

Simpozij »Nikola Tesla«

ZAGREB — SMILJAN/GOSPIĆ
7— 10. jula 1976.

I KNJIGA



JUGOSLAVENSKA AKADEMIJA ZNANOSTI I UMJETNOSTI



JUGOSLAVENSKA AKADEMIJA ZNANOSTI I UMJETNOSTI

SIMPOZIJ »NIKOLA TESLA«

u okviru programa proslave
120. obljetnice rođenja Nikole Tesle

Zagreb - Smiljan/Gospić, 7-10. jula 1976.

ZAGREB, 1978.

REDAKCIJSKI ODBOR ZBORNIKA RADOVA

dr Tomo Bosanac Branko Jemrić, dipl.ing.
dr Božidar Frančić dr Sead Krajinić
dr Mirjan Gruden dr Vladimir Matković
dr Zijad Haznadar dr Petar Miljanić
 dr Vladimir Muljević
 dr Gojko Muždeka
 dr Ranko Wolf

Urednik:

dr Tomo Bosanac

Tisak: Sveučilišna naklada Liber

ODBOR SIMPOZIJA "NIKOLA TESLA"

Predsjednik

dr TOMO BOSANAC, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu; izvanredni član Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti

Članovi:

dr BOŽIDAR FRANČIĆ, direktor Elektrotehničkog instituta "Rade Končar", Zagreb

dr MIRJAN GRUDEN, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerze u Ljubljani

BRANISLAV JANKOVIĆ, dipl.ing, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Sarajevu; savjetnik u Istraživačko-razvojnom centru za energetiku "Energoinvest". Sarajevo

BRANKO JEMRIĆ, dipl. ing, rukovodilac Tehničke službe Tvornice električnih zarulja "TEŽ"; izvanredni profesor Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

dr STANIMIR JOVANOVSKE, redovni profesor Elektrotehničkog i mašinskog fakulteta Univerziteta u Skopju

dr VLADIMIR KNAPP, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

VOJNO KUNDIĆ, dipl. ing, glavni direktor Instituta "Rudjer Bošković", Zagreb

dr VLADIMIR MATKOVIĆ, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu; izvanredni član Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti

dr PETAR MILJANIĆ, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu; dopisni član Srpske akademije nauka i umetnosti, Beograd

dr GOJKO MUŽDEKA, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

dr VOJIN POPOVIĆ, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

dr IVO ŠIMONOVIĆ, predstojnik Zavoda za radiologiju Kliničkog bolničkog centra, Zagreb; redovni profesor Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Referati su objavljeni u rukopisu i predstavljaju
stavove autora

SADRŽAJ

Stranica

SVEČANO OTVORENJE

T. Bosanac: Nikola Tesla - pronalazač	11
H. Meinke: Electromagnetic Waves	23
R. Basarić: Od vodenice do hidroelektrane "Djerdap"	34
A. Marinčić: Dnevnik istraživanja Nikole Tesle u Kolorado Springsu 1899-1900	47
O. Benda: The Laser - A New Tool for Diagnostics of Media with Randomly Varying Parameters	61

I. poglavlje TESLINI PRONALASCI

A. Čebulj: Nikola Tesla in ustvarjanje polifaznih sistemov	65
E. Hercegovac, S. Sablić: Asinhrono pokretanje velikih sinhronih generatora	89
B. Jurković, Z. Sirotić, R. Wolf: Nasljedstvo Nikole Tesle u oblasti električnih strojeva	105
M. Kremlj: Prva hidroelektrana u Srbiji	117
Z. Sirotić, V. Krajzl, S. Novosel, M. Bučić: Proizvodnja sinhro- nih generatora u Jugoslaviji	125
P.L. Alger: Induction Motor Developments in the U.S. from Tesla to the Present Day	135
P. Hammond: The Development of Turbogenerators from the Time of Nikola Tesla to the Present Day	151
L.T. Rosenberg: Unusual Problems in Large Turbogenerators	161

II. poglavlje SJEĆANJE NA TESLU

Dj. Kurepa: Nikola Tesla i matematika	173
J. Milivojević: Nikola Tesla i njegov doprinos na polju električnih izvora svjetlosti	181
V. Muljević: Faust Vrančić i njegovi pogonski strojevi	191
D. Trifunović: Jedno uopštenje zakona o centralnim silama - o od- nosu Nikole Tesle i Djordja Stanojevića	203
F. Avčin: Sprejetje enote "tesla (T)" v mednarodni merski sistem (SI) za veličino indukcija (B)	213
J.D. Tebo: Nikola Tesla - Electrical Genius, the Greatest Forgotten Electrical Engineer	231

III. poglavlje ELEKTRIČNI STROJEVI

D. Ban, A. Reicher: Dostignuća i perspektive razvoja asinhronih motora visokog napona	241
--	-----

B. Brkić, I. Kurtović, S. Šaban: Prilike hladjenja, neraz- dvojni dio istraživanja	259
S. Car: Pulzacije poteznog momenta	269
B. Frančić: Suvremeni električni stroj - predmet znanstvenih istraživanja	283
V. Jarić: Mehanika velikih električnih postrojenja	301
S. Novosel: Suvremena tehnologija u gradnji velikih električ- nih strojeva	319
D. Paljan: Buka električnih strojeva	329
M. Rašeta, B. Marušić, I. Feri: Osnovni parametri za utvrđiva- nje i ocjenu stanja izolacije namota velikih elek- tričnih strojeva	339
Z. Smolčić: Suvremeni istosmjerni strojevi velikih snaga ...	347
N. Srb: Svojstva rotora s neizoliranim kratkospojenim kavezom	359
J. Šaban: Rotacijski osovinski transformatori i indukcionu uz- budnici u sastavu beskontaktnu uzbude sinhronih strojeva	369
A. Ašner: Supravodljivi magneti za visokoenergetsku fiziku elementarnih čestica	387
T. Bratoljić: Supravodljivi električki strojevi	421
H. Jordan: Stationäre und transiente Vorgänge in elektrischen Maschinen	445
J. Šaban: Homopolarni ili heteropolarni stroj - mogućnosti za posebna rješenja	461
IV. poglavlje ENERGETSKA ELEKTRONIKA	477
Z. Benčić, I. Flegar, A. Lisac, S. Mikac: Poluvodički pretvarači - - priširenje mogućnosti upravljanja istosmjernih električnih motora	479
Z. Benčić, I. Flegar, A. Lisac, S. Mikac: Poluvodički pretvarači - proširenje mogućnosti upravljanja izmjeničnih električnih motora	491
S. Čunko: Osobitosti u istosmjernom stroju napajanom iz polu- vodičkih pretvarača	505
M. Ćišić: Prednost AC elektromotornih pogona na brodovima .	517
F. Gal: Model asinhronog motora upravljano promjenljivom primarnom frekvencijom	529
P. Miljanić, Dj. D. Kalić: Podsinhrona tiristorska kaskada: is- kustva u primeni kratkospajajućih invertora ...	545
D. Smiljanić, I. Šaban: Frekvencijsko upravljanje asinhronog motora za potrebe reguliranja nuklearnog reak- tora	557
V. Teodorović: Na pragu najšire primene Teslinog obrtnog po- lja i kod motora s upravljano brzinom	571

	Stranica
K. Woschnagg: The Development of HVDC-Technology from Mercury-Arc Valves to Thyristor Valves	579
W. Leonhard: The Impact of Electronics on the Evolution of Today`s Electrical Drives	591
R.W. Bass, R.K. Golka: Nikola Tesla`s Theory of Ball Lightning (Colorado Springs, 1899)	603
A . poglavlje TEORIJA MASINA	615
Z. Čulić: Suvremena analiza dinamičkih stanja velikih generatora	617
Z. Haznadar, K. Hot, J. Matjan, M. Djurek: Numeričke metode proračuna polja u električnim strojevima	631
M. Jadrić: Moderna istraživanja vladanja asinhronog motora.	643
I. Mandić: Električni stroj kao kontinualna fizikalna sredina..	655
M. Mehmedović: Modeliranje vladanja sinhronih generatora s reguliranom uzbudom u višemašinskom elektro-energetskom sistemu	663
B. Rajković: Osobitosti elektromotornog pogona s naponom upravljanim asinhronim motorom	679
I. Šaban: Sastavljanje priključnog plana pomoću elektroničkog računala	691
M. Santak: Odredjivanje momentne karakteristike jednofaznog asinhronog motora pomoću viših harmoničkih komponenti polja	709
S. Štefanko: Prilike u zoni zračnog rasporeda i njihov utjecaj na bilancu snaga u asinhronom stroju	717
B. Zelenko: Proračun magnetskog polja u jarmu rotacionog stroja	727

SVEČANO OTVORENJE

Dr TOMO BOSANAC, redovni profesor
Elektrotehnički fakultet, Zagreb

NIKOLA TESLA - PRONALAZAČ

Proživljavamo izvanredan razvoj elektrotehnike i energetike. Energetski strojevi su dosegli zapanjujuće dimenzije. Parni kotlovi, parne turbine, vodene turbine, generatori, transformatori, električni vodovi, svi ti osnovni elementi proizvodnje i prijenosa električne energije doživjeli su ogromne dimenzije i snage, a još kao da se ne vidi kraj. Postignute su snage od milion kilovata, naponi od milion volti, tlakovi u kotlovima od 300 atmosfera. Iskorištava se energija atoma, grade se ogromne nuklearne elektrane.

Kako izgleda drugi dio elektrotehnike: telekomunikacije i prijenos obavijesti? U cijelom svijetu je jedan telefon na 12 stanovnika, jedan radio na pet stanovnika, a jedan televizor na 14 stanovnika. Svjetski telekomunikacioni sistem je uspostavljen uz pomoć satelita. Olimpijade su pokazale da cijeli svijet može istovremeno promatrati televizijski prijenos igara, a to je auditorij od najmanje jedne milijarde ljudi. Izvršen je televizijski prijenos s Mjeseca, a zatim s kozmičkog broda upućenog na Mars i Veneru. Elektronička računala vrše računske operacije koje bi mnoštvo ljudi trebalo raditi godinama, a pitanje je da li bi ih uopće izračunalo. Moćni radari vide na tisuću kilometara približavanje letjelice. Gigantski akceleratori služe istraživačima u proučavanju materije i proizvode zračenja kakva nam dolaze iz kozmosa.

Kako je bilo kad je Nikola Tesla pošao na Visoku tehničku školu u Gracu godine 1875., dakle prije 100 godina? Kakav je i koliki je njegov doprinos ovom silnom napretku nauke i tehnike? Tada nije bilo studija elektrotehnike, kao ni studija strojarstva. Tehnika je bila arhitektura i građevinarstvo. Ni fizika nije bila razvijena, možda nešto više kemija, a ipak je Tesla zaželio u gimnaziji u Rakovcu da studira elektrotehniku. Što je bila tada elektrotehnika? Postojao je niz različitih galvanskih članaka, postojao je Morzeov telegraf i Morzeova abeceda. Telegraf

je djelovao revolucionarno. Za nekoliko godina je osvojio Evropu i Ameriku. Već je bio položen prvi telegrafski kabel preko Atlantika. Pokrenuli su se strojevi istosmjerne struje koji su poslužili u rasvjeti lučnicama, a isto tako su služili za pogon alatnih strojeva. Još nije bilo telefona. Upravo je ove godine sto godina kako je Bell pokazao svoj prvi telefon. Parni stroj je radio već sto godina, a iskorišten je u pogonu brodova i lokomotiva. Gradnja brodova i željeznica dobiva velik zamah pronalaskom Bessemerova postupka u dobivanju čelika, a počele su se graditi prve valjaonice. To je bilo 1860. Velika se industrija ne može razvijati, jer nema prikladnih motora za pogon različitih strojeva i uređaja, nema prikladnog prijenosa energije od izvora do mjesta potrošnje. Iako su već poznate vodene turbine, nema pravog električnog generatora koji bi dao struju koja bi se mogla prenijeti na bilo koje željeno mjesto. Američka industrija se nakon građanskog rata razvija u velikom zamahu, a grade je emigranti iz Evrope. Nacionalizam bjesni Evropom i narod bježi u Ameriku, zemlju "snova", gdje ih dočekuje neviđena eksploatacija. To je i Tesla iskusio na sebi.

Tesla započinje svoj stvaralački put u Budimpešti, siječnja 1881. kada je počeo s radom pri Ugarskoj upravi pošta, koja je instalirala telefonsku centralu. Tesla je još za studija u Gracu uočio nedostatak komutatora strojeva istosmjerne struje. Tada se zarekao da će riješiti taj problem, da će pronaći motor bez komutatora. Ideju za rješenje je našao u Budimpešti. Odmah mu je bilo jasno da mora proizvesti rotaciono magnetsko polje, koje će biti sposobno da održava rotor motora u rotaciji. Tamo mu nitko ne želi pomoći niti malim sredstvima da dođe do materijala i da napravi motor. Možda ćemo to teško razumjeti, jer to nije zahtijevalo velika sredstva. Međutim, moramo znati da je to bilo vrijeme, kada su nadnice bile tek tolike da se jedva moglo preživjeti. Tesla nema niti toliko novaca da otputuje u Pariz, već ga mora posuditi. 1882. putuje u Pariz, radi u Edisonovoj kompaniji za Evropu na uspostavljanju i održavanju tadašnjih centrala koje najviše služe za uličnu rasvjetu evropskih gradova. Ističe se na poslu u izvršavanju izvanrednih zadataka, te skuplja nešto sredstava da može kupiti nekoliko kilograma bakrene žice i isto toliko željeznog lima, da bi u

Strasbourg izradio svoj prvi motor i omogućio njegovo okretanje. To je bilo krajnje primitivno, ali se motor okretao, i to motor bez komutatora. Pokazao je svoj motor, ali ga nitko nije razumio, nitko nije shvatio važnost tog momenta. Odlazi u Ameriku 1884., no mora raditi na brodu da bi se mogao prevesti preko Atlantika, jer nema novaca za kartu. U Americi radi u Edisonovoj kompaniji u New Yorku da bi skupio nešto novaca kako bi mogao nastaviti rad na svom motoru, jer mu Edison ne dozvoljava da u njegovu poduzeću radi na svojim zamislima. Nije dobio dogovorenu nagradu i napušta Edisona i osniva svoju kompaniju u zajednici s nekim radnicima Edisona. Kompanija propada 1886., te opet nema sredstava. Konačno uspostavlja vezu s kompanijom Western Union koja je konkurencija Edisonu. Dobiva kredit od pola miliona dolara da može realizirati svoje zamisli. To je bilo u početku 1887. godine, a već u jesen iste godine Tesla prijavljuje svoje prve patente motora, generatora, prijenosa i razdiobe električne energije primjenom izmjeničnih struja. Za nekoliko mjeseci prijavio je četrdeset patenata koji su potpuno pokrili polifazni sistem i bili osnova elektrifikacije.

Tesla drži predavanje pred Američkim institutom elektroinženjera 16. svibnja 1888., o "Novom sistemu motora i transformatora", u kome detaljno obrazlaže rotaciono magnetsko polje i njegovo djelovanje. On kaže u uvodu predavanja:

"... Predmet, koji vam imam čast prikazati, novi je sistem razdiobe i prijenosa energije pomoću izmjeničnih struja, što nam pruža osobite prednosti, naročito u primjeni motora koji će, vjerujem, odjednom postići vrhunsku prilagodljivost tih struja prijenosu energije i pokazati da se mnogi rezultati, dosad nedostižni, mogu doseći njihovom upotrebom; rezultati koji su vrlo poželjni u praktičnom radu takvih sistema, a koji se ne mogu ispuniti pomoću istosmjernih struja."

Teslino predavanje i demonstracija novog motora djelovali su revolucionarno. Najednom su se otvorile neslućene mogućnosti iskorištenja električne energije. Nedostatak sistema prijenosa i razdiobe električne energije i adekvatnog elektromotora prijetio je da zakoči daljnji razvoj industrije koja se počela naglo

razvijati u drugoj polovici prošlog stoljeća. Morseov telegraf i Teslin motor odigrali su u prošlom stoljeću najznačajniju ulogu. George Westinghouse, veliki pobornik izmjeničnih struja, a po tome protivnik Edisonov, odmah je uočio značenje Teslinih izuma, te ih je sve otkupio. Tesla je time došao do značajnih financijskih sredstava. Konačno je mogao započeti pravi istraživački rad. Rasplamsala se borba između zastupnika istosmjernne struje na čelu s Edisonom i pobornika izmjenične struje.

Iskorištenjem slapova Niagare trebalo je pokazati koji je pravi sistem. Poslije vrlo duge borbe pala je odluka da se Niagara iskoristi primjenom Teslina sistema, te je i sistem prozvan "Niagara-Tesla" sistem. Prvi generator Niagare pušten je u pogon 15. travnja 1895. To je bila definitivna pobjeda Teslina sistema polifaznih struja.

Tesla je, radeći na polifaznom sistemu, uvidio značaj frekvencije u prijenosu energije. Prijenos je lakši i jednostavniji, ako je frekvencija viša, a motori su jednostavniji za nižu frekvenciju. On predlaže upotrebu 60 herca za Ameriku kao standardnu frekvenciju. Nastavlja s istraživačkim radom s povišenim frekvencijama, te razvija generatore povišene frekvencije. Prvi patent prijavljuje 15. studenog 1890. Novi generatori su sposobni da daju izmjenične struje od 15 kiloherca i viših frekvencija. U to doba nije bilo riješeno pitanje rasvjete i izvora svjetla, jer je Edisonova žarulja s ugljenom niti bila nepouzdana i nekvalitetna, a bila je uz lučnice jedini izvor svjetla. Tesla direktno iskorištava sreenjefrekventne generatore u pogonu lučnica i to patentira 1. listopada 1890. Ustanovljuje da te lučnice, radeći s frekvencijom od 15 kiloherca i više, postaju nečujne, rade mirnije i stabilnije, jednako troše elektrode. Tesla drži svoje drugo predavanje pred Američkim institutom elektroinženjera 20. svibnja 1891. o strujama visokih frekvencija i njihovoj primjeni u rasvjeti. Odmah, u početku predavanja, kaže:

"... ali elektricitet i magnetizam sa svojim singularnim odnosom, sa svojim prividno dualnim karakterom, jedinstvenim među silama u prirodi, sa svojim pojavama privlačenja, odbijanja i rotacije, čudesnim manifestacijama misterioznih učinaka uzbu-

đuju um i podstiču ga na razmišljanje i istraživanje ... "

Time on postavlja svoj put istraživanja, a prvo iskušavanje treba biti u iznalaženju novih izvora svjetlosti. On sam kaže u istom predavanju:

"... Što više napredujemo u studiju električnih i magnetskih pojava, to smo više svjesni da će postojeće metode biti kratkog vijeka. Za proizvodnju svjetla, konačno, tako teški strojevi bi se činili nepotrebnim... ... Vrtimo se kroz beskrajni prostor s neshvatljivom brzinom, sve je oko nas u vrtlogu. Sve je u kretanju, svuda je energija. Mora postojati neki put da iskoristimo tu energiju direktno..."

Hertz je svojim pokusima potvrdio Maxwellovu teoriju svjetla. Crookes je ispitivao pražnjenje u razrijeđenim plinovima. Tesla je pošao drugim putem. Uviđajući značaj visokih frekvencija, polazi na iskorištenje rezonancije. Ruhmkorffov induktor je dotada iskorištavan u dobivanju visokih frekvencija, a tek ga Tesla ispravno iskorištava, jer mu dodaje transformator i to ga kvalitativno mijenja. On ide dalje, te ga iskorištava kao pravi transformator, a dodaje posebno iskrište, koje znatno usavršava da bi se u njemu trošilo što manje energije. Zato dobiva snažne izvore struja vrlo visokih frekvencija od nekoliko miliona perioda u sekundi, a kroz to i dotad neviđene učinke. Tesla je prvi koji iskorištava prijenosni vod kao oscilatorni sistem. To je viđljivo iz njegova patenta za električnu konverziju i razdijelu i pripadne aparate, koga je prijavio 4. veljače 1891. U njemu se vide svi elementi oscilatornog sistema: kondenzatorska baterija, vodovi kao dio oscilatornog sistema i iskrište koje je usavršene izvedbe. Da bi dobio dovoljno visoke napone, dodaje još i visokofrekventni transformator, a na njegovu sekundaru dobiva napone od stotina tisuća volta. To je dotada bilo moguće samo s elektrostatskim strojevima, ali sa slabim učincima zbog male izdašnosti. On priključuje žarulje jednom žicom, a one tek tada pokazuju značajne efekte. Tesla je zapljusnut mnoštvom pojava. Nije čudo da se pita što je elektricitet i na putu je da uđe u najveće dubine toga problema. U spomenutom predavanju on ustanovljuje značajno objašnjenje kad kaže:

"... Vraćajući se na predmet, a imajući na pameti da je postojao-

nje dvaaju elektriciteta, kazavši konačno, krajnje nevjerojatno, moramo se sjetiti da nemamo evidencije o elektricitetu, niti se možemo nadati da ćemo do nje moći doći dok god je materijal prisutan. Elektricitet se, prema tome, ne može zvati eter u užem smislu riječi; ali izgleda da ništa ne stoji na putu da se zove eter vezan za materiju, ili vezani eter; ili, drugim riječima, da je takozvani statički naboj molekula eter vezan na neki način s molekulom. Gledajući to u takvom svjetlu, prisiljavalo bi nas da kažemo da je elektricitet prisutan u svim molekularnim akcijama."

Koliko je to duboko i dalekosežno dokazano, ne možemo se čuditi da je tadašnji znanstveni svijet bio nadasve impresioniran Teslinim pokusima. On u istom predavanju kaže, opisujući pokuse s izvorima svjetla:

"... svjetlosna struja je posljedica kontakta zračnih molekula s točkastom elektrodom; one su privučene pa odbijene, nabijene pa izbijene, a njihovi su atomski naboji na taj način poremećeni, vibriraju i emitiraju svjetlosne valove."

Ili malo dalje Tesla kaže:

"... Od velikog je značaja razmišljanje da možemo i nekim drugim sredstvom, a ne kemijskim, proizvesti pravi plamen koji će davati svjetlo i toplinu, a da se bilo kakav materijal ne troši, bez ikakvog prisutnog kemijskog procesa. Da to izvedemo, potrebne su nam samo perfektne metode da proizvedemo enormne frekvencije i potencijale... Ne sumnjam, kad bi se električni napon mijenjao dovoljnom brzinom i snagom, da bi električni čuperač na kraju žice izgubio svoj električni karakter i postao sličan plamenu. Uzrok plamena mora da su elektrostatska molekularna djelovanja."

Na ovo Teslino mišljenje reagirao je Joseph Thomson, pronalazač elektrona 1897., te mu prigovorio na "elektrostatsko molekularno djelovanje" koje se mora tumačiti elektromagnetski. Tesla mu je odmah odgovorio u časopisu "The Electrical Engineer", N.Y. 26.08.1891. da ne treba tako doslovce tumačiti pojam "elektrostatski", jer je on time htio samo ukazati da su svjetlosni učinci posljedica poremećenog električnog naboja. Tesla je ponovio svoje pokuse i iznio svoje mišljenje u čuvenim pre-

davanjima, održanim u veljači 1892. u Londonu pred Ustanovom elektroinženjera i pred Kraljevskim društvom, te u Parizu pred Društvom elektroinženjera. Fleming, koji je bio savjetnik Marconijeve kompanije, u svojoj knjizi o osnovama telegrafije i telefonije električnim valovima, koja je izašla u trećem izdanju 1916., kazao je za Teslino predavanje u Londonu:

"... 1892. Nikola Tesla je osvojio pažnju cijelog znanstvenog svijeta svojim fascinantnim pokusima s električnim strujama visoke frekvencije. Stimulirao je znanstvenu imaginaciju drugih kao što je izložio svoju, te je stvorio široko rasprostranjeni interes za svoje briljantne demonstracije."

Crookes je započeo pokusima s izbojem u razrijeđenom plinu i ustanovio neke čudne svjetlosne učinke. Tesla je uspio znatno pojačati iste učinke primjenjujući svoje visokofrekventne izvore. Tada je mnoštvo fizičara započelo s istim pokusima, a među njima su bili Hertz, Lenard, J.J.Thomson, Fitzgerald, Stoney. Uspio je J.J.Thomson, koji je otkrio elektron 1897. Historičari fizike nigdje ne spominju značajan doprinos Tesle u pronalasku elektrona.

Tesla ide dalje u istraživanju visokih frekvencija i visokih napona. Drži svoje, također, čuveno predavanje u Franklinovom institutu u Philadelphiji veljače 1893. "O svjetlu i drugim pojavama visokih frekvencija." Ovdje naročito ističe ulogu rezonancije i prilagođenja. On kaže:

"... vrlo je vjerojatno da rezonantna vibracija igra najvažniju ulogu u svim manifestacijama energije u prirodi. Kroz prostor sva materija vibrira, a svi iznosi vibracije su predstavljeni, od najnižih muzičkih nota do najviše visine kemijskih zraka. Zato atom ili kompleks atoma, nije važno koja im je perioda, moraju naći vibraciju s kojom su u rezonanciji. Ako zamislimo enormnu brzinu svjetlosnih vibracija, svjesni smo nemoći da proizvedemo takve vibracije direktno s bilo kakvim aparatom mjerivih dimenzija, te smo ponukani da upotrijebimo jedino moguće sredstvo da dostignemo predmet uspostavivši svjetlosne valove električnim sredstvima ili djelujući na molekule i atome plina, natjeravši ih da se sudaraju i vibriraju."

Titrajni krug bio je davno poznat. William Thomson je još 1853. godine dao analizu titrajnog kruga sastavljenog od kapaciteta i induktiviteta, ali nije znao što bi s njime učinio. Tesla prvi uviđa puni značaj titrajnog kruga i smatra da je on osnova svim manifestacijama u prirodi, a na njemu treba temeljiti svu buduću elektrotehniku. Već 1893. jasno mu je da će se prijenos bez žica riješiti iskorištavajući titrajne sisteme. Već tada govori o mogućnosti prijenosa energije kroz zemlju. Smatra da su visinski slojevi atmosfere električki nabijeni, te se ponašaju kao vodič. Zemlja je drugi vodič i čini s gornjim nabijenim slojevima atmosfere veliki električni kondenzator koji se može iskoristiti za utitravanje naboja, a tada i za prijenos energije po cijelom globusu, praktički bez gubitaka. Vjerojatno je frekvencija titranja toga zemaljskog sistema vrlo niska, jer se radi o velikom kapacitetu. Kratko vrijeme iza Teslina predavanja fizičar Fitzgerald objavljuje u časopisu "Nature" iz 1893. da je izračunao vlastitu frekvenciju Zemlje, ali ne spominje Teslu koji je najavio tu mogućnost. Tesla je prilikom ispitivanja u Coloradu predvidio vlastitu frekvenciju titranja Zemlje sa 6 titraja u sekundi, a pokušao je to ustanoviti i pokusom. Tek u najnovije vrijeme Američka mornarica je pokrenula ispitivanje rasprostiranja signala kroz Zemlju zbog komuniciranja s atomskim podmornicama, te je mjerenjima ustanovljeno da je vlastita frekvencija titranja 8 perioda u sekundi, što se jako dobro slaže s Teslinim predviđanjima.

Tesla je želio dobiti nove izvore svjetla koji neće iskorištavati žarenje niti električnom strujom. Zato je upotrijebio visokofrekventne izvore struje i postigao izvanredne učinke koji su se mogli iskoristiti kao novi izvori svjetla. Na taj način je dao osnovu današnje fluorescentne rasvjete koja još niti danas nije postigla ono savršenstvo koje je Tesla predviđao. Upravo je publicirano, da je u Americi uspjelo proizvesti kruškoliku fluorescentnu svjetiljku po idejama Nikole Tesle, koja će zamijeniti današnju žarulju s metalnom, žarnom niti, ali će trošiti samo petinu energije za istu količinu svjetla. Teslina rasvjeta se u njegovo vrijeme nije mogla raširiti, jer su bili potrebni visokofrekventni izvori struje, posebno instalirani samo za rasvjetu. Tek je moderna mikroelektronika omogućila izgradnju

viskokofrekventnih izvora struje koji se mogu ugraditi u samu svjetiljku. Još nije ostvarena Teslina svjetiljka koja radi s užarenim plinom, a koja je savršenija nego fluorescentna svjetiljka.

Tesla je, radeći s visokom frekvencijom i visokim naponima na izbojima, u evakuiranim cijevima morao naići na X zračenje. On to potvrđuje kad je Röntgen već objavio pronalazak X zračenja. Tesla drži predavanje pred Njujorkškom akademijom znanosti 6. travnja 1897., a Röntgen je objavio svoj pronalazak 8. studenog 1895. Röntgen napominje da mu je pronalazak omogućila primjena Teslinih aparata i Teslinih ideja. Tesla je, radeći 1894. s evakuiranim cijevima, primijetio da mu je stradao filmski materijal, te je posumnjao u posebno zračenje. No tada mu je izgorio laboratorij i tom prilikom stradao je sav dokumentacioni materijal. Imao je namjeru nastaviti s istraživanjem tajanstvenog zračenja, ali je bilo kasno. Upravo kada je osposobio laboratorij, Röntgen je objavio svoj pronalazak. Tesla je tada izvršio niz istraživanja X zraka, te dao potpunu tehniku i mjere zaštite u radu s X zračenjem. Po tome je on začetnik rentgenske tehnike, ali se Tesla nigdje ne spominje u vezi s razvojem te tehnike.

Tesla je sebi postavio cilj da ostvari prijenos obavijesti i energije bez žica takvih dosega da bude pokrivena cijela Zemlja. Jedno vrijeme ne prijavljuje nikakve patente, jer intenzivno radi na ostvarenju toga zadatka. Razvio je mnoštvo iskrišta za velike struje, visoke frekvencije, iskrišta spojena u slijedu da bi postigao što brže prekide struja, rotaciona iskrišta kojima se može mijenjati frekvencija i tako postići prilagođenje. Prvi je uspio dobiti viskokofrekventne izvore koji su trajno davali energiju, što je bilo neophodno za rad radiostanica. Proizveo je prekidače struje s kliznim i živinim kontaktima, izvedene za velike struje i veliki broj prekida u sekundi.

Radio je istovremeno na predajnicima i prijemnicima. Tesla prijavljuje 2. rujna 1897. patent "Sistem prijenosa električne energije" koji je objavljen tek 20. ožujka 1900., a u kome su vidljivi bitni elementi predajnog uređaja: izlazni transformator antena koje imaju na vrhu vodljivu kuglu, da bi povećao efika-

snost antene, uzemljenje. On predviđa da bi taj uređaj služio za prijenos energije. U prijenosu energije vodljivu kuglu antene treba podići do visine najmanje 10 kilometara gdje je atmosfera razrijeđena i lakše se održava izboj, te je mali pad napona, a prijenos je moguć na tisuće kilometara, s malim gubicima. Razvio je cijeli niz prijemnika, upotrebljava koherer kojeg je sam izumio, a koji je trajno aktivan i ne treba posebnu dekoheraciju. Tako je uspio riješiti male prijemnike koji se mogu nositi gotovo u džepu. Budući da je radio s visokim naponima i visokim frekvencijama, morao je riješiti mnoštvo neophodnih, usputnih problema, a njihova rješenja su poslužila daljnjem razvoju elektrotehnike. To je bila izolacija krutim i tekućim izolatorima koji mogu izdržati visoke frekvencije; posebna konstrukcija kabela i vodiča za visoke frekvencije i visoke napone; namoti transformatora malog, vlastitog kapaciteta, a opet za visoke napone; brzi prekidači koji su otporni na električni luk i koji vrlo brzo gase luk primjenom gašenja luka strujanjem, tlakom, magnetski. Primijenio je i patentirao hlađenje tekućim zrakom, te je tako osnivač kriogene tehnike, koja je upotrijebljena tek mnogo kasnije, kada se već zaboravilo da je to Tesla patentirao. Svi ti pripremni radovi trebali su poslužiti prvom velikom pokusu radiostanice u Coloradu, a zatim na Long Islandu. Ispitivanja u Coloradu su opisana u njegovu dnevniku, koji se upravo objavljuje, a iz koga se vidi sav ogroman rad koji je Tesla uložio da bi ostvario prijenos energije i obavijesti bez žica. Drugi pokus je trebao pokazati u još većem opsegu kako je Tesla želio postići svoj cilj. Predajna stanica je trebala biti na Long Islandu nedaleko New Yorka, a prijemna stanica u Engleskoj, s druge strane Atlantika. Gradnja je počela 1901.godine, a pripadni patent je prijavio 18.siječnja 1902. Isti patent objavljen je mnogo kasnije, tek 1.prosinca 1914. Njegova stanica "Svjetske telegrafije" nije nikad završena, jer Tesla nije dobio potrebna sredstva. Potom Tesla nije više ništa dao u elektrotehnici, jer nije imao više što dati. On je dao sve, jer je riješio prijenos energije i obavijesti bez žica u svim varijantama. Njemu je bio potreban veliki pokus na Long Islandu da bi mogao ići dalje. To potvrđuje i njegov dnevnik iz Colorada, iz kojega se vidi kako je Te-

sla radio. Iza toga je istraživao turbine te dao turbinu bez lopatica, pneumatske diode neophodne u automatskom upravljanju postrojenja, koje su došle do izražaja tek u novije vrijeme i prozване su njegovim imenom.

Ovo, dosada spomenuto, je tek jedan dio pronalazačkih rezultata Nikole Tesle. Nije spomenut niz poznatih patenata, pa onih neprijavljenih, ni neusvojenih patenata, niz opisanih rješenja i ideja.

Knogo toga je upotrijebljeno, a nije uopće spomenuto da je to Teslino djelo. Radiotelegrafija se počela izgrađivati u svijetu iza 1910., a radiotelefonija tek od 1923.godine. Upotrijebljeni su elementi koje je razvio Tesla, a drugi su patentirali kao svoj pronalazak. To su bili visokofrekventni generatori, iskrišta, prekidači, spregnuti krugovi, modulacija, kabeli, transformatori. Pored toga ima Teslinih rješenja koja još čekaju da budu iskušana uz pomoć moderne tehnike.

Tesla je svojim pronalascima udario temelje moderne elektrotehnike. Dapače, svojim radovima značajno je pomogao da je fizika napravila veliki korak daljnjem upoznavanju prirode materije. On je jedan od rijetkih velikana, radovi kojega još nisu objelodanjeni, a to je možda i razlog zašto još uvijek nije sasvim jasna njegova uloga u nekim oblastima znanosti. Tesla je pisao u časopisu "The Sun" 20.prosinca 1914., dakle kad je već započeo svjetski rat, gdje je dao najbolji prikaz svoga rada, pa neka ovaj prikaz bude zaključen citatom:

"... Dokle god bude različitih nacionalnosti, bit će i patriotizma. Taj osjećaj mora biti iskorijenjen iz naših srdaca da bi se mogao uspostaviti trajni mir. Njegovo mjesto se mora ispuniti ljubavlju prema prirodi i znanstvenom idealu. Znanost i otkriće su velike snage koje će dovesti do njegova okončanja. Upravo sam objelodanio izum koji će pokazati električarima kako da proizvedu velike električne napone i učinke. S pomoću njih se mogu postići čudesni rezultati. Ljudski glas i slično bit će otposlani oko globusa bez žica, energija usmjerena kroz prostor, pustoši oceana učinit će se sigurnima u navigaciji, transport olakšan, kiša izazvana po volji, a možda i oslobođena neiscrpna zaliha atomske energije.

Napreci te vrste će, u vremenu koje dolazi, ukloniti fizičke uzroke rata. Postepeno smanjenje udaljenosti stavit će ljudska bića u tješnji kontakt i harmonizirati njihove poglede i aspiracije. Ujarmljene sile prirode istjerat će bijedu i želju, a osigurati obilna sredstva za siguran i udoban opstanak ... "

Prof.Dr. H.H. Meinke
Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik
der Technischen Universität München

ELECTROMAGNETIC WAVES

Ladies and gentlemen, I am very pleased to be able to speak to you about electromagnetic waves and their relation to Nikola Tesla. When we go back a hundred years to the time of young Tesla, electromagnetic waves had just theoretically been predicted by Maxwell, but no experimental evidence was available. In 1873 Maxwell published his "Treatise on Electricity and Magnetism" and by his famous equations found that light could be an electromagnetic wave. It came as a scientific surprise when it was found, in this theory, that there was no frequency limit for the existence of these waves. This meant that electromagnetic waves could exist at all frequencies, especially at far lower frequencies as well, and, of course, be invisible. This fact was the starting point for the experiments of Heinrich Hertz the results of which he published in 1888. A recent reconstruction of his equipment has shown that he used frequencies around 500 MHz. Hertz thought that these waves could not be used for wireless communication because they behaved like light and propagated along straight lines. Only a few years later Tesla presented a wireless communication system at far lower frequencies which generally made long distance communication possible. Tesla's system already had all the basic elements of systems which were later in practical use all over the world for decades. These, the first steps were the beginning of one of the most sophisticated techniques man has ever developed.

Today, a hundred years later, man-made electromagnetic waves not only circle the Earth, but also penetrate deep into space. Colour television images have been transmitted from the Moon to the Earth. Wireless data transmission has enabled space vehicles to land on Mars and Venus and provided

information on physical features in the field near the Sun and Jupiter . This technique has developed so fast that we have not yet, probably, found that broad understanding which would be necessary to make optimum use of all these new possibilities . Engineering is a human creation and scientists and engineers play an important role in shaping our world . Therefore, it is worthwhile to look at historical development and remember the men whose work has brought us new knowledge . We should recall the numerous highly intelligent scientific and engineering steps which had to be made in the short time of a hundred years in order to arrive at our present potential .

The four main problems of wireless communication were:

1. to generate high frequency currents of sufficiently high power in the transmitter station;
2. to radiate this power into space by an antenna;
3. to receive high frequency power out of space by a receiving antenna;
4. to have a sensitive detector for weak electromagnetic signals in the receiver station .

This sensitivity of the detector proved to be the most important point and I shall explain that later . Tesla`s general experience with alternating current generators made him, of course, an early pioneer in generating high frequency currents and consequently brought him to the radiation of high frequency power into space . One limitation faced him, however; the technology of those early times only permitted the generation of low frequencies, far lower than the frequencies used by Hertz some years before . But this was his good luck, because we know now that only these low frequencies were capable of ensuring long distance communication . This was good luck for all the pioneers of the time, because there was no knowledge about the propagation of electromagnetic waves in the atmosphere . At the beginning they did not even recognize that the waves of Tesla and the waves of Heinrich Hertz were of the same nature . Tesla first thought there was no wave in his system, but a disturbance of a field . Later, much later, we recognized that all these fields were special solutions of Maxwell`s equations and time dependent electro-

magnetic fields with an interaction between electric fields and magnetic fields.

Fig. 1 shows an old picture from Tesla's early days explaining a wireless communication system. On the left you see a generator, G , and a

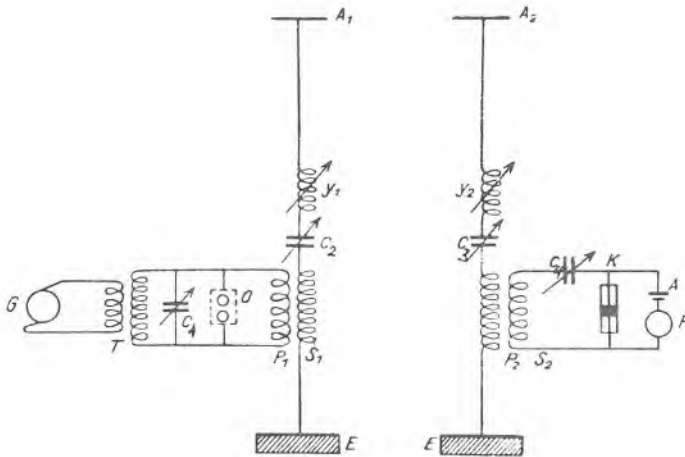


Fig. 1

transformer, T . This is the power supply of the transmitter station. There is a resonant circuit with a condenser, C_1 , and a primary coil, P_1 ; they form a resonant circuit which is pushed by the oscillator, O . That was a spark oscillator at the time and the interrupted signals of the spark oscillator brought about oscillations of the resonant circuit. Next is the antenna, A_1 . Here is the main point - the most interesting point for this Symposium: The antenna, which is a vertical wire with something on top as capacity, is an extremely high impedance at these frequencies, because the capacity of the antenna is very small and a small capacity at 100 kHz is an extremely high impedance. The oscillator is a high-frequency generator with a very small impedance, and so you can never feed an antenna directly by this oscillator because there is an extreme mismatch between the impedance of the antenna as a load and the impedance of the oscillator as an internal impedance of the source. Thus, the main point

which Tesla invented, is the high frequency transformer between the antenna and the oscillating circuit. The transformer which is known as Tesla's Transformer has a primary coil, P_1 , and a secondary coil, S_1 . Another salient feature is that there is resonance on the secondary coil owing to inductance, Y_1 , and capacity, C_2 . We can imagine that the high impedance of the antenna comes from its low capacity, which is a reactance. This capacity in the resonant circuit is compensated by the coil, Y_1 , and owing to this secondary resonance the antenna becomes a far lower impedance than before. This impedance is then transformed into the oscillating circuit.

The existence of this optimum impedance match between the antenna as a load and the generator as a source, was a very important point; on the other hand this would mean that we have very high voltage and low current in the secondary coil. We transform the high current of the oscillator into a low current with high voltage in the antenna, A_1 . I think everything in wireless communication has changed very impressively since that time, but this basic idea, i.e., matching the antenna to the oscillator by a Tesla Transformer and by a secondary resonance, is still in use, and no generator, no radio station operates without this principle.

I recently tried to ask my students: "Do you know the name of Tesla?" and everybody said: "Yes, I know this name, it is the man who invented the Tesla Transformer". I found it very impressive that today's students overloaded with scientific knowledge, still know the name of Tesla. They knew it exactly, without thinking, and could answer this question at once. I would be very impressed if a hundred years from now anybody still knew my own name.

On the right side of Fig. 1 we see the receiver. The receiver has mainly a similar antenna, A_2 , and the receiver antenna also has something like a Tesla Transformer to match the impedance of the antenna to the detector, K . This is a sensitive detector which gives you the received signal in any form. The K in this old picture comes from the name coherer, which is a very old-fashioned device and nobody uses it now. What K is today will be explained to you later, because most progress was made in K .

At the end of Tesla's time, of this low frequency communication, during the 1st World War, worldwide communication was required by the military. Then we had the largest antennas which, I think, have ever been built. Fig. 2 shows an antenna which stood near Berlin at Nauen, and you may be impressed by the dimensions of those wires. In this antenna the top

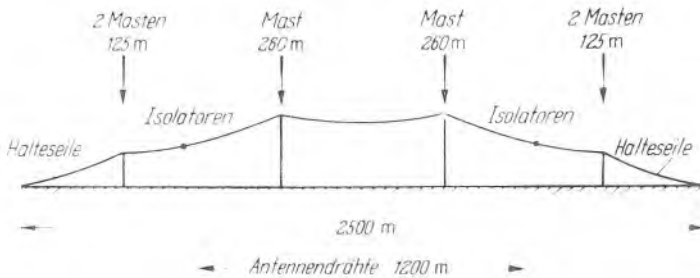


Fig. 2

load capacity consisted of 10, 1200 m long horizontal wires, mounted on towers which were up to 260 m high.

In this station they generated 400 kW high frequency power by machines (Fig. 3). This combination of a large machine with a large antenna was the first worldwide communication system. But at that time, in 1918, long distance communication at low frequencies came to an end, because the electronic age had already started and high frequency currents could be generated by help of control-grid high-vacuum tubes, making higher frequencies possible. The next invention brought the radio into homes around 1924 - that amplitude modulated radio which we still have and which brought every man into contact with high frequencies.

There came another discovery, the short wave communication, which was discovered by amateurs around 1922, and it was another surprise that with

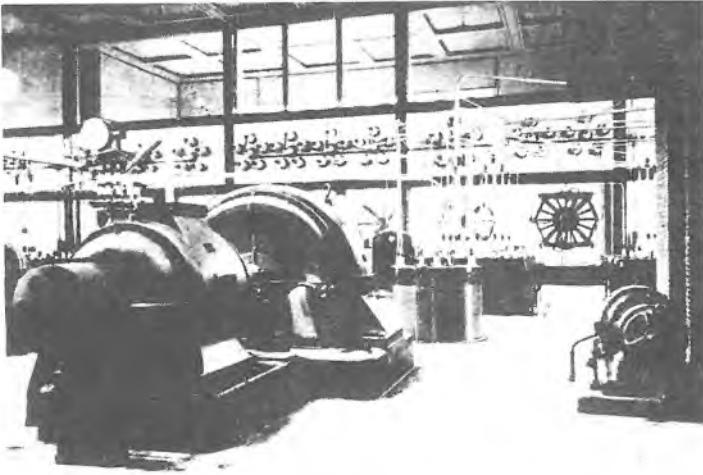


Fig. 3

a very few watts of transmitted power we could circle the Earth. In 1924 an amateur succeeded in establishing communication between London and New Zealand with very low transmitted power. We know that with adequate weather we can communicate around the Earth with 2 W of transmitted power. These higher frequencies also made the use of directional antennas possible, and so we found that long distance communication could be done far easier by short waves, and the old principles of Tesla's time died. Low frequency transmission is used today only in very special cases but no more for general wireless communication. By developing higher frequencies, for example at 100 MHz, we had radio systems as early as 1935, and 10 GHz was first used during the War around 1943.

The end of this development is space communication. It offers the highest possible performance and uses the most sophisticated equipment. Since distances in deep space are much greater than distances on Earth, the best of human intelligence had to be combined with extreme financial investment in order to send man-made waves, modulated by signals, into deep space. In space communication only frequencies capable of penetrating the ionosphere

can be used. The ionosphere is a conducting layer in our atmosphere at altitudes between 100 and 300 km. Depending on its conductivity the ionosphere reflects and attenuates waves with frequencies below 50 MHz. Therefore, only very high frequencies can penetrate the ionosphere and be used for communication between spaceships and Earth. To bridge a very long distance by electromagnetic waves we need extremely large directional antennas. The power we transmit today into space is not so much greater than that transmittable as early as Tesla's time. But the progress achieved by highly directional antennas was possible only by using higher frequencies.



Fig. 4

Fig. 4 shows the famous Goldstone Antenna in the U.S.A. built specially for deep space communication. It has a mirror of 64 m in diameter and around the Earth there are several stations of this kind for communication with spaceships at any time on the rotating Earth. One can also use this antenna for receiving.

There is one limitation which is very severe. The limitation is on the spaceship because there no large weight is allowed. One has to use small antennas and no high power is available because the power supply for a space-

ship is very limited. Fig. 5 shows a Jupiter spaceship and you see the small antenna on the ship. One cannot use a large antenna. Endeavours have been made to blow up antennas in space, but the accuracy of these antennas is too

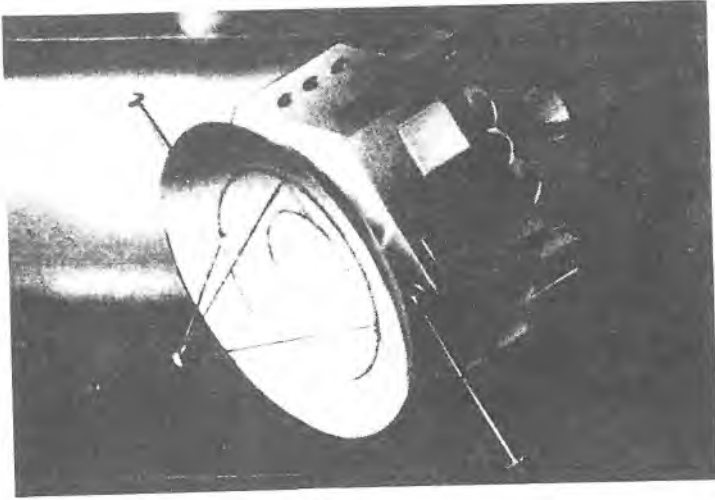


Fig. 5

small to give a sharp beam. Antennas with a diameter of 1 or 2 m are mainly used on spaceships.

I can give you an interesting piece of information about colour television image transmission from the Moon to the Earth. Maybe you have seen these images. I have spoken to the astronauts who were on the Moon and made this television transmission, and they told me that the reflector antenna had a diameter of about 1 m. It was directed to Earth by hand and the transmitted power was 10 W. Since they had this antenna on their vehicle on the Moon they had no power supply for more power, and it is really surprising that with 10 W of transmitted power and a small directional antenna they had a full colour television transmission to Earth. Therefore, the receiving station on Earth had to have a large antenna and the highest sensitivity. We cannot build antennas on Earth with a diameter much greater than 64 m, because we need

certain accuracy. Larger antennas no longer give a good focus. Wind and temperature also change the form of the antenna, and 60 or 70 m are optimum dimensions for deep space antennas on Earth. However, these large antennas can receive signals of extremely low power. You have seen the television images which were very good. How could they do it? This is a problem of sensitivity. I think I shall use my last five minutes to tell you something about sensitivity, because I have been working in this field since 1935.

I should explain sensitivity with a very simple example. If you are all very quiet in this room, you can easily hear me, but if you started to speak you would no longer hear me, though I radiate the same power into the room. When you speak, you make noise and so you find out that the ratio of signal to noise is most important for long distance communication between me and you. When you are silent you are able to use your sensitive ears. You could amplify my signal and everything that is spoken in this room and you would still fail to hear me, because you amplify me, i.e. the signal, and the noise. Therefore the main point is the signal to noise ratio.

What we need is not a strong signal out of deep space, but the absence of noise in space and the absence of noise in the receiver station. So we can have a good signal-to-noise ratio even with very weak signals.

I shall give you another example. Let us say that the transmitted signal from a distant spaceship is something like light. Let us imagine that a distant spaceship, when transmitting, is a star in the sky, which transmits light. The light is modulated and gives us the signal. How can we see a distant spaceship which is flying away from us and its light becomes weaker and weaker? When we go to astronomy we know that we can make photos of extremely distant stars, but only when the sky is dark. The universe is completely dark at optical frequencies and our problem is that the universe is not dark at radio frequencies. You have all heard about radio astronomy. The stars and the universe generate by their nuclear processes high frequency signals, a kind of noise, so the universe is noisy. We can say the universe resembles a grey sky. Our spaceship, which is a light source, flies in the grey sky, and when the light of the

spaceship becomes weaker and weaker there comes a point where you can no longer see the spaceship in the grey sky. This is our main problem: what to do in order to see a weak signal in the sky better than now.

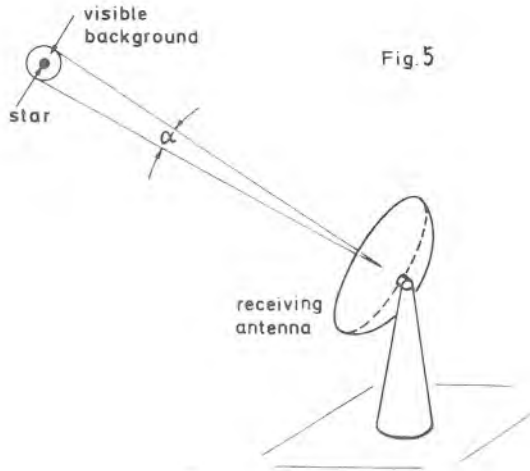


Fig. 6

I can explain what can be done by using Fig. 6. Here you see a parabolic antenna on Earth. There is a certain angle at which the antenna receives and you see a spaceship which I call a star. In Fig. 6 you also see part of the background, of the grey sky. A background with a certain radius around the star is visible by these antennas because it is not an infinite antenna with a sharp beam. But when you increase the diameter of the antenna, then the angle α decreases and the radius of the visible background in the grey sky decreases too, so that the ratio of starlight to the integral light of the received background radiation becomes better with an increasing antenna and a decreasing angle α . This was the first point: to make sharp beams with the receiving antenna in order to decrease background radiation.

There is a second way to decrease background radiation. Background radiation has a broad frequency spectrum, but the spaceship which transmits

the signal has a single frequency. By using a filter which filters out that special starlight, which is the signal, we can improve the signal to noise ratio. A small band filter reduces background radiation, because this filter eliminates all the parts of background radiation which have frequencies different from the frequency of the signal. Thus, in order to reduce background radiation we use a sharp beam antenna and a small band filter.

But there is also noise in the receiver. This noise mostly comes from the thermal movement of the electrons. Thermal movements of the electrons influence the transmission of electrons through boundary layers in the electronic devices. So there is an internal noise in the receiver, and there are also some ways to reduce internal noise. Again, we reduce first the band width of the system in order to eliminate all noise which is outside the band of the received signal. The next step involves cooling the systems with liquid helium and thus reducing the thermal movement of the electrons. The third way is to develop low noise components, which are mostly parametric amplifiers or parametric mixers. There is another point: these stations must be located in very quiet surroundings, because our world is full of man-made electromagnetic noise and so one can build these stations only in special quiet places.

I would like to report some very impressive results. In his time Tesla required about 10 mW of received power to put his coherer into action; Maybe he required 100 mW, we don't know exactly, however Hertz or Tesla required a certain amount of power in order to detect the waves. In present-day low noise systems we need no more than 10^{-15} W. This is extremely low power. Nobody can imagine what that means, but we have had a 10^{14} improvement in sensitivity since Tesla's time and this has been the main progress in wireless long distance communication.

Finally, I can say that sufficient power was available already in Tesla's time, and so were large antennas. What we have now is the extremely sensitive detector and that enables us to establish deep space communication. This was once a dream, and I think nobody ever thought, in times past, that this dream would come true.

Basarić Radoslav, dipl.ing.
Hidroelektrana "Đerdap"-Kladovo
Bujenović Milivoje, dipl.ing.
Institut "Nikola Tesla"-Beograd

OD VODENICE DO HIDROELEKTRANE "ĐERDAP"

Retrospektivnim pregledom velikih ostvarenja, referat ističe objektivnu veličinu čovekovih želja do kojih je došao u svom razvoju na području energetike.

Posebno je istaknut istorijski značaj otkrića Nikole Tesle, čiji je sistem polifaznih naizmeničnih struja oslobodio električnu energiju i pružio joj mogućnost da se raširi na velike prostore kao i značaj hidrocentrale na Nijagari koja je dovela do definitivnog prihvatanja Teslinog sistema.

Prikazana je izgradnja i razvoj hidroenergetskih objekata u našoj zemlji sa mnoštvom podataka od prvog hidroelektričnog izvora na jednosmernu struju pa do hidroelektrane "Đerdap".

U svom završnom delu referat iznosi sažeto tok izgradnje hidroenergetskog i plovidbenog sistema "Đerdap", i daje pregled njegovih osnovnih karakteristika.

FROM THE WATER-MILL TO THE ĐERDAP HYDROELECTRIC POWER PLANT

A retrospective review of great achievements discloses the true magnitude of the progress attained by man in the field of energy.

Of particular historical significance are the discoveries of Nikola Tesla whose polyphase AC systems released electric power and provided for its spread over large areas; no less important is the Niagara hydroelectric power station which brought about the definitive acceptance of Tesla's system.

The construction and development of hydroelectric power stations in Yugoslavia, from the first hydroelectric DC source to the Đerdap power station, is reviewed through numerous data.

Finally, the construction of the Đerdap hydroelectric power and navigation system is outlined, and its basic characteristics presented.

1. Od antičke tehnike do Teslinog sistema

"Ovaj pregled je napisan radi toga da se vremenom ne bi umanjio značaj onoga što je čovečanstvo stvorilo, te da velika i divna dela ne bi bila zaboravljena..."

(Herodot 5 v.p.n.e.)

U najstarijem dobu, uslov kulture i privredne moći bila je koncentracija ljudi na jednom mestu, a ona su se prirodno nalazila u dolini reka. Povezanost ljudi sa rekama izazvala je potrebu za korišćenjem voda.

Vodenica, veliki izum antičkih naroda, predstavlja prvi korak na dugom putu zamene čovekovog rada vodom energijom, a jejasni počeci njene pojave i daljeg razvoja duboko su i direktno vezani za istoriju sveta i razvoj društvenih odnosa.

Tehnika starih naroda u dolini reka Tigra, Eufrata, Nila, Ganga i drugih, procvala je rešavajući elementarne građevinske, saobraćajne i ekonomske probleme i postavila osnove današnjih naučnih sistema. No, brojni izumi antike nisu mogli da ovladaju proizvodnjom jer je robova bilo u izobilju, a njihovim gospodarima se nije žurilo da im olakšaju rad. Mali vodenični točak se stotinama godina okretao i čekao promenu društvenih odnosa.

Jedan rimski pesnik, oduševljen mehanizmom gde rečni tok pokreće težak točak mlina, spevao je stihove budućnosti u kojima je predviđao brzu zamenu za umorne čovekove mišice. Ali vodna snaga nije osvojila društvo starog Rima.

Društveno uređenje starog doba je dalo pupoljke graditeljstva, arhitekture i mehanike ali je postalo kočnica daljeg rasta i iz njegove krize i sloma iznikao je feudalizam.

Sa razbacanim grofovijama i kraljevinama, protkano sitnim i nerazvijenim zanatima, opterećeno misticizmom, feudalno društvo

bilo je isuviše surovo i rascepkano da bi dalo podstrek masovnoj proizvodnji i industriji.

Tek sa razvojem srednjevekovnih gradova, trgovine i saobraćaja u XIV veku, stasa ekonomski i politički mlađa buržoaska građanska klasa, koja se oslobađa feudalnih stega i traži izlaz u "renesansi" antičke tehnike. Rad se plaća i jača sve veći interes za zamenu čovekovog rada mašinom.

Početkom XVI veka vodenički točak dobija veće dimenzije i čvršću građu, pokreće komplikovanije mehanizme sa zupčanim prenosom, testere i pumpe iz rudarskih jama.

Međutim, uspon do gradnje većih mehaničkih postrojenja bio je usporen raskorakom između društveno-ekonomskog terena, koji je bio pripremljen za dolazak mašinske tehnike i istraživačkih mogućnosti XVI veka. Pronalazači tog doba zasnivali su svoj rad isključivo na iskustvu.

I tada, na istorijsku scenu dolazi nauka kao nova društvena snaga koja je kao feniks poletela u visine i ubrzala celokupan razvoj. Naučna i tehnička otkrića XVII veka delovala su tako snažno da su podstakla pokretanje svih proizvodnih snaga. Počelo je novo doba u razvoju i istoriji sveta. Osamnaesti vek doživljava pravu industrijsku revoluciju. Uz reke se gradi mnoštvo malih fabrika, mašine kojih pokreće vodna snaga, a neravnomernost okretanja reguliše se pomoću točka - zamajca. Ali, uskoro su obaveze lokacije i mala snaga vodnih mašina uputili nauku i industriju na nove izvore energije, koji će zadovoljiti porast proizvodnje na širokim prostranstvima bez rečnih tokova. I krajem XVIII veka na industrijsku scenu stupa novi džin - parna mašina.

Vodna snaga se ponovo udaljava od velikih mašina i vraća romantici malih seoskih mlinova.

I kada je već izgledalo da je njen povratak zauvek izgubljen, u krilu fizike začela se nova, nečujna, nevidljiva i pomalo tajanstvena nauka o elektricitetu. Mlada nauka krila je u sebi davni san industrije, saobraćaja i široke potrošnje, da osnovni izvori budu svi vidovi energije koje pruža priroda, i da ih preko električne struje pretvara u motorni pogon, grejanje i hlađenje, osvetljenje, prenos zvuka i slike i mnoštvo drugih primena.

Pedesetogodišnji period, od Faradijevog osnovnog principa proizvodnje električne energije 1831.godine, pa do izgradnje prve električne centrale na jednosmernu struju Edisonovog tipa u Njujorku, ispunjen je razvojem i primenom jednosmerne struje.

Pored velikih nedostataka u proizvodnji i prenosu, tehnika jednosmerne struje je potpuno ovladala autoritetima tog doba.

I dok su u Americi i Evropi nicale mnogobrojne centrale i mali sistemi na jednosmernu struju, te 1882.godine, jedan nepoznati um je uz Geteove stihove, bez kabinetskog konfora, na prašnjava-voj stazi Budimpeštanskog parka crtao štapom jedan novi naučni princip koji će dovesti do električne revolucije u svetu.

Stihovi su podsticali stvaranje, a rešenje problema duboko humane reči: "Moj motor će osloboditi ljude teškog rada... on će raditi posao sveta."

Taj razdragani dvadesetšestogodišnjak bio je naš Nikola Tesla.

Imao je snažnu moć dubokog ispitivanja, sposobnost za dug i istrajan rad, revnost duha i dalekosežnost misli.

Samo pet godina kasnije mladi Tesla iz Smiljana u Lici, nastanjen i zaposlen u Njujorku, zasipao je Ameriku bujicom otkrića:

- otkriće višefaznih naizmeničnih struja,
- otkriće kružnog obrtnog magnetnog polja,
- otkriće principa transformacije višefaznih struja i mnoga druga.

Sva ta otkrića opremao je i praktičnim pronalascima koji su omogućavali potpun razvoj proizvodnje, transformacije, prenosa i upotrebe nove tehnike višefaznih naizmeničnih struja u gotovo današnjem obliku.

Nov sistem je donosio oslobođenje električne energije male snage i kratkog dometa, ali je nastao u vreme kada su velike kompanije, koje su vladale proizvodnom strukturom i širokom potrošnjom, bile duboko privržene tehnici jednosmerne struje.

U industrijski život tadašnje Amerike, Teslin sistem mogao je da uvede jedino veliki kapital, i taj trenutak je došao 1888. godine, samo mesec dana po briljantnom Teslinom predavanju u Ame-

ričkom institutu elektroinženjera, kada je u svojoj maloj laboratoriji u Petoj aveniji primio Džordža Vestinghausa.

Sprega Tesla-Vestinghaus pokrenula je masovnu proizvodnju i primenu na univerzalnom principu da se snaga pretvara u samo jedan oblik industrijske struje i napona, prenosi do mesta upotrebe i tamo preobražava u željeni oblik.

Put do definitivnog prihvatanja novog električnog sistema usledio je oktobra 1893.godine, kada je komisija za iskorišćenje energije vodopada na Nijagari, poverila izgradnju hidrocentrale društvu Vestinghaus.

Tesla, sada već ozbiljan i poznat pronalazač, budio je nad izvođenjem grandioznog sistema na Nijagari sa istom zaljubljenosti, kojom je kao dečak pravio mali točak na potoku u rodnom Smiljanu.

Avgusta 1895.godine, Nijagara je pokrenula tri avofazna generatora ukupne snage 11,25 MVA i prva energija isporučena je fabrici aluminijuma u Picburgu, a godinu dana kasnije izgrađen je prenosni sistem i vodna snaga je prenesena na udaljenost od 22 milje do grada Bufala.

Događaji su ubrzali svoj hod. Mala vodenica je izrasla u modernu turbinu koja pokreće generator i pomoću Teslinog sistema udaljenu vodnu snagu dovodi na vrata industrije i široke potrošnje.

Teslina misao da: "Dolazak prenosa električne snage pomoću sistema naizmjeničnih struja označava epohu uštede raspoložive energije uglja..." sadržana je u srećnoj okolnosti po čoveka što se vodna energija za razliku od svih ostalih vidova energije, stalno obnavlja.

2. Hidroenergetski izvori na tlu Jugoslavije

Pre nego što se okrenemo našoj zemlji u užem smislu, naime istoriji primene i razvoja hidroelektrične energije kod nas, neophodno je istaći da se u razvijenijim zemljama Evrope i Amerike u drugoj polovini XIX veka već izvršila koncentracija kapitala. Velika akcionarska društva, na račun bogatih građova ili čak država, podižu industrijske centre napajane brojnim električnim

centralama, tako da je kraj XIX veka u znaku masovne elektrifikacije.

Ekonomska, društvena i kulturna podloga za masovno uvođenje električnog sistema na području Jugoslavije nije postojala. Nerazvijenost, rascepanost i lokalni interesi domaćeg kapitala osnovno su obeležje tog vremena.

Iskorišćenje hidropotencijala za proizvodnju električne energije na našem tlu može se podeliti u tri karakteristična perioda:

- pionirski period do 1918.godine;
- period između dva svetska rata; i
- period socijalističke Jugoslavije.

Za svaki od navedenih perioda pomenućemo one objekte koji su značajni po vrsti primenjenog sistema, godini gradnje i snazi.

Epoha jednosmerne struje, podstakla je 1884.god., izgradnju prve hidrocentrale za proizvodnju jednosmerne struje u Srbiji na reci Crnici kod Paraćina. Generator jačine 50 KS pokretao je razboje i napajao osvetljenje tekstilne fabrike u Paraćinu.

Već 1894.godine oseća se uticaj tehnike naizmernih struja. U Dalmaciji na Skradinskom Buku izgrađena je hidrocentrala sa monofaznim generatorom snage 300 kVA, 42 Hz, a prenos do Šibenika za snabdevanje industrije i osvetljenja izveden je dalekovodom pod naponom od 3000 V.

Pojava Teslinog polifaznog sistema i njegova primena na Ni-jagari, okrenula je industrijski svet ka većem iskorišćenju vodnih snaga. Gotovo istovremeno grade se tri hidrocentrale na reci Plivi kod Jajca, reci Djetinji kod Užica i reci Gradcu kod Valjeva.

Godine 1897. puštena je u pogon hidrocentrala Jajce sa devet generatora od kojih su osam bili trofazni, pojedinačne snage 800 kVA i služili za napajanje Industrije karbida, a deveti jednosmerni generator snabdevao je elektromotorni pogon i gradsko osvetljenje.

Hidrocentrala "Gradac", snage 94 kVA, puštena je u rad 1900.godine i napajala je pogon mlina, pivare i gradsku rasvetu.

Užička hidrocentrala puštena je u pogon 1900.godine sa dva

trofazna generatora, snage po 50 KS, 50 Hz, napona 2000 V. Snabdevala je motorni pogon ткаčnice i gradsku mrežu osvetljenja pod naponom od 120 V.

Prvih godina XX veka gradi se niz malih hidrocentrala za trofaznu struju snage 200 do 300 kVA koje su zadovoljavale samo pojedine manje industrijske pogone, i gradsko osvetljenje.

U Dalmaciji 1906. i 1912. godine podignute su dve izuzetno snažne hidrocentrale: Manojlovac na reci Krki kod Šibenika snage 20,8 MVA i Kraljevac na reci Cetini kod Splita snage 32 MVA. Od hidrocentrale Manojlovac izveden je prenos snage do Šibenika na udaljenosti od 34 km pod naponom od 30 kV metodom serijskog spajanja namotaja generatora.

HE "Kraljevac" je napajala fabriku karbiida na udaljenosti od 23 km pod naponom od 50 kV i bila je najveća na našem području.

Narednih šest godina ispunjeno je gradnjom većeg broja manjih hidrocentrala pojedinačnih snaga od 100 kVA pa do nekoliko MVA i to na rekama Timoku, Nišavi, Moravici, Lupi, Jadru i Krki. Uspom u gradnji je postojao, ali je još uvek bio daleko od masovne elektrifikacije.

Za razliku od pionirskog perioda izgradnje, koji je u svom završnom delu imao porast u broju i kapacitetu izgrađenih izvora, obeležje perioda između dva svetska rata karakteriše usporenost u gradnji izuzev nekoliko, po snazi, značajnih objekata.

Godine 1918. izrađena je i puštena u rad prva faza HE "Pala" na reci Dravi kod Karibora, snage 35 MW, a 1930. proširena je HE "Kraljevac" na reci Cetini sa dva agregata po 26 MVA. Izgrađene su i dve nešto manje hidroelektrane, "Jaruga" na Krki 6 MW i hidroelektrana "Matka" kod Skoplja snage 4 MW.

Godine 1939. sa ukupno instalisanom snagom od 174 MW proizvodnja svih hidroelektrana u Jugoslaviji iznosila je 567 miliona kWh.

U toku drugog svetskog rata, sa izuzetkom HE "Dravograd" snage 15 MW, nije bilo izgradnje drugih hidrocentrala, a mnoge postojeće su bile teško oštećene ili potpuno razorene.

Sa oslobođenjem jugoslovenskih naroda i ujedinjenjem na osnovama socijalizma, centralizacijom sredstava i planskom iz-

gradnjom stvoreni su društveni, politički i ekonomski uslovi za obnovu i elektrifikaciju zemlje.

Samo godinu dana po završetku rata dostignuta je proizvodnja električne energije koju je zemlja imala uoči rata.

Proizvodna snaga u elektranama iznosila je 207 MW ili samo 1% od one koja se mogla postići od raspoloživog hidropotencijala Jugoslavije. Procenjene rezerve u izvorima od 64 milijarde kWh po godini, od čega slivno područje Jadranskog mora 31%, sliv Jegejskog mora 6%, a sliv Crnog mora 63%, stajale su na raspolaganju. Uvako veliko energetske bogatstvo upućivalo je na brzo iskorišćenje, ali je orijentacija prve posleratne gradnje bila prirodno okrenuta ka podizanju većeg broja manjih objekata, koje su domaće graditeljstvo i industrija mogle da prihvate. Sa druge strane za studije, istraživanja i projektovanja bilo je potrebno kraće vreme.

Sa instalisanom snagom ispod 10 megavata izgrađene su u Crnoj Gori Mušovića Rijeka, Slap Zete i Glava Zete; u Bosni i Hercegovini Bogatići, Vlasenica, Mesići i Slapovi na Uni; u Hrvatskoj Ozalj II i Zavrelje; u Sloveniji Savica; u Srbiji Sokolovica, Seljašnica, Ras, Ovčar Banja, Međuvršje, Kožnjari i Dikance, a u Makedoniji Zrnovci, Sapunčica, Pesočani i Došnica, sve ukupne snage 68,7 MW.

Realizacija prvog Petogodišnjeg plana posleratne izgradnje dovedena je 1948. godine u ozbiljne teškoće, ali su izvanrednim naporima celokupne naše privrede stvoreni uslovi za sopstvenu proizvodnju i jaku domaću industriju. Građevinska preduzeća su od primitivnog načina građenja, prerasla u graditelje koji se služe efikasnijim metodama i savremenom mehanizacijom. Mašinogradnja i elektroindustrija su se osposobile za proizvodnju gotovo sve elektromašinske, hidromehaničke i elektroopreme.

Do 1955. godine dovršena je elektrana "Mariborski Otok" 54 MW, započeta u vreme rata, i izgrađene "Nikola Tesla" 84 MW, "Moste" 15,75 MW, "Vuzenica" 36 MW, "Vrta I" 23 MW, "Jajce II" 20 MW, "Vrta II" 11,2 MW, "Zvornik" 22 MW, "Vuhred" 40 MW i "Jablanica" 72 MW.

Te 1955. godine proizvodnja hidroelektrične energije povećala se osam puta u odnosu na 1945. godinu.

Izgradnjom brojnih hidrocentrala većih snaga stvoreni su uslovi za međusobno povezivanje u jedan jedinstven elektroenergetski sistem na naponu 110 kV.

Posle 1955.godine prešlo se na gradnju snažnijih i ekonomičnijih hidrocentrala sa većim generatorskim jedinicama i do 1970.godine izgrađeno je i pušteno u pogon novih 27 hidroelektrana, među kojima su najznačajnije: "Bistrica", "Vrutok", "Perućica", "Zakućac", "Bajina Bašta", "Trebinje", "Dubrovnik", "Rama" i "Zlatoličje".

Godine 1970. ukupna instalisana snaga hidrocentrala iznosila je 3636 MW, a proizvedena je hidroelektrična energija u iznosu od 14.741 miliona kWh.

Jednovremeno sa gradnjom ovih objekata, naše želje su se skoncentrisale oko, do tada neostvarenog zadatka, da iskoristimo energiju Dunava kao što smo to i ranije uspešno radili kod drugih reka.

Đerdap je najveća i najsnažnija rečna probojnica u Evropi, kroz koju je Dunav formirao svoje korito na dužini od oko 100 km. U sektoru klisure postoji velik broj podvodnih pragova, zona sa koncentrisanim padovima i velikim brzinama, koje predstavljaju izuzetnu opasnost za plovidbu.

Prve plovidbe Dunavom počinju pre više od 3000 godina, tamo gde su nejasne veze između istorije i legende u priči o Argonautima. Živ saobraćaj Dunavom razvili su tek Rimljani u drugom veku nove ere, posle skoro stogodišnjih radova, na probijanju puta kroz Đerdap, što je omogućilo vuču njihovih brodova kroz divlje vode klisure.

U poslednjih 100 godina uklanjane su stene sa plovnog puta i podizane hidrotehničke građevine. I pored svih napora i znatnih investicija, nisu bitnije izmenjene osnovne nepogodnosti plovnog puta: mala dubina i širina, velika brzina vode, česti prekidi saobraćaja i havarije brodova.

U sektoru Đerdapske klisure, Dunav raspolaže izvanrednim hidroenergetskim potencijalom, koji je rezultat velikih protoka i koncentracije znatnih padova. U poređenju sa potencijalom susednih deonica, hidroenergetski potencijal Đerdapa je 4-5 puta veći.

Iskorišćenje tako velikog potencijala Dunava u sektoru Đerdapa ima svoju dugu istoriju interesovanja stručnjaka i stranog kapitala.

Interes dveju priobratnih zemalja je takođe postojao, ali su njihove privrede pre drugog svetskog rata bile na niskom nivou pa nisu bile sposobne da konzumiraju proizvedenu energiju, a pogotovo da obezbede sredstva za izgradnju tako velikog objekta.

Brz ekonomski razvoj socijalističkih zemalja SFR Jugoslavije i SR Rumunije, kao i porast međunarodne plovidbe Dunavom u godinama posle drugog svetskog rata pokrenuo je potrebu zajedničke izgradnje hidroenergetskog i plovidbenog sistema "Đerdap".

Godine 1956., obrazovana je mešovita komisija i dat je zadatak projektantskim organizacijama Energoprojekt-Beograd i ISPH-Bukurešt, da u ravnopravnoj saradnji pripreme i prezentiraju vladama studiju o korišćenju zajedničkog sektora Dunava, pošto su projektovanje i izvođenje ovako velikog sistema zahtevali posebno obimne istražne radove i druga ispitivanja.

Po obavljanju radova i usvajanju Memoranduma kojeg su podnеле navedene organizacije 30.novembra 1963.godine, Predsednik SFR Jugoslavije i Predsednik državnog saveta SR Rumunije potpisali su sporazum.

Jedan od osnovnih principa sadržanih u Sporazumu jeste ravnopravnost partnera, koja je naročito došla do izražaja u stavu da se investicije i električna energija podjednako dele, dopuštajući slobodu svakoj strani u izboru tehnologije izvođenja radova.

Najpovoljniji profil lokacije brane na km D 942+950 od ušća Dunava, određen je u svetlu svih geološko-geotehničkih, energetskih i hidrološko-hidrauličkih uslova.

Pregledom po godinama, izgradnja objekta na našoj teritoriju je tekla ovako:

- od 1963. do 1966. izvršeni su svi pripremni radovi koji obuhvataju izgradnju naselja, komunikacija, zagata i pomoćnih pogona,
- od 1966. do 1969. završeni su glavni građevinski radovi u koje spadaju iskopi, betoniranje, injektiranje i pregrađivanje Dunava,

- od 1969. do 1971. sprovedeni su montažni radovi koji obuhvataju dopremu i montažu hidromehaničke opreme, turbina i elektro opreme.

Propuštanje vode i leda i obezbeđenje plovidbe tokom izgradnje sprovedeno je preko srednjeg dela Dunava, između našeg i rumunskog zagata, na širini od 280 m.

Složena hidrotehnička operacija pregrađivanja, u završnom delu gradnje, predstavljala je jedinstven poduhvat graditelja sa obe strane reke. Generalnim planom je bilo predviđeno da se pregrađivanje izvrši za 72 kalendarska dana, a Dunav je pregrađen za svega 12 radnih dana, intenzivnim nasipanjem kamenog nabačaja, betonskih kocki, blokova, gabiona i tetrapoda težine i do 25 t. po komadu, u ukupnom iznosu od 100.000 m³ materijala. Ova veoma važna faza gradnje uslovila je uspešno okončanje radova i puštanje u pogon prvog agregata u avgustu 1970.godine.

Jugoslovenski deo objekta sastoji se iz:

- neprelivne brane sa galerijom,
- brodske dvostepene predvodnice sa uzvodnim i nizvodnim predpristaništima,
- elektrane sa komandnom zgradom i razvodnim postrojenjem 400 kV,
- prelivne brane sa slapištem.

Glavni izvođači građevinskih radova na jugoslovenskoj teritoriji su građevinska preduzeća "Hidrotehnika"-Beograd i "Hidrogradnja"-Sarajevo, a u okviru pripremnih radova i mnoga druga.

Na isporuci opreme i montaže radila su domaća preduzeća "Rade Končar", "Litostroj", "Metalna", "Hidromontaža", "Goša", "Minel", "Prva Petoletka", "Bratstvo" i druga.

Hidroelektrana Đerdap je tokom čitave izgradnje imala jugoslovenski karakter, na kome su se dokazale istraživačke, graditeljske i proizvodne sposobnosti cele naše zajednice.

Instalisana snaga našeg i rumunskog dela objekta je 2100 MW, a sa prosečnom proizvodnjom električne energije od 11,5 milijardi kWh je treća hidroelektrana na svetskoj rang listi.

U jugoslovenskom delu elektrane ugrađeno je šest generatora nominalne snage od po 175 MW, koji su sa ukupnom snagom od 1050 MW

uključeni u elektroenergetski sistem na naponskom nivou 380 kV, čime je učinjen prvi korak u stvaranju 380 kV mreže Jugoslavije.

Za razliku od svih ostalih hidroelektrana koje po svojoj prirodi predstavljaju smetnju plovidbi, Đerdapski sistem obezbeđuje optimalno rešenje kojim se povećava kapacitet plovidbe sa 14 na 60 miliona tona godišnje.

Pored osnovnih energetske i plovidbenih namena, proistekao je i niz povoljnosti za razvoj poljoprivrede, industrije, saobraćaja i turizma.

Ali, iznad svega, Đerdap je nastavak puta na koji je Tesla usmerio čovečanstvo u sve većoj kontroli energije.

LITERATURA:

1. Nikola Tesla The problem of increasing human energy;
The Century Magazine June 1900.
2. Đorđe Stanojević: Električna industrija u Srbiji, Beograd
1901.
3. B.A. Behrend: Dynamo-electric Machinery and Its Evolu-
tion; Western Electrician Sept. 1907.
4. K.M. Swezey: Nikola Tesla; New-York Herald Tribune
July 1931.
5. Elektro-mašinski almanah za 1932.godinu,
Beograd, 1932.
6. S. Bokšan: Naš dug Nikoli Tesli; izuanje radio ča-
sopisa N.Tesla, Novi Sad 1936.
7. I. Supek: Od antičke filozofije do moderne nauke
o atomima; Nakladni zavod, Zagreb 1945.
8. S. Bokšan: Delo Nikole Tesle; Srpska akademija na-
uka, Beograd, 1950.
9. Džon O'Nil: Nenadmašni genije; Prosveta Beograd, 1951.
10. V. Jevđević: Vodne snage Jugoslavije, Jugoslovenski
nacionalni komitet Svetske konferencije
za energiju, Beograd, 1956.
11. Razvoj elektroprivrede Jugoslavije 1945-
-1955. Zajednica jugoslovenske elektro-
privrede, Beograd, 1957.
12. Elektroprivreda Jugoslavije, Privredni
pregled, Beograd, 1962.
13. Herodot: Istorija (prevod s grčkog), Novi Sad
1959.
14. M. Verčon: Određivanje potencijala vodnih snaga u
slivu; Institut za vodoprivredu Jaroslav
Černi, 1968.
15. Statistički godišnjak elektroprivrede SFRJ za 1974. Zajednica
jugoslovenske elektroprivrede, Beograd, 1975.

Dr Aleksandar Marinčić
profesor Elektrotehničkog
fakulteta u Beogradu

DNEVNIK ISTRAŽIVANJA NIKOLE TESLE U KOLORADO SPRINGSU
1899 - 1900

Muzej Nikole Tesle u Beogradu, u kome se čuva sva lična zaostavština Nikole Tesle, publikovaće ove godine engleski original i prevod na srpsko-hrvatski jezik istraživačkog dnevnika Nikole Tesle. Dnevnik je pisan u toku eksperimentalnih istraživanja u Teslinoj laboratoriji blizu mesta Kolorado Springs u Sjedinjenim Američkim Državama u drugoj polovini 1899. i na samom početku 1900.godine. Izložene ideje, teorijski i eksperimentalni rezultati su od izuzetne vrednosti kako za istoriju radiotehnike tako i za bolje i dublje upoznavanje sa Teslinim delom, kada je bio na vrhuncu svojih stvaralačkih moći. Dnevnik omogućava da se sagleda stvaralački proces, razvoj ideja, zamah eksperimentalnog duha i upoznavanje sa izvesnim brojem nepoznatih Teslinih otkrića. Po svemu sudeći, Tesla nije nameravao da objavi svoje zabeleške u celini tako da ih je prvo trebalo pripremiti za studiranje na originalnom, engleskom jeziku. Zatim je usledio prevod na srpsko-hrvatski jezik i više korekcija prevoda. Da bi se olakšalo praćenje i studiranje materijala dnevnika, uz srpsko-hrvatski tekst pripremljeni su i komentari.

Dnevnik počinje 1.junom 1899.godine i završava se 7.januarom 1900.godine. Sadrži 507 strana rukopisa na engleskom jeziku i 193 crteža. U poslednjoj fazi eksperimentalnog rada Tesla je sa fotografom snimio više fotografija. U tekstu je opisao ukupno 63 fotografije, od kojih je u arhivi muzeja Nikole Tesle u Beogradu nađeno 40 fotografija.

Pre dolaska u Kolorado Springs Tesla je imao skoro 10 godina iskustva u radu na polju visokofrekventnih struja. Prva ispitivanja naizmeničnih struja viših frekvencija od onih koje se koristile u elektroenergetici Tesla je vršio pomoću svojih alternatora specijalne konstrukcije 1889.godine. Za kratko vreme otkrio je niz neobičnih osobina ovih struja i 1891.godine objavio je

pronalazak čuvenog Teslinog varničnog oscilatora. Visokofrekventni rezonantni transformator koji je Tesla primenio u ovom oscilatoru, omogućio je lako dobijanje vrlo visokih napona struja visokih frekvencija. U narednih nekoliko godina do dolaska u Kolorado Springs, Tesla je dobio preko 20 patenata na razne aparate za proizvodnju i korišćenje visokofrekventnih struja o čemu je govorio u ukupno pet predavanja pred naučnicima Amerike i Evrope.

1897.godine Tesla podnosi zahteve za dobijanje patenata na "Električni transformator" i "Sistem prenosa električne energije" iz čega je deobom nastao i patent "Aparatura za prenos električne energije". Prvi od ovih patenata dodeljen je Tesli iste godine, a druga dva tek 1900.godine.

U patentu, u kojem govori o sistemu prenosa električne energije Tesla opisuje svoj, pre eksperimenata u Kolorado Springsu, najveći oscilator sa kojim je proizvodio napone i do 4 miliona volti. Visokofrekventni transformator oscilatora bio je u obliku ravne spirale sa 50 zavojaka žice prečnika 2,9 mm, sa jednim zavojkom primara oko sekundara prečnika 244 cm. Radna frekvencija se kretala oko 240 kHz. U arhivi Muzeja Nikole Tesle u Beogradu otkriven je Teslin slajd iz koga se vidi da je sa ovim oscilatorom izvodio eksperiment prenosa električne energije kroz razređeni gas. Na sl.1 pokazana je staklena cev iz koje je delimično izvađen vazduh tako da to predstavlja atmosferski pritisak visoko iznad zemlje gde bi trebalo da se nalazi kraj antene. Pod uticajem visokog napona gas postaje provodan i Tesla tvrdi da je efikasno prenosio energiju u ovakvom sistemu. Na mestu prijema nalazio se transformator slične konstrukcije kao na mestu predajnika sa obrnutom ulogom. Mislimo da je značaj ovog dokumenta u tome što dokazuje da Tesla nije samo zamišljao svoj sistem bežičnog prenosa već da je za to imao i neku eksperimentalnu potvrdu.

U njujorškoj laboratoriji Tesla je izvršio mnoge eksperimente bežičnim prenosom i razvio brojne aparate, kako za proizvodnju visokofrekventnih struja i njihovo zračenje, tako i za prijem slabih radio signala preko sistema antena-zemlja prema zamisli koju je prvi put javne izneo 1893.godine u Filadelfiji i Sent Louisu. Da je to tako potvrđuje nam Tesla svojim dnevnikom iz Kolorado Springsa gde često pominje da je na sličnim problemima već

radio u Njujorku. Međutim, krajem 1898.godine njegovi eksperimenti sa bežičnim prenosom postali su takvih razmera da ih nije mogao dalje nastaviti u uslovima grada. Posle studije raznih lokacija odlučio se za visoravan na 2000 metara iznad morskog nivoa u blizini mesta Kolorado Springs. Prema jednom dokumentu⁽⁴⁾ tamo je došao 13.maja 1899.godine posle dva dana putovanja iz Njujorka. Iz novinskih izveštaja⁽⁵⁾, Tesline izjave u Patentnom uredu SAD⁽⁴⁾ i članka koji je napisao 1904.godine⁽⁶⁾ saznajemo da je Tesla došao u Kolorado Springs sa sledećim ciljem:

1. da razvije predajnik velike snage
2. da usavrši metode individualizacije i izolacije prenete energije, i
3. da utvrdi zakone prostiranja struja kroz zemlju i atmosferu.

Iz pisanja Western Electricitiana i American Inventora saznajemo da je Tesla imao nameru da prenese signale sledeće, 1900.godine u Pariz. Tesla je imao, izgleda, čak i ambiciozniji cilj što se da zaključiti iz njegove izjave pred Patentnim uredom SAD 1902.godine⁽⁴⁾

"... Želeo sam da utvrdimo najbolje uslove pod kojima se predajnik može upotrebiti za prenos poruka preko Atlantskog i Pacifičkog okeana, što sam verovao da je ostvarljivo i pre mog polaska. Takođe sam želeo da usavršim sve detalje mog sistema pre nego se upustim u komercijalne poslove. Drugim rečima, premda, što se mene tiče, nisam sumnjao u mogućnost realizacije takvog prenosa s obzirom na eksperimente i merenja koja sam izvršio u Njujorku, želeo sam da budem siguran ne samo da mogu preneti poruke već da će moj poduhvat biti komercijalni uspeh."

U štampi je pisano novembra 1899.godine da Tesla brzo na preduje u usavršavanju svog sistema i da se poruke koje on šalje ne mogu ometati. Jedanaestog januara 1900.godine Tesla se vratio u Njujork⁽⁴⁾.

Za razliku od mnogih zabeležaka Nikole Tesle koje se nalaze u njegovom muzeju u Beogradu, dnevnik iz Kolorado Springsa je lepo sređen i vođen gotovo svakodnevno.

Ako se izvrši analiza rada prema zapisima pojedinih dana,

Tesla je najviše vremena posvetio predajniku (56%), zatim prijemnicima malih signala (oko 21%), merenju kapacitivnosti antene (oko 16%) i raznim proučavanjima i istraživanjima (oko 6%).

Varnični oscilator - predajnik

Varnični oscilator predajnika imao je u početku klasičan oblik Teslinog visokofrekventnog oscilatora sa primarom i sekundarom u relativno jakoj sprezi (oko 0,6). Visokofrekventni transformator bio je namotan na konusnom telu sa srednjim prečnikom od preko 12 m. Kada je bio konačno uobličen, transformator je imao 29 zavojsa u sekundaru i jedan ili dva zavojsa u primaru. Primarni kalem namotan je upletenom žicom, a sekundar običnim provodnikom. Velike dimenzije Tesla je morao da izabere zbog visokih napona sa kojima je imao nameru da radi.

Već posle nekoliko dana eksperimentisanja Tesla je izmenio konstrukciju svog oscilatora tako što je na red sa sekundarom priključio "dodatni kalem" koji se zatim redovno sreće. Po Tesli ovaj kalem omogućava dobijanje većih napona od onih koji se mogu dobiti kada se koristi njegov klasični oscilator. U stvari, ovaj kalem menja režim rada čitavog varničnog oscilatora i sada to postaje sistem sa tri oscilatorna kola.

U kasnijoj fazi rada Tesla je izmenio oblik sekundarnog kalema visokofrekventnog oscilatora i primenio cilindrični sistem sa prečnikom od 15 m. I ovde je sprega primara i sekundara bila jaka. Izgled dva pomenuta tipa visokofrekventnih transformatora dat je na sl.2. U sredini transformatora su nacrtani "dodatni" kalemovi poslednjih konstrukcija. Kondenzatore primarnog kola transformatora Tesla je pravio od staklenih boca, a elektrode su mu bile slana voda.

Konstrukciju visokofrekventnog oscilatora Tesla je otpočeo proračunavanjem elemenata oscilatora služeći se gotovim formulama. Numerička izračunavanja vršio je sa velikom tačnošću. Tako je, na primer, samoinduktivnost cilindričnih kalemova izračunavao po formuli za beskonačno dug kalem, a za kalemove kružnog i kvadratnog oblika sa jednim zavojkom koristio je odgovarajuće teorijske formule. Sam je izveo proračun za sopstvenu periodu cilindričnog jednoslojnog kalema sa raspodeljenom kapacitivnošću.

S obzirom da je radio sa kalemovima velikih faktora valjanosti, ispravno je zanemarivao uticaj otpornosti na određivanje rezonantne učestanosti oscilatornih kola po Thomsonovom obrascu za kolo bez gubitaka.

Eksperimentalno je proveravao proračunate vrednosti na konstruisanim elementima. Primenjivao je relativno jednostavne merne metode. Iz odnosa napona i struje, poznate učestanosti i otpornosti nalazio je induktivnost kalemova. Međusobnu induktivnost kalemova određivao je iz pobudne struje, učestanosti i napona praznog hoda na nepobuđenoj strani spregnutih kalemova. Merenja je obično vršio pri učestanosti oko 140 kHz. Primenjivao je i metode upoređivanja u kojima se koristi standard induktivnosti ili kapacitivnosti tako da se eliminišu greške koje nastaju usled nedovoljno tačno određene frekvencije izvora.

U dnevniku se može naći kompletan proračun varničnog oscilatora sa spregnutim oscilatornim kolima. S obzirom da je analiza prilično jednostavna, Tesli su ovi proračuni služili za orijentaciju.

Proračun oscilatora Tesla je započinjao od zadane frekvencije. Na osnovu nje odredio bi dužinu žice u sekundaru tako da ona bude jednaka četvrtini talasne dužine (talasnu dužinu računa za slobodni prostor). Parametre primarnog kola oscilatora određuje na osnovu Thomsonovog obrasca $f = 1/2\pi\sqrt{L_p C_p}$. Energetski bilans obračunava tako što uzima da se kondenzator puni n puta u sekundi do napona izvora, i da se sva nagomilana energija troši između impulsa (tj. pretvara se u visokofrekventne struje). Tako, snagu koju oscilator uzima iz mreže za napajanje, izračunava na osnovu $\frac{n}{2} C_p U_p^2$. Treba napomenuti da se sličan pristup proračunu sreće u literaturi posle 1900 godine.

U proračunima Tesli je veliku teškoću zadavala raspodeljena kapacitivnost sekundarnog kalema visokofrekventnog oscilatora koju nije mogao tačno da odredi. Pravilno je zaključio da je kapacitivnost sekundara presudan faktor koji određuje maksimalni sekundarni napon oscilatora. Tražio je načine da smanji ovu kapacitivnost pa je vršio pokušaje sa razmaknutim zavojcima ili je koristio tanju žicu. Sve to, međutim, nije moglo da eliminiše uticaj neželjene kapacitivnosti sekundara, pa je pokušavao da primeni

složenije veze sa više oscilatornih kola. Neki od ovih varničnih oscilatora sa više oscilatornih kola pokazani su na sl.3. (U objavljenim patentima praktično se ne nalazi ni jedna od ovih veza). Teško bi bilo u nekoliko rečenica opisati sve teškoće sa kojima se Tesla suočavao, dok konačno nije došao do rešenja oscilatora sa kojim je ostvario neverovatno visoke napone reda 10 miliona volti. Izgled najsavršenijeg poznatog Teslinog varničnog oscilatora iz laboratorije u Kolorado Springsu prikazan je na sl.4.

Pri eksperimentisanju sa oscilatorom Tesla je obično menjao parametre primarnog oscilatornog kola i to kapacitivnost (promenom broja uključenih "boca") i induktivnost (pomoću "regulacionog" kalema koji je vezivao na red sa primarnim namotajem visokofrekventnog transformatora), dok ne bi ostvario najveće dejstvo na krajevima sekundarnog kola.

Određivanje frekvencije oscilatora preastavljalo je za Teslu težak problem. Često se zadovoljavao frekvencijom koju je izračunavao iz parametara primarnog oscilatornog kola pomoću Thomsonovog obrasca, ali je često naglašavao da je to samo orijentaciona vrednost. Kasnije je pri određivanju frekvencije na ovaj način primenjivao "redukovanu" primarnu induktivnost, ali i to je bila opet aproksimacija. Od mernih metoda primenjivao je ponekad "samorezonantni" kalem, i frekvenciju određivao iz dužine žice ovog kalema (pri rezonansi) smatrajući da je tada dužina žice u kalemu jednaka četvrtini talasne dužine. Moment rezonanse određivao je po najvećoj varnici na krajevima kalema. Tesla je bio svestan svih ograničenja ove metode, ali ponekad nije imao drugog izbora. Tačnije merenje frekvencije vršio je pomoću oscilatornog kola poznate induktivnosti i pločastog kondenzatora čiju je kapacitivnost dobijao računskim putem.

Visoki napon merio je na osnovu dužine varnice između metalnih sfera, a manje tačno na osnovu najdužih strujnica.

Modulacija predajnika

Izvesno vreme Tesla je posvetio opisu modulatora za oscilator velike snage. Problem ovih modulatora je u velikoj struji koja bi tekla kroz mikrofon, stavljen u snažno pobuđeno oscilatorno kolo, pa je zato trebalo naći neko drugo rešenje. Na sl.5

prikazano je jedno kolo - sistem za dobijanje mehaničkog kretanja u ritmu varijacija zvučnog pritiska ispred mikrofona. Mikrofon-ska struja reguliše magnetisanje gvozdene trake koja ovlaš dodiruje gvozdeni točak A. Promena trenja, usled promenljive struje kroz kalem, izaziva snažno kretanje trake u ritmu varijacija struje kroz kalem. Traka je povezana sa specijalnim ventilom koji reguliše protok vazduha na električni luk u sekundaru oscilatora. Rezultat dejstva vazdušne struje je promena amplitude nosioca u ritmu zvučnog signala. Koliko je poznato Tesla nije dobio patent na ovakvu napravu niti je bilo gde objavio ovaj pronalazak.

Prijemnici i primopredajnici

Kao što smo rekli na početku, Tesla je dosta vremena posvetio razradi raznih tipova prijemnika za slabe signale kontinualnih visokofrekventnih struja. U toku boravka u Kolorado Springsu podneo je (govorimo samo o patentima koje znamo da je dobio) 4 patenta na prijemnike koji koriste "metod akumulacije". S obzirom da su neki podneti odmah na početku boravka, a druga dva su nastala deljenjem prva dva, jasno je da su to pronalasci iz njujorške laboratorije. Usavršavanja, koja je vršio u Kolorado Springsu, su nastavak i proširenje ranijih radova. Mnogo je radio na razradi specijalne modifikacije tzv. kondenzatorske metode pojačavajućeg dejstva sa uvođenjem samopobuđivanja koje je slično, kako Tesla kaže, "samopobudi dinamo mašine". Jedno od kola ovog tipa pokazano je na sl.6a.

U dnevniku ima oko stotinu raznih shema vezivanja osetljivih uređaja (koherera) u kojima se koristi efekat akumulacije sa povratnom spregom za brzo uključivanje osetljivog uređaja na dolazeći signal. Tesla je tvrdio da su izvesne sheme sa dva osetljiva uređaja jako osetljive, ali iz velikog broja pokušaja stiće se utisak da nije našao ono baš najbolje rešenje koje bi ga potpuno zadovoljilo. Tipičan prijemnik ovog tipa pokazan je na sl.6c.

Razrađivao je nekoliko tipova prijemnika kod kojih se koristi termički efekat visokofrekventnih struja. Kod jednog tipa, pokazanog na sl.7, otpornik male mase zagreva gas u posudi koja ne razmenjuje toplotu sa okolinom. Širenje gasa meri se u tankoj

cevdici pomeranjem čepa od tečnosti. Kada se dostigne određeni iznos širenja, zatvaraju se kontakti u cevčici i prijemnik registruje prijem signala. U jednoj drugoj modifikaciji predvideo je upotrebu tankog živinog stuba, ali mu je proračun pokazao da ovo ne bi bilo dovoljno za osetljivi prijemnik pod realno prihvatljivim uslovima. Kod trećeg tipa merio bi promenu otpornosti otpornika male mase i tako bi registrovao prijem signala. Ideje za ovakve aparate su starijeg datuma.

Tesla je na neki način upoređivao prijemnike ali nije jasno rekao kako je to vršio. Samo na jednom mestu pominje da je osetljivost prijemnika proveravao priključivanjem malog kondenzatora paralelno osetljivom uređaju, ali ne kaže ništa o veličini kapacitivnosti i opterećenju ovog kondenzatora.

Tesla je pravio prenosne primo-predajnike. Nažalost, nema podataka gde je sve nosio ove uređaje, ali se prema njegovim kasnijim izjavama vidi da mu nije bio cilj da vrši ispitivanja na velikim udaljenostima⁽⁴⁾. Prijemnike je postavljao na oko milju udaljenosti od predajnika ali je ovom poslednjem pri tome bila smanjena snaga. Pretpostavku o najvećem dometu donosio je na osnovu formula elektrodinamike, za koje kaže da je našao "da su strogo istinite u izvesnom smislu".

Ispitivanja antena

Istraživanja uzemljene monopol antene Tesla je vršio gotovo mesec dana iz dana u dan. Zbog male dužine antene u odnosu na talasnu dužinu, merenje ulazne impedanse sistema antena-zemlja u stvari je bilo merenje kapacitivnosti.

Završna kapacitivnost Tesline monopol antene poticala je od kugle na vrhu antene. S obzirom da se pri raznim dužinama antene ova kugla nalazila na raznim visinama od zemlje, Tesla je želeo da ustanovi zakon promene kapacitivnosti kugle sa visinom. Iz želje da dobije pouzdane podatke vršio je vrlo precizna merenja rezonanse oscilatornih kola u kojima se antenski sistem nalazio kao dodatna kapacitivnost. Merio je, na primer, kapacitivnost vertikalne žice, stuba od metalnih cevi i horizontalne žice. Poređenje mernih rezultata vršio je sa izračunatim vrednostima po

teorijskim formulama za usamljeni izduženi elipsoid (za vertikalnu žicu) i elipsoid u prisustvu provodne ravni (za horizontalnu žicu). Interesantno je da je pomenuo mogućnost da se pri višim frekvencijama neće dobiti tačna vrednost po ovoj metodi zbog razlike između "dinamičke i statičke" kapacitivnosti.

Za merenje kapacitivnosti primenjivao je rezonantnu metodu. Najbolje rezultate dobijao je kada je radio sa varničnim oscilatorom kao pobudnim generatorom ali bez sekundarnog kalema visokofrekventnog transformatora. U ovom slučaju merno kolo, koje je sačinjavao pomoćni kalem i nepoznata kapacitivnost, bilo je slabo spregnuto sa pobudnim kolom varničnog oscilatora tako da je on određivao radnu frekvenciju. Kada je pak, sekundar velikog visokofrekventnog transformatora bio uključen, nastajale su teškoće zbog složenog rada oscilatora.

Moment rezonanse Tesla je određivao po veličini varnice na krajevima pomoćnog kalema ili pomoću raznih indikatora spregnutih sa oscilatornim kolom (gasna cev, sijalica, indikator sa termičkim zagrevnim elementom). Koristio je često pomoćnu petlju oko kalema oscilatornog kola, a primenjivao je i predgrevanje indikatora rezonanse (sijalice sa vlaknom) iz pomoćne baterije tako da malo povećanje napona u trenutku rezonanse dovodi sijalicu do vidljivog usijanja. Sa ovakvom indikacijom uspeo je da meri kapacitivnosti reda 1 pF.

Radio je i na nekim drugim problemima antena. Nacrtao je nekoliko načina vezivanja uzemljene antene da bi se izbegao problem izolacije postolja antene. Ono što je Tesla tada predlagao odgovara tzv. šantno napajanim antenama koje su se pojavile znatno kasnije⁽⁷⁾.

Poslednji eksperimenti u Kolorado Springsu

Poslednjih dana perioda, koji obuhvata Teslin dnevnik, Tesla se posvetio snimanju laboratorije spolja i iznutra. Opisao je ukupno 63 fotografije, od kojih najveći broj pokazuje veliki oscilator u radu sa obiljem strujnica koje izlaze iz gornjih namotaja sekundara i "dodatnog kalema". Verovatno je Tesla nalazio posebno zadovoljstvo u posmatranju svojih veštačkih munja koje su ovde bile i stotinu puta gušće od male varnice njegovog prvog

oscilatora u laboratoriji u ulici Grand Street u Njujorku. U periodu od desetak godina mnogi veliki istraživači radili su na polju "Teslinih" visokofrekventnih struja, ali je Tesla i dalje bio u prvim redovima i pojavljivao se sa novim i neočekivanim rezultatima. Kada je okončao radove u Kolorado Springsu i objavio neke fotografije oscilatora u plamenu strujnica, Tesla je proizveo još jedanput efekte slične onima posle njegovih čuvenih predavanja u Americi, Engleskoj i Francuskoj 1891-1893. Poznati nemački naučnik Slaby rekao je da su aparature drugih istraživača u oblasti radija igračke u poređenju sa Teslinim oscilatorom u Kolorado Springsu.

Pri opisivanju fotografija u dnevniku Tesla je iscrpno objašnjavao sheme veza i uslove rada oscilatora. Fotografije pružaju impresivnu sliku sve grandioznosti izvođenih eksperimenata. Na nekim fotografijama Tesla tvrdi da se zapažaju svetlija mesta koja su posledica "vatrenih lopti" stvorenih veštačkim putem. Dao je i svoju teoriju nastanka ovog fenomena koji je i danas delimična zagonetka. Istraživanja vatrenih lopti nisu bila predviđena planom rada u Kolorado Springsu. Ona su spadala u grupu specijalnih eksperimenata koja su bila, po Teslinim rečima, "od čisto naučnog interesa u to vreme"⁽⁴⁾, a kojima se bavio kad je za to imao vremena.

Neke materijale dnevnika Tesla je koristio prilikom pripremanja patentnih zahteva, koje je podneo između 1899. i 1902. godine. Vođenje beležaka je bila, manje više, stalna praksa u Teslinom radu i one su mu služile kao podsetnik kada bi pristupio publikaciji otkrića.

Dnevnik sadrži izvesne opise prirode, uglavnom okoline laboratorije i nekih nepogoda, ali to je učinjeno samo sa ciljem da se iznesu fakta od značaja za tekuća ili buduća istraživanja. Neposredno po okončavanju radova u Kolorado Springsu Tesla je napisao jedan veliki članak pod naslovom "Problem povećanja ljudske energije", u kome često pominje rezultate iz Kolorado Springsa. O tome kako je radio na pripremi članka, pisao je 1902. godine sledeće⁽⁴⁾: "...Iz časopisa Century" vršili su veliki pritisak na mene da završim članak koji sam im obećao, a njegovo pisanje zahtevalo je svu moju energiju. Znao sam da će članak ući u istoriju jer sam u njemu izneo pred svet, po prvi put,

rezultate koji su bili iznad bilo čega što sam ja ili drugi ostvarivao do tada." Po objavljivanju Teslin članak je zaista izazvao veliku senzaciju i bio prepisivan i citiran mnogo puta. Po načinu pisanja, ono što je u članku napisano o Kolorado Springsu, znatno se razlikuje od teksta u dnevniku.

O rezultatima rada u Kolorado Springsu Tesla je pisao i 1904.godine⁽⁶⁾. Neki zanimljivi podaci mogu se naći i u Teslinim odgovorima pred Američkim patentnim uredom 1902.godine gde se raspravljalo o patentnim pravima Tesle i Fessendena⁽⁴⁾. U pomenutom dokumentu nalaze se i izjave Teslinog saradnika Fritza Lowensteina i sekretara George Scherffa. Tesla je zaposlio Lowensteina aprila 1899.godine u Njujorku. Krajem maja iste godine pozvao ga je u Kolorado Springs, gde je ovaj ostao do kraja septembra 1899.godine, kada je iz porodičnih razloga morao da se vrati u Nemačku. Tesla je bio zadovoljan svojim asistentom i pozivao ga je da se kasnije vrati u Ameriku, što je ovaj uradio, i od februara 1902.godine ponovo je bio Teslin asistent.

Teslina istraživanja u oblasti radiotehnike ne završavaju se eksperimentima u Kolorado Springsu. Po povratku u Njujork 11. januara 1900.godine preduzima energične korake da dođe do sredstava za realizaciju sistema "Svetske telegrafije". Sagradio je zgradu na Long Islandu, noseću konstrukciju antene i počeo da oprema novu laboratoriju. Iz kasnijih beležaka saznajemo da je imao nameru da proveriti svoje ideje o rezonansama zemljine kugle, o kojima je pisao u patentu iz 1900.godine⁽⁸⁾. Želeo je da izvede eksperimente koji su izvršeni tek šezdesetih godina ovog veka, kada je nađeno da Zemlja stupa u rezonansu na 8, 14, 20 Hz. Tesla je predviđao da će rezonanse biti na 6, 18, 30 Hz. Zanesenost velikom idejom sprečila je brzu gradnju Tesline prekookeanske radio-stanice, i kada je okean premošćen jednostavnijom aparaturom, Tesla je morao da prizna da su njegovi planovi bili ne samo da prenese signale na daljinu već i da isproba bežični prenos energije. Komentarišući Teslin poduhvat, jedan od najvećih svetskih eksperata za ova pitanja Wait⁽⁹⁾ je napisao:

..."Sa istorijskog gledišta važno je istaći da je genije Nikola Tesla predvideo svetski komunikacioni sistem koristeći svoj veliki varnički predajnik u Kolorado Springsu 1899.godine. Nekoliko godina kasnije sagradio je veliku radiostanicu na Long

Islandu iz koje je želeo da prenese signale do Cornish obale u Engleskoj. Uz to, predvideo je da primeni modifikovanu verziju sistema za prenos energije do svih mesta na zemljinoj kugli. Nažalost, njegov finansijer J. Pierpont Morgan prestao je da ga potpomaže. Ono što je uticalo na takav razvoj događaja vezano je i za Markonijevu uspešnu demonstraciju prenosa signala preko Atlantika 1901. godine sa mnogo jednostavnijom i jeftinijom instrumentacijom. Uprkos tome, mnogi od Teslinih ranih eksperimenata imaju veliku sličnost sa kasnijim istraživanjima u oblasti prostiranja ekstremno niskih učestanosti."

U jednom pismu Morganu⁽¹⁰⁾ na početku 1902. godine Tesla objašnjava svoja istraživanja i navodi da očekuje tri etape u radu: prvu, u kojoj će ostvariti "prenos malih iznosa energije i izazivanje slabih efekata, koji se jedva mogu primiti pomoću osetljivih uređaja; drugu - prenos većeg iznosa energije što eliminiše potrebu za osetljivim uređajima i omogućuje zadovoljavajući rad svake vrste aparata, koji zahteva mali iznos energije; i treću etapu u kojoj će ostvariti prenos energije u iznosima industrijskog značaja." Za probu prenosa većih iznosa energije predviđao je građenje postrojenja na Nijagari koje bi proizvodilo napon oko 100 miliona volti. Međutim, Tesla nije dobio tražena sredstva pa je posle tri godine uzaludnih napora da okonča postrojenje na Long Islandu odustao od daljih namera i prešao na druga polja istraživanja. O svojoj velikoj zamisli bežičnog prenosa energije pisao je nekoliko puta, i do smrti ostao uveren da će se njegove zamisli ostvariti jednog dana. Danas, kada su poznate i dokazane rezonanse Zemlje (tzv. Schumannove rezonanse⁽¹¹⁾), kada se zna da postoje talasi sa vrlo malim slabljenjem - toliko malim da se pojavljuju i stojeći talasi u sistemu Zemlja-ionosfera, vidi se koliko je Tesla bio u pravu kada je tvrdio da mehanizam prostiranja elektromagnetnih talasa u "njegovom sistemu" nije isti kao u Hertzovom sistemu sa usmerenim zračenjem. Prirodno je što Tesla nije mogao znati da će fenomeni, o kojima je govorio, biti izraziti samo na vrlo niskim frekvencijama jer nikada nije mogao da izvrši eksperimente koje je genijalno zamislio još 1893. godine. S punim pravom i velikim zakašnjenjem, Teslino ime počinje ponovo da se javlja u radovima koji tretiraju pitanja prostiranja radio talasa⁽⁹⁾ i rezonansi Zemlje^(12,13). Verujemo da će

dalje istraživanje Teslinih zapisa pružiti još neke zanimljive detalje o njegovim zamislima na ovom polju.

Objavljivanjem Teslinog dnevnika iz Kolorado Springsa naučna literatura biće obogaćena jedinstvenim delom izuzetnog genija. Pored toga što osvetljava jedan veoma interesantan period Teslinog stvaralaštva, dnevnik je značajan i kao izvor podataka neophodnih za studiju Teslinog dela u celini, a naročito njegove uloge u razvoju radiotehnike.

U pripremama rukopisa za štampu i u prevođenju držalo se pravila da se originalan tekst ne menja čak i kada sadrži manje važne netačnosti (računske ili oko jedinica za snagu i energiju). Predgovor je napisao profesor Veljko Korač. Knjigu je pripremio za štampu Muzej Nikole Tesle u Beogradu uz saradnju većeg broja saradnika, a preveo je profesor Vojin Popović. Za lakše razumevanje i praćenje dnevnika autor je napisao naučne i stručne komentare.

LITERATURA:

1. Nikola Tesla, Lectures, Patents and Articles, Nikola Tesla Museum, Beograd, 1956.
2. Tribute to Nikola Tesla, Nikola Tesla Museum, Beograd, 1961.
3. Nikola Tesla, Dnevnik istraživanja Kolorado Springs 1899-1900, Molit, Beograd, 1976.
4. Testimony in Behalf of Tesla, Interference No. 21,701, United States Patent Office, New York, 1902.
5. Arhiva Muzeja Nikole Tesle u Beogradu, Knjiga isečaka iz novina i časopisa.
6. Nikola Tesla: The Transmission of Electric Energy without Wires, Electr. World and Eng. March 5, 1904, (takode u l., A-153)
7. Brown G.H.: A Consideration of the Radiofrequency Voltages encountered by the Insulating Material of Broadcast Tower antennas, Proc. IRE, 1939, v.27, No.9.
8. Nikola Tesla: US patent No. 787.412, Art of Transmitting Electrical Energy Through the Natural Media, podnet 21. marta 1900., izdat 18.aprila 1905. (takode u l. P-331)
9. Wait, J.R.: Historical Background and Introduction to the Special Issue on Extremely Low Frequency (ELF) Communications, IEEE Trans. on Comm., COM-22, No.4, April 1974.
10. Arhiva Muzeja Nikole Tesle u Beogradu. Pismo Tesle Morganu od 9. januara 1902.
11. Schumann, W.O.: Uber die strahlunglosen Eigen schwingungen einer Luftschicht und einer ionospherenhulle ungenben ist, Z.Naturforsch., Vol.72, 149-154,1952.
12. Jackson, J.D.: Classical Electrodynamics, John Wiley, New York, 1975.
13. Marinčić, A.: Nikola Tesla jedan od utemeljivača elektro-tenike, Voprosi istorii estestvovan i tehniki, AN SSSR,1976.

Prof. Ing. Oldrich Benda, Dr. Sc.
Katedra Teoretickej a Experimentálnej Elektrotechniky
Elektrotechnická Fakulta SVŠT, Bratislava, Czechoslovakia

THE LASER - A NEW TOOL FOR DIAGNOSTICS OF MEDIA WITH RANDOMLY VARYING PARAMETERS

It is well known that the propagation of a laser beam through a turbulent atmosphere, or through thermal flows leads to fluctuations of beam parameters, e.g., its amplitude, phase, direction of propagation, frequency, etc. These effects, undesirable from the point of view of telecommunication technique, give us the possibility of investigating the statistical properties of the randomly varying scalar fields of the index of refraction in air or gases.

Starting from theoretical relations between the statistics of laser beam parameter fluctuations and the statistics of refractive index fluctuations it is possible to estimate the latter by means of a correlation function of the former measured by photodetector or the interference technique.

In the paper new methods for the estimation of the following quantities are described:

- a. the spectrum of turbulence of the refraction index in the wave number representation;
- b. the inner scale of turbulence;
- c. the profile of turbulence along the path of laser beam propagation.

The advantage of the laser technique for diagnostic purposes follows from the fact, that it does not influence the random medium under investigation; at the same time, by using a laser beam we can easily vary its parameters, e.g., the diameter and the focus, and in this way substantially change the kernel of integral equations that have to be solved, which makes the inverse procedure easier.

1. Poglavlje

TESLINI PRONALASCI

Prof.dr. Albert Čebulj, dipl.ing.
Fakulteta za elektrotehniko
Univerze v Ljubljani

NIKOLA TESLA IN USTVARJANJE POLIFAZNIH SISTEMOV

V dobi razvoja večfaznih sistemov je nastopala cela vrsta elektrotehnikov in je na videz zagonetno, da ni nobeno ime v energetiki polifaznih tokov ostalo živo v vsakdanjem življenju.

S tem v zvezi je posebni pododbor zveze nemških elektrotehnikov raziskoval zgodovino polifaznih tokov. Po mnenju pododbora je bistvena realizacija izuma in to naj bi napravil Dolivo-Dobrowolsky.

Referat osvetljuje takratno stanje z gledišča izuma in poti do realizacije in s pregledom stanja gradnje električnih strojev tik pred odkritjem večfaznih sistemov in temeljnih dogodkov v razvoju večfaznih sistemov ugotovi, da je bilo takratno poznavanje električnih strojev že na taki stopnji, da realizacija odkritja polifaznega motorja ni bila več problem in je celotni polifazni sistem Teslovo delo.

NIKOLA TESLA AND THE CREATION OF POLYPHASE SYSTEMS

A number of electrical engineering researchers were active at the time of polyphase system development and it is rather puzzling why none of these names connected with the energetics of polyphase currents have been preserved to date.

In connection with this a special subcommittee of the German Electro-technical Association was charged with investigating the history of polyphase currents. In the opinion of this Committee implementation is more important than invention, and this they believe was done by Dolivo-Dobrowolsky.

The paper discusses the situation from the point of view of invention and its implementation. It also surveys the state of the art in the design of electrical motors just before the discovery of polyphase systems, pointing out that the knowledge of electric motors had by that time reached a level where the implementation of the discovery of the polyphase motor was no longer a problem, and thus establishing that the polyphase system as a whole must be attributed to the work of Tesla.

NIKOLA TESLA IN USTVARJANJE POLIFAZNIH SISTEMOV

1. UVOD

Z življenjem Nikole Tesle se je podrobno ukvarjalo že mnogo avtorjev. Tu naj omenimo izvrstni deli O'Neila /17/ in S.Boksana /40/. Če se omejimo na Boksana /40/, opozarjamo na poglavje "Teslas Epoche der Drehstroms und der Drehstrom-Kraftübertragung" str. 12 do 73.

V dobi razvoja večfaznih sistemov je nastopila cela vrsta elektrotehnikov, ki so reševali najrazličnejše probleme, realizirali velike pionijske projekte in je na videz precej zagonetno, kako da ni nobeno ime v energetiki polifaznih tokov ostalo v vsakdanjem življenju tako živo, kakor drugje na primer imena Röntgen, Pupin, Diesel, Kaplan, Pelton in še vrsta drugih.

Po drugi strani se pritožujejo Nemci, da so premalo priznani. Zato je znanstveni odbor Zveze nemških elektrotehnikov VDE konec leta 1957 ustanovil pododbor, ki naj bi raziskal začetke vrtilnih sistemov in prispevek Nemčije na tem področju. Pododbor so sestavljali F. Hillebrand, ki je predsednik komisije VDE za elektricne stroje, R.Aymans in M.Ischermak. Izdelal je obsirno poročilo, ki je objavljeno kot članek: F. Hillebrand, Zur Geschichte des Drehstromes, ETZ-A, 80, letnik, zv. 13, 1959, str. 409 ... 421 in 453 ... 461. To poročilo posveča izredno pozornost Nikoli Tesli in je prav, da ga bistveno spoznamo, zlasti ker prihaja iz krajev, koder so nekdanj Tesli veliko oporekali. Pri tem pa imamo seveda pravico in dolžnost, da opozorimo, če imamo kje pomisleke.

V referatu se bomo tedaj skozi in skozi ukvarjali z gornjim poročilom in bomo ugotovitve komisije oznacevali s "Komisija-VDE". Vzeti si moramo tudi nekaj svobode glede terminologije. Danasnja enostavna oblika trifaznega sistema je sele plod razvoja; takratni "vrtilni tok" je med celo vrsto sistemov od enosmernega, izmeničnega, večfaznih itd. oznaceval v nekem smislu sistem in lastnost in ne sme se nam zameriti, če bomo večkrat rabili ta izraz. Tudi razni dinamo stroji so nam že toliko odmaknjeni, kakor bodo zanamcem npr. transduktorji.

2. STANJE GRADNJE ELEKTRICNIH STROJEV TIK PRED ODKRITJEM VEČFAZNIH SISTEMOV IN TEMELJNI DOGODKI V RAZVOJU VEČ- FAZNIH SISTEMOV

Preden pričnemo s prikazom ugotovitev komisije-VDE, je nujno potrebno, da se seznanimo z osnovnim stanjem v elektrotehniki v dobi, ko se je začel razvoj večfaznih sistemov. To se nam zdi potrebno tembolj, ker je temu posvečala komisija-VDE malo pozornosti, je pa lahko odločilnega pomena pri vrednotenju kakega dosežka. Med odkritjem in realizacijo je različno dolga pot: če je nastal izum v dobi, ko še niso znani elementi za realizacijo, sta avtorja realiziranega izuma oba - izumitelj in realizator; če je nastal izum v dobi, ko so znani elementi za realizacijo, je avtor samo izumitelj.

1. Prva zasnova večfaznega prenosa je bila podana v letu 1882 (Tesla). Enosmerni stroji so imeli takrat za seboj že velik del razvoja. Poznan je bil izračun elementov električnih strojev. Elektrotehnika je imela z Maxwelllovo teorijo elektrike in magnetizma že od 1856 popolnoma izdelane teoretske temelje.
2. 12. oktobra 1887 je Nikola Tesla prijavil dva US-patenta: 382 280 - Električni prenos energije in 381 968 - Elektromagnetni motor. Oba patenta sta bila podeljena 1. maja 1888. Tesla je prijavil še celo

patentov s področja prenosa energije in motorjev, toda gornja patenta sta temeljna patenta elektroenergetike večfaznih sistemov /15/. 16. maja 1888 je imel Tesla o teh izumih predavanje s predvajanji v American Institute of Electrical Engineers. To predavanje je bilo v izčrpnem poročilu objavljeno v julijski številki leta 1888 v nemški elektrotehniški reviji ETZ /21/.

3. 28. avgusta 1891 je pričel ob priliki elektrotehniške razstave v Frankfurtu obratovati prenos Lauffen-Frankfurt. V času od 12. oktobra 1887, ko je Tesla prijavil svoje temeljne patente, do pričetka obratovanja naprave Lauffen-Frankfurt ni bil prijavljen noben patent, brez katerega ne bi bilo možno obratovanje naprave Lauffen-Frankfurt. Vodilni mozje pri izvedbi te naprave so bili Oskar von Miller, Ch.E.L.Brown, Dolivo-Dobrowolsky in Rathenau.
4. julija 1893 je bila svetovna razstava v Chicagu. Na njej je tovarna Westinghouse prikazala celotno Teslovo delo na področju večfaznih tokov: motorje, transformatorje in generatorje za dvo- in trifazne sisteme. Med temi so bili številni asinhronski in sinhronski motorji, enofazni do šestfazni in zlasti še trifazni s samo tremi vodniki. Motorji so bili različni: rotorji z navitjem in brez navitja, z drsnimi obroči in kratkostični.
5. Leta 1891 so sklenili, da bodo zgradili na Niagarskih slapovih elektrarno. V velikem mednarodnem razpisu so se odločili za Teslov sistem. Že leta 1891 so pri Westinghousu naročili 3 generatorje po 5000 KM. Elektrarna je pričela obratovati leta 1896.

Komisija-VDE pravi uvodoma, da je bila doba odkritja večfaznih sistemov v zamislih prvih strokovnjakov tako daleč pripravljena, da je rešitev bila večkrat že skoraj dosegljiva, ne da bi to opazili. Hitro zaporedje in veliko število zelo podobnih patentov v odločujočih letih in najrazličnejših slučajev pri podeljevanju patentov zelo zamota razplet dogajanj.

Pri tem je treba upoštevati, da je s patentnega gledišča prioriteta podana samo z datumom prijave in besedilom patentnih zahtev. S tehničnega in človeškega gledišča pa igra medtem čas koncepcije iznajditeljske misli, notranje vrednotenje iznajdbe in njeno realiziranje in končno sposobnost, iznajdbo privedi do uporabe in z njo prodreti, prav posebno vlogo. - (A.Č.: Kasneje bomo videli, da te uvodne opombe komisija-VDE močno uporablja: dosledno se drži kriterija realizacije iznajdbe in se pogosto sklicuje na zamisli, ki so bile predmet zaupnih pogovorov in nimajo dokumentacije. Pri teh zamislih navaja podatke nemških elektrotehnikov, deloma popolnoma razumljivo, ker takih podatkov za tuje dežele ni dobila.)

3. FIZIKALNE OSNOVE PRENOSA Z VEČFAZNIMI TOKI

Komisija-VDE prikazuje pot do odkritja vrtilnega polja. Prvi, še zelo nejasen model je napravil Arago. W. Baily je Aragojeve misli razvil naprej. V polju je imel bakreno ploščico, ki se je v vrtilnem polju pričela vrteti /2/. Model je imel takorekoč elemente asinhronnega motorja; Baily je imel jasno sliko o dogajanju, vendar se ni dalje ukvarjal z modelom in tudi ni ugotovljeno, ali so njegovi poizkusi vplivali na delo drugih raziskovalcev. Zelo uspešen model je napravil M. Deprez leta 1883 /3/. Njegovo predavanje je zaradi ozke specialnosti ostalo očitno neopaženo, so pa njegove zamisli tako uporabne in bogate, da je težko razumljivo, kako da Deprez svojega znanja ni znal širše izkoristiti. Glavni raziskovalec vrtilnega polja je Ferraris. Izdelal je polje do konca, napravil motor in imel o odkritju 18. marca 1888 predavanje v akademiji v Torinu /4/. Toda kakšna ironija: Motor je imel samo 50 % izkoristek in zaradi napačne razlage slabega izkoristka je Ferraris prišel do zaključka, da je nesmiselno delati motorje po tem principu. Prišel je tudi do zaključka, da bi se dalo njegovo odkritje uporabiti pri električnih števcih. (A.Č.: Znano je, da je na tem področju Ferraris izredno prodorno uspel). Kljub temu, da je Ferraris

svoj prispevek k razvitju večfaznega motorja tako nizko ocenil, so pripisovali njegovemu predavanju velik pomen. Westinghousova družba se je takoj zanimala za Ferrarisove ideje /2/. Toda kmalu je izostal Westinghousov odgovor, ker je v Združenih državah Amerike medtem stopil v plan Tesla.

4. STANJE PRENOSA ELEKTRICNE ENERGIJE IN PRESKRBE TIK PRED UVAJANJEM VEČFAZNEGA SISTEMA

Komisija-VDE: ... enosmerni stroji so imeli leta 1880 prvi stadij razvoja že za seboj; to je jasno pokazala prva mednarodna elektrotehniška razstava v Parizu 1881.

Na razstavi v Torinu leta 1884 je bil prikazan enofazni prenos 20 kW, 2000 V, 40 km daleč, toda brez motorja, izkoristek prenosa je bil 89 % /8,9/. Poizkus je prepričljivo dokazal, da je izmenični tok zelo enostaven in zanesljiv za prenos na velike razdalje. Odprto je ostalo vprašanje motorja, ki bi bil vsaj približno enakovreden enosmernemu motorju. Motorja se je lotila cela vrsta raziskovalcev /po abecedi/: Bradley, Dolivo-Dobrowolsky, Ferraris, Haselwander, Tesla in Wenström; treba je imenovati tudi imena Borel, Schallengerger in Elihu Thomson.

5. USTVARJANJE TRIFAZNEGA SISTEMA, NJEGOVI IZUMITELJI IN PRVI STROJI

Komisija-VDE: "V naslednjem poizkušamo na podlagi literature in patentov prikazati delež posameznih udeležencev pri razvoju trifaznega prenosnega sistema. Pri tem zaenkrat ne bomo obravnavali vprašanja prioritete."

Charles Schenk Bradley

Ch.S. Bradley je eksperimentaliral z večfaznimi toki in večfaznimi motor-

ji se pred Ferrarisovimi eksperimenti, vendar ni spoznal vrednosti svojih opazanj. To se vidi iz diskusije z M.J.Pupinom /10/. V njegovem delu so značilni zlasti patenti, ki jih je prijavil 8. maja 1887 /11/. 5. oktobra 1888 /12/ in 20. oktobra 1888 /13/.... /11/: Malokrat opazena patentna zahteva ⁹ se glasi: Elektromotor, obstoječ iz induktorja in kotve, pri kateri sta dve točki navitja paroma zvezani z drsnimi obroci, ki jih lahko zvezemo z dvema neodvisnima zunanjima tokokrogoma. S tem je po mnenju Silvanusa P. Thomsona nedvomno opisan večfazni generator in večfazni sinhronski motor. ... /12/: 5. oktobra 1888 vložen patent vsebuje jasen opis in delovanje dvofaznega asinhronskega motorja, pri katerem ima rotor kot primarni del obliko Grammejevega obroča z odcepi k stirim drsnim obročem, medtem ko je izoblikovan stator - kar je omembe vredno - kot kratkostična kletka (A.C.: motor ima se druge zanimivosti, ki pa so tehnološkega značaja). ... /13/: 20. oktobra 1888 vložen patent ima čisto oblikovano misel, kar poveže naslov "Sistem električne razdelitve energije". Sklicujoč se na prejšnje svoje patente, predlaga Bradley odcepe na kotvi ne v štirih, temveč v treh točkah, ki so simetrično premaknjene za 120° . Generator in motor imata razen drsnih obročev tudi komutator za odzemanje vzbujalnega toka.

S tem je Bradley 20. oktobra 1888 v tehnično čisti in nedvoumni obliki opisal trifazni sinhronski generator, trifazni sinhronski motor in trifazni indukcijski motor s krakosticno kletko kot sredstvo za razdelitev električne energije.

Friedrich August Haselwander

... prišel je na misel, da bi izločil obe nasprotujoči si operaciji usmerjanja na komutatorjih, opustil komutatorja, zvezal tri fazno premaknjene toke primarnega stroja s tremi drsnimi obroči in zvezal s tremi vodniki ravno tako v zvezdi zvezane tuljave sekundarnega stroja.

Toda na poti do svojih pravic je imel Haselwander smolo, ki ji je težko najti podobno. Napravo, ki jo je zgradil, je moral predelati na enosmer-
ni tok, ker naj bi obratovanje z izmeničnim tokom motilo telegrafski
vod ... patentni zastopnik mu je zavlekel prijavo patenta ... in nazadnje
še uradnik na patentnem uradu ni razumel bistva patenta. Vrnil je pri-
javo, češ da je treba vložiti dve prijavi - ločeno za generator in motor
in sploh ni vedel, da Haselwander prijavlja sistem prenosa, ne pa stro-
je kot take. Končno je bila prijava zavrnjena, ker je bil medtem Tesla
že podeljen patent 382 280, ki ga je Tesla prijavil 12.10.1897. "Tako so
ostale Haselwanderjeve ideje praktično brez patentne zaščite".

Komisija-VDE dobesedno: "V deloma zelo ostro patentno-pravno polemi-
ko Haselwanderja proti Dolivo-Dobrowolskemu se tu ne bomo spuščali,
ker principialna patentno-pravna prioriteta Haselwanderja na področju
vrtljivega sistema nasproti Dolivo-Dobrowolskemu ni dvomljiva. Razen
tega velike zasluge obeh izumiteljev niso osnovane na prioriteti njihov-
vih prijav ali formulaciji patentnih zahtev." (Opomba A.C. - Bralec že
mogoče opazi, da komisija-VDE skuša zmanjšati pomen patentne prijave
in da hoče prikazati ključ rešitve večfaznega sistema v motorju. Dva
kriterija, ki izločata druge in govorita izključno v prid Dolivo-Dobro-
wolskemu!)

Nikola Tesla

Največjo pozornost posveča poročilo komisije-VDE Nikoli Tesli. Njemu
je posvečeno največje poglavje s številnimi slikami in navedbami naj-
različnejših podatkov. Poudarjena je Teslova genialna osebnost: poglavje
je pisano z veliko toplino. Med vsemi raziskovalci navaja poročilo ko-
misije-VDE edino pri Tesli tudi življenjepis. Poglavje se prične:

"Najvidneje izgleda povezan z izumom večfaznega motorja Nikola Tesla,
ki je bil genialna osebnost s tako mnogostranskimi močno izraženimi
lastnostmi, da moramo v nadaljevanju tu pa tam poseči v njegov življe-
njepis, da nam bodo razumljive nekatere stvaritve. Er wurde am 9. Juli

1856 in Smiljan, einen kleinen Ort in Grenzprovinz Lika (Österreich-Ungarn, jetzt Jugoslawien) geboren." Ze leta 1875, torej pri 19 letih, se je bavil s problemom, kako bi pri enosmernih strojih odpravil komutator.

... sledi opis Teslovega življenja do prihoda v Ameriko.

... 1882 prvi koncepti prenosa brez komutatorjev. ... 1884 predvajanje dvofaznega sinhronskega generatorja in dvofaznega sinhronskega motorja v Strassbourgu: razocaran odšel v Ameriko. ... Edison, takrat že svetovno znani izumitelj, je bil tehnično in poslovno preveč zaposlen, da bi imel interes za novi izmenični ali večfazni sistem. ... opisana so prva težka Teslova leta v Ameriki. ... kratek opis poizkusov in zamisli, ki so 12. oktobra 1887 dovedli do prijave znamenitega US-patenta 282 280 /15/ in celo vrsto nadaljnjih patentnih prijav. Patent 382 280 je bil podeljen 1. maja 1888. Značilno je klavzuliranje patentne zahteve: "Metoda za prenos električne energije, ki obstoji v tem, da dosežemo kontinuirno premikanje polov kotve ali induktorja ali obeh delov motorja, in sicer s proizvajanjem izmeničnih tokov v neodvisnih tokokrogih, v katerih so vključene tuljave za magnetenje enega ali obeh elementov, kakor je bilo tu pojasnjeno." V zahtevi za nemški patent DRP 47 885 /19/, prijava od 1. maja 1888, patent podeljen 17. julija 1889, je formulacija mnogo jasnejša: "Motor, katerega tuljave so razdeljene v več med seboj ločenih skupin, ki so zvezane z enako v deljene skupine razdeljenimi tuljavami generatorja, tako da lahko tvorimo ravno toliko neodvisnih tokokrogov, kolikor je skupin, ki so tako vezane, da povzročijo gibanje kotve motorja s premikanjem polov v motorju."

Patentne zahteve podajamo (komisija-VDE, op. A.Č.) tu dobesedno, ker so pomembne za patentno-pravno prioriteto na področju večfaznega motorja in dajejo vpogled v način Teslovega razmišljanja. Tako v svojih predavanjih kakor v besedilu patentne prijave je nastajanje rotirajočega magnetnega polja označeno kot "progressing shifting of the magnetism" in je s pomočjo številnih slik zelo nadrobno razstavljeno. Komisija-VDE pravi:

To je znak, da Tesli takrat niso bila znana Ferrarisova dela z njihovimi enostavnimi izvajanji. (Op.A.C.: Čeprav govori komisija tu o motorju, ni naveden Teslov US-patent 381 968, ki se nanaša na motor.)

Dalje poroča komisija-VDE o nadaljnjem delu na patentih, vendar ti patenti niso temeljnega značaja.

Zatem je omenjeno predavanje Nikole Tesle dne 16. maja 1888, o katerem je A. du Bois-Reymond podal v julijski številki 1888 obsirno poročilo /21/. Du Bois-Reymond je sicer dvomil, da bo nova ideja prodrla, toda Westinghouse je šel takoj k Tesli in kupil vse patente. Z razvojem motorja so pa imeli težave in je tovarna Westinghouse leta 1890 ustavila poizkuse z motorjem. Temu zacasnemu neuspehu je kriv Tesla, ker se je prevec posvečal osnovnim stvarjem, tj. fizikalnemu jedru problema, za racunsko obdelavo in konstrukcijsko realizacijo se pa ni zanimal. Imel je izreden spomin in izrazit čut za predstavo in zato ni nikdar delal sestavnih risb ali z merami opremljenih podrobnih risb; jih pač ni potreboval. Westinghouse-ova družba je na predlog njenega glavnega inženirja B.G. Lammeja leta 1891 obnovila ustavljene poizkuse in leta 1892 je dal motor presenetljivo dobre rezultate /38/. Vendar resignirano ugotavlja Lamme, da je bila kratkostična kotva v Evropi že prej preizkusena. Sploh so ti poizkusi tekli eno leto po elektrotehniški razstavi v Frankfurtu, ko so se na mednarodnem elektrotehniškem kongresu lahko prepričali o neoporecnem obratovanju prenosa Lauffen-Frankfurt in razstavljenih motorjev na vrtilni tok.

Mihael von Dolivo-Dobrowolsky

Komisija-VDE: Glavni elektrotehnik tovarne AEG Michael von Dolivo-Dobrowolsky je bil manj tako imenovani izumitelj ali odkritelj, temvec je bolj bil izkusen, spreten inženir z veliko odločnostjo, ki je z zanimanjem zasledoval domačo in tujo tehnično literaturo in je bil dobro seznanjen s problemi s področja električnega prenosa energije. Poznal je Ferrarisove poizkuse in spoznal miselno napako, ki je zavedla Ferrarisa,

da je opustil poizkuse z motorjem. Pri tem je dobro spoznal pomen slipa. Dobro mu je uspel motor z močjo 0,1 KM. razvil je kotvo s kratkostrično kletko in 8. marca 1889 prijavil patent "kotvo za motorje na izmenični tok". Patent je podeljen 19. aprila 1890 DRP 51 083 /22/. Patentna zahteva jasno zahteva, da morajo biti palice v kotvi na koncih kratko sklenjene. V patentu so opisane kletke vseh oblik. Toda dodatne patentne zahteve so bile po navedbi Dolivo-Dobrowolskega zaradi nekaterih formalnih napak zavrnjene.

V letu 1889 je zgradil Dolivo-Dobrowolsky še en motor, in sicer za moč 1 do 5 KM. Ta motor je imel slabe zagonske lastnosti in zelo močen šum. Pri raziskovanju tega motorja je Dolivo-Dobrowolsky spoznal velik pomen razsipanja in potrebo, da se predvidi "spremenljiva stopnja kratkega stika", da bi bilo možno kombiniranje dobrega zagona in majhnega slipa.

Oba motorja so predvajali vodji Maschinenfabrik Oerlikon in glavnemu Oerlikonovemu inženirju Ch.E.L.Brownu. AEG in MFO sta pri tem sklenili licenčno pogodbo.

Sredi leta 1890 je začel Ch.E.L.Brown sam studirati večfazni motor za 2 KM. Novost tega motorja so bili zaprti ali polzaprti utori.

Med AEG in MFO so se nato dogovorili, da bodo skupaj razvijali večfazni sistem. MFO naj bi delal na področju visoke napetosti; prvemu poizkusnemu motorju AEG je takoj sledil poizkusni motor MFO, ki je imel določen konstrukcijski napredek. MFO je tudi razvila transformator z oljnim hlajenjem. Ch.E.L. Brown je za izboljšanje lastnosti teka in zmanjšanja "tuljenja" leta 1890 eksperimentiral s štirimi različno izvedenimi rotorji. Pri tem je spreminjal število utorov, oblike utorov, vrsto navitja in izvedbo železnega dela /2/.

Komisija-VDE pravi dobesečno: Morda so ravno te študije in močna angažiranost Ch.E.L.Browna na področju enofaznega motorja ključ za razlago zelo neljube korespondence med Dolivo-Dobrowolskim in Ch.E.L. Brownom v letu 1891, torej po izstopu Ch.E.L. Browna iz Maschinenfabrik Oerlikon.

Korespondenca je objavljena v /25/; v njej Ch.E.L. Brown odreka Dolivo-Dobrowolskemu kakršne koli zasluge pri razvoju motorja na vrtilni tok in pusti v tem pogledu veljati samo Teslo in sebe samega. V več pismih tujim revijam se izraža zelo drastično: "the three phase current as applied at Frankfort is due to the labors of Mr. Tesla and will be found clearly specified in his patents" in dalje: "Edino novo, kar je frankfurtska razstava prinesla na področju vrtilnega toka, so bile konstrukcijske izboljšave, ki jih v celoti brez kakrsnekoli izjeme zahtevam za sebe (claim as my own without exception)" /23/. Kljub tem izjavam je treba ugotoviti, da je bil ob sodelovanju Dolivo-Dobrowolskega in Ch.E.L. Browna v najkrajšem času razvit motor na vrtilni tok z majhnim razsipanjem in razdeljenim večfaznim navitjem in narezanim enosmernim navitjem. Vec se nam ni treba ukvarjati s svojevrstnim Ch.E.L. Brownovim stališčem glede večfaznih sistemov: stališče je pri ostroumnem inženirju, ki je bil uspešen na številnih področjih, mogoče razlagati samo z njegovim dolgotrajnim intenzivnim delom na problemih enofaznih motorjev. Tako komisija-VDE.

Jonas Wenström

V svojem patentu /26/ je Jonas Wenström opisal vse dele prenosa z vrtilnim tokom in zaščitil z dvanajest skrbno formuliranimi zahtevami. Dvomljivo je, da bi Wenström poznal dela Ferrarisa, Bradleya in Dolivo-Dobrowolskega ... Bil pa je eno do dve leti za drugimi.

6. MEDNARODNA ELEKTROTEHNIŠKA RAZSTAVA V FRANKFURTU IN PRENOS LAUFFEN-FRANKFURT

Pobudnik tega velikega projekta je bil Oskal von Miller. Generator je zgradila Maschinenfabrik Oerlikon, Švica. Podatki generatorja: 300 KM, 50 V, 1400 A, 150 vrt/min pri 40 Hz, 32-polni rotor krempljastega tipa. Izkoristek generatorja je bil 95,4 %. Osnovni koncept transformatorja je AEG. Transformator je bil po predlogu Ch.E.L. Browna oljni. Maschinenfabrik Oerlikon je napravila obsežne visokonapetostne poizkuse zaradi študija prenosa z napetostjo 20 do 30 kV. Po teh poizkusih je bilo med dru-

gim ugotovljeno, da vod ne bo vplival na obratovanje telefona in telegrafa.

MFO je dobavila dva transformatorja po 150 kVA. AEG pravtako dva po 150 kVA. Pri napetosti do 16 kV so na vsaki strani uporabili po en transformator, pri napetosti h 20 do 30 kV so visokonapetostna navitja obeh transformatorjev zvezali zaporedno. Visokonapetostni vod je zgradila posna uprava. Izvedba izolatorjev je rezultat poizkusov in osnutkov Ch.E.L. Browna.

Za obratovanje crpalke na razstavišču je AEG zgradila trifazni motor za 100 KM. Motor je moral biti izdelan v najkrajšem času in dobavljen brez preizkusanja. Ker so bile izkušnje na motorjih za 0,1,2 in 5 KM se premajhne, se je Dolivo-Dobrowolsky, da se je izognil tveganju, odločil za tip z drsnimi obroci.

Proti koncu razstave je bil dostavljen na razstavo tudi motor 20 KM od Maschinenfabrik Oerlikon. Motor je imel bobnasto navitje in kratkostično kletko. Motor je imel odlične karakteristike, toda zelo velik zagonski tok.

Naprava Lauffen-Frankfurt je pričela obratovati 28. avgusta 1891.

V uradnem poročilu o obratovanju piše med drugim:

1. Pri prenosni napetosti 8500 do 7500 V je bilo v terciarnih vodih v Frankfurtu pri najmanjši moči 68.5 % in pri največji moči 75.2 % energije, ki jo je oddala v Lauffenu turbina dinamu.
2. Pri najvisji napetosti 25000 V (14 000 do 15 000 V proti zemlji) in 24 Hz je bil pri 180 KM izkoristek približno 75 %.
3. Za izolacijo golih vodnikov uporabljeni izolatorji so se najbolje obnesli.

(Op.A.C.: Naprava Lauffen-Frankfurt je imela za prodor večfazne energije nesporno izreden pomen.)

V nadaljevanju piše poročilo komisije-VDE dobesedno:

Nasproti temu apostrofira znani zaslužni ameriški znanstvenik B.A.Behrend prenos Lauffen-Frankfurt v slavnostnem govoru ob priliki podelitve Edisonove medalje Nikoli Tesli z naslednjimi besedami: "Three years later (po

16. maju 1888) in 1891 there was given the first great demonstration by Swiss engineers of the transmission of power at 30 000 volts from Lauffen to Frankfurt by means of Mr. Teslas system." In v široko zasnovani odlični knjigi W.Wysslinga o razvoju švicarskih elektrarn piše o prenosu Lauffen-Frankfurt med drugim: "Mi smemo z vso pravico govoriti o razvoju švicarske jakotočne elektrotehnike: čeprav je bila naprava sama v Nemčiji, je bila vendar v glavnem izvedena s švicarskimi močmi. Inicijativa izvira od zaslužnega Oskarja von Millerja, ki je po odklonitvi neke nemške tovarne pridobil za idejo prezidenta MFO Petra Huberja in konstruktorja MFO Ch.E.L. Browna.

Profesor ETH v Zürichu E.Dünner je v svojem poslovilnem predavanju o razvoju električnih strojev in razvoju večfaznih sistemov /27/ karakteriziral sumarično: "Od Tesle izvira iz leta 1887 trifazni indukcijski motor: njemu pripisujemo trifazno povezavo (Verkettung). 1888 je pokazal Ferraris cepljenje enofaznega polja v dve nasprotno vrteči se polji polovične amplitude. V ta čas pade tudi začetek gradnje velikih generatorjev za vrtilni tok, katerih prvega je zgradila tovarna MFO za prenos Lauffen-Frankfurt. Projekt je napravil takratni glavni inženir Ch.E.L. Brown. V istem času so začele tudi evropske tovarne proizvajati motorje za vrtilni tok." Haselwander in von Dolivo-Dobrowolsky tudi tu nista omenjena.

7. VPRAŠANJE PRIORITETE

Komisija-VDE: "Iz prednjega vidimo po eni strani, kako daleč so bile razčiščene fizikalne osnove za gradnjo večfaznega motorja, in po drugi strani, kako močna je bila potreba po uporabnem motorju v zvezi z dobrim prenosnim sistemom. V tej situaciji je bila rešitev problema skoraj na dlani in ni čudno, da so se v številnih glavah skoraj istočasno in na zelo podobnih zamislih odlikovale zelo podobne rešitve ...

... eden ima rešitev, vsaj v principu, skoraj v rokah, pa zgreši zaradi napake v sklepanju pomen rešitve (Ferraris), drugi reši skoraj vse, toda samo s patenti, pa ne misli na realizacijo (Bradley). Zopet

pride eden skoraj slučajno do prave rešitve ... toda ni sposoben pro-dreti (Haselwander). Pride neumorni mislec, ki sanja o fantastičnih iz-gledih, ki jih odpira polet njegovih misli, hoče ukrotiti Niagarske sla-pove, toda ni zmožen, da bi hitro zgrabil in našel tehnično uporabno obliko ali navdušil sodelavce za svoje ideje (Tesla)...

... drugi je zopet dve leti zaostal (Wenström)...

Dalje pride nekdo, ki pozna situacijo na področju preskrbe z energijo, ki obvlada materijo suvereno in je navajen premagovati težave pri raz-vijanju električnih strojev, združuje pogum in odločnost in ki ima veliko srečo, da lahko sodeluje s široko gledajočim gospodarstvenikom (Dolivo-Dobrowolsky). Končno je treba imenovati še nekoga, ki ga sicer ne mo-remo označiti za predbojevnika uvajanja polifaznega sistema, ki pa je dal velike prispevke, da se je posrečil odločilni velepoizkus prenosa Lauffen-Frankfurt, s tem, da je rešil visokonapetostne in daljnovidne probleme (Ch.E.L. Brown).

Kako težko je pri takem ozadju pravilno razdeliti zasluge! Kako malo more reči ravno v tem primeru bolj ali manj slučajni datum odločilne patentne prijave o odločilnosti neke storitve! Kako razumljiv je pa tudi občutek marsikaterega prizadetega, da ni dovolj priznan ali je krivično postavljen za drugimi v vrsti zaslužnih izumiteljev in inženirjev. Pri Tesli je bil ta občutek kajpak posebno močno izražen. Njegova nadmočna samozavest je morala biti težko prizadeta, ko je trifazni prenos slavil v Frankfurtu triumfe, medtem ko njegov lastni motor še ni imel uporabne oblike in so pričeli Niagarski projekt izvajati šele 1893. Tudi čezmerne počastitve in priznanja mu niso zadostovale. Tu nekateri značilni primeri: "Every transmission line, every powerhouse, every dynamo and every motor ... is a monument to him" (O'Neill); "Tesla has contributed more to electrical science than any man up to his time" (Lord Kelvin); "Nature and nature's law lay hid in night. God said: Let Tesla be, and all was light" (B.A.Behrend).

Kljub zgornjim opombam o pomenu datumov patentnih prijav so v tem

delu zajeti najvežnjiši patenti večfaznih oziroma vrtilnih sistemov iz kritičnega obdobja. Razen tega so zajeti v pregledu znani datumi prvih objav.

KRONOLOŠKI PREGLED ODLOČILNIH PATENTNIH PRIJAV, PRVIH SPOROČIL IN PRVIH IZVEDB VEČFAZNIH STROJEV V ČASOVNEM OBDOBJU OD 1882 do 1892 /1/

Datum	Ime	Patent, sporočilo, izvedba
1882	Tesla	Prva koncepcija večfaznega prenosa brez komutatorja
1884	Tesla	Predvajanje dvofaznega sinhronskega generatorja in enakega sinhronskega motorja s štirimi zveznimi vodniki v Strassbourgu (modelna izvedba)
1885	Ferraris	Gradnja in poizkusi z modelom dvofaznega induksijskega motorja
8.maja 1887	Bradley	V ZDA patentna prijava številka 390 439: dvofazni sinhronski stroji, generator in motor - z in brez lastnega vzbujanja; štirje zvezni vodniki /11/
julij 1887	Haselwander	Prva koncepcija trifaznega sinhronskega generatorja in sinhronskega motorja. Zaupno poročilo Dr.May-u in H. Voigt-u
12.oktobra 1887	Haselwander	Javni začetek obratovanja trifaznega sinhronskega generatorja z lastnim vzbujanjem: zgrajen po Haselwanderjevih navodilih
12. oktobra 1887	Tesla	US-patentna prijava št. 328 280: dvofazni sinhronski generator in motor;dvofazni induksijski motor s kratkosklenjenim faznim navitjem;štirje zvezni vodniki /15/

Opomba A.Č.: 12. oktobra 1887 je Tesla vložil dve patentni prijavi - 1. ELECTRO-MAGNETIC MOTOR, na katero je bil 1. maja 1888 podeljen patent št. 381 968 in 1. ELECTRICAL TRANSMISSION OF POWER, na katero je bil 1. maja 1888 podeljen patent št. 382 280. Oba patenta imata enake risbe, toda pri patentu št. 328 280 je poudarek na sistemu prenosa, pri patentu št. 381 968 pa na motorju in delovanju motorja v sistemu. Zanimivo je, da komisija-VDE v svojem poročilu nikjer ne omenja patenta št. 381 968.

Datum	Ime	Patent, sporočilo, izvedba
februarja 1888	Haselwander	Poizkusno predvajanje večfaznega prenosa z dvema sinhronskima strojema
18. marca 1888	Ferraris	Predavanje o poizkusih v letu 1885
23. aprila 1888	Tesla	US-patentna prijava št. 390 414: Dynamoelectric-stroj: odjem večfaznega toka na primernih točkah kotve za enosmerni tok, dvofazna izvedba s štirimi zveznimi vodniki, trifazna izvedba s tremi zveznimi vodniki; opisano in prikazano z risbami /20/
aprila 1888	Haselwander	Predosnutek patentne prijave pri H. Uppenborn-u
1. maja 1888	Tesla	Prijava DRP 47 885: "Zveza žičnih tuljav električnih generatorjev s tuljavami motorjev" /19/; ustreza US-patentu št. 382 280
16. maja 1888	Tesla	Predavanje s predvajanji; ustrezno patentni prijavi od 12.10.1887 /15/
Opomba A.Č.: To predavanje je bilo za Teslo usodno. Tesla je napravil enako napako, kakor številni izumitelji - govoril je o svojem izumu, še preden ga je realiziral. Že 16. maja 1888, torej komaj dva tedna po podelitvi patenta in še preden je zgradil poskusne motorje, je imel predavanje o svojih izumih v American Institute of Electrical Engineers. Obsežno poročilo o tem predavanju je komaj dva meseca po predavanju objavil v ETZ A. du Boys - Reymond 21/, glej tudi Schüller /31/!		
21. julija 1888	Haselwander	Vloga prve patentne prijave H 8 144 II/21
25. avgusta 1888	Schallengerger	US-patentna prijava št. 412 932 ¹ ; zvezani (verketter) dvofazni sistem /16/
26. avgusta 1888	Zipernevsky-Déri	Patentna prijava št. 53 416: razporeditev n-faznih izmeničnih tokov /32/
jesen 1888	Dolivo-Dobrowolsky	Pričetek gradnje prvega indukcijskega motorja za vrtilni tek s kletkasto kotvo
5. oktobra 1888	Bradley	US-patentna prijava številka 404 465 cd: dvofazni indukcijski motor s kletkastim statorjem /12/
20. oktobra 1888	Bradley	US-patentna prijava št. 409 450: trifazni generator in motor; sinhronski in asinhronski /13/

Datum	Ime	Patent, sporočilo, izvedba
začetek 1889	Dolivo- Dobrowolsky	Poizkusni motor na vrtilni tok "läuft einwandfrei"
8. marac 1889	Dolivo- Dobrowolsky	Patentna prijava DRP 51 083; kotva za motorje za izmenične toke /22/
9. aprila 1889	Wenström	Britanska patentna prijava štev. 54 23; vrtilni sistem v vseh delih /26/
29. avgusta 1889	Dolivo- Dobrowolsky	Patentna prijava DRP 56 359: razporeditev stebrov in jarmov pri transformatorjih za vrtilne toke /33/
5. decembra 1889	Dolivo- Dobrowolsky	Britanska patentna prijava št. 19 554, zvezdna in trikotna vezava trifazno navitih generatorjev in motorjev /34/
5. decembra 1889	Dolivo- Dobrowolsky	Britanska patentna prijava štev. 19 555 /37/; ustreza prijavi DRP 56 359 /33/
avgust 1890	Ch.E.L. Brown	Gradnja motorja za večfazni tok z odprtimi utori, moč 2 KM
24. januarja 1891	Ch.E.L. Brown	Visokonapetostni poizkusi pri Maschinenfabrik Oerlikon za dokazovanje električnega prenosa energije z neizoliranimi nadzemnimi vodi (goli vodniki, op. A.Č.) pri 20 in 30 kV;
28. avgusta 1891	Dolivo- Dobrowolsky	Pričetek obratovanja prenosnega sistema na večfazni tok Lauffen-Frankfurt; pričetek obratovanja generatorja z močjo 300 KM in motorja z drsnimi obroči z močjo 100 KM
4. oktobra 1891	Dolivo- Dobrowolsky	Prijava DRP 79 608; večfazni transformatorji z razporeditvijo stebrov v eni ravnini /35/
1891	Tesla	Obnova leta 1890 ustavljenega razvojnega dela na večfaznih motorjih pri Westinghouseu
1891	Tesla	Dobri rezultati na novem poizkusnem motorju

ZAKLJUČEK

Ta pregled in predhodno podrobno obravnavanje in vrednotenje del posameznih izumiteljev vodi komisijo-VDE k naslednjemu zaključku:

Tesla je bil prvi, ki se je intenzivno ukvarjal z vprašanji električnega prenosa energije z večfaznimi izmeničnimi sistemi; on je prvi našel osnove za tak prenos in je prvi podal princip večfaznega induksijskega motorja.

Bradley je prvi prijavil patent za dvofazni izmenični prenos energije z dvofaznimi sinhronskimi stroji in štirimi vodniki. Njegov je tudi prvi patent trifaznega induksijskega motorja s popolnoma kratkosklenjenim sekundarnim delom (kletkasti stator).

Haselwander je imel prvi koncepcijo prenosa z vrtilnim tokom s trifaznimi sinhronskimi stroji in tremi vodniki.

Von Dolivo-Dobrowolsky je zgradil prvi enostavni praktično uporabni induksijski motor na vrtilni tok s kratkostično kletko. V široko zasnovanih znanstvenih predavanjih in razpravah je razjasnil bistvo in lastnosti vrtilnega toka in motorjev za vrtilni tok. Prepričan o pravilnosti svojih gledanj in o gospodarskem pomenu sistema vrtilnih tokov se je zavzel z vso svojo osebnostjo za izvedbo prenosa Lauffen-Frankfurt kot prenosa z vrtilnim tokom in je dal dve leti po zgraditvi njegovega prvega 0,1 KM močnega motorja na razstavi v Frankfurtu v normalno obratovanje 100 KM močan motor na vrtilni tok. Dolivo-Dobrowolsky je zato pionir pri uvažanju vrtilnega toka v prenosu energije. Podobna ali skoraj enaka ocena vloge, ki jo je imel Dolivo-Dobrowolsky, je tudi v vrsti del, študij in dopisov številnih avtorjev. Naj tu omenimo samo biografsko skico W. Möbus-a /29/, študije L. Schüller-ja o izumu motorja za izmenični tok /30, 31/ in dopis W. Schuiskega časopisu ETZ /31/, koder Schuisky izraža prepričanje, da lahko smatramo za ustvarjalca modernega prenosa z vrtilnim tokom samo Dolivo-Dobrowolskega. Tako komisija-VDE!

L.Schüler, ki je bil nekaj let sodelavec Dolivo-Dobrowolskega, piše /31/, da se je Dolivo-Dobrowolsky nedvomno opiral na Ferrarisa /4/ in zlasti na Teslino predavanje 16.maja 1888, ki je bilo obširno prikazano v ETZ /21/. Takoj po predavanju je Dolivo-Dobrowolsky začel graditi poizkusni motor. Schüler pravi, da je značilno, da je Dolivo-Dobrowolsky prijavil samo en patent na tekač s kletko (DRP 51 083), ki so ga kmalu na različne načine obšli. Tudi sicer je o priznavanju zaslug Dolivo-Dobrowolskemu precej zadržan. Na koncu pravi: "Slavo za izum motorja za vrtilni tok je treba deliti med Teslo in Dolivo-Dobrowolskym; Tesla je najprej objavil teoretske osnove in prijavil prve patente; Dolivo-Dobrowolsky je dodal nadaljna važna spoznanja in pokazal, kako je treba graditi praktično uporaben motor."

W.Schuiskey je v svojem dopisu /31/ kratek in priznava vse samo Dolivo-Dobrowolskemu. Delo drugih (Bradley-a in Tesle) "ni imelo praktičnih rezultatov". Med drugim pravi: "Med iznajdbo principa in realizacijo v življenju je še zelo veliko dela. Niso vse iznajdbe sposobne za življenje in vsak izumitelj ne spozna takoj pomena svoje iznajdbe." Zelo spoštujemo Schuiskega, toda dopis Schuiskega ne zdrži nobene kritike. Ali je med iznajdbo principa in realizacijo v tem primeru res veliko dela? Smo v dobi med 1887 in 1892: Enosmerni stroji so imeli že velik del razvoja za seboj, enosmerne stroje so takrat že računali, konstruirali - ne risali. Elementi električnih strojev so bili že dobro poznani, ni bilo več navijanja tuljav na slepo srečo - Maxwelllova teorija elektrike in magnetizma je iz leta 1856, znana torej že 31 let in Tesla jo je poznal in (prav gotovo) tudi znal. Nismo v dobi prvih poizkusov električnih strojev, vsi vemo, da je takrat cela množica drvela proti cilju. Ali Schuiskey ni pogledal datumov v pregledu? Tesla je imel predavanje 16. maja 1888, julija 1888 je bilo predavanje objavljeno v ETZ, jeseni 1888 je Dolivo-Dobrowolsky začel delati motor in v začetku 1889 je bil motor gotov. Je to "zelo veliko dela"? Tesla je 1891 ponovno začel z motorjem, ki ga je opustil 1890 in bil leta 1892 gotov. Je to "zelo veliko dela"? Teslove

iznajdbe naj bi "ne bile sposobne za življenje"?! Prav svojevrstno pa je, da pride Schuisky ob Tesli na misel "... in vsak izumitelj ne spozna takoj pomena svoje iznajdbe."! V poročilu komisije-VDE vidimo, da Dolivo-Dobrowolskemu kar na več mestih osporavajo prispevek na področju prenosa z vrtilnim tokom, npr. B.A. Behrend, W. Wyssling, Ch.E.L. Brown /25/, E. Dünner /27/ in tudi B.G. Lamme /38/ ga ne priznava, čeprav Lamme ni bil Teslov prijatelj. Ali ne vidimo, kako poudarja komisija-VDE vlogo Ch.E.L.Browna pri projektu Lauffen-Frankfurt in sodelovanje Browna pri delu Dolivo-Dobrowolskega na motorju? Ali ni opaziti iz poročila komisije-VDE, da je uspeh Dolivo-Dobrowolskega predvsem v rutinski finalizaciji idej drugih? In brez težav pridemo do zaključka: Če bi ne bilo Teslovih osnov, Dolivo-Dobrowolsky ne bi imel na čem graditi - Tesla je pa zgradil svoj prenos in motor, ne da bi za to potreboval Dolivo-Dobrowolskega.

Poročilo komisije-VDE je najvišje priznanje Nikoli Tesli. Na začetku smo povedali, zakaj je bila sestavljena ta komisija. Zato ji ne smemo očitati, da je Dolivo-Dobrowolsky tako prikazan.

Bistveno drugačen pa bi bil zaključek, če bi bil v razpravo širše zajet tudi Teslov US-patent št. 381 968 "Electromagnetic motor", ki je fundamentalni patent za indukcijski motor. Kako, da so ta patent izpustili?

. . .

Prerivanje, ali naj bo na Niagari večfazni ali enosmerni tok, je vzelo dragoceni čas. Zagovornik enosmernega toka T.A. Edison je bil v elektrotehniki takrat že tak velikan, da se proti njemu ni bilo lahko boriti, čeprav je v tem primeru zagovarjal zastarele koncepte. In tako je velika demonstracija večfaznega toka Lauffen-Frankfurt prehitela Teslovo Niagaro. Tesla je bežal za srečo iz Evrope v Ameriko: v Ameriki je mislil, v Evropi pa so izkoriščali njegove misli. Prerivanje z Edisonom je krivo, da govorimo samo o trifaznih sistemih in ne o Teslovih sistemih, da v življenju moderne elektroenergetike ni Teslovo ime povezano tako, kakor Pupin s pupinizacijo, Röntgen z rentgenologijo,

Diesel z dieselskim motorjem in v življenju razočarani Kaplan s Kaplanovo turbino.

Tako je Teslovo ime znano predvsem v Teslovi drobni dejavnosti na področju Teslovih tokov in Teslovih visokofrekvenčnih transformatorjev.

Pozno je prišlo priznanje Teslovemu delu na področju večfaznih tokov. Teslovo ime v energetiki ne bo slišati na vsakem koraku, kakor drugje imena Pupin, Röntgen, Diesel, Kaplan. Toda v poročilu komisije-VDE je dobil priznanje od naslednikov tistih elektrotehnikov, ki so z združenimi močmi zgradili za Nikolo Teslo tako nesrečni prenos Lauffen-Frankfurt.

LITERATURA

- /1/ Hillebrand, F.: Zur Geschichte des Drehstromes, ETZ-A, 80. letnik, zv. 13, 1959, str. 409 ... 421 in 453 ... 461
- /2/ Thompson, S.P.: Polyphase electric currents and alternate-current motors, 2.izd. Zal.Spon & Chamberlain, New York 1900
- /3/ Deprez, M.: Sur le synchronisme électrique de deux mouvements relatifs et de son application à la construction d'une nouvel bussol électrique, Comptes rendus, Zv. 96 (1883), str. 1193 ... 1194
- /4/ Ferraris, G.: Atti della Reale Academia delle Scienze di Torino, Zv. 23 (1888), str. 360 ... 375
- /5/ Sahulka, J.: Theorie des Ferrarischen Drehfeides, ETZ, Zv. 12 (1891), str. 537... 539
- /6/ Miller, O.: Über die verschiedenen Systeme der Stromvertheilung zur Beleuchtung und Kraftübertragung in den Städten, ETZ, Zv. 2 (1881), str. 613 ... 617
- /7/ Thury, R.: Kraftübertragungen auf grosse Entfernungen durch hochgespannten Gleichstrom, ETZ, Zv. 51 (1930), str. 113 ... 122
- /8/ Müller, K.E.: 50 Jahre Drehstrom - Kraftübertragung, Bull. Oerlikon 1941, str. 1437 ... 1443 in 1446 ... 1452
- /9/ Petersen, W.: Entwicklung der Krafterzeugung und Kraftübertragung der letzten 50 Jahre in Deutschland. ETZ, Zv. 51 (1930), str. 107 ... 113
- /10/ Pupin, M.: On polyphased generator, Trans. AIEE, Zv. 8 (1890/1891), str. 562 ... 585 in 586 ... 597
- /11/ Bradley, Ch.Sch.: Dvofazni sinhronski generator in motor z Grammejevim obročem; US-patent 390 439 od 2.10.1888 - prijavljen 8.5.1887
- /12/ Bradley, Ch.Sch.: Dvofazni aninhronski motor s kratkostično kletko v statorju; US-patent 404 465 od 4.6.1889 - prijavljen 5.10.1888

- /13/ Bradley, Ch.Sch.: Trifazni sinhronski generator in motor z in brez lastnega vzbujanja: US-patent 409 450 od 20.8.1889 - prijavljen 20.10.1888
- /14/ Ruppel, S.: Aus Geschichtstafeln der Elektrotechnik 1881 do 1931, izdano ob 50-letnici elektrotehniškega društva v Frankfurtu
- /15/ Tesla, N.: Prenos električne energije s štirimi vodniki, dvofazno: US-patent 382 280 od 1.5.1888 - prijavljen 12.10.1887 (Temeljni patent)
- /16/ Schallenberger, O.B.: Razdelilni sistem za zvezan dvofazni tok s povratnim vodnikom; US-patent 412 932 od 15.10.1890 - prijavljen 25.8.1888
- /17/ O'Neil, J.: The Life of Nicola Tesla, Zal.Ives Washburn, New York 1944
- /18/ Tesla, N.: A new system of alternate current motors and Transformer, Trans, AIEE, Zv. 5 (1887/1888), str. 308 ... 325
- /19/ Tesla, N.: Zweiphasiger Synchronmaschinen - Generator und Motor. Zweiphasiger Asynchronmotor mit in sich kurzgeschlossenen Phasenwicklungen: DRP 47 885 od 17.7.1889 - prijavljen 1.5.1888, ustreza US-patentu št. 382 280 (L 15)
- /20/ Tesla, N.: Odjem večfaznega toka na primernih točkah kotve za enosmerni tok : štirje ali pet zveznih vodnikov; US-patent 390 414 od 2.10.1888 - prijavljen 23.4.1888
- /21/ Bois-Reymond, A.du: Referat o Teslovem predavanju, ETZ, Zv. 9 (1888), str. 343... 344 (julij 1888)
- /22/ Dolivo-Dobrowolsky, M.: Käfiganker für Wechselstrommotoren in allen Formen, auch Mehrnutanker; DRP 51 083 od 19.4.1890 - prijavljen 8.3.1889
- /23/ Brown, Ch.E.L.: Reasons for the use of the three-phase current in the Lauffen-Frankfurt transmission, Electr. Vld. zv. 18 (1891), str. 346
- /24/ Brown, Ch.E.L.: Nicht synchron laufender Motor für gewöhnlichen Wechselstrom, System Ch.E.L. Brown, ETZ zv. 14 (1893) str. 81 ... 84
- /25/ Brown, Ch.E.L.: Erwiderung auf den Artikel von Herrn M.v. Dolivo-Dobrowolsky (L 24), ETZ zv. 14 (1893), str. 178. 263 in 285
- /26/ Wenström, J.: Sinhronski in asinhronski stroji za vrtilni tok, večfazni transformatorji, zvezdna in trikotna vezava; britanski patent 54 23 od 10.5.1890 - prijavljen 9.4.1890 (na Svedskem prijavljen 20.1.1890)
- /27/ Dünner, E.: Entwicklung der elektrischen Maschinen, Bull. Schweiz, el. Ver. zv. 48 (1957), str. 503
- /28/ Tesla, N.: Vezava transformatorja in pripadajočega dvofaznega generatorja, štirje zvezni vodniki; DRP 47 012 od 10. 5. 1889 - prijavljen 1.5.1888, ustreza v glavnem US-patentu št. 382 282
- /29/ Möbus, W.: Michael von Dolivo-Dobrowolsky, ETZ-B, zv. 6 (1954), str. 76
- /30/ Schüller, L.: Die Erfindung des Drehstrommotors, Elektrotechn. zv. 2 (1948), str. 93 ... 95

- /31/ Schüller, L., in Schuiskey, W.: Michael von Dolivo-Dobrowolsky, ETZ-B, zv. 6 (1954), str. 180
- /32/ Zippernovsky, C., in Déri, M.: Razdelitvena razvrstitev za 2-, 3- ali splošno n-fazne izmenične toke z $2n$ ali $(n+1)$ vodniki; DRP 53 416 od 22.9.1890 - prijavljen 28.8.1888
- /33/ Dolivo-Dobrowolsky, M.v., in AEG: Večfazni transformator z radialno usmerjenimi železnimi jedri in dvema koncentričnimi sklepnimi jarmi; DRP 56 359 od 22.5.1890 - prijavljen 29.8.1889
- /34/ Dolivo-Dobrowolsky, M.v., in AEG: Improvements in the connections of alternating current generators and electric motors; Brit.patent 19 554 od 18.10.1890 - prijavljen 27. 8. 1890
- /35/ Dolivo-Dobrowolsky, M.v., in AEG: Večfazni transformator z razporeditvijo stebrov v eni ravnini; DRP 79 608 od 4.3. 1895 - pripravljen 4.10.1891
- /36/ Tesla, N.: Vzbujanje polja večfaznega motorja z enosmernim tokom pri približno doseženem sinhronizmu; US-patent 382 281 od 1.5. 1888 - prijavljen 30.11.1887
- /37/ Dolivo-Dobrowolsky, M.v., in AEG: Večfazni transformator z radialno usmerjenimi železnimi jedri in dvema koncentričnimi sklepnimi jarmi; Brit. patent št. 19 555 od 18. 10. 1890 - prijavljen 5.12. 1889
- /38/ Lamme, B.G.: The story of the induction motor. I. Amer. Inst. electr. Eng. zv. 1 (1921), str. 203 ... 223
- /39/ Popović, V., Horvat, R., in Nikolić, N.: Nikola Tesla, Zal. Muzej Nikole Tesle, Beograd 1956
- /40/ Bokšan, S.: Nikola Tesla und sein Werk, Zal. Deutscher Verlag für Jugend und Volk, Leipzig-Wien-New York 1932
- /41/ Cebulj, A.: Nikola Tesla v svetlobi zgodovine večfaznih sistemov, Elektrotehniška zveza Slovenije. 1970, str. 13 ... 44

Hercegovac Enes
Sabljić Sead
ELEKTROPRIVREDA BiH
ZOOOR na slivu Trebišnjice
Trebinje

ASINHRONO POKRETANJE VELIKIH SINHRONIH GENERATORA

U referatu se govori o potrebi za vršnom električnom snagom te o njenom zadovoljenju pomoću pumpnih hidroelektrana. Ukratko se navode prednosti pumpnih hidroelektrana kao i razni načini pokretanja u pumpnom pogonu s posebnim osvrtom na sinhroni zalet jedinica pumpne elektrane Čapljina.

ASYNCHRONOUS STARTING OF LARGE SYNCHRONOUS MACHINES

Peak loads are generally recognized as necessary. One of the ways to meet this requirement are pumped storage power stations, which offer several advantages as compared with other solutions. Several starting methods can be applied in pumping operation. The asynchronous starting of the units of the Čapljina pumped storage power station is reviewed in particular.

Elektroenergetske potrebe su u cijelom svijetu iz godine u godinu sve veće. Već prema prirodnim mogućnostima (izvorima) pojedine zemlje pokrivaju te potrebe iz hidro i termoenergetskih objekata. Međutim, te potrebe u većini zemalja prekoračuju mogućnosti podmirenja iz hidroenergetskih postrojenja pa se zbog toga sve više grade termoenergetski izvori s velikim termoblokovima kao i nuklearne elektrane. Uz izgradnju takvih postrojenja neminovno se javlja popratna pojava, tj. kako riješiti potrebe stalnog vršnog opterećenja s jedne strane, a s druge na koji način riješiti problem tehničkog minimalnog opterećenja termo i nuklearnih elektrana, koje u pojedinim vremenskim intervalima prekoračuje opterećenje mreže.

Rješenje ovog problema se može realizirati izgradnjom suvremenih pumpno-akumulacionih elektrana koje uz to imaju niz drugih korisnih osobina za elektroenergetski sistem, i to:

- Višak električne energije u satima male potrošnje se može uskladištiti pumpanjem u gornji bazen te koristiti turbiniranjem u satima vršnog opterećenja. Na taj se način postiže veća konstantnost opterećenja turbo jedinica i poboljšava rentabilitet rada velikih termo i nuklearnih elektrana i elektroenergetskog sistema u cjelini.
- Pumpno-akumulacione elektrane su sposobne za brzo ulaženje i izlaženje iz pogona, prikladne su za brze promjene opterećenja, tj. karakterizira ih velika pogonska fleksibilnost.
- U slučajevima naglog ispada potrošnje ili nekog od proizvodnih strojeva mogu prelaskom iz turbinskog u pumpni pogon ili obrnuto izvršiti veoma korisne intervencije i spriječiti nepoželjne moguće perturbacije u elektroenergetskom sistemu uzimajući, odnosno dajući odgovarajuću snagu i energiju.
- Prikladne su za uključenje u regulaciju snaga - frekvenca, u regulaciju reaktivne energije i u kontrolu, odnosno održavanje napona mreže.
- Ove elektrane se odlikuju visokim stepenom raspoloživosti.

Slična pojava, odnosno zakonitost, vrijedi i za našu zemlju. Porast potrošnje sistema i snaga elektrana rastu iz godine u godinu. Iako Jugoslavija raspolaže s još relativno velikim mogućnostima iskorištenja vodnih snaga u svrhu proizvodnje električne energije, i kod nas se sve više grade termoelektrane s jedinicama sve veće snage, a počeli smo već i s izgradnjom prve nuklearne elektrane. Ako tomu dodamo da smo do sada izgradili većinu hidroelektrana s relativno malim instaliranim protokom, praktički s karakteristikama godišnjeg korištenja sličnim kao kod termoelektrana, onda se lako može razumjeti potreba da se i kod nas grade elektrane koje mogu riješiti prije navedene probleme tj. potrebe u vršnoj snazi i energiji uz sve ostalo rečeno s tim u vezi.

S obzirom na navedene karakteristike izgrađenih naših

hidroelektrana i gradnju novih termoelektrana s većim agregatima kao i nuklearnih elektrana, smatramo da bi za rješenje navedenog problema kod nas bio poželjan principijelni redoslijed izgradnje odgovarajućih objekata kako slijedi:

- a) Povećanje instalirane snage postojećih hidroelektrana ugradnjom novih proizvodnih jedinica, pogotovo tamo gdje je na raspolaganju veća akumulacija, pa takvo postrojenje može uz ostalo predstavljati veoma važnu rezervu u elektroenergetskom sistemu u slučaju ispada iz pogona nekog od proizvodnih objekata ili većih jedinica.
- b) Pumpno-akumulacione hidroelektrane s prirodnim dotokom u gornji bazen.
- c) Pumpno-akumulacione hidroelektrane s većim gornjim akumulacionim bazenom bez prirodnog dotoka koji omogućava dugotrajniji rad postrojenja u turbinskom pogonu. Na taj način takvo postrojenje, osim što osigurava povećanje snage elektroenergetskog sistema, služi i kao rezerva koja u slučaju ispada nekog kapaciteta može dotični zamijeniti do njegovog popravka ili do iznalaženja nekog drugog rješenja.
- d) Pumpno-akumulacione hidroelektrane za podmirenje dnevnih vršnih opterećenja i bez prirodnog dotoka u gornji bazen. U skladu s tim u Jugoslaviji je izrađen niz projekata-objekata koji bi trebali riješiti navedene potrebe u vršnoj snazi i energiji.

Međutim, nije se stalo na projektiranju. Naime, već su u gradnji dvije pumpno-akumulacione hidroelektrane i to RHE Bajina Bašta s dva agregata po 303 MW u turbinskom pogonu i PHE Čapljina s dva agregata po 210 MW u turbinskom pogonu.

Obje ove pumpno-akumulacione hidroelektrane su po svojim karakteristikama značajne u svjetskim razmjerima. Naime, RHE Bajina Bašta ima srednji napor pumpe 600 m pri protoci od 43,5 m³/s, što je u izvedbi jednostepene pumpe-turbine svjetsko dostignuće. Daljnja karakteristika ovog postrojenja je ta što ima veliku korisnu zapreminu gornje akumulacije od 150 hm³, odnosno energetska vrijednost akumulacije na vlastitom padu od 200 GWh i mali prirodni dotok u tu akumulaciju. PHE Čapljina ima znatan

prirodni dotok u gornji bazen, o čemu će biti još govora, a uz to je specifična s obzirom na sistem pokretanja koji je predviđen kao asinhroni s jedinicama snage po 240 MVA, što je također svjetsko dostignuće.

1. Opći podaci o PHE Čapljina

PHE Čapljina se nalazi oko 14 km. jugoistočno od gradića Čapljine. Glavni građevinski radovi počeli su u proljeće 1973.godine. Puštanje u pogon predviđa se krajem 1977.godine. Ugradnja reverzibilnih jedinica omogućuje potpuno iskorištenje kapaciteta postrojenja, naročito u ljetnom periodu malih voda. Naime, tokom 140 zimskih i proljetnih dana dotok u gornji akumulacioni bazen dovoljno je velik da postrojenje može raditi u čistom turbinskom pogonu 12-14 sati dnevno. Nasuprot tome, dotok za preostalih 225 dana (rano ljeto i jesen) praktički je zanemaren. U tom periodu, i kada mreža nije opterećena, pumpat će se voda iz donjeg akumulacionog bazena u gornji da bi se koristila u satima vršnog opterećenja.

Prema izloženom, dnevno trajanje turbinskog pogona zimi i u proljeće (tj. od novembra do marta) može varirati između 12 i 24 sata. Od aprila do oktobra elektrana će raditi dnevno 8-9 sati u pumpnom i 7-8 sati u turbinskom pogonu.

Izrazimo li to u satima po pojedinim vrstama pogona godišnje, vidjet ćemo da će elektrana raditi:

- u generatorskom pogonu	cca 4.000-4.400 h/god.
- u motornom pogonu	cca 1.500-2.000 h/god.
- u kompenzatorskom pogonu	cca 2.500-1.250 h/god.
- stajanje	<u>cca 750-1.000 h/god.</u>
Ukupno:	cca 8.750 h/god.

PHE Čapljinu čine slijedeći glavni objekti:

- 1.1. dovodni kanal od bazena "Trebinje", kojeg formira brana Gorica do gornjeg kompenzacionog bazena "Popovo polje", ukupne dužine cca 68 km;
- 1.2. gornji kompenzacioni bazen "Popovo polje" korisne sadržine $5,27 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ vode kod normalnog nivoa u turbinskom pogonu od 230 m.n.m.;

- 1.3. dovodni tunel (između gornje akumulacije i gornjeg vodostana) dužine 8.110 m i svijetlog promjera 8.000 mm; gornji je vodostan s galerijom vodostanskih leptirastih zatvarača te s dvije tlačne cijevi konstantnog promjera 5.250 mm ukupne razvijene dužine cca 350 m;
- 1.4. podzemna strojara PHE Čapljina izvedena s dva odvojena kružna okna u koje su smještene:
 - 2 vertikalne reverzibilne pumpe-turbine kruto spojene s motorgeneratorima po 240 MVA, koji u blok spoju s učinkovitim transformatorima rade na mrežu 220 kV. (Dubina ukapanja : sredina spirale - 30,00 m.n.m. za $n_H = 300$ o/min.),
 - 2 kuglasta predturbinska zatvarača promjera 3.000 mm,
 - pomoćni pogoni, klima uređaji i ostalo;
- 1.5. donji vodostan s dva tablasta zatvarača i odvodno-dovodnim tunelom do izlazno-uzlazne građevine ukupne dužine 635 m;
- 1.6. donji kompenzacioni bazen "Svitava" korisne zapremine $14 \cdot 10^6$ m³ kod normalne kote donje vode od 3,0 m.n.m., odnosno maksimalne korisne zapremine od $44 \cdot 10^6$ m³ kod najvišeg nivoa donje vode od 5,80 m.n.m.

Kod normalne kote gornjeg i donjeg bazena postoji brutto pad od 227 m. Dvije jednake grupe ugrađene u PHE Čapljina, ukupne snage 420 MW, daju sreanju godišnju proizvodnju od 833 GWh od vlastitih voda, što zajedno s proizvodnjom od pumpanja (278 GWh) daje ukupno 1.111 GWh.

S druge strane, izgradnjom termoelektrane Gacko 1, snage 300 MW, kojoj se rok puštanja u pogon približno poklapa s puštanjem u pogon PHE Čapljina, dobiva se noćna energija iz bliskog izvora.

Nisu samo energetske razlozi uvjetovali odluku o izgradnji PHE Čapljina. Bila je to želja i potreba da se područje Popova polja oslobodi poplava koje su i poslije izgradnje brane Grančarevo, HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik i nadalje stvarale velike nevolje stanovništvu, onemogućavajući normalan život i poljoprivrednu djelatnost, pogotovo jer je to područje u vegetativnom periodu ostajalo bez potrebne vode.

Izgradnjom PHE Čapljina omogućeno je odvođenje poplavnih voda iz Popova polja, te smanjenje na taj način poplave na minimum, a izgradnjom dovodnog kanala od brane Gorica do gornjeg kompenzacionog bazena dovodi se kroz cijelu godinu voda u područje polja omogućavajući navodnjavanje i intenzivnu poljoprivrednu proizvodnju u ovom mediteranskom području, na obradivoj površini od oko 5.500 hektara. Nadalje se uz riječno korito na potezu od brane Gorica do gornjeg kompenzacionog bazena u Popovom polju, kroz koje će kroz cijelu godinu biti neprekinuti tok vode, otvara mogućnost za normalan život i rad ljudi - prerađu i konzerviranje poljoprivrednih proizvoda, zanatstvo, pošumljavanje itd.

U donjem kompenzacionom bazenu predviđa se formiranje komercijalnog ribogojstva na široj industrijskoj osnovi.

2. Jednopolna shema - kratak opis

PHE Čapljina priključena je na TS 380/220 kV Mostar 4 preko dva posebna voda na portalnim stupovima, s vodičima u snopu 3 x (2 x 360 mm²), dužine po 33 km.

Reverzibilni agregati spojeni su u blok spoju na jednostruke sabirnice 220 kV. Smjer vrtnje u pumpnom i turbinskom pogonu mijenja se sabirničkim rastavljačima 220 kV. Veza između vanjskog razvodnog postrojenja 220 kV i podzemne strojare s galerijom blok transformatora izvedena je jednožilnim uljnim kablovima 220 kV, dužine po cca 750 m. Spoj između blok transformatora i pripadnih sinhronih strojeva izveden je s oklopljenim sabirnicama reda 20 kV, koje stoje pod manjim nad pritiskom da bi se spriječilo ulaženje prašine i vlažnog zraka. Sabirnice sadrže oklopljene priključke za transformatore uzbude, vlastite potrošnje agregata, mjernu čeliju i čeliju rastavljača za kočenje. Električno kočenje postalo je uobičajeno kod reverzibilnih grupa.

Kočenje se vrši kratkim spajanjem statorskih izvoda bez dodatnih otpora, uz regulaciju uzbudne struje tako da se na strani statora, prema izboru, dobije jednostruki, jednoipostruki ili dvostruki višekratnik nominalne struje.

Rastavljač za direktno kratko spajanje zvjezdišta sinhro-

nog stroja, odnosno za premoštenje prigušnica kod indirektnog asinhronog zaleta, nalazi se u zvjezdištu sinhronog stroja, kao i same prigušnice, a uključuje se kada struja zaleta padne na svoju polovičnu vrijednost.

Usvojeni asinhroni zalet u pumpnom pogonu uvjetovao je primjenu blok-transformatora s regulacijom pod opterećenjem.

Napajanje vlastite potrošnje predviđeno je s pojedinog otcjepa svakog agregata kao i s mrežnog transformatora, kojega su prenosni odnos i regulacija prilagođeni za asinhroni zalet agregata za ekstremne naponske prilike u mreži. Pored mrežnog transformatora, napajanje vlastite potrošnje omogućeno je iz mreže 35 kV, a za krajnju nuždu predviđena su i dva Diesel agregata po 1200 kVA.

Prenosni odnosi i naponi kratkog spoja otcjepljenih transformatora vlastite potrošnje odabrani su tako da pokrivaju regulaciono područje sinhronog stroja +10 do -5%, odnosno tako da napon na sabirnicama 0,4 kV bude unutar propisima dozvoljenih granica. Za granični slučaj, koji nastaje u kompenzatorskom radu kada regulacija sinhronog stroja pređe vrijednost -5%, predviđeno je povratno prekapčanje na napajanje s mrežnog transformatora, što je već uvedeno i kod normalnog zaustavljanja.

3. Zalet u pumpnom pogonu

Razmatrane su razne mogućnosti pokretanja reverzibilnih agregata u pumpni pogon:

- pokretanje pomoćnom vodnom turbinom,
- pokretanje pomoćnim elektromotorom,
- asinhrono pokretanje, koje može biti direktno tj. s punim naponom mreže, te indirektno tj. sniženim naponom pomoću prigušnica, pomoću blok transformatora i sl.,
- sinhrono pokretanje uz pomoć posebnog agregata ili pomoću statičkog pretvarača frekvencije,
- polusinhrono pokretanje pomoću posebnog agregata,
- razni specijalni načini pokretanja koji se primjenjuju u posebnim slučajevima.

Nakon prethodnih ispitivanja i kontrolnih proračuna koji su uzeli u obzir perspektivne prilike u visokonaponskoj mreži, od mogućih vrsta zaleta u pumpni pogon odabran je za PHE Čapljina asinhroni zalet sinhronog stroja i to, ovisno o snazi kratkog spoja, u početku indirektni s prigušnicama u zvjezdištu sinhronog stroja s potisnutom vodom, a kasnije direktni bez prigušnica i s vodom u prostoru rotora pumpe-turbine. Svakako, velik utjecaj na izbor zaleta imali su i hidraulički razlozi koji su diktirali kraće vrijeme zaleta. Naime, period oscilacija, računat simultano za donji i gornji vodostan, uvjetuje ulazak u pogon u određenom momentu, uzimajući u obzir ne samo nivo nego i gradijent promjene nivoa u oba vodostana, što kontrolira posebna automatika s mjernim uređajima.

4. Sinhroni strojevi

Dva vertikalna sinhrona stroja pogonjena su turbinama tipa Francis nominalne protoke u turbinskom pogonu po $112,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pri konstruktivnom netto padu od 213 m, odnosno nominalne protoke u pumpnom pogonu po $85 \text{ m}^3/\text{s}$ pri dobavnoj visini od 230 m.

Sinhroni strojevi konstruirani su za slijedeće parametre:

4.1. generatorski pogon

nazivna snaga	240 MVA, $\cos \phi = 0,85 \dots 1,0 \dots 0,95$
nazivni napon	15,75 kV $\pm 10\%$
nazivna frekvencija	50 Hz
nazivni broj okretaja/pobjeg	300/480 o/min.
zamašni moment rotora	4000 Mp m ²

4.2. motorni pogon

nazivna snaga	225 MW, $\cos \phi = 0,95 \dots 1,0 \dots 0,95$
maksimalna trajna snaga	245 MW, $\cos \phi = 1,0$

4.3. kompenzatorski pogon

maksimalna jalova snaga $\pm 160 \text{ MVar}$, $\cos \phi = 0$

U gornjem i donjem križnom nosaču smješteni su vodeći, segmentni, samomazni ležajevi dok je kombinirani noseći-vodeći ležaj iznad turbine predviđen s visokotlačnom pumpom za rastere-

ćenje prilikom starta u pumpni pogon. Predviđeno je ukrućenje gornjeg križnog nosača prenošenjem sila na armirano-betonsku ploču.

Stator sinhronog stroja zavarene čelične konstrukcije je četverodjelni. Paketiranje statora i ulaganje namota izvršit će se u tvornici isporučioća. Rotor je lančani sa slaganim limovima i masivnim polovima. Tijelo rotora (bez polova i osovine) bit će sastavljeno u tvornici isporučioća i dopremljeno na gradilište.

Sinhroni stroj predviđen je za tzv. djelomično vodno hlađenje tj. šuplji vodiči statora hlade se direktno vodom, dok se paket statora i rotor hladi zrakom. Budući da se zbog promjene smjera vrtnje u pumpnom i turbinskom pogonu ne mogu upotrebiti aksijalni ventilatori na vijencu rotora, za zračno hlađenje koristi se slog od 16 elektromotornih ventilatora (po 8 gore i dolje). Po obodu statora raspoređeno je 8 hladionika voda-zrak.

Toplina razvijena tokom asinhronog zaleta odvodi se forriranim ventiliranjem prostora između zvijezde rotora i polova.

Izolacija statorskog namota je klase F, a rotorskog klase H.

4.4. Uzbuda

Predviđena je čista statička uzbuda. Napajanje ispravljačkog transformatora vrši se sa otcjepa, a početno napajanje do napona praznog hoda iz sabirnica vlastite potrošnje. Nominalna uzbudna struja iznosi 1910 A uz nominalni uzbudni napon od 344 V za opterećenje od 240 MVA i $\cos \phi$ 0,85 (preuzbuđen). Uzbudni sistem dimenzioniran je za 2930 A i stropni napon od 620 V.

Razbuđivanje se vrši kombinirano tj. pomoću upravljanih tiristorskih ispravljača u izmjenjivačkom pogonu i dodatno pomoću otpornika. Predviđena je i automatska grupna regulacija napona, odnosno raspodjela jalove snage između agregata.

5. Asinhroni zalet i reaktancije u krugu

5.1. Indirektni zalet

Polazne pretpostavke za proračun zaleta su snaga kratkog spoja TS Mostar 4 $S'_{kmin} = 3900$ MVA, odnosno dozvoljeni pad napona na sabirnicama 220 kV u TS Mostar 4 tokom zaleta manji od 6% u odnosu na 231 kV.

Reaktancije u krugu zaleta:

- reaktancija mreže i dalekovoda

$$X_{mr} = \frac{231^2}{3900} \left(\frac{15750}{266437} \right)^2 \cdot \frac{1}{1,033} = 0,0462 \text{ j.v.}$$

$$X_{DV} = \frac{1}{2} 32,3 \cdot 0,31 \left(\frac{15750}{266437} \right)^2 \cdot \frac{1}{1,033} = 0,0169 \text{ j.v.}$$

- reaktancija transformatora na stupnju regulacije 6

$$X_T = 0,135 \text{ j.v.}$$

- reaktancija prigušnice (minimalna vrijednost)

$$X_D = 0,45 \text{ j.v.}$$

Ukupna reaktancija u seriji sa sinhronim strojem iznosi, prema gornjem, 0,6481 j.v.;

- reaktancija sinhronog stroja pri zaletu:

$$X_m = 0,257 \text{ j.v.}$$

- napon na sinhronom stroju prije zaleta proračunava se na računaru, koji se inače koristi i za obradu podataka u elektrani, iz formule

$$u_s = 1,15 \cdot u_{mr} = 1,15 \cdot 231 \text{ kV} = 266 \text{ kV tj.}$$

regulaciona sklopka bira se na stupnju 6 s odnosom 266437/15750 pa napon na sinhronom stroju iznosi 231/266,437 = 0,867 j.v.

- struja zaleta

$$i_m = \frac{0,867}{0,6481 + 0,257} = 0,958 \text{ j.v.}$$

- pad napona u TS Mostar 4 iznosi:

$0,958 \cdot 0,0462 = 0,044$ j.v. tj. cca 4,4% od 266,4 kV dakle, 11,72 kV tj. padne od 231 na cca 219 kV. Vrijeme zaleta iznosi cca 90 sek., uz pretpostavljeni protumoment pumpe-turbine od 0,02 j.v. u stanju mirovanja, odnosno 0,033 j.v. kod nazivne brzine i odvodnjene pumpe-turbine.

- pad napona na sabirnicama 220 kV u PHE Čapljina, uz gore navedene uvjete i uključena oba spojna voda iznosi:

$0,958 (0,0462 + 0,0169) = 0,060$ j.v. tj. 6% od 266,4 kV pa na sabirnicama 220 kV dobivamo napon $231 - 16 = 215$ kV.

U slučaju da je samo jedan vod u pogonu, pad napona na sabirnicama PHE Čapljina iznosi cca 0,958 $(0,0462 + 0,0338) = 0,0766$ j.v. tj. 7,66%, ili napon na sabirnicama elektrane $231 - 20,4 = 210,6$ kV.

Pri gore navedenim uvjetima sjecište krivulje protumomenta i krivulje zakretnog momenta motora je kod klizanja manjeg od 0,001 tj. prilike za sinhronizaciju vrlo su povoljne. Gornji podaci vrijede za zalet prvog agregata u pumpni pogon. U slučaju da jedan agregat već radi kao pumpni, a drugi se zalijeće, prilike su povoljnije. Zanimljivo je spomenuti da se jalova snaga, koju grupa u zaletu, s prigušnicama i odvodnjenom pumpom-turbinom uzima iz mreže, mijenja od cca 220 - 100 MVAR-a, počevši od momenta uključanja do postizanja nazivne brzine. Kod direktnog zaleta u vodi jalova se snaga, međutim, mijenja od 500 - 100 MVAR-a.

5.2. Direktni zalet

Pretpostavke za direktni zalet (bez prigušnica i s neodvodnjenom pumpom-turbinom).

- isti napon na sabirnicama 220 kV u TS Mostar 4 tj. 231 kV;
- minimalna trajna snaga kratkog spoja u TS Mostar 4 - 8000 MVA;
- zalet se uvijek izvodi s maksimalnim prenosnim odnosom regulacione sklopke tj. stupanj 1 i prenosni odnos 281,750/15,75;
- reaktancija mreže i dalekovoda

$$x_{mr} = \frac{231^2}{8000} \left(\frac{15750}{281750} \right)^2 \cdot \frac{1}{1,033} = 0,020 \text{ j.v.}$$

$$x_{DV} = \frac{1}{2} 32,3 \cdot 0,31 \left(\frac{15750}{281750} \right)^2 \cdot \frac{1}{1,033} = 0,015 \text{ j.v.}$$

- reaktancija transformatora na stupnju regulacije 1

$$x_T = 0,14 \text{ j.v.}$$

- ukupna reaktancija iznosi (u seriji sa strojem) 0,175 j.v.
- reaktancija sinhronog stroja:

$$x_m = 0,252 \text{ j.v.}$$

- Napon na sinhronom stroju je

$$u_m = \frac{231}{281,750} = 0,82 \text{ j.v.}$$

- struja zaleta

$$i_m = \frac{0,82}{0,427} = 1,92 \text{ j.v.}$$

- pad napona u TS Mostar 4:

$$1,92 \cdot 0,020 = 0,0384 \text{ j.v. tj. } 3,84\% \text{ od } 281,750 \text{ kV}$$

odnosno 10,80 kV pa je napon u TS Mostar cca 220,2 kV.

Vrijeme zaleta je cca 30 sek., dok sjecište krivulje protumomenta pumpe-turbine, koji je sada znatno veći nego u slučaju odvodnjene pumpe-turbine, s krivuljom momenta sinhronog stroja, još uvijek omogućuje sinhronizaciju.

Pretpostavljeni protumoment pumpe-turbine kod nazivne brzine vrtnje s rotorom u vodi garantiran je s 0,26 j.v.

Pad napona u samoj elektrani iznosio bi u tom slučaju $1,92 \cdot 0,035 = 0,067 \text{ j.v.}$ tj. 6,7% od 281,750 kV, ili napon na sabirnicama 220 kV u elektrani : $231 - 19 = 212 \text{ kV.}$

Imajući u vidu činjenicu da uvjetovana snaga kratkog spoja u TS Mostar 4 od 8000 MVA, potrebna za direktni zalet pumpe-turbine u vodi, vjerovatno neće biti postignuta u toku garantnog perioda opreme za PHE Čapljina, razmatran je i direktni zalet odvodnjene pumpe-turbine uz 60%-tnu kratkospojnu snagu od gore navedene.

Provedeni proračuni pokazali su da je i uz gornju, manju kratkospojnu snagu moguć direktni zalet odvodnjene pumpe-

-turbine, a u cilju provjere karakteristika sinhronog stroja. U ovom slučaju dobit ćemo nešto veće padove napona, koji su, međutim, u dozvoljenim granicama i nešto kraće vrijeme zaleta. Čak je, šta više, izvršen i detaljni kontrolni proračun direktnog zaleta u vodi uz gornju kratkospojnu snagu. Proračun pokazuje da je, sa stanovišta mreže, moguć direktni zalet i pri ovim uvjetima, ali uz upotrebu regulacione sklopke blok transformatora tj. s ukupnim prekapčanjem od 11 stupnjeva u vremenu od 33 sekunde. Sjecište krivulja protumomenta pumpe-turbine i zakretnog momenta motora je kod klizanja $S = 0,01$ tj. sinhronizacija je moguća uz upotrebu predviđenog relea za sinhronizaciju. Ukupno vrijeme zaleta iznosi 45 sek., pa se za ovaj slučaj predviđa dodatna kontrola ugrijavanja polnih nastavaka, koja treba potvrditi mogućnost produženog zaleta i sa stanovišta sinhronog stroja.

6. Konstruktivne i ostale pojedinosti

Ugovorom je bio predviđen agregat s 2 vodeća ležaja i nosećim ležajem iznad turbine. Tokom konstrukcije i proračuna kritičnog broja okretaja osovine, došlo se do zaključka da se mora ugraditi i treći vodeći ležaj. To je učinjeno tako da je već predviđeni noseći ležaj rekonstruiran i izveden kao kombinirani noseći i vodeći. Na ovaj način održane su garantirane vrijednosti kritičnog broja okretaja od 20% iznad brzine pobjega. Mada su od samog početka bili predviđeni masivni polovi, rotor kao i stator, tokom razrade konstrukcije, doživjeli su izvjesne izmjene sve u cilju postizanja većeg zakretnog momenta tokom zaleta.

Za polove primjenjen je materijal strogo zahtjevanih mehaničkih, električkih i magnetskih osobina, te određenog kemijskog sastava. Da bi se smanjila termička naprezanja polova tokom zaleta, ovi su izvedeni sa žljebovima i odgovarajućim dilatacijama.

Međupolnim vezama, s obzirom na visoke struje, koje njima teku tokom zaleta, posvećena je odgovarajuća pažnja. Izvedene su kao jaki bakreni segmenti, dimenzionirani za struju od 60 kA, koji su tvrdim lemljenjem spojeni s polnim nastavcima. Kratkospojni prsten od legure bakra i srebra, smješten između polnog

nastavka i namota također poboljšava prilike kod zaleta.

Dodatni otpor u krugu rotora poboljšava krivulju momenta sinhronog stroja. Zahvaljujući relativno malim protumomentima pumpe-turbine u odvodnjenom stanju zalet bi se mogao uspješno izvesti i bez dodatnog otpora u rotorskom krugu. To, međutim, nije slučaj kod direktnog zaleta s rotorom pumpe-turbine u vodi, kada, bez dodatnog otpora, ne bi bilo moguće sinhroniziranje. Utjecaj dodatnog otpora u krugu rotora na krivulju momenta sinhronog stroja sistematski je istraživao za vrijednosti 0, 8, 12 i 15 R_f . Da bi se dobila dovoljna rezerva u slučaju odstupanja od garantiranih vrijednosti protumomenta, odabran je dodatni otpor od 15 $R_f = 2,32$ oma.

Struje, odnosno momenti tokom asinhronog zaleta kao i ugrijavanje polova, računati su prema metodi Dr. Canay-a za indirektni i direktni zalet. Maksimalna temperatura na površini polova kod indirektnog zaleta iznosi 140°C , maksimalni temperaturni gradijent $4,94^{\circ}\text{C/mm}$, odnosno srednja gustoća energije $2,33 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2$. Odgovarajuće vrijednosti kod direktnog zaleta su 224°C ; $9,24^{\circ}\text{C/mm}$ i $2,4 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2$.

Umjesto zaključka

Sinhroni motor-generatori za PHE Čapljina danas su najveći strojevi koji se pokreću asinhronim zaletom iz mreže.

Tesline ideje o asinhronim strojevima realizirane su na taj način na današnjim strojevima najvećih snaga.

Zbog svoje jednostavnosti, praktičnosti i ekonomičnosti asinhroni start sinhronih strojeva bit će i dalje izazov projektantima i konstruktorima budućih još većih pumpno-akumulacionih postrojenja.

L I T E R A T U R A:

1. Canay, M.: ASYNCHRONOUS STARTING OF SYNCHRONOUS MACHINES
WITH OR WITHOUT RECTIFIERS IN THE FIELD CIRCUIT
PROC. IEE, VOL.119, No.12, DECEMBER 1972.
2. Jaccard, D. CHOIX DES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DES
Vešligaj, F. INSTALLATIONS DE POMPAGE - TURBINAGE, EXPERIENCES
EN COURS DETUDE ET D'EXPLOITATION
CIGRE, PARIS, 1968. Referat 11-09
3. Hercegovac, PHE ČAPLJINA, ELEKTROSTROJARSKA PROBLEMATIKA
E.
Sabljic, E. Referat na IV Savjetovanju o HE i PAHE, Split,
Štrafela, M. IV/74



Jurković B., Sirotić Z., Wolf R.
Elektrotehnički fakultet
Sveučilišta u Zagrebu

NASLJEDSTVO NIKOLE TESLE U OBLASTI ELEKTRIČNIH STROJEVA

Polifazni sistem je osnova za gradnju velikih strojeva i prijenos velikih količina energije. Široka primjena električne energije je posljedica tog razvoja. Porast potrošnje energije zahtijeva sve veće jedinice. Moderna rješenja velikih generatora i današnje granične snage, te pogledi na mogućnosti daljnjeg razvoja.

Izmjenični elektromotori na Teslinim principima omogućavaju razvoj industrijalizacije. Moderne koncepcije elektromotornih pogona. Problem regulacije brzine vrtnje različitih vrsta izmjeničnih strojeva i današnji način rješavanja. Usporedba mogućnosti istosmjernih i izmjeničnih strojeva i perspektive sve veće primjene izmjeničnih strojeva.

Motori s okretnim poljem u primjeni široke potrošnje. Napajanje motora iz jednofazne mreže. Jednofazni sistem kao superpozicije Teslinih simetričnih višefaznih sistema. Vrste i izvedbe malih izmjeničnih motora. Linearni motor kao specijalni slučaj Teslinog polifaznog motora.

NIKOLA TESLA'S HERITAGE IN THE FIELD OF ELECTRICAL MACHINES

The polyphase system provided the basis for the construction of large machines and the transmission of large quantities of energy. This development has brought about large-scale use of electric power. The growth of energy consumption requires units of an increasing size. Modern designs of large generators, present-day limits of power per unit, and the prospects of future development are reviewed.

AC motors based on Tesla's inventions have made the development of industrialization possible. Several aspects of this extensive field are reviewed: modern electromotor drive concepts; problems of speed control for various AC motor types and modern solutions; DC/AC machine comparison and prospects of growing AC machine application; rotating field motors in consumer goods applications; single-phase supply; the single-phase system as a superposition of Tesla's symmetrical polyphase systems; types and designs of small AC motors; the linear motor as a special case of Tesla's polyphase motor.

Jedno od svojstava čovjeka kao misaonog bića bilo je uvijek nastojanje da preinačuje svoju okolinu kako bi je bolje prilagodio svojim potrebama. U tom nastojanju upotrebljavao je znatne količine mehaničkog rada, prvo vlastitog, pa onda domaćih životinja, i napokon je koristio prirodne izvore energije.

Duh čovjeka pronalazio je nove puteve, i poput Prometeja osvojio vatru, naučio izradjivati i upotrebljavati alat, izumio kotač. Dugo bi se moglo nabrajati izume kroz vjekove, bez kojih danas za čovjeka ne bi bilo ni golog opstanka. Nije presmiona tvrdnja, da je jedan od takovih prometejskih koraka učinio i Nikola Tesla na području korištenja velikih prirodnih izvora energije, svojim pronalascima polifaznog sistema, polifaznih generatora i motora, jer je taj izum značio početak prodiranja električne energije u svaki kutak ove planete, i njenog korištenja za vršenje mehaničkog rada upravo tamo gdje je taj rad potreban. Posljedica takovog procesa bila je - u nekoj vrsti pozitivne povratne veze - znatno povećana potražnja za energijom, i taj proces je još i danas u toku. Ovim pogledom unazad željeli bismo upravo rekapitulirati sve one izuzetno velike i široke posljedice, koje je zapalila iskra jednog genija ne tako davno, a koji predstavljaju nasljedstvo Nikole Tesle u oblasti električnih strojeva.

Brzi rast potrošnje električne energije moguće je danas zadovoljiti samo gradnjom vrlo velikih elektrana. U želji da se smanje troškovi proizvodnje, razvoj ide u pravcu povećanja jediničnih snaga, a time i smanjenja broja agregata u pojedinoj elektrani. Gradnjom većih agregata, a mi ćemo ovdje govoriti o dijelovima tih agregata, sinhronim generatorima, smanjuju se troškovi po jedinici snage uz istovremeno povećanje korisnosti. U nastojanju za povećanjem jediničnih snaga ravnopravno sudjeluje niz stručnjaka koji proučavaju elektromagnetske pojave u stroju, rade

na otkrivanju novih boljih materijala ili traže nova konstruktivna i tehnološka rješenja. U tom radu treba posebno naglasiti napredak na polju hladjenja, koji je doveo najprije kod turbogeneratora, a zatim i kod hidrogeneratora, do upotrebe novih medija za hladjenje.

Parna turbina, danas najrašireniji pogonski stroj, traži, zbog ekonomičnog rada, velike brzine vrtnje, pa se zato turbogeneratori grade najčešće u dvopolnoj izvedbi tj. s 3000 odn. 3600 o/min. U novije se vrijeme, posebno u nuklearnim postrojenjima, gdje turbina radi s relativno niskim parametrima pare, pojavljuju generatori u 4-polnoj izvedbi. To su obično generatori vrlo velikih snaga (iznad 800 MVA), ali su zbog manje brzine problemi mehaničke prirode znatno lakši. Samo se kod malih snaga (ispod 20 MW) grade turbine s većim brzinama vrtnje i spajaju s generatorima preko reduktora. Generatori su tada gradjeni u 4-polnoj izvedbi, ali s istaknutim polovima (zbog cijene) pa o njima neće ovdje biti dalje govora. Zbog velikih mehaničkih naprezanja, rotor se turbogeneratora grade u obliku cilindra od kovanih legiranih čelika visokih mehaničkih svojstava u kome su izglodani utori za smještaj uzbudnog namota. Maksimalni promjer diktiraju dozvoljena mehanička naprezanja, a taj je kod generatora s 3000 o/min, uz materijal koji danas stoji na raspolaganju, oko 1250 mm. Maksimalna je dužina uslijed karakteristika elastične linije rotora i mogućnosti dinamičkog balansiranja negdje oko 7,5 metara. Uz ovako definirane glavne dimenzije i iskorištenja koja se mogu postići uz zračno hladjenje mogla bi se izvući snaga od oko 200 MVA. Ta snaga nije mogla već prije mnogo godina pokriti zahtjeve graditelja energetske postrojenja. No, kao i uvijek, kad se ukaže potreba, nađe se i odgovarajuće rješenje.

s vodnim hladjenjem onđa kađ su to trađene snage zahtijevale. Danas se u eksploataciji već nalaze generatori, hladjeni ili djelomično (samo statorski namot) ili potpuno vodom, snaga preko 500 MVA, a u najskorijoj se budućnosti oćekuju snage i do 750 MVA. Iz izloženog se vidi da nam danas stoje na raspolaganju konstrukcije snaga većih od onih koje se danas trađe. Ipak razvoj ne miruje. Već danas se intenzivno radi na razvoju turbogeneratorsa koji će koristiti pojavu supravodljivosti za rotorski namot. Ta su istraživanja već dovela do modela koji se nalaze na ispitivanju. Uspiju li ti modeli dati ono što se oćekuje, mođe se oćekivati daljnji skok u jediničnoj snazi uz poboljšanje korisnosti i smanjenje težine.

Primjena Teslinog polifaznog sistema na proizvodnju, razdijelu i upotrebu električne energije imala je i još uvijek ima gotovo nesagledive posljedice na razvoj industrijalizacije i proizvodnosti cijelog društva u svjetskim razmjerima. Osim mogućnosti gradnje mnogostruko većih izvora energije (sinhronih generatora) od postojećih (istosmjernih generatora), osim povećanja moguće udaljenosti prijenosa energije, reda veličine 1000 puta većeg nego što omogućava istosmjerni sistem, posebno se ističu mogućnosti primjene električne energije u industrijskom elektromotornom pogonu. Teslini polifazni motori, asinhroni i sinhroni omogućuju pravi prodor jeftine električne energije u industrijske pogone. Osnovne su im prednosti pred konkurentskim istosmjernim motorima znatno manja cijena i težina, znatno veća pogonska pouzdanost, manja podložnost kvarovima, neosjetljivost na kratkotrajna čak i višestruka preopterećenja, mnogostruko manji troškovi održavanja, mogućnost primjene i za više napone, što vodi na znatno manji utrošak bakra za razdjelnu mrežu i dovode, mogućnost gradnje velikih jedinica većih i preko 100 puta od istosmjern-

nih, te veće mogućnosti smanjenja relativne cijene i težine s napretkom tehnologije, jer otpadaju sva komutaciona ograničenja. Zapravo su tek jeftini izmjenični motori početkom ovog stoljeća istisnuli iz industrije stapne parne strojeve, "lokomobile", koji su pogonili cijele radionice i tvornice sistemom mehaničkog razvoda energije putem sistema osovin i remenica. Ne samo da je zamjenjen "lokomobil" obično trofaznim asinhronim motorima u postojećem mehaničkom razvodu, što se odigralo u prvo vrijeme prodora elektrifikacije u industriju, već je nedugo iza toga odbačen i sam mehanički razvod i zamijenjen grupni pogon pojedinačnim pogonom radnog mehanizma vlastitim motorom i električkim razvodom. To je sve omogućio tek izmjenični sistem, polifazni sistem, koji je uspio na najekonomičniju mrežu priključiti najekonomičniji motor.

Dakako, izmjenični je motor omogućio ne samo prodor u niz industrijskih pogona, već je dobrim dijelom potisnuo i istosmjerne motore iz mnogih pogona, koji su već tada bili elektrificirani. Jedini razlog, da izmjenični motori nisu već samom svojom pojavom potpuno istisnuli istosmjerne, leži u prirodnoj prednosti istosmjernog stroja da mu se može relativno jednostavno podešavati brzina vrtnje. Njegova je brzina vrtnje dana omjerom induciranog napona i glavnog magnetskog toka koji se (u raznim izvedbama) relativno jednostavno mogu podešavati. Naprotiv, brzina vrtnje izmjeničnog motora je u prirodnim uvjetima bitno vezana na frekvenciju mreže i odatle slijede njegove osnovne mane u usporedbi s istosmjernim - brzina vrtnje se teško podešava, a uspije li se brzina vrtnje ipak podešavati tako da znatnije odstupa od one određene frekvencijom mreže, znatno se povećavaju gubici i znatno su lošije pogonske karakteristike. To je održalo istosmjerni stroj u svim onim pogonima gdje je podešavanje brzine vrtnje bila tehnološka nužnost. Početkom ovog stoljeća takvih je pogona bilo re-

lativno malo, ali je općim razvojem (posebno kad je nastupila era automatizacije) broj takvih pogona sve veći, iako je brojem i ekonomskom važnošću i danas dominantan broj izmjeničnih pogona. U međuvremenu može se reći da se čitavih 3/4 ovog stoljeća nastoji ukloniti mane izmjeničnih strojeva u smislu pogodnosti za regulaciju, kako bi ih mogli primijeniti u što većem broju pogona.

Asinhroni kolutni strojevi upravljaju se rotorskim otpornicima, a razvijeni s i kaskadni spojevi uz pomoć jednoarmaturnih pretvarača. Kod asinhronih kaveznih strojeva razvijaju se konstruktivna rješenja rotora, koja podnose i visoke gubitke koji se javljaju u zaletu i kočenju, s ciljem da se taj najjednostavniji i najjeftiniji stroj primijeni i u teškim pogonima. Pojavljuju se polno preklopivi strojevi s dvije, tri i više brzina vrtnje i oni osvajaju sve one pogone gdje zadovoljavaju podešavanja brzine u skokovima, a omogućuju i znatno smanjenje gubitaka energije u bakru u dinamičkim stanjima. Međutim, za pogone s potrebom kontinuiranog podešavanja brzine vrtnje ostaje sve do posljednjeg decenija istosmjerni stroj jedino rješenje. Pojava trofaznih kolektorskih strojeva, hibrida kolektorskih strojeva i Teslinog polifaznog motora s okretnim poljem, u drugoj četvrtini ovog stoljeća, uspijeva doduše direktno priključiti stroj visoke regulacione sposobnosti na najekonomičniju mrežu, ali mane kolektora ubrzo odnose prevagu nad jednostavnošću spoja, pa se mogu smatrati samo kompromisnom epizodom tehničkog razvoja u jednom periodu.

Nove mogućnosti otvaraju električki ventili i upravljivi ventili, najprije živini, a zatim poluvodički. U prvoj fazi jačaju pozicije istosmjernog motora koji priključen na mrežu posredstvom ventila stiče znatno veću ekonomičnost u usporedbi s ranijim rješenjima Leonardovim agregatom, a i širu mogućnost primjene. Međutim, u najnovijoj fazi razvoja poluvodičkih elemenata i

elemenata industrijske elektronike općenito, otvaraju se sasvim nove mogućnosti i za izmjenične strojeve. Jer, industrijska elektronika donoseći u prvoj fazi pretvarač izmjenične mreže u istosmjernu, svojim razvojem stvara i pretvarače izmjenične mreže jedne frekvencije u izmjeničnu mrežu druge frekvencije. Uz konkretne promjenljive frekvencije pretvara se svojstvo izmjeničnog motora, kad mu brzina vrtnje bitno ovisi o frekvenciji, iz mane u prednost. Pitanje je samo koliko konverzija frekvencije unosi novih elemenata nepouzdanosti u takav pogon i kolika joj je cijena. Tako razvitak elemenata i sklopova energetske elektronike postaje za budućnost presudni faktor u već 80 godina staroj konkurenciji istosmjernih i Teslinih polifaznih motora. Neka su pitanja već tako reći riješena. Kolutni motor sa statičkim pretvaračem frekvencije u rotorskom krugu već je danas povoljnije rješenje od istosmjernog motora napajanog preko usmjerivača, dakako u pogonima gdje zadovoljava opseg podešavanja. Za pogone s relativno niskom frekvencijom izgrađeni su izmjenični motori s konvertorima frekvencije do snage od cca 10 MW, iako su danas još uvijek skuplji od istosmjernih rješenja. Očito je to rješenje vezano za pogone velikih snaga koje prelaze granične snage istosmjernih motora. Općenito se za trenutak u kome živimo može reći da su za pogone s manjim i srednjim snagama rješenja s izmjeničnim motorima upravljanim konvertorima frekvencije još skuplja od rješenja s istosmjernim motorima, a i pogonska pouzdanost im još nije bitno veća. No cijena konvertora (ventila upravljačkih elemenata, itd.) relativno pada, a pouzdanost raste, pa će tek budućnost reći hoće li i za regulacione pogone izmjenični motor prevladati. Zanimljiv je možda jedan detalj. Broj ventila, impulsnih uređaja itd. dijelom ovisi o broju faza motora. Konvertor frekvencije se u principu može graditi i za proizvoljni broj faza na izlazu. Ne treba odba-

citi razmišljanja o primjeni dvofaznog motora napajanog preko konvertora frekvencije i broja faza iz trofazne mreže. Vjerojatno bi takav konvertor bio jeftiniji i pouzdaniji zbog manjeg broja elemenata. A dvofazni motor i uopće dvofazni sistem je prvi polifazni sistem o kome je Tesla razmišljao i koji je patentirao! Možda ta njegova gotovo najstarija ideja tek sutra nadje punu primjenu.

Poslije prodora elektromotora u industrijske pogone, on osvaja sasvim nova područja primjene. Riječ je o malim i najmanjim motorima, koji se proizvode u upravo nevjerojatnim količinama. Oni prodiru s jedne strane u domaćinstva, gdje rasterećuju čovjeka od najraznovrsnijih fizičkih poslova, a s druge strane preuzimaju novu funkciju pri automatizaciji procesa i u domaćinstvu i u industrijskim pogonima. Tu motor više nije element sa zadaćom da oslobodi čovjeka teškog rada, već gurava vršenje odredjenih operacija odredjenim redoslijedom, po odredjenom programu, element koji posluhuje odredjeni uredjaj ili postrojenje, i time oslobadja čovjeka ne toliko rada, koliko brige oko ispravnog odvijanja procesa. I na području malih motora Teslini principi dali su najjednostavnija i najjeftinija rješenja, pa su vrlo jako zastupljeni. Osobitost je malih motora, pogotovo onih u domaćinstvima, da moraju biti upotrebljivi na običnoj jednofaznoj rasvjetnoj mreži, bez uvođenja posebne instalacije koja bi omogućavala priključak polifaznog motora. To su dakle, pretežno jednofazni motori, pa izgleda kao da se princip Teslinog okretnog polja ovdje ne može koristiti. No poznata je stvar da se izmjenično polje jednog jedinog namota može - matematički i fizikalno - prikazati kao superpozicija dvaju jednakih okretnih polja suprotnog smisla vrtnje. Ta dva polja djeluju na rotor suprotnim momentom, pa je rezultat nula, ako su polja jed-

naka. Potrebno je dsmo da ta dva polja budu različitih veličina, pa da jedno od okretnih polja prevlada svojim djelovanjem. Za to je dovoljan utjecaj rotorskih struja - ako se rotor vrti, rezultira moment u smjeru u kojemu je vrtnja započela. No za kretanje iz stanja mirovanja potreban je, a koristan i zbog boljih pogonskih karakteristika, još jedan fazni namot, koji je priključen na isti jednofazni napon, ali u seriju s kondenzatorom, otpornikom ili prigušnicom, ili je naprosto kratko spojen tako da u njemu teku inducirane struje. U svim tim slučajevima dobivamo eliptičko polje, koje se može svesti na superpoziciju dvaju suprotnih okretnih polja različitih veličina. Zakonitosti okretnog polja toliko su jasne, i tako smo navikli upotrebljavati ih, da je najbliži i vrlo često upotrebljavan pristup analizi jednofaznih motora upravo ovaj preko "simetričnih komponenata", što u stvari nije ništa drugo nego svodjenje razmatranja na Teslin simetrični višefazni sistem

Prema vrsti rotora javlja se bezbroj varijanti asinhronih i sinhronih malih motora - s kaveznim i punim cilindrom, s permanentnim magnetima, promjenljivom reluktancijom, ili korištenjem histereze da bi postigli sinhroni rad - a u vrlo različitim izvedbama kod brzohodnih odn. sporohodnih motora. Kao zanimljivost valja spomenuti elektrostatski sinhroni motor, koji koristi elektrostatsko umjesto elektromagnetskog okretnog polja.

Ideja polifaznog sistema osnova je nekih rješenja koja su tek mnogo godina nakon Teslinih izuma našla svoju primjenu, ali su u biti sadržana u njegovoj osnovnoj misli. Tako npr. selsini za prenošenje podatka o položaju na daljinu, nisu u suštini ništa drugo no polifazni strojevi s rotorom koji se napaja visokofrekventnom izmjeničnom strujom. U faznim namotima induciraju se naponi transformacijom, a ne rotacijom, i čine polifazni sistem koji daje pulzirajuće polje određenog smjera, ali veličine neovisne o

brzini rotora. To polje postaje okretno polje kad se rotor vrti. Danas se mnogo razmatra linearni motor, kao sinhroni ili asinhroni motor, kod kojega je višefazni namot razvijen u ravninu. Umjesto rotacije dobiva se linearno gibanje, pa se od daljnjeg razvoja mnogo očekuje na području specijalno brze električne vuče. Ideja je, dakako, potpuno identična s idejom polifaznog motora, a problemi se javljaju u rubnim područjima, gdje beskonačni obod moramo ograničiti na konačnu dužinu vozila.

U tehnici se ideje i izumi ponašaju kao neka vrsta živih bića. Radjaju se, razvijaju, dostižu kulmen, opadaju i nestaju. Tako je to bilo s izumom npr. jedara u pomorstvu, kolotura i koloturnika, parnog stroja, balona i zrakoplova, itd. Svaki se izum nalazi u nekoj "životnoj dobi". Promatrajući Tesline izume i ideje jasno vidimo da se nalaze u fazi uspona a ne opadanja. Radi li se o pogonskim motorima u elektromotornom pogonu, o generatorima velikih snaga ili o najmanjim motorima, ne pitamo se hoće li nešto potisnuti rješenja izrasla na idejama Teslinog genija, rješenja dominantna već 80 godina. Naprotiv, realnije je pitanje neće li Teslino nasljedje istisnuti u toj sferi tehnike ostala rješenja?

Miloš Kremić, dipl.el.ing.

Poslovno udruženje elektrodistribucije

Srbije - Beograd

PRVA HIDROELEKTRANA U SRBIJI

Samo nakon tri godine od puštanja (1896. godine) džinovskih generatora hidroelektrane na Nijagarinim vodopadima, u tadašnjoj Srbiji već se pristupa izgradnji prve hidroelektrane 1899. godine u Užicu. Ova hidroelektrana građena je za potrebe pogona tadašnje tkačke radionice i osvetljenja varoši Užica. Hidroelektrana je imala veliki značaj za razvoj privrede grada i bila od neposredne koristi stvaralačkog uma Nikole Tesle.

THE FIRST HYDROELECTRIC POWER STATION IN SERBIA

The construction of the first hydroelectric power station in Serbia began in Užice as early as 1899, only three years after the starting of the giant generating sets of the Niagara Falls hydroelectric power station.

The station supplied power to the local weaving mill and for the illumination of the town. It boosted the economic development of the town, and benefitted directly from Nikola Tesla's creative genius.

x x x x

Osnovna otkrića u elektrotehnici, izvršena u 18. i 19. veku, stvorila su praktične mogućnosti primene električne energije u prvom redu za osvetljenje, a zatim za elektromotorni pogon, prenos signala na daljinu i dr.

Polet industrije izazvan Edisonovim pronalaskom sijalice s ugljenim vlaknom 1879. godine i gradnjom njegove prve električne centrale 1881. godine u Njujorku omogućio je gradnju velikog broja električnih centrala Edisonovog sistema za proizvodnju jednosmerne struje. Primena ovog napretka bila je ograničena jer se radilo o jednosmernoj struji s relativno niskim naponom, tako da je prenos električne energije na daljinu bio praktično nemoguć zbog velikih gubitaka. Zato se morao graditi veliki broj električnih centrala male snage. Poznato je da je početkom devedesetih godina prošlog veka u

Njujorku bilo instalirano oko 2 000 malih centrala. Sve veći zahtevi industrije za proizvodnjom velikih količina jeftine električne energije na mestima i u blizini izvora akumulisane prirodne snage - energije i prenosom na velike daljine do potrošača nije iz tih razloga bilo moguće postići.

Zahvaljujući epohalnom pronalasku Nikole Tesle, kada 1887. godine patentira asinhroni motor, generator i transformator višefaznih struja i prenos električne energije, rešeno je pitanje prenosa električne energije na velike udaljenosti.

Do 1890. i 1891. godine električna energija je isključivo prenošena jednosmernom strujom, a u periodu do 1897. godine trajala je vrlo uporna borba između jednosmerne i naizmenične struje, odnosno Teslinog polifaznog sistema za prenos električne energije na daljinu. Konačnu pobedu i praktičnu primenu svog sistema Tesla je ostvario nakon vrlo upornog rada i borbe, izgradnjom i puštanjem u pogon prvog agregata velike hidroelektrane na vodopadima Nijagare 1895. godine. Naredne godine završena je izgradnja ove elektrane kao i puštanje prvog dalekovoda do Bafala. Od tada na ovamo grade se generatori naizmenične struje (mahom trofazni) visokog napona od 13 000 V, a kasnije i 20 000 V, a električna energija se neposredno prenosi na daljinu. Transformacija se vrši na kraju prenosa pri distribuciji električne energije do krajnjeg potrošača.

Potrebe za električnom energijom javljaju se u to vreme u svim većim gradovima Amerike i Evrope, gde dolazi do izgradnje velikog broja električnih centrala.

U tadašnjoj Srbiji koja je, prema statističkim podacima, u 1834. godini zauzimala površinu od 35 511 km², živelo je 678 189 stanovnika, ili 18 stanovnika na 1 km². Posle 50 godina na ovoj istoj teritoriji bilo je 1,353.000 stanovnika, da bi 1890. godine taj broj iznosio 2,161.961, odnosno 58 stanovnika na km². Od toga broja u gradovima je živelo 13,2%. 90-tih godina bila je razvijena trgovina i zanatstvo, a industrijskih pogona skoro da nije ni bilo. Ipak, u vreme vrlo oskudnih komunikacija, ideja o uvođenju električnog osvetljenja u gradovima javlja se u više gradova Srbije. Tome su sledile velike rasprave, da li će se petrolejske lampe zameniti gasnim ili električnim.

Hroničari su zapisali da je samo nakon godinu dana od pronalaska Edisonove sijalice, u Beogradu upaljena prva električna sijalica (1880. godine). Vlasnik kafane "Hamburg" ili kako se još zvala "Kod narodne skupštine", koja se nalazila na uglu današnjih ulica Kneza Miloša i Masarikove, gostioničar Petar Jovanović nabavio je jedan lokomobil s generatorom i postavio je u bašti zgrade Narodne skupštine, koja je bila preko puta (danas bioskop "Odeon"). Izolovani provodnik preneo je preko ulice (danas Kneza Miloša) u svoj lokal i vezao s gasnom "bogen-lampom" u koju je stavljena Edisonova sijalica s ugljenim štapićima.

U isto vreme, tj. 1880. godine, zapisano je da je u Subotici izvršena i prva javna demonstracija električne sijalice. Uzbudjenje i interesovanje građana za ovom novinom bilo je veliko. Iako je nakon toga preuzeta inicijativa za uvođenje električnog osvetljenja u Subotici, ipak su Subotičani morali čekati 53 godine od prvog prikazivanja Edisonove sijalice do uvođenja električnog osvetljenja.

U javnosti je vodjena široka polemika o izboru vrste osvetljenja - gasno ili električno.

Iz arhiva se vidi da je Odbor opštine varoši Beograda na sednici od 24. februara 1885. godine rešio u načelu "da se Beograd osvetli svetlećim gasom". I pored odiuke polemika se nastavlja.

Veliku presudnu odluku za uvođenje električnog osvetljenja u Srbiji, a posebno u Beogradu i Užicu, imao je Djoka M. Stanojević, profesor vojne akademije u Beogradu. Bio je veliki pobornik uvođenja električnog osvetljenja. U tom cilju drži 17.X 1890. godine predavanje na temu: "Kojim bi - električnim ili gasnim osvetljenjem - trebalo osvetliti Beograd". Na osnovu njegovog predloga beogradska opština je revidovala svoju prethodnu odluku od 24.II 1885. godine za uvođenje gasnog osvetljenja, i na svojoj sednici 17.XII 1890. godine formirala specijalnu stručnu komisiju sa zadatkom da ovo pitanje detaljno prouči i predloži rešenje. Definitivnu odluku donosi u januaru 1891. godine za uvođenje električnog osvetljenja kako je to predlagao profesor Djoka Stanojević. Ujedno imenuje i Nadzornu komisiju za električno osvetljenje, a za predsednika imenuje profesora Stanojevića. Nakon sprove-

denog konkursa zaključen je 3. avgusta 1891. godine ugovor o izgradnji svih postrojenja. Prva faza električne mreže i prve javne termoelektrane završena je i puštena u pogon 23. septembra 1893. godine. Tom prilikom podvučena je velika zasluga profesora Djoke Stanojevića za uporan i visokostručan rad na uvodjenju električnog osvetljenja u Beogradu. Sa propagiranjem električne energije uporno dalje nastavlja i u svojim predavanjima ističe:

"... da elektrika pored leba i vode postane svakodnevna potreba i to kako za varošanina, tako i za najsiromašnijeg seljaka našeg". To pobudjuje interes i u drugim gradovima i kod poslovnih ljudi za korišćenjem električne energije, pored osvetljenja, i za pokretanje mašina.

U to vreme Užičani se bave mišlju da podignu modernu tkačku radio-nicu, ali se nisu mogli složiti u tome kako će i na koji način moći zameniti jedan deo ljudske radne snage, drugom. Jedni su predlagali da upotrebe paru, što je po njihovim računima bilo skupo. Drugi su predlagali električnu energiju izgradnjom termoelektrane, ali i to je bilo neprihvatljivo, jer nije bilo uglja u blizini. Konačno rešenje dao je profesor Djoka Stanojević prilikom svoje posete Užicu, predloživši Užičanima da iskoriste vodenu snagu reke Djetinje i upotrebe je za proizvodnju električne energije koju bi koristili za pokretanje tkačkih mašina, a pored toga i za osvetljenje varoši. Ova ideja je bila prihvaćena s oduševljenjem i odmah je usledilo osnivanje akcionerskog društva početkom 1898. godine i obezbedjenje sredstava za gradnju hidroelektrane i električne mreže. Izrada projekta poverava se profesoru Djoki Stanojeviću.

Nakon toga dolazi do početka izgradnje hidroelektrane. U tu svrhu podignuta je na reci Djetinji u blizini samog grada, brana na svod s poluprečnikom od 44,2 m i svojom ispupčenom stranom okrenuta izvoru reke. Zgrada hidroelektrane podignuta je 800 m nizvodno. Od brane pa do centrale vodi betonski jaz – kanal, sečen u steni i podzidan s jedne strane zida. Na jednom delu kanal prelazi u tunel dužine 15 m. Na početku i kraju kanala nalaze se ustave i rešetke za prečišćavanje vode. Iz kanala, iza same zgrade za centralu, voda s padom od 10–12 m sprovodi se kroz dve cevi u dve turbine od po 200 KS. Turbine su francuskog sistema, s horizontalnom osovinom, postavljene na oko 5 m iznad donjeg nivoa.

Svaka turbina pokreće transmisionim kaišem po jednu dinamo mašinu za trofaznu struju izlaznog napona 2 000 V, 50 Hz. Električna energija se razvodi do 7 transformatorskih stanica gde se transformiše na 120 V i dalje razvodi do pretplatnika.

Ista mreža služi za javno ulično osvetljenje i za osvetljenje stanova. Za ulično osvetljenje postavljeno je 120 sijalica od 16 sveća i 9 plamenih lampi od po 10 A. Sve sijalice i lampe podeljene su tako da jedna polovina svetli do 22 časa, a druga celu noć. Paljenje i gašenje javnog osvetljenja vrši se s jednog mesta pomoću odgovarajućih releja.

Poseban problem kod gradnje hidroelektrane javio se kod transporta celokupne opreme. Kako su za one prilike delovi generatora i turbina bili "ogromne" težine, to nije bilo lako naći prevoznika. Turbine su isporučene od firme "Danubius" u Budimpešti, a generatori od Simens-SCHUCKERT u Beču, i to preko Kragujevca. Odatle je zaprežnim kolima dopremljena do Užica. Tadašnje novine su to zabeležile kao poseban događaj.

Početak radova na izgradnji hidroelektrane bio je maja 1899. godine, a puštanje u rad obavljeno je 24. avgusta 1900. godine.

Od dva generatora u hidroelektrani, jedan je bio u rezervi, a drugi je proizvodio električnu energiju preko dana za pogon u tkačkoj radionici, a uveče za osvetljenje varoši. U cilju veće potrošnje električne energije, Akciono društvo je davalo određene povlastice potrošačima kao i nižu cenu za utrošenu električnu energiju. Radi regulisanja odnosa s potrošačima-pretpatnicima, Društvo je donelo i odgovarajući Pravilnik električnog preduzeća, kojim se regulisala prodaja električne energije. Iz njega možemo da vidimo sledeće:

- Instalacije vrši isključivo Društvo sa svojim monterima po prethodnom predračunu koji se mora odmah isplatiti društvenoj blagajni, zajedno s taksom za davanje veze
- Instalacija mora imati najmanje dve lampe ma koje vrste, bez lusteru. Ko želi samo jednu lampu plaćaće po 33% veću taksu nego običnu
- Strujomer se daje samo nadležstvima, a pojedinim privatnim licima samo po odobrenju Društva koje ih isključivo i nabavlja i prodaje pretplatnicima

- Zabranjeno je vršiti ma kakvu izmenu ili opravku na instalaciji bez odobrenja Društva
- Struja se plaća u mesečnim ratama i to: za paušalno osvetljenje od 1-5 u početku svakog meseca unapred, a po strujomeru najdalje 3 dana po dobivenom izveštaju o utrošenoj struji
- Struja za osvetljenje naplaćuje se po strujomeru i to: za privatne instalacije od 1 kWh din. 0,30, za državna nadleštva po posebnom ugovoru. Pored ove cene naplaćuje se državna trošarina
- Struja za paušalno osvetljenje daje se pretplatnicima od zalaska do izlaska sunca i deli se u 5 kategorija: u I kategoriju spadaju: hoteli, kafane, mehane i pekarnice sa svim sporednim lokalima, u II kategoriju spadaju: kancelarije sa svim sporednim lokalima, u III kategoriju spadaju: kasarne i bolnice, u IV kategoriju spadaju: dućani, radionice i privatni stanovi sa svim sporednim lokalima, u V kategoriju spadaju: lusteri, u privatnim stanovima (može biti samo jedan) no s tim, da svaki luster ima najmanje 3 sijalice i pored toga još i 2 sijalice odvojeno ma koje kategorije. Pregled cena za paušalno osvetljenje bio je:

Kategorija	16 sv.	25 sv.	32 sv.	50 sv.	100 sv.	200 sv.	400 sv.	600 sv.	1000 sv.
I	2,50	3,00	3,70	5,65	10,00	18,35	33,15	41,60	50,00
II	2,00	2,40	2,95	4,50	8,00	14,65	26,70	33,20	40,00
III	1,75	2,10	2,55	4,00	7,00	12,83	23,40	29,20	35,00
IV	1,50	1,80	2,20	3,40	6,00	11,00	20,00	25,00	30,00
V	0,60	0,75	0,90	1,40	2,50	-	-	-	-

- Sijalice za paušalne pretplatnike nabavlja isključivo električni odsek društva. Protiv pretplatnika kod koga bi se našla sijalica za paušalno osvetljenje, koju nije prodao električni odsek društva, odgovaraće sopstvenik instalacije po materijalnoj, a potrošač po krivičnoj odgovornosti krivičnog zakona

- Plamene lampe plaćaju za struju: - do 6 A za svaki amper dinara 6,50 mesečno, a preko 6 A za svaki amper dinara 5,50 mesečno
- Struju za motornu snagu odobravalo je Društvo samo u slučaju ako mu nije potrebna za njegovu upotrebu i to samo po strujomeru:
 - ispod 2 KS za KWh dinara 0,30
 - od 3-5 KS za KWh " 0,25
 - od 6-10 KS za KWh " 0,19
 - od 10-15 KS za KWh " 0,14

Ako strujomer ne služi isključivo za motor, plaća se, pored utrošene struje, i državna trošarina:

- za izmenu izgorelih osigurača na uvodu naplaćuje se od sopstvenika ili pretplatnika:
 - za osvetljenje din. 1
 - za motore din. 3za svaki izgoreli osigurač.
- Ako bi pretplatnik želeo da mu Društvo samo održava instalaciju u ispravnom stanju, plaća mesečno:
 - za instalaciju do 3 lampe od 1 ld 0,50
 - za instalaciju preko 3 lampe od 1 ld 0,40
 - za ovo Društvo je obaveza da izmeni o svom trošku sve delove instalacije izuzev sijalica
 - u slučaju neplaćanja struje ili kradje struje, oštećenja instalacije i sl. pretplatniku je mogla biti obustavljena isporuka električne energije.

Za ponovnu vezu naplaćuje se:

- za osvetljenje din. 5.-
- za motore din. 12.-
- za motore i osvetljenje s visokog napona din. 22.-

Društvo je imalo i svoja pravila za izvodjenje električne instalacije kod pretplatnika.

Ova hidroelektrana je kasnije proširena ugradnjom trećeg generatora. Rad centrale značajan je za razvoj industrije i zanatstva u Užicu kao i za razvoj samog grada. Centrala je bila u pogonu sve do 1972. godine, kada je izvodjač radova na pruzi Beograd-Bar ošteti i zatrpao jaz-kanal za dovod vode. Postrojenja su u ispravnom stanju, a objekt treba da bude stavljen pod zaštitu države i pretvoren u muzej, što će biti od posebnog značaja da se sačuva kao prva javna hidroelektrana u Srbiji. Posebnu ulogu imala je hidroelektrana i u vreme trajanja Užičke republike 1941. godine za snabdevanje električnom energijom prve partizanske fabrike oružja i drugih zanatskih radionica.

Na reci Djetinji, u periodu između dva rata, izradjene su još dve hidroelektrane koje su u to vreme sve zajedno podmirivale potrebe grada i industrije za električnom energijom.

Primeru Užica sleđu Valjevo, Leskovac, Niš i drugi gradovi u Srbiji gde se voda reka koristi za izgradnju hidroelektrana. Valjevo gradi na reci Gradac kod sela Degurića hidroelektranu s dva agregata od 100 kVA. Tri godine kasnije, tj. 1902. godine, sagrađena je na reci Vučanki kod Vučaja hidroelektrana s dva agregata po 170 kVA za potrebe Leskovca, za koju se energija prenosi dalekovodom dužine 16 km, što je za ondašnje prilike značilo veliki napredak.

Dalji napredak i razvoj privrede podstaknut je izumima Nikole Tesle i korišćenjem jeftinih hidropotencijala za proizvodnju električne energije.

Literatura:

1. "Ekonomska istorija Beograda do Svetskog rata" - 1932. godine
2. Profesor Djoka Stanojević: "Električna industrija u Srbiji", 1901.
3. "Večernje novosti" br. 129. od 11. maja 1899. godine
4. Pravilnik električnog preduzeća - Prve povelje užič. akc. Tkačke radionice
5. 75 godina snabdevanja el.en.Subotice 1896-1971 - Izdanje 1972. godine
6. 80 godina elektrifikacije Beograda 1893-1973. godine
7. Razvoj elektroprivrede Jugoslavije 1945-1955. godine

Sirotić Zvonimir
Krajzl Vinko
Novosel Stjepan
Bučić Mato

PROIZVODNJA SINHRONIH GENERATORA U JUGOSLAVIJI

Nagli razvoj potrošnje električne energije nakon rata diktirao je i razvoj proizvodnje elemenata za proizvodnju električne energije. Već 1948. godine puštena je u pogon prva elektrana s generatorom izrađenim u tvornici "Rade Končar". Od tada je izgrađeno nekoliko stotina turbo i hidrogeneratora na bazi vlastitih razvojnih radova i vlastitih konstrukcija.

MANUFACTURE OF SYNCHRONOUS GENERATORS IN YUGOSLAVIA

The rapid post-war growth of electric power consumption has necessarily been supported by the development of plants for the manufacture of power production equipment. Thus the first power station equipped with a generator manufactured at the "Rade Končar" Works was put into operation as early as 1948. Since then several hundreds of turbine and hydrogenerators have been developed, designed and manufactured.

Proizvodnja velikih generatora u Jugoslaviji započeta je nakon rata, a njen razvoj ima malo neobičan tok. Potreba za energijom u ratom razrušenoj zemlji zahtijevala je hitnu izgradnju novih izvora energije. No 1946, nije postojala mogućnost da se gradnja generatora povjeri nekoj stranoj tvornici, pa je došlo do odluke da se taj zadatak povjeri tvornici "Rade Končar". Tako se rodila nova tvornica generatora.

Na improviziranom prostoru, bez potrebne opreme i iskustva, počeo je rad na izradi i montaži prvog generatora za HE Mariborski Otok snage 24000 kVA. Iako generator nije rađen po vlastitoj dokumentaciji, gradnja takvog generatora, za to doba relativno velike snage, predstavljala je niz problema ali istovremeno i dobru školu za kolektiv bez velikog iskustva.

Stečenim iskustvima na gradnji tog generatora, grupa mladih radnika, tehničara i inženjera započela je vlastitim projektima i konstrukcijama. Započeto je proširenje i modernizacija proizvodnje gradnjom novih površina i nabavkom potrebne opreme. Tako je već tokom 1949. puštena u pogon nova hala površine 13000 m², a već 1962. još jedna s daljnjih 6000 m².

Nakon montaže i puštanja u pogon prvog hidrogeneratora 1948.godine u slijedećih je pet godina projektirano i izrađeno više hidrogeneratora, među kojima treba posebno spomenuti šest generatora za HE Jablanicu i četiri za HE Zvornik, snage od po 30000 kVA.

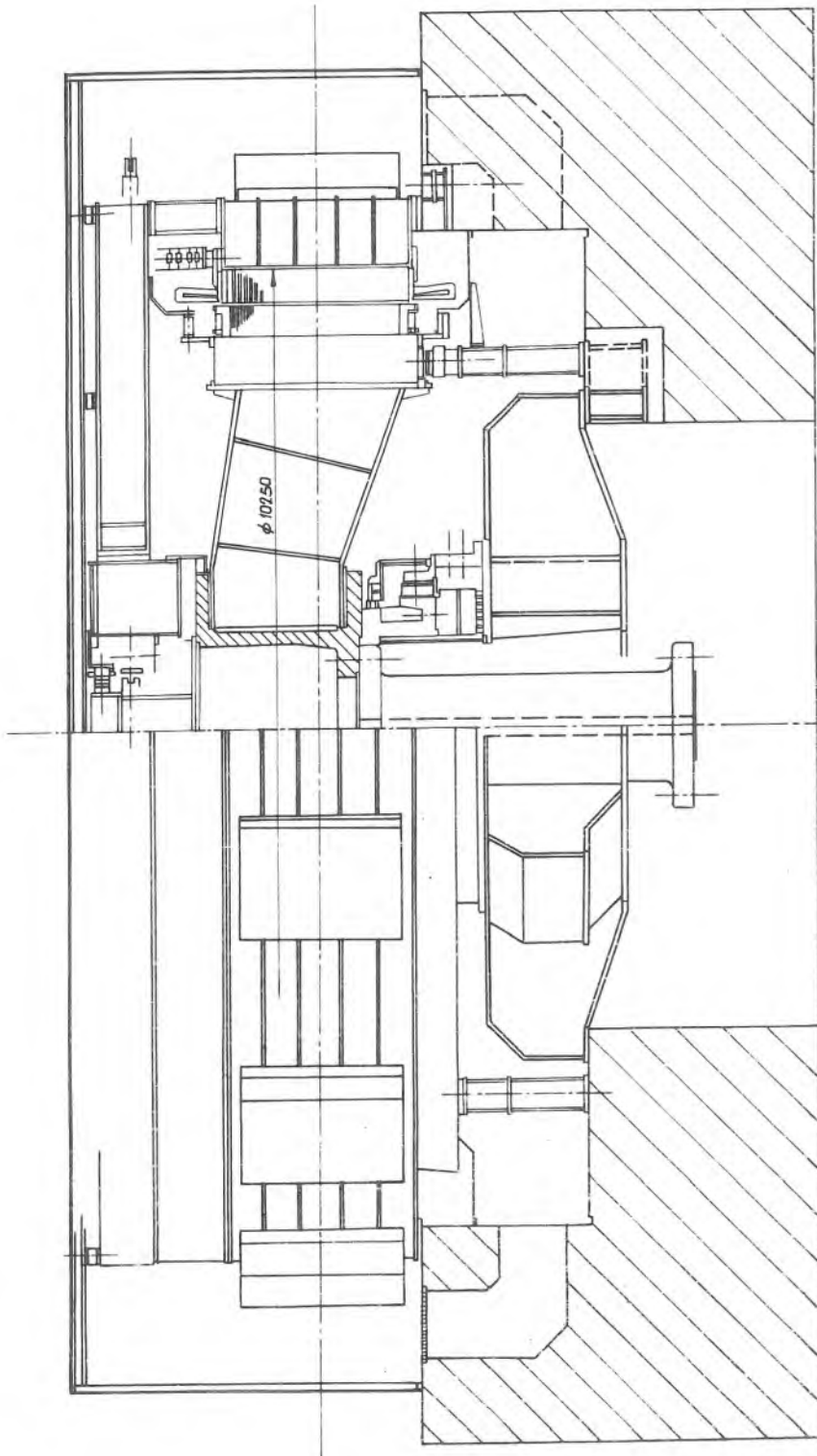
Iskustva stečena gradnjom tih generatora poslužila su kao temelj brzom razvoju kako teoretskih saznanja na području teorije električnih strojeva i mehaničke čvrstoće tako i na područjima hlađenja, izolacionih sistema, uzbuđnih sistema te konstrukcije pojedinih elemenata. To je dovelo do brzog rasta snaga generatora po jedinici uz istovremeni porast iskorištenja. Već je 1961. godine pušten u pogon generator snage 120000 kVA za HE Split.

Uspješan rad niza od stotinjak hidrogeneratora doveo je i do početka izvoza na strana tržišta.

Daljnji period je karakteriziran gradnjom većeg broja generatora velikih snaga, od kojih spomenimo samo neke kao HE Bajina Bašta, 100 MVA, HE Senj, 80 MVA, HE Rama, 90 MVA. Ispitivanja, provedena na ovim generatorima, omogućila su daljnji porast snaga po jedinici. To u prvom redu vrijedi za generatore za HE Đerdap, snage 190000 kVA na svega 71,4 o/min, te generatore za HE Kariba (Zambija) snage 167000 kVA (vidi sliku 1).

Odmah nakon uspješno izrađenih prvih hidrogeneratora prišlo se pripremama za gradnju turbogeneratora. Već 1952.godine povjerenica je tvornici "Rade Končar" gradnja šest turbogeneratora 16000 kVA. Otada pa do danas izrađeno je više od sto turbogeneratora, hlađenih zrakom snage do 40000 kVA.

Stalnim usavršavanjem tih generatora dostignuta je visoka kvaliteta koja je omogućila njihovu prodaju na svjetskom tržištu. Tu treba posebno spomenuti turbogeneratore namijenjene



Sl. 1 Presjek generatora za HE Kariba, Zambija
167 MVA, 136 o/min.

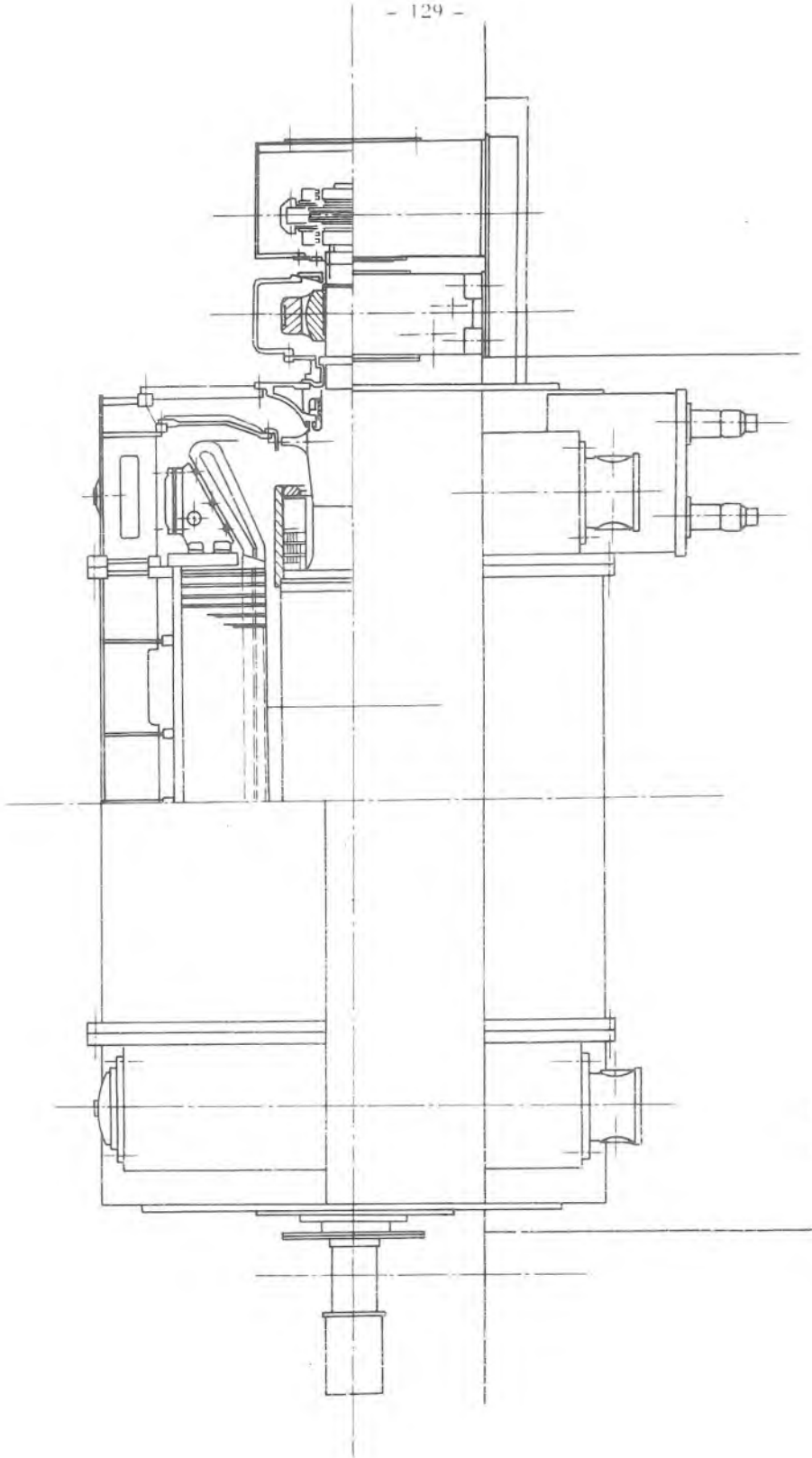
spajanju s plinskim turbinama (proizvedeno je više desetaka za Zapadnu Njemačku).

Porast snaga turbogenerators iznad 50000 - 80000 kVA dovodi uslijed specifičnosti konstrukcije do potrebe uvođenja novih medija za hlađenje - vodik i vodu. Prvi je prototip, vodikom hlađenog generatora, izveden 1966.godine iz tipa zrakom hlađenog generatora snage 40000 kVA i na njemu je postignuta snaga od 56000 kVA. Slijedeće jedinice većih snaga su turbogeneratori za TE PLOMIN i TE MORAVA snage 156000 kVA, a izrađeni su u kooperaciji s poljskim proizvođačem. Sada su u projektu turbogeneratori (vidi sliku 2) 150000 i 200000 kVA, koji će biti isporučeni domaćim elektranama po vlastitoj dokumentaciji.

Razvoj mreže u Jugoslaviji traži još veće jedinice pa će slijedeća snaga turbogenerators iznositi 350000 kVA. Taj će stroj biti izrađen za TE Gacko u kooperaciji s ruskim proizvođačem. Tabela 1 daje pregled nekolicine najvećih strojeva koji su izgrađeni u tvornici "Rade Končar" ili se nalaze u projektiranju.

Kao što je naprijed rečeno, proizvodnja generatora je počela praktički bez ikakvih iskustava. Zato će biti razumljiv oprezan pristup dimenzioniranju i projektiranju.

Osnovne parametre generatora u pravilu određuju pogonski stroj (snaga, brzina vrtnje, moment inercije) i zahtjevi mreže (faktor snage, reaktancije). Svi ovi parametri bitno utječu na dimenzioniranje.



SL. 2 Presjek turbogeneratorsa hlađenog vodikom za
TE-TO Zagreb, 150 MVA, 3000 o/min.

Tabela 1. Pregled najvećih generatora "RK"

Objekt	Snaga MVA	Brzina vrtnje o/min	Masa t	Broj komada	Zemlja
HE Kidatu	60	375	298	2	Tanzanija
HE Peručica	65	428	275	2	SR Crna Gora.
HE Trebinje	70	214	451	1	SR B i H
HE Ohau	73	166	410	4	Novi Zeland
HE Srednja Drava I	74	125	515	2	SR Slovenija
HE Senj	80	600	256	3	SR Hrvatska
HE Orlovac	83	500	304	3	SR Hrvatska
HE Rama	90	375	336	2	SR B i H
HE Bajina Bašta	100	136	517	3	SR Srbija
HE Split	120	300	592	2	SR Hrvatska
HE Mratinje	120	250	580	3	SR Crna Gora
HE Kariba	167	136	962	4	Zambija
HE Đerdap	190	71,5	1090	3	SR Srbija
TE Morava	156	3000	263	1	SR Srbija
TE Plomin	156	3000	263	1	SR Hrvatska
TE Zagreb	150	3000	185	1	U projektu
TE Novi Sad	200	3000	210	1	
TE Gacko	350	3000	-	1	

Prividna snaga se daje prikazati pomoću specifičnih opterećenja i dimenzija izrazom

$$P = mUJ = ABD^2Ln = CD^2Ln$$

gdje

A - strujni oblog

B - indukcija u zračnom rasporu

D - promjer provrta statora

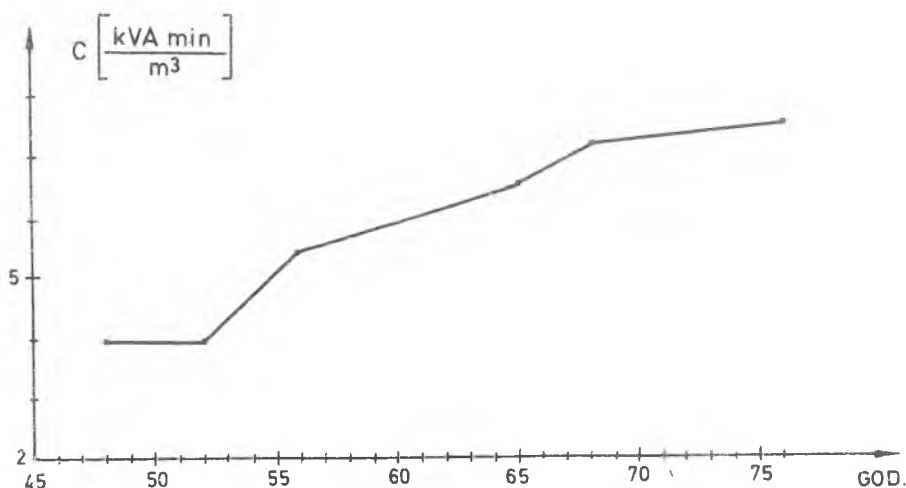
L - dužina željeza

n - brzina vrtnje

C - faktor iskorištenja (Essonova - konstanta)

Gornji izraz prikazuje utjecaj specifičnih opterećenja A i B na dimenzije generatora, odnosno na faktor iskorištenja $C = k AB$.

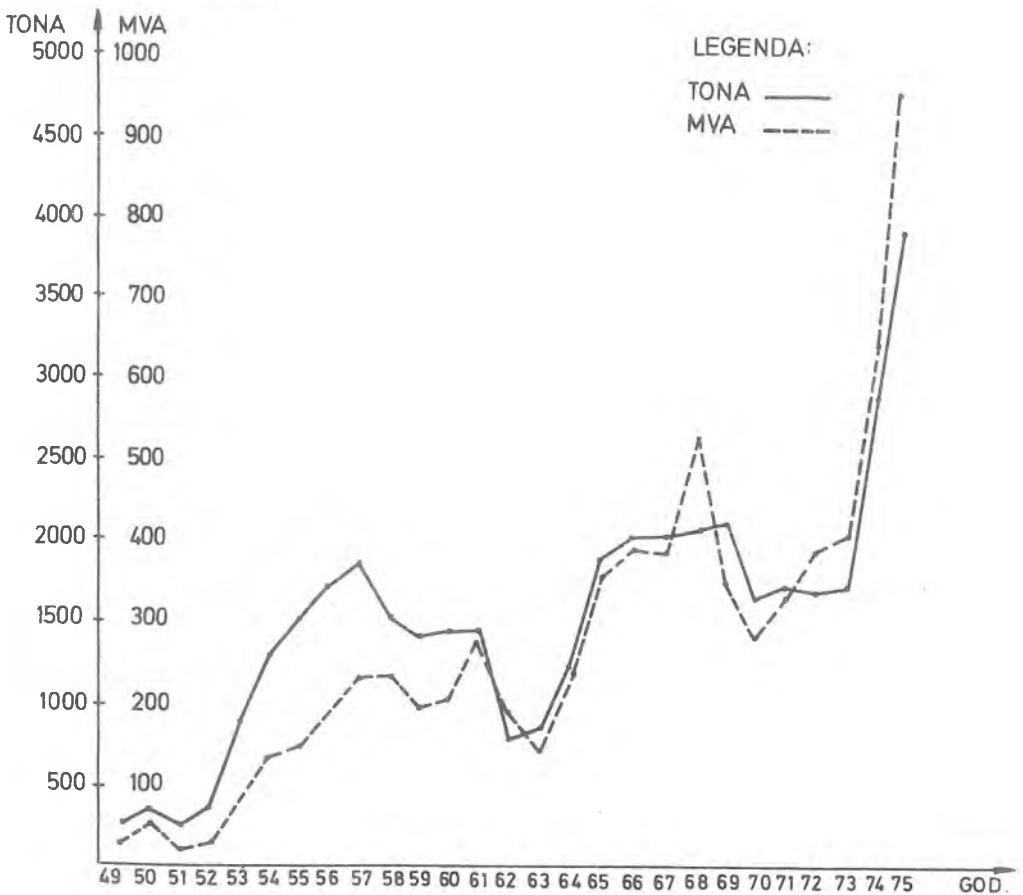
Specifična strujna i magnetska opterećenja mjerilo su za gubitke u stroju koji se moraju odvesti rashladnim sredstvom (zrak, vodik, voda). Zadaća je dimenzioniranja odabiranje specifičnih opterećenja i osnovnih dimenzija uzevši u obzir sve zadane parametre. Iskustvo proizvođača sadržano je u veličini faktora iskorištenja uz dozvoljena zagrijanja i mehanička naprezanja.



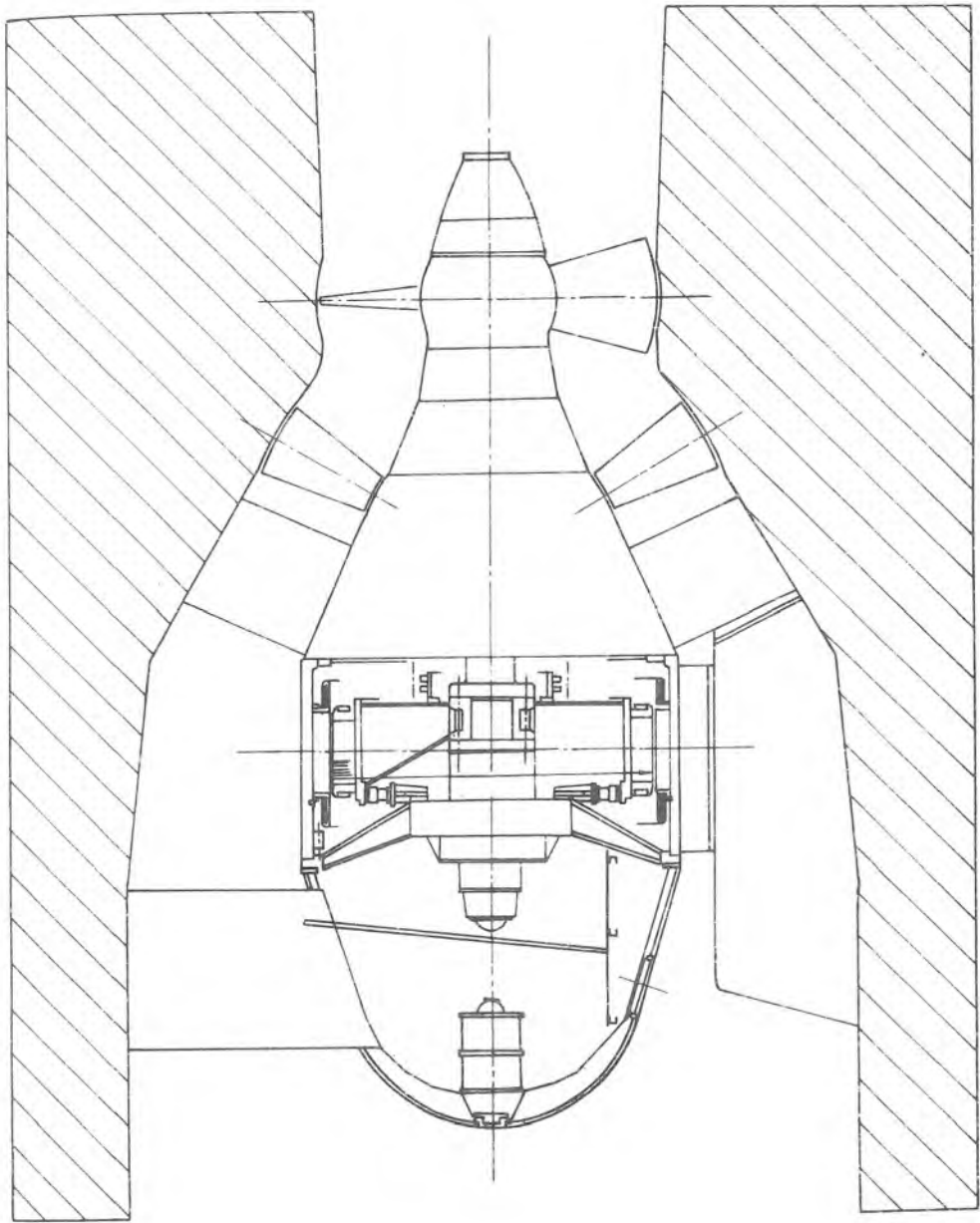
Sl. 3 Diagram faktora iskorištenja zrakom hlađenih hidrogeneratora

Iz dijagrama na sl.3 se vidi porast faktora iskorištenja C po godinama u ovisnosti za hidrogeneratore hlađene zrakom. Taj porast, iako je izazvan djelomično i porastom snaga pojedinih strojeva, ilustrira i stjecanje iskustva. Razumljivo je da se drugim sistemima hlađenja mogu postići znatno veći faktori iskorištenja. U proizvodnji su turbogeneratori hlađeni vodikom s faktorom $C = 11,5 \frac{\text{kVA min}}{\text{m}^3}$, a projektirani, vodom hlađeni generator s $C = 13 \text{ kVA min/m}^3$.

Sumiramo li rezultate proizvodnje generatora od 1948.godine do danas, tvornica "Rade Končar" je izradila, montirala i pustila u pogon cca 450 generatora, ukupne snage 8000 MVA, od čega 167 hidrogeneratora i 62 turbogeneratora za domaće i 62 hidrogeneratora i 45 turbogeneratora za inozemno tržište. Dijagram na sl.4 prikazuje kretanje proizvodnje generatora po snazi i težini od 1948. do danas.



Sl. 4 a) Ukupna snaga isporučenih generatora
b) Ukupna težina



Sl. 5 Presjek cijevnog generatora za HE A JBA,
4300 kVA 187 o/min.

Osim ovih strojeva većih snaga opremljeno je više od hiljadu dizelagregata manjim generatorima bilo klasične izvedbe bilo u samouzbudnom spoju.

Uz strojeve velikih snaga razvijaju se strojevi specijalne izvedbe za različite namjene. Spomenimo u prvom redu sinhronne generatore u tzv. cijevnoj izvedbi, od kojih se prvi pokusni agregat nalazi u pogonu u HE Ajba, snage 4300 kVA (vidi sliku 5), a daljnji se agregati nalaze u stadiju projektiranja.

Philip L. Alger
Fellow, IEEE and IEE

INDUCTION MOTOR DEVELOPMENTS IN THE U.S.
FROM TESLA TO THE PRESENT DAY

Abstract

Tesla's invention of the induction motor in 1888 was honored by the award of the AIEE Edison Medal to Tesla in 1917, and an award of the Tesla Medal, named in his honor, by the IEEE in 1976. The Edison Medal presentation was made by B.A. Behrend, the inventor of the circle diagram theory.

The first induction motors, brought out by Westinghouse in 1890, were used to replace engines driving line shafts. General Electric and other manufacturers soon followed, and motors for individual machines rapidly replaced the belt drives. The equivalent circuit due to Steinmetz replaced the early circle diagram and the theory was extended to cover double squirrel cages and harmonics of the air-gap field. The first motors were wide open, with sleeve bearings, cotton covered wires, and organic insulation. A great step forward was made about 1920 when Maxwell of General Electric developed the cast aluminum squirrel cage. Step by step, major improvements were made in protection, insulation, ventilation, and bearings, that enabled the output from a given motor frame to be increased more than tenfold in the past 80 years. A table is given, showing the successive ratings of a given motor frame over the years, and the improvements that made these possible are reviewed.

TESLA'S INVENTION

On May 18, 1917, Mr. B.A. Behrend presented the Edison Medal of the AIEE to Nikola Tesla. He said:

"By an extraordinary coincidence, it is exactly twenty-nine years ago, to the very day and hour, that there stood before this Institute Mr. Nikola Tesla, and he read the following sentences:

"To obtain a rotary effort in these motors was the subject of long thought. In order to secure such a result, it was necessary to make such a disposition that while the poles of one element of the motor are shifted by the alternate currents of the source, the poles produced upon the other element should always be maintained in the proper relation to the former, irrespective of the speed of the motor. Such a condition exists in a continuous current motor; but in a synchronous motor this condition is fulfilled only when the speed is normal.

The object has been attained by placing within the ring a properly subdivided cylindrical iron core wound with several independent coils closed upon themselves. Two coils at right angles are sufficient, but a greater number may be advantageously employed. It results from this disposition that when the poles of the ring are shifted, currents are generated in the closed armature coils. These currents are the most intense at or near the points of the greatest density of the lines of force, and their effect is to produce poles upon the armature at right angles to those of the ring, at least theoretically so; and since this action is entirely independent of the speed--that is, as far as the location of the poles is concerned--a continuous pull is exerted upon the periphery of the armature. In many respects, these motors are similar to the continuous current motors. If load is put on, the speed, and also the resistance of the armature, is diminished and more current is made to pass through the emerging coils, thus increasing the effort. Upon the load being taken off, the counterelectromotive force increases and less current passes through the primary or emerging coils. Without any load, the speed is very nearly equal to that of the shifting poles of the field magnet.

"It will be found that the rotary effort in these motors fully equals that of the continuous current motors. The effort seems to be greatest when both armature and field magnet are without any projections."

"Not since the appearance of Faraday's Experimental Researches in Electricity has great experimental truth been voiced so simply and so clearly as this description of Mr. Tesla's great discovery of the generation

and utilization of polyphase alternating currents. He left nothing to be done by those who followed him. His paper contained the skeleton of the mathematical theory."

"The due appreciation of even the enumeration of the results of Mr. Tesla's inventions is neither practical nor desirable at this moment. There is a time for all things. Suffice it to say that, were we to seize and to eliminate from our industrial world the results of Mr. Tesla's work, the wheels of industry would cease to turn, our electric cars and trains would stop, our towns would be dark, our mills would be dead and idle. Yea, so far-reaching is this work, that it has become the warp and woof of industry."

"The basis for the theory of the operating characteristics of Mr. Tesla's rotating field induction motor, so necessary for its practical development, was laid by the brilliant French savant, Professor Andre Blondel, and by Professor Kapp of Birmingham. It fell to my lot to complete their work and to coordinate--by means of the simple circle diagram--the somewhat mysterious and complex experimental phenomena. As this was done twenty-one years ago, it is particularly pleasing to me, upon the coming of age of this now universally accepted theory--tried out by application to several million horsepower of machines operating in our great industries--to pay my tribute to the inventor of the motor and the system which have made possible the electric transmission of energy. HIS name marks an epoch in the advance of the electrical science. From THAT work has sprung a revolution in the electrical art."

"We asked Mr. Tesla to accept this medal. We did not do this for the mere sake of conferring a distinction or of perpetuating a name; for so long as men occupy themselves with our industry, his work will be incorporated in the common thought of our art, and the name of Tesla runs no more risk of oblivion than that of Faraday, or that of Edison."

"Nor indeed does this Institute give this medal as evidence that Mr. Tesla's work has received its official sanction."

"No, Mr. Tesla, we beg you cherish this medal as a symbol of our gratitude for a new creative thought, the powerful impetus, akin to revolution, which you have given to our art and to our science. You have

lived to see the work of your genius established. What shall a man desire more than this? There rings out to us a paraphrase of Pope's lines on Newton:

"Nature and Nature's laws lay hid in night:
God said, 'Let Tesla be,' and all was light."

THE EARLY MOTORS

George Westinghouse bought Tesla's patents and assigned C.F. Scott to work with Tesla. They substituted a salient pole stator with 4 slot-embedded coils and a small air gap for the ring wound stator. Then, B.G. Lamme took a hand, changed to a two-phase distributed stator winding, and added a distributed rotor winding. In these ways, Westinghouse had a practical induction motor of quite modern appearance by 1892. However, the only alternating-current power available was single phase of high frequency. To promote a practical polyphase system, Westinghouse exhibited a 300-hp two-phase induction motor at the Chicago Fair in 1893, driven from a pair of single-phase, 60 hertz, 500-hp alternators on the same shaft, but displaced 90 degrees, so that together they provided two-phase power. The motor had 12 poles, with a distributed two-phase rotor winding of cable threaded through partially closed slots. The stationary secondary also had partially closed slots, with one conductor per slot, connected in two circuits 90 degrees apart. In starting, these were closed through long heavy carbon rods, which were short-circuited when the motor came up to speed. As the carbon rods became red hot in starting, they were placed in the basement, so the public would not see them.

Then, Westinghouse developed a line of 60 hertz polyphase alternators for general use, and it was remarkable how quickly the public accepted these. A line of 60 hertz motors was brought out in 1893, with rotating primary windings, to avoid the difficulty of supplying the large secondary currents through slip rings. Cast iron grids were connected permanently across each secondary phase, and were short-circuited at speed.

In 1891 the Thomson-Houston Company began work on 3-phase motors, under the direction of H.G. Reist. These had rotating secondaries, with iron grids inside the rotor, and a centrifugal switch for short-circuiting the grids at speed. Two of these motors were sold in 1892. Late in 1893, Sidney Paine, a General Electric salesman, sold 14 induction motors, each rated 65 horsepower, to a South Carolina cotton mill, against direct-current competition, on the basis of less fire risk without commutators, and more constant speed. The motors were ceiling mounted, driving line shafts, belted to looms below. These motors were very successful, starting a general shift from engine to motor drive. Soon, motors were applied to each machine, eliminating the forest of belts then customary.

As smaller motors came into use, squirrel cages replaced the rotor windings, and autotransformers were used to reduce the voltage on starting. Double squirrel cages came in before long, with reduced starting currents, so full-voltage starting became customary when ample power became available.

MOTOR THEORY

The circle diagram of Behrend and Heyland, Figure 1, was very helpful to early designers. The more exact and general equivalent circuit theory of C.P. Steinmetz was soon adopted by General Electric engineers, and this was later extended by Kron, and used to advantage with modern computers. The early squirrel-cage motors were troubled by standstill locking, torque dips, and noise, but these were gradually overcome as designers learned what slot combinations were best, were able to calculate the effects of harmonics of the air-gap fields, and adopted skewed slots for small motors.

At first, a number of different frequencies were used, 25, 30, 40, 50, and 60 hertz; but it was soon found desirable to concentrate on 60 hertz, as giving a wide range of speeds, with 2, 4, 6, and more pole designs, and allowing the use of high-speed turbines for power generation.

For fractional-horsepower motors, as used in domestic applications, it was found economical to use single-phase supply. These single-phase induction motors had an auxiliary primary winding, at right angles with the main winding, and a high resistance to displace the phase of the auxiliary current. For usual purposes, the auxiliary winding was short-circuited by a centrifugal switch, but small fan motors had permanently short-circuited "shading coils" on each pole. The theory of the single-phase motor was puzzling at first, as the cross-field theory developed for it, Figure 2, showed the two windings as having line frequency currents in both. A more correct theory was developed by W.J. Morrill, based on dividing the pulsating single-phase field into two oppositely-revolving fields, as shown in Figure 3.

When capacitors became available, a capacitor was placed in series with a low-resistance auxiliary winding, giving much improved performance. For small fan motors, a small capacitor was used, left permanently in circuit. For general-purpose motors, two capacitors were used, the larger one being opened by a centrifugal switch at full speed. Figure 4 shows a capacitor motor with a belt tightener base and resilient rubber rings over the bearings to absorb the torque vibrations caused by the pulsating torque of a single-phase motor.

CONSTRUCTION AND BEARINGS

The early motors were wide open, with pillow blocks, sleeve bearings, and exposed rotating parts, but these were soon succeeded by protective frames with end shield bearings, generally of cast iron. Standard general-purpose motors were made drip proof, and later splash proof, and lines of totally-enclosed and explosion-proof motors were developed also. Recently, aluminum frames have come into use for small motors. Sleeve bearings were replaced by grease-lubricated ball bearings, to avoid oil spills, provide some thrust capacity, and permit smaller air gaps. The life

of a ball bearing depends to a great extent on the grease used for lubrication. The bearings were improved by the use of vacuum degassed steel for the bearings and races, which gave triple the former fatigue life and increased the load capacity some 50%. Also, the greases were made oxidation resistant, giving longer life, and the base used was changed from sodium to lithium and then to urea, so that bearing temperatures up to 125°C are now permitted with adequate life, as compared to only $80\text{--}90^{\circ}\text{C}$ originally.

The early motors used laminations of common iron for the magnetic circuits, but soon it was found desirable to use steel laminations with a few per cent of silicon added, giving lower losses. These were insulated by thin enamel coatings, preferably applied after punching. The steel mills later developed inorganic coatings that withstand anneal, and also give good die life. It has been found recently that adding a small amount of aluminum in place of some silicon gives a slightly greater saturation limit, so that steels with 0.25% of aluminum and 1.75% silicon are used to advantage in large motors.

CAST ALUMINUM ROTORS

In 1916 H.G. Reist and H. Maxwell were granted a patent^{*} for casting the rotor squirrel cage of aluminum in one piece. About 1920, these cast rotors were widely adopted, giving lower costs, greater reliability, and better cooling. The cast construction permitted the use of deep bars and double squirrel cages that gave lower starting currents, better starting torque, and lower slip for a given starting torque. Fans were cast integral with the end rings, giving excellent air flow. Figure 5 shows a cutaway view of a typical general-purpose motor with a cast rotor and drip-proof construction.

^{*} U. S. No. 1, 190,009

INSULATION

The early motors used cotton-covered copper wires, with varnished cotton or paper coil insulation. Enamel-coated wires were developed, permitting thinner cotton coverings. Later, superior grades of enamel, such as Formex, were developed, for use without covering. Still later inorganic enamels became available, permitting higher temperatures, and a wide variety of improved insulating materials were developed, for coil and slot insulation and wedges. With these better materials, the open slot form wound coils were abandoned in favor of partially closed slots with random windings, giving better power factor and lower costs.

In 1913, B.G. Lamme and C.P. Steinmetz defined insulation composed of organic materials as Class A, good for a limiting temperature of 105°C , and insulation of inorganic materials, such as mica, glass, and asbestos, as Class B, good for temperatures up to 130°C . Class A insulation was standard for general-purpose motors until about 1945, with 40°C ambient temperature assumed, and a permitted temperature rise of 40°C by thermometer, or 50°C by resistance.

In World War II the U.S. Navy needed a large number of induction motors for their new ships, and Captain Rickover, in charge of the project, asked the manufacturers to make them smaller than standard, suggesting that the high temperature silicones just announced by General Electric would make this possible. The early silicones were too soft for use in motors, so the manufacturers set up a rush program for evaluation of new higher-temperature motor insulation systems, subjecting the motors to repeated periods of exposure to high temperature, moisture, and vibration until failure occurred. In this way, it was soon found that a new system of high-temperature enamel fiber glass-covered wires, with Class B slot and coil insulation gave longer life at Class B temperatures than the standard motors at Class A temperatures, so the Navy adopted the new system, and the

needed motors were produced with little delay. The test program for evaluating motor insulations thus begun, was continued and made into a standard IEEE Test Procedure, so that now all new insulation systems are proved by test before adoption.

INCREASED RATINGS

The National Electric Manufacturers Association was formed in 1926, by consolidation of the Electric Power Club (1910) with 4 other associations. NEMA proceeded at once to develop commercial standards, prescribing ratings, torques, overloads, and numerous requirements for standard motors. In 1927 NEMA standardized the dimensions of induction motor frames, and assigned standard ratings to each frame.

The changes, especially in insulation, made it possible to increase the output from a given motor frame. With thinner insulation, the slots could be made narrower, and the teeth wider, thus allowing fewer turns of increased copper area, with higher magnetic flux and lower reactances, to be used. Also, more active material could be placed in a given frame. The increased rating occurred in steps over the years, as shown in the table of standard ratings of NEMA frame 404, with a shaft height of 10 inches (25.4 cm). Figure 6 shows 5 versions of the 15-hp motor as it developed from 1903 to 1954.

Rating of General-Purpose Induction Motors in NEMA Frame 404

<u>Years</u>	<u>HP Rating</u>	<u>Temperature Rise</u>
1898-1903	7.5	40 ^o C by thermometer
1903-1905	10	" " "
1905-1914	15	" " "
1914-1924	20	" " "
1924-1929	25	" " "
1929-1940	30	" " "
1940-1956	40	50 ^o C by resistance
1956-1961	50	" " "
1961-1966	60	" " "
1966-	100	80 ^o C " "

These general-purpose motors have the capacity to take a momentary overload of 50%. There are several lines of special-purpose motors that are covered by NEMA standards. And, there are some 25 standards of various kinds maintained by the IEEE that apply to induction motors. These standards, with the commercial standards of NEMA enable buyers to evaluate bids, installers to select proper associated equipment, and users to shift from one manufacturer to another--all of which are essential for sound business relations.

BIBLIOGRAPHY

1. Philip L. Alger, INDUCTION MACHINES, 2nd Edition, Bordon and Breach, Science Publishers, Inc., New York, 1970.
2. B.A. Behrend, THE INDUCTION MOTOR, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1921.
3. F.T. Chapman, A STUDY OF THE INDUCTION MOTOR, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1930.
4. B.G. Lamme, "The Story of the Induction Motor," AIEE Journal, Vol. 40, 1921, pp. 203-223.
5. W.J. Morrill, "The Revolving Field Theory of the Capacitor Motor," AIEE Trans., Vol. 48, 1929, pp. 614-629.
6. C.P. Steinmetz, "The Single Phase Induction Motor," AIEE Trans., Vol. 15, 1898, pp. 103-174.
7. N. Tesla, "A New System of Alternate Current Motors and Transformers," AIEE Trans., Vol. 5, 1888, pp. 308-324.
8. R.F. Woll, "The Integral Horsepower AC Electric Motor, 1890 to 1980," Westinghouse Engineer, Vol. 31, 1971, pp. 120-125.

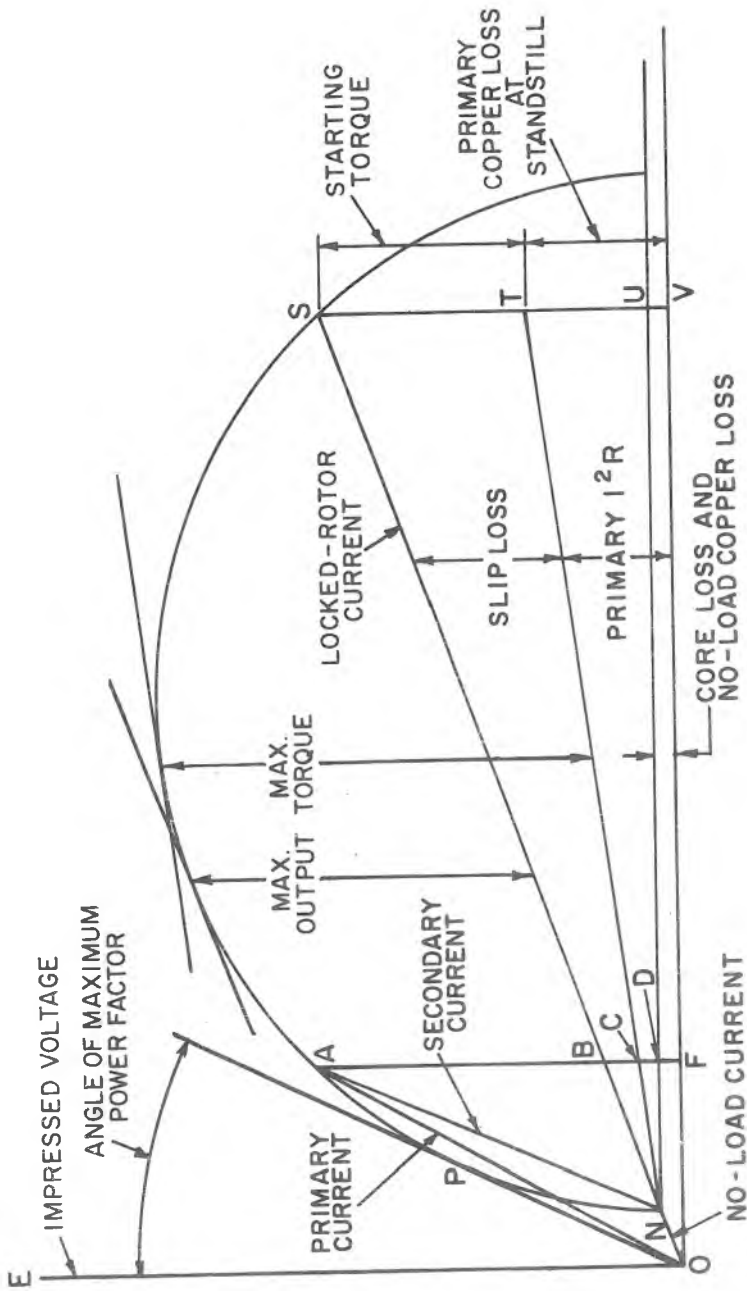


FIG.1 CIRCLE DIAGRAM

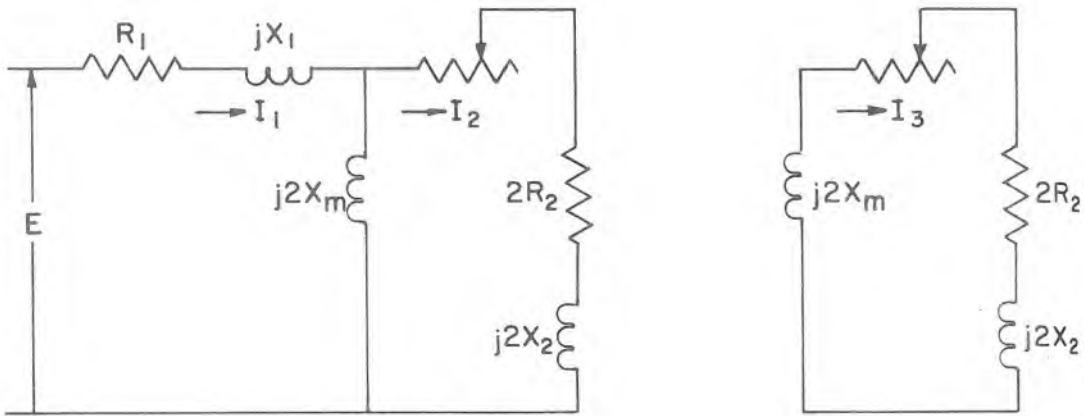


FIG. 2 CROSS FIELD CIRCUIT OF SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR

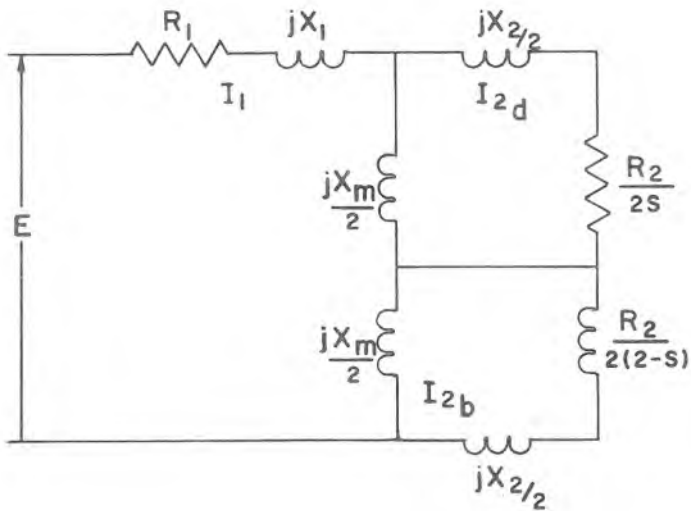


FIG. 3 ROTATING FIELD EQUIVALENT CIRCUIT OF SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR

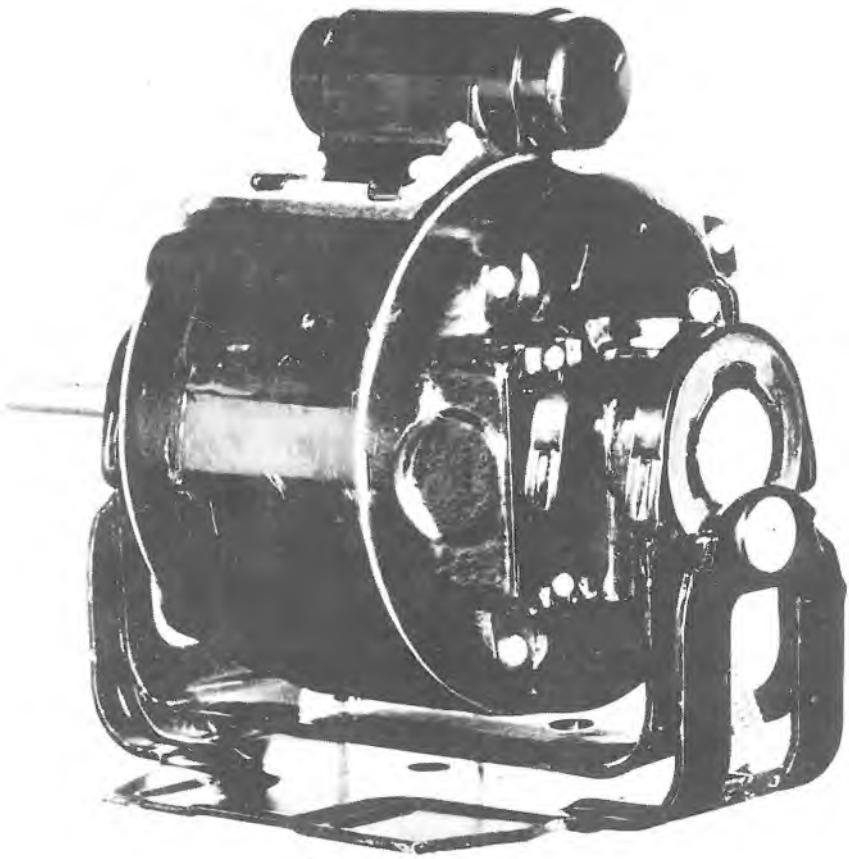


Fig. 4 Fractional-Horsepower Capacitor
Motor with Belt Tightener Base and
Resilient Mountings

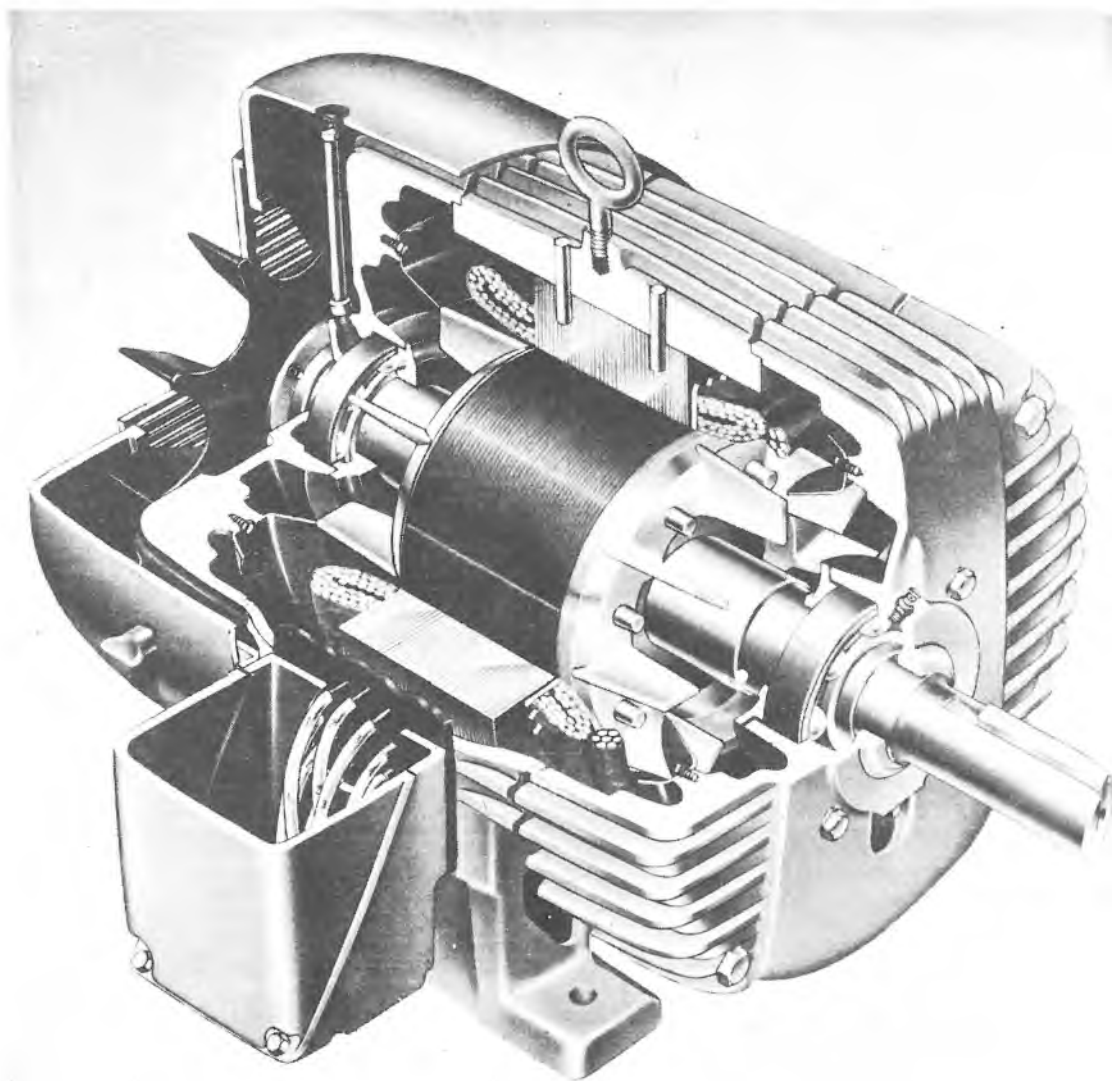


Fig. 5 Cutaway View of Drip-Proof, General-
-Purpose, Squirrel-Cage Motor



GENERAL ELECTRIC SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR
15 HP, 1800 RPM, 3 PHASE, 60 CYCLES, 220 VOLTS

Fig. 6 Several Examples of the 15-HP, 4-Pole,
60-Hertz Induction Motor

P. Hammond
Southampton University
Southampton, England

THE DEVELOPMENT OF TURBOGENERATORS FROM THE TIME OF NIKOLA TESLA TO THE PRESENT DAY

1. Introduction

Before I turn to my subject of the development of turbogenerators I should like to pay a brief tribute to Nikola Tesla in whose memory these meetings are being held. What impresses me most about him is his remarkable ability of visualising electrical processes such as the rotating magnetic field in a machine or the general phenomenon of resonance in high voltage devices. He could see what was happening and so he was able to make rapid progress. Others may have been better equipped mathematically, but Tesla demonstrated that physical insight is the key to successful engineering design and construction. In this there lies a message for those who like myself have to teach the next generation of engineers. If we can follow Tesla in the evocation of mental images we shall do well. If on the other hand we rely on mathematical symbols only, then we shall accomplish little. Tesla had superb imagination and this we must seek to stimulate in our students.

2. Early history

In talking about the development of turbogenerators I am confining my remarks to steam-turbine driven a.c. generators, but I hope you will allow one exception. I should like to refer briefly to the Niagara Falls station which began its operations in 1896 with three 3730 kW (5000 HP) water-turbine driven alternators using the Tesla polyphase system both for generation and transmission. One of Tesla's biographers relates that as a young boy Nikola told his father that "some day I am going to America and

to the Niagara Falls to produce power". And he did - a remarkable prophecy and a remarkable achievement.

The first steam turbogenerator was constructed by Sir Charles Parsons in 1884. This also does not quite fit into my story because the electrical output was direct current 75A, 100V and the speed was a terrifying 18,000 r.p.m.

The first turbogenerators using alternating current were built by Parsons in 1888 and were rated at 10, 75 kW, 1000 V, 80 Hz, 4800 r.p.m. They had direct-coupled exciters. The turbines operated at inlet pressure of about 1MN/m^2 (140 lbs/in²) and exhausted at atmospheric pressure. Condensers were introduced into the steam cycle in 1892 with a great gain in the thermal efficiency.

The Parsons turbogenerator arrived on the scene at exactly the right moment, because this was the time of the development of central power stations which had been pioneered by Sebastian Ziani de Ferranti, who was seven years younger than Tesla, but died thirteen years earlier in 1930. Ferranti was like Tesla an extremely gifted man. He constructed his first generator at the age of 17 and started a manufacturing business at the age of 19. In the "battle of the systems", i.e. a.c. versus d.c. Ferranti and Tesla fought on the same side. Against them were ranged such famous names as Edison, Crompton and Kelvin. Like Tesla, Ferranti had great courage and was not afraid of high voltages. Ferranti's famous Deptford power station in London had generators at 2400 V, which was stepped up to 10,000 V for transmission. For this purpose Ferranti had to design and build his own transformers and also 28 miles of a 10,000 V cable, some of which survived for forty years. But like Tesla, Ferranti knew failure as well as success, and after a visit of Edison to the Deptford station his position was terminated, and he lost his job. It was however only a temporary setback.

Without turbogenerators the movement towards large central stations could not have succeeded. In the original plans for the Deptford station Ferranti included a pair of 7450 kW (10,000 HP) reciprocating steam engines running at 60 r.p.m. The alternators weighed 500 tons each. The

rotating armatures had a diameter of 14 m. The engines were similarly massive, having a stroke of 1.9 m. The courage which could envisage such enormous machines was altogether admirable and there was engineering achievement to match the courage. Nevertheless the reciprocating engine suffered from many inherent disadvantages. Vibration was one of these and the speed varied throughout each cycle so that parallel operation was often impossible. These troubles were overcome by the Parsons turbine-driven generators. A particular example is that of the Manchester Square power station in London in 1890 which had ten reciprocating engines driving 120 kW single phase alternators at 350 r.p.m. The vibration and noise was such that the people living near took legal action against the operating company. Large sums were spent to improve the foundations of the power station, but to no avail. The situation was saved by replacing the engines in 1894 with steam turbines. The alternators were rated at 350 kW, 1000 V, 100 Hz, 3000 r.p.m. At the time they were the first turboalternators in London and had more than twice the rating of any previous turbogenerator. The turbogenerators had far less vibration. Some of them were mounted on rubber blocks without being bolted down.

The original alternators had surface-wound armatures with the conductors held down by piano wire binding. Frequently this wire overheated and fractured. Later the armature conductors were put into tunnels (closed slots). Later still it was realised that a.c. output could best be taken from the stator and rotating field windings became the accepted practice.

3. More recent history

Developments in unit size came rapidly. Parsons built a 1000 kW, 1500 r.p.m. turbogenerator for the city of Elberfeld in Germany in 1900. Other companies soon also began to manufacture such machines, at first under licence from Parsons. On the continent Brown, Boveri and Co. commissioned a 6 pole 100 KVA machine in 1898. In America the Westinghouse

Company acquired the American rights in Parsons patents. 1912 saw a 25,000 kW turbogenerator at 750 r.p.m. A considerable achievement in 1928 was a 64,000 kW, 3Ø, 11 000 V alternator running at 1500 r.p.m. Voltages increased and for a while 33,000 V was favoured for direct transmission, without the need of a step-up transformer. This development was superseded by the introduction of large interconnected systems, which had to operate at still higher voltages. These interconnections required the adoption of a single frequency standard. In 1925 there were still 17 different frequencies in use in Britain, but in 1926 50 Hz became the standard with a standard transmission voltage of 132,000 V. This meant the general adoption of 3000 r.p.m. for the speed of turbogenerators in Britain and Europe. America chose 3600 r.p.m. 60 Hz. The present standard rating in Britain is 660 MW at 3000 r.p.m. Designs exist for 1300 MW 3000 r.p.m. and 1215 MW 4 pole generators have been built for 1800 r.p.m. Even bigger sets are planned.

But this section must stop on a more cautious note. Until 1970 demand for electricity increased exponentially, roughly doubling every 10 years. People confidently extrapolated this increase for several decades to come. Then came the energy crisis, the recession of trade and the general awakening to the fact that exponential growth is neither possible nor desirable. To-day's talk is about S curves rather than exponential curves. I expect that such talk would not have fitted the optimistic temperament of Tesla, who was happy to envisage unlimited growth and the transmission of MW and GW by resonance effects in the earth's electric field. Happily it is not my business to discuss the enormous non-technical problems involved in the generation of electricity. I merely mention in passing that the same pattern for growth cannot be assumed in the future.

4. Technical problems in the development of turbogenerators

The brief account of the development of turbogenerators which I have given, a development made possible by Tesla's polyphase system and Parsons' development of the turbine, may have conveyed the impression that no difficulties had to be overcome on the way. Indeed I have often been told by pure physicists that, after Faraday had in 1831 discovered electromagnetic induction, there was little to be done in the development of electrical machines. That is the view of those who confuse theory and practice.

We must distinguish between first-order and second-order effects. The generation of electricity by the interaction of electric and magnetic fields is the first-order effect and this was well-established by Faraday, Tesla and other pioneers. But the design and manufacture of efficient and reliable machines requires more than principle. It requires engineering skill and the overcoming of second-order difficulties.

Let me take some examples. First of all there is the cooling of the device. Already in 1905 Sylvanus P. Thompson had pointed out that, even if an alternator had 98% efficiency, the losses would raise its temperature to red heat in one minute. The removal of the heat due to losses has been one of the chief problems in the development of turbogenerators. Air was naturally the earliest cooling medium. But the motion of air at high speed through constricted passages causes additional losses. This problem was most urgent in America, because 60 Hz necessitates 20% higher speeds than 50 Hz, and windage losses may therefore be 70% higher. The Americans overcame the problem by the use of hydrogen, which is very much lighter than air and has excellent heat-conductivity. Unfortunately hydrogen/air mixtures are inflammable. Hydrogen-cooled machines have to be enclosed in massive explosion-proof housings, but happily there have been almost no explosions so far. The rotor of a turbogenerator is particularly difficult to cool, but soon designers introduced cooling ducts into the rotor windings. The introduction of hydrogen-cooling resulted in a five-fold increase in unit ratings accompanied by roughly

a five-fold reduction in the weight per kW. Further improvement was achieved by increasing the hydrogen pressure to around 5 atmospheres. The next step was taken when the stator conductors were made tubular and cooled by passing water through them. Since some of the conductors are at voltages of the order of 10,000 V, this was a very courageous step, but it has been highly successful. Present-day practice combines water cooling of the stator windings with hydrogen cooling of the stator core and of the rotor. Experiments are in progress on the use of water to cool the rotor. But water is heavy and its use in the rotor which is moving at high speed is difficult. At present another idea is therefore gaining in importance. This is to use liquid helium to cool the rotor, so as to make use of a superconducting winding. Such a winding would have no ohmic losses. Even more important, the use of a superconducting rotor winding would enable the generator to be built without requiring a high-strength steel forging. Such forgings are extremely difficult to produce and there are very few steel companies in the world which can produce them. A generator with a superconducting winding would also be considerably smaller and lighter. But on the other hand it would require a refrigeration plant, which would add to the cost and constitute a possible source of trouble. Decisions are not easy to make.

The cooling story shows how this second-order effect has dominated the design of the turbogenerator. Other factors could be mentioned such as the mechanical strength which has controlled the design of the rotor and hence of the diameter of the machine. Then there are the critical speeds of the whirling rotor which are very important and potentially hazardous. We shall mention only one other such second-order matter, namely the control of eddy currents. This is a fascinating story which is known to very few people.

The use of iron cores to strengthen magnetic fields was known to Faraday and it was natural to employ iron in the construction of generators. But the effects of currents in the iron, when this was subject to alternating fields was unexpected. Thus the famous designer J.E.H. Gordon installed

three large alternators in 1886, in which the armature winding had a solid core of boiler plate. It was found that practically the entire output of the steam engines driving these machines (about 500 kW each) went into heating the iron, and the coils burnt out at every test. Water cooling reduced the temperature, but did little to improve the output. The trouble was cured by the introduction of laminated iron cores. This early experience showed the importance of inhibiting the parasitic eddy currents in the iron, which not only caused losses and heating, but also reduced the flux and the voltage of the machine.

As the size of machines increased it was found that parasitic currents also flowed in the copper conductors themselves. The a.c. losses were larger than the d.c. losses and it became necessary to subdivide the conductors. A further improvement was introduced by the method of transposition which ensured that there would be no circulating currents within the winding. Such circulation could be produced by leakage fluxes linking some of the conductors, but not others, and so causing circulating electromotive force in the winding.

In generators of the present day, eddy currents have had adverse effects particularly at the machine ends. Here leakage flux impinges on the massive end-plates and causes eddy currents in them. Moreover some axial flux occurs in the laminated core and the laminations offer a low resistance path to eddy currents induced by such flux components. The losses caused by such currents are of no consequence, but local hot spots may be very important indeed. The conductor insulation is very sensitive to temperature. It only needs one failure in the insulation system in one small place to lead to very severe damage to the generator. Designers have used much skill in the battle against eddy currents.

It is difficult for the man in the street to appreciate the care that is needed in the design and manufacture of present-day turbogenerators. The news media, in their search for novelty, regard electrical machines as old-fashioned. But designers are not searching for novelty. Their chief aim is

reliability. The need for this reliability can best be understood by anyone who has seen what happens when a turbogenerator fails. There have been few catastrophic failures, but occasionally a mechanical failure has produced such devastation as to make it appear that the whole power station has been destroyed by high explosive. Second-order effects can lead to first-order destruction! The high economic cost of outages must also be mentioned.

5. Research and development on turbogenerators

Any account of the development of machinery or other technological devices tends to concentrate on the achievements which have been made and this is right and proper. But it may give the misleading impression that all problems have been solved. This is seldom the case. Even if the problems of the past have been solved more or less satisfactorily, the future generally brings problems of its own. One cannot predict the future, but certain trends are apparent. The energy crisis is only the forerunner of many other shortages of raw materials, which will have to be faced by our successors. Society will depend more, rather than less, on engineers who have a firm grasp of fundamental science and who possess physical insight.

It is therefore very important that research and development should continue. In our university we have a particularly strong interest in research on turbogenerators as well as other electrical machines.

It may be asked now a university can possibly contribute anything to the development of generators weighing hundreds of tons. Of course the centre of research and development must lie in the manufacturing firms. Full-scale tests are always necessary. But they are also time consuming and expensive. Model tests are therefore desirable, coupled with intensive and extensive theoretical work and computation. Such work is possible in research institutes and universities.

Scale models are not easy to produce, because there are many parameters to be taken into account. Amongst the important linear dimensions

there are the pole-pitch on the stator and rotor. The endwinding geometry includes the rotor or stator stand-out, the stator winding overhang and core-angle and the arrangement of the core clamping-plates and screens. Another linear parameter, the eddy current penetration depth varies with the material and depends on permeability, conductivity and frequency. The radial core depth has also to be considered and so have the stator and rotor slot-pitches. The lamination thickness and the arrangement of the core segments and of ventilating ducts are important. The permeability of the iron is a crucial factor and this permeability varies from place to place, it is also anisotropic and varies with direction and also depends on saturation.

This list is far from exhaustive, but enough has been said to show that designers face a formidable task and this task is shared by research and development engineers.

Since a single scale model is impossible, research work must proceed by seeking to separate the variables so as to give guidance about the influence of each factor. This is a difficult matter. Trouble in large generators usually manifests itself by temperature rise, but as in a human body the diagnosis of a 'fever' is not sufficient if the patient is to be cured. The cause of the fever and the location of the cause have to be found.

My colleagues and I have been working on such problems for many years and in conclusion I should like to show you a few illustrations of our work. First there are some of the tools used. Then there are some very simple models: a large copper plate, a stack of laminations. Then two more complicated models for end effects, studying various kinds of screens. Then there is a specially designed stator-rotor unit instrumented fully. There are also special rotors and some models related to generators with superconducting machines. Variable frequency supplies are a great help in analysing behaviour.

Allied to such experimental work is much computation. The problems studied have to include Laplacian and Poissonian fields in two and three dimensions, and also diffusion problems both under transient and steady

alternating conditions. The calculations in themselves are difficult, but the overriding difficulty is the use of the results. A flood of paper with arrays of numbers is not immediately useful to the designer. The enthusiasm of young computer specialists has to be curbed. As always physical insight matters most. Here are some results which may interest you: the fringing field at the machine and, the field in a stator tooth, eddy currents in a hollow conductor, eddy currents in various end rings, temperature rise in a core, variation of axial flux density in a core.

In all this work close touch must be kept with the manufacturer, who possesses large scale test facilities and who alone can guide the research worker to the study of the most important and urgent problems. The planning of co-operative research is in itself a very important and difficult matter. It seems to me that the electrical machines industry in your country is well-adapted to such co-operation and we can learn much from you.

6. Conclusion

I hope that this survey has kept a balance between the past, the present and the future. The story of Tesla is the story of the heroic age of electricity. Tesla was one of the giants, one of the pioneers who opened unknown regions to mankind. Our problems are different. As Newton said: the reason why we can see farther is because we stand on the shoulders of giants. But our task is no easier. The challenge of using the resources of nature in the service of mankind without waste or destruction is enormous. In our less heroic times we must overcome the additional challenge of learning to work together, a challenge which Tesla found it difficult to meet. One thing is certain: there is very much work to be done.

Leon T. Rosenberg, Consultant,
Allis-Chalmers Power Systems, Inc.
and Allis-Chalmers Corporation
P.O. Box 512
Milwaukee, Wis. 43201, U.S.A.

UNUSUAL PROBLEMS IN LARGE TURBOGENERATORS

Summary

Rapid growth in turbogenerator ratings has resulted in many problems. Foremost among those in stators were core vibration, magnetic forces, stray and fringing flux losses and insulation. Problems in rotors involved retaining ring and forging metallurgy, vibration, shorted turns, and negative sequence current damage. Abnormal shaft torques have been discovered due to subsynchronous resonance and power system switching. Some of these unusual problems are reviewed together with their solutions.

1. INTRODUCTION

The rapid growth in the electric power industry since Nikola Tesla laid the foundation for polyphase ac power has resulted in many problems for both users and producers of electrical equipment. Turbogenerators were no exception. The attractiveness of larger and larger ratings to the utilities was so compelling that orders were often placed for turbine units rated much higher than any previously built. It was therefore to be expected with such rapid advances in output that some problems would occur.

2. STATOR PROBLEMS

2.1. Core Vibration

The rotating field of a 2-pole generator tends to ovalize the stator core due to the magnetic force in the air gap. The elliptical distortion rotates with the rotor, creating a double frequency vibration at any point on the stator core. To minimize the amplitude, the natural frequency must be well above twice operating speed. As stator cores grew larger in diameter, this became more difficult to accomplish.

Prolonged operation at abnormal amplitude has been known to cause progressive wear and objectionable noise. Relative motion of the laminations has also been observed and, in one case, a complete core failure has resulted. A core failure can also result from a foreign object in the air gap, or from bruises in the bore caused during maintenance work. A 5/8" x 2" long setscrew, not securely locked, was drawn into the air gap of the first generator built with a direct-cooled rotor, soon after its installation in 1951. Eighty percent of the core had to be replaced with new punchings, but no damage was done to the rotor in any way related to the new cooling method. Such disasters emphasize the importance of meticulous inspection of every detail in large machines.

2.2. Remedial Measures

The most effective remedy for abnormal core vibration has been to restore firm axial pressure and apply radial compression when needed. In new 2-pole generators, Allis-Chalmers Power Systems and Kraftwerk Union tightly clamp their cores radially in spring baskets, and insure permanent uniform axial pressure by frequent successive pressings during stacking. The insulated through-bolts are securely anchored in heavy, one-piece clamping plates.

2.3. Coil Forces

Under sudden asymmetrical short circuits, the largest machines today may experience momentary peaks exceeding 300,000 amperes. Distortion of the coil ends due to the enormous forces that vary as the current squared has been a problem. The most effective solution so far, employed by Kraftwerk Union and Allis-Chalmers Power Systems in their largest generators, involves a huge funnel-shaped backing ring (Figure 1) to which the coil ends are securely bolted. A solidly rigid structure of great strength and high natural frequency is obtained.

2.4. Fringing Flux Losses

Fringing fluxes at both ends of the stator teeth create losses and abnormal temperatures. The earliest solution was enlargement of the gap

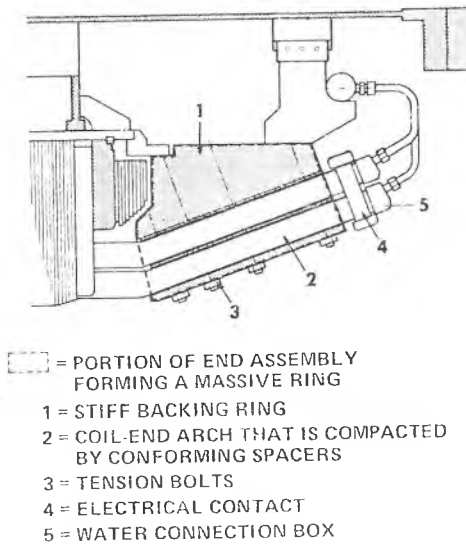


Fig. 1. Stator coil ends bolted to the
funnel-shaped backing ring

at both ends. Nonmagnetic finger plates and retaining rings gave further relief. A great forward step was achieved in an 80 mw generator in 1948 by radial slits for several inches at both ends of each tooth. The temperature rise of 80°C in a duplicate unit was reduced to 40°C , indicating a 2 to 1 loss reduction. Two and even three radial slits per tooth have been employed in some units. To help alleviate local temperature, forced cooling with pressurized cold hydrogen has been applied between the finger plates and the core.

2.5. Insulation

For many years, asphalt-bonded mica tape was considered best for turbogenerators. As machine lengths increased, and units were required to cycle or shut down each night, tape migration at the ends of the stator coils became a problem. New insulations were developed using either mica flakes or mica paper with some form of epoxy or polyester resin. In

Micalastic^R insulation⁵, used by A-CPSI and KWU, the mica tape is thoroughly impregnated with epoxy resin under a high vacuum. Sixteen years of operation in hundreds of units have not revealed any in-service breakdowns.

2.6. Stray Losses

To cope with the enormous stray losses that increase nearly as the square of the current loading, low reluctance, low loss flux traps adjacent to the pressure plates and behind the coil ends have been found highly effective. Low resistance shielding to protect the pressure plates and coil-end enclosures has also proven beneficial.

3. ROTOR PROBLEMS

3.1. Vibration

To insure smooth operation of a high speed rotor, the wise designer will try to avoid any lateral critical speed within 20% of operating speed. In any case, careful balancing at the factory is considered imperative. Large rotors require high excitation current. Prior to adoption of the brushless excitation system, large collector rings were necessary which increased the length of the outboard end of the shaft. In one case, this created extreme sensitivity to unbalance, which resulted in a periodic cycling of the outboard bearing journal as shown in Figure 2.

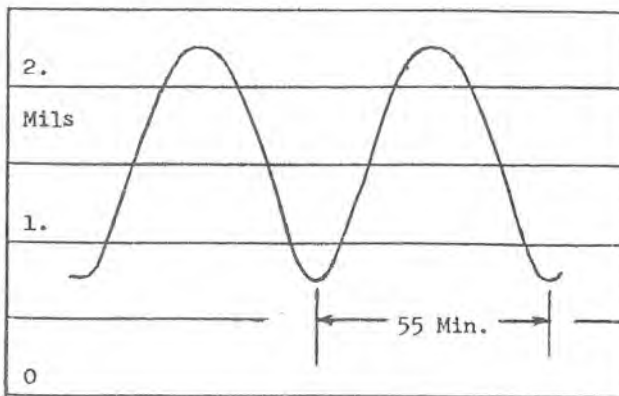


Fig. 2. Unstable vibration of bearing journal. $y = 1.5 + .75 (\cos .001904t + j \sin .001904t)$

Investigation revealed this to be the vector sum of a 1.5 mil steady component, plus a 0.75 mil component rotating 360° every 55 minutes. The cause was found to be abnormal friction of the brushes within the brush holders. Fifty percent more pressure was being applied by the brushes to the rising region of the collector rings than to the receding region. The extra friction created local heat that penetrated to the shaft, causing a slight bow equivalent to adding balance weight. As with a balance weight addition, this caused the high side of the shaft and collector rings to move to a different location. The local heat then also moved to the new high side, causing further displacing of the bowed region. The ultimate solution involved redesign of the brush holders to reduce their internal friction.

3.2. Short Circuits Between Turns

Experience has indicated that short circuits between rotor turns seldom progress. Unless mechanical unbalance results that cannot be offset by weights or thermal balancing³, immediate correction is not usually imperative. Some local heat may be generated if the contact has a resistance comparable to the turn resistance. Two or more turns shorted at the same point with unfavorable resistance can be serious. Techniques for locating shorted turns, open circuits, and grounds in the rotor are outlined in a 1971 paper.⁴

3.3. Negative Sequence Damage

Unbalanced phase currents contain a negative sequence component. Single phase line-to-line operation is most severe. It is highly probable that alternating current would not have been adopted had it not been for Nikola Tesla's invention of polyphase ac power which eliminates the negative sequence component if the phases are balanced. If not, the backward rotating flux circulates currents in the rotor wedges, teeth and retaining rings, causing severe local heating at their contacts with each other. Temper colors and even welding of wedges to retaining rings have been observed.

Before the days of non-magnetic retaining rings, the alloy steel rings were vulnerable to Martensite pockets caused by the quenching effect of sur-

rounding cool metal after the localized arcing had subsided. Incipient cracks originating in these pockets progressed by fatigue until failure occurred. The non-magnetic steel retaining rings, now employed, are not subject to this type of failure but may sustain loss of ductility in the overheated regions. For large generators up to 800 MVA the new ANSI Standards will provide for an integrated $I_2^2 t$ capability of 10. Above 800 MVA, a linear reduction to 5 at 1600 MVA has been agreed upon. To meet these standards, most large rotors will be equipped with some form of amortisseur windings.

4. COOLING METHODS

4.1. Hydrogen Cooling

The thrust bearing type of hydrogen seals originally developed at Allis-Chalmers gave good service with gas pressures up to 30 psig. When direct cooling was adopted in the early '50s at gas pressures up to 75 psig, the original hydrodynamic type proved inadequate. It was replaced with a new hydrostatic thrust bearing type. Some problems still occur due to O-ring jamming, but these are being corrected by modification of the seal housings. Double-flow radial seals used by Allis-Chalmers power Systems and Kraftwerk Union AG are giving good service on their largest units.

4.2. Water Cooling

Figure 3 compares the heat transfer coefficients of water, hydrogen and oil. The benefits of water cooling far outstrip those of any other cooling medium. The 1500 MVA Biblis unit in West Germany has both its rotor and stator windings cooled with water. Many more large units like it are on order. A number of problems were encountered during the ten years of development, but they served to point out vulnerable features that needed revision or elimination. The Biblis unit has already completed well over a year of operation² with no problems reported related to water-cooling of the rotor.

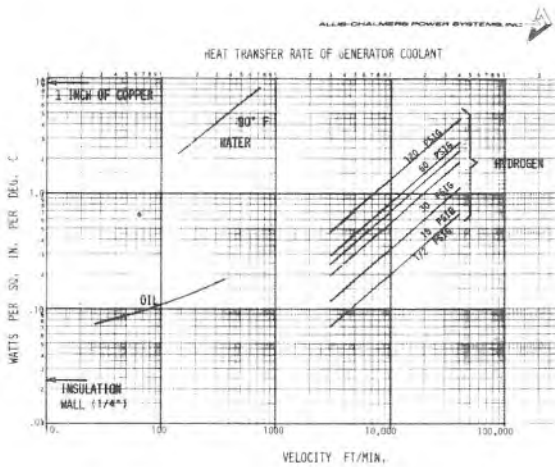


Fig. 3. Comparison of heat transfer coefficients

5. PROBLEMS AFFECTING GENERATOR AND TURBINE

5.1. Forging Metallurgy

Among the most serious of disasters were the several catastrophic rotor and turbine forging failures in the early 1950's. The causes were determined to be high transformation stresses during heat treatment and embrittlement of the steel from hydrogen which created cracks within the forgings. These led to brittle fracture of several forgings that were brought up to speed in a cold condition. As a temporary measure, rotors of this metallurgy were preheated at reduced speed for several hours before accelerating to full speed.

To solve this problem, new steels were developed along with a vacuum degassing technique to lower the hydrogen content. These and other advances also lowered the transition temperature, above which brittle failure does not occur, and greatly improved the quality of the forgings.

5.2. Abnormal Shaft Torque Due to Switching

Recent studies by computers have determined that severe torsional stresses can occur in the shafts of large turbogenerators when a short circuit near the power plant on one of two parallel lines to the network is cleared at an unfavorable instant. The oscillations between generator and turbine create

alternating stresses that can be greatly increased if the fault is cleared while the turbine shaft is deflected forward and the generator has also advanced ahead of the network voltage. The curves of Figure 4 for a typical 1000 MW unit show that minimum torques result if clearing is done in 3.5 or 7 cycles. Clearing at 5 and 9 cycles gives much higher shaft torque.

If automatic reclosing is employed, much higher torques are possible, especially if the fault is still present. Figure 5 depicts an unsuccessful reclosing in which 7-1/2 times full load torque occurs after the fault is cleared the second time. Also indicated at the top, a peak of only 4.1 p.u. would be reached if the reclosing had occurred one cycle earlier. This problem is under intensive study by an IEEE Working Group which is endeavoring to set up limits in Δp or Δi as a guide to switching practice.

5.3. Subsynchronous Resonance

Two shaft failures occurred recently at the Mohave Station in Western United States, due to subsynchronous resonance (SSR). This phenomenon may occur when series capacitors are employed to compensate for line reactance. A resonant oscillation frequency, f_0 , results that is always less than system frequency, f . System resistances usually damp out these oscillations but they can be fed from the positive sequence currents in rotating machines. Pulsating torques result at frequency, $f - f_0$, which may build up harmful torsional stresses in any shaft region with mechanical resonance at or near this frequency.

Tentative preventive measures consist of minimizing the extent of compensation, and the use of monitors and relays to detect the first signs of SSR. Dual gaps, filters, thyrite resistors, and bypass switches are also employed to quickly correct or compensate for any tendency toward SSR when detected. A Task Force has also been organized to study this problem.

6. CONCLUSIONS

From the foregoing it is evident that the problems in large turbo-generators have not all been solved. Hopefully, exchange of technology through published papers and symposia such as this one honoring that brilliant Genius, Nikola Tesla, solutions will ultimately be found.

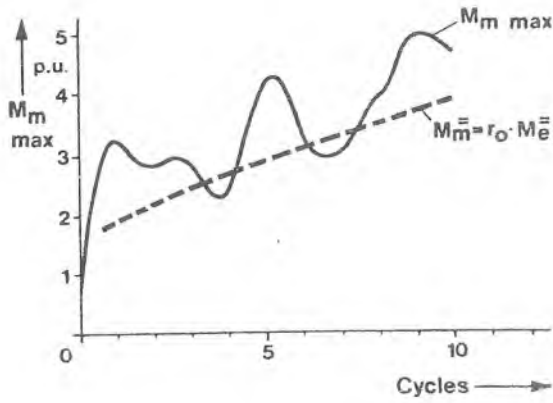


Fig. 4. Variation of peak shaft torque with clearing time

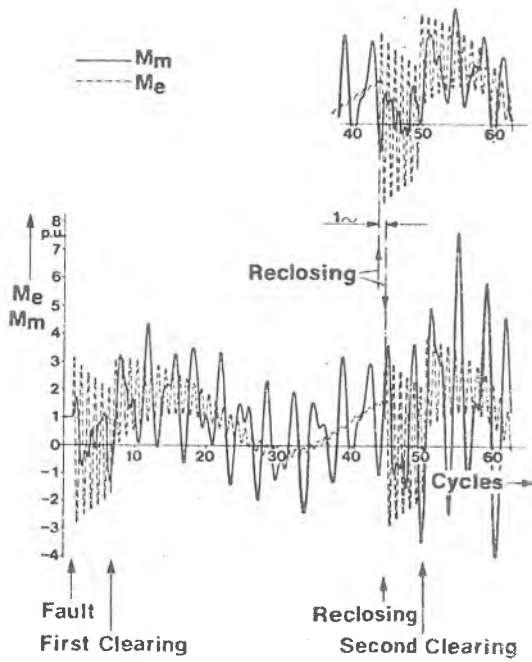


Fig. 5. Effect of unsuccessful automatic reclosing on shaft torque

7. REFERENCES

1. Abolins A, Lambrecht D, Joyce J.S., and Rosenberg L.T.
"Effect of Clearing Short Circuits and Automatic Reclosing on Torsional Stress and Life Expenditure of Turbine-Generator Shafts". IEEE Trans. Vol. PAS 95, No.1, pp 14-25, Jan./Feb.1976.
2. Haas H, Heinrichs F, and Spalthoff F.J.
"First Year of Operation of the World's Largest Tandem-Compound Turbine-Generator". Presented at the American Power Conference in Chicago April 21-23, 1976. Will be published in the Proceedings of the American Power Conference 1976.
3. King W.F.
"Thermal Balancing of Large Rotors". Allis-Chalmers Electrical Review, Vol. 12, No.2, pp 8-11, 1947.
4. Rosenberg L.T.
"Detecting Faults in Turbine-Generator Rotor Windings". Allis-Chalmers Engineering Review, Vol. 36, No.3, pp 17-21, 1971.
5. Wichmann A.
"Reliability and Testing of High-Voltage Stator Insulation for Large Rotating Machines". IEEE Trans., Vol. PAS 91, No.5, pp 2230-36, Sept./Oct. 1972.

II. Poglavlje

SJEĆANJE NA TESLU

Kurepa, Djuro

Prirodnomatematički fakultet
Studentski trg 16, Beograd

Matematički institut
Knez Mihajlova 35, Beograd

NIKOLA TESLA I MATEMATIKA

Za ličnost kao što je Tesla treba ispitati veze između njega i svake delatnosti i pojave. U svojem neverovatnom stvaralačkom delu Tesla je, što svesno što nesvesno, dotaknuo vanredno raznorodna i važna pitanja koja, preko danas cvatuće nauke kvantorike, povezuje Teslu s velikim matematičkim problemima, granama, ... Ističemo i Teslinu diodu (čl. 3).

NIKOLA TESLA AND MATHEMATICS

A personality like Nikola Tesla calls for the explanation of his connections with every activity and every phenomenon. In his incredible creative work Tesla was deliberately or accidentally involved with extremely heterogeneous and important fields. These, through the currently thriving science of Quantorics, link Tesla with major mathematical problems and disciplines ... Tesla's fluid diode is also reviewed. (Section 3).

0. Diversity of Tesla. 0/0. A great man like Nikola Tesla should be examined from every point of view, in connection with every scientific field, technical performance, cultural phenomenon.

Every word, every statement, every hypothesis emanating from such an personality should be carefully examined; many of Tesla's ideas were certainly used by many individuals without quoting Tesla.

In particular, it is necessary and useful to explore the theme

Nikola Tesla and X

where X denotes: Mathematics, Physics, Engineering, Psychology, Philosophy, Ethics, Aesthetics, Politics, Human World, Universe, Telecommunications, Radio, Life, Planets, Stars, Astronautics, Metascience, Poetry, Hazard, Dialectics, Teaching, Education, Arts, Wars, Religion, Remote Control, Health, Nutrition, ...

Let us say something on the subject "Tesla and Mathematics".

0/1. Freedom. Courage. Discipline. One of the fundamental items in Mathematics is rationalized freedom of thought. Georg Cantor wrote: "Das Wesen der Mathematik liegt in ihrer Freiheit". Tesla certainly demonstrated unbelievable freedom, courage, and discipline in his ideas and showed thereby that he possessed a great deal of this mathematical quality.

0/2. Tesla wrote: "There was no force of suggestion or mysterious influence about it. Such means would have had no effect whatever on me, for I was a firm believer in natural laws" (7) A 196.

0/3. "My imaginings were equivalent to realities ... But more important than all this was to me the revelation that I was inventor. This was the one I wanted to be. Archimedes was my ideal. I admired the works of artists, but to my mind, they were only shadows and semblances. The inventor, I thought, gives to the world creations which are palpable, which live and work" (v.7) A 198₈₋₃.

2. Tesla and mathematicians.

2/1. Tesla had no relations with mathematicians. A scientist with a greater mathematical culture and technique with whom Tesla could have collaborated was his conational Mihajlo Pupin (1858.10.04 Idvor - 1935.03.12 New York), a Yugoslav immigrant in the U.S.A. like Tesla; unfortunately, after an initially excellent and friendly cooperation they disagreed, and it was only on the eve of Pupin's death that they made it up again.

2/2. It is amazing that there are no mathematical reprints in Tesla's papers, although some ought to be there; e.g., in 1936 I sent to Tesla, with a dedication, a signed copy of my doctor's dissertation Ensembles ordonnés

et ramifiés, 6+138, Thèse Paris; idem: Publ. Math. Univ. Belgrade 4(1935)1 - 138); so far I have not been able to find this copy.

2/3. One of Tesla's ideals was Archimedes, the greatest mathematician of all times. Tesla appreciated very much his professor of mathematics, Moritz Allé (1837.09.19 Brno - 1913.04.06 Baden/Wien).

2.4. The name TESLA is a permutation of TALES which can in turn be connected with the name of the great Greek mathematician, physicist and philosopher THALES (←640 - ←548).

2/5. At the secondary school in Križevci my fellow students called me Tesla, which was the result of a conference on radiotelegraphy I performed as a student.

3. Cypher systems and Tesla's diode.

3/1. There are many possibilities of representing digits, numbers and calculations in various systems. As digits we can use material objects (stone, string, rope, knots), signs, various phenomena (light, electricity, magnetism, etc.). It is a revolutionary fact that electricity, and electronics in particular, found a far-reaching application in computing devices, in particular for very fast calculations. But there are cases where high speed is not necessary, and non-electrical calculating devices can be used; such are the hydointegrators of Mihajlo Petrović, and pneumomotors.

3/2. The memory units of pneumomotors are built up of fluid diodes, and one of the first fluid diodes belongs to Nikola Tesla.

3/3. In 1916 N. Tesla applied (v. 6) for a patent concerning a fluid control element. Tesla called it Valvular Conduit; it worked as a fluid diode, producing high resistance to fluid flow in one direction and low resistance in the opposite direction. This was an asymmetrical phenomenon, resembling the circulation of blood in the veins. Tesla mechanically modelled a biological process, the inverse of what had first been done by Euler 150 years earlier: Euler developed a hydrodynamic model of blood circulation in the human body (it was the first mathematical model of a rather complicated biological process).

3/4. Tesla's diode is acclaimed as the first fluid device having no moving parts. Fluid diodes appear as passive components in present fluid units. cf. the important paper (4); v.also (3), (5).

4. Graphs and Tesla's work. A new mathematical discipline called the theory of graphs has developed in the 20th century. In Tesla's papers and patents there are various schemes and designs; they constitute interesting mathematical features also as graphs. The graphs corresponding to n-phase currents - star connections as well as polygonal connections - are interesting from the mathematical point of view and generally as well (in particular if n equals 3).

5. Macrocosmos - Microcosmos. Nikola Tesla expressed the great idea that the behavior of the microcosmos is like the behavior of the macrocosmos. This idea was later developed and extended by Ernest Rutherford (1871.08.30 - 1937.10.19) and Niels Bohr (1885.10.07 - 1962.11.18). Here are Tesla's words: "An infinitesimal world, with the molecules and their atoms spinning and moving in orbits, in much the same manner as celestial bodies, carrying with them and probably spinning with them ether, or in other words, carrying with them static charges, seems to my mind the most probable view, and one which, in a plausible manner, accounts for most of the phenomena observed."

5/2. "Each thing we perceive, though it may be vanishingly small, is in itself a world, that is, like the whole of the universe, matter and force governed by law - a world, the contemplation of which fills us with feelings of wonder and irresistibly urges us to ceaseless thought and inquiry". (7) L4, p.107.

5/3. Prophecy on atomic energy (1914). (7) A 171: "I have just made known an invention which will show to electricians how to produce immense electrical pressures and activities. By their means many wonderful results will be achieved. The human voice and likeness will be flashed around the globe without wire, energy projected through space, the wastes of the ocean will be made safe to navigation, transport facilitated, rain precipitated at will and, perhaps, the inexhaustible store of atomic energy released."

6. Tesla and Informatics (a new mathematical discipline). Tesla is a pioneer in the communication and transmission of symbols, words, energy, etc. It is very instructive to read a proclamation, written in 1900 by a group of Tesla's friends to get funds for the construction of a broadcasting station on Long Island. All its components have practically been in use since as early as the thirties. Since then a vast mathematical and technical discipline has developed: informatics, with all implications and achievements (v.(8) pp. 470-471). Tesla's results in radio engineering, energy transmission, symbol transmission ... constitute an important contribution to this new field of science and engineering.

7. Continuity - Discontinuity.

7/1. In mathematics, as well as in other fields, continuity and discontinuity considerations are studied extensively. For a long time continuity considerations prevailed, in particular because of the tremendous applications of infinitesimal calculus. But in the last century, discontinuity, too, began to appeal to mathematicians. It is worthwhile to note that in his 1891 lecture Tesla emphasized the possibilities and applications of discontinuity by saying the following: "It is the problem of imparting to a body a certain velocity without passing through all lower velocities. But there is a possibility of obtaining energy not only in the form of light, but motive power, and energy of any other form, in some more direct way from the medium. The time will be when this will be accomplished, and the time has come when one may utter such words before an enlightened audience without being considered a visionary ... (7) L.47.

7/2. Discrete considerations in the quantum theory are also an example of discontinuity.

8. Some mathematical aspects of Tesla's approach.

8/1. Tesla's mathematical approach to certain problems can be seen when he describes how he and Edison proceeded to find a solution. Tesla meditated, and studied the problem until he found the best, quickest and most effective solution. On the contrary, Edison proceeded experimentally, case by case, until

he found the solution. In the case a needle was lost in a hay-stack, Edison would not worry where with the greatest probability the needle was lost but would turn straw by straw, until he found it.

8/2. For Tesla, mathematics enabled one, with a certain probability or certitude, to predict something, to express it and find it. Thus, in an article in the Harvard Illustrated Magazine, published in 1906 and describing his experiments in Colorado Springs (1899), he wrote that in 1900 he received and captured some noises he considered to come from outer space; he answered on his radio-transmitter and concluded that these disturbances could be captured on Mars and decoded as interplanetary messages. For Tesla the existence of extraterrestrial intelligent beings was not only a probability but even a mathematical certitude.

8/3. The sense of generalization and transferring. Mathematical tools: specification, generalization, analogy, transferring, extension, are often used by Tesla, even in social fields. Thus he wrote in 1914 an article on work of (7) A 171 and claimed: "One good effect of this disastrous disturbance will be a long period of peace. This is a natural consequence of the law that action and reaction are equal."

9. Tesla's work from the point of view of quantorics.

9/1. Quantorics is a new discipline common to mathematics, logic, linguistics and phenomenology. In particular, the study of quantors or quantifiers (indefinite pronouns): all, some, no, every, each, has helped to settle some very important questions. All and nothing, as well the superlatives, also play a role in this field.

9/2. In his investigations Tesla did not use formal mathematical algorithmic techniques. He frequently used design, graphs, extremality, optimality ... considerations and particularly quantifiers (or quantors). From this point of view Tesla's case is very instructive.

9/3. On the other hand, from the point of view of quantorics, considering simple key transitions: particular $\rightarrow$ any, somewhere $\rightarrow$ elsewhere $\rightarrow$ everywhere, and the closing operator of statements and concepts, Tesla's performance

is immense; by means of such logico-mathematical devices one can associate Tesla's ideas and results ... with very many and very important mathematical researches, fields, disciplines ...

9/4. Tesla's main results are contained in his patents. His way of patent writing and presentation is very typical of algorithmics and modellings. Tesla's models were acting, running and producing (cf. section 0/3). Every design of any model is something more than proof of the existence of the model. In this sense Tesla's method of work is typically constructive. Constructivism in mathematics occurred later; cf. theory of algorithms, recursive functions, theory of automata, ...

9/5. Tesla's case constitutes evidence of the unifying ways in creative activity - an important statement in the Metascience (Science of Science).

Acknowledgment. I thank heartily D. Trifunović for his help in the writing of this paper.

BIBLIOGRAPHY

1. Bokšan, Slavko: Nikola Tesla und sein Werk, Leipzig-Wien-New York, 1932, 16 344.
2. Bokšan, Slavko: Delo Nikole Tesle I, SAN (The Work of Nikola Tesla), posebna izdanja, knjiga 171. Odeljenje Tehničkih nauka, knj. 1. Beograd 1950, 10 412.
3. Humphrey, Eugene F. - Tarumoto, Dave H.: Fluidics. Contributing authors: Glenn, Hale Jr., Lippincott, Longson, Press, Simmons. Fluid Amplifier Associates, Incorporated, Boston, Mass. 1965.
4. Pio-Ulsky, G.N. - Die Arbeiten Nikola Tesla's auf dem Gebiete der angewandten Mechanik; pp. 337 - 348 in Nikola Tesla, Spomenica. Beograd 1936, pp. 520.
5. Shinnars, Stanley M. - Techniques of Systems Engineering, Mc Graw-Hill Book Comp., New York - San Francisco - Toronto - London - Sydney, 1967.

6. Tesla, N. - Valvular Conduit, U.S.A. Patent N^O 1329559, patented 19200203 (Application 19190706 ser. N^O 309482, pp. 1-5 /v. (7)P 445-450.
7. Tesla, N. - Lectures. Patents. Articles (published by the Nikola Tesla Museum, Beograd), Beograd 1956, XX, L1-L 167, P1-P 456, A1-A 199, photographs (pp. 1-22).
8. Trifunović, Dragan: Teslin element za fluidnu memoriju (Tesla's Fluid Memory Element), Dijalektika, Beograd 7₁ (1973), 49-53.
9. Trifunović, Dragan: Razvitie vičislitel'noj tehniki, Voprosi po istorii jestv. i tehn. ANSSSR, vip. 55 (1976), 83-93.
10. Žaček, A.: Nikola Tesla, créateur de la technique des courants à haute fréquence, pp. 464-472 in Nikola Tesla, Spomenica, Beograd 1936, pp. 520.

Jovan Milivojević, dipl.fiz.

INSTITUT "NIKOLA TESLA"

Pretseanik Potkomiteta za
osvetljenje SR Srbije

NIKOLA TESLA I NJEGOV DOPRINOS NA POLJU ELEKTRIČNIH IZVORA SVETLOSTI

Eksperimentišući strujama visokog napona i visoke frekvencije Tesla je došao do zanimljivog otkrića da cevi sa razređenim gasovima svetle u visokofrekventnom električnom polju. Proučavajući, zatim, električno pražnjenje visokog napona pod atmosferskim uslovima i u balonima sa inertnim gasovima sniženog pritiska Tesla je zaključio da se na toj osnovi mogu konstruisati ekonomičniji električni izvori svetlosti od dotadašnjih. Predmet nekoliko njegovih patenata su baš ovakve sijalice za koje se, u literaturi, tvrdi da su bile oko dvadeset puta ekonomičnije od inkadescentne sijalice sa ugljenim vlaknom.

NIKOLA TESLA AND HIS CONTRIBUTIONS TO THE FIELD OF ELECTRIC LIGHT SOURCES

While experimenting with high voltage and high frequency currents Tesla came across an interesting discovery: tubes filled with rarefied gas glowed in a high frequency electric field. Tesla then studied high voltage electric discharge under atmospheric pressure, and in bulbs filled with reduced pressure inert gas, and concluded that this could provide the basis for the design of electric light sources which would be more economical than hitherto applied ones. Some of his patents regard precisely such lamps which were claimed, in literature, to be twenty times more economical than incandescent carbon filament lamps.

Ove godine 10.jula, navršava se 120 godina od rođenja Nikole Tesle, velikog naučnika, istraživača i autora mnogobrojnih pronalazaka na polju elektrotehnike i nekih drugih, njoj bliskih oblasti nauke.

Nikola Tesla je, odlazeći iz svoje zemlje, koja mu u tadašnjim uslovima nije mogla pružiti mogućnosti da posveti svoje sposobnosti i um nauci i njenom razvoju, uspeo da se, snagom svoga talenta i neumornim radom, probije u vrhove svetske nauke. Trebalo je imati ogromne unutrašnje snage, volju, talenat i biti spreman na sve napore da bi, kao nepoznat čovek iz zao-stale sredine, savladao tadašnja naučna dostignuća i uspeo da učini džinovski korak napred, otvarajući nepoznata čitava naučna područja. Teslin doprinos je tim veći što je njegova delatnost bila na polju nauke, koja je dala materijalnu osnovu savremenog sveta i stvorila realne uslove za njegov novi materijalni preobražaj. Njegovi radovi na polju elektrotehnike i ostalih grana nauke omogućili su neslućeni razvoj savremene privrede pružajući joj ogromne izvore energije koji do tada nisu mogli biti adekvatno korišćeni.

Kao pravi, istinski naučnik, on se posvetio naučnom radu ne želeći da od svojih uspeha u nauci stiče bogatstvo i lično blagostanje. Taj odnos prema materijalnom bogatstvu i novcu još više ističe njegovu grandioznu figuru naučnika, odanog napretku naučne misli i služenju čovečanstvu.

Ovaj stav ogleda se i u njegovim idejama da će materijalni uspon, do koga će neminovno dovesti napredak nauke i tehnike, povezati ljude, skratiti prostor, zbližiti narode i stvoriti materijalne preduslove za onemogućavanje ratnih strahota, podvojenosti i mršnje. On je u progresu nauke i tehnike gledao moćno oružje za savlađivanje starih shvatanja i otklanjanje uzroka međunarodnih sukoba.

U Americi, koja mu je postala druga domovina, sva njegova strast bila je u nastojanju da da svoj, što veći udeo, za sreću čovečanstva i jugoslovenskih naroda.

U tom smislu Tesla je doslovno govorio:

"Korist, koju će od mojih izuma imati civilizacija, znači za mene mnogo više nego novac koji bih mogao privrediti.

Dela uma, nauke i veštine treba da služe ljudskoj zajednici za olakšanje i ulepšanje života, a ne pojedincima za sticanje bogatstva.

Novi svet, koji dolazi neće biti svet pogaženih i poniženih, nego svet slobodnih ljudi i naroda, jednakih u dostojanstvu i poštovanju čoveka."

Prema Teslinom shvatanju:

"Krajnji čovekov cilj je da potpuno ovlada materijalnim svetom i potčini prirodne sile ljudskim potrebama. To je težak zadatak pronalazača, koga često ne shvataju i ne priznaju. Ali on zato nalazi ogromne naknade u zadovoljstvu koje u njemu budi stvaralački rad i u saznanju da pripada onom, naročito povlašćenom, krugu ljudi bez kojih bi ljudski rod već davno iščezao u teškoj borbi sa nemilosrdnim silama prirode."

Tesla je jedinstveni pronalazački genije. Obdaren stvaralačkom maštom, velikom intuicijom i instinktom da oseti i prozre istine, neobično vešt i spretan da ih tehnički realizuje, Tesla je dao čovečanstvu dela neocenjive vrednosti. U svome radu nije imao pomoći ni sa koje strane. Nije imao osiguranu egzistenciju niti laboratorije na raspolaganju, u kojima bi mogao mirno raditi. Nije imao čak ni podršku nacije; Srbija je u to vreme bila razdirana raznim ratovima, Hrvatska je bila pod okupacijom Austrougarske. Sve što mu je bilo potrebno morao je sam da pripremi.

Pet punih godina nosio je Tesla u sebi ideju o obrtnom magnetskom polju, nemajući sredstava da je realizuje. Posle više pokušaja, u kojima je uložio neverovatno mnogo napora, uspeo je najzad da nađe načina da čovečanstvu, do danas, najsavršeniji elektromotor.

"Mi ne možemo - kaže profesor Vidmar - staviti Teslu u normalni okvir uspelog elektrotehničkog inženjera. Tesla je pesnik elektrotehnike, umetnik ako hoćete. Tesla je bio prepun ideja, da bi mogao otpravljati normalan posao inženjera. Njegova intuicija je ogromna, njegov pogled u prirodne tajne fantastičan."

Prilikom posete koju je 1892.god.učinio Beogradu, Tesla je na banketu, koji je beogradska opština priredila u njegovu čast, rekao: "U meni ima nešto što može biti i obmana, kao što često biva kod mlađih oduševljenih ljudi, ali ako budem srećan da ostvarim bar neke od mojih ideja, to će biti dobročinstvo za

celo čovečanstvo. Ako se te moje nade ispune, najslađa misao biće mi ta, da je to delo jednog Srbina.

Što se tiče odnosa prema svom narodu i svojoj zemlji Tesla je bio u toku celog života nepokolebljivi Jugosloven i nije pravio razlike između jugoslovenskih naroda. Poznate su njegove reči: "Ponosim se svojim srpskim rodom i hrvatskom domovinom."

Prvi i najznačajniji Teslini radovi bili su iz oblasti proizvodnje, prenosa i primene električne energije. Otkrićem obrtnog magnetnog polja i konstrukcijom indukcionog, asinhronog elektromotora Tesla je postavio osnove moderne elektroprivrede i elektroindustrije. To je bio, ne korak napred, nego epohalno otkriće u elektrotehnici, kojim je Tesla iz osnova izmenio tadašnje koncepcije proizvodnje i primene električne energije. Prenos namerno nisam spomenuo jer se, pre Teslinog otkrića polifaznih sistema, za elektromotorni pogon koristila isključivo jednosmerna struja, a prisutnima je poznato na kolike se teškoće nailazi pri prenosu električne energije jednosmernom strujom. Praktično prenosa, u današnjem smislu, nije ni bilo.

U oblasti proizvodnje, prenosa i korišćenja električne energije Tesla je, svojim polifaznim sistemom i indukcionim motorom, rešio sve probleme elektroprivrede ostavivši svojim sledbenicima samo da usavrše tehnologiju proizvodnje mašina za ove potrebe.

Brojna su i ne manje važna i Teslina otkrića u oblasti struje visokog napona i visokih frekvencija. Iz ovih otkrića neposredno proističu otkrića principa prenosa na daljinu električnih signala bežičnim putem, čime je Tesla postavio osnove telekomunikacione i radiotehnike. Njegov teledirigovani brodić, kojim je komandovao sa velikog rastojanja, zadivio je sav stručni svet onoga vremena. Nažalost, prvo što je palo na pamet stručnim posmatračima, bilo je, da se tako opremljen brod može natovariti eksplozivom i uputiti u neprijateljske redove, što je Teslu veoma ražalostilo, jer je on stalno isticao da je srećan što će njegovi radovi doprineti poboljšanju blagostanja svih ljudi na Zemljinoj kugli.

U predavanjima, koja je krajem prošloga veka držao u

Americi i Evropi, Tesla se često osvrtao i na probleme električnih izvora svetlosti. U to vreme za unutrašnje osvetljenje korišćena je Edisonova sijalica sa ugljenim vlaknom, veoma malog svetlosnog iskorišćenja.

Tesla je jednom prilikom rekao: "Ni u jednoj oblasti elektrotehnike usavršavanja nisu tako značajna kao u oblasti dobijanja svetlosti. Svaki naučnik, analizirajući savremene varvarske metode osvetljenja i nedopustive gubitke, neizbežne čak i u najboljim sistemima, mora da postavi sebi pitanje: Kakvo može biti osvetljenje budućnosti? Da li će to biti usijano čvrsto telo, kao u savremenim sijalicama, ili usijani gas, fosforescentno telo ili neka slična sijalica, ali znatno efikasnija."

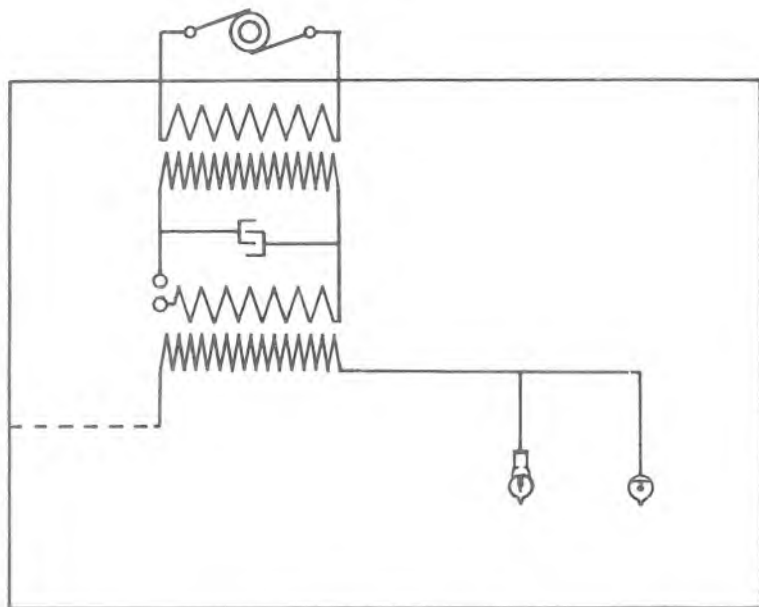
"Ne - odgovara na to pitanje sam Tesla - plinsko osvetljenje ne može biti osvetljenje budućnosti. Ekonomično dobijanje svetlosti može se ostvariti samo električnom strujom, a usavršavanje može ići u tri pravca: usijano vlakno ili kugla, usijani ili u specijalno stanje dovedeni gas i, na kraju, fosforescentne cevi - to su tri izvora svetlosti na čijem usavršavanju treba da rade svetlo-tehničari svih zemalja."

Prvi Teslini radovi iz oblasti električnog osvetljenja bila su usavršavanja električne lučne sijalice sa ugljenim elektrodama. Na zahtev njujorške kompanije za osvetljenje, Tesla je dao projekat za napajanje i automatsku regulaciju rastojanja ugljenih elektroda lučnih sijalica, čime je omogućio da se izradi relativno efikasan i jeftin sistem javnog osvetljavanja.

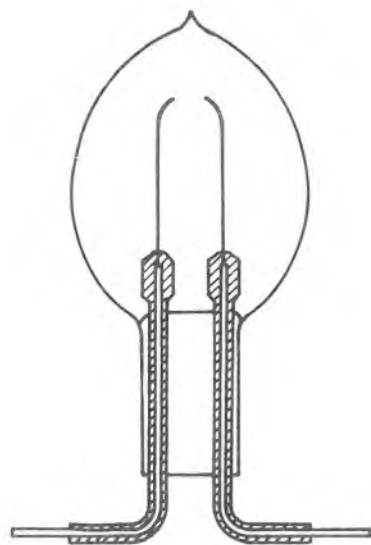
Lučne sijalice su bile efikasnije od inkadescentnih sa ugljenim vlaknom, ali, zbog velikog bljeska i gasova koji se razvijaju pri radu, nisu bile pogodne za unutrašnje osvetljenje.

Otkrivši visokofrekventne struje veoma visokog napona, Tesla je brzo uočio da zatvorene cevi sa razređenim gasovima kao i Edisonova sijalica sa ugljenim vlaknom svetle, ako se samo jednom žicom vežu za jedan kraj sekundara visokofrekventnog transformatora ili se jednostavno postave u njegovoj blizini.

To ga je podstaklo na razmišljanje da ovu pojavu iskoristi za izgradnju nove vrste izvora svetlosti. Posle brojnih eksperimenata Tesla je konstruisao i patentirao nekoliko tipova



sl. 1



sl. 2

sijalica. Na sl.1 prikazana je šema napajanja i presek sijalice koja je imala evakuisani stakleni balon sa jednom elektrodom, na vrhu koje se nalazila ugljena kuglica postavljena u centru balona. Ovaj patent nosi naziv "Sistem električnog osvetljenja."

U patentu koji nosi naziv "Električna inkadescetna sijalica" Tesla je napisao: "Ja sam otkrio da dva provodna tela, montirana u balonu sa visokim vakuumom, mogu da se usijaju i praktično da se koriste kao izvor svetlosti, ako se direktno ili indirektno spoje sa krajevima izvora struje vrlo visoke frekvencije i visokog napona." Ova sijalica prikazana je na sl.2.

U to vreme sastav atoma nije bio poznat pa ni elementarne čestice: elektron, proton i neutron. Zbog toga je Tesla ovako objasnio pojavu svetljenja razređenih gasova u visokofrekventnom električnom polju:

Sjaj svetlosti koju zrači sijalica uglavnom zavisi od frekvencije i napona, a takođe i od gustine električne struje na površini elektrode. Propuštajući kroz nju visoke frekvencije vrši se odbijanje molekula gasa od elektrode, koji velikom brzinom udaraju o stakleni balon i izgubivši naelektrisanje, još većom brzinom se vraćaju na elektrodu, ponovo se odbijaju od nje i taj proces se stalno ponavlja.

Od udara molekula elektroda se zagreva sve jače i jače i uskoro počinje da predaje toplotu okolnom gasu. Ovaj usijani gas obrazuje oko elektrode neku vrstu vatrene fotosfere, analogno fotosferi Sunca. Primenujući teško topljive elektrode od dijamanta, karborunduma ili oksida cirkonijuma može se dobiti fotosfera zapremine hiljadu puta veće od zapremine elektrode. Pri tom se električne obojine gasne okoline vrlo brzo približavaju osobinama same elektrode i fotosfera kao da se sliva sa elektrodom. Dalje udari molekula, koji su se odbili od staklenog balona, zasipaju, ne elektrodu, već fotosferu kojom je ona okružena. Ovaj proces raste velikom brzinom i omogućava da se dobi je intenzivno zračenje svetlosti zagrevanjem fotosfere.

Moderna fizika jonizovanih gasova drugačije tumači ovu pojavu, ali je Tesli ovo tumačenje omogućilo da konstruiše i patentira svoje sijalice, za koje se tvrdi da su bile dvadeset puta efikasnije od inkadescetnih sijalica sa ugljenim vlaknom.

Veliki nedostatak Teslinih sijalica bio je u tome što su se napajale visokofrekventnom strujom 12-15000 Hz, napona oko 20.000 V. Ubrzo su, na samom početku dvadesetog veka, razrađene metode za izradu tankih žica od teško topljivih metala volframa, osmijuma i molibdena, pa su ugljena vlakna u Edisonovoj sijalici zamenjena metalnim. Edisonova sijalica postala je veoma praktična za primenu pa su ovi Teslini pronalasci pali u zaborav.

Inkadescentna sijalica sa volframovim vlaknom, modernizovana i usavršena, i danas je najšire primenjena kao električni izvor svetlosti za unutrašnje osvetljenje, naročito stanbenih prostorija. Poslednja usavršavanja na inkadescentnoj sijalici izvršena su 60-tih god. uvođenjem malih količina halogenih elemenata pomešanih sa internim gasovima. Halogeni element, na određeni način, sprečava isparavanje volframa, što omogućava, zagrevanjem vlakna do veće temperature, povećanje efikasnosti sijalice. No, i pored toga, moderna sijalica sa usijanim vlaknom ni deseti deo utrošene električne energije ne pretvara u svetlost, gubici su još uvek veliki. Teorija pokazuje da inkadescentnu sijalicu ne možemo učiniti mnogo ekonomičnijom ni u budućnosti.

U svojim predviđanjima o razvoju električnih izvora svetlosti Tesla kaže da će jedan od pravaca razvoja biti "usijani ili, u specijalno stanje dovedeni, gas." Danas je to "specijalno stanje", kako kaže Tesla, visoko jonizovani gas ili para metala, jednim imenom nazvana plazma, koja se stvara, pod specijalnim uslovima, u električnom luku u zatvorenim cevima. Jonizovani ili pobuđeni atomi raznih elemenata, vraćanjem u osnovno ili niže pobuđeno stanje, emituju svoje karakteristične spektre, čijom kombinacijom se dobija svetlost veoma slična Sunčevoj. Što se kvaliteta svetlosti tiče danas postoje izvori svetlosti sa električnim pražnjenjem u gasovima i parama metala čija se svetlost po spektru malo razlikuje od sunčeve i oni s pravom nose naziv "veštačko Sunce". Ekonomičnost električnih izvora svetlosti sa pražnjenjem u gasovima je u komercijalnom pogledu zadovoljavajuća. Ma da je delimično pretvaranje električne energije u toplotu i kod ovih izvora svetlosti neizbežno,

budućnost pripada njima. Današnje potrebe za osvetljenjem su veoma velike i stalno rastu, a sa električnim pražnjenjem u gasovima i parama metala mogu se graditi veoma snažni izvori svetlosti, snaga kojih ide i do stotinu kW.

Zapažanja u vezi procesa kretanja gasnih molekula u sijalici omogućila su Tesli da obrazuje sliku pojava koje se odigravaju na Suncu. Tesla je pretpostavio da je centralni deo Sunca sličan usijanoj elektrodi, okružen fotosferom o koju udaraju čestice koje se vraćaju iz okolnog prostora. Druga struja čestica sa ogromnim naelektrisanjem, koje izbacuje fotosfera Sunca, upravljena je u međuplanetarni prostor u obliku kosmičkog zračenja.

Tesla je na taj način prvi izrekao pretpostavku o postojanju korpuskularnog zračenja Sunca i fluksa kosmičkih čestica, izračunavši da im je energija nekoliko stotina miliona elektronvolti, što se relativno dobro slaže sa savremenim ispitivanjima.

Prema Tesli, Sunce se, kao i druga usijana nebeska tela, ponaša potpuno isto kao elektroda koja ima vrlo veliko naelektrisanje. Oko Sunca i nebeskih tela nema staklenog balon, sličnog balonu Tesline sijalice, i čestice od njih odlaze velikom brzinom do susreta sa gasovima koji okružuju druga nebeska tela. Dospevši i do zemljine atmosfere kosmički zraci izazivaju naelektrisanje razređenih slojeva (danas se ovaj sloj naziva jonosfera) čineći ih električki provodnom sredinom. Ovaj visoko naelektrisani sloj, prema Tesli, čini jednu oblogu kondenzatora. Druga obloga je zemlja, a izolacija je neprovodni sloj atmosfere.

Na postojanju naelektrisanog, provodnog sloja atmosfere Tesla je zasnivao svoj grandiozni projekat osvetljenja čitave zemljine kugle i usmerenog prenosa električne energije bežičnim putem. Ovaj projekat, nažalost, Tesla nije realizovao.

L I T E R A T U R A :

1. Slavko Bokšan
Nikola Tesla i njegov pionirski rad u elektrotehnici.
Beograd 1930.
2. B. Ržonsnickij
Nikola Tesla. Moskva 1959.
- 3."Centenary of the birth of Nikola Tesla". Beograd, 1959.
4. Nikola Tesla
Lectures, patents, articles. Beograd 1956.

Prof.dr ing. Vladimir MULJEVIĆ
Elektrotehnički fakultet
Sveučilište u Zagrebu

FAUST VRANČIĆ I NJEGOVI POGONSKI STROJEVI

Faust VRANČIĆ iz Šibenika spada među istaknute inženjere i lingviste svoje epohe u Evropi. Za vrijeme svojeg boravka na dvoru RUDOLFA II, kralja Austrije, Mađarske, Hrvatske itd., kao i poslije, VRANČIĆ je proučavao i pronalazio mnoge tehničke konstrukcije, strojeve i naprave. On je u pet jezika napisao svoju poznatu knjigu "Machinae Novae", koja je objavljena u Veneciji 1595. Od ukupno 58 opisa koje sadrži ova knjiga, 16 se odnose na različite vrste pogonskih strojeva, predviđenih uglavnom za mlino-ve. U ovom radu razmatraju se svi VRANČIĆEVI pogonski strojevi, a podijeljeni su u strojeve na ručni i životinjski pogon, te strojeve na pogon na vjetar i vodu. VRANČIĆ djelomično opisuje postojeće konstrukcije, te daje prijedloge za njihovo usavršavanje, a djelomično opisuje i svoje vlastite pronalaskе. Između ovih mogu se naći veoma zanimljive vjetrenjače i vodenična kola sa zakrivljenim lopaticama, slična suvremenim turbinama. VRANČIĆ je također preporučao primjenu zamašnjaka u različitim strojevima.

FAUST VRANČIĆ AND HIS DRIVING ENGINES

Faust Vrančić (Faustus Verantius 1551 - 1617) from Šibenik, Dalmatia (Yugoslavia), belongs to the outstanding European engineers and linguists of his time. During his stay in the court of Rudolf II, king of Austria, Hungary, Croatia etc., and later, Vrančić studied and developed many engineering designs, engines and machines. His famous book, *Machinae Novae*, written in five languages, was published in Venice in 1595. 16 out of the 58 technical descriptions presented in the book refer to different types of driving engines, mainly intended for mills.

This paper reviews all of his driving engines, which have been divided into manual and animal drive, and wind and water drive engines. In his book Vrančić described both existing designs providing proposals for their improvement, and his own inventions. Among the latter we find very interesting windmills, and water wheels with curved blades resembling present-day turbines. Vrančić also advocated the use of flywheels in different machines.

1. Uvod

Faust VRANČIĆ rodio se u Šibeniku 1551., a škole je polazio u Padovi i Veneciji, gdje je studirao filozofske nauke i bavio se matematikom, a osobito mehanikom i ostalim inženjerskim disciplinama. U Pragu, na dvoru rimsko-njemačkog cara i hrvatsko-ugarskog kralja RUDOLFA II (1522-1612) vršio je važne dužnosti, uz astronome Tycho BRAHEA (1546-1601) i Johana KEPLERA (1571-1630).

Pod nazivom Fausto VERANZIO objavio je više svojih djela iz područja etike, logike, religije i povijesti. Neka su ostala u rukopisu, a neka su propala. Njegovo monumentalno djelo "MACHINAE NOVAE" tiskano je prvi put u Veneciji 1595., a pisano je na latinskom, talijanskom, francuskom, španjolskom i njemačkom jeziku. Iste godine štampan je u Veneciji i njegov rječnik "DICTIONARIUM QUINQUE NOBILISSIMARUM EUROPAE LINGUARUM, LATINAE, ITALICAE, GERMANICAE, DALMATICAE ET UNGARICAE".

Faust VRANČIĆ umro je u Veneciji dne 17. siječnja 1617., a prema njegovoj želji, njegovo mrtvo tijelo je preneseno na otok Prvić kraj Šibenika i pokopano u Prvić Luci, gdje se i danas nalazi.

U VRANČIĆEVO doba gotovo sva proizvodnja je bila još orijentirana na klasičnu, tj. primarnu fazu tehničkog razvoja. To je ona faza u kojoj je od tri osnovna elementa obrade, a to su alat, energija i informacija, kao tehnički objekt realiziran samo alat, dok kao izvor energije služi pretežno čovjek koji svojim znanjem, dakle svojim informacijama, može ispravno voditi alat i primjenjivati svoju ili tuđu energiju, da bi ostvario svoj, unaprijed predviđeni ili zadani cilj oblikovanja, odnosno prerade tvari, tj. sirovina.

Neki zanati, odnosno radovi, koji su trajno iziskivali velike snage, odnosno velike količine energije, služili su se već odavna animalnim izvorima energije (konj, mazga, magarac itd.). Na taj način su se pokretali mlinovi, crpla se voda, tjerali kovački mjeleci pa i brodovi. Ovo posljednje predložio je 1801. i naš Marko Antun HORVATOVIĆ (Orahovica, ? - 1821) (L.2.)

U doba Fausta VRANČIĆA mlinovi su predstavljali jednu od glavnih proizvodnih grana, koja je svima i svakome bila potrebna. Nije stoga čudo što je VRANČIĆ u svojem djelu "Machinae Novae" (L.4) na dosta mjesta posvetio pažnju različitim vrstama pogona za mlinove. Od ukupno 58 tehničkih opisa koji se odnose na različite naprave ili postupke, posvećeno je pogonima mlina 16 opisa. Kao izvor energije VRANČIĆ u ovom svojem djelu primjenjuje uglavnom sve ono što je u njegovo vrijeme stajalo na raspolaganju čovjeku, a to je ljudska i životinjska pogonska snaga, zatim vjetar i konačno voda iz potoka, rijeka, pa i mora.

2. Ljudska pogonska snaga

Ovu vrstu pogonske snage VRANČIĆ primjenjuje na više mjesta, ali ne samo za pogon mlinova. Pri tome se služi svojim izumom, "nagaznim kolom" (rota calcatoria, Trittrad). Za ovo kolo VRANČIĆ između ostalog kaže: "Ovo naše nagazno kolo gotovo je u svemu jednako onima koja se sada običavaju upotrebljavati. Ali tko na ovo obrati pažnju, naići će, da ga se mnogo lakše tjera. A tome je razlog samo mjesto sile, to jest, mjesto u kojem ga ljudi hodajući gaze. Naime, u drugima, ljudi hodaju u unutrašnjosti i na donjem dijelu kola, a u našem kolu oni stoje izvana na sredini kola". Tako opisanim pomicanjem djelovanja sile iz unutrašnjosti na vanjski obod kola, i to u visini osovine, dobiven je najveći mogući krak, na kojem djeluje sila, u ovom slučaju težina čovjeka koji pokreće kolo. Time je dobiven i najveći zakretni moment, o kojem VRANČIĆ još nije ništa znao, ali ga je naslućivao. VRANČIĆ je ponosan na svoj izum "nagaznog kola", što i naglašava riječima: "Ovim se novim izumom pogona kola možemo opravdano pohvaliti, jer do sada nismo o takovima ništa čuli niti vidjeli". Georgius AGRICOLA (Georg Bauer) (Njemačka, 1494-1555) opisao je u svojem opsežnom djelu "De re metalica libri XII", objavljenom 1556. jedno nagazno kolo, na kojega je s vanjske strane gazio konj (L.6.), međutim, VRANČIĆEVA konstrukcija je prikladnija i bolja. VRANČIĆ dalje ističe široku primjenljivost nagaznih kola, pa nastavlja: "Ova uz to ne služe samo za tjeranje mlinova, već mogu biti od velike koristi i za druge pogone". U opisanoj konstrukciji "Mlin s nagaznim kolom" (XXIII) troje ljudi zajednički gazi, u visini vratila, na prečke smještene na obodu kola. Takovo kolo, ali samo s jednim čovjekom, primjenjuje VRANČIĆ za pogon preše za ulje (XXIV), za sukanje užadi (XLII) kao i za pokretanje lopatica za vadenje mulja, na bageru za čišćenje morskog dna (XLI). Tim svojim kolom VRANČIĆ nastoji postići veći učinak opisanih strojeva i naprava.

3. Životinjska pogonska snaga

Životinjsku pogonsku snagu nalazimo kod VRANČIĆA samo u jednom opisu koji se odnosi na "Magareći mlin" (XXI). Za razliku od starih antičkih

mlinova kod kojih se je pogonska životinja kretala neposredno uz mlinski kamen, VRANČIĆ prikazuje, vez većeg tekstualnog opisa, veoma zornu sliku pogona mlina, kojega preko velikog ozubljenog kola promjera oko 6 do 8 metara, pokreću dvije mazge. U ovoj konstrukciji obilno je iskorištena prednost velikog prijenosnog odnosa izmedju velikog i malog zupčanika, na kojega je priključen mlinski kamen.

4. Vjetar kao pogonska snaga

Čovjeku je od pradavnih vremena bila bliska pomisao, temeljena na opažanjima, da se za pogon različitih tehničkih naprava može služiti snagom vjetra. Ovaj pogon se ostvarivao pomoću lopatičnih kola raznog oblika, smještenih na horizontalnom ili vertikalnom vratilu.

4.1. Pogonska kola (na vjetar) s horizontalnim vratilom bila su poznata već u antičko doba, a oko 110. je znameniti konstruktor pneumatskih aparata HERON iz Aleksandrije (izmedju 150. i 250.) pomoću takovog kola na vjetar, kojega se moglo zakretati u smjeru vjetra, pokretao pumpu za orgulje. Na sličan način u to vrijeme pokretane su pumpe za navodnjavanje, a i mlinovi. Podaci o postojanju vjetrenjača s horizontalnim osovinama u Engleskoj 833. i Francuskoj 1105. (L.7) nisu pouzdani, ali postoje dokazi da su takove mlinove već prije križarskih ratova, dakle prije XI stoljeća, imali Arapi (L. 1), koji su u to doba, kao sljedbenici antičkih grčkih iskustava i znanosti, imali veoma razvijene prirodne znanosti i tehniku. Nakon križarskih pohoda Evropljana na Bliski Istok javljaju se vjetrenjače i u Evropi. Postoje podaci da su se ove primjenjivale u Engleskoj još prije 1323., a u Veneciji je takav mlin sagradio 1332. Bartolomeo VERDE. U Holandiji se vjetrenjače spominju 1341., a u Njemačkoj su postojale oko 1390. Sve su ove vjetrenjače, međjutim, bile s kolom postavljenim u jednom smjeru. Podaci o vjetrenjačama, kod kojih se zakreće cijela zgrada, tzv. "njemačke" vjetrenjače, potječu iz 1430. LEONARDO DA VINCI (Italija, 1452-1519) je oko 1500. konstruirao vjetrenjaču sa zakretnim krovom tzv. "holandska" vjetrenjača, a takove je opisao 1580. Jacopo de STRADA

(Italija, ?-1588), graditelj i carski ratni komesar na dvoru austrijskog cara i hrvatskog kralja RUDOLFA II u Pragu. Gradnja vjetrenjača s horizontalnim vratilom nastavljena je i dalje, sve do današnjih dana. Međutim, ovu vrstu pogonskih strojeva na vjetar ne nalazimo kod VRANČIĆA, jer je on u osnovi protiv takovih konstrukcija, kao što će se to vidjeti iz daljnjeg razmatranja.

4.2. Pogonska kola (na vjetar) s vertikalnim vratilom.

Kao što je već spomenuto, VRANČIĆ većinu svojih pogonskih strojeva opisuje u vezi s mlinovima, kao tadašnjim najčešćim korisnicima takovih strojeva. U "Novim strojevima" prikazano je ukupno sedam konstrukcija s vertikalnim vratilom. Iz ovih prikaza se vidi da je VRANČIĆ tražio tehnički i ekonomski najpovoljnije rješenje, u okviru tada raspoloživih tehničkih sredstava.

Neki oblici vjetrenjača s vertikalnim vratilom bili su poznati i prije VRANČIĆA. Jednu posve jednostavnu konstrukciju takove vjetrenjače, predviđenu za izvlačenje vode iz zdenca, opisao je 1438. MARINO (MARIANO) di JACOPO, inženjer iz Siene, u svojem "Codex latinus". Izvedbu kola vjetrenjače s preklopnim plohamo opisao je 1547. Gualther RIVUS (Walter Ryff), a zatim 1565. i Jacques BESSON (Francuska, oko 1500-1569), profesor matematike i inženjer francuskog kralja FRANJE I (1494-1547). VRANČIĆEVE konstrukcije vjetrenjača s uspravnim vratilom odaju vrsnog konstruktora koji znalački prikazuje i uspoređuje različite, uglavnom vlastite, konstrukcije takovih vjetrenjača. U opisu "Mlin na vjetar" (VII/1) on iznosi svoj stav prema vjetrenjačama s uspravnim i vodoravnim vratilom, pa opisujući svoj pronalazak kaže: "Uredjaji tjerani vjetrom, koji pokreću mlinove, bili su i do sada u upotrebi, imali su svi jednak oblik, ali nisu uopće bili prikladni, jer imaju vodoravno vratilo koje uvijek, kako vjetar dolazi, treba amo okretati ... Mi smo, međutim, pronašli put, prema kojemu naši mlini uredjaji ostaju stalni i postojani, a vjetar se, odakle on dolazio, ništa manje njima ne ukazuje prikladan i povoljan ... Tada imadete uspravno vratilo, ali krila i ruke tako ispružene, da na jednoj strani hvataju vjetar, a na drugoj strani

puštaju da prolazi mimo ... " Opisujući dalje "Mlinove tjerane jedrima" (VIII/2) i govoreći o preklopnim krilima s jedrima, VRANČIĆ ovako obrazlaže njihovu funkciju: "Ova krila neka su, međutim, u stožerima učvršćena tako da se oko njih okreću i tako su poredana, da se na jednoj strani vratila suprotstavljaju vjetru, a na drugoj mu se ugibaju". Naslućujući zakonitost ovisnosti otpora tijela različitih oblika u nekom mediju koji se giba, VRANČIĆ u opisu "Mlin s trokutastim krilima" (IX) obrazlaže svoju vlastitu, i tada posve novu, konstrukciju. Četiri krila ovdje su sastavljena od po dvije daske koje su na prednjoj strani medjusobno spojene pod nekim kutom, a na stražnjoj strani su razmaknute. Kada vjetar udara na otvorenu stražnju stranu, nailazi na veliku zapreku i svoju energiju predaje tom krilu, dok prednja oštra strana krila pruža vjetru znatno manji otpor. Tako dolazi do okretanja kola u smjeru oštrem strane krila.

"Mlin s pomičnim krilima" (X) ima pogonsko kolo sa 16 prema dolje (a u drugoj verziji, prema gore) zavješanih preklopnih kvadratičnih ploha koje se u jednom smjeru suprotstavljaju vjetru, a u drugom mu se ugibaju.

Slijedeću konstrukciju, sličnu u principu onoj s trokutastim krilima, predstavlja "Mlin s pomičnim krovom" (XI). Ovdje zakrivljene plohe tvore rotor koji na svojem vanjskom obodu ima otvore, dok se u središtu rotora ove plohe medjusobno spajaju. Otvori rotora hvataju vjetar, a uz zakrivljene plohe struji zrak, zbog čega dolazi do okretanja rotora u odgovarajućem smislu. Ovako oblikovan rotor predstavlja preteču rotora suvremenih vodnih turbina niskog tlaka (malog pada), a i sam ga je VRANČIĆ primijenio u svojoj konstrukciji vodenog pogonskog stroja (XVI), o čemu će još poslije biti govora.

Nastojeći pronaći što bolji način iskorištavanja snage vjetra, VRANČIĆ razmatra "Mlin u četverouglastom tornju" (XII). Ovaj se sastoji od vratila "koje je u sredini tornja uspravljeno u vis, a ima na sebi četiri ili osam krila ... prozori moraju biti tako načinjeni jedan nasuprot drugom, da bi vjetar mogao kroz jedan ući, a kroz drugi opet nesmetano izaći". Ovaj raspored prozora je odabran da bi se vjetar, bez obzira iz kojeg smjera dolazio, dovodio na pogonska krila samo s jedne strane uspravnog vratila, dok su krila na suprotnoj strani vratila zaklonjena zidom tornja.

Posebno je zanimljiva i posve originalna konstrukcija pogonskog stroja, zapravo zračne turbine, "Mlin u okruglom tornju" (XIII). Ovo je logična i bitno poboljšana varijanta prethodne konstrukcije (XII), " ... ali je toranj okrugao i u svojem gornjem dijelu, na stranama gdje vratilo ima krila, svuda otvoren, ali ipak podijeljen zidovima u prozore koji su postavljeni zakrivljeno, da vjetar ne bi ulazio ravno, nego koso u toranj, te tako pokretao krila vrtila". Zakrivljeni zidovi tornja predstavljaju u stvari lopatice, čijim se oblikom i smišljenim rasporedom postiže optimalno iskorištavanje vjetra, bez obzira iz kojeg smjera ovaj dolazio. Iako u VRANČIĆEVO doba nisu još bile poznate i razradjene zakonitosti gibanja fluida, ipak je on kao vrstan konstruktor naslutio da zaobljene plohe i postupna promjena smjera pogonskih ploha pružaju bitne prednosti u radu strojeva koje pokreću struja vjetra i voda. Ovom svojom konstrukcijom VRANČIĆ je više stoljeća unaprijed anticipirao oblik turbinskog pogona. Zanimljivo je da je na sličan način o važnosti "naravnih staza" gibanja i strujanja, koje će pružati manji otpor i "koje neće izazivati poremećenja ... već će pogonski fluid nezamjetljivo mijenjati svoju brzinu i smjer gibanja ... što će sprečavati gubitke od naglih promjena, za vrijeme dok fluid predaje energiju", govorio i Nikola TESLA (1856-1943) u svojem patentnom spisu 1,061.206 od 6. svibnja 1913., koji se odnosi na njegovu turbinu (L.3. - P.383).

5. Voda kao pogonska snaga

VRANČIĆ opisuje ukupno sedam konstrukcija koje se odnose na vodeni pogon. On pri tome primjenjuje slijedeće vrste pogonskih koła:

1. nadjlevno kolo (XIV)
2. podljevna kola (na rijekama) (XVIII i XIX)
3. kola s preklapnim lopaticama
 - 3.1. na horizontalnom vratilu (XX)
 - 3.2. na vertikalnom vratilu
 - 3.2.1. s okretištem lopatice oko horizontalne osi (V)
 - 3.2.2. s okretištem lopatice oko vertikalne osi (XVII)
4. kolo sa zakrivljenim plohami (XVI)

5.1. Nadljevno kolo

Ova kola su se primjenjivala već u starom vijeku, a oko 250. p.n.e. spominje ih FILON iz Bizanca (Grčka, III st. p.n.e.). Oko 65. rimski pisac i povjesničar Gaj PLINIJE Sekund (23-79) u svojem djelu "Naturalis historia" XVIII, 23 spominje da se u većem dijelu Italije primjenjuju takova kola. U novom vijeku inženjer Konrad KYESER von EICHSTAETT (Njemačka, 1366-iza 1405) koji je boravio i u našim krajevima, prikazao je u svojim spisima oko 1405. jedno nadljevno kolo.

Svoju varijantu nadljevno g kolo daje VRANČIĆ u opisu slike "Mlin u potočiću" (XIV). Konstrukcija je predviđena za "male i niske" potočiće, tj. one s malim padom " ... da bi voda imala viši pad, mi smo - veli VRANČIĆ - izmislili da se u sredini potoka, ispod kola, iskopa jarak ... tako da četvrti dio kola stoji u jarku".

5.2. Podljevna kola

Ova vrst podljevno g kola, smještenih na brodovima, primjenjivana je već u ranom srednjem vijeku. Medjutim, o njihovom izgledu ništa detaljnije ne znamo. Bizantski, tj. istočno rimski vojskovođa Justinijan BELIZAR (Velizar) (505-565) dao je na rijeci Tiberu u Rimu postaviti vodenice tjerane ovakovim kolima. To je bilo 536. kada su Istočni Goti opsjedali Rim. Takovi mlinovi su postojali na brodovima sredinom XVI stoljeća na Rajni kod Kölna, o čemu svjedoči drvorez veduta "Colonia" kojega je 1531. izradio slikar Anton WOENSAMS (Njemačka, prije 1500-1541). Ovakova kola su postojala nesumnjivo i na drugim velikim rijekama, pa i na Dunavu, o čemu govori VRANČIĆ u opisu "Mlin na mostu od brodova" (XVII). Ovdje je prikazana konstrukcija koja se sastoji od dva broda medjusobno spojena dvim mostovima, između kojih se nalazi dugačko vodeno kolo koje ne nadvisuje rubove broda. Ovo kolo preko svojeg vratila i dva para zupčanika tjera po jedan mlin, smješten na svakom brodu. U konstrukciji "Mlin postavljen na brodu", (XIX) VRANČIĆ pogonska kola smješta na bokove broda, također na jedno vratilo koje, preko dva para zupčanika, tjera mlinske kamene. Vodena kola su uronjena svojim

ravnim lopaticama u rijeku, gotovo do vratila, a " ... ako se na prednjem dijelu (broda) međusobno sastave grede u obliku trokuta, kola će na obje strane broda biti osigurana, da se ne polome, ili da ... ne budu odnešena". Tom dodatnom konstrukcijom VRANČIĆ sprečava da kola budu izložena " ... velikom drveću i tome slično, što snaga vode katkada običava sobom nositi".

5.3. Kola s preklopnim lopaticama

5.3.1. Konstrukciju kola s preklopnim lopaticama, smještenog na horizontalnom vratilu, opisuje VRANČIĆ pod nazivom "Vodeno kolo" (XX). Princip rada je jednak onome kod "Mlinova tjeranih jedrima" (VIII/2) i "Mlina s pomičnim krilima" (X). U opisu "vodenog kola" VRANČIĆ obrazlaže prednost četverouglastog vratila u pogledu njegove čvrstoće i jednostavnosti izrade kola.

5.3.2. Kola s preklopnim lopaticama na vertikalnom vratilu

5.3.2.1. Već spomenuti J. BESSON opisao je oko 1565. vodeno kolo na vertikalnom vratilu, providjeno preklopnim lopaticama, zapravo ravnim ploham, koje se zakreću oko horizontalne osi i ugibaju, odnosno osovljavaju, u ovisnosti o smjeru u kojem na njih dolazi struja vode. U konstrukciji "Mlin u sredini rijeke" (XV) VRANČIĆ primjenjuje pomične plohe, slične onima u "Mlinu s pomičnim krilima" (X) konstruiranom za vjetar. U ovom pogonskom stroju na vodu lopatice su smještene na gornju stranu horizontalno postavljene okrugle drvene ploče promjera 2 do 3 metra. Pravokutne preklopne lopatice sežu od ruba okrugle ploče pa skoro do vratila koje je, kao i u svim ostalim VRANČIĆEVIM pogonskim strojevima, četverouglasto. Pogonski stroj je " ... tako izveden, da svojim lopaticama koje se okreću, na jednoj strani prima vodu, a na drugoj je ispušta". U ovom opisu VRANČIĆ stavlja posebni naglasak na lociranje pogonskog stroja u sredinu rijeke. On ovo obrazlaže ovako: Općenito se običava postaviti mlinove na obali rijeka u kojima katkada nedostaje vode, a katkada je preobilna, što oboje sprečava rad mlina. Ovu priliku želio sam predusresti, pa sam smatrao dobrim da mlin smjestim u

sredini rijeke, gdje naime rijeka ima najbrži tok ..." On dalje nastavlja: "Ali stroj koji treba tjerati mlin, morao bi cijeli biti uronjen u rijeku, ... mlin neće, dakle, nikada mirovati, već će sve vrijeme raditi, bilo da je voda veća ili manja". (L.5).

5.3.2.2. Vodeno kolo na vertikalnom vratilu s lopaticama, kojih je okretište oko vertikalne osi, konstruirano je na principu opisanom u prikazu "Mlinovi tjerani jedrima" (VIII/"). Vodeno kolo je, dakako, izvedeno s punim lopaticama od dasaka, a VRANČIĆ ga je primijenio na svoj "Mlin postavljen u morskom tjesnacu" (XVII). U ovom slučaju sam pogonski stroj nije toliko zanimljiv, koliko je zanimljiv VRANČIĆEV INTERES ZA ISKORIŠTAVANJE PLINE I OSEKE za pogon strojeva. O tome on doslovce kaže: "Tko je do sada mogao prisiliti more da ono tjera mlinove, te da bude korisno i za druga pokretanja? Mislim da se to može potpuno izvršiti, ali ne svuda, već na njegovim uskim mjestima. Treba se ipak pobrinuti da mjesto nije otvoreno i da nije izloženo bilo kojoj sili valova. Još je i drugi način, da se more tako učini korisnim. Na obali treba iskopati jezerce, toliko visoko, koliko more običava porasti, da bi kad more nadolazi, jezerce bilo puno, ali kad se more ponovno povlači, voda bi istjecala kroz žlijeb ili cijev i tjerala mlin. Ali ovo će se u oceanu bolje zbiti zbog većeg pridolaženja i odlaženja ... " Pogon mlinova iskorištavanjem plime i oseke već u VRANČIĆEVO doba nije bio nov. Neki smatraju da su u Veneciji već u XI stoljeću primjenjivani takovi mlinovi. MARINI di JACOPO opisuje 1438. jedan način pogona mlina iz jezera koje se puni i prazni kod nastupa oseke, odnosno plime. Ovo je slično onom drugom načinu o kojem govori VRANČIĆ, a možda ga je on i preuzeo od MARINA

U primorskim zemljama s razvijenijom tehnikom primjenjivani su, nakon VRANČIĆA, strojevi za pogon mlinova, pokretani morem. Holandezi su u Brocklynu (SAD) 1637. izgradili jedno takovo postrojenje. Prvi patent "za dobivanje motorne sile iz plime i oseke" dobio je u Engleskoj 1693. John HADLEY. U Frañcuskoj je 1713. neki stolar PERSE na Kanalu la Manche sagradio mlin tjeran morem. U XX stoljeću iskorištene su plima i oseka po prvi puta za pogon hidroelektrana. U Bretanji je 1965. puštena u pogon hidroelektrana "La

Rance", a u SSSR, na Barentsovom moru izgradjena je hidroelektrana "Kislaja Guba". VRANČIĆEVA predviđanja u pogledu iskorištavanja plime i oseke za dobivanje mehaničke pogonske energije bila su, kako vidimo, realna, kao što su bile realne gotovo sve njegove konstrukcije.

5.4. Kolo sa zakrivljenim ploham

Posluživši se s tehnički izvanredno naprednom idejom zračnog kola sa zakrivljenim lopaticama, opisanog u već spomenutom "Mlinu u okruglom tornju" (XIII), VRANČIĆ je dao i konstrukciju "Mlina obješenog na stijenu" (XVI). Ovdje su na veoma preciznom i tehnički vješto i korektno izvedenom crtežu prikazani svi osnovni dijelovi ovog postrojenja. Lopatično kolo s točno označenim oblikom lopatica, smješteno je na vertikalnom vratilu kojega se, već prema visini vodostaja, može spuštati i podizati pomoću koloturnika.

Na kraju, vrijedno je spomenuti, da je Faust VRANČIĆ nekim svojim pogonskim strojevima, posebno onim koji su predviđeni za ručni pogon, dodavao i jednu vrst zamašnjaka. To se odnosi na "Mlin s teretima" (XXII) i na "Način tucanja ječma i ostaloga" (XXIX/1). Ovdje VRANČIĆ između ostalog kaže: "... mlinovi ... imaju utege tako vezane na četiri križa, da daju jaki dodatni tlak. Umjesto križa mogli smo postaviti kolo i njemu pridodati uteg, ali križ se lakše načini, a izvrši jednako toliko". Zamašnjaci se nalaze na pojedinim crtežima već oko 1100., kao npr. na bušilici koju je prikazao svećenik THEOPHILUS Presbiter, autor djela "Schedula diversarum artium". Zamašnjake su u svojim konstrukcijama primjenjivali MARINO die JACOPO (1438), LEONARDO da VINCI (oko 1500), G. AGRICOLA (1556), A. RAMELLI (1588), B. LORINI (1597) i ostali. Međutim, VRANČIĆEVA primjedba: "... Onaj tko će znati ispravno primijeniti utege, izvršit će izvanredne stvari", odaje inženjerski duh kojem je bila potpuno jasna korisna uloga zamašnjaka u radu pogonskih strojeva.

LITERATURA

1. FELDHAUSEN, F.M.: Die Technik. Ein Lexikon.
R. Loewit, Wiesbaden. 1970.
2. HORNATOVIĆ, M.A.: Nacsin lahglyi velikih lagyah, i uz vodu, i niz
vodu putovanya.
Novoszelinnszkima szlovima, Zagreb. 1804.
3. Muzej Nikole Tesle Beograd: Nikola Tesla. Lectures, Patents, Articles.
Nolit, Beograd. 1956.
4. VERATIUS, F.: Machinae Novae.
Venetiis. 1595.
5. VRANČIĆ, F. - MULJEVIĆ, V.: Novi strojevi (prijevod).
časopis "Arhitektura", Zagreb. 1974. Svezak 150. str. 56-64.
6. WISSNER, A.: Erlaeuterung zu den Tafeln. Machinae Novae.
Reprint-izdanje 1964.
7. x x x : Das Buch der Technik
Bertelsmann Lexikon Verlag. Muenchen. 1971.

Op a s k a : Rimski brojevi u okruglim zagradaama odnose se na
broj slike u djelu "Machinae Novae".

Dragan Trifunović
Matematički institut, Beograd

JEDNO UČESTERJE ZAKONA O CENTRALNIM SILAMA -
O ODNOSU NIKOLE TESLE I ĐORĐA STANOJEVIĆA

Naš prilog o delu Nikole Tesle izlaže naučnikovu saradnju sa srpskim fizičarem i dugogodišnjim rektorom Univerziteta u Beogradu, Đorđem Stanojevićem (1858-1921). Posebno njihova prepiska ima važnost u tome što nam je ukazala na nove rezultate u iznalaženju jezgra analogija u prirodi. Ovi rezultati upotpunjuju dosadašnju analizu matematičke fenomenologije Mihaila Petrovića (1868-1943).

NIKOLA TESLA AND ĐORĐE STANOJEVIĆ

The list of people with whom Nikola Tesla cooperated includes Đorđe Stanojević (1858-1921), Serbian physicist and for many years Rector of Belgrade University.

Their correspondence is important in that it pointed out new paths in discovering analogies in nature. Stanojević's conclusions complement Mihailo Petrović's (1868-1943) analysis of mathematical phenomenology.

Prepiska Đorđa Stanojevića i Nikole Tesle ukazala nam je na nove rezultate u iznalaženju izvesnih analoških problema u našoj nauci koji analizu matematičke fenomenologije Mihaila Petrovića više i šire upotpunjuju (3). Za istoriografiju matematike fenomenologije ova prepiska je značajna zbog podataka da se profesor Stanojević takođe bavio iznalaženjem analogija među disparatnim pojavama "Drugi Tesla". "Posle vrlo dugog vremena rad sam da vas nekoliko trenutaka uznemirim šaljući vam ovaj moj poslednji rad (5). Kao što ćete i sami videti čini mi se da mi je ispalo za rukom da konstatujem da se Njutnov zakon koji vlada u planetskom svetu, da se Kulonov zakon koji vlada u električkim i magnetskim pojavama može primeniti i na organsku, naročito biljnu prirodu. Iz priloženih nekoliko fotografija vidite vanredno lepo reproducirane

linije sila i ekvipotencijalne površine na pojedinim biljnim prese-
cima. Naročito se tačno po pomenutom zakonu ponašaju ne samo prvo-
bitno stvarane i obrazovane sada "ćelijskog polja", nego tako se
isto izvode i perturbacije u homogenim poljima od strane čvorova
koji igraju ulogu magnetskih, odnosno električnih masa i polova.

U masi naučnih radova koji svakodnevno izlaze na površinu,
sigurno vam je ovaj moj posao, publikovan u "Comptes Rendus" izma-
kao, pa zato sam slobodan da vam na nj` obratim pažnju i da vas za-
molim da putem, koji vi smatrate kao najzgodniji, obratite na nj`
pažnju i vašeg američanskog naučnog sveta ako nalazite da to za-
služuje.

Ja vam ovde šaljem samo nekoliko najzanimljivijih slučajeva
iako je moja zbirka ovim stvari(ma) mnogo veća. Kroz izvesno vreme
izaći će na francuskom jeziku čitava jedna knjižica u kojoj će si-
stematski biti izložena cela stvar (7).

Moleći vas da me izvinete što vam dosađujem, molim vas da mi
dostavite vaše kompletno mišljenje i ono što bi se o tome publiko-
valo, kao i da primite iskrene pozdrave od vašeg Đ.M.Stanojevića,
prof.Vel.šk. (2/14 April 1898. u Beogradu)" (1).

Nismo uspeali da doznamo odgovor na ovo pismo i, uopšte, Te-
slino mišljenje o Stanojevićevim analogijama među disparatnim poja-
vama koje imaju zajedničku modelujuću funkciju u obliku Njutnovog,
odnosno Kulonovog zakona. Prema činjenici da je Stanojević nagove-
štenju knjigu u pismu objavio tek posle osam godina, verujemo da je
nastavljena prepiska u tom pravcu i da je Tesla uputio svoje miš-
ljenje o iznalaženju analogija u prirodi i društvu. Rađajući i sam
na analoškim modelima za svoje pronalaskе, Tesla je sigurno imao
puno razumevanje za Stanojevićeva istraživanja i verujemo da mu je
pružio odgovarajuću podršku.

Znajući za sličnost između gravitacionog i elektromagnetnog
polja, Stanojević je preduzeo ispitivanja kako bi utvrdio činjenice
da i pri rašćenju biljaka u njihovim stablima postoje linije
sila i ekvipotencijalne površine isto onako kao i pri pojavama po-
larizacije zrakova kroz kristale ili isto onako kao pri dejstvu
dvaaju magnetnih polova.

Suština Stanojevićevih analogija je u sledećem. U prirodi,
gde se dve ili više masa privlače ili odbijaju saglasno zakonu

centralnih sila, imamo slučaj sa poljem koje sadrži linije sila i ekvipotencijalne površine. Ili, ako u prirodi naiđemo na linije sila u ekvipotencijalne površine imamo prvo da tvrdimo da one potiču od centralnih sila koje deluju saglasno Njutnovom zakonu. Na ovaj način Stanojević je došao do pojma generalisanih centralnih sila, odnosno generalisanih linija sila i generalisanih ekvipotencijalnih površina, isto onako kao što je u prvoj raspravi iz fenomenologije Mihailo Petrović najavio pojam generalisane mase, generalisanog težišta, ... (2).

Skup pojava koje je istraživao profesor Stanojević i koje su podvrgnute generalisanom pojmu ecentralnih sila

$$F = \{f^1, f^2, f^3, \dots, f^8\},$$

sa jedinstvenim matematičkim modelom (analoško jezgro), obuhvata sledeće:

G r a v i t a c i o n o p o l j e (pojava f^1); zakon centralnih sila u gravitacionom polju formulisao je Njutn 1685. godine

M a g n e t n o p o l j e (pojava f^2);

E l e k t r i č n o p o l j e (pojava f^3);

E l e k t r o m a g n e t n o p o l j e (pojava f^4);

Krajem 18.veka Kulon je našao zakon o linijama sila i ekvipotencijalnim površinama u navedenim pojavama f^2 , f^3 , f^4 koji se izražava sličnim matematičkim oblikom kao i Njutnov zakon.

O p t i č k o p o l j e (pojava f^5); obojeni prstenovi kao i neutralne linije koje se vide u optičkom polju kristala duž jedne osi, slična je pojavi u elektromagnetnom polju pravolinijskog provodnika. Optičko polje kristala sa dvojnim prelamanjem omogućava da vidimo iste elemente koji se zapažaju u polju koje formiraju bilo dva paralelna pravolinijska provodnika, kroz koje protiče struja istog smera, bilo dva istoimena električna ili magnetna pola.

C e l u l a r n o p o l j e (pojava f^6); međućelijsko dejstvo u biljkama podleže zakonitostima centralnih sila, odnosno linije sila i ekvipotencijalne površine više ili manje slične u godišnjim prstenovima kod biljaka i raznih plodova.

Ć e l i j s k o p o l j e (pojava f7); kod živih bića ćelije se uređuju i fiksiraju prema određenim zakonitostima. Velika sličnost koja postoji u životu biljaka i živih bića ukazuje da su ove zakonitosti jednake onima koje upravljaju električnim i magnetnim pojavama ili prema kojima se regulišu obojeni prstenovi u optičkom polju.

P l a n e t a r n o p o l j e (pojava f8); ako pretpostavimo da su putanje planeta Sunčevog sistema kružne, i da je Sunce u zajedničkom središtu, tada će čitav planetarni sistem biti jednopolno polje u kome su putanje planeta ekvipotencijalne linije, a radijus-vektori linije sila tog polja.

Na osnovu ovako ustanovljenih analogija među pojavama f1, f2, f3, ... , f8, biljnog i životinjskog sveta, elektriciteta, magnetizma, optike i kretanja planeta u Sunčevom sistemu, Stanojević dolazi do zaključka koji je, svakako, značajan za savremenu bioniku:

1. Ćelije organske prirode deluju jedna na drugu srazmerno svojim masama i obrnuto srazmerno kvadratu rastojanja;

2. Ćelije se pomeraju i fiksiraju po linijama sila i ekvipotencijalnim površinama.

Na osnovu ovoga, profesor Stanojević je izveo uopštenje na materijalni svet iznoseći:

1. delovi materije deluju jedna na druge srazmerno svojim masama i obrnuto srazmerno kvadratu međusobnih rastojanja;

2. svi delovi materije se uređuju po linijama sila i ekvipotencijalnim površinama.

Neosporno, ovo je najuopšteniji fenomenološki prilaz Njutnovom zakonu kao najuniverzalnijoj pojavi u prirodi, pri čemu poslednja Stanojevićeva uopštenja savremena nauka treba da proveriti novim sredstvima.

Pored uspostavljenih analogija među pojavama f1, f2, f3, ... f8, Stanojevićeva tumačenja imaju i direktnih koristi za novu analizu same pojave f1. Ovo ćemo pokazati na primeru Ticiusovog zakona.

Model (f8) Sunčevog sistema, kao jednopolnog ekvipotencijalnog polja, Stanojević je iskoristio za nova naučna objašnjenja

o radius-vektorima planeta. Ovim načinom Stanojević je u potpunosti bio na savremenom stanovištu o odnosu original/model: ono što se kod originala ne može proučiti i naučno objasniti, često je moguće uraditi na modelu.

Imajući u vidu aktuelnost proučavanja rastojanja planete od Sunca (5), ovde ćemo izložiti modelno objašnjenje - nje Ticiusovog zakona u smislu generalisanog pojma centralnih sila kojeg je iskazao profesor Stanojević u pojavi f8.

Neka je Sunčev sistem jednopolno električno polje. Tada skup tačaka, gde potencijali φ imaju stalnu vrednost, obrazuju putanje planeta kao ekvipotencijalne površine pri čemu su linije sile radius-vektori. Pretpostavimo, dalje, da se na Suncu nalazi jedna elektrostatička jedinica elektriciteta, tada rastojanja planeta možemo izraziti u voltima prema navedenoj tablici, pri čemu je elektrostatička jedinica potencijala φ jednaka 300 volti.

Prema ovome, modelno objašnjenje udaljenosti planeta od Sunca je sledeće:

1. raspored planeta nije uniforman sa gledišta potencijala;
2. pad potencijala kod unutrašnjih planeta je osetno reguliran. Merkurov potencijal je približno dva puta veći od Venerinog.

Planeta	Rastojanje	
	$D = R/R_0$	φ (v)
Merkur	0,387	750
Venera	0,723	400
Zemlja	1,000	300
Mars	1,524	200
Male planete	3,000	100
Jupiter	5,203	60
Saturn	9,539	30
Uran	19,183	15
Neptun	30,055	10

Tablica rastojanja planeta od Sunca u astronomskim jedinicama i voltima

3. Razlika potencijala kod unutrašnjih planeta je stalna, te možemo pisati da je

$$\varphi = 600 - 100 n,$$

gde je n - redni broj planete ($n = 2, 3, 4, 5$).

4. Spoljašnje planete imaju stalne potencijale koji opadaju po geometrijskoj progresiji

$$\varphi = 60 \cdot 2^{1-n}.$$

Ovde je u početku promena potencijala regularna; docnije nastaju pometnje usled perturbacija spoljašnjih ili uzajamnih sila.

5. Kako putanje planeta odgovaraju ekvipotencijalnim linijama jednog polja s dva istoimena pola, može se pretpostaviti da putanja Merkura, budući da je vrlo bliska Suncu, nije eliptična, već bliža obliku lemniskate. Na ovaj način bi se moglo objasniti neregularno ponašanje koje se zapaža u kretanju Merkura, što je nauka pripisivala jednoj planeti bližoj Suncu - po imenu Vulkan.

Primetimo da ovo nije jedino modelno objašnjenje udaljenosti planeta u našoj literaturi. Tako je akademik Vladimir Varićak (1865-1942) u raspravi "O predočavanju distanca", (Rad, 230, 1925, str.259-263), izneo svoje modelno objašnjenje na taj način, što je za Ticiusov zakon dobio odgovarajući matematički model u geometriji Lobačevskog s važnošću zakona spacijalne teorije relativnosti. Oba modela, i Stanojevićev i Varićakov, koji su međusobno izomorfni, imaju isto modelno objašnjenje, pri čemu je kod Varićaka za spoljašnje planete model linearna funkcija kao i za unutrašnje planete.

Neosporno, i ostale pojave iz Stanojevićevog fenomenalnog skupa mogle bi se na sličan način analizirati modelnim objašnjenjima, što na ovom mestu ne činimo.

Matematičaru Mihailu Petroviću bili su poznati radovi profesora Stanojevića. U poglavlju "Varijacije aktiviteta u mehanizmu pojava" za slučaj recipročnosti između mehanizma i načina varijacija aktiviteta (3), gde Petrović analizira slučaj upoznavanja mehanizma pojave ako je analoško jezgro (aktivitet) poznato u obliku nekog grafika ili rasporeda linija i površina; on navodi sledeće: "Tako, slike, formirane distribucijom gvozdених opiljaka u magnetskom polju, identične sa onima koje daju raspored linija sila u polju kakve centralne sile, obrnuto proporcionalne kvadratu rastojanja, ističu na vidik fakt, da su magnetne sile, sile te

vrste. Geometrijske slike, što predstavljaju raspored ćelija u preseccima raznih biljnih delova (korena, stabla, semena) i koje se sa velikom preciznošću, i u svim pojedinostima, podudaraju sa linijama sila ili preseccima ekvipotencijalnih površina što odgovaraju centralnim silama pomenute vrste, ukazuju na nesumnjivo učešće takvih sila pri stvaranju celularnog polja"(3).

Kao što i Petrović utvrđuje, po Stanojeviću se ne zna na koji način i kakvim mehanizmom deluju ćelije jedne na druge u organskom tkivu. Ali linije koje se vide na preseku biljaka, nisu ništa drugo nego sistem linija sila i ekvipotencijalnih površina koje je ucrtala priroda sa istom preciznošću i tačnošću kao što se u elektricitetu i magnetizmu teorijski i eksperimentalno konstruišu. U stvari, za Stanojevićev fenomenološki skup f^1 , f^2 , f^3 , ..., f^6 , specijalno, za celularna (f^6) i ćelijska (f^7) polja, imamo slučaj pojava gde je za njihovu deskripciju zakon aktiviteta poznat samo u obliku nekog grafika, te je veoma teško u takvim slučajevima donositi neke zaključke o mehanizmu pojave..... "Poznavanje (samo) tako jedne pojave", piše M.Petrović, - "i njegovih raznih pojedinosti, uopšte, samo sobom nedovoljno (je) za saznavanje mehanizma pojave". Naglašavajući da su ekvipotencijalne linije kao aktiviteti koji su samo vizuelno, empirijski utvrđene u obliku grafika, Petrović ukazuje na opreznost, da se može u ovakvim fenomenološkim poljima okarakterisati pogrešan mehanizam pojave. "Jedna ista pojava, sa svim svojim deskriptivnim pojedinostima, može biti shvaćena kao posledica raznovrsnih mehanizama".

Stanojevićevo fenomenološko polje, čije je analoško jezgro izraženo geometrijskim oblikom Njutnovog, odnosno Kulonovog zakona, nužno je ponovo istaknuti kako bi današnja bionika odgovorila na Petrovićevo opreznost iz 1911.godine i razrešila sve pojedinosti mehanizma u celularnom i ćelijskom polju, koje se manifestuju u obliku linije sila i ekvipotencijalnih površina. Stanovište savremene teorije modelovanja ne odbija nalaženje nekog modelnog mehanizma za polja f^6 , f^7 pod uslovom da je ono izomorfno sa originalnim mehanizmom.

Navedena Stanojevićeva istraživanja strukture materije iz 1898.g. kao i Teslina razmišljanja i preuočavanja u odnosima mikro i makro sveta, nazirući strukturu i elektronsku konfiguraciju atoma (10), javljaju se znatno ranije od Borovog pronalaska(1911)

i Paulievog principa (1925), što je za istoriju naše nauke značajan podatak.

U želji da u našoj istoriji nauka i tehnike utvrdimo sve ličnosti koje su stvarale u tuđini, van svoje domovine i stepen njihovog učešća u razvitku nauke i tehnike svoga naroda, - pažnja nam je bila usredsređena na Jankovića Mirijeuskog (1741-1814), reformatora ruskih škola, Atanasija Stojkovića (1773-1832), profesora fizike i mehanike na Harkovskom univerzitetu, Konstantina Vujića (1851-1914) profesora mehanike i balistike na Bečkoj politehnici i Nikolu Teslu. U Teslinom slučaju pokazalo se da je on sarađivao sa naučnim krugovima u Beogradu.

Godine 1894. u Beogradu je Đorđe Stanojević priredio sabrana dela Nikole Tesle (4). Tesla je u Americi prihvatao naše mlade inženjere (11); postoji još neproveren podatak da je Tesla konsultovan u izgradnji hidrocentrale na Djetinji (Užice) i Vučju (Leskovac) (6), kao i nekim instalacijama rashladnih uređaja (8).

LITERATURA

- 1) Muzej Nikole Tesle, Prepiska "S"
- 2) Petrović, M.: Jedan pogled na geometrijske mase,
Nastavnik 7 (1896), 1-10
- 3) Petrović, M.: Elementi matematičke fenomenologije,
Beograd, 1911, str.746
- 4) Stanojević, Đ.: Nikola Tesla i njegova otkrića,
Beograd 1894, str.340
- 5) Stanoievitch, G.: Les lignes de farces et les surfaces
equipotentiellees dans la nature, CR 126 (1898), 9, 1-4
- 6) Stanojević, Đ.: Električna industrija u Srbiji,
Beograd 1901, str.68
- 7) Stanoievitch, G.: Les farces centrales dans la Nature,
Belgrade 1906, p.90
- 8) Stanoievitch, G.: L'industrie du froid en Serbie,
Belgrade 1910, p.27
- 9) Ter Haar D. - Cameron A.: Historical review of theories
of the origin of the solar system, London 1963.
- 10) Tesla N.: Lectures, Patentes, Articles, Muzej Nikole
Tesle, Beograd 1956, p.850
- 11) Trifunović D.: Nikola Tesla i Đorđe Stanojević,
Dijalektika 8 (1973), 1, 59-68.

Prof.dr. France AVČIN

Fakulteta za elektrotehniko
Ljubljana

SPREJETJE ENOTE "tesla (T)" V MEDNARODNI MERSKI SISTEM (SI) ZA VELIČINO INDUKCIJA (B)

Povzetek

Profesor elektrofakultete v Ljubljani dr. tehn. France Avčin pripoveduje iz svojih osebnih spominov o dogodkih, ki so 1. 1960 privedli do dokončnega sprejetja merske enote "tesla" v SI za veličino magnetna indukcija B. V ta namen mora poseči daleč nazaj, prav v čase slovenskega osvobodilnega boja, od koder ga je vodil nenavaden splet dogodkov preko Mednarodne Elektrotehniške Komisije TC 24 in Devete Generalne Konference za Mere in Uteži 1. 1948 ter 1954 do Enajste, ki je usodnega 18.10.1960 dokončno sklepala o "to be or not to be" imena Tesla v SI. Ker sta bila tako MEK kot tudi Mednarodni Komite za Mere in Uteži "tesla(T)" že sprejela in jo predlagala GKMU, se je zgodilo, da je od prvoborcev zanj bil prisoten samo avtor. Srečal se je s težko in povsem nepredvideno kampanjo proti "tesli(T)", zlasti iz mednarodnih krogov fizikov. S svojimi intervencijami mu je uspelo - skupno z drugimi ugodnega mišljenja - bistveno pripomoči, da je rezultat končnega glasovanja bil pozitiven in "tesla(T)" dokončno sprejeta, po devizi Metrske konvencije

"pour tous les temps, pour tous les peuples,
za vse čase, za vse narode".

THE ACCEPTANCE OF THE "tesla(T)" UNIT INTO THE INTERNATIONAL SYSTEM OF UNITS (SI) FOR THE QUANTITY OF MAGNETIC INDUCTION (B)

France Avčin, professor at the Faculty of Electrical Engineering, Ljubljana University, presents his personal reminiscences of the events which in 1960 brought about the definitive acceptance of the "tesla" unit for the quantity of

induction B into the International System of Units (SI). His reminiscences start as early as the Slovene liberation war, from which time an unusual interaction of events led, through Technical Committee No. 24 of the International Electrotechnical Commission, the Ninth and Tenth Conference on Weights and Measures, to the crucial Eleventh Conference which was to definitively decide - on October 18, 1960 - on the "to be or not to be" of the name Tesla in the SI. As both the IEC and the International Committee on Weights and Measures had already accepted "tesla(T)" and were, on the date in question, submitting it for approval to the ICWM, it so happened that only France Avčin was present of the principal supporters of the idea. He met with a strong and quite unforeseen opposition, mainly by physicists. However, by his firm stand and thanks to the support of other favourably inclined international delegates, he succeeded in substantially contributing to the positive final vote regarding the acceptance of "tesla(T)"

"for all times, for all nations"

as stated by the Meter Convention.

x x x x

Moja fakulteta mi je naložila, naj Vam pripovedujem iz osebnih spominov na pota in dogodke, ki so 1. 1960 privedli do dokončnega sprejetja našega imena Tesla za eno od enot mednarodnega merskega sistema SI (Système International d'Unités de Mesure), določenega "za vse čase, za vse narode". Nekaj tega sem bil napisal že 1. 1970 v publikaciji Elektrotehniške zveze Slovenije ob priliki 25-letnice Teslove smrti. To pot naj bi povedal še kaj več. Zato bom moral biti pač še bolj osoben in bo mogoče koga kaj prizadelo, celo po 15 letih. Mene pa je marsikaj prizadelo takrat. Kajti vse življenje sem bobu rekel bob, drugače nisem mogel, pa mi je to vselej škodilo in mi še. Tako naj bo tudi danes povedano "nudo e crudo".

Tesla je bil unikum na tem svetu, ne le za svojo dobo. Kaj vse je čudežnega ustvaril za takrat rojevajočo se elektrotehniko, to je sedaj znano in končno tudi splošno priznано. Njegova pota in prijemi so bili ne le originalni,

temveč tudi genialni. Ni pa bil le čudežni genij elektrotehnike, bil je tudi njen svetnik: da je lahko povsem nemoteno ustvarjal, je sredi najbolj "booming city" tega sveta živel vprav samostansko življenje. Odrekel se je vsem varljivim mikom tega sveta tja do mesnega in mesenega poželjenja, saj ženskaska v njegove sfere ni vstopila. Odrekel se je tudi denarju, razen kolikor ga je nujno potreboval za svoje grandiozne stvaritve. Teh zahtev pa je bilo mnogo, nikoli dovolj. Kljub temu je znal z eno samo potezo raztrgati pogodbo z Westinghousom, ki mu je obetala svojih 12 milijonov takratnih težkih dolarjev: obljubljeni en dolar za vsak instalirani trofazni kilowatt bi bilo pogodbenika namreč uničilo, Westinghouse bi banrotiral, s tem pa bi bil močno prizadet prodor Teslovega trofaznega električnega sistema v ves svet ... S tako širokopotezno miselnostjo je proti svojemu koncu seveda povsem obubožal. Da ni bilo podpore tedanje jugoslovanske vlade, bi končal v ubožnici, zapuščen in pozabljen od vseh, razen od bele newyorške golobice, prav po principu "vse na svetu je ustvarjeno, da trpi". Sic transit gloria mundi, tudi za najvišje glave. Če kdo, je Tesla do dna okusil kupo gorjupo ameriškega reka: "It's no fun to be ahead of one's time". Tesla naj bo zlasti studentom dokaz za osnovno vrednost in vpliv visoke temeljne izobrazbe na vsakršen, tudi tehniški napredek, ne le realne, temveč in predvsem humanistične. Vse veliko, pa naj bo dobro ali zlo, se namreč rojeva le iz individualnih bistrih, aktivnih, razgibanih, predvsem pa dovolj izobraženih glav posameznikov vse od kamene sekire preko loka tja do "vesoljskih" potovanj človekovih.

O izjemnih ljudeh pisati in govoriti je najtežje, človek je pač največja uganka tega sveta, žal pa hkrati postaja v svoji ponoreli sli za "razvojem, napredkom, nenehno rastjo", tudi njegova propast. Na modrost starih je povprečnež pri tem namreč že povsem pozabil. Izjemni ljudje se človeštvu rojevajo zelo poredko, kot vsi genetski "čudeži" v vsej živi Naravi. Rojevajo se pa kjerkoli, kadarkoli, kateremukoli narodu, le da manj iztrošenim, manj razvitim češče. Le pogoji za razvoj niso za vse enaki in je tako nič koliko takih "genius wasted". Tesle pa ni moglo zadržati prav nič, svojo trdo a trdno pot si je utiral in utrl sam samcat. Tako je živi Tesla bil - in to velja tudi za

njegov spomin - državljani vsega sveta, kot so to vsi izjemni ljudje, npr. njegov znanec Einstein s področja čiste in uporabne fizike. Če danes Teslo slavimo kot hrvaškega Srba iz Jugoslavije, potem nam za to daje pravico ne zgolj rodni kraj, temveč predvsem dejstvo, da Tesla na svoje poreklo ni nikdar pozabil, niti za hip ne. Domovini je bil vselej zvest sin, tudi ko se je v krčih in krvi rojevala nova Jugoslavija. To pa v ZDA takrat ni bilo ne lahko, ne rado videno. Zato je Tesla bolj naš kot ameriški, čeprav je svoja čudesna odkril in ostvaril prav v tej deželi neomejenih možnosti, kjer uspeš le, če si dovolj odporen proti negativnim dobičcarskim vplivom tržnega gospodarstva in dovolj brezobziren v potrošniški družbi.

V nadaljnjem naj vam tedaj govorim samo o tem, kako je prišlo, da je veliko ime Tesla post tot discrimina rerum le bilo sprejeto v moderni svetovni merski sistem SI (Système International)

"pour tous les temps, pour tous les peuples", kot je bila to daljnovidno odredila že francoska revolucija. Nenavadno vlogo mi je bila namreč pri tem dodelila usoda s spletom mnogih okoliščin, teško in odgovorno takrat, ko je leta 1960 v tem za nas Jugoslovane načelno važnem vprašanju šlo za vse. Osemnajstega oktobra sem se znašel pred njim iznenada, sam, brez podpore dotedanjih borcev za "jedinicu", sam pred nepričakovano, prefinjeno organizirano zaroto zagrizenih starih nasprotnikov, nedvomno tudi politično obarvanih, ljubosumnih celo na uspehe moderne elektrotehnike, brez katere ni vrhunske eksperimentalne fizike od atomskih reaktorjev do radioastronomije. Napad sam je prišel nepričakovano, iznenada kot iz zasede, z najtežjimi orožji. Tako me je doletel najtežji dan mojega življenja, moralno težji od vsega, kar sem kdaj doživel nevarnosti v gorah in med vojno. Da pa bomo razumeli vso nenavadno povezano verigo dogodkov, moram poseči daleč nazaj.

V elektrotehniki me je od nekdaj zanimalo pred vsem drugim njeno fizikalno ozadje: elektrofizika. Tehnika mi je vselej bila materializirana fizika plus gospodarstvo. Kaka takoimenovana elektroenergetika mi tako sploh ni elektrotehnika, vse prej kot to: strojništvo, hidraulika, termodinamika, vodogradbeništvo, ekonomika, celo politika, seveda tudi korupcija, itd., itd.

Elektrotehnika pričenja šele v mehanski gredi med pogonskim strojem kakršnekoli vrste in generatorjem, tudi kakršnekoli oblike, v centralah, pri pretvorbi mehanskih napetosti, ki jih obvlada ena sama tenzorska enačba mehanike, v elektriško napetost in tok, ki v vsem sledita osnovni-
ma dvema Maxwelllovima enačbama elektromagnetike, tako čudežnima, "kot da ju je ostvarilo kako božanstvo (Boltzmann)".

Vendar sem se volens nolens vpletel tudi v elektroenergetiko in to prav v partizanih. Na jesen 1944 sem tamkaj zvedel za namero Glavnega štaba NOV in POS : onesposobiti, če treba, uničiti okupatorju vse električne centrale! Zavrtelo se mi je v glavi: konec vojne je blizu, mi pa naj si vprav sedajle, tik pred svobodo, sami prerežemo srčno ožilje, prepotrebno za obnovo in razvoj! Kaj narediti?? Naravnost ne bo uspelo nič, mogoče pa mi uspe prepričati odločujoče po drugi poti.

Priredil sem profesorsko predavanje za vodilne pri SNOS v Črmošnjicah o osnovnem pomenu in nenadomestljivi važnosti elektrike za obnovo in razvoj takoj po vojni. Centrale si moramo vojaško zavarovati, ne pa da bi jih kakorkoli uničevali. Povedal sem, kako najuspešneje in najlažje ohromiš električno omrežje za primerno dobo. Te stvari sem dobro poznal, saj sem iz angleščine prevedel minerski priročnik prisotnega britanskega polkovnika Moora. Mine po mojih načrtih iz Italijanom zaplenjenega vojnega materiala bi mi bile za las prinesle kroglo, ker nisem hotel ubogati predpostavljenega mi komandanta, jurista, s katerim sem bil sicer drsal šolske klopi celih 12 let. No, polkovniku so potem prinesle v Afriki nagrado in generalske našive ... Upirati se višjim naredbam je bilo namreč, kot v vsaki vojski in vojni, močno tvegano početje. Po meni, intelektualcu, so v debati po predavanju padli z vseh strani : to da je egoizem, biti moramo brezkompromisni tudi do samega sebe, itd. Zgodilo pa se je, da je vprav sredi tega ognja kakor deus ex machina vstopil tovariš Krištof, Edvard Kardelj, pravkar prihajajoč iz Vrhovnega štaba. Ko je izvedel, kakšne uporniške misli zastopam, je povedal, da imam povsem prav, Takšna je tudi linija Vrhovnega štaba sedaj, ko je konec vojne videti že tako blizu. Še sedaj jih vidim, v hipu spreobrnjene obraze in še mi gre na smeh, kadar jih z menoj vred ostarele srečujem.

Tako so slovenske centrale bile rešene, le na Fali so menda pokvarili neke vzbujačnike. Zaščita pa je dobila nalogo zasesti in zavarovati jih, ko bi Nemci zbežali. Za vse gornje dandanes komaj kdo še ve, tretjina stoletja je že tega.

Moje elektroenergetsko prizadevanje pa ni ostalo nezapaženo: ob novem letu 1945 sem iz Bele Krajine odletel v Bari in naprej v že svobodni Beograd, v Saveznu komisiju za privrednu obnovu zemlje. Tam se je med drugim pokazala potreba, najti regulatorje ter vzbujačnike turboagregatov znane švicarske firme BBC (Brown Boveri Co.), ki so jih bili uničili bežočii nadljudje. Kako do njih? Očitno bi moral nekdo v Švico, nekdo, ki se tam spozna, se zna obrniti, obvlada jezike pa še elektrotehniko jakega toka in nekaj strojništva, zanesljiv seveda. Prof. Ciril Rekar, metalurg, je našel - mene, ki sem bil že pred vojno strašil po švicarskih gorah. Močno so si oddahnili nekaterniki, ki so se že gnetli okrog rojevajočih se vodilnih elektro-gospodarskih položajev, ko sem 14. aprila 1945 odfrčal po zraku v Bari, od tam pa dobro opremljen iz zalog generala Pehačka z lovskim letalom in s svojo rusko Tokarev - Tula 7,63 mm v žepu naprej v Marseille ter Pariz. Naprej v Švico pa ni šlo, nikakor ne : alpinist je res, Švico pozna, govori začuda celo nemško in francosko, toda bandit ...? Ne, počakajmo raje konca vojne! Tako sem doživel 8. maj 1945 v Parizu, "le jour de la victoire" zvečer na Champs Elisées. Nepredstavljivo noro veselje tri dni brez kraja. In jaz edini oficir jugoslovanske rësistance v uniformi! Bilo je enkratno, nepozabno. Kadarkoli moram dandanes v Pariz, mi je to sedaj živ dolgčas. Prav takrat pa sem dobil stike tudi s francosko Rësistance. Mnogokaj sem tako zvedel, mnogokaj sem se naučil, kar mi je pozneje prišlo prav tudi v bojih okrog Tesle za "teslo(T)" do dokončne zmage 15 let pozneje.

Diplomatski potni list in nove zveze so mi končno utrle pot v Švico. Pa švicarske nujne potrebe po surovinah: vlak najslabšega lignita bi bili tedaj odfehtali z zlatimi urami, le da mi tega tedaj nismo hoteli razumeti. Tiste dele sem dobil, finance je uredil bančnik iz Beograda, požegnal pa novodošli politkomisar Slovenec. Potem so na našo delegacijo do novembra pozabili, kar sem temeljito izkoristil za samotna potepanja po tamošnjih gorah. Ko

sem rešil dva Švicarja na Bernini, sem bil končno sprejet v CAS (Club Alpin Suisse), kjer sem danes že veteran. Ta izkaznica mi je dolgo koristila več kot vsak CD. Tako smo n.pr. z njeno pomočjo pritihovali dva avtomobila umetnih rubinastih ležajev za nastajajoče Iskrine električne števec. Ko je prišel težko pričakovani povratek, sva s finančnikom odietela, ostal pa je - politkomisar ...! Tam sem se tudi jaz prvič srečal s prekletstvom denarja, a mene ni mogel zaslepiti. Na zimo 1945 me je tovariš Krištof, ko nisem hotel v nobenega od visokih zveznih položajev tja do diplomacije, posadil za volan velikega kamiona, polnega žakljev moke, pa vozi za Ljubljano! Prav vse sem jih disciplinirano oddal, saj še nisem in še danes ne obvladam že tedanjih uspešnih tehnik nekaterikov, kako brez dela prideš do blagostanja na račun skupnosti.

Stiki z vrhovi švicarske elektroindustrije ter tehnike so mi profesorju elektrotehnike brž postali nad vse dragoceni. Spoznal sem med drugimi tudi prof. Landolta, veliko glavo pri Oerlikonu (glej poznejši njegov pravični članek o Tesli v Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereines 1959). Povabil me je k delu v Mednarodni elektrotehniški komisiji (IEC), odbor za elektriške in magnetske veličine ter enote (TC 24), najbolj znanstveni od vseh številnih ostalih. Že 1. 1950 sem se vključil. Med deset let trajajočimi in še do danes ne dognanimi spori okrog "racionalizacije" nekaterih elektriških veličin (npr. jakost magnetnega polja H) in enot (npr. njena CGS enota, "oersted") sem se hočeš nočeš dodobra spoznal s historičnimi koreninami formulacij v magnetiki: H je sicer zelo koristna, a hipotetična veličina, nemerljiva, njene enote se ne da realizirati. Res meri se vedno in edino le gostota magnetnega polja oziroma indukcija B . Celo magnetiko lahko napišeš brez H (+ prof. Koželj), brez B pa ne, razen če se postaviš na višje, a edino pravilno stališče, kot sem ga čim preprosteje prikazal v Elektrotehničnem vestniku 1974, štev. 2: "magnetike ni, so le sile med elektrinami. V mirovanju jih obvlada elektrostatika, v relativnem gibanju pa lé-ta plus relativistika". Vse njene veličine, tudi B , slede iz te poti, kot sledi vsa relativistika najpreprosteje iz enačb elektrodinamike oz. elektromagnetike.

V našem jugoslovanskem odboru TC 24 se je kmalu utrnila zamisel, dati tej osnovni veličini magnetike B enoto lastnega imena, ne kar stari miriagauss (10^4 gaussov klasičnega CGS sistema) in tudi ne Vs/m^2 oz. Wb/m^2 novega praktičnega sistema. In kdo bi bil bolj kompetentan kandidat za to poimenovanje, kot naš Tesla, ta klasični svetovni velikan elektromagnetike! Za glavni tozadevni naskok na vseh strokovnih poljih je bila izbrana 100-letnica njegovega rojstva (9/10. julija 1856 v Smiljanu pri liškem Gospiću). Do takrat pa se moralo zgoditi še mnogokaj, še več pa zatem, da je prišlo do dokončnega sprejetja 1960. Kaj in kako, bomo takoj videli.

Leta 1948 je prišla Generalna konferenca za mere in uteži, prva po vojnih letih. *Conférence Générale des Poids et Mesures* je diplomatskega značaja, izvršilni organ Meterske konvencije (*Convention du Mètre*), ki je prav 20. maja lani (1975) slavila stoletnico obstoja, mimo vseh vojaških in političnih akrobacij tega nezrelega, da, norega človekovega sveta. V njej sede tudi diplomati, resnični strokovnjaki pa v njenem Mednarodnem Komiteju za mere in uteži (CIPM), le da dokočno odločajo prvi. Glede na moje izkušnje 1. 1945 je Savezni sekretarijat inostranih poslov poslal mene, poleg člana finančnega odbora CIPM Kargačina iz zagrebske ekspoziture beograjskega Saveznog urada za mere i dragocene metale. Inž. Kargačin pa ni prišel. Takrat so bili končno postavljeni dokončni temelji današnjemu Mednarodnemu merskemu sistemu (SI) : vse enote dimenzijsko koherentne z osnovnimi Biorgijeve izbire (m, kg, s, Ws elektrike = J mehanike), pri čemer pa četrta še ni bila določena. Za magnetno indukcijo B je še veljalo (p. 115 *Comptes Rendus de la IX^e CGPM*) : "L'unité d'induction magnétique est le myriagauss ($10^4 \text{ cm}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$). Le myriagauss est l'induction qui produit un flux d'induction magnétique de un weber par metre carré".

Definicija enote za B je tedaj še bila naslonjena na klasični tročlenski elektromagnetni sistem CGS (centimeter, gram, sekunda), dočim je enota fluksa-weber že spadala v moderni štiričlenski merski sistem (m, kg, s, A).

Takrat sem imel posebno srečo : Francozi pišejo Jugoslavijo z Y (Yougoslavie), en o zadnjih crk v abecedi, pa sem tako sedel za konferenčno mizo na koncu. Vljudni, kot so, so za sebe, gostiteljico Francijo, rezervirali

prav zadnje mesto, še za meno. Predstavljal pa jo je nihče manjši kot sam Louis de Broglie (izg. Lúis de Brój), sloviti fizik in Nobelov nagrajenec, ustanovitelj valovne mehanike (z enačbo za električne korpuskule $mv^2/2 = eU = h\nu = hc/\lambda$ pri čemer je λ "de Brogli-jeva valovna dolžina, pripisana delcu mase m in elektrine e , enačbo nič manj važno za fiziko in svet, kot je Einsteinova $E = mc^2$). Ves čas 9 GKMU (13-21.X 1948) sva tako sedela skupaj. Spoznal sem, da stalni sekretar francoske akademije in francoski princ ni le princ fizike, temveč tudi čudovit človek, vljuden, prijazen, skromen, ustrežljiv, tak kot so le res veliki ljudje. Ogromno sem tako zvedel o fiziki, who is who v njej, o njeni filozofiji, pa tudi o njenih organizacijah in si dobil še druge dragocene stike in zveze. Ob le-téh sem spoznal, kako stvari tečejo na GKMU, interese, grupacije ipd., vse od časa, ko je 31.3.1791 Ljudska skupščina Francije določila za enoto dolžine meter, enak 40 000 000-temu delu Zemljinega meridiana in je bil v Franciji ostvarjen prameter 25.7.1800. Dobil sem en hommage cordial štiri njegove čudovito pisane vljudno znanstvene knjige brez vseh formul o takratni moderni fiziki* v zamenjavo za svojo pozneje natisnjeno razpravo "Is the Giorgi System of Units to be considered 3 - or 4 Dimensional?" (Electrotechnical Review, vol. XXII, n° 5-6 and n° 7-8 1954). Predstavljajo mi silno dragocenost. "L'histoire des sciences est ... l'une des branches les plus passionantes de l'histoire générale" piše za konec uvoda v četrti. In edina resnična, kajti vse druge zgodovine se od nekdanj sproti prikrojujejo željam vsakokratnih političnih režimov.

Leta 1954 je prišla X. GKMU. SSIP v Beogradu je zopet določil mene in Kargačina, na novo še inž. Lazarja, takratnega direktorja SUMDM. Predsedoval je Maurice de Broglie, brat Louisa, predsednik Académie des Sciences de l'Institut de France. Moji stiki so ostali ohranjeni.

Švico je zastopal moj švicarski znanec prof. Dr. Roš, Slovenec iz Hrastnika, predsednik Švicarskega inštituta za preiskavo materiala. Bil mi je v nadaljnjem dragocen svetovalec ter učitelj. Takrat so bile opravljene

* La physique nouvelle et les quanta	1937
Matière et lumière	1937
Continu et discontinu	1941
Physique et microphysique	1947

vse priprave za bodoči sprejem sedanjega "optičnega metra" s tem, da smo pretaknuli v poštevi prihajajoče mononukleide (Hg_{80}^{198} , Cd_{48}^{114} , Kr_{36}^{84} , Xe_{54}^{136} ...). Fiziki so namesto ampera kot četrte osnovne enote SI hoteli doseči raje sprejem enote magnetne stalnice μ_0 za osnovno ($\text{Vs/Am} = \text{H/m} = \text{T/Am}^{-1} = \text{N/A}^2$), češ da ampere ni neodvisen od m, kg, s, kajti velja

$$\text{ - elektromagnetno: } 1\text{A} = 10^{7/2} \text{ m}^{1/2} \text{ kg}^{1/2} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{ - elektrostatično: } 1\text{A} = 3 \cdot 10^{9/2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{1/2} \text{ s}^{-2},$$

razmerje pa je $3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = c_0$.

Tu sem se prvič spopadel s fiziki. Na osnovi gornje razprave sem predložil noto, tičočo se definicije absolutnega ampera, ki je dokazala, da tako gledanje na enoto el. toka velja le, če tudi SI baziramo na zgolj treh osnovnih veličinah mehanike - tako kot je to v obeh sistemih CGS, ne pa, da je za edino logično interpretacijo SI potreben štiridimenzionalen v elektromagnetiki in je le tako ampere kot četrta osnovna enota definiran povsem neodvisno (glej Annexe IV, p. 95 h Comptes rendus X, CGPM). Fiziki so si me že tu dobro zapomnili, zlasti njihov šef, sekretar Mednarodne unije za čisto in uporabno fiziko (UIPPA) Holandec prof. J. de Boer z Instituta za teoretsko fiziko v Amsterdamu. Čez 6 let so mi on in njegovi vrnili milo za drago na XI. GKMU, ko je šlo za "teslo(T)" na nož. Doma smo delali v našem odboru TC 24 - IEC naprej, zlasti verzirani beograjski profesorji Miljanić, Damjanović, Ranojević. Prikazali smo z vseh mogočih gledišč osnovno upravičenost veličine B (gostota magnetnega polja, indukcija) do lastne enote na eni strani, po drugi pa vso težo in slavo imena Tesla za to enoto.

Na letno zasedanje IEC pa so pričeli kapati raznorazni "brezzvezniki", priskledniki in neme ribe, bolezen congressitis acuta je močno razsajala v YU. Nisem zdržal, pa sem si k poročilu o zasedanju IEC (srbohrvaška izdaja) drznil napisati, da "u IEC važičima i neznačicama nesme da ima mesta" kjer gre za stvari, tako važne za vse nas Jugoslovane in da na prevažnem zasedanju v Opatiji 22.6. - 1.7.1953. "gledaocima koji bi se prekrštenih ruku gostili na račun zajednice, a pored toga nekonstruktivno kritikovali, u Opatiji neće biti mesta".

Prizadeti so mi organizirali pravi pravcati pogrom, me zasuli z ognjem in žveplom, napravil da sem nepopravljivo škodo zamisli o enoti "tesla", ko bodo zunaj to brali ... Grozila mi je savezna UDBa, beogradski in zagrebški kolegi so se me javno odrekli, s tem da so mi Zagrebčani - - jedan po jedan - dajali prav ... S svojo nediplomatsko oglatostjo zopet enkrat nisem šel v neke račune.

Zatem je prišlo leto 1956, stoletnica Teslovega rojstva. Bile so velikanske prireditve, predavanja, povabljene najvažnejše osebnosti iz IEC, pa tudi iz GKMU - Bureau International, Comité Consulatif d'Electricité, CIPM. Prisoten je bil velik fizik nobelovec Niels Bohr. Bili so izleti, darila, Jadran, kaj vem kaj vse. Da ta večna nakaza Avčin povabila ni dobil, se razume. Ni ga dobil niti na 25-letnico Inštituta Milana Vidmarja, vse v znamenju HE Kobarid, čeprav mu je bil prvi predsednik družbenega upravljanja, da ne bi kaj zinil o tem izumetničenem projektu, ki ne rešuje ničesar, škoduje pa veliko. V Philadelphio na važno zasedanje IEC so šli trije ali štirje, vsi iz Beograda, zna se ...

Res je bila zamisel "tesla(T)" kmalu sprejeta v IEC in tudi v CIPM, glavni strokovni organ GKMU, vrhovne metrološke instance sveta. Vsi z menoj vred smo bili ob tem prepričani, da je sprejetje dokočno : Roma locuta, causa finita! Vendar smo vsi delali račun brez krčmarja, kajti pravi Rim, Generalna konferenca za mere in uteži, se še ni oglasil. V njem so nekateri, dobro pripravljeni, čakali, da udarijo.

Prišla je Enajsta Generalna konferenca (11.-20.10.1960). Ni bila več v Breteuilu, sedežu BIPM, kot poprej, temveč, svoji teži primerno, v samem Ministrstvu za zunanje zadeve Francije. Po uradno predlagani resoluciji števil. 12 CIPM - CC d'É (str. 88 Comptes Rendus de la XI CGPM - glej prilogo) bi naj enota "tesla(T)" bila sprejeta avtomatično z vsemi drugimi predlaganimi enotami SI vred.

Razpis za 11. GKMU z listo traktand sem dobil, očitno po neki "inerciji". Zvedel sem tudi za listo že prijavljenih. Med njimi je bil tudi Monsieur de Boer kot šef fizikov, moj "prijatelj" z X. GKMU. Dalje Italijan Perucca, znani profesor fizike, sila uglajen gospod. Od nas pa to pot trije,

poleg Kargačina in Lazarja kot šef delegacije še novi direktor SUMDM, sicer energičen in zaslužen človek, ki je pozneje dosegel novo zgradbo novega Sa-
veznog Zavoda za MDM, a žal natanko v dunavskem pristanišču sredi vseh
mogočih fizikalnih motenj, nemogočnih za državno metrologijo najvišje rav-
ni. Zgodovine in razvoja "tesle" ni mogel poznati v potrebne nadrobnosti, tu-
jih jezikov ni obvladal aktivno. Vse naštetu znanje očitno ni bilo več potreb-
no, so pač mislili. Torej kar vsi trije iz SUMDM, kaj bi še s profesorji, beo-
grajskimi ali celo ljubljanskimi ... Od teh torej nikogar, niti najvažnejši od
beograjskih prvoborcev prof. Miljanić, veliki teoretik, francuski djak in gla-
dek Francoz ne! Jaz pa sem po svojih prejšnjih izkušnjah že iz imen zaslutil,
da nekaj visi v zraku nad "jedinico", pa še privatno sporočilo nekega sedaj
že umrlega znanca iz 1. 1945 v BIPM me je na take možnosti na XI. CGPM
opozorilo. Kaj storiti?

Poiskal sem starega prijatelja, dr. Jožo Vilfana, takrat podpred-
sednika skupščine Slovenije. Razumel me je izkušeni diplomat in na njegovo
intervencijo je SSIP le pristal in me diplomatsko akreditiral kot "svetovalca"
delegacije, toda s tem, da moje stroške plača - Slovenija !!!

Na Gare de Lyon je srečanje z uradno delegacijo bilo hladno. Ob
ločitvi je moje lovsko uho ujelo ostre besede: "A šta će ovaj ovdje, koliko će
još da nas bude?" Ne da bi se poprej temeljito pogovorili, pripravili našo
strategijo, si za vsak možen primer razdelili vloge, je prišla četrta seja
XI. GKMU: sreda 18.10.1960 ob 15. uri. Z njo se je pričelo zame nekaj,
kar mi je postalo, kot rečeno, najrazburljivejši dogodek in dan mojega živ-
ljenja. Pa tudi najnevarnejši, kot sem se zavedel k sreči sele naknadno, pa
mi v življenju nevarnosti bogme ni manjkalo, če pomislim samo na partizan-
stvo in alpinizem. Takole je bilo zares, medtem ko je v ustreznem uradnem
tekstu (Comptes rendus des Séances de la XI^e CGPM - str. 66 - 68) vse zápi-
sano omiljeno in prečiščeno, seveda.

Pri točki 15 "Système International d'Unités" je Commission du
Système d'Unités (pod vodstvom Avstrijca Stulla-Götz-a) predložila reso-
lucijo šte. 12 o vseh enotah SI, v § 4 med vsemi izpeljanimi enotami (unités
dérivées) tudi "tesla(T)" za veličino "induction magnétique". Proti nobeni po

vrsti ne starih ne novih ni bilo ugovora, edinole pri "tesli" se je pričel generalni napad.

Sprožil ga je Danec, fizik Jensen: naj se v listi soglasno priporočenih enot črta T in pusti Wb/m^2 ! Motiv: itak gre za neko ploskovno gostoto, sploh pa je koristno omejiti uporabo specialnih imen za enoto. Že stare, dobro znane in vpeljane naj sicer ostanejo, novih pa nič več!

Sledil je zopet fizik, Monsieur de Boer, kot že rečeno, sekretar UIPPA: vpeljava specialnih imen za izvedene enote jasnosti SI le škoduje. On je proti, "teslo" brisati!.

Vstal je Italijan Perucca, že tretji fizik zapovrstjo: govoril je uglajeno, diplomatsko, a v istem negativnem smislu. Ob njem mi je, takrat še naivnežu, končno postalo jasno, v katerem grmu tiči zajec: stari, že zdavnaj razrešeni spori okrog osnovnih iznajdb polifaznih tokov s Ferrarisom in z Marconijem za radio (Marconiju so Tesli ukradene patente v ZDA naknadno razveljavili) žive še naprej, da o stari politiki obeh Rimov, laškega in vatikanskega, do nas, niti ne govorimo.

Kar zameglilo se mi je, kaj sedaj? Vsi napori Jugoslavije naj takole propadejo, kajti proti sklepom Generalne Konference ni ugovora, poti nazaj ni nobene. Od naše delegacije pa sem sam, ki lahko kaj ukrenem, pomagam. Trije iz SUMDM že zaradi uradnih jezikov ne bodo odprli ust. Dva sicer razumeta, a ozadij ne poznata. Tretji, tisti s kolodvora, pa še tega ne. Če pa se niti mi Jugoslovani ne bomo aktivno borili, če bomo obsedeli kot nemci, se tudi drugi ne bodo tolkli za nas s toliko fronto fizikov. Ne preostane drugega, kot da nastopim sam in ex tempore v francoščini in angleščini brez prevajanja pobijam njihove argumente.

In če ne uspem? Na to takrat k sreči nisem niti pomislil. Pod ostro lupo Beograda bi bil kot "vsiljenec" vsega debakla kriv zopet tisti Avčin, ki je bil enkrat "jedinici" že tako škodil, da so ob 100-letnici to komaj-komaj izgledili. Razčetrverili bi me bili...

Dva zaveznika sta se pojavila, k sreči. Prvi profesor Arutinov, direktor Vsesojuznega Inštituta Metrologiji imeni Mendeljejeva iz Leningrada. Poudaril je tendence v elektrotehniškem svetu, dati kratka lastna imena vsaki enoti. Tako predlagajo oni za veličino H (jakost magnetnega polja) "lenz"

(Lenzovo pravilo induciranja) namesto povsem nenazornega "ampere na meter (A/m). Ker je "teslo" že 1956 sprejela IEC, so to enoto v SSSR že uvedli v pouk

Drugi je bil profesor R. Vieweg, prezident Physikalisch-Technische Bundesanstalt v Braunschweigu, naslednice slovite PT - Reichsanstalt v Berlinu, prvega državnega metrološkega laboratorija na svetu sploh. Bil je sila ugleđen, res pravičen in dober prijatelj še izpred izredno uspelega opatijskega zasedanja IEC (1953). Udeležil se je bil tudi proslave 100-letnice Teslovega rojstva. Menil je, naj se poimenovanja sicer omeje, a "tesla(T)" da je že tolikanj v rabi in uporabi, da se lahko ohrani.

To mi je dalo hrbtenico: brez prevajanja sem v obeh jezikih kratko in jasno povedal historijat, naše razloge, sedanje stanje, zlasti pa, da je "tesla" sprejeta že v nekatere zakonodaje (n.pr. ČSSR). Končal sem s predlogom, naj se v primeru sprejetja zahteve prvih treh govornikov opusti tudi ime "newton(N)" za SI enoto sile, saj je N tudi izvedenka (kg m s^{-2}). Pa poj-dimo nazaj na stari "pentadyn" ($10^5 \text{ dyn} = 10^5 \text{ cm g s}^{-2}$)!

Proti je govoril še Belgijec prof. Jacob, menda prav tako fizik. Za njim se je oglasil delegat ZDA dr. Astin. Pod njegovim predsednikovanjem sem bil svoj čas v slovitem ameriškem National Bureau of Standards (Washington DC) pred leti prakticiral pol leta v magnetiki. Izzvenelo je fifty-fifty, ne krop ne voda, čeprav je bil Tesla ameriški državlján in je tamkaj do-sezal svoje fantastične uspehe.

Avstrijec Stulla-Götz je bil z nami: Avstriji tudi ne prija sprejeti prefiks "deka(da)", pa ga bodo vendarle uzakonili. Pozval je GR, naj resolu-cijo sprejme tako, kot je predložena.

Ponovno je nastopil g. de Boer, še danes ga vidim: odločno je proti "tesli" in vsem tendencam elektrotehnikov, uvajati specialna imena za enote, s katerimi da so posilili vesoljni svet. "Fiziki smo nasprotnega mnenja. Ka-dar pa so mnenja deljena, tedaj raje nič". Torej à la Louis XIV "l'état, c'est moi", zraven pa še staro rivalstvo fizikov do elektrotehnikov, ki brez njiho-vih dosežkov svojih zamisli ne morejo več oživotvoriti.

Ponovno je vstal prof. Arutinov: pobijal je Perucco glede pouka elektrofizike. Res je tudi, da za "lenz" še ni vse zrelo, za "teslo" pa je. Sam je sodeloval v CIPM, ko je vse bilo sprejeto po dobrem premisleku, soglasno.

Na to še enkrat jaz. Odgovoril sem de Boeru odločno, njegovo početje da je pravzaprav desavuiranje, težka nezaupnica strokovnjakom vsega sveta v CIPM.

Nato je sledilo kritično glasovanje okrog "tesle(T)": 11 za, 6 proti in kar 12 vzdržanih. De Boer na to: zgrešeno bi bilo sprejeti tako šibko podprt sklep!

Honti, jurist in podpredsednik Narodnega madžarskega urada za mere, Budimpešta, je ugotovil, da po statutu sicer zadostuje enostavna večina (11 : 6), vendar predlaga skupno z Arutinovim, izraziti se o celotni resoluciji števil. 12, taki kot je predložena.

Sledil je odvrčevalni maneuver v zadnjem hipu: fizik prof. Perucca (Italija) in Carreira (Portugalska) sta naskočila ime kilogram v vlogi osnovne enote, ker ima dekadičen prefiks, pa bi tako milikilogram bil gram. Še enkrat vse razmisliti, torej - odložiti za nadaljnjih šest let, seveda s "teslo" vred! Vmes bi se pa že videlo ...

Predsedniku GKMU Barillonu (predsednik Francoske akademije) je bilo natezanja dovolj, pa je kar sam predlagal ponovno glasovanje, a to pot za celo listo v resoluciji 12. Rumuna, ki ali ni razumel, ali pa je zaspal, je prof. Arutinov, sedeč pred menoj, h glasovanju spodbudil kar s pestjo v hrbet: "A čto tu, Rumun!" Rezultat je bil (str. 87) 18 za, 1 proti (de Boer), 11 vzdržanih.

Bilo je 18. oktobra 1960 ob 17.30. Veliko ime Tesla je bilo sprejeto v mednarodni sistem merskih enot "za vse čase in vse narode".

Prebudil sem se kot iz težke more. Kaj je sledilo do konca seje, nisem več slišal, kamoli razumel. Ob 19.15 smo končali. V avli pa je moje lovsko uho iz kabine telefonskega avtomata le ujelo krepke besede našega šefa na poslanstvo SFRJ: "Čvrstome stavu naše delegacije uspelo je ... "

Zavrtelo se mi je. Brž v prvi taksi pa v moj skromni hotelček! Spotoma sem kupil "une bouteille du rouge" – burgundca za to slovesno priliko! – legel v posteljo in se iz varnostnih razlogov kar v njej dodobra napil.

Potem pa vse tiho je bilo. Iz Beograda sem pozneje dobil osamljeno ustno priznanje z udarcem po rami, da sem "ipak borac". Tudi nekaj!

x x x x x

Tako smo Jugoslovani končno in dokončno prišli do imena Tesla v SI. Samotni samorastnik Tesla, veliki vizionar, pa do več kot zasluženega večnega spomenika, vsem zavistnikom, tatovom idej, konstrukcij in patentov, vsem političnim zoprnikom navkljub. Prišel je z Metrskim sistemom že v zakonodajo vseh kulturnih držav. Če fiziki ponekod še operirajo z "gaussom", potem ilegalno, znanstvenemu naraščaju pa v škodo. To počno zlasti v magnetiki, češ da je zanjo klasični CGS-sistem prikladnejši od SI. S tem pa si sami sebi dajejo testimonium paupertatis, saj povedo, da SI ne poznajo dobro. Kajti magnetika v fiziki ni nič posebnega, svojskega, podobno, kot to ni termika v mehaniki.

Monsieur de Boer je še enkrat preko IEC poskusil rešiti CGS, za fizike vsaj, in sicer s predlogom, naj za veličino električni tok njeno elektromagnetno CGS enoto gauss ($1 \text{ cm}^{-1/2} \text{ g}^{1/2} \text{ s}^{-1}$) poimenujemo z "biot", elektrostatično ($1 \text{ cm}^{-3/2} \text{ g}^{1/2}$) pa s "franklin". Zgoraj navedeni moj dokaz, da mora vsakršen merski sistem, prikladen za elektromagnetiko, biti štiridimenzionalen, če noče vsebovati absurdov kot CGS – za eno in isto veličino kar dve enoti z istimi tremi osnovnimi enotami! – je opravil tudi s tem reševalnim manevrom in extremis (v Opatiji sem to prinesel v najkrajši možni oblik). Odtlej mi g. de Boer ni več privoščil pogleda. Pogledal je vstran, še danes ga vidim! Molti nemici, molti onori!

Walther Rathenau, znani generalni direktor staroznane nemške Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG) je 1. 1912 v svojem predavanju o tedaj še živem Tesli dejal tole:

"Če bi Tesla zahteval, da se mu vrne vse tisto, kar je dal naši današnji kulturi in civilizaciji, tedaj bi se pomračila svetloba, prenehalo bi vsako delo, ki se

opravlja s prenašanjem energije iz daljine, ustavili bi se električni vlak in tramvaji, obstali bi mlini in tovarne, zavrl bi se domala ves napredek in človeštvo bi se povrnilo nazaj, v regres, v barbarstvo."

Dandanes bi morali pridejati še mnogo, mnogo več; še telekomunikacije, telekomande, telemerjenja, avtomatiko, hladno svetlobo, kaj še vse! Vse, kar se je bilo v mukah rodilo iz razuma ene same misleče samotne človeške glave, ustvarilo v edinstvenem intelektualnem delu enkratnega posameznika. Kolektivnih možganov namreč ni, v "modernem" teamskem delu ustvarja pač samo kolektiv posameznikov, ki rojevajo zamisli - ali pa tudi ne! Povečeni ne, kajti manjka jim, uklenjenim v toge okvire, prepotrebne svobode, širine, poleta, samote, zlasti samote! Skupno delo v kolektivu je lahko silno plodno, če je sodelovanje pristno v smislu tistega intelektualnega duha, kot je stoletja razsvetljeval napredek znanosti. Žal pa vodi le prečesto do nerazrešljivih spopadov med premočnimi osebnostmi. In Tesla je bil nadvse močna, samostojna in osamljena osebnost. Neodvisnost, svobodo dela je zategadelj cenil nad vse. To sledi iz besed, ki jih je Tesla 1. 1937 posvetil znanstvenikom, zapustil zlasti njihovemu naraščanju, besed, ki razkrivajo vso skrivnost njegovih spektakularnih uspehov:

"Dobro je delo sudbine, da mladič ili čovjek pronalazačkog duha nije "blagosloven" milijunom dolara. Duh je oštrij i smeliji u povučenosti, osamljenosti, koju ništa ne uzbuđuje. Originalnost cvate u osami, daleko od spoljašnjih utisaka, koji nas tuku i onesposobljavaju stvaralački duh. Biti sam, to je tajna otkrića. Biti sam, to je čas, kad se ideje radjaju. Zbog toga su mnoga zemaljska čuda našla svoju genezu u skromnim prilikama. Mlad čovek ne treba da žali što nema milijun dolara da razvije neku ideju. Razmišljanje ne stane milijun dolara, a kroz razmišljanje stvara se ideja."

Teslov spomenik sedaj stoji, največji možni in najtrajnejši: monumentum aere perennius, trajnejši od brona. Globoko sem srečen in hvaležen dobri usodi, da sem mu v večni podstavek smel vgraditi tudi svoj skromni kamen podpornik.



Julian D. Tebo, Dr. Eng., P.E.
Consulting Engineer
Verona, New Jersey, U.S.A.

NIKOLA TESLA - ELECTRICAL GENIUS, THE GREATEST FORGOTTEN ELECTRICAL ENGINEER

As a great admirer of Nikola Tesla, ever since my early "wireless" days in 1916, I consider this occasion an honor to me to be able to participate in this Yugoslav-American Commemorative Session of the Nikola Tesla Symposium. We all honor ourselves when we gather to give recognition to the man whose fundamental discoveries made possible and practical present-day electric power generation and distribution throughout the world.

Nikola Tesla was born on July 10, 1856 in the hamlet of Smiljan in the Austro-Hungarian province of Lika, now a part of Yugoslavia. His father was a Serbian Orthodox Priest; his mother, although said to be illiterate, was a cultured person, who was known to be able to recite great amounts of poetry and Biblical texts. Tesla said that he was inspired by her to invent; she devised a number of labor-saving instruments for the home, and she also took over business matters involving both the church and the household.

Tesla finished his school course at the Gospić Gymnasium in 1870 at the age of 14, with high grades. But he was in delicate health, and his father wanted him to go into the church ministry. While he was in a listless condition, he happened to read one of Mark Twain's books; this aroused his interest in life, and in later years, he credited Twain with having saved his life; they became very close friends.

At the age of 18, Tesla became very ill with malaria; then later, he contracted cholera, and for 9 months was almost a physical wreck. He used his weakness as an argument against his father to get permission to become an engineer. When he recovered, he went to the Polytechnic Institute at Graz, Austria, in 1875, where he became a top student.

In his second year, Professor Poeschl demonstrated the Gramme machine, which could function as a generator or as a motor. When Tesla objected to the sparking of the commutator, the professor assured him "it was inherent in the machine" - a statement to which Tesla objected - so strongly that Professor Poeschl deviated from his next lecture program to reply to Tesla's objections. Professor Poeschl is said to have remarked at the conclusion that "Mr. Tesla will accomplish great things, but he will certainly never do this" (succeed in eliminating the sparking).

In the fall of 1878, instead of going to the University of Prague, Tesla took a position with a technical firm at Maribor, near Graz. He earned enough there to study mathematics and advanced physics at Prague for a year. His father died following his graduation, and he obtained a position with the new telephone company in Budapest. In 1881, he was placed in charge of the central office in Budapest.

It was while walking with a friend in the city park of Budapest in 1882, that Tesla had his "revelation" of the rotating magnetic field. Soon afterward, he went to Paris to work for the Continental Edison Company; he was sent to Strasbourg to repair the lighting system, and while there, in his spare time, he built a generator and motor to prove his ideas. The administrator of the Continental Edison Company, a close personal friend of Thomas Edison, urged Tesla to go to the United States and work with Edison. The administrator, Mr. Charles Batchelor, gave Tesla a letter of introduction to Edison, which said "I know of two great men, and you are one of them; the other is this young man".

On the way to America, Tesla lost his tickets and his money - all but four cents, but managed to persuade the steamship officials that he had a reservation on the ship. When he arrived in New York, he wondered how he would be able to provide food and lodging, but as he walked past a shop where a man was struggling with an electric motor, Tesla offered to repair it, and upon his success, the man was so grateful that he gave Tesla twenty dollars.

When Edison met Tesla, he was impressed with Tesla's skill and knowledge, even though Edison was unalterably opposed to alternating current, considering it too dangerous. Edison told Tesla "there's \$ 50,000 in it if you can

improve the efficiency of my motors". Tesla spent several months in designing 24 types of Edison dynamos, eliminating the long core field magnets and substituting the more efficient short ones; he also devised some automatic controls. When Tesla asked Edison for his agreed-upon money, Edison replied "Tesla, you don't understand our American sense of humor!" Tesla immediately resigned.

Without any income, Tesla was reduced to becoming a day laborer from the spring of 1886 to the spring of 1887. During the winter of early 1887, his foreman became impressed by Tesla's story of his inventions and his great hopes for his alternating current system. Through this foreman, Tesla was introduced to a Mr. A.K. Brown of the Western Union Telegraph Company, and with the financial help of Brown and others, a laboratory known as the Tesla Electric Company was established in New York City in April, 1887. Tesla then began to produce a variety of alternating current machinery, and within a few months, he submitted his two-phase motor to Professor W.A. Anthony of Cornell for testing. Professor Anthony reported that it had an efficiency equal to that of the best direct-current motors.

As a succession of fundamental patents started to issue from the United States Patent Office, the attention of the electrical engineering profession was drawn to this practically unknown inventor. He was invited to deliver a lecture before the American Institute of Electrical Engineers on May 16, 1888, and this lecture became a classic in the electrical engineering field.

George Westinghouse learned of these new discoveries about a month after Tesla's lecture; he visited Tesla and they agreed on a one million dollar contract, with one dollar per horsepower royalty. But in 1892, when the Westinghouse Company was in financial trouble (following the formation of the General Electric Company, Westinghouse's principal competitor), Tesla tore up the royalty contract, and thus sacrificed royalties estimated at the time as worth twelve million dollars. In a statement in his speech to the American Institute of Electrical Engineers (sent to the Hotel Biltmore to be read at the dinner on May 12, 1938), Tesla said: "George Westinghouse was, in my opinion, the only man on this globe who could take my alternating current system under the circumstances then existing and win the battle against prejudice and money power. He

was a pioneer of imposing stature, one of the world's true noblemen of whom America may well be proud and to whom humanity owes an immense debt of gratitude".

The Westinghouse Company won the contract for lighting the 1893 Columbian Exposition World's Fair in Chicago, using Tesla's alternating current system. Originally, the Westinghouse Company did not bid on the lighting, but the General Electric Company put in a bid of \$ 13.98 to \$ 18.51 per lamp. Mr. Charles F. Locksteadt, President of the South Side Machine and Metal Works of Chicago, made a bid of \$ 5.49 per lamp. He then came to Westinghouse for help, and when new bids were called for, Westinghouse bid \$ 5.25 per light.

The problem, then, was how would Westinghouse be able to meet its obligation? Edison held the patent on the one-piece bulb, and obviously, would not sell lamps to Westinghouse. To get around the Edison patent, Westinghouse devised the "stopper" lamp - putting the electrodes in a glass stopper, similar to the stopper used in laboratory reagent bottles, and making the glass envelope with a ground glass opening, so that a practically air tight seal was obtained. Westinghouse also used soft-iron wire instead of platinum wire for the lead-in conductors. Several hundred thousand bulbs were used, so it can be seen that the amount of money involved was substantial. The biographer of George Westinghouse, Francis E. Leupp, states in his book (page 169) "When the World's Fair opened on the first of May, 1893, the Westinghouse lighting plant was one of the few very large installations that was complete and in place. It included 12 dynamos ten feet high and weighing about 75 tons apiece, constructed on the Tesla multiphase system".

Tesla also dramatized the phenomenon of passing very high voltages at very high frequencies through his body. He subjected himself to one million volts without harm, as an answer to Edison's claim that alternating currents were more dangerous than direct current. (Actually, no appreciable current passes through the body, but passes over the surface at very high frequencies).

For a long time, people had thought about the possible use of Niagara Falls as a power source. Tesla himself, when a young boy, saw a picture of the Falls and predicted that some day, he would harness that power for the benefit of

mankind. A number of small, water-wheel operated mills had been built near the Falls to make use of fractions of the power, but a serious project was begun in 1886, when a charter was granted to an organization called the Cataract Construction Company. All sorts of methods of getting the power, estimated at 4 to 9 million horsepower, were proposed, such as belts and pulleys, or pneumatic methods, until finally it was decided to make it a hydroelectric system. Lord Kelvin in England and Thomas Edison in America were called in as consultants; they advocated direct current, but in due time, the Westinghouse Company received the contract for three 5,000 horsepower, 2-phase Tesla alternating current generators. The General Electric Company was granted the contract for a transmission line to the city of Buffalo, 22 miles away.

Westinghouse completed the power house in 1895, and it stood ready to deliver 15,000 horsepower - the most gigantic piece of electrical engineering yet conceived or accomplished up to that time. Although experts had pronounced the AC system impossible for Niagara, these generators, several times larger than any previous such machines, were still operating more than 40 years later.

Power was delivered in August, 1895, to the first customer, the Pittsburgh Reduction Company (now the Aluminum Company of America), and on November 15, 1896, power began to flow through 22 miles of wire to Buffalo. Power was generated at 2200 volts, 2-phase, transformed to 11,000 volts, 3-phase by the genius of Professor Charles F. Scott of Yale University. Many problems faced electrical engineers in this historic event - insulation of the line, lightning protection, switching, to mention a few, but these were successfully overcome and the new system began a string of further hydroelectric developments.

But Tesla did not limit himself only to power applications of electricity. In 1889 he developed his system of electrical conversion and distribution by oscillatory discharges, and in 1891 developed the famous high-frequency "Tesla Coil". He demonstrated the principle of tuning at Columbia University that year, discovering that he was able to produce tremendous resonance effects and build up very high voltages.

After fire destroyed his New York laboratory, Tesla accepted the invitation of Leonard E. Curtis of Colorado Springs Electric Company to build an

experimental laboratory at the foot of Pike's Peak, in 1899. He set up a 100 by 100-foot laboratory with a 200-foot mast and giant oscillator, or Tesla Coil. This was a circular fence-like wall 75 feet in diameter as the primary coil, and a secondary coil 100 feet in diameter having 75 turns of wire, connected to the bottom of the 200-foot mast that had a 3-foot diameter copper ball on top. Tesla wanted to prove that the earth was an electrically-charged body, and this electricity could be disturbed so that rhythmic vibrations could produce resonant effects of tremendous magnitude. In this way, with the earth set into electrical oscillation, a source of energy would be provided at all spots of the earth, and the energy could be drawn off anywhere by using a tuning system of coils and capacitors.

Tesla's experiments produced 100,000,000 volts at 300,000 Hertz, or cycles per second, and enabled him to sit in the midst of the discharges without harm, as pictures show him quite often. His experiments also succeeded in burning out the generator at the Colorado Springs Electric Company power station! Tesla never did disclose the results of his Colorado Springs research, apparently expecting to do this when he had time - which never arrived. He had expected to live to be 140 years old, and would write his memoirs when he reached the age of 100, but he died at 87.

Tesla returned to New York in the fall of 1899, broke again, but with the continuing hope of wireless transmission of energy, and through his friend, Robert Underwood Johnson, an editor of Century Magazine, created a tremendous impression on his friends. J.P. Morgan, the famous financier, became interested in this project and provided funds for the building of the Wardenclyffe, Long Island Laboratory. But the pressure of debts and the failure of Morgan to provide more financial assistance resulted in the closing of Wardenclyffe in 1906. Frustrated and bitter at this failure, Tesla blamed the tragedy on a "doubting" world. It was at this time that Tesla "lost face" with many of his associates for his expensive and grandiose schemes. Thus, he spent the remaining years of his life mostly alone and without much money. During the last half-dozen years of his life, the Yugoslavian government paid him an honorarium of \$ 7200 per year.

But honors came to Tesla both before his death and subsequently. He refused to accept the Nobel Prize in 1912 - to share it with Thomas Edison - and

the award was given to the Swedish Scientist Gustav Dalen. After some persuasion, Tesla did accept the Edison Medal of the AIEE in 1915, but this was done very reluctantly. In 1956, the International System of Units included the "tesla" as the unit of magnetic flux density. In February, 1975, I accepted the Certificate of Induction of Tesla into the Inventors Hall of Fame at the United States Patent Office in Arlington, Virginia, as the representative of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. Tesla was one of six inventors chosen by representatives of 38 national scientific and engineering organizations throughout the United States.

One of Tesla's most loyal friends, and one of my own - the late Kenneth M. Swezey - wrote to me on November 29, 1955 in our unsuccessful efforts to get the United States Post Office to issue a commemorative stamp in honor of Tesla, saying that "Twice (once under the royal government and later under Tito's) Yugoslavia has put Tesla's picture on its own stamps. In 1933, two years after it had been my privilege to help arrange a world-wide celebration among engineers and scientists for Tesla's seventy-fifth birthday - a movement was begun in Yugoslavia to found a Nikola Tesla Institute, planned to honor Tesla and to carry on scientific research. Learning that Tesla was not well and was living on charity, Yugoslavs arranged to send Tesla a small honorary pension for the rest of his life. Young King Peter, I was told, wept when he met Tesla for the first time in his room at the Hotel New Yorker. When Tesla died here in 1943, unhonored and penniless, it was again the royal Yugoslav government who paid for a state funeral".

And so, once again we are honoring Tesla, with an IEEE award presented to Leon T. Rosenberg of the Allis-Chalmers Corporation "for his half-century of development and design of large turbine-driven generators and his important contributions to literature". This award, along with the Yugoslav Nikola Tesla Medal, were presented to Mr. Rosenberg at the Tesla Symposium Luncheon in New York City, January 30, 1976. It is unfortunate that all these awards and honors have to be presented post-humously!



III. Poglavlje

ELEKTRIČNI STROJEVI



D. Ban
Elektrotehnički fakultet, Zagreb

A. Reicher
"Rade Končar" - Tvornica gene-
ratora, Zagreb

DOSTIGNUĆA I PERSPEKTIVE RAZVOJA ASINHRONIH MOTORA VISOKOG NAPONA

U referatu su ukratko prikazana neka osnovna pitanja i problemi povezani s projektom, konstrukcijom i tehnologijom izrade asinhronih motora visokog napona. Ukratko su iznesena neka dostignuća na tom području, ostvarena u poduzeću "R. Končar" u proteklih dvadesetak godina. Napredak u projektiranju i konstrukciji povezuje se i s upotrebom digitalnih elektroničkih računala, a napredak u kvaliteti izrade i pouzdanosti u pogonu povezuje se s razvojem vlastitog sistema izolacije. Pomoću nekoliko skica motora iz tekuće proizvodnje prikazani su različiti sistemi mehaničke zaštite povezani sa sistemom ventilacije.

ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS IN THE DEVELOPMENT OF HIGH VOLTAGE INDUCTION MOTORS

A brief outline is provided of some basic questions and problems related to electrical and mechanical design, and methods applied in the manufacture of high voltage induction motors. Some of the achievements of the "Rade Končar" Company in this field over the past twenty years are presented. Advances in electrical and mechanical design are due partly to the application of digital computers, while improvements in production quality and operating reliability are to be attributed to the development of the Company's own insulation system. Through several illustrations of motors from current production a review is given of different mechanical enclosures coupled with ventilation systems.

1. UVOD

Elektromotorni pogoni u termoelektrani, cementari, naftnoj industriji, naftovodu, pumpnoj stanici, brodu, luci i sl. teško su zamislivi bez trofaznih asinhronih motora. Funkcioniranje tih motora vezano je za genijalno otkriće okretnog magnetskog polja i polifaznog sustava struja našeg zemljaka nenadmašivog Nikole

Asinhroni motor neprestano se razvija i doživljava svoj konstantni napredak zahvaljujući mnogim faktorima. Prvenstveno su pitanja usavršavanja naših teoretskih znanja o vrlo zamršenim odnosima u elektromagnetskoj konfiguraciji asinhronog stroja, napretka u razvoju aktivnih materijala za gradnju strojeva, te razvoja tehnoloških postupaka koji se mogu primijeniti.

U razmatranju postignutih rezultata i daljnjih perspektiva ima smisla odvojeno razmatrati "male" i "velike" asinhronne strojeve. S povišenjem dimenzija odnosno momenata i snaga prirodno se pojavljuju dodatni problemi koji traže posebna rješenja. Stečena znanja na malim asinhronim strojevima ne mogu se jednostavno preslikati na 100, 1000 ili čak 10000 puta veći motor. poteškoće su tim veće kod velikog asinhronog motora jer je model ili prototip vrlo skup i jer treba specijalna i skupa oprema i ispitne stanice gdje bi se mogla izvršiti ispitivanja i provjera računskih podataka.

U referatu će se sasvim ukratko ukazati na neke od posebnih projektno konstruktivnih osobitosti ^{kao} i na postignute rezultate u proizvodnji i razvoju visokonaponskih asinhronih motora u proteklih dvadesetak godina u poduzeću "R.Končar".

1.1. Pravci razvoja asinhronih motora

Asinhroni strojevi, pretežno motori, razvijaju se po svojim konstruktivnim rješenjima u smjeru postizanja sve većih i većih momenata odnosno snaga po jedinici vrtnje za napone koji u sadašnjoj fazi iznose najčešće 3, 6 i 10 kV. To su trofazni motori s namotanim rotorom (kolutima i četkicama) i kavezni motori. Kaveznom asinhronom motoru pridaje se u razvoju daleko više značaja jer se teži da se njime na što je moguće više mjesta zamijene skuplji i za održavanje kompliciraniji kolutni motori. Kolutni

motori nemaju posebnog ograničenja kada su u pitanju teški zaleti ili neka druga moguća teška pogonska stanja. Energija gubitaka (klizanja) troši se u rotorskim upuštačima različitih izvedbi. Interesantno je spomenuti posebne moderne regulacije brzine vrtnje asinhronog kolutnog motora pomoću statičkih frekventnih pretvarača u rotorskom krugu tzv. podsinhrona kaskada. Radi se o regulaciji brzine vrtnje pomoću nešto kompliciranijih sklopova industrijske elektronike s vraćanjem energije klizanja u mrežu. Ovo je energetske vrlo interesantno jer se sve skuplja energija ne troši u otpornicima, ali zbog sadašnjih cijena tiristora, dioda i druge nužne opreme te kompliciranosti izvedbe rijetko se primjenjuje. Kolutni motor namijenjen za pogon s regulacijom u rotoru podsinhronom kaskadom razlikuje se u dimenzijama i cijeni u odnosu na motor opće namjene. Premda je to pitanje ovisno o mnogo parametara, naročito o području regulacije brzine i karakteru opterećenja, jedna sasvim približna razlika u cijeni iznosi 10-15% više za regulirani motor.

Kavezni se motor nastoji različitim konstruktivnim i tehnološkim zahvatima prilagoditi sve težim uvjetima pogona: pokretanju velikih zamašnih masa, veliki broj pokretanja u toku životne dobi, te sposobnosti rada i samozaleta kod velikih promjena napona u mreži. Premda se za sada "veliki" kavezni motor sasvim rijetko regulira konvertorima frekvencije napojnog napona ili struje statora treba očekivati da će brzim razvojem elemenata industrijske elektronike njihova cijena brzo padati a pouzdanost rasti, pa će biti potrebno takav motor projektirati i konstruirati tako da se bez poteškoća može napajati s valovitim strujama.

1.2. "Veliki" motori

Dva su važna parametra za definiciju "veliki" i "mali" motor; snaga i fizičke dimenzije.

Mali motor može postati veliki u nekom izoliranom energetskom sistemu (brod, odvojena mreža, pumpna stanica s vlastitim agregatima itd.).

Veliki asinhroni motor nema smisla uspoređivati s velikim sinhronim generatorom. Gotovo se može reći da je najveći do sada upotrebljeni asinhroni motor barem 30 puta manji po snazi za istu brzinu vrtnje od sinhronog generatora. Poznato je naime da danas nije rijetkost 1200 MW sinhroni generator ni 40 MW asinhroni motor oba u 4-polnoj izvedbi. Pitanje granične snage asinhronog motora, koliko nam je poznato, nije posebno do sada nikada razmatrano jer nije bilo takove potrebe. Teoretski gledano nema zapreka da se napravi 100 MW asinhroni motor u 4-polnoj izvedbi s primjenom načina konstrukcije turbogeneratora; tj. hladjenje namota tekućinom i izvedbom masivnog rotora. Ako u navedenom periodu bude takovih zahtjeva odnosno ako za takove zahtjeve ne budu postavljena pitanja vezana na stabilnost sistema, jalovu energiju ili neko drugo slično pitanje ekonomičnosti, proizvođači će to moći i znati proizvesti.

Specifičnu snagu je općenito teško definirati. O njoj se može govoriti za konkretni napon, brzinu vrtnje, zaštitu i namjenu.

Ima manje ili više kontradiktornosti u značenju termina "konstanta iskorištenja". Teoretsku snagu motora može se s dimenzijama povezati poznatim izrazom

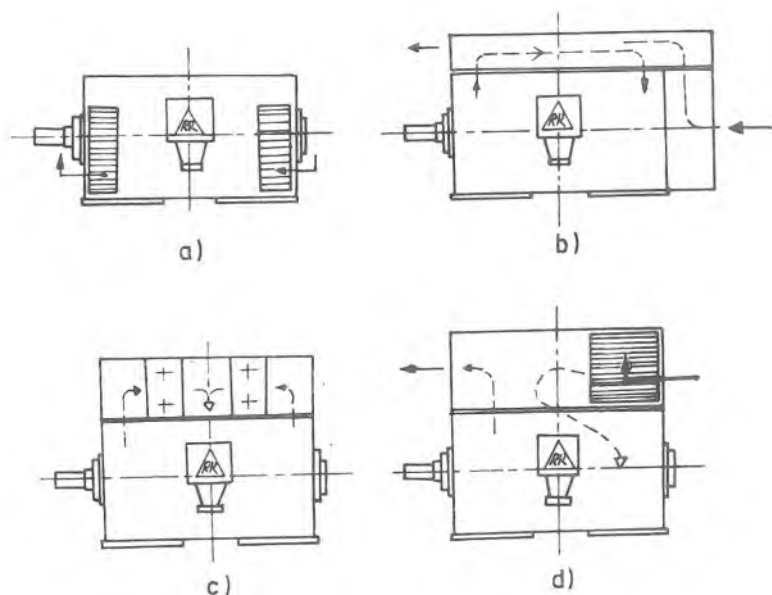
$$P :: D^3 \ell$$

(D dijametar jezgre, ℓ duljina paketa)

koji slijedi iz ekvivalentnog produkta strujnog obloga i magnetske indukcije u zračnom rasporu, ne obazirući se na mehaničke, ventilacione i termičke probleme. Mehanički, ventilacioni i termički problemi postavljaju ograničenja na primjenu izraza $D^3 \ell$ i time na područje primjenjivosti teorije zakona sličnosti.

1.3. Neka pitanja zaštite i hlađenja

S porastom snage motora smanjuje se, prema poznatim zakonima sličnosti, odnos površina prema volumenu a time odnos rashladne površine za odvod energije gubitaka iz aktivnih dijelova stroja. Kod strojeva manjih snaga odvođe se gubici konvekcijom preko glatkog ili rebrastog kućišta ili preko različitih izvedbi izmjenjivača topline. Kako o načinu hlađenja ovisi direktno snaga, cijena i težina motora to je tokom godina u "R.Končaru" razvijeno nekoliko različitih izvedbi izmjenjivača topline. Skicom na sl. 1



Sl. 1. Osnovni oblici izvedbi motora 5-te serije s obzirom na zaštitu i hlađenje

su prikazani osnovni načini hlađenja i mehaničke zaštite većih i velikih asinhronih motora visokog napona. Sl. 1.a) ilustrira zaštitu IP23, s dovodom i odvodom zraka iz ambijenta, a što predstavlja najčešću izvedbu. Na isti osnovni element kao kod sl. 1.a) nadograđuju se različite izvedbe dodatnih elemenata, koji omogućuju ostvarenje određene mehaničke zaštite i hlađenja. Tako, na sl. 1.b) prikazana je dogradnja izmjenjivača zrak-zrak (koncentri-

rani hladnjak), čime se motor odvaja od ambijenta i ostvaruje zaštitu IP44 prema IEC 34-5. Na sličan način se prema sl. 1.c) ostvaruje ista zaštita, ali primjenom izmjenjivača zrak-voda. Za ugradnju na otvorenom prostoru moguća je primjena izvedbe prema sl. 1.d), gdje se s prigradjenim filterima za ulazni zrak ostvaruje zaštita IPW 24.

Površinski hladjeni motori ili motori hladjeni izmjenjivačem zrak-zrak najčešće su namijenjeni za rad na otvorenom prostoru praktički bez ograničenja na klimatske uvjete (pogon ventilatora svježeg zraka, pogon mlinova za ugljen, pogon recirkulacionih pumpi u termoelektrani, pogoni naftovoda, pogoni u rafinerijama nafte itd.). Za snage veće od 2 MW u 4-polnoj i 2-polnoj izvedbi upotrebljavaju se za pomoćne pogone u termoelektrani i motori hladjeni izmjenjivačem voda-zrak. Granicu prelaska na izmjenjivač voda-zrak određuju ekonomski uvjeti (cijena rashladne vode i njezine instalacije, cijena i održavanje hladnjaka, cijena motora itd.). Kako izmjenjivač voda-zrak nije moguće, zbog smrzavanja, upotrijebiti i na otvorenom prostoru, to su za takve slučajeve razvijene posebne konstrukcije u zaštiti IPW24 s filterima preko kojih se rashladni zrak nečiste okoline pročišćava prije direktnog oplakivanja površina namota i paketa motora.

Jedna sasvim približna računaska usporedba električnih parametara težine i cijene za 3 različite izvedbe hladjenja motora snage 3 MW u 4-polnoj izvedbi je slijedeća:

Zaštita	IP44	IPW24	IP44
hladjenje	indirektno izmjen.zrak-zrak	direktno filteri	indirektno izmjen.voda-zrak
Snaga kW	3000	3000	3000
Brzina vrtnje	1490	1490	1490
Gubici kW	110	90	90
$\cos \varphi$	0,87	0,87	0,87
korisnost (η) %	96,5	97	97
Težina (ukup) Mp	13,7	11	11,7
Cijena motora prema IPW24	120	100	107

Iskustveni rezultati daju podatke prema kojima se iz jednakog aktivnog materijala dobije do 25% veća snaga ako se za hladjenje motora primijeni izmjenjivač zrak-voda umjesto zrak-zrak. Razlika potječe od većeg koeficijenta prelaza topline na izmjenjivaču voda-zrak. Između različitih stupnjeva razvijene zaštite nije jednostavno pitanje pravih usporedbi. Kod motora hladjenog izmjenjivačem zrak-zrak moraju se smanjiti specifična opterećenja kako bi se smanjili ukupni gubici u aktivnom dijelu pa je faktor iskorištenja odgovarajuće manji. S druge strane ima motor za svaki rashladni krug po jedan ventilator pa to povećava gubitke ventilacije u odnosu na direktno hladjeni stroj, odnosno smanjuje stupanj iskorištenja motora.

Sa stanovišta buke najpovoljnije je rješenje hladjenja izmjenjivačem voda-zrak, a takovo konstruktivno rješenje kao varijanta je prihvatljivo i u slučajevima kada motor treba raditi u zatvorenoj prostoriji a njegovi gubici bi nedozvoljeno povisili temperaturu.

Proizvodjač motora mora u svakom slučaju moći izvesti sve moguće konstrukcije da bi udovoljio zahtjevu projektanta postrojenja, koji na osnovu opširnih analiza vrši izbor vrste hladjenja i zaštite motora.

Stalni pritisak kupaca motora za što manjom cijenom i nastojanje proizvodjača da zbog troškova vlastite proizvodnje "izvuče" iz upotrebljenih materijala i količine utrošenog rada sve više, doveo je i do problema koji su se ranije smatrali manje važnim ili se nisu zamjećivali. Radi se o pitanjima buke i vibracija. Povećanjem specifičnih opterećenja materijala upotrebljenih za aktivne i za konstruktivne dijelove strojeva postaju buka i vibracija kritičnim pitanjima. Ublažavanje spomenutih problema moguće je uz dodatne posebne studije problema, izvođenjem

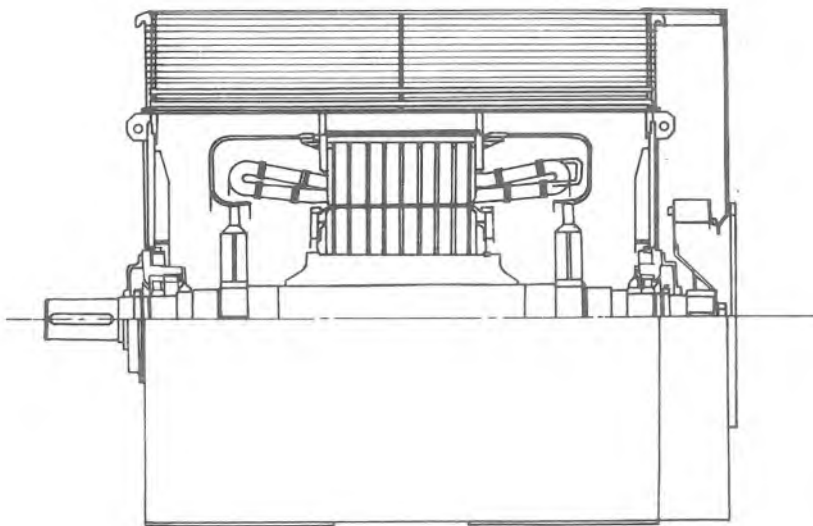
specijalnih konstrukcija kućišta i optimiranjem ventilatora na što manju aerodinamičku buku kod 2-polnih i 4-polnih strojeva. Izradom posebnih pokrova za čitavi motor može se postići smanjenje buke kod brzohodnih i sporohodnih strojeva. Kod sporohodnih strojeva naročito se pazi na dimenzioniranje magnetskog kruga (jarma statora) i na izbor broja utora rotora i statora. Potreba za gradnjom sve većih motora i često njihovom montažom na otvorenom prostoru, te s druge strane sve veće potrebe da se zaštiti čovjek od opasnosti buke dovode do ozbiljnih dilema proizvođača motora. Na pojedinim mjestima mogu zahtjevi biti tako strogi da dovedu u pitanje primjenu asinhronog motora, ili da ga se izvede s teško prihvatljivim ekonomskim pokazateljima.

U tvornici generatora i Elektrotehničkom institutu poduzeća "R.Končar" uložena su i stalno se ulažu nova sredstva za istraživanje magnetske buke i vibracija asinhronih motora. Gluha komora u Zavodu za rotacione strojeve Elektrotehničkog instituta izvedena vrlo suvremeno i namjenski omogućava precizna ispitivanja i mnoga laboratorijska istraživanja vezana za buku rotacionih strojeva. Nezamislivo je raditi na razvoju bez takvog laboratorija i potrebne opreme.

1.4. Oblici izvedbe

Veći strojevi pretežno se izvode u obliku B3 s kliznim ili kotrljajućim ležajevima smještenim na štitu motora. Ovakvom konstruktivnom izvedbom postiže se kompaktnost konstrukcije, visoka stabilnost i čvrstoća, mogućnost transporta u 1 komadu. Razvijene su i konstrukcije vertikalnih motora s nosećim ležajevima za dodatne aksijalne sile od nekoliko desetina Mp.

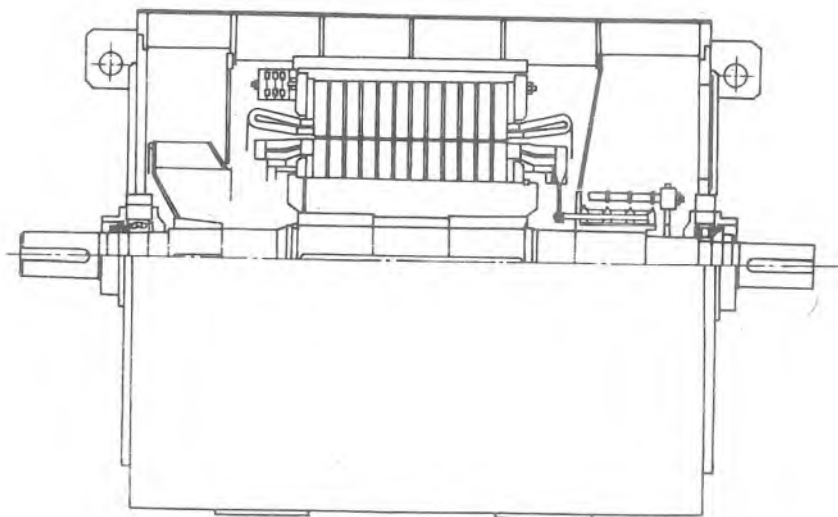
Na sl.2 prikazan je u presjeku trofazni kavezni asinhroni motor 1500 kW, 10000 V, 50 Hz, 4-polni namijenjen za pogon mlinova ugljena u termoelektrani 2x350 MW, izradjen u Tvornici generatora



Sl. 2 Visokonaponski asinhroni motor 1500 kW, 10 kV, 4-polni za termoelektranu

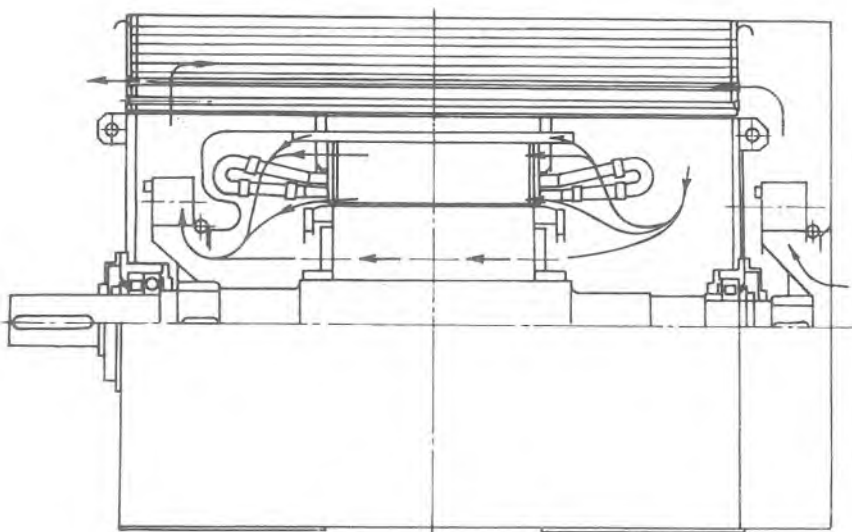
poduzeća "Rade Končar". Motor je izveden tako da zadovolji vrlo stroge zahtjeve pogona: automatsko ponovno ukapčanje i prekapčanje bez ograničenja, zagon relativno velikih zamašnih masa, visoka korisnost i nivo buke reda 85 dB.

Na sl.3. ilustrirana je izvedba velikog kolutnog asinhronog



Sl.3 Trofazni kolutni motor 2800 kW, 6 kV, 6-polni za cementaru

motora pogon mlinova u cementari Beočin, 2800 kW, 6 kV, 50 Hz, 6-polni. Na sl. 4. prikazan je osnovni princip ventilacije kaveznih



Sl. 4 Princip ventilacije motora 5-te serije "RK"

asinhronih motora iz 5-te serije "R.Končar" koja je u fazi razrade, ali i prvih isporuka.

2. ZAHTJEVI NA VISOKONAPONSKI MOTOR

2.1. Zahtjevi pogona na visokonaponske kavezne motore

Veliki i najveći asinhroni motori su pretežno namijenjeni za pomoćne pogone u termoelektranama. Zahtjevi su rigorozni na svim pogonskim mjestima gdje se radi o proizvodnji električne energije i obavezi elektroprivrednih poduzeća da održavaju sistem stabilnim. Iako se zahtjevi pojedinih elektroenergetskih proizvođača ponešto razlikuju može ih se zajednički grupirati kako slijedi:

- Sigurno pokretanje kod pada napona na iznos 80% nominalnog
- Dva uzastopna zaleta iz "toplog stanja"
- Struja pokretanja ne veća od 5,5 puta nominalna

- Automatsko ponovno uklapanje odn. preklapanje na drugu mrežu bez ikakvog vremenskog zatezanja ili ograničenja
- Pet minutni pogon sa 70% nominalnog napona do 3 puta godišnje
- Mogućnost trajnog rada sa +10 i -5% nominalnog napona
- Trogodišnji siguran pogon između dva generalna remonta uz 25000 radnih sati i 1000 pokretanja
- Kod potpunog nestanka napona u vremenu od 2-3 sekunde motor se mora pokrenuti s postojećim teretom na osovini i kod pada napona na iznos 65% nominalnog
- Buka ne smije preći nivo od 85 dB.

Uz ove teške zahtjeve na motore u klasičnim termoelektranama treba još nadodati i posebne zahtjeve na motore pomoćnih pogona u nuklearnim elektranama. Nuklearna elektrana treba motore za pomoćne pogone u tzv. primarnom krugu (nuklearni dio) i u sekundarnom krugu koji se praktički ne razlikuje od klasične termoelektrane. Motori za sekundarni dio (rashladne pumpe i sl.) neće se razlikovati od ovih za klasične termoelektrane. Zahtjevi na motore za primarni (nuklearni dio) su jako pooštreni.

Takvi motori rade relativno dugo vremena u uvjetima povišene temperature okoline, povišene relativne vlažnosti, povećanih pritisaka, radijacija koje mogu imati utjecaj na izolaciju, konstruktivne materijale te sredstva za podmazivanje ležaja. Pooštreni su zahtjevi i na mogućnosti motora za pokretanje i rad s većim naponskim i frekvencijskim promjenama.

2.2. Zahtjevi ekonomike pogona

Krizna energetska situacija koja je izazvala neočekivano poskupljenje energije dovela je u prvi plan pitanje stupnja iskoristenja motora (η). Kontradiktorno je pitanje ekonomičnosti u pogonu i ekonomičnosti u izradi motora. To je natjeralo proizvođače

da mijenjaju pojedine stavove iz projekta i konstrukcije i da se prilagode zahtjevu potrošača. Tako npr. viša klasa izolacije odn. veće moguće dozvoljeno zagrijavanje motora vodi smanjenju korisnosti. Koliko je pak opravdano da kupac traži motor s najboljim nako je dokazati. Svaki kW gubitaka kod motora koji radi (7000 do 8000) sati godišnje košta kupca barem 6000 Din. Bez obzira kako se računa uvijek ispada da se isplati investirati u skuplji motor (motor veće korisnosti).

2.3. Mogućnosti ispunjavanja zahtjeva na suvremeno izvedeni asinhroni motor

a) Upotreba kompjutera u elektromagnetskom projektu

Primjenom digitalnih kompjutera (IBM 1130 IBM 360 te UNIVAC) kao pomagala napravljen je veliki napredak^u projektiranju kako u pogledu izbora optimalnog rješenja tako i u mogućnostima da se nužni a zamršeni i mukotrpni ručni proračuni provedu elegantno i brzo s po volji odabranim brojem varijanti.

U toku izrade, testiranja i dotjerivanja nalazi se veliki broj programa za računala tipa IBM i UNIVAC. Praktički se već 10 godina vrlo uspješno koriste programi za proračun parametara magnetskog kruga, proračun parametara motora, proračun zagrijavanja, buke itd.

b) Upotreba kvalitetnijih materijala

Za smanjenje gubitaka - povećanje korisnosti - poduzimaju se slijedeći koraci:

Upotrebom visokokvalitetnog hladno valjanog dinamo lima specifičnih gubitaka

$$p = (1,35 - 1,8) \text{ W/kg kod } 1 \text{ T i } 50 \text{ Hz}$$

c) Konstruktivnim zahvatima

Smanjenjem mehaničkih gubitaka (ventilacioni + trenje) na minimum, što se postiže korektnim dimenzioniranjem ventilacionog

kruga i ventilatora. Doprinos smanjenju ovih gubitaka postiže se i optimiranjem promjera rotora (provrti statora) te unutrašnjeg provrta rotora. Izborom sistema ventilacije (čisto aksijalna, aksijalno-radijalna) može se postići značajne uštede u gubicima energije odn. može se povećati η motora.

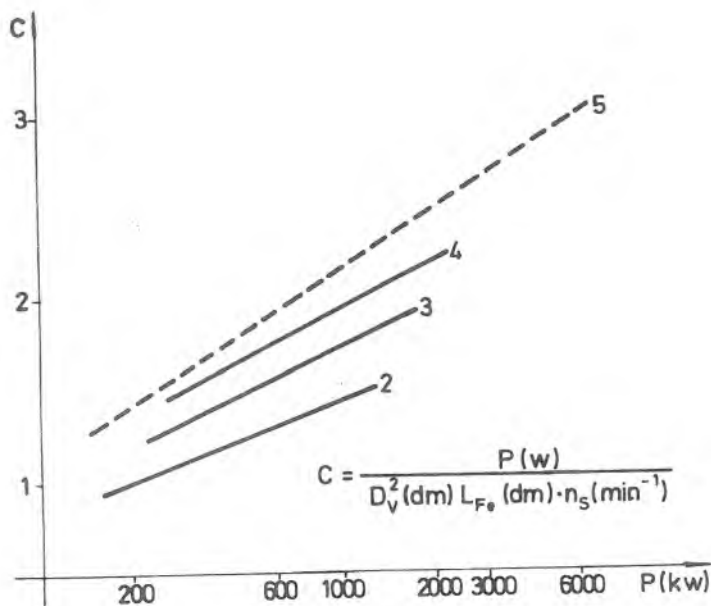
d) Teoretskim istraživanjima

Poboljšanim elektromagnetskim projektom tj. poznavanjem uzroka dodatnih gubitaka mogu se takvi gubici smanjiti na minimalnu vrijednost. Tako se npr. pravilnim izborom odnosa broja utora statora i rotora, korektnim izborom koraka namota, te izvjesnim zahvatima na kavezu rotora mogu dodatni gubici svesti na minimalnu vrijednost. Obuhvaćanje u račun visokofrekventnih gubitaka i istraživanje njihovog porijekla uvelike je olakšano uz pomoć elektroničkog računala.

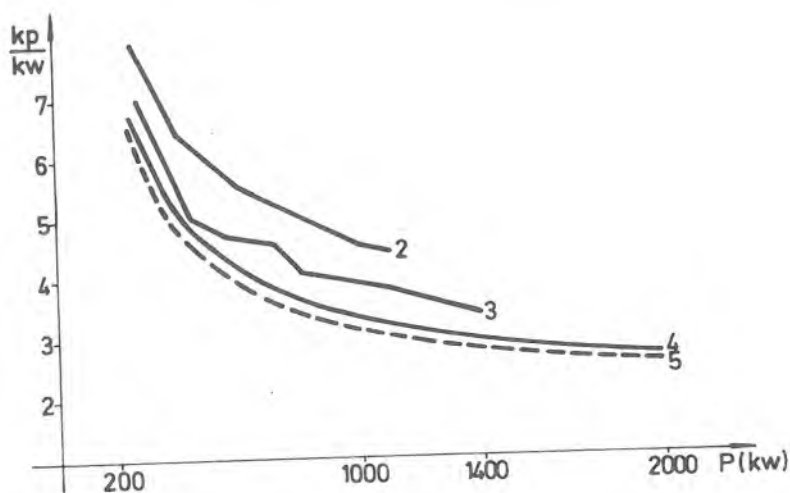
2.4. Napredak u iskorištenju aktivnog materijala

Povećanje snage na dvostruko (iz istog volumena aktivnog materijala utrošenog za izradu motora) svakih 15 godina, postizavano je do sada (dalje to vjerojatno ne može tako napredovati) zahvaljujući velikom poboljšanju kvalitete izol cijevi, te savladavanju ventilacionih i toplinskih problema. Veliki doprinos tom napretku pridonijelo je i bolje poznavanje elektromagnetskih pojava u asinhronom motoru. Poznavanje sekundarnih fenomena u motoru kao što su dodatni gubici, računanje utjecaja zasićenja, kombinacije broja utora rotora i statora povezane sa problemom dodatnih gubitaka, buke i karakteristike momenta čine u današnjim uvjetima jedno od osnovnih pitanja napretka. Ta ista pitanja još su pred dvadesetak godina bila pretežno perifernog karaktera.

Za ilustraciju napretka u proizvodnji motora visokog napona u poduzeću "R.Končar" prikazana je na sl.5. konstanta iskorište-



Sl.5. Porast konstante iskorištenja za motore 3,4 i 5.serijske nje C za odgovarajuće usporedive motore iz serije 2,3,4. i 5-te koja je u fazi projektno-konstruktivne razrade. Dvadeset godišnji period rada donio je relativno veliki napredak. Dvostrukost snage iz istog volumena aktivnog materijala praktički je postignuta. Na sl.6. ilustrirano je smanjenje utrošenog materijala za 1 kW snage, preko razvoja od 2 do 5 serije.



Sl.6. Odnosi kp/kw za motore "R.Končar"

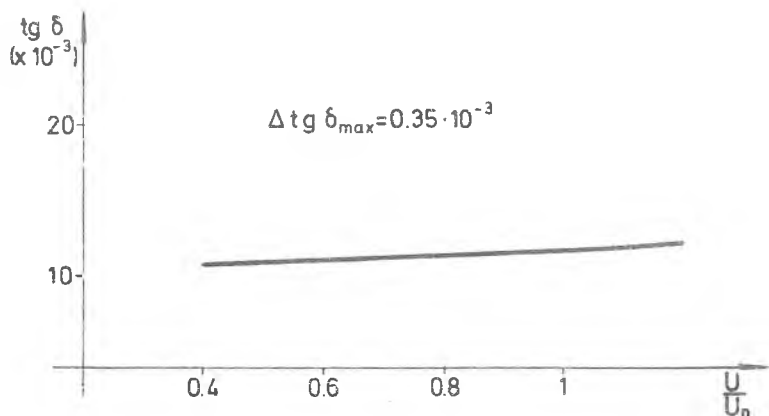
2.5. Izolacija i izoliranje

Ogromni napredak kemijske industrije u stvaranju novih materijala prilagodjenih specifičnim potrebama odrazio se u znatnoj mjeri i u pronalaženju sve boljih izolacionih materijala za potrebe visokonaponskih namota elektromotora. Zahvaljujući takovoj mogućnosti, te ulaganjem relativno mnogo rada i sredstava stvoreni su u "R.Končaru" i novi sistemi izoliranja namota motora i generatora.

Osnovna koncepcija tehnologije novog sistema izoliranja sastoji se u kontinuiranom namatanju svitka po čitavoj dužini poroznom vrpcom na bazi stakla i tinjčeva papira te vakuum-tlačnoj impregnaciji s odabranim epoksidnim smolama. Ne ulazeći u detalje opisa postupka i svojstava upotrebljenih materijala navest ćemo neka bitnija svojstva gotovog izoliranog namota.

Dielektrična, termomehanička i toplinska svojstva su vrlo dobra. Izolacija je otporna na vlagu pa su grijači suvišni, praktički nema ograničenja na klimu, slanu atmosferu, kiseline, lužine. Iako nije ispitano u stvarnom pogonu pouzdano se tvrdi da je takova izolacija otporna na radijacije odn. da je upotrebljiva i za rad u primarnom krugu nuklearne elektrane.

Za ilustraciju je na sl. 7. dan prikaz ovisnosti kuta gubi-



Sl.7. Ovisnost kuta gubitaka $\text{tg } \delta$ o naponu kod a.motora 6 kV

taka tgđ o naponu za jedan 6 kV motor proizveden u svibnju 1976. Za dielektrična svojstva sadašnjeg tzv. kompaktnog sistema izolacije preko navedenog tipičnog primjera može se reći da su odlična.

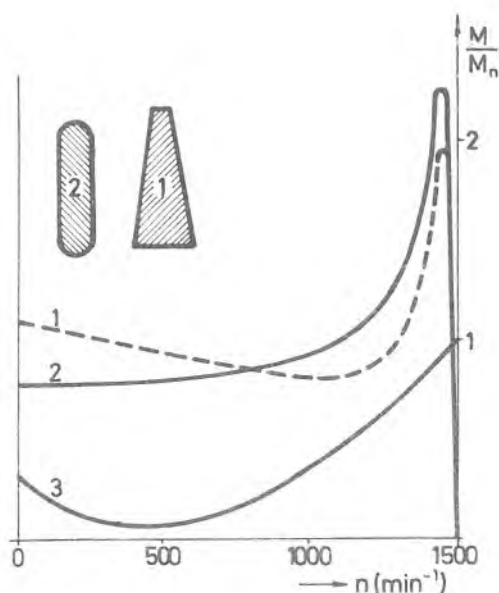
Event. usporedba dobivenih rezultata s važećim propisima pokazala bi da su ti rezultati barem 10 puta bolji od dozvoljenih.

Mehanička svojstva spomenutog sistema izolacije su sasvim prihvatljiva i zahvaljujući njima "R. Končar" proizvodi motore koji praktički nemaju ograničenja po pitanjima posljedica izazvanih direktnim priključkom motora na mrežu, automatskim ponovnim ukla-panjem ili prekapčanjem na rezervne sabirnice itd. Konstrukcija sistema za učvršćivanje glava namota je vrlo pojednostavljena, a značajna je i ušteda u radnom vremenu.

Ako bi se trebalo navesti izvjesni nedostatak navedenog sistema izoliranja onda je to poteškoća kod event. popravka odn. izmjene jednog dijela statorskog namota. U daljnjem razvoju sistema radi se na pronalaženju mogućnosti da se iz impregniranog statora ipak može izvaditi pojedinačni svitak i po potrebi zamijeniti. Zbog ovog se razloga u toku izrade vrši stroga kontrola postupka i materijala a ispitivanje se vrši i sa trostrukim nominalnim naponom.

2.6. Primjer projekta prema vrsti opterećenja

S porastom snage, a što u određenim područjima prati i prelaz na više standardne napone (3,6,10) kV, kavezni motora, raste značaj pitanja njihovog upuštanja i sposobnosti pogona tokom havarijskih stanja u mreži energetskeg sistema. Pogoni od naročito-
tog značaja ne smiju se zaustaviti, pa se kod nestanka napona s jednih sabirnica prelazi na rezervno napajanje. Istovremeno nastaje samonapuštanje svih ostalih motora pa dolazi do dubokog pada napona (dopušta se i do 65% U_n). Naročite poteškoće mogu nastupiti kod zaleta brzohodnih motora ili u pogonu s većim padovima



Sl.8. Ovisnost vanjske karakteristike o obliku štapa rotora

napona u slučaju da gonjeni stroj ima centrifugalnu karakteristiku momenta. U području od (70-90)% nominalne brzine vrtnje, veći brzohodni motori imaju nepovoljan tok momentne karakteristike pa u slučaju nedovoljno prostudiranog projekta motora može doći do nepremostivih poteškoća. Problem je ilustriran skicom na sl.8, na kojoj su prikazane karakteristike momenta 4-polnog motora za 50 Hz, projektiranog jedanput

s tzv. trapeznim štapom u rotoru, karakteristika 1, a drugi put s pravokutnim na krajevima zaobljenim štapom, karakteristika 2 na slici. Karakteristika 3 predstavlja tok momenta opterećenja pumpe. Kod pada napona će biti mnogo kritičnije područje brzine vrtnje oko 80% nominalne za motor s trapeznim nego za onaj s pravokutnim profilom štapa rotora.

3. ZAKLJUČAK

Moderna industrijska i druga postrojenja zahtijevat će izdana u dan sve veće, pouzdanije i jeftinije asinhronne motore. Udoboljenje zahtjeva bit će moguće prilagođavanjem oblika i zaštita, uvjetima pogona, unapredjenjem metoda projektiranja, konstruiranja i proizvodnje. Daljnjim usavršavanjem teoretskih i tehnoloških znanja, te nadom da će se još barem nešto poboljšati izolacioni i magnetski materijali može se korisnost motora povećati. Nije isključeno da će i pitanje graničnih snaga biti ozbiljno postavljeno u skoroj budućnosti, a time i čitav spektar drugih problema.



Mr Blago Brkić, dipl.inž.
Ivo Kurtović, dipl.inž.
Stjepan Šaban, dipl.inž.
Elektrotehnički institut
"Rade Končar" Zagreb

PRILIKE HLADJENJA, NERAZDVOJNI DIO ISTRAŽIVANJA ELEKTRIČNIH STROJEVA

U referatu su navedeni ekonomsko-tehnički aspekti potrebe za istraživanjem hlađenja električnih strojeva pri današnjim uvjetima njihove gradnje.

Opisano je nekoliko primjera aerodinamičkog i toplinskog modeliranja, izvršenih u fazi razvoja novih strojeva, koja su omogućila postavljanje ventilacionog i toplinskog proračuna.

COOLING CONDITIONS - AN INTEGRAL PART OF ELECTRICAL MACHINE RESEARCH

Research into electrical machine cooling under present-day manufacturing conditions involves both economic and engineering aspects.

Several aerodynamic and thermal models have been worked out in the stage of new machine development, which made ventilation and heat calculations possible.

1. Uvod

Pri razvoju i projektiranju električnih strojeva postavlja-ju se tehnički i ekonomski ciljevi, do kojih se može doći na različite načine. Kad se radi o pojedinačnim ili malobrojnim strojevima posebne namjene, već se ugovorom dogovaraju najvaž-niji zahtjevi hlađenja: klasa izolacije, temperatura okoline, otvori za ulaz i izlaz zraka, vrsta ventilatora, nivo ventila-cione buke, vrsta mehaničke zaštite i sl. Kad se postavlja no-

vi proizvod, najbolji je način da se izradi predstudija s valoriziranjem svih varijanti hlađenja, a kao mjerilo vrijednosti uzme cijena koštanja stroja i kvaliteta tehničkih karakteristika prema stanju na tržištu. Da bi predstudija uvjerljivo ukazivala na valorizaciju pojedinih varijanti, mora se bazirati na dovoljno velikom iskustvu i dobrim metodama proračuna. Posjedovanje proračuna, pogotovo sintetiziranih, iziskuje dugotrajan istraživački rad, teoretski, eksperimentalni i statistički.

2. Najvažniji ekonomsko-tehnički aspekti istraživanja hlađenja

Obzirom da se zagrijavanje stroja limitira zbog životne dobi izolacionih materijala, odluka koja najviše utječe na daljnju analizu hlađenja stroja je izbor klase izolacije. Prekoračenje radne temperature izolacije naglo još opada životna dob, s konačnom posljedicom kratkog spoja među zavojima. Većina današnjih strojeva gradi se u B, F i E klasi izolacije.

Kod elektromotora značajno usmjerenje istraživanja daje protuteret, odnosno vrsta pogona. Dosada se većina strojeva gradila za B-l pogon, pogon s konstantnim protuteretom uz trajni rad. Sve ostale vrste pogona su se proračunavale raznim metodama pomoću ekvivalentnog B-l pogona.

Mogućnosti tehnologije, pogotovo za impregnaciju i izradu namota, su slijedeći važan faktor, koji nameće potrebu za istraživanjem hlađenja stroja upravo u onim uvjetima koje zahtijeva tehnologija.¹³ Toplinskog gledišta, radi se o zagrijanju namota zbog velikog otpora provodjenja topline i zbog smanjenja rashladne površine na glavama namota.

Standardizacija priključnih mjera prema IEC-propisima, a pogotovo težnja za povezivanjem reda snage stroja i visine osovine, zahtijeva da se istraživanjem uvjeta hlađenja omogući odvod većih toplinskih tokova iz zadanog volumena stroja. To je naročito izraženo kod manjih elektromotora, gdje bi veće dimenzije stroja onemogućile zamjenu već ugrađenog stroja drugog proizvođača. Kod ovih strojeva se skoro uvijek postavlja još zahtjev reverzibilnosti i hlađenja ventilatorom na vlastitoj osovinu stroja, pa je stupanj korisnosti ventilatora za hlađenje najčešće ispod 15%. Usvoji li se normalna ekonomska težnja za unifikacijom dijelova, ili simetričnosti stroja u aksijalnom smjeru zbog okretanja priključne kutije na lijevu ili desnu stranu, konstrukcija namoće vrlo grube zahtjeve na stvaranje strujanja zraka vlastitim ventilatorom.

Kod rotora s velikim obodnim brzinama treba tražiti kompromis između zahtjeva hlađenja s jedne strane, te čvrstoće elemenata rotora i iznosa zamašnih masa rotora s druge strane. Problem čvrstoće, posebno na turbogeneratorima, dovodi često do vrlo malog prostora za zračne kanale. Nejednoliko hlađenje namota, kojemu je često uzrok i zagrijavanje zraka na putu kroz rashladne kanale, dovodi do toplinskih dilatacija i vibracija stroja, od kojih se treba osigurati već u fazi projektiranja hlađenja.

Kod strojeva posebne namjene treba često uravnotežiti nivo ventilacione buke i hlađenje. Time se ograničava promjer, pa i tlak ventilatora, te je odvod topline konvekcijom otežan /motori za osobna dizala, za pomične stepenice, za radne i alatne strojeve i sl./.

U strojevima, kod kojih je primarna štednja energije /veliki generatori, motori napajani iz baterija i sl./ također se hlade-

njem postiže cilj zbog smanjenja otpora namota, zbog niže temperature. Nakon sveobuhvatne analize stroja i postavljanja zahtjeva na hlađenje, ide se u proračunsko i eksperimentalno istraživanje strujanja zraka i odvoda topline iz stroja. Najmanje što se pri tome može dobiti je ušteda u materijalu aktivnog dijela i dimenzijama stroja.

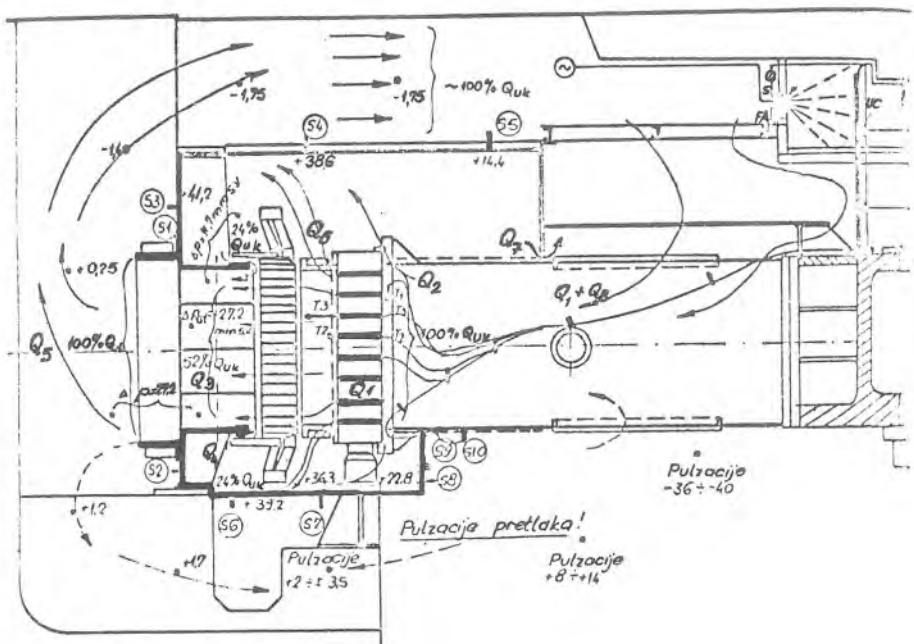
3. Primjeri istraživanja uvjeta hlađenja električnog stroja u Institutu "Rade Končar"

Paralelno s razvojem novih proizvoda realiziraju se istraživačke teme u Institutu "R. Končar" Zagreb s područja hlađenja rotacionih strojeva, koje se mogu svrstati u sljedeće grupe: sistematska mjerenja na gotovim strojevima, istraživanje karakteristika izvora tlaka, istraživanja koeficijenta konvekcije na aktivnom dijelu stroja, nove metode proračuna o raspodjeli zraka i temperature u stroju i modeli za posebna istraživanja.

Sistematska mjerenja na gotovim strojevima su najjeftiniji i najbolji način da se dođe do podataka o metodama proračuna i stjecanju iskustva za daljnje usmjeravanje istraživanja. Od mnogobrojnih rezultata prikazani su na sl. 1 rezultati ventilacionih ispitivanja na hidrogeneratoru "Đerdap" /190 MVA/, za kojeg je, na primjer, prije izvedbe izrađen "vodni model" stroja, da bi se dobili pouzdani podaci o brzinama strujanja zraka i gubicima ventilacije. Cilj ponovnih mjerenja sa sl. 1 je da se provjeri efikasnost ventilacionih istraživanja modeliranjem stroja za ispitivanje u vodi i da se postavi metoda ventilacionog proračuna.

Karakteristike ventilacionog sklopa, odnosno izvora tlačne energije na električnom stroju, istražuju se modeliranjem za većinu novih serijskih proizvoda, uglavnom zbog niske cijene mode-

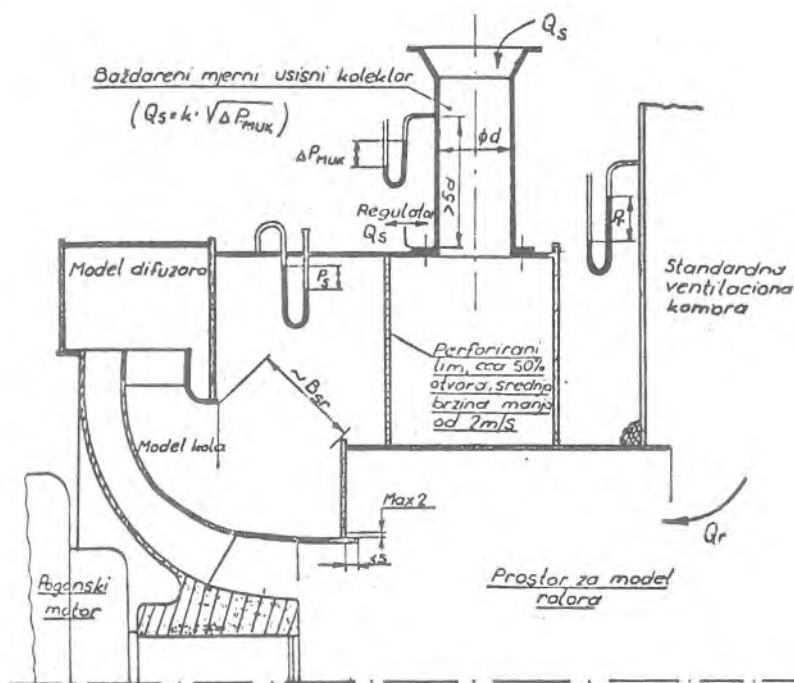
la, u odnosu na toplinske modele ili gotove strojeve. Na sl.2 prikazan je način ispitivanja karakteristika tlaka ventilatora s dvostrukim nizom lopatica i zajedničkim difuzorom, koji se nameće u slučaju pojačanog hlađenja rotora. Na sl.3 prikazano je korištenje tih rezultata za proračun raspodjele protoka kroz stator i rotor $/Q_{2s}$ i $Q_{2r}/$, ako su poznate krivulje otpora rotora $Z_r Q^2$, statora $Z_s Q^2$ i zajedničkih otpora za stator i rotor $Z_{sr} Q^2$.



SL. 1

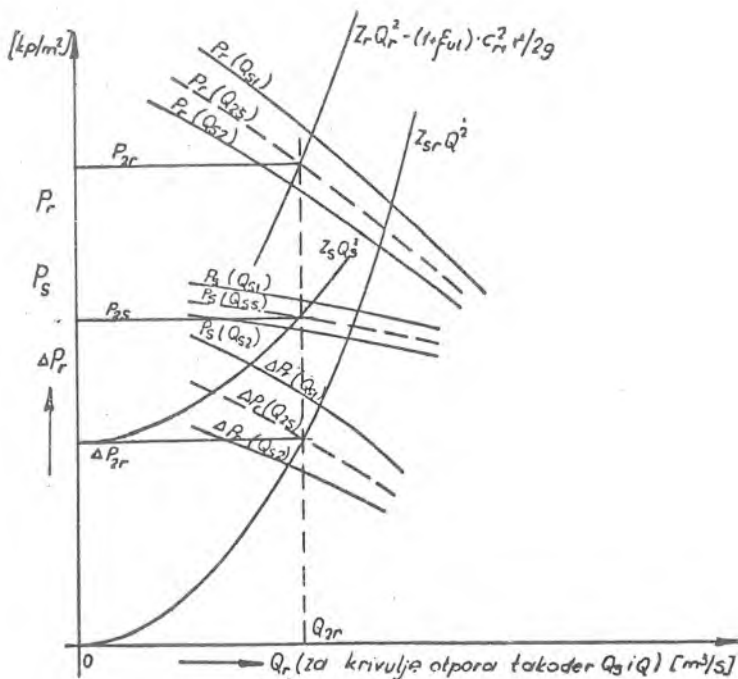
Koeficijent konvekcije na aerodinamički neuobičajenim ploham aktivnog dijela stroja, posebno namota, često je moguće odrediti jedino eksperimentalnim putem. Kao primjer je prikazan na sl.4 model glava turbogeneratorskog namota, na kojem se istraživao koeficijent konvekcije na oklopljenim glavama rotorskog namota, gdje se između ostalog očekivao znatan utjecaj pojačanog termosifonskog efekta /zbog velikih obodnih brzina/ na odvod topline s glava rotora. Na sl.5 prikazan je jedan od rezultata mjerenja na modelu.

Za postavljanje toplinskog i ventilacionog proračuna potrebna je matematička analiza i upotreba računala. Kod toplinskih pro-



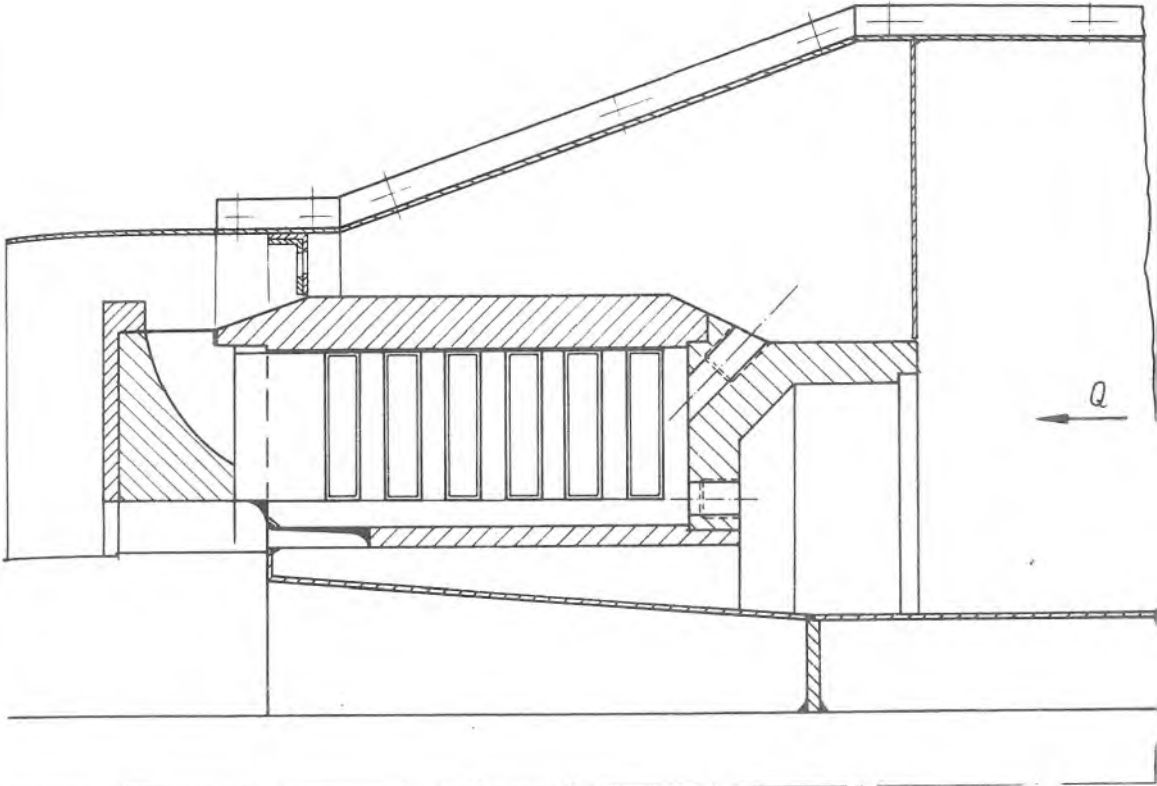
sl.2

računa pojavljuju se sistemi linearnih jednadžbi, ali veliki broj jednadžbi, pogotovo ako se računaju i kratkotrajna opterećenja, a kod proračuna brzina ili raspodjele protoka, pojavljuju se siste-

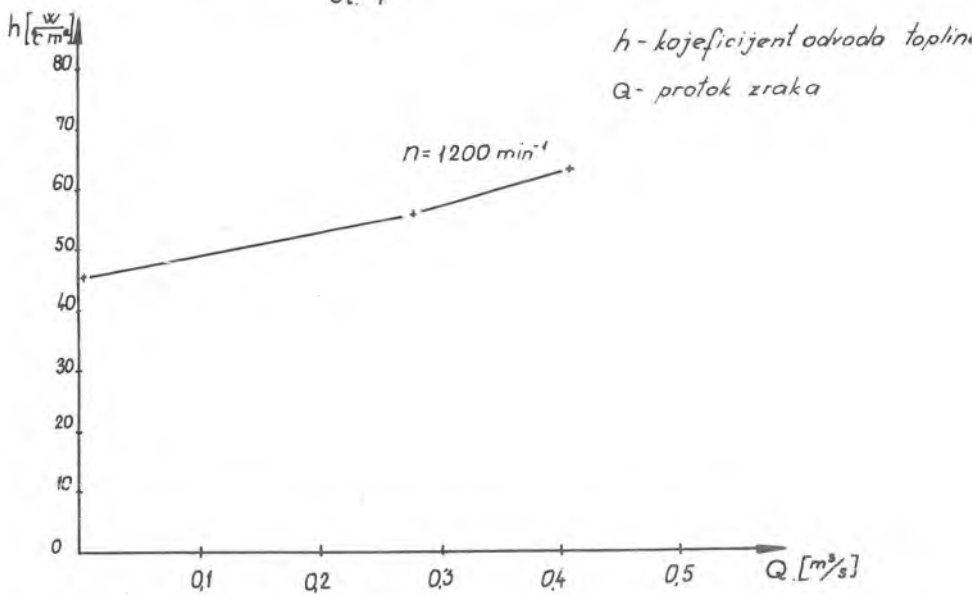


sl.3

mi kvadratnih jednadžbi. Kao primjer prikazana je na sl.6 mreža
s izvorima tlaka i otporima strujanja.



Sl. 4



Sl. 5

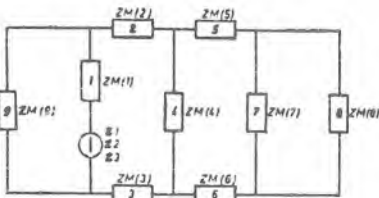
Za tu mrežu glasi sustav jednađbi:

za petlje:

$$\begin{aligned}
 & - ZM(1) \cdot Q(1)^2 - ZM(9) \cdot Q(9)^2 = Z1 \cdot Q(1)^2 + \\
 & \quad + Z2 \cdot Q(1) + Z3 \\
 & - ZM(1) \cdot Q(1)^2 + ZM(2) \cdot Q(2)^2 + ZM(3) \cdot Q(3)^2 + \\
 & \quad + ZM(4) \cdot Q(4)^2 = Z1 \cdot Q(1)^2 + \\
 & \quad + Z2 \cdot Q(1) + Z3 \\
 & - ZM(4) \cdot Q(4)^2 + ZM(5) \cdot Q(5)^2 + \\
 & \quad + ZM(6) \cdot Q(6)^2 + ZM(7) \cdot Q(7)^2 = 0 \\
 & - ZM(7) \cdot Q(7)^2 + ZM(8) \cdot Q(8)^2 = 0
 \end{aligned}$$

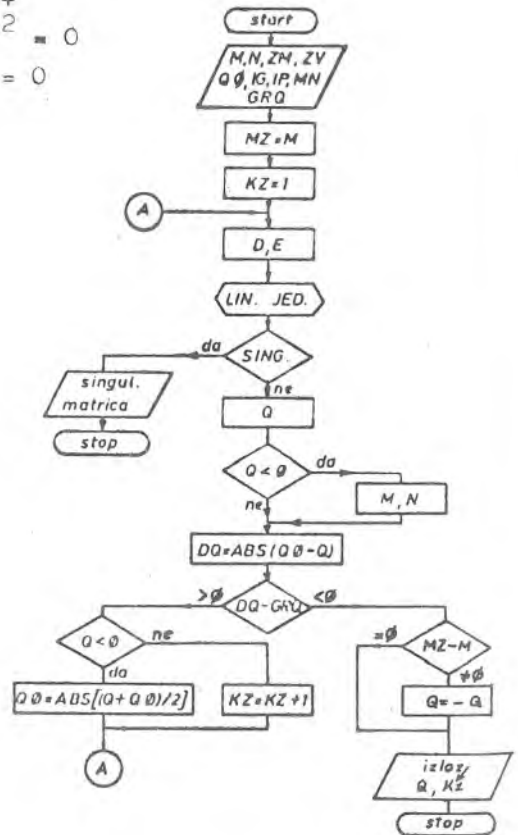
za čvorove:

$$\begin{aligned}
 & Q(1) - Q(2) - Q(9) = 0 \\
 & - Q(1) + Q(3) + Q(9) = 0 \\
 & Q(2) - Q(4) - Q(5) = 0
 \end{aligned}$$



Sl. 6

$$\begin{aligned}
 & - Q(3) + Q(4) + Q(9) = 0 \\
 & Q(5) - Q(7) - Q(8) = 0
 \end{aligned}$$



Sl. 7

Na sl.7 prikazan je dijagram toka za rješavanje navedenog sistema jednađbi metodom iteracije, s tim da se točnost za protoke uzima kao ulazni podatak, na pr. $GRQ = 0,0001$.

Istraživanja na posebnim modelima rješavaju parcijalne probleme hlađenja ili specifične slučajeve na skupim strojevima. Kao primjer je naveden slučaj istraživanja strujanja u Teslinim centrifugalnim strojevima na trenje, koje je Tesla patentirao 1910. godine, a danas su interesantni kao strojevi s niskim nivoom

buke. Na sl.8 prikazani su rezultati o polju brzina u takvom stroju, za slučaj laminarnog strujanja daleko od ulaznog promjera, dobivenog rješenjem Navier-Stokesovih jednačbi u graničnom sloju. Poznato je i analitičko rješenje takvog strujanja:

radijalna brzina:

$$C_r = \frac{q}{r} \quad k_1 \operatorname{ch}(az) \cos(az) - k_2 \operatorname{sh}(az) \sin(az)$$

relativna obodna brzina:

$$W_\varphi = \frac{q}{r} \quad k_1 \operatorname{sh}(az) \sin(az) + k_2 \operatorname{ch}(az) \cos(az) - 1$$

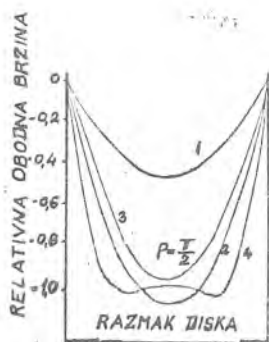
gdje je:

r = radius, kao nezavisna varijabla

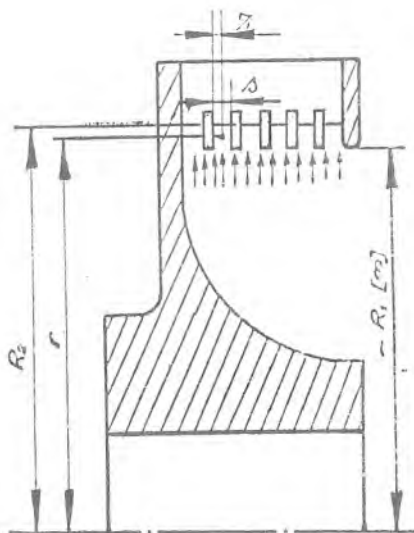
z = udaljenost od sredine razmaka među diskovima, kao druga nezavisna varijabla

$$q = \frac{a \cdot Q}{2\pi}$$

$$a = \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$$



Sl.8



Sl.9

$$k_1 = \frac{2 \operatorname{sh}(ad) \sin(ad)}{\operatorname{ch}(2ad) + \cos(2ad)}$$

$$k_2 = \frac{2 \operatorname{ch}(ad) \cos(ad)}{\operatorname{ch}(2ad) + \cos(2ad)}$$

$$c = \frac{\operatorname{sh}(2ad) - \sin(2ad)}{\operatorname{ch}(2ad) + \cos(2ad)}$$

ω = kutna brzina

ν = kinematska žilavost

Q = protok između 2 diska

d = polovina razmaka između diskova

Na sl.9 prikazan je pokušaj da se reverzibilni centrifugalni ventilatori za hlađenje električnih strojeva poboljšaju ugradnjom radijalne rotirajuće rešetke na principu toplinskog patenta.

Literatura:

1. B.Brkić: Reverzibilni centrifugalni ventilatori za hlađenje električnih strojeva, magistarski rad, Zagreb 1973.
2. B.Brkić: Proračun centrifugalnih ventilatora sa dvostrukim nizom lopatica, Zbornik IX seminara hlađenja električnih rotacionih strojeva, Brno 1974.
3. M.Köhler: Die Strömung durch das Spaltelement einer Reibungs-pumpe, dizertacija, Karlsruhe 1969.
4. I.Kurtović: Podloge za program proračuna zagrijavanja asinhronih strojeva, elaborat E 32111 "Končar", Zagreb 1970.
5. I.Vranković: Istraživanje ventilacije hidrogeneratora Đerdap, Zbornik IX seminara hlađenja električnih rotacionih strojeva, Brno 1974.
6. S.Šaban: Rješavanje ventilacijskih mreža na digitalnim računskim strojevima, "Tehnika" br.6/1976, Beograd.

STJEPAN CAR

Elektrotehnički institut
"Rade Končar", Zagreb

PULZACIJE POTEZNOG MOMENTA

Polazeći od osnovnih zakona u teoretskoj elektrotehnici i primjenom valne teorije, napravljena je na idealiziranom asinhronom stroju veza između geometrije stroja, priključenog napona i momenta na osovini stroja. Tako definirani matematički model asinhronog stroja pretpostavlja nesimetrični m -fazni namot na statoru i Z_2 -fazni kavezni namot na rotoru. Pomoću krivulja vodiča i magnetske vodljivosti zračnog raspora uvedena je opća definicija induktiviteta između i -te i j -te faze stroja. Utvrđjena je mogućnost računanja pulzacija poteznog momenta asinhronih strojeva preko valne teorije i naponskih jednadžbi, zaobilazeći tako nadomjesnu shemu stroja uz istovremeno pravilno uzimanje u obzir: raspodjele namota, ozublja, ekscentričnosti i zasićenja stroja.

START TORQUE PULSATIONS

A model connecting the geometry, connected voltage and torque of a simplified induction motor has been developed by drawing upon the basic laws of theoretical electrical engineering and the wave theory. Thus defined, the mathematical model of the induction motor assumes an asymmetrical m -phase stator winding and a Z_2 -phase rotor squirrel cage winding. A general definition of inductivity between the i and j motor phase has been worked out by using conductor curves and magnetic conductivity of the air gap. It has been established that induction motor start torque pulsations can be computed by using the wave theory and voltage equations, thus bypassing the electrical equivalent scheme of the motor but taking proper account of winding arrangement, slotting, excentricity and motor saturation.

1. Uvod

U posljednje vrijeme istraživanja na području asinhronih strojeva usredotočena su na istraživanje parazitnih pojava počev od: dodatnih gubitaka, parazitnih momenata, pulzacija poteznog momenta pa sve do pojava buke i vibracija. Sve su ove pojave međusobno usko povezane. Ovdje će biti prikazani rezultati istraživanja pojava pulzacija poteznog momenta, njihovo nastajanje i mogućnost njihovog računanja. Premda pulzacije ne moraju biti takve da zakoče rotor, mogu bitno ugroziti zaletna svojstva strojeva, naročito jednofaznih i polnopraklopivih, te su stoga postale predmet posebnog istraživanja. Kod toga se polazilo od osnovnih zakona u teoretskoj elektrotehnici i na matematičkom modelu idealiziranog asinhronog stroja uz pomoć valne teorije došlo se do veze između: geometrije stroja, priključenog napona i momenta na osovini. Ovdje nisu data neka pravila, što nije niti bilo moguće zbog pretpostavke opće nesimetrije namota ali je određena metoda računanja čiji se rezultati kvalitativno slažu s mjerenim vrijednostima. Treba posebno istaći da je postavljeni proračun izvodiv jedino pomoću računskog stroja i da pruža mogućnosti računanja prilika u stroju kod bilo kojeg pogonskog stanja.

2. Opća definicija induktiviteta između i-te i j-te faze

Magnetsko polje u zračnom rasporu električnog stroja može se odrediti pomoću zakona protjecanja iz strujnog obloga. Uzevši općenito, strujni oblog $a(\alpha, t)$ i veličina zračnog raspora $\delta(\alpha, t)$ funkcije su kuta α i vremena t . Ako su $a(\alpha, t)$ i $\delta(\alpha, t)$ poznate veličine, u svakoj točki po obodu stroja i u svakom trenutku može se odrediti radijalna komponenta magnetske indukcije u zračnom rasporu $b(\alpha, t)$. Proračun je moguće provesti uz slijedeće pretpostavke:

- permeabilitet željeza beskonačno je velik što znači da će silnice polja ulaziti okomito na željezo,

- tangencijalna komponenta magnetskog polja u rasporu je zanemarlivo mala tako da je polje u zraènom rasporu radijalno.

Gornje pretpostavke su tipične za valnu teoriju i vrijede u slučaju ako je radijalna veličina zraènog raspora mnogo manja u odnosu na valnu dužinu promatranog vala polja.

Indukcija u zraènom rasporu općenito je jednaka umnosku magnetske vodljivosti $\lambda(\alpha, t)$ i krivulje uzbude $v(\alpha, t)$ koja se opet određuje kao linijski integral strujnog obloga. Da bi se uvela opća definicija induktiviteta, zgodno je definirati "krivulju ukupnog broja vodiča":

$$w(\alpha, t) = v(\alpha, t) / i(t) \quad (1)$$

koja predstavlja krivulju uzbude uz jediničnu struju. Krivulja ukupnog broja vodiča ovisna je samo o broju vodiča i o njihovom rasporedu duž oboda stroja. Dok magnetska vodljivost opisuje geometrijski put silnica, krivulja ukupnog broja vodiča opisuje geometrijski put struja kroz vodiče. Induktivitet između i -tog i j -tog namota električnog stroja može se pokazati da je općenito jednak:

$$ijL(\alpha, t) = R \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} w(\alpha, t) \cdot w(\alpha, t) \cdot \lambda(\alpha, t) d\alpha \quad (2)$$

gdje su R polumjer provrta, a L dužina stroja. Prema tome, induktivitet je izražen samo "geometrijskim veličinama" tj. određuje ga geometrija zraènog raspora i raspored vodiča.

Pretpostavimo sada asinhroni stroj s m nesimetričnih faznih namota na statoru kojega i -ta faza stvara strujni oblog prema slici 1. Nadalje, pretpostavimo da se na rotoru nalazi kratkospojni kavezni namot, kojeg možemo tretirati kao Z_2 -fazni simetrični namot. Strujni oblog i -te faze statora, prikazan na slici 1, može se razviti u Fourierov red u obliku:

$$i_a(\alpha, t) = \sum_{k=1}^m {}^kA_s \sin k(\alpha + {}^k\varphi_s) \cdot i(t), \quad (3)$$

gdje su kA_s i ${}^k\varphi_s$ amplituda odnosno fazni pomak k -tog harmonika vala. U najopćenitijem slučaju namota k poprima vrijednosti 1, 2, 3 ... Kod strojeva

Neka su utori rotora skošeni za kut skošenja $\beta: \kappa$ u odnosu na statorske uture. Geometrijska veličina zračnog raspora σ_0 efektivno se povećava zbog: utjecaja ozubljenja statora i rotora, zbog zasićenja zubi i jarma kao i zbog eventualne ekscentričnosti rotora. Uzimajući u obzir sva tri efekta povećanja zračnog raspora kao i njegovu prostornu i vremensku promjenu, magnetska vodljivost zračnog raspora može se prikazati kao suma valova:

$$\begin{aligned} \lambda(\alpha, t) = & \Lambda_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_1 \cdot \cos n \cdot Z_1 \alpha + \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_2 \cdot \cos n \cdot Z_2 (\alpha - \Omega \cdot t - \varphi_0 - \beta_2 \cdot \frac{Z_2}{Z_1}) + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{h=1}^{\infty} \lambda_{12} \cos n \cdot Z_1 \alpha \cdot \cos h \cdot Z_2 (\alpha - \Omega \cdot t - \varphi_0 - \beta_2 \cdot \frac{Z_2}{Z_1}) + \\ & + \Lambda_2 \cos 2(p \cdot \alpha - \omega \cdot t - \varphi_2) + \Lambda_4 \cdot \cos(\alpha - \omega_4 \cdot t - \varphi_4), \end{aligned} \quad (4)$$

Amplitude valova vodljivosti mogu se odrediti na poznate načine opisane u literaturi.

Ovakav pristup vrlo je prikladan ali ima poteškoća kod određivanja pojedinih amplituda zbog nejednakog zasićenja pojedinih dijelova magnetskog kruga. Ali ovakvo pojednostavljeno promatranje daje vrlo preglednu sliku stroja i ukazuje na utjecajnost pojedinih dijelova stroja na njegove karakteristike.

Iz poznatog strujnog obloga i magnetske vodljivosti moguće je, na prije spomenuti način, odrediti induktivitet između bilo kojih dviju faza. Ukupni induktivitet između bilo kojih dviju faza moguće je, općenito, opet prikazati kao sumu induktiviteta kod čega svaki od sumanada uzima u obzir samo po jednu komponentu magnetske vodljivosti. Induktivitet se može prikazati kao:

$$L(t) = {}^0L(t) + {}^1L(t) + {}^2L(t) + {}^3L(t) + {}^4L(t) \quad (5)$$

kod čega su:

${}^0L(t)$ - komponenta induktiviteta uz konstantnu efektivnu širinu zračnog raspora,

$z_1 L(t), z_2 L(t), z_3 L(t)$ - komponente induktiviteta uslijed ozublja statora
odnosno rotora

$z L(t)$ - komponenta induktiviteta uslijed zasićenja magnet-
skog kruga i

$e L(t)$ - komponenta induktiviteta uslijed ekscentričnosti
rotora.

Kao primjer, kako izgledaju izrazi samo za komponente induktiviteta

${}_{ij}^s L_{SR}(t)$ i ${}_{ij}^z L_{SR}(t)$ između i -te statorske i j -te rotorske faze, dane
su jednačbama (6) i (7):

$${}_{ij}^s L_{SR}(t) = R^2 \cdot \pi \cdot L \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=k}^{\infty} \frac{{}_i^s A_S \cdot {}_j^s A_R}{k \cdot n} \cdot \Lambda_n \cdot {}_k^s f_S \cdot \cos[k \cdot {}_i^s \varphi_S - n \cdot {}_j^s \varphi_R + n \cdot (\Omega \cdot t + \varphi_0)], \quad (6)$$

$$\begin{aligned} {}_{ij}^z L_{SR}(t) = & \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \pi \cdot L \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=|k-1|}^k \frac{{}_i^s A_S \cdot {}_j^s A_R}{k \cdot n} \cdot \Lambda_n \cdot {}_k^s f_S \cdot \cos[k \cdot {}_i^s \varphi_S - n \cdot {}_j^s \varphi_R + n \cdot (\Omega \cdot t + \varphi_0) + 2(\omega \cdot t + \varphi_2)] + \right. \\ & + \sum_{n=k+1}^{\infty} \frac{{}_i^s A_S \cdot {}_j^s A_R}{k \cdot n} \cdot \Lambda_n \cdot {}_k^s f_S \cdot \cos[k \cdot {}_i^s \varphi_S - n \cdot {}_j^s \varphi_R + n \cdot (\Omega \cdot t + \varphi_0) + 2(\omega \cdot t + \varphi_2)] + \\ & \left. + \sum_{n=k+2p+1}^{\infty} \frac{{}_i^s A_S \cdot {}_j^s A_R}{k \cdot n} \cdot \Lambda_n \cdot {}_k^s f_S \cdot \cos[k \cdot {}_i^s \varphi_S - n \cdot {}_j^s \varphi_R + n \cdot (\Omega \cdot t + \varphi_0) + 2(\omega \cdot t + \varphi_2)] \right\}, \quad (7) \end{aligned}$$

Faktor ${}_n^s f_S$ je faktor skošenja za n -ti harmonik. Ostale komponente slič-
no su građene.

3. Naponske jednačbe i moment na osovini

Ograničimo se na promatranje stroja sa zakočenim rotorom. Tada
će biti sve komponente induktiviteta vremenski nezavisne osim induktive-
ta zasićenja. Uslijed njegove vremenske promjene generirat će se i struje
frekvencije različite od frekvencije priključenog napona. Kako je, pored os-
novnog harmonika struje, značajan samo harmonik trećeg reda, to ćemo
samo njih promatrati. Zbog mogućnosti rješavanja kasnije postavljenih na-
ponskih jednačbi, prelazi se na simbolični račun. Sve kompleksne veličine
bit će pisane velikim pisanim slovima, a matrice masnim slovima. Kompo-

nenta induktiviteta zasićenja pisana u kompleksnom obliku glasi:

$$z_{ij}^{\varphi}(1) = \frac{z_{ij}^{\varphi}}{1 - \varphi_{ss}^2} \cdot e^{j\varphi} \cdot 2 \cdot \omega \cdot l \quad (8)$$

$$\begin{aligned} z_{ij}^{\varphi} &= \frac{1}{2} \cdot R \cdot \pi \cdot L \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \left[\sum_{l=2p-k+1}^{\infty} \frac{A_s/A_s}{k \cdot l} \cdot A_2 \cdot e^{j(k \cdot \varphi_s + l \cdot \varphi_s + 2 \cdot \varphi_2)} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{l=k-2p+1}^{\infty} \frac{A_s/A_s}{k \cdot l} \cdot A_2 \cdot e^{j(k \cdot \varphi_s - l \cdot \varphi_s + 2 \cdot \varphi_2)} \right] \\ z_{ij}^{\varphi} &= \frac{1}{2} \cdot R \cdot \pi \cdot L \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=k-2p+1}^{\infty} \frac{A_s/A_s}{k \cdot l} \cdot A_2 \cdot e^{j(k \cdot \varphi_s - l \cdot \varphi_s + 2 \cdot \varphi_2)} \end{aligned} \quad (9)$$

Priključi li se na statorski namot m -fazni simetrični sistem napona frekvencije ω , tada će se pojaviti struje frekvencije ω , 3ω i više koje zanemarujemo. Uz pretpostavku da mreža predstavlja kratki spoj za struju frekvencije 3ω , naponske jednačbe asinhronog stroja pisane u matricnom obliku glase:

$$\begin{bmatrix} U_s \\ 0_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{SS} & Z_{SR} \\ Z_{RS} & Z_{RR} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_R \end{bmatrix} \quad (10)$$

gdje su submatrice matrice jednačbe (10) jednake:

$$U_s = \begin{bmatrix} iU_s \\ 0 \\ \vdots \\ iU_s \\ 0 \\ \vdots \\ mU_s \\ 0 \end{bmatrix}, \quad 0_R = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Z_s = \begin{bmatrix} i\omega L_{ss} \\ i\omega L_{ss} \\ \vdots \\ i\omega L_{ss} \\ i\omega L_{ss} \\ \vdots \\ i\omega L_{ss} \\ i\omega L_{ss} \end{bmatrix}, \quad Z_R = \begin{bmatrix} i\omega L_{ss} \\ i\omega L_{ss} \\ \vdots \\ i\omega L_{ss} \\ i\omega L_{ss} \\ \vdots \\ i\omega L_{ss} \\ i\omega L_{ss} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Z_{ss} = \begin{bmatrix} R_s + j\omega \left[L_{ss} - \frac{1}{2} (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) \right] & j\frac{1}{2} \omega (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) & \dots & j\omega \left[L_{ss} - \frac{1}{2} (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) \right] & j\omega \frac{1}{2} (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) \\ j\frac{3}{2} \omega (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) & R_s + j\omega \left[L_{ss} - \frac{1}{2} (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) \right] & \dots & j\frac{3}{2} \omega (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) & j\omega \frac{1}{2} (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ j\omega \left[L_{ss} - \frac{1}{2} (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) \right] & j\frac{1}{2} \omega (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) & \dots & R_s + j\omega \left[L_{ss} - \frac{1}{2} (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) \right] & j\omega \frac{1}{2} (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) \\ j\frac{3}{2} \omega (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) & j\frac{3}{2} \omega (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) & \dots & j\frac{3}{2} \omega (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) & j\omega \frac{1}{2} (L_{ss}^2 + L_{ss}^2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Jednadžba (10) vrijedi za jednofazne i višefazne namote spojene u zvijezdu s nul vodičem ili spojene u poligon.

Submatrice: Z_{SR} , Z_{RR} i Z_{RS} su slično građene kao i Z_{SS} . U submatrici Z_{SS} oznaka iR_s označava radni otpor, a iL_{ss} rasipni induktivitet i -te faze statora. $\sum_{ij}^k L_{ss}$ označava sumu svih vremenski nezavisnih komponenti induktiviteta. Prednost odredjivanja struja razvijenim matematičkim modelom je mogućnost računanja strojeva s bilo kakvim namotima i s proizvoljnim oblikom zračnog rasporeda.

Elektromagnetski moment stroja odredjuje se iz magnetske energije kao njena derivacija po obodu stroja. Izražen preko matrica struja osnovnog harmonika i struja trećeg harmonika kao i matrica vremenski konstantnih induktiviteta kL i vremenski promjenljivih zL glasi:

$$M_{\theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (i_s^T R_s i_s + \sum_{ij}^k L_{ss} i_{sj} i_{si}) +$$

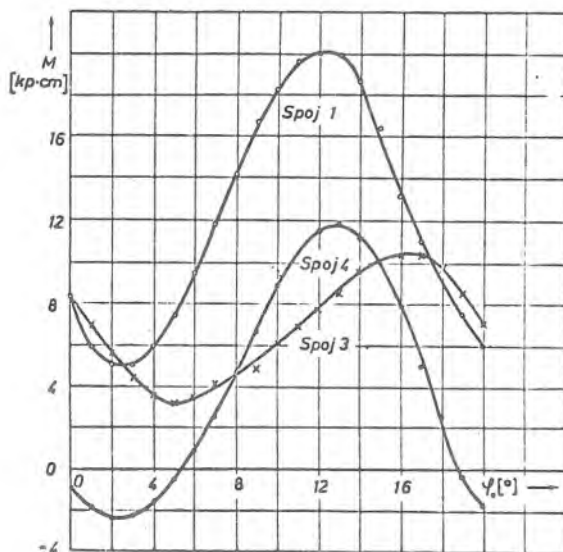
$$+ R_r \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (i_r^T R_r i_r + \sum_{ij}^k L_{rr} i_{rj} i_{ri}) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2} \sum_{ij}^k L_{rs} i_{rj} i_{si} \right\} \quad (13)$$

Vidi se da svaka od komponenti struja stvara elektromagnetski moment preko vremenski konstantne komponente induktiviteta, ali takodjer i njihovim medjusobnim djelovanjem preko vremenski promjenljivog induktiviteta zasićenja, nastaje elektromagnetski vremenski konstantan moment. Uobičajeno je vremenski konstantan elektromagnetski moment dijeliti na sinhroni i asinhroni moment. Asinhroni moment moguće je u općem slučaju definirati kao prosječnu vrijednost momenta za jedan okretaj rotora pri bilo kojoj kutnoj brzini rotora Ω . Sinhroni moment je onaj vremenski konstantan moment koji je jednak razlici ukupnog vremenski konstantnog momenta i asinhronog momenta. Kako se ovdje razmatra zakočeni stroj, amplituda pulsacija poteznog momenta do prosječne vrijednosti poteznog momenta jednaka je sinhronom momentu u kratkom spoju, a prosječna vrijednost momenta jednaka je asinhronom momentu u kratkom spoju.

4. Rezultati mjerenja poteznog momenta i usporedba s računskim vrijednostima

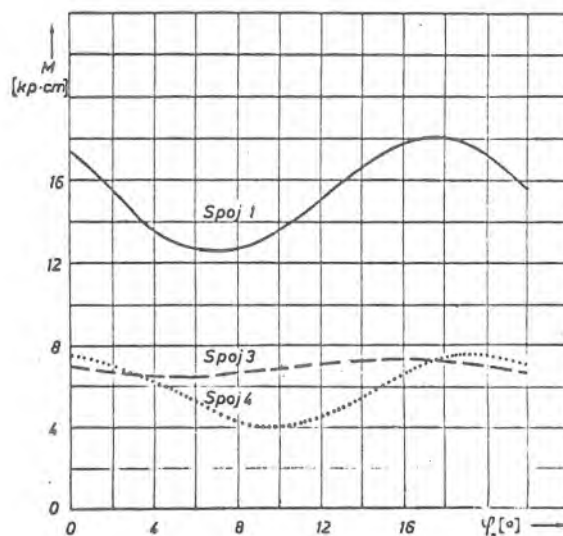
Pulzacije poteznog momenta su nepoželjna pojava, a uzrok im je dvorak: namoti i reluktancije jezgara. Period pulzacija jednak je utorskom koraku statora, odnosno rotora ili je manji od njega. Ovisnost pulzacija o raspodjeli namota prikazan je na slici 3. Mjerenja su vršena na jednofaznom kondenzatorskom motoru s namotom u tri različita spoja uz približno jednaka zasićenja u sva tri slučaja. Uočava se značajna utjecajnost raspodjele namota na pulzacije. Preko razvijene teorije, a uz pomoć računskog stroja, računate su pulzacije za ova tri slučaja, a dobiveni rezultati prikazani su na slici 4. Iako ima značajnih kvantitativnih razlika, jer je računato samo s utjecajem namota, a zanemareno ozublje i zasićenje, kvalitativno se rezultati uvelike podudaraju. U kojoj mjeri može utjecati ozublje na pulzacije, pokazuju rezultati mjerenja na istom motoru, ali s dva rotora različitih brojeva utora, skošenih za po jedan utorski korak, slika 5. što daje račun, prikazuje slika 6. Vrlo je zanimljiv slučaj motora s jednakim rotorima, ali sada bez skošenja, slika 7. Računske vrijednosti pulzacija za taj slučaj prikazuje slika 8. Rezultati se kvalitativno podudaraju ali uz znatno kvantitativno odstupanje. Primjećuje se bitan utjecaj skošenja kod motora s 18 utora na rotoru. Analiza utjecajnosti namotnih harmonika na nastajanje pulzacija uz pretpostavku glatkog zračnog rasporeda sprovedena je na već spomenutom motoru. Rezultati te analize prikazani su na slici 9. Vidi se kako se asinhroni moment smanjuje, uzima li se u obzir sve više i više namotnih harmonika, dok je slučaj sa sinhronim momentom potpuno drugačiji. Najprije se povećava, a zatim se smanjuje. Vrlo je interesantno promatrati kako se mijenjaju pulzacije uslijed raspodjele namota uz skošenje kao parametar, slika 10. Vidimo da se u ovom slučaju pulzacije sa skošenjem utora čak povećavaju. Slika 11. prikazuje mjerenje vrijednosti pulzacija motora sa i bez kratkospojnih prstena



Slika 3.

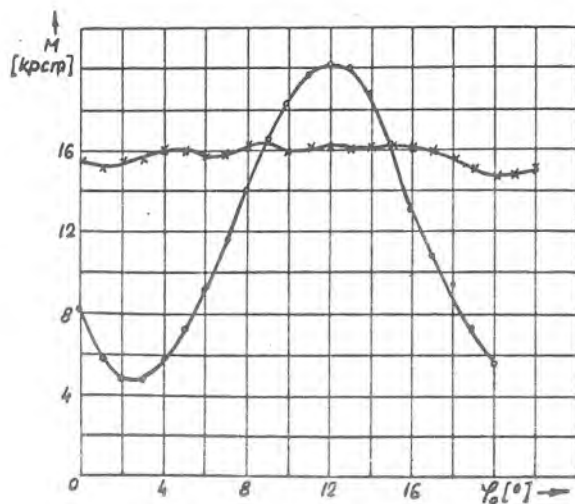
Mjerenje vrijednosti pulzacija
poteznog momenta jednofaznog
motora u različitim spojevima
statorskog namota s rotorom:

$$Z_2 = 18, m_{sk} = 1/18$$



Slika 4.

Računate vrijednosti pulzacija
poteznog momenta motora iz
slike 3.

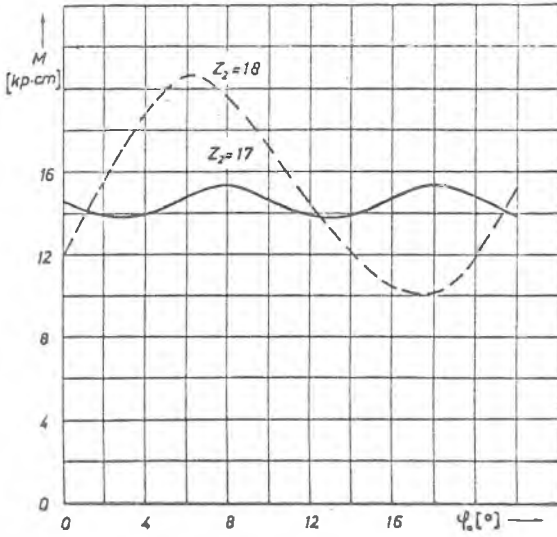


Slika 5.

Mjerenje vrijednosti pulzacija
poteznog momenta jednofaznog
motora u spoju 1 s rotorima:

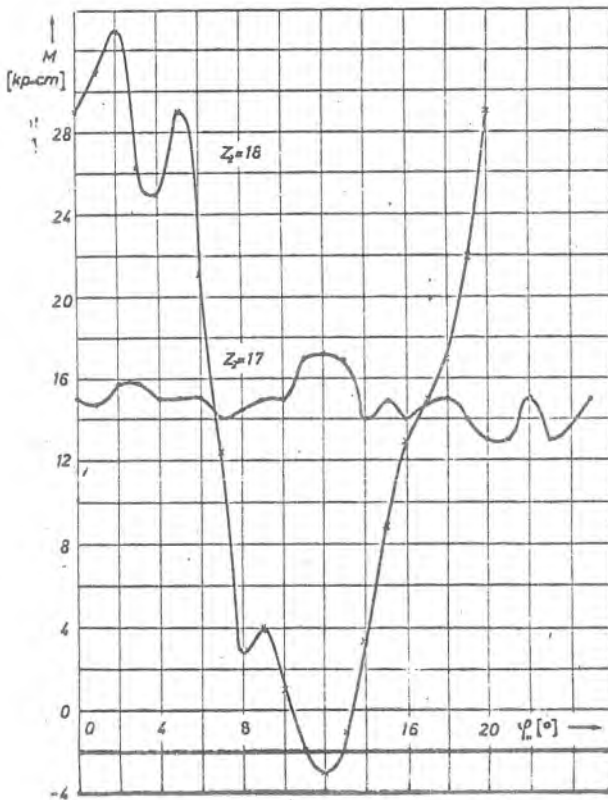
$$Z_2 = 18, m_{sk} = 1/18$$

$$Z_2 = 17, m_{sk} = 1/17$$



Slika 6.

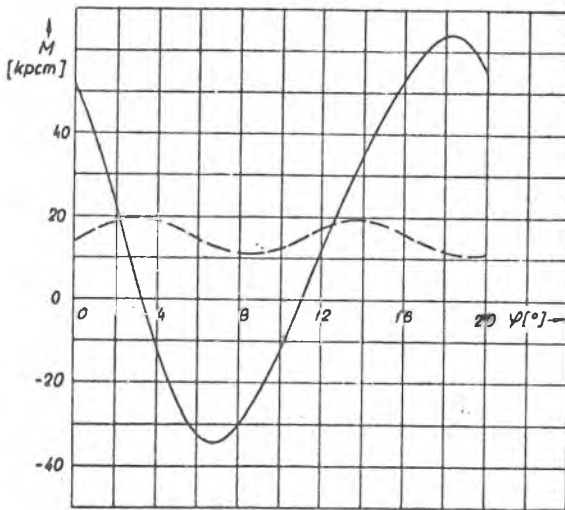
Računske vrijednosti pulzacija
poteznog momenta u slučaju mo-
tora iz slike 5.



Slika 7.

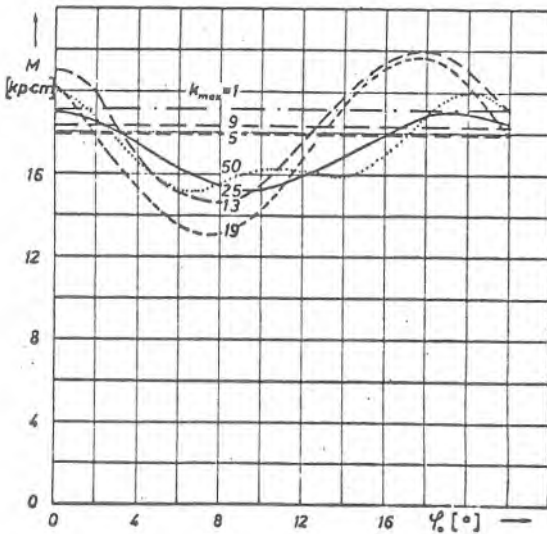
Mjerene vrijednosti pulzacija
poteznog momenta jednofaznog
motora s rotorima bez skoše-
nja i brojem utora:

$$Z_2 = 18 \text{ i } Z_2 = 17$$



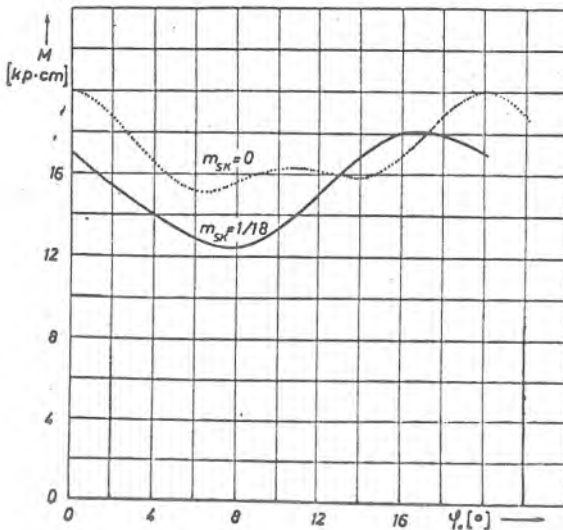
Slika 8.

Računske vrijednosti pulzacija poteznog momenta motora kao u slučaju slike 7. (računato s geometrijskom veličinom otvora utora).



Slika 9.

Računske vrijednosti pulzacija poteznog momenta jednofaznog motora s rotorom: $Z_2 = 18$ i $m_{sk} = 0$ računato do različitih maksimalnih redova k_{max} namotnih harmo- nika.



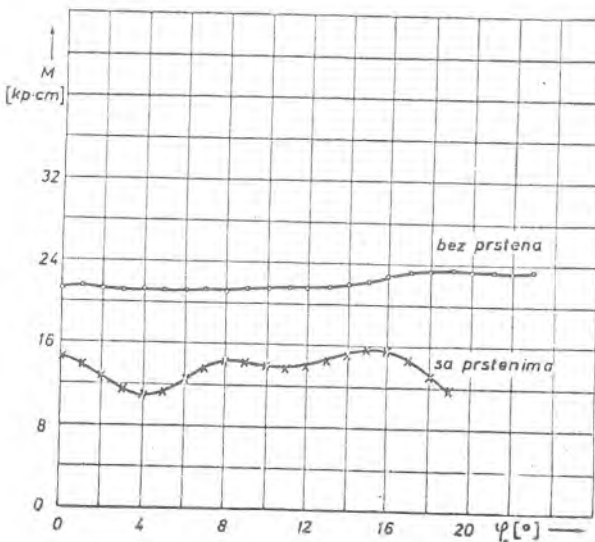
Slika 10.

Računske vrijednosti pulzacija po- teznog momenta jednofaznog moto- ra sa $Z_2 = 18$ uz skošenje kao pa- rametar.

na rotoru. Vidimo da se pulzacije smanjuju otklanjanjem prstenova i prijelazom struje od štapa na štap kroz paket. To ujedno potvrđuje činjenicu, da u slučaju kada bismo imali glatku jezgru rotora s kontinuirano električki vodljivom površinom, ne bi postojale pulzacije poteznog momenta bez obzira kakav je stator.

Već letimičnim pogledom mjerenih i računskih vrijednosti pokazuje se da je moguće računom, na osnovu razvijene teorije, kvalitativno ocijeniti veličinu pulzacija sa zadovoljavajućom točnošću za projektanta. Na kvantitativni rezultat može se bitno utjecati sa zadavanjem nekih ulaznih veličina koje nije moguće teoretski točno odrediti, već se zadaju na osnovu subjektivne procjene. To su: stanje zasićenosti i efektivni otvor utora.

Iz ovog izlaganja proizlazi jasan zaključak da je razvijenim računom, na osnovu valne teorije strojeva, moguće računati pulzacije poteznog momenta. Tako dobiveni rezultati će se kvalitativno zadovoljavajuće slagati s mjernim vrijednostima. Postojat će kvantitativno odstupanje, koje dolazi jednom zbog same pretpostavke idealiziranog stroja i odbacivanja stvarne situacije u stroju, a s druge strane zbog nepoznavanja nekih ulaznih veličina koje dolaze od zasićenja pojedinih dijelova magnetskog kruga.



Slika 11.

Mjerenje vrijednosti pulzacija poteznog momenta jednofaznog četveropolnog motora sa i bez prstena na rotoru.

Najveća prednost ovog računa je ta što se može utvrditi na jednostavan način koja je, na primjer, od kombinacija utora povoljnija i koji je namot bolji; da li je potrebno skošenje ili ne, a sve to prije nego što su poznate geometrijske dimenzije motora.

5. Literatura

1. Altenbernd G., Bausch H., Jordan H.: Theorie des Einphaseninduktions motor mit abgestupfem Luftspalt. Acta Technica CSAV 13 (1968), 4, S. 403 --- 425.
2. Car S.: Pulzacije poteznog momenta asinhronog kaveznog stroja; Magistarski rad, Zagreb, 1975.
3. Nowack S.: Beitrag zur Theorie des Asynchronmotors mit Schleifringläufer im Hinblick auf die Berechnung des Lärms; Dissertation Technische Hochschule Hannover, 1968.

Prof. dr Božidar Frančić

Poduzeće "Rade Končar"

OOOR Elektrotehnički institut

Zagreb

SUVREMENI ELEKTRIČNI STROJ - PREDMET ZNANSTVENIH ISTRAŽIVANJA

Nikola Tesla je svoje izume stvarao intuicijom genija. On i njegovi suvremenici otkrili su gotovo sve vrste električnih strojeva koje danas poznajemo. Zbog toga bi neupućeni mogli zaključiti da područje električnih strojeva nije i ne mora biti predmet znanstvenih istraživanja, već samo dobro organizirane tehnološke aktivnosti. Zahtjevi tehničkog i industrijskog razvoja nalažu suprotno. Cilj je referata da prikaže raznovrsne mogućnosti znanstvenog pristupa električnom stroju, ovisno o obilježju odgovora koji se traži. Posebno se ističe učešće i doprinos naše znanstvene sredine takovim istraživanjima.

MODERN ELECTRICAL MACHINE - SUBJECT OF SCIENTIFIC RESEARCH

Nikola Tesla created his inventions by intuition of a genius. He and his contemporaries discovered nearly all the kinds of electrical machines known today. This might lead the layman to conclude that the field of electrical machines is not and need not be a subject of scientific research, but only the object of a well organized manufacturing activity. However, the requirements of engineering and industrial development require just the opposite. The purpose of the paper is to show the various possibilities offered by a scientific approach to the electrical machine, depending on the nature of the answer sought. Our contribution to such research will be pointed out in particular.

x x x x

Nikola Tesla je svoje izume stvarao intuicijom genija. On i njegovi suvremenici otkrili su gotovo sve vrste električnih strojeva koje danas poznajemo. Zbog toga bi neupućeni mogli zaključiti da područje električnih strojeva nije i ne mora biti predmet znanstvenih istraživanja, već samo dobro organi-

zirane tehnološke aktivnosti. Zahtjevi tehničkog i industrijskog razvoja nalažu suprotno.

Primjena električnih strojeva u raznovrsnim suvremenim i veoma često suptilnim tehnološkim sustavima i njihova gradnja s najmanjim mogućim utroškom materijala i rada uz doseg visoko vrijednih svojstava, zahtijevaju izrazito višedisciplinarni znanstveni pristup, tako da se u zavisnosti o vrsti problema razvijaju i primjenjuju raznovrsne metode istraživanja. Ovakvo je stanje naročito obogaćeno u novije vrijeme, zahvaljujući suvremenim računskim strojevima i naglom razvoju eksperimentalne tehnike. Istraživanja, koja zahtijeva električni stroj, zasnivaju se na teoriji elektromagnetskih polja i krugova, raznim disciplinama mehanike (čvrstoća, vibracije), termodinamici, hidro i aerodinamici, znanosti o materijalima i tehnologiji materijala, ergonomskim istraživanjima i dr.

Izumi Nikole Tesle dali su osnovnu funkciju i rješenja električnih strojeva izmjenične struje, koji su ušli u temelje industrijske revolucije. Uvjet je napretka da se potrebna funkcija ostvaruje što potpunije sa što manje ulaganja. Stoga znanstvena istraživanja električnih strojeva moraju obuhvaćati:

- Istraživanje vladanja električnih strojeva u raznovrsnim tehnološkim sustavima i uvjetima rada, da bi se što točnije odredili parametri potrebni za njihov najbolji mogući rad;

- Istraživanje prilika u stroju, kako bi se zadani parametri ostvarili s najmanjom mogućom sveukupnom cijenom – optimumom između utroška materijala, rada i energije. Pri tome mora biti udovoljeno zahtjevima sigurnosti stroja i njegove okoline (ograničeno zagrijanje namotaja, ograničena dielektrička i mehanička naprezanja, buka u dozvoljenim granicama, pozitivno ergonomsko uklapanje u čovjekovu sredinu).

Osnovne fizikalne podloge za istraživanje električnih strojeva potječu još iz prošlog stoljeća, uglavnom iz razdoblja prije pojave Nikole Tesle. Izumitelji i istraživači njegova doba gotovo da ih nisu mogli koristiti, jer tadašnje mogućnosti računanja nisu ni približno dopuštale primjenu općih fizikalnih zakonitosti na konkretne složene geometrijske oblike realnog električnog stroja. Zahvaljujući suvremenim računskim strojevima, napose digitalnim računalima,

danas je moguće analizirati prilike u stroju polazeći upravo od kvantitativne primjene osnovnih fizikalnih zakonitosti.

U znanstvenoj i stručnoj obradi električnih strojeva susrećemo dva osnovna pristupa, međusobno nekada veoma udaljena:

1. Prikaz električnog stroja kao sustava medjuinduktivno povezanih strujnih krugova s koncentriranim parametrima i jednim stupnjem slobode mehaničkog gibanja. Ovaj pristup koristi metode iz teorije električnih krugova.

2. Prikaz električnog stroja kao kontinuirane fizikalne sredine, pri čemu se istraživanja zasnivaju na teoriji elektromagnetskih polja.

Ova se dva pristupa danas sve više zbližuju, zahvaljujući napretku računske tehnike. Razvijaju se i kombinirane metode, u kojima se analizom polja nalaze osnove za veoma detaljnu diskretizaciju i tako unaprijedjenu primjenu teorije električnih krugova.

x x x x x x

Primjena teorije električnih krugova s koncentriranim parametrima

Za točno određivanje zahtjeva na električni stroj od bitne je važnosti točno poznavanje njegova vladanja u sustavima primjene. Odavno je bio poznat osnov kako to postići: vladanje stroja opisuje drugi Kirchoffov zakon za njegove strujne krugove i drugi Newtonov aksiom za mehaničku vrtnju rotora. Nezavisne koordinate ovakvog sustava (varijable stanja) mogu se birati na razne načine, recimo da su to vektor struje (i) i kut γ (kut između referentnih osi statora i rotora, koji određuje u svakom trenutku položaj statora prema rotoru).

Tako se dobiva matematički prikaz stroja:

$$[u] = [R][i] + \frac{d\gamma}{dt} \frac{d[L]}{d\gamma} [i] + [L] \frac{d[i]}{dt} \quad (1)$$

$$J \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = M_v - \frac{1}{2} [i]_t \frac{d[L]}{d\gamma} [i]$$

Ovaj sustav u načelu rješava sva pitanja vladanja bilo koje vrste električnog stroja, u bilo kojim uvjetima rada. Mora se, međutim, naglasiti da su do pojave suvremenih računskih strojeva postojale ogromne teškoće za izravno ko-

rištenje ovog matematičkog modela. Navest ćemo samo neke od njih.

Nužan je uvjet za elektromehaničku pretvorbu energije da postoji elektromagnetski zakretni moment u stroju i da u određenom intervalu vrtnje postoji njegova srednja vrijednost. Mora, dakle, nužno biti

$$M_e = \frac{1}{2} [i]_t \frac{d[L]}{d\gamma} [i] \neq 0 \quad (2)$$

Isključi li se trivijalni uvjet da mora postojati vektor struje, preostaje uvjet

$$\frac{d[L]}{d\gamma} \neq 0 \quad (3)$$

Prema tome, osnovni je uvjet da uopće postoji elektromehanička pretvorba energije da induktivitet stroja, točnije njegova matrica, ovisi o položaju rotora prema statoru (kut γ). Taj uvjet vodi na periodički promjenljive koeficijente γ i $\frac{d[L]}{d\gamma}$ u matematičkom modelu (1), što čak i pri konstantnoj brzini vrtnje, kada otpada jednadžba gibanja, stvara ogromne teškoće za analitičko rješavanje. Zbog toga su prije gotovo pedeset godina (Park) uvedene u teoriju električnih strojeva raznovrsne linearne transformacije koordinata, što pri konstantnoj brzini vrtnje vodi na sustav linearnih jednadžbi s konstantnim koeficijentima i tako omogućuje pristupačnu analitičku obradu. To je ujedno i njihov krajnji domet. Odatle i potječu promatranja električnih strojeva u raznovrsnim koordinatnim sustavima (npr. sustav rotirajućih koordinata d, q u analizi sinhronih strojeva). Ako je, pak, brzina vrtnje promjenljiva, što je u općem vladanju stroja neizbježno, tada povrh periodičnosti koeficijenata, što se može izbjeći odgovarajućom transformacijom koordinata, dolazi i do izrazite nelinearnosti u obliku umnoška varijabli. Javlja se umnožak γ i $[i]$ u naponskim jednadžbama i umnožak struja $[i]$ u jednadžbi gibanja. Ovakav je sustav rješiv jedino numeričkom integracijom, što se danas pomoću suvremenih digitalnih računala vrši s lakoćom, ne samo u istraživačkom radu, već i u projektantskoj praksi.

Bez suvremenih računala osnovni se model (1) nije mogao rješavati, pa se je u proučavanju vladanja strojeva pribjegavalo približenjima i spekulaciji,

što je nesumnjivo razvijalo inženjerski smisao za fizikalne predodžbe, no često ipak ostavljalo bitna pitanja bez potpunog rješenja. Na primjer:

- Asinhroni zalet mogao se rješavati jedino kao slijed elektromagnetskih stacionarnih stanja, dakle kao mehaničko prolazno stanje, koristeći stacionarne elektromagnetske podatke, dobivene s većom ili manjom točnošću simboličkim računom. Ovakovo približenje, domet kojega se bez suvremenih računala nije moglo prijeći, ne zadovoljava u slučaju brzih zaleta visokoiskorišćenih asinhronih strojeva. Rješenja pomoću općeg modela (1), pa makar i s razmjerno primitivno odredjenim parametrom $[L]$, daju mnogo točnije podatke, naročito u zakretnom momentu i gubicima zaleta. Na slici 1. prikazan je primjer razlike izmedju rezultata statičkog proračuna i proračuna po općem modelu (1) u dvije varijante točnosti (L 13). Točnost proračuna po modelu (1) potvrđena je mjerenjima.

- Dinamička stabilnost sinhronog generatora u radu na elektroenergetski sistem veoma je značajan problem, zbog zahtjeva na pouzdanost opskrbe električnom energijom. Taj se zadatak može riješiti tek točnim poznavanjem prilika gubitka sinhronizma. Brzina osnovnih elektromagnetskih i mehaničkih procesa tu je podjednaka, pa pretpostavke o kvazistacionarnom stanju - bilo mehaničkom ili elektromagnetskom - nemaju osnove. Nelinearnost je neminovna i proces se može kvantitativno analizirati jedino rješavanjem općeg modela (1). Ta je okolnost prije pojave računskih strojeva uzdigla problem dinamičke stabilnosti na razinu najtežih zadataka elektrotehnike, pa je on rješavan približno, s velikim zanemarenjima i mukotrpnim primitivnim načinima numeričke integracije, s danas već anahronističkim nazivom "korak po korak". Danas se dinamička stabilnost proučava numeričkim rješavanjem općeg modela (1). Na slici 2. prikazani su rezultati proračuna prilika gubitka sinhronizma nakon tro-polnog kratkog spoja i ponovnog uklapanja (L 6). Vjerodostojnost modela (1) u velikoj mjeri ovisi o točnosti induktiviteta $[L]$, što je ujedno i osnovna pretpostavka da se uz zadane parametre ostvari optimalni stroj. Odredjivanje induktiviteta stroja vanredno je težak zadatak, zbog veoma složene geometrijske slike stroja; raspodjele njegovih namotaja i feromagnetskih svojstava materijala. Tradicionalna tzv. "opća teorija električnih strojeva", koja se je razvijala posljednjih

četrdesetak godina, a naročito u poslijeratnom razdoblju, s ciljem da sistematizira analizu električnih strojeva polazeći od modela (1) s diskretiziranim parametrima, koristi induktivitete određene na najjednostavniji i ranije gotovo jedino mogući način. Pretpostavlja se da namotaji stvaraju samo protjecanje s čistom sinusnom raspodjelom u zračnom rasporu, zanemarena je nejednolikost zračnog raspora zbog utora, a permeabilnost željeza smatrana je beskonačnom. Na takovim se pretpostavkama zasniva rješenje modela (1), prikazano na slici (1), a usporedbe proračuna i mjerenja pokazuju da takav, gotovo primitivni prikaz induktiviteta, veoma često zadovoljava. Mora se napomenuti da se već i tako mogu, na približan način, uzimati u obzir i neke dodatne pojave, koje nastaju zbog složene konfiguracije realnog stroja. Tako se, na primjer, utjecaj prostornih viših harmoničkih članova protjecanja namotaja, koji po svojoj naravi induciraju u armaturi napon osnovne frekvencije, prikazuje dodatnim nadomjesnim induktivitetom, tzv. dvostruko ulančenim (diferencijalnim) rasipanjem. Utjecaj zasićenja takodjer se može približno uračunati, na primjer, odgovarajućom promjenom induktiviteta u skladu s karakteristikom magnetiziranja stroja (L 5, 7).

Primjena teorije polja u kontinuiranoj sredini

Prikaz električnog stroja pomoću koncentriranih parametara nesumnjivo je fizikalno pregledan i za inženjersku praksu veoma pogodan, no on je ipak na određeni način i izraz teškoća da se električni stroj prikaže u svojoj pravoj biti, kao kontinuirana sredina, u kojoj su na složen način rasprostranjene elektromagnetske, toplinske, mehaničke i druge fizikalne pojave. Zakonitosti elektromagnetskog polja poznate su odavno, njih je egzaktno formulirao Maxwell, no mora se reći da taj fundamentalni aparat gotovo nije utjecao na praktične izume, pa niti na izume genijalnog Tesle. Matematički izrazi osnovnih elektromagnetskih zakonitosti bili su za konkretne probleme neprimjenjivi, u prvom redu zbog složenih geometrijskih oblika, što je onemogućavalo analitičke proračune. Tako su izumi industrijske revolucije prošlog i s početka ovog stoljeća nastali kao plod intuicije, a njihova kvantitativna obrada dobiva puni zamah mnogo kasnije, tek pojavom računskih strojeva. Izričiti je primjer takvih prilika istraživanje elektromagnetskog polja u električnim strojevima. Čitava

je industrija električnih strojeva iznikla i razvila se do golemih razmjera koristeći u projektiranju najjednostavnije, gotovo primitivne načine proračuna magnetskog kruga stroja, kada se uzbuda računa obilazeći približno postavljenu tzv. srednju magnetsku silnicu. Drugačije se nije ni moglo, jer je analitičko rješavanje jednadžbi magnetskog potencijala, čak i samo dvodimenzionalno, bilo nezamislivo zbog složenih stvarnih rubnih uvjeta i magnetske nelinearnosti. Analitičkim metodama bilo je moguće obuhvatiti tek poneki sasvim ograničeni detalj, kao što je proračun tzv. Carterovog faktora (povećanje djelotvornog zračnog raspora zbog nazubljenja) pomoću metode konformnog preslikavanja.

Suvremena računaska tehnika i na tom je području omogućila snažan napredak. Danas je moguća i praktično izvodiva numerička integracija Poissonove jednadžbe (eliptička parcijalna diferencijalna jednadžba), čak s uračunatom magnetskom nelinearnosti. Na taj se način rješavaju statičke dvodimenzionalne slike polja, polazeći od osnovnih zakonitosti potencijala.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -G_z \quad (4)$$

$$\vec{B} = \text{rot } A \quad (5)$$

$\vec{A}$	 magnetski vektorski potencijal
γ	 specifična magnetska reluktancija (recipročna vrijednost permeabilnosti)
$\gamma = \gamma(B)$	 u feromagnetskom dijelu
$\gamma \frac{1}{\mu_0}$	 u zraku
$\vec{G}$	 zadano polje gustoće struje

U dvodimenzionalnom slučaju poprečnog presjeka stroja zadatak se bitno pojednostavljuje. Magnetski vektor, potencijal i gustoća struje imaju samo komponentu u smjeru osi stroja (A_z , G_z), a linije konstantnog vektorskog potencijala poklapaju se s magnetskim silnicama. Kao rubni uvjeti zadaju se tada fizikalno jasna stanja magnetskih silnica na granicama promatranog područja

(silnica prolazi granicom, silnica je okomita na granicu).

Na sličan je način moguća i numerička integracija Laplaceove jednadžbe sa skalarnim magnetskim potencijalom, naravno, za područja bez strujne zone.

Numerička integracija ovakvih parcijalnih diferencijalnih jednadžbi moguća je na razne načine, s različitim metodama ubrzanja. Spomenimo dvije metode najraširenije u tehničkim istraživanjima: metodu konačnih razlika i metodu konačnih elemenata. Primjer primjene metode konačnih razlika prikazan je na slici 3, s uračunatom magnetskom nelinearnosti, što je kod nas riješeno još 1967. godine (L 20). Na taj su način rješavani i drugi detalji u električnom stroju. Metoda konačnih elemenata u nas je uvedena nešto kasnije. Rezultat primjene te metode prikazan je na slici 4, na primjeru proračuna raspodjele magnetskog polja u poprečnom presjeku realnog asinhronog stroja s uračunatim zasićenjem (L 21).

U toku je razvoj proračuna trodimenzionalnog polja u stroju, što je naročito aktuelno u njegovim čeonim dijelovima. U tim je proračunima od presudne važnosti vještina numeričkog računanja i sastavljanja programa, da bi se razvili postupci koji su na sadašnjem stupnju razvoja digitalnih računala racionalni. Numerički proračun polja u stroju za sada je u primjeni ograničen uglavnom na statička i dvodimenzionalna stanja. On može dati podloge za optimiranje stroja, tako da se što točnije proračunava njegovo magnetiziranje i parametri, što se zatim može koristiti u metodama s koncentriranim parametrima, npr. u modelu (1). Na taj se način zbližuju dva nekada veoma udaljena pristupa. Može se pretpostaviti da će se neposredna primjena teorije polja u istraživanju električnih strojeva razvijati i dalje. Poznavajući prilike polja, mogu se za svaki položaj rotora odrediti i sile, dakle, zakretni moment rotora.

x x x x x

Kombinirana primjena rezultata teorije polja i krugova
s podrobnom diskretizacijom

U analizi statičkih svojstava električnih strojeva u velikoj mjeri primjenjuju se tzv. nadomjesne sheme. One su zapravo izraz modela (1) u stacionarnom stanju, kada se on svodi samo na naponske jednadžbe. Takova predodžba može se proširiti i na djelovanje viših harmoničkih članova polja u zračnom rasporu, kada se za pojedine harmonike bilo kojeg porijekla (prostorni raspored namotaja statora i rotora, utori statora i rotora i njihovo međusobno djelovanje) sastavljaju posebno složene nadomjesne sheme. Takova analiza u suštini znači superpoziciju, u kojoj se prilike u stroju, na primjer zakretni moment i gubici, određuju odgovarajućim zbrojem, polazeći od prethodne analize pojedinih harmonika simboličkim računom. Prednost je ovakovog promatranja u njegovoj fizikalnoj preglednosti, što daje uvid u veoma suptilne podrobnosti energetske bilance stroja (L 22), a omogućuje da se postižu i dobri kvantitativni rezultati, no uvijek samo za statičke prilike, dakle za konstantnu brzinu vrtnje, ili je pak brzina samo promjenljivi parametar.

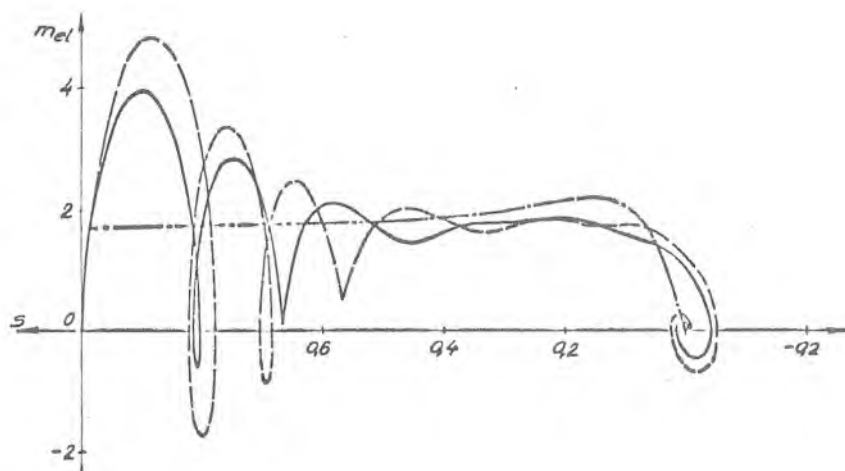
Veoma su zanimljivi pokušaji da se, koristeći ovakova razmatranja statičkih prilika u realnom stroju (raspodijeljeni namot i nazubljenje), odrede točniji oblici induktiviteta, u obliku odgovarajućih suma, nastalih zbog harmoničkog sastava polja u zračnom rasporu, pa da se na taj način upotpuni osnovni model (1). Takav je pristup moguć, naravno, samo primjenom veoma brzih digitalnih računala, što je danas već ostvarivo. On se još uvijek zasniva na superpoziciji, što zbog magnetske nelinearnosti može biti podložno kritici, no ovakova sinteza dinamike koju izražava model (1) i iscrpnog prikaza induktiviteta, dobivenog podrobnim razmatranjem svih harmonika bilo kojeg porijekla, zasigurno će u bliskoj budućnosti biti daljnji veoma značajni korak u teoriji električnih strojeva, napose na području preciznih i brzih pogona s visokoiskorišćenim motorima izmjenične struje. Ovaj pristup nesumnjivo zaslužuje pažnju i podršku (L 1).

U istraživačkoj praksi poznate su i metode koje izravno koriste zakonitosti difuzije elektromagnetskog vala u kontinuiranu feromagnetsku sredinu,

da bi se odredili parametri za finu diskretizaciju. Primjer je analiza prilika asinhronog hoda sinhronog stroja s masivnim polovinama, što je problem praktičnog značaja, zbog razvoja sinhronog motora i generatora za reverzibilne agregate. Površina pola raspodijeli se na četrdesetak zona, za svaku se od njih numerički proračuna prodiranje vala s uračunatom nelinearnošću, da bi zatim takova raspodjela poslužila za vrlo detaljnu diskretizaciju u obliku složene nadomjesne sheme. Ovakav pristup daje dobre rezultate, što pokazuje usporedba proračuna i mjerenja zakretnog momenta prikazana na slici 5. (L 19).

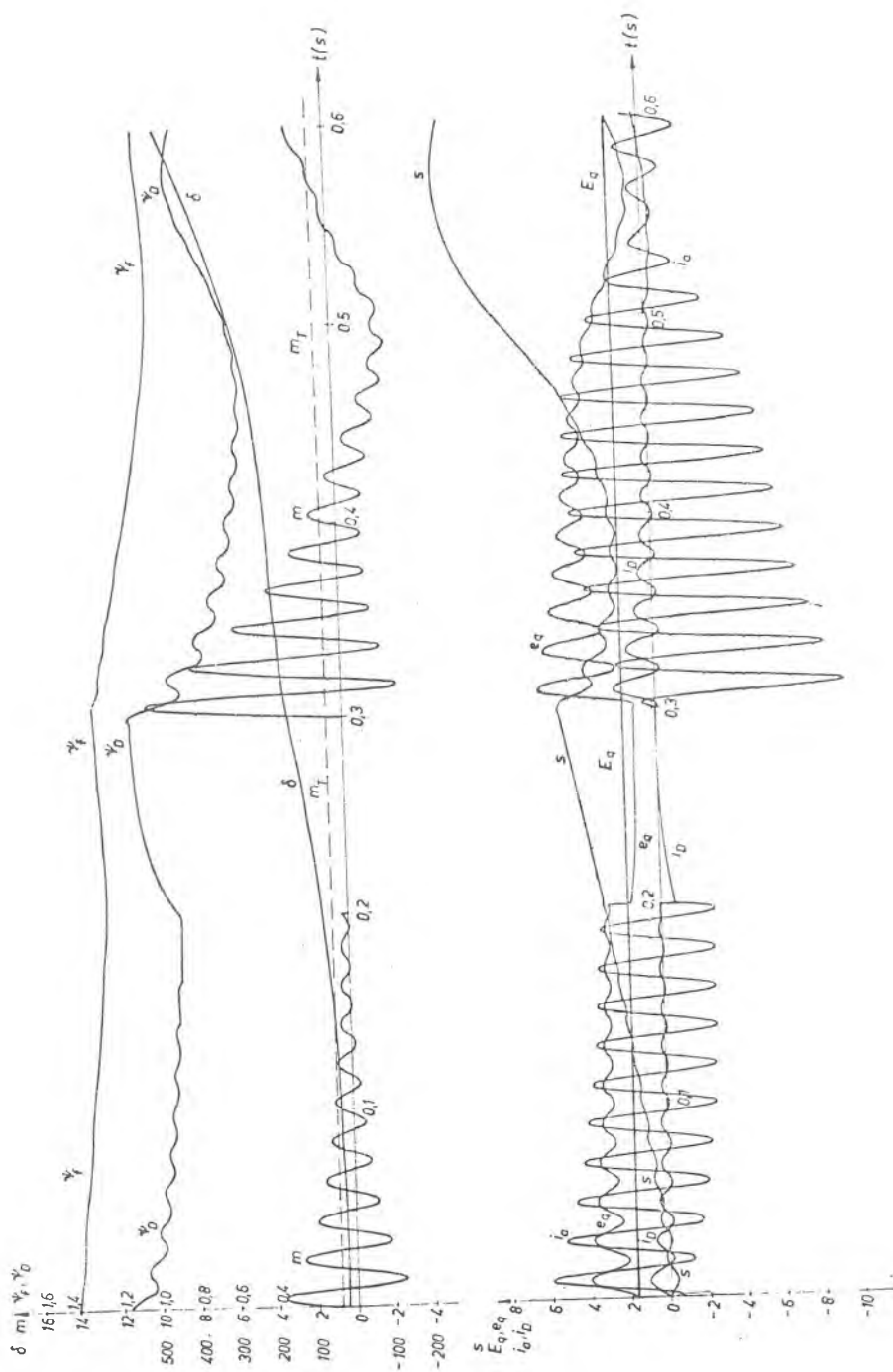
Mogućnosti analize drugih fizikalnih veličina u električnom stroju u velikoj su mjeri slične kao kod elektromagnetskih prilika. Tako se, na primjer, analiza toplinskih prilika u stroju može također zasnivati na dva krajnja pristupa, koji se danas sve više približuju: proračunu strujanja topline rješavanjem toplinskih mreža s koncentriranim parametrima, ili pak analizi toplinskog polja rješavanjem Poissonove jednadžbe, slično kao kod magnetskog polja. Sličan je razvojni put metoda koje služe za analizu i drugih fizikalnih pojava u stroju - ventilacije, mehanike, buke. Tako susrećemo obilježja vanrednog dostignuća suvremenih tehničkih znanosti - tzv. sistemskog inženjerstva, kada se naoko raznorodne fizikalne discipline zajedničkim metodama istraživanja zbližuju i zahvaljujući velikim mogućnostima suvremenih računala, postaju snažna potpora u višedisciplinarnim istraživanjima o kojima ovisi napredak električnih strojeva i njihove primjene. Time se otklanja teret nepotrebnih specijalizacija, a inženjeri postaju svestrani stvaraoci, kojima upravo dostupnost složenih metoda omogućuje uvid u svekoliku sliku električnog stroja.

Sa zadovoljstvom možemo ustvrditi da naši znanstvenici i stručnjaci daju na tom području rezultate na svjetskoj razini i ujedno se zalažu za njihovu primjenu, pa tako doprinose općem napretku zajednice. To je najbolji način da se odužimo našem velikom stvaraocu - Nikoli Tesli.

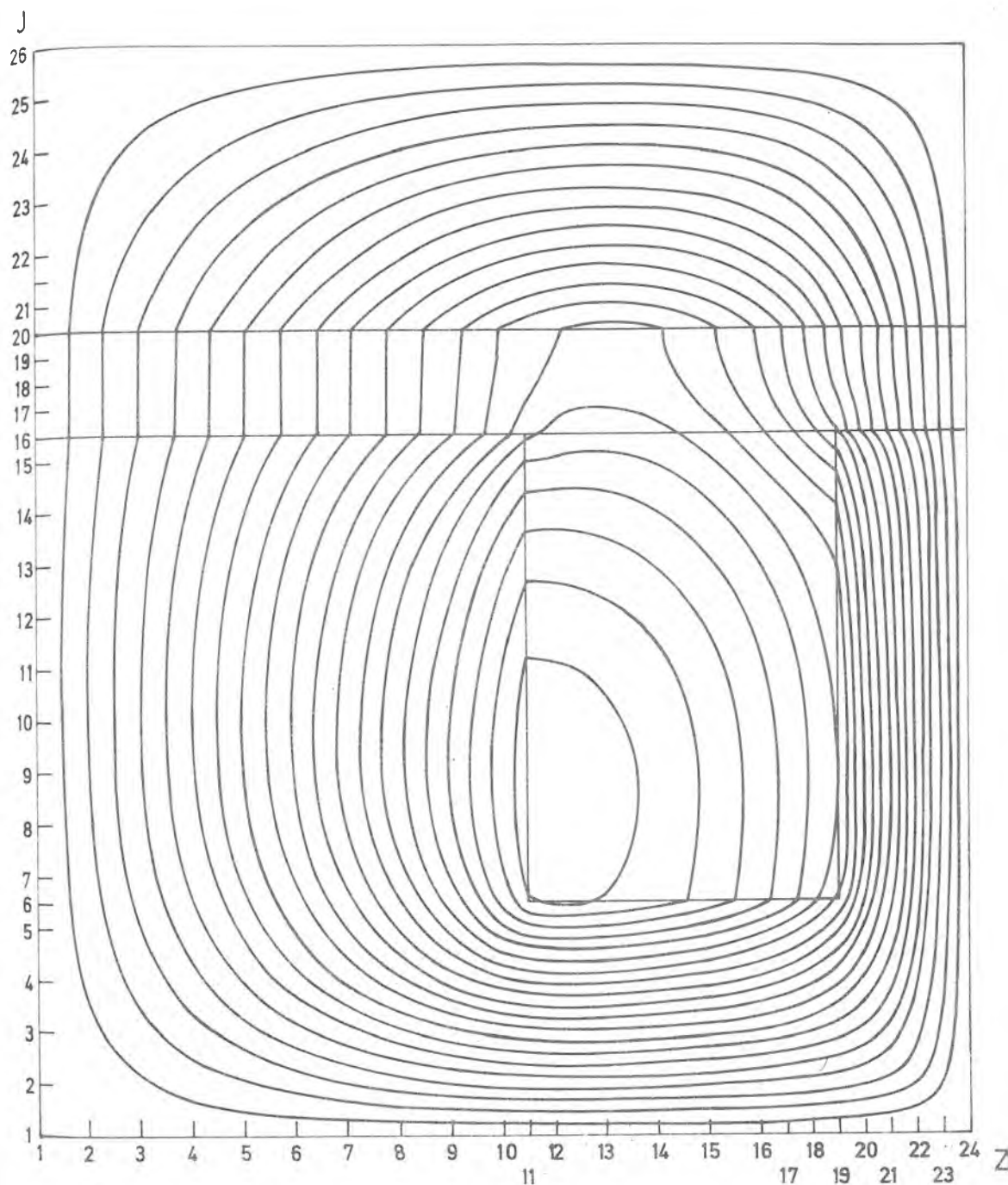


Sl. 1 (L 13) Momentne karakteristike motora ⁷

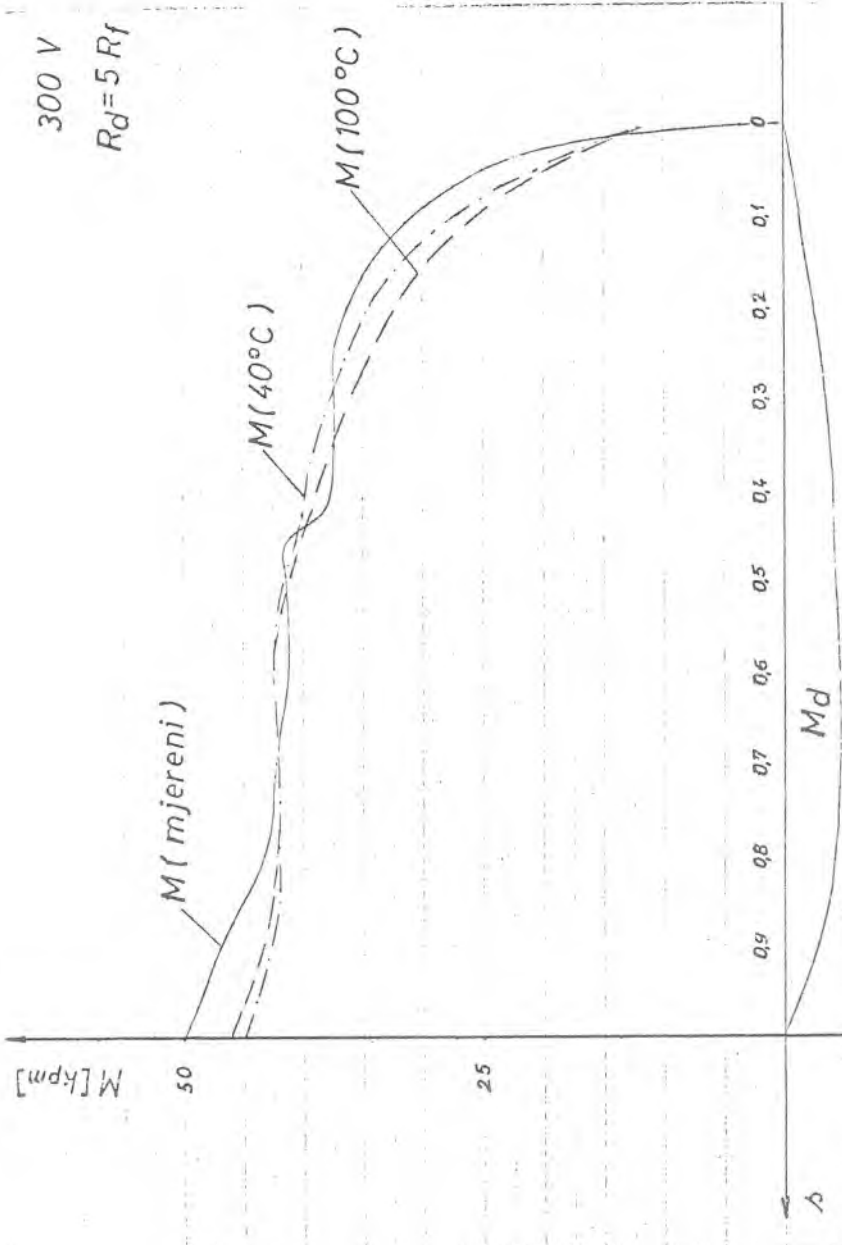
— proračun s modelom I
 ---- proračun s pojednostavljenim modelom
 -.-.- statička karakteristika



Sl. 2 (L 6) - Prelazna pojava kratki stroj - prazni kod - ponovno uklapanje, na vrtložni s prigušenjem i konstantni usledni napon T_{go}



Sl. 3 (L 20) - Magnetsko polje u zoni zuba s uračunatim zasićenjem i uzбудom 100 A/mm^2 . Proračun metodom konačnih razlika



Sl. 5 (L 19) - Moment dodatnih gubetaka u polnom stopalu (M_d) i ukupni elektromagnetski moment u ovisnosti o klizanju (s) pri naponu mreže od 300 V

Literatura

1. S. Car: Pulzacije poteznog momenta asinhronog kaveznog stroja, magistarski rad na ETF Zagreb, 1975.
2. Z. Čulig: Istraživanje izvanrednih pogonskih stanja i smetnji sinhronih generatora, I matematički model, Elektrotehnika 4/75, Zagreb
3. Z. Čulig: Istraživanje izvanrednih pogonskih stanja i smetnji sinhronih generatora, II simetrični i nesimetrični kratki spojevi, Elektrotehnika 5/75, Zagreb
4. Z. Čulig: Istraživanje izvanrednih pogonskih stanja i smetnji sinhronih generatora, III asinhrona stanja, Elektrotehnika 6/75, Zagreb
5. B. Frančić: Statička i dinamička svojstva samouzbudnih kompaundiranih sinhronih generatora, doktorska disertacija na ETF Zagreb, 1965.
6. B. Frančić, M. Kajari, V. Šantek: Analiza dinamike reguliranog sinhronog generatora pomoću digitalnog računala, referat na IX stručnom savjetovanju elektroenergetičara Jugoslavije, Vrnjačka Banja, 1968.
7. B. Frančić: Utjecaj zasićenja na parametre i dinamiku sinhronog generatora, referat na IX stručnom savjetovanju elektroenergetičara Jugoslavije, Ohrid 1972.
8. M. Jadrić: Dinamički zalet kolutnog asinhronog motora, Elektrotehnika 1/71, Zagreb
9. M. Jadrić: Vlastita njihanja asinhronog motora, Elektrotehnika 2/71, Zagreb
10. M. Jadrić: Udarno opterećenje asinhronog stroja, Elektrotehnika 6/71, Zagreb
11. M. Jadrić: Reverziranje i ponovno uklapanje kolutnog asinhronog motora, Elektrotehnika 3/72, Zagreb
12. M. Jadrić, M. Smajo: Prisilna njihanja asinhronog motora, Elektrotehnika 5/74, Zagreb

13. M. Jadrić: Dinamika kaveznog asinhronog stroja s uračunatim potiskivanjem struje u rotoru, doktorska disertacija na ETF Zagreb, 1976.
14. I. Kurtović, I. Mandić: Optimiranje rebra kao rashladnog elementa pomoću digitalnog računala, Informacije Rade Končar 59, Zagreb, 1974.
15. M. Kurtović: Obrada sinhronne mašine u nestacionarnom stanju pomoću digitalnog računala, Elektrotehnika 2/68, Zagreb
16. M. Kurtović: Analiza trofaznog udarnog kratkog spoja sinhronog generatora s pomoću digitalnog računala, Elektrotehnika 6/70, Zagreb
17. M. Kurtović: Energetski odnosi u toku udarnog kratkog spoja sinhronog generatora, referat na X stručnom savjetovanju elektroenergetičara Jugoslavije, Dubrovnik, 1970.
18. M. Kurtović: Asinhroni zalet sinhronih strojeva s izraženim polovima, Elektrotehnika 2/75, Zagreb
19. M. Kurtović: Asinhroni hod sinhronog stroja s izraženim masivnim polovima, doktorska disertacija na ETF Zagreb, 1976.
20. I. Mandić: Izrada programa za proračun magnetskog polja u zoni zuba za digitalno računalo C 90-40, Elaborat Elektrotehničkog instituta "Rade Končar" E 32052, Zagreb, 1967.
21. I. Mandić: Computation of magnetic fields in saturated iron structures with special reference to the computation of short circuit performance of induction machines with wound rotors, doktorska disertacija na Univerzitetu u Southamptonu, 1974.
22. S. Štefanko: Beitrag zur Klärung der parametrischen Vorgänge in Drehstromasynchronmaschinen und ihre Anwendung auf die Nutungsoberfelder, doktorska disertacija na TU Hannover, 1974.
23. H. Jordan, S. Štefanko: Theorie der parametrischen Vorgänge in elektromagnetischen Systemen, Archiv für Elektrotechnik 56, 1974.
24. H. Jordan, S. Štefanko: Einfluss der läuferrnutung auf die Ständerzusatzverluste leerlaufender Drehstrom - Asynchronmotoren, ETZ-A, Bd 96 H.3, 1975.
25. R. Wolf, M. Jadrić: Einfluss der Symmetrie und der Kurvenform der Spannung auf das statische und dynamische Verhalten des Drehstrommotors, Acta technica ČSAV 3, 1968.

26. B. Zelenko: A practical method for determining stationary two-dimensional magnetic field, Conference on The Computation of Magnetic Fields, Oxford, 1976.

x x x x x x

Vladimir Jarić, dipl.inž.
OOUR Tvornica generatora,
OUR "Rađe Končar", Zagreb

MEHANIKA VELIKIH ELEKTRIČNIH POSTROJENJA

Sile i momenti koji se pojavljuju kod rada električnih strojeva različitog su porijekla i izazivaju složena stanja naprezanja.

U današnje vrijeme, kada želimo dobiti što veću snagu uz što manji utrošak materijala veoma je važna analiza naprezanja, trajnosti i mehaničke stabilnosti stroja.

Čitav niz problema koji zadiru u područje dinamike, kinematike i elastičnosti obuhvaćen je jednim imenom "Mehanika velikih električnih strojeva".

Nekima od problema, opisanih u referatu, pripadaju vlastita rješenja, kao i iskustva stečena na izvedenim konstrukcijama.

MECHANICS OF LARGE ELECTRICAL MACHINES

Forces and moments appearing in electrical machine operation are of different origin, and induce complex stress conditions.

Today, when we tend to achieve maximum power with the least material, analyses of machine stresses, durability and mechanical stability are very important.

A number of problems encroaching upon the field of dynamics, kinematics and elasticity have been included by a common heading, "mechanics of large electrical machines."

Some of the described cases refer to own solutions and experiences acquired on developed designs.

1. Uvod

Osnovna zadaća električnih generatora i motora je pretvorba električne energije, pa i definiranje osnovnih parametara spada u područje elektrostrojarstva. Međutim, veoma važnu ulogu u projektiranju, konstruiranju i ispitivanju ima osim elektrotehnike i mehanika, odnosno njena primijenjena područja. Kada se električni rotacioni strojevi, o kojima je ovdje riječ, promatraju sa stanovišta statičkih i dinamičkih opterećenja, koja se neminovno javljaju, tada se uočava važnost rješavanja niza mehaničkih problema.

Optimalna gradnja, sa stanovišta mehanike i čvrstoće, daje uštedu na materijalu i siguran poslon. Velika mehanička opterećenja električnih rotacionih strojeva u nestacionarnim stanjima, kao što su pobjeg i kratki spojevi, zahtijevaju razuman pristup ovim problemima, gdje se bez rasipanja materijala mora postići visoka pogonska sigurnost. Zbog toga je potrebno stalno pratiti nove tendencije i rješenja na tom području uz veliko vlastito razvijanje. Danas, osim vlastitog iskustva i poznatih teorija, imamo moćno oružje u eksperimentalnom radu i metodama numeričke analize.

Ovdje će biti govora o skupu mehaničkih pojava kod velikih električnih strojeva, veličina kojih nije strogo ograničena nekom donjom granicom snage, jer se iste pojave susreću ponekad i kod najmanjih strojeva.

Sile i momente, koji se javljaju u radu stroja, možemo po porijeklu svrstati na: elektromagnetske, gravitacijske, inercijske, termičke, aerodinamičke, hidrauličke, te sile i momente uslijed trenja. Teško je reći, koja od ovih sila i momenata predstavlja potencijalnu opasnost za rad stroja. Tako na pr. aerodinamičke sile, koje su neusporedivo manje od inercijskih, mogu u specijalnom slučaju izazvati lom ventilatorskih lopatica kada uzbude njihovu vlastitu frekvenciju pa dolazi do rezonancije.

Stroga podjela na statička i dinamička djelovanja ne postoji, jer npr. sporo promjenljiva sila kod termičke neuravnoteženosti rotora turbogeneratorsa očituje se više kao statička nego dinamička sila. Dio sila i momenata uravnotežava se u samom stroju, gdje izaziva naprezanja u materijalu, a dio se prenosi na okolinu.

Prema karakteru djelovanja, naprezanja mogu biti dinamičke naravi nezavisno od toga da li se neki dio vrtili ili ne. Tako je npr. naprezanje u lastinom repu pola na generatoru sa istaknutim polovima, izazvano inercijskom silom u stacionarnom radu, čisto statičke naravi, jer je nepromjenljivo. Kod horizontalne izvedbe možemo inercijskoj sili superponirati vlastitu težinu pola, koja je doduše znatno manja, pa ćemo vidjeti da postoji i promjenljivo naprezanje, izazvano promjenom položaja smjera gravitacijske sile u odnosu na smjer inercijske sile, zbog rotacije.

Djelovanja izazvana neuravnoteženošću rotora ili rotirajuće komponente jednostrane magnetske sile prenose se preko ležaja na statične dijelove stroja, gdje izazivaju promjenljiva naprezanja. Ova djelovanja sudjeluju u dinamici složenog gibanja rotora, koje je ograničeno zračnostima u ležaju i veličinom elastične deformacije pripadajućih dijelova.

Vibracije statičnih i rotirajućih dijelova mogu dovesti do zamora materijala, a mogu biti i izvor buke, koja nepovoljno djeluje na ljude. Na njih isto tako djeluju i vibracije, koje se prenose na okolinu, a osjeća ih osoblje, koje radi u neposrednoj blizini agregata.

Nekoliko navedenih primjera daje uvid u raznolikost i važnost mehaničkih problema, koji se javljaju kod rotacionih električnih strojeva.

Cilj mehaničkih proračuna, istraživanja i ispitivanja elek-

tričnih strojeva je postizanje sigurnosti u radu stroja, njegova trajnost i smanjenje djelovanja na okolne uređaje i čovjeka.

2. Dinamika rotora

Rotori električnih strojeva su elastična tijela, koja rotiraju u elektromagnetskom i gravitacionom polju i pri tom, osim rotacije, vrše i tzv. precesiono gibanje. Amplituda precesionog gibanja je veoma mala kod mehaničkih stabilnih stanja, a ako počne rasti preko neke mjere, tada govorimo o nestabilnom radu rotora. Ovo je svakako nepovoljno za rad strojeva, jer se tada preko ležaja na statične dijelove prenose velike sile, koje izazivaju velike vibracije.

Nestabilnosti, o kojima je riječ, su prije svega kritične brzine, koje su analogija rezonanciji elastičnih tijela. Kada elastičan rotor postigne kutnu brzinu, koje je kružna frekvencija jednaka frekvenciji vlastitih oscilacija toga tijela kada oscilira, tada progib počinje rasti preko svake mjere, i da nema unutarnjeg prigušenja u materijalu, došlo bi do loma. Zbog toga kod brzohodnih strojeva, koji rade iznad kritične brzine, treba kod puštanja u rad i zaustavljanja paziti da se dovoljno brzo prodje kroz kritično područje. Kada govorimo o kritičnim brzinama rotora, tada obično mislimo na kritične brzine, koje su posljedica savijanja ili fleksije, pa ih zovemo fleksione, kritične brzine.

Druga grupa nestabilnosti su kritična stanja izazvana promjenljivošću nekog parametra, kao što je nejednolika fleksiona krutost rotora turbogeneratora, nejednolika krutost vodećeg i nosećeg ležaja u raznim smjerovima i drugo.

Konstantan priliv energije od djelovanja neperiodičkih sila može izazvati velike oscilacije ili stanja analogna kritičnim

stanjima. Ovu pojavu zovemo samouzbudne oscilacije i za razliku od rezonantnih stanja, čiji intenzitet brzo opada, kada se udaljujemo od kritičnih brzina, ovdje je amplituda precesije veoma velika u širokom dijapazonu brzina.

Nestabilnosti se susreću nadalje kod izrazitih nelinearnosti u sistemu rotor-ležaji-stator. Sve ove nestabilnosti ne moraju biti opasne za rad stroja, jer se često puta prigušuju i predstavljaju samo teoretski interes.

Nekada je bio zadatak konstruktera da izračuna kritične brzine i tako dimenzionira stroj, da se kritična brzina nalazi dovoljno daleko od radne brzine. Porastom dimenzija strojeva, a i optimalnijim načinom konstruiranja dobivene su velike i lagane jedinice, kod kojih se često puta mogu pojaviti i ostala nestabilna stanja, pa ih u izradi stroja treba i predvidjeti.

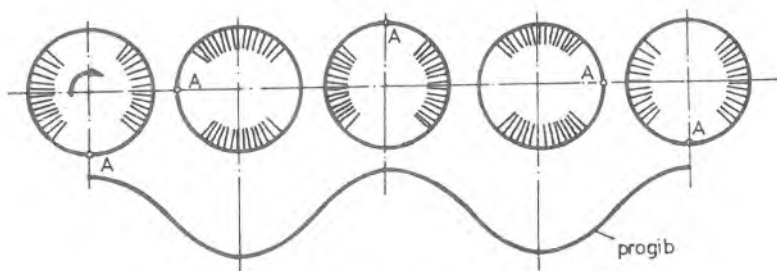
2.1. Dinamika rotora turbogeneratora

Rotor dvopolnog turbogeneratora, sa stanovišta dinamike može se promatrati kao horizontalna elastična osovina promjenljivog presjeka, koja se vrti s. 3000 min^{-1} , što je nominalna brzina kod frekvencije mreže od 50 Hz. Kod većine manjih jedinica prva kritična brzina je ispod nominalne brzine, dok je kod jedinica većih od 100 MVA često puta i druga kritična brzina ispod nominalne brzine. To dolazi od tuda što krutost sistema rotor-ležaja utječe na veličinu kritične brzine i krućem sistemu odgovaraju više kritične brzine, a kod većih jedinica krutost sistema opada.

Spajanje rotora generatora s rotorom turbine nešto ukrućuje sistem i kod turboagregata kritične brzine su nešto više, nego kada se promatraju pojedine jedinice zasebno. Na slijedećoj tablici prikazani su rezultati proračuna kritičnih brzina manjeg turboagregata.

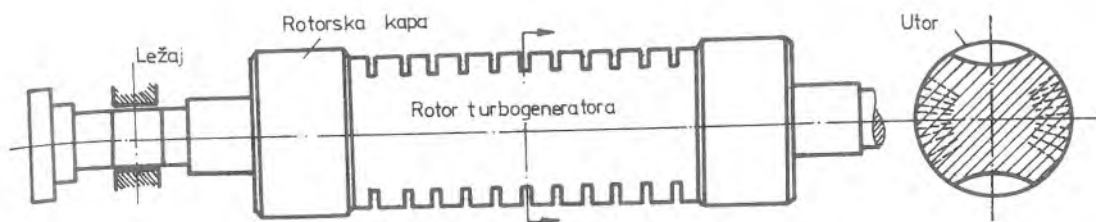
Red kritične brzine	Uvjeti oslonaca	Kritična brzina min ⁻¹		
		rotor generatora	rotor turbine	spojeni rotori
prva krit. brzina	kruti oslonci	1160	1770	1178
druga krit. brzina		3710	5225	2160
				4005
				5980
prva krit. brzina	elastični oslonci	1070	1385	1010
druga krit. brzina		2020	2706	1390
				2090
				2800

Kritične brzine mogu se uzбудiti promjenljivošću nekog parametra, pa ih zovemo parametarske kritične brzine. Zbog utora za namot kao i polova, poprečni presjek rotora turbogeneratora ima dvije glavne osi fleksione krutosti, pa je krutost rotora u vrt-nji taj promjenljivi parametar. Na sl.1 shematski je prikazan presjek rotora u raznim položajima jednog punog okretaja.



Sl. 1

Za jedan puni okret rotora progib, zbog vlastite težine i promjenljive krutosti, dva puta postiže maksimalnu i minimalnu vrijednost. Ukoliko je nominalna brzina slučajno dva puta manja od kritične brzine, ova će se uzбудiti zbog navedenog dvostrukog impulsa i doći će do intenzivnih oscilacija ležaja kod nominalne brzine. Da bi se izbjegla ova pojava, nastoji se što više izjednačiti krutost rotora, pa se u polovima režu poprečni utori kao na sl.2.



Sl. 2

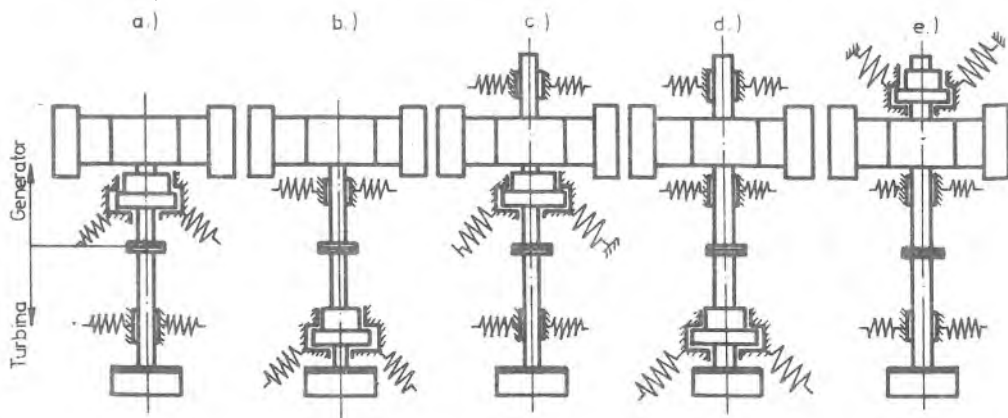
Rotor turbogenerators leži na kliznim ležajima, koji su prisilno podmazivani. U ležajima se stvara uljni film na kojemu plivaju rukavci ležaja. Uljni film se ponaša kao opruga, koja osim što je anizotropna, pa u pravcu najvišeg pritiska ima najveću krutost, ima i nelinearnu karakteristiku. Ponekad je uljni film kod rotora turbogenerators uzročnik samouzbudnih oscilacija velikog intenziteta. Ove oscilacije se pojavljuju iznad prve kritične brzine, a frekvencija im je jednaka približno frekvenciji prve kritične brzine, pa je **dijapazon brzina na kojem se uočavaju, velik**. Obično su vrlo intenzivne kod brzine vrtnje, koja je jednaka dvostrukoj prvoj kritičnoj brzini. Da bi se umanjio njihov intenzitet, izvode se ležaji s dva i više uljnih klinova, što bitno doprinosi stabilizaciji. Iako se sve naprijed navedene neugodnosti mogu izbjeći dobro izvedenom konstrukcijom, rotor se uvijek moraju uravnotežavati. Uravnotežavanjem se izjednačavaju mase, koje tehnološkim postupkom nisu mogle biti precizno rasporedjene. Uravnotežavanje rotora turbogenerators vrši se korekcionim utezima, koji se postavljaju u više ravnina, okomitih na os generatora, **broj kojih kod većih jedinica prelazi sedam**.

Zbog nejednolikog zagrijavanja rotorskog namota ili lošim odvođenjem nastale topline, može doći do nejednolikog zagrijava-

nja rotora. Posljedica toga je deformacija rotora, koja iako obično nije veća od nekoliko desetaka mikrona, kod vrtnje od 3000 min^{-1} daje ekscentričnost masa, **centrifugalna sila kojih izaziva** velike vibracije ležaja. Ova pojava se uklanja zgodnom raspodjelom zraka za hlađenje, koji struji kroz rotor i intezivnije hladi mjesta, gdje se razvija najveća toplotina. To je tzv. termičko uravnotežavanje rotora turbogeneratorsa. Pojava termičke neuravnoteženosti je praktički izbjegnuta kod šupljih vodiča što je slučaj npr. kod vodikom hlađenih turbogeneratorsa, pa medij za hlađenje struji kroz vodiče i daje jednoličniju raspodjelu topline.

2.2. Dinamika vertikalnih rotora

Kod vertikalnih električnih strojeva, a ovdje u prvom redu spadaju hidrogeneratorsi, brzine nisu tako visoke kao kod turbogeneratorsa. Najbrži hidrogeneratorsi izradjeni u poduzeću "R.Končar" imaju brzinu od 750 min^{-1} . Radi toga svi hidrogeneratorsi rade u podkritičnom području. I raspodjela masa je drugačija nego u turbogeneratorsa, pa je na sl.3 prikazano nekoliko dinamičkih modela hidroagregata.



Sl. 3

Na sl.3a/ i b/ prikazana je tzv. gljivasta konstrukcija generatora, gdje su ležaji smješteni ispod rotora generatora. Kombinirani

ležaj /radijalno-aksijalni ležaj/ većinom je smješten odmah ispod rotora generatora /a/, a ponekad do rotora turbine b/. Gljivasta izvedba se primjenjuje kod izrazito sporohodnih izvedbi, kojih nominalna brzina ne prelazi 150 min^{-1} . Izvedbe na sl. 3 c/, d/, i e/ su troležajne, a razlikuju se prema smještaju kombiniranog ležaja, kao što je to uočljivo na slici.

Za razliku od rotora turbogeneratora, koji ima beskonačno mnogo stupnjeva slobode, rotor hidrogeneratora i rotor hidroturbine može se u prvom približenju promatrati kao sistem s: dvije mase povezane međusobno i s. okolinom elastičnim vezama. To daje konačan broj kritičnih i rezonantnih stanja, koja su ovdje nabrojana:

- a/ Kritična brzina fleksionih oscilacija rotora, koja mora po mogućnosti biti iznad brzine pobjega agregata.
- b/ Njihajne oscilacije rotora, kada se rotor njiše kao kruto tijelo oko elastičnog kombiniranog ležaja. Vlastita frekvencija im je veoma niska i iznosi svega nekoliko herca.
- c/ Uzdužne ili longitudinalne oscilacije rotora, koje su obično kombinirane s. torzionim oscilacijama, a dolaze od nestacionarnih hidrauličkih sila. Frekvencija i ovih oscilacija je veoma niska, a kako se radi o prisilnim oscilacijama mogu ponekad pričinjavati neugodnosti u nominalnom pogonu.
- d/ Oscilacije lančanog rotora. U izvedbi s. tzv. lančanim rotorom najveći dio mase rotora generatora rasporedjen je na periferiji rotora pomoću čeličnih nosača, koje zovemo ruke rotora. Ta masa je povezana s. osovinom. Posljedica takove elastične veze su mogućnost osciliranja lančanog dijela rotora oko osovine i mogućnost vertikalnih oscilacija lančanog rotora. Vertikalne oscilacije se mogu uzbu-

dit i preko osovine hidrauličkim silama, a horizontalne zakretne oscilacije mogu nastati u režimu kratkog spoja.

Sva navedena kritična i rezonantna stanja mogu se izbjeći već unaprijed pravilnim dimenzioniranjem konstrukcije.

U slučaju da je u montaži ili kod precesionog gibanja rotor malo nagnut na os rotacije, dolazi do izražaja giroskopski moment, koji nastoji rotor vratiti u položaj okomit na tu os. Giroskopski moment prema tome djeluje stabilizirajuće na fleksionu precesiju, jer umanjuje fleksionu deformaciju.

Stabilnost rada nije vezana samo za navedena kritična i rezonantna stanja, jer se kadkad a mogu pojaviti nestabilnosti kao posljedica parametričkih uzbuda ili izrazite nelinearnosti elastičnih elemenata. Primjećeno je da uljni film u aksijalnom ležaju gljivaste konstrukcije kao na sl.3 b/ može uzбудiti znatne parametričke oscilacije, što je vezano i s anizotropijom takvog ležaja i s udaljenošću glavne mase od tog ležaja. Zbog toga je uputnije graditi gljivaste konstrukcije s kombiniranim ležajem ispod generatora, kao na sl.3 a/.

2.3. Dinamika rotora ostalih strojeva sa horizontalnom osovinom

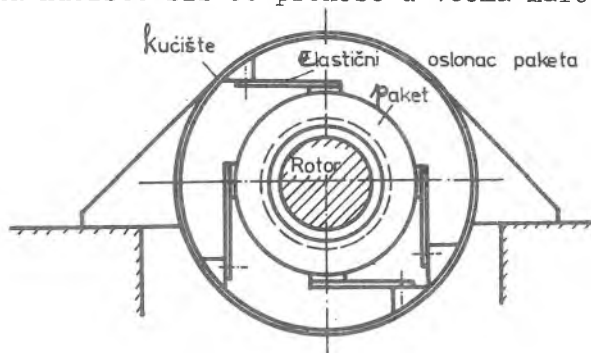
Slični problemi, kao oni opisani u prethodne dvije točke, pojavljuju se i kod motora i generatora sporijih brzina od 3000 min^{-1} , a o specifičnosti konstrukcije zavisi koja će pojava dominirati. Imamo li spregu stepni motor-generator ili stepni kompresor-elektromotor, veoma je važno obratiti pažnju na torzione oscilacije osovine, jer za puni okret osovina dobije nekoliko impulsa, koji dolaze od svakog stapa. O redoslijedu aktiviranja pojedinog cilindra, kao i o broju cilindara, odnosno stapova, zavisi koliko će utjecati i viši harmonici na uzbuđivanje vlastitih frekvencija, a ne samo harmonik nominalne brzine.

Kotrljajući ležaji također mogu biti uzročnici nestabilnog rada osovine, a frekvencija vibracija, kao što je iskustvo pokazalo nalazi se u širokom rasponu od 50-3000 Hz. Ugradnjom specijalnih bešumnih ležajeva, koji imaju nešto povećanu zračnost, mogu se te neugodnosti izbjeći.

3. Dinamika statora električnih rotacionih strojeva

Stator električnog rotacionog stroja sastoji se od statorskog namota, statorskog paketa i kućišta, koje je nosač tih dijelova. Kod mnogih horizontalnih strojeva i većine vertikalnih, stator nosi jedan ili oba ležaja. Statorski izvodi, hladnjaci i drugi dijelovi na statoru relativno male mase ne utječu dovoljno na dinamiku statora, pa ih ovdje nećemo niti spominjati. Dvije grupe sila i momenata djeluju na stator: sile i momenti elektromagnetskog porijekla, te sile i momenti mehaničkog porijekla. Magnetske sile izazivaju složene deformacije statorskog paketa, čiji se intenzitet mijenja s: višekratnikom od 50 Hz. To su prisilne vibracije statorskog paketa, kod kojih po intenzitetu obično dominiraju harmonici od 50 i 100 Hz. Statorski paket je složen od limova i tvori kompaktnu cjelinu, koja je kod turbogeneratorsa i sinhronih i asinhronih brzohodnih motora debeli cilindar, a kod većine ostalih sinhronih i asinhronih strojeva može se promatrati kao masivni prsten. Bakreni namot, koji se nalazi u utorima paketa, doprinosi ukupnoj masi paketa, ali praktički ne ukružuje paket. Vibracije paketa neugodne su radi zamora materijala paketa i zamora statorskog namota, a osim toga mogu biti izvor jake buke. Te vibracije se preko kućišta prenose na okolinu, a što se tiče buke, kućište može djelovati kao jak rezonator. Radi toga kod turbogeneratorsa velikih snaga od 150 i više MVA statorski paket se elastično učvršćuje na kućište, a jedan način učvršćenja prika-

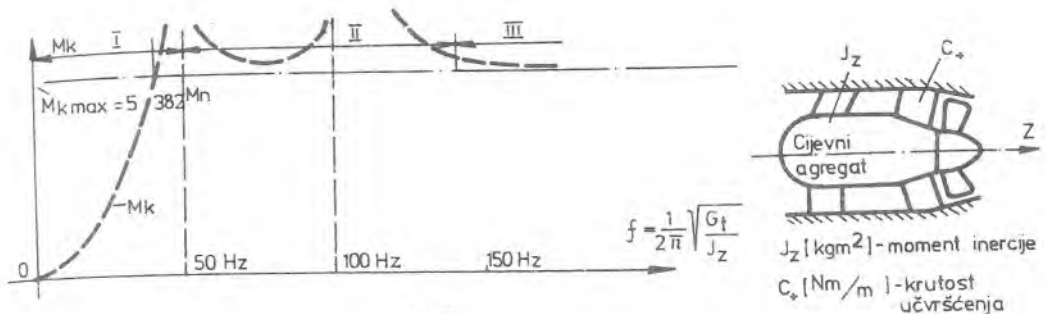
zan je na sl.4. Ova konstrukcija omogućava paketu da oscilira kao elastičan cilindar, ali onemogućava pomake paketa kao krutog tijela u prostoru. Na taj način se vibracije paketa ne prenose na kućište ili se prenose u veoma maloj mjeri.



Sl. 4

Zadatak statora je i da preuzme veoma jak dinamički moment, koji nastaje za djelovanja kratkog spoja. Kod sinhronih strojeva ovaj moment ima veliku izmjeničnu komponentu, koja doduše vrlo brzo prigušuje. Ukupni moment, koji se najviše očituje na statoru, je moment dvopolnog kratkog spoja maksimalne amplitude pet do deset i više puta od nominalnog momenta. Cijeli taj moment ne prenese se na temelje, nego se priguši u elastoviskoznom sistemu statora. Ovaj moment igra značajnu ulogu kod veoma elastičnih učvršćenja statora, kao na primjer kod cjevnih agregata, gdje je zajednički stator generatora i turbine elastično učvršćen u protočni dio. Radi hidrodinamičkih otpora ova učvršćenja ne mogu biti jako kruta, što može dovesti do velikih i dugotrajnih oscilacija cijelog agregata. Na sl.5 prikazana je prenosna funkcija momenta od dvopolnog kratkog spoja u zavisnosti o krutosti učvršćenja jednog cjevnog agregata u protočni dio, odnosno vlastite frekvencije oscilacija oko uzdužne osi. Područje I odgovara "mekom" učvršćenju, i kod ove izvedbe za djelovanja momenta kratkog spoja, dolazi do velikih oscilacija oko uzdužne osi, ali je moment

koji se prenosi na plašt pretočnog dijela znatno manji, jer se velik dio energije troši na ubrzanje masa.



Sl. 5

U području II, koje počinje ispod frekvencije 50 Hz, a završava iznad frekvencije 100 Hz prenosna funkcija ukazuje na nestabilnost učvršćenja u tom području krutosti, jer agregat dolazi u rezonanciju s dva osnovna člana momenta kratkog spoja. Vrlo kruto učvršćenje, koje odgovara području III ne doprinosi smanjenju momenta, koji se prenosi na protočni dio, ali čini konstrukciju stabilnijom u odnosu na druge vrste oscilacija agregata, koje se mogu pojaviti u nominalnom režimu rada. Stvar je kompleksne analize da li će se odabrati učvršćenje u "mekom" ili "krutom" području, s tim da se kruto učvršćenje teško postiže radi narušavanja hidrauličke funkcije pretočnog dijela.

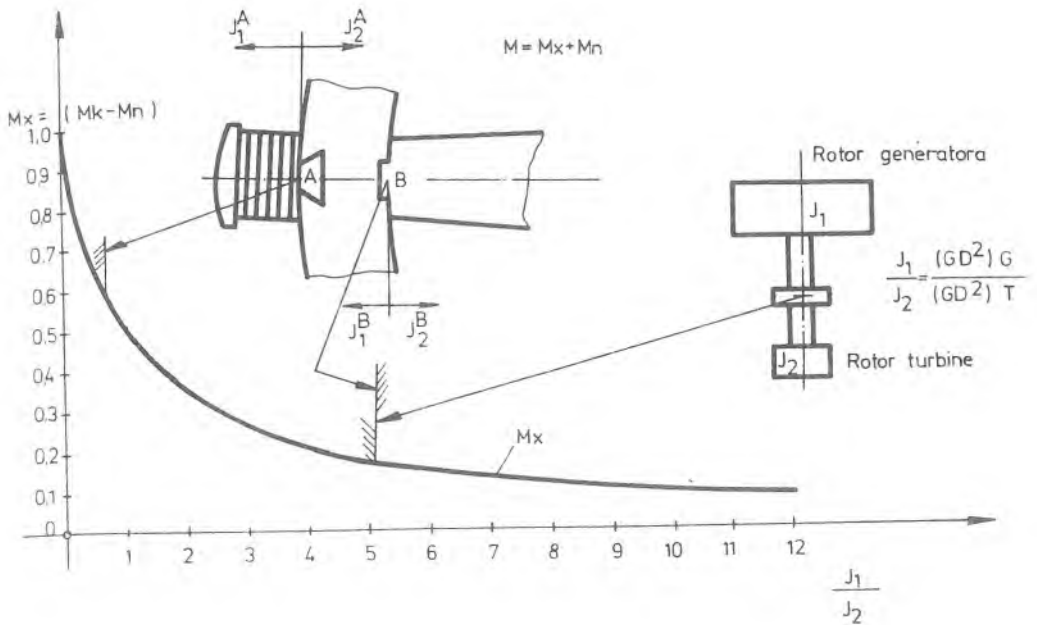
Sile i momenti mehaničkog porijekla, koji se od rotirajućih dijelova prenose na stator preko ležaja, mogu takodje izazvati rezonanciju nekog dijela na statoru ili u slučaju velike neuravnoteženosti rotora pretjerano velike vibracije. Radi toga se obavezno kod ispitivanja kontroliraju i vibracije ležaja ili nosača ležaja, te dijelova statora za koje postoji sumnja da pretjerano vibriraju.

4. Mehanička naprezanja u velikim električnim strojevima

Kao što je u uvodu rečeno suvremena gradnja električnih strojeva zahtijeva visoku iskoristivost materijala. To se može postići samo tako da se u režimima rada, kada postoje najveća mehanička naprezanja, dozvole ona maksimalna naprezanja, koja će omogućiti minimalan utrošak materijala uz siguran rad u projektiranom vijeku trajanja.

Mehanička naprezanja, koja se javljaju potječu od slijedećih sila i momenata:

- a/ uslijed vlastite težine;
- b/ uslijed djelovanja centrifugalnih sila na rotor. Najveća naprezanja nastaju kod pobjega tj. kod one brzine koju može postići rotor kod naglog rasterećenja agregata. Rotori se radi toga prilikom ispitivanja "vitlaju", tj. zavrte se na maksimalnu moguću brzinu pobjega. Brzina vitljanja zavisi o tipu stroja, a kreće se od 10% iznad nominalne brzine kod asinhronog motora, pa do cca 100% iznad nominalne brzine kod nekih hidrogenatora;
- c/ uslijed djelovanja kratkih spojeva od kojih je najneugodniji dvopolni kratki spoj, jer daje najveći zakretni moment između rotora i statora. Kao što je već rečeno taj moment se u statoru djelomično priguši, a djelomično se prenosi na temelje. Kod rotora nastoji ubrzati mase, pa mu intenzitet vrlo brzo pada od polova prema ostalim dijelovima. Ilustracije radi na sl.6 informativno je dana promjena maksimalno moguće amplitude momenta M za pojedine dijelove lančanog rotora. M_n i M_k su nominalni momenti i maksimalni moment kratkog spoja. I_1 je moment inercije dijela rotora od promatranog presjeka prema periferiji rotora, a I_2 je moment inercije ostalog dijela uključujući i turbinu.



Sl.6

Kod turbogeneratora je situacija nešto nepovoljnija, a naročito kod turbine s redukcijom brzine, gdje je ekvivalentni moment inercije turbine relativno velik, pa je moment na pri rubnici znatno veći, nego kod hidrogeneratora;

- d/ slijed magnetskih sila između rotora i statora;
- e/ slijed sila i momenata, koji se kod sinhronih strojeva pojavljuju u asinhronom radu;
- f/ slijed hidrodinamičkih sila turbine, aerodinamičkih otpora, te otpora trenja.

Najveća naprezanja nastaju kod pobjega na rotoru, a kod djelovanja kratkih spojeva na statoru, pa se dimenziniranje vezano uz mehanička naprezanja, vrši najvećim dijelom za ta stanja.

Da bi se što bolje iskoristio materijal, potrebno je odrediti maksimalna dozvoljena naprezanja, na čiju veličinu utječu fizikalna svojstva materijala, vrst naprezanja i geometrijski

oblik. Jedan od načina određivanja maksimalnih dozvoljenih napreznja, karakterističnih za električne strojeve, prikazan je na donjoj shemi.

Vrst materijala:	Karakter napreznja:	Vrst napreznja:
a/ plastični materijal	A/ vremenski nepromjenljiva napreznja	1/ jednoosno napr. 2/ dvoosno napr.
b/ kruti materijal	B/ vremenski promjenljiva periodička napreznja	3/ troosno napr.
	C/ vremenski promjenljiva slučajna, neperiodička i udarna napreznja	
Metodika računanja:	Primjena:	
1/ prema jednoj od teorija čvrstoće	a-A-1,2,3	
2/ prema graničnoj nosivosti /sigurnost prema stvaranju plastičnog zgloba/	a-A-1,2,3	
3/ prema sigurnosti od krtog loma	a-A-2,3	b-A-1,2,3
4/ prema dinamičkoj nosivosti	a-B-1,2,3	a-C-1,2,3

Primjera radi navodimo kapu rotora turbogeneratorsa, koja je u vrtnji jednoosno napregnuta uslijed tangencijalnih sila po obodu, a izrađuje se od veoma žilavog plastičnog materijala. Za pobjega je dozvoljeno kratkovremeno napreznje do 80% granice tečenja, dobivene na osnovu ispitivanja epruvete. Čvrstoća rotorske kape indirektno definira i granični promjer rotora dvopolnih turbogeneratorsa, koji ni kod najvećih jedinica ne prelazi mnogo 1,2 m.

Osim dimenzioniranja prema dozvoljenim napreznjima neki dijelovi električnih strojeva dimenzioniraju se i prema dozvoljenim deformacijama. Ovdje spadaju nosači aksijalnog ležaja i osovine.

Kombinacija između dozvoljenih naprezanja i dozvoljenih deformacija određuje tzv. brzinu odvajanja lančanih rotora hidrogeneratora i rotorskih kapa turbogeneratora. Kod velikih hidrogeneratora lančani rotori se toplo navlače na ruke rotora, da ne bi došlo kod nominalne brzine do odvajanja rotora od ruku uslijed centrifugalnih sila. U mirujućem stanju radi toga na ruke djeluje aksijalna sila, koja može izazvati velika naprezanja u rukama. Veličinom tih naprezanja određen je i početni preklop između lančanog rotora i ruku rotora, a zavisno o veličini preklopa postoji tzv. brzina odvajanja, koja je iznad nominalne brzine. Kod brzine odvajanja lančani rotor se odvaja od ruku i oslanja na zato predviđene elemente na rukama. Za vrijeme projektiranja se nastoji da ova brzina ne bude manja od 1,5 nominalne brzine, a da ne bude nikako ispod 1,2 nominalne brzine.

Slična stvar se događa i kod rotorske kape turbogeneratora, s tom razlikom da brzina odvajanja ne smije biti ispod brzine pobjega.

Naprezanja igraju veliku ulogu i kod načina učvršćenja polova hidrogeneratora s istaknutim polovima. Postoji nekoliko oblika učvršćenja polova na tijelo rotora, a zadatak je konstruktora da u skladu s tehnološkim mogućnostima i ekonomičnosti, izabere onaj oblik, koji će sa stanovišta čvrstoće, garantirati siguran rad generatora.

U posljednje vrijeme postoje zahtjevi, da u tzv. potresnim zonama električni strojevi podnesu jače potrese, kako bi mogli bez popravaka nastaviti rad poslije trusova. To u nekim slučajevima zahtijeva posebnu dinamičku analizu i kao rezultat mogu biti pojačanja konstrukcije, što poskupljuje proizvod.

5. Zaključak

U ovom informativnom referatu osvrnuli smo se na niz problema kojih je porijeklo iz mehanike i njenog širokog primijenjenog područja. Postoji još čitav niz zanimljivih i važnih primjera, koji nisu spomenuti. Ovdje namjerno nisu spominjane konkretne jedinice na kojima smo surađivali, jer često puta značaj nekog mehaničkog problema nije povezan sa značajem nekog izvedenog objekta. Iz navedenih primjera vidljivo je da je značaj mehaničkog proračuna i istraživanja veoma značajan osobito kada se uzme u obzir sigurnost pogona.

LITERATURA

- 1/ Aleksejev A.E.: Konstrukcija električkih mašina, Gosenergoizdat 1958.
- 2/ Detinko F.M., Zagorodnaja G.A.Fastovski V.M.: Pročnost i kolebanja električkih mašina. Energija 1969.
- 3/ Jarić V., Orešković G.: Dinamički model hidrogeneratora. Str.135-139, CIGRE; Budva april 1975.
- 4/ Jarić V.: Vibracije statora električnih strojeva i njihova mehanička svojstva. Str.47-55, CIGRE; Dubrovnik, oktobar 1970.
5. Jarić V., Zubović P.: O termičkom uravnotežavanju rotora turbo-generatora. Str. 28-32, Informacije R.Končar br.37/65.
6. Jarić V., Zubović P.: Uravnotežavanje elastičnih rotora. Str. 1-17, CIGRE; Mostar 1966.
- 7/ Reicher A., Jarić V.: Mechanical problems of the bulb units. IFTOMM; Dublin 1974.
- 8/ Sirotić Z., Andlar S., Jarić V., Ilakovac N.: Konstrukcija hidrogeneratora 190 MVA za HE Đerdap. Str.14-22, Informacije R. Končar 1974.
9. Vučetić A.: Osnovi fleksionih vibracija i kritičnih stanja kod osovina, koje rotiraju. Str.85-98, Informacije R.Končar, 1958.
- 10/ Wiedemann E., Kellenberger W.: Konstruktion elektrischer Maschinen. Springer Verlag, Berlin 1967.

Mr. Stjepan Novosel, dipl. inž.
Poduzeće "Rade Končar", Zagreb
Tvornica generatora

SUVREMENA TEHNOLOGIJA U GRADNJI VELIKIH ELEKTRIČNIH STROJEVA

U referatu je prikazan dosadašnji razvoj gradnje velikih električnih strojeva u poduzeću "Rade Končar". Opisani su neki od novih, danas upotrebljivanih materijala i tehnoloških procesa koji su bitno utjecali na mogućnosti gradnje i koncepciju razvoja velikih električnih strojeva.

Na ograničenom prostoru je veoma složeno dati potpuni uvid u suvremenu tehnologiju gradnje velikih električnih strojeva, stoga se na karakterističnim primjerima pokušalo ukazati na današnje stanje suvremene tehnologije u gradnji velikih električnih strojeva.

Posebno su, također, opisani neki od novih tehnoloških postupaka, koji su omogućili današnji suvremeni tehnološki proces na izradi bitnih komponenata velikih električnih strojeva.

ADVANCED TECHNOLOGY IN THE DESIGN OF LARGE ELECTRICAL MACHINES

The "Rade Končar" Enterprise has been developing and manufacturing large electrical machines for quite a few years. Some of the new, currently applied materials and manufacturing processes have substantially influenced the design and development of such machines.

The limited scope of a paper hardly lends itself to providing full insight into the modern technology of large electrical machine manufacture, and only characteristic examples are used in order to provide a cross section of the state of the art.

Some new processes have advanced the manufacturing of essential components of large electrical machines.

U v o d

U poduzeću "Rade Končar" proizvodnja velikih električnih strojeva započela je u prvim godinama poslije II svjetskog rata. Prvi su veliki strojevi-generatori rađeni u veoma složenim uvjetima, bez neophodne opreme, u improviziranim prostorijama, s oskudnim iskustvom, ali s velikom voljom za postizanje što boljih rezultata. Treba napomenuti da su u tom periodu izrađeni sjećanja vrijedni objekti. Mnogo trajnija vrijednost tih uspjeha je početak organizirane proizvodnje i smišljenog razvoja tehnoloških disciplina, vezanih za ovu vrstu proizvoda, koji su omogućili niz zaista vrijednih tehnoloških rješenja. Moramo odmah reći da za originalnost pojedinih rješenja nemaju zasluga samo pojedinci, već velika grupa tehničkog kadra, angažiranog na rješavanju ove problematike.

Na ograničenom prostoru je teško opisati sve elemente suvremenog tehnološkog procesa u gradnji velikih električnih strojeva. Stoga su u nastavku opisani samo karakteristični primjeri tehnološkog procesa, na bazi kojih je moguće zaključiti o tehnološkom nivou u gradnji velikih strojeva. Navedeni su također samo neki od danas primjenjivanih materijala, koji su bitno utjecali, ili na konstruktivna rješenja, ili na tehnologiju koja omogućuje njihovu potpunu primjenu.

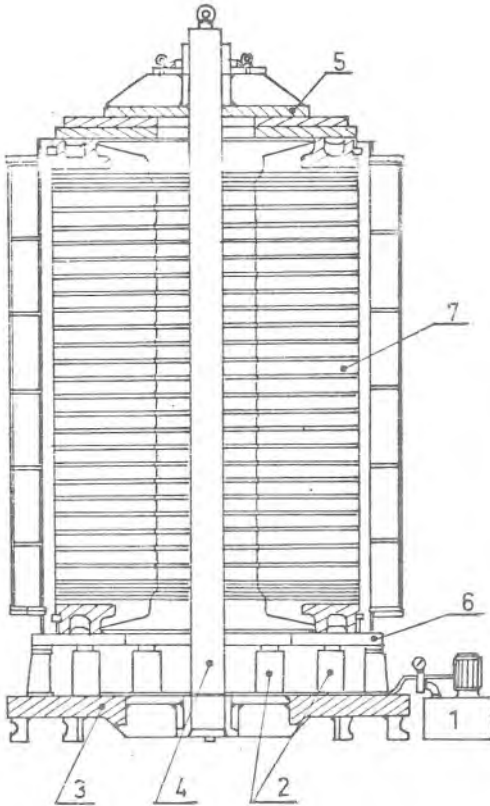
1. Tehnološki proces izrade statora

Prema našim su uvjetima razrađena tri osnovna principa u gradnji statora velikih električnih strojeva. Svaki od njih ima svoja tehničko-ekonomska opravdanja za pojedinu grupu strojeva. U nastavku

su navedena ta rješenja samo u osnovnim crtama.

1.1. Stator turbogeneratorsa

S obzirom na veličinu i neophodnu kompaktnost kućište se izrađuje u jednodjelnoj izvedbi. Statorski paket se slaže od segmentnih, međusobno izoliranih limova. Radi postizanja dovoljnog specifičnog pritiska među pojedinim limovima i postizanja odgovarajućeg faktora punjenja statorskog paketa, u procesu se pakiranja vrše višekratna prešanja specijalnim hidrauličkim uređajima.



Sl. 1-1 Uredjaj za prešanje statorskog paketa turbogeneratorsa

1- agregat, 2-cilindar prese, 3- osnovna ploča, 4- stup, 5- gornja ploča, 6- ploča za prešanje, 7- statorski paket.

Kod velikih se statorskih paketa vrši zagrijavanje cijelog paketa prilikom posljednjeg prešanja i konačnog zatezanja predviđenim steznim svornicima.

1.2. Stator hidrogenatorsa

Uglavnom je stator kod srednjih i većih generatora zbog transportnih razloga u višedjelnoj izvedbi. Stoga se kućište i statorski paket izradjuju od dva ili više segmenata. No izrada se kućišta i paketiranje statorskog paketa radi u sastavljenoj formi pojedinih segmenata. Kako se radi o najviše upotrebljavanom i tzv. standardnom tehnološkom procesu poseban opis dotičnog nije neophodan.

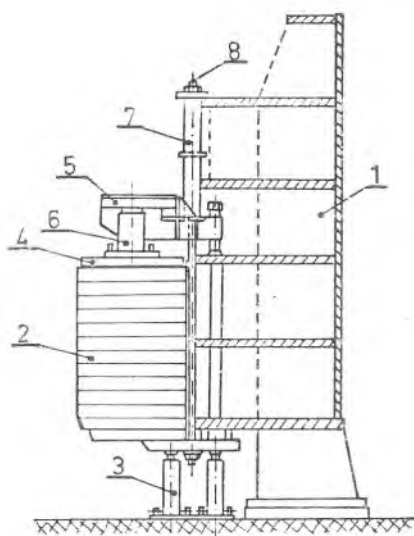
1.3. Stator najvećih hidrogeneratora

Kod najvećih se jedinica, za koje nema dovoljno mjesta na proizvodnom prostoru, koristi metoda tehnološkog procesa tzv. segmentne izrade statora. U tu svrhu se već u konstrukciji statora moraju predvidjeti određene adaptacije, koje omogućuju primjenu ovog tehnološkog procesa. Osim toga moraju postojati i određeni preduvjeti, kao npr. broj statora, broj segmenata u statoru, veličina statora, raspoloživi prostor itd. Bit ovog procesa se svodi zapravo na tretman zasebne cjeline koju u točki 1.1 i 1.2 predstavlja stator, a ovdje je to segment statora. S obzirom da se prva montaža vrši u elektrani, potrebno je osigurati identičnost sastavnih ploha međusobno susjednih segmenata statora. Kako su naknadna dotjerivanja nemoguća, potrebno je tehnološki proces, a posebno kontrolu segmenata, veoma brižljivo razraditi i provesti.

Priprema kućišta za paketiranje ovdje je jedan od složenijih problema tehnoprocasa. Stator je u principu tako riješen da se limovi statorskog paketa slažu na nosače s oblikom tzv. "lastinog repa".

Prilikom postavljanja nosača statorskog paketa potrebno je osigurati potpunu točnost u njihovom rasporedu po tetivnoj raspodjeli, koncentričnosti, paralelnosti međusobno i prema nosačima susjednih segmenata. U tu je svrhu uobičajeno raditi vrlo skupe i složene naprave, koje i pored svoje preciznosti, prvenstveno zbog veličine, često ne osiguravaju zadovoljavajuću točnost. U našoj je praksi

razvijen originalni sistem izrade ovih naprava. Radi se zapravo o prikladno složenim segmentima odštancanog lima statorskog paketa. Tako složeni dioni paket visine 40 mm učvršćen kalibriranim klinovima u utorima i montiran na odgovarajuće postolje predstavlja odličnu napravu za točno slaganje nosača statorskog paketa. Ovako su izrađene naprave potpuno zadovoljile u pogledu točnosti, kako kod ove vrste statora, tako i kod velikih turbostatora, kod kojih je predviđen isti sistem učvršćenja statorskog paketa. Na Sl. 1-2 prikazan je presjek segmenta statora s dijelom statorskog paketa i uređajem za prešanje.



Sl. 1-2 Presjek segmenta statora s dijelom statorskog paketa i uređajem za prešanje.

1- kućište statora, 2- statorski paket, 3- poderive podloge, 4- ploča, 5- nosač, 6- hidraulična preša, 7- odstojna cijev, 8 - vijak

Na kraju naglasimo još da se proizvodni ciklus kod ovog sistema značajno smanjuje u odnosu na klasični. Tako npr. ako su za izradu kompletnog kućišta potrebna 4 mjeseca, za pripremu i paketi-ranje 3 mjeseca, te ulaganje statorskog namota 4 mjeseca, onda je za izradu kompletnog statora u klasičnom tehnološkom procesu potrebno 11 mjeseci.

U slučaju da je stator sastavljen od šest dijelova, svaku šestinu možemo tretirati kao zasebnu cjelinu. U usporedbi s vremenom

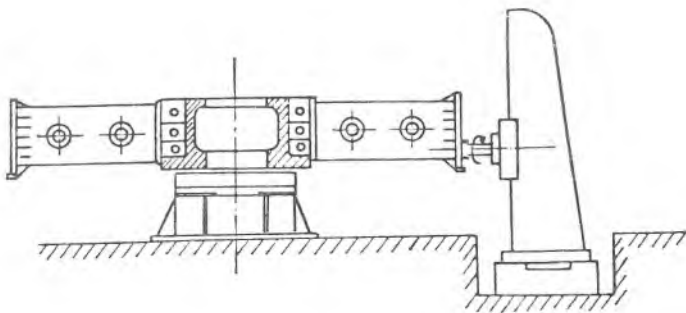
iz klasičnog načina izrade možemo **reći** da je za 1/6 kućišta potrebno ~~4-6~~ mjeseci. Analogno je za pripremu i paketiranje 1/6 statora potrebno 3-6 mjeseci, a za ulaganje 1/6 statora ~~4-6~~ mjeseci. Prikladnim se planiranjem može postići ulaganje namota u jednu šestinu, priprema i paketiranje druge **šestine**, izrada **treće** itd. Račun rada pokazuje da je ukupni ciklus proizvodnje jednog statora nešto više od 5 mjeseci.

Istina, ovdje **je** uzeto idealno tehnološko vrijeme, no bez obzira na potrebno stvarno vrijeme odnos u usporedjivanim slučajevima ostaje isti.

2. Obrada velike zvijezde rotora

Kod velikih se generatora pojavljuje problem obrade vanjskog promjera zvijezde rotora. Neki proizvođači posjeduju veoma velike strojeve tipa "karusel" na kojima je tu obradu moguće izvršiti.

U našim je **uvjetima** razradjena metoda obrade vertikalnom glodalicom na okretnom postolju prema Sl. 2-1.



Sl. 2-1 Prikaz obrade zvijezde rotora vertikalnom glodalicom

Iz slike je vidljiva zvijezda rotora postavljena na okretnom postolju, koje je tako uležišteno da se podizanjem hidrauličkim sistemom zvijezda rotora može zakretati u traženi položaj prema vertikalnoj glodalici. Os rotacije alata za obradu u svakom položaju

vretena mora spjeći os rotacije okretnog stola. Osim toga za točnu obradu uvjet je da ove dvije osi rotacije uvijek zatvaraju pravi kut.

U našoj su tvornici ovim načinom obrade postignute potpuno zadovoljavajuće točnosti.

3. Trapezni uzbudni namoti

Kod nekih se generatora optimalna konstrukcija s obzirom na probleme hlađenja i mehanička naprezanja u rotoru postiže uzбудnim namotom čiji je poprečni presjek trapeznog oblika.

Kod izvedbe takovog namota neophodno je bilo riješiti određene tehnološke probleme. Kako je poprečni spoj pojedinih zavoja u namotu različitih dimenzija, a osim toga i formiran koncentrično u odnosu na os rotacije pola, potrebni su određeni zahvati na izradi takovog polnog namota. Odrezivanje pojedinih spojeva vršeno je grupiranjem jednakih pozicija svakog polnog namota. Nakon zavarivanja određenih pozicija u polnom namotu u posebnoj je napravi formiran konačni oblik sa zakrivljenim dijelovima. Izoliranje uzbudnog namota međuzavojno i prema polnoj jezgri standardne je izvedbe. Izradjeni su namoti u višegodišnjoj eksploataciji potvrdili mogućnost primjene ovog sistema.

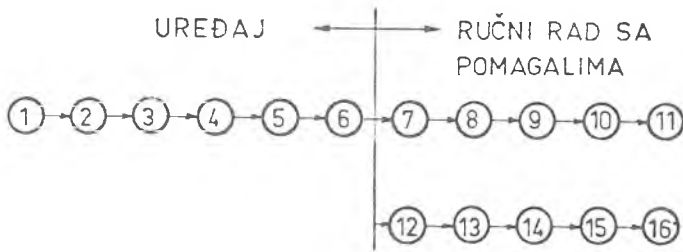
4. Izrada namota velikih strojeva

U izradi i izoliranju namota za visokonaponske strojeve u nizu standardnih rješenja ima i nekih specifičnosti. S obzirom na raspoloživi prostor prikažimo u osnovnom samo slijedeća :

4.1. uređaj za izradu neizoliranog štapa

S obzirom na godišnji broj proizvedenih štapova u našoj se tvornici godinama koristi improvizirano rješenje, korištenjem jednog starog stroja za rezanje i ravnanje dičnih vodiča. No, treba reći, da

je u fazi montaže uređaj za kompletnu izradu reblovanih štapova. Osnovna i tehnološka linija tog uređaja prikazana je na sl. 4-1.



Sl. 4-1 Osnovna linija izrade reblovanih štapova

1- odmatanje s koluta, 2- ravnanje vodiča, 3- skidanje izolacije na krajevima, 4- transport, 5- rezanje, 6- slaganje, 7- savijanje pregiba, 8- reblovanje, 9- ulaganje vert.uloška, 10- sastav i izol. prepleta, 11- ispuna prepleta, 12- omatanje folijom, 13- odlaganje za transport, 14- transport, 15- kalibriranje, 16- čišćenje.

Napomenimo samo da je čišćenje krajeva štapa s predizoliranim dionim vodičima složen problem. Stoga je u uređaju predviđen slog rotirajućih žičanih bubnjeva za automatsko skidanje izolacije na krajevima dionih vodiča.

4.2. Nanošenje osnovne izolacije

U suvremenim sistemima izoliranja dominiraju kao rješenja kontinuirane izvedbe visokonaponskih namota. Ta izvedba se na današnjem stupnju tehnološkog razvoja postiže omatanjem prikladnih vrpca za izoliranje. Sam proces omatanja štapova izvodio se uglavnom ručno, uz veoma veliki utrošak radnog vremena. Osim toga kvalitet izoliranog štapa je između ostalog rezultat uvježbanosti, pažnje i trenutnog raspoloženja radnika.

Zbog toga je u našoj tvornici izradjen uređaj za strojno bandažiranje visokonaponskih namota. Korištenjem parcijalnih rješenja u danas poznatim strojevima za omatanje vrpcoma razradjen je naš sistem.

Uvedenim je sistemom omogućeno omatanje bilo kojim vrpčama za izoliranje, uz traženu točnost prijeklopa vrpce i jednostavnu prilagodljivost na svaki oblik namota. Ovdje se kao optimalno rješenje traženih zahtjeva pokazalo korištenje bandažiranog predmeta - štapa kao vodilice uredišja.

Rotirajući je prsten, na kojem su smještene vrpce za izoliranje, smješten u kućištu s vodećim valjcima, koji radi određenog prenosnog omjera s prstenom i stalnog pritiska na bandažirani predmet osiguravaju konstantni posmak stroja. Cijeli je stroj antigravitacijski zavjesen tako da je rukovanje veoma jednostavno.

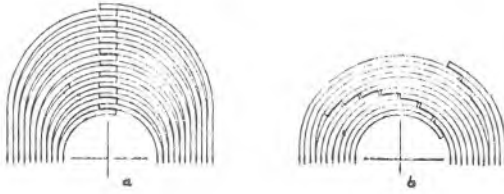
Treba još samo reći da se prilikom bandažiranja vrpčama s odjeljivačkom folijom, dotična prilikom rada automatski odjeljuje i posebno namata na rotirajući valjak. Kvaliteta bandažiranja je potpuno udicačena, a vrijeme je deseterostruko smanjeno u odnosu na ručno bandažiranje namota.

5. Ulaganje statorskog namota

Prelaskom na izolacije namota na bazi kontinuiranog tinčevog papira i modificiranih epoksidnih smola, klasičan je način umetanja pojedinih štapova u utore statorskog paketa, neprikladan.

U nasoj se tvornici razradjena naprava za utiskivanje štapova u utore. Primjenjeni se način tehnološkog procesa, iako sporiji od klasičnog, pokazao izvanredno pouzdanim.

Navedimo još samo kao zanimljivo rješenje spajanje štapova statorskog namota. Budući se radi o veoma delikatnoj operaciji tehnološkog procesa, koja uz lošu izvedbu može imati velike materijalne štete, analizirani su poznati načini spajanja. Od svih se varijanti u našoj eksploataciji najsigurnijim pokazao poznati spoj po dva diona vodiča preklopno zavarena, prikazan na sl. 5-1.



Sl. 5-1 Spoj glave namota

Veliki je nedostatak ovog spoja što je visina glave namota, zbog preklopa zavarenih dionih vodiča, dvostruka u odnosu na normalnu.

Naša je varijanta ovog spoja prikazana na sl. 5-1 a. Iz slike se vidi da su zadržane sve prednosti odabranog spoja, uz ukupnu visinu glave namota, neznatno veću od normalne.

Mr. Davorin Paljan, dipl. ing. el.
Elektrotehnički institut "R. Končar"
Zagreb

BUKA ELEKTRIČNIH STROJEVA

Moderni su električni strojevi jednom zbog velikog područja primjene, a drugi put zbog visokog iskorištenja, značajni izvori buke. Uzroci buke su aerodinamičkog, magnetskog i mehaničkog podrijetla. Buka električnog stroja može zavisiti o tehnologiji izrade i o pogonskom stanju.

Zadaća smanjenja buke električnog stroja zahtijeva poznavanje više različitih tehničkih oblasti: elektrostrojarstva, aerodinamike, teorije vibracija i akustike.

ELECTRICAL MACHINE NOISE

Because of the vast field of their application and the very high utilization rate electrical machines represent significant sources of noise. The noise of an electrical machine can depend on manufacturing technology and operating conditions.

The reduction of electrical machine noise requires knowledge of several fields of engineering: electrical engineering, aerodynamics, theory of vibrations, and acoustics.

1. Uvod

Električni je stroj u usporedbi s drugim strojevima razmjerno slab zvučni izvor. Akustički stupanj djelovanja, to jest omjer između zračene zvučne snage i nazivne snage električnog stroja iznosi cca 10^{-8} , dok je odgovarajuća vrijednost npr.

za diesel-motor 10^{-6} , a za mlazni motor čak 10^{-2} .

Značaj električnog stroja kao izvora buke i stalna tendencija smanjenja razine te buke proizlazi iz slijedećeg: električni motor je danas nezamjenjiv pogonski stroj u svim područjima ljudskog rada ili boravka. Nadalje, zbog stalnog tehnološkog razvoja znatno su povećana naprezanja aktivnih i konstrukcijskih dijelova strojeva: magnetska, električna, termička i mehanička. Posljedica toga je činjenica da su današnji visokoiskorišteni električni strojevi izvori znatno većih zvučnih snaga nego starije teške i slabo iskorištene konstrukcije.

Buka električnog stroja može biti aerodinamičkog, magnetiskog i mehaničkog podrijetla. Ali, ona može zavisiti i o pogonskom stanju i kvaliteti izrade.

Koliko god, međutim, buka bila neizbježan pratilac današnjih električnih strojeva, postojeća teorija pruža i praktične mogućnosti da se pojava buke svede u prihvatljive granice, a da se pri tom bitno ne naruše tehničke i ekonomske značajke strojeva.

Zadaća smanjenja buke električnog stroja bezuvjetno zahtijeva pristup s nekoliko posve različitih tehničkih ili znanstvenih aspekata. U prvom redu to je potpuno poznavanje teorije električnog stroja. Područje aerodinamike i tehnike strujanja plinova ili tekućina vezano je za aerodinamičku buku. Teorija vibracija daje odgovor na ponašanje elemenata konstrukcije izvrgnute magnetskim ili mehaničkim silama. I u jednom i u drugom slučaju tek uz pomoć akustike može se izračunati koji se dio mehaničke energije pretvara u zvučnu i kakve su tipične karakteristike takvog zvučnog izvora.

2. AERODINAMIČKA BUKA

Svaki nestacionarni proces u plinu ili tekućini popraćen je stvaranjem zvuka. Glavni uzroci aerodinamičke buke jesu: stvaranje vrtloga pri gibanju čvrstih tijela u plinu, promjene tlaka na lopaticama rotirajućih dijelova konstrukcija zbog nejednolikosti strujanja; periodične promjene tlaka pri prolazu rotirajućih dijelova mimo blizih nepokretnih dijelova konstrukcije. Ostale vrste aerodinamičkog zvuka: zvuk slobodne struje, gorenje, kavitacija i strujanje pri nadzvučnim brzinama nisu značajne u elektrostrojarstvu. Izvori aerodinamičke buke električnog stroja jesu: ventilator, rotor, te strujanje zraka kroz ventilacione puteve.

Vrtložni šum: U aerodinamičkoj se struji iza čvrstog tijela stvaraju vrtlozi. Karakteristike toga strujanja zavise o brzini tijela prema sredstvu, te obliku i dimenzijama tijela. Odvajanje vrtloga od tijela je oscilirajući proces, kojemu je srednja frekvencija proporcionalna srednjoj brzini strujanja. Zvuk nastaje isključivo pri stvaranju vrtloga. Pulzacione sile koje nastaju u procesu odvajanja vrtloga djeluje okomito na smjer strujanja, tako da izvori zvuka ovog tipa imaju usmjernu karakteristiku kao akustički dipol. Zvučna snaga takvog izvora proporcionalna je primarno brzini strujanja:

$$P_{zv} \approx v^3 \quad (1)$$

Ostali parametri, kao što su geometrijska svojstva tijela i fizikalna svojstva sredstva, znatno su manjeg utjecaja.

Koeficijent β ima iznos reda veličine 6 i u slučaju rotacionih aerodinamičkih izvora, što znači da do udvostručenja obodne brzine ventilatora povećava razinu za 18 dB.

Nejednolikost strujanja karakteristika je aerodinamičkih strojeva s rotacionim gibanjima. Svaka vrteća lopatica izaziva lokalne poremećaje u struji zraka na ulazu u kolo, koji su popraćeni pulzacijama tlaka. Takve pulzacije javljaju se i na nepomičnim dijelovima u struji, ali s ispravno oblikovanim putevima na ulazu, odnosno izlazu iz rotirajućeg dijela, mogu te pulzacije, dakle i zvuk, smanjiti. Zvučna snaga, koja se stvara zbog nejednolikosti strujanja, zavisi o obodnoj brzini i ostalim fizikalnim parametrima na sličan način kao i vrtložni šum.

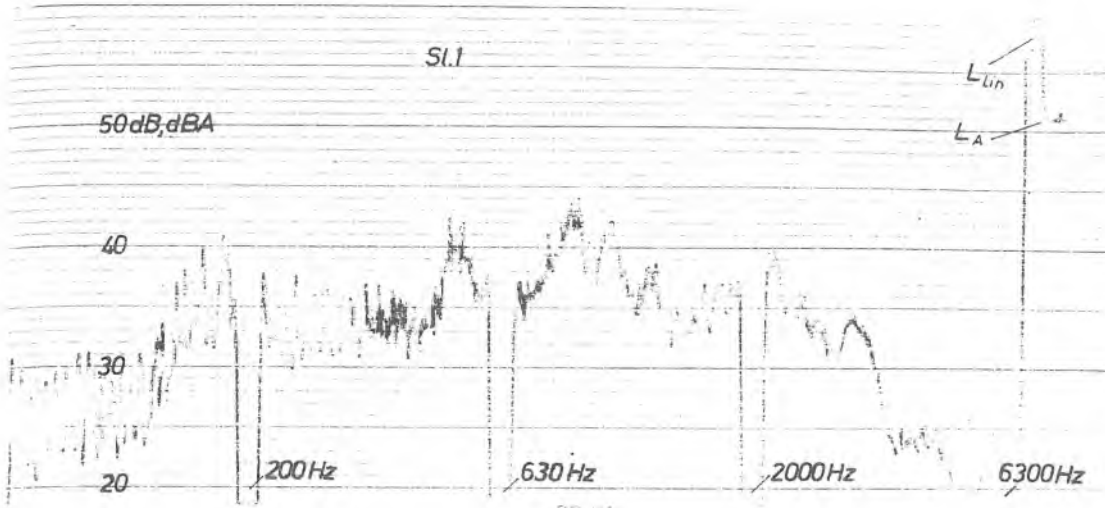
Periodične pulzacije tlaka nastaju na izlazu struje iz rotacionog dijela ako se u blizini nalaze nepomični konstrukcijski dijelovi. Frekvencija pulzacija tlaka, dakle osnovna frekvencija zvuka koji se pri tom stvara iznosi:

$$f = \frac{n \cdot Z}{60} \quad (2)$$

U toj relaciji n znači broj okretaja, a Z broj lopatica ventilatora. Često se puta osim osnovnog javljaju i viši harmonici. Spektar ovakvog zvuka ima tonalni karakter.

Zvuk vrtloženja i nejednolikost strujanja sastavljeni su od nepravilnog niza pojedinačnih, međusobno nezavisnih zvučnih impulsa. Ti procesi nisu stacionarni te se mogu opisati isključivo statističkim metodama. Spektar takvog zvuka je kontinuiran u širokom frekvencijskom području, dakle ima karakter šuma. Na sl.2 prikazan je tipičan spektar aerodinamičkog šuma, specijalnog motora od 10 kW, 1000 °/min sa smanjenom razinom buke.

Iako sami ventilatori imaju izraženu usmjernu karakteristiku, ta se usmjerenost smanjuje nakon ugradnje u električni stroj.



Aerodinamička se buka javlja na svim vrstama električnih strojeva s prigradenim ventilatorom. Pri obodnoj brzini ventilatora od 50 m/s razina buke ventilatora iznosi po prilici 90 dBA. To znači da ta vrst buke dominira na brzohodnim asinhronim istosmiernim strojevima, te na svim hidro- i turbogeneratorima.

3. MAGNETSKA BUKA

U zračnom rasporu električnog stroja, osim osnovnog vala indukcije $b_1(x,t)$, postoje i nizovi viših harmonika indukcije različita podrijetla tako da se, sasvim općenito, polje u rasporu može prikazati jednažbom:

$$b(x,t) = b_1(x,t) + \sum_i \sum_{\mu} b_{\mu i} \quad (3)$$

Promatrajmo dva takva vala, koji neka su prostorno i vremenski raspoređeni duž zračnog raspora.

$$b_y(x,t) = B_y \cos(\gamma x - \omega_y t - \varphi_y)$$

$$b_z(x,t) = B_z \cos(\gamma z - \omega_z t - \varphi_z)$$

(4)

Njihov zbroj jednak je:

$$\bar{b}_{y,z}(x,t) = \bar{b}_y(x,t) + \bar{b}_z(x,t)$$

(5)

Površinska magnetska sila, to jest specifično naprezanje normalno na površinu željeznih ploha koje omeđuju zračni raspor, izazvano valom $b_{\gamma\lambda}(x,t)$ je:

$$\sigma(x,t) = \frac{1}{2\mu_0} b_{\gamma\lambda}^2(x,t) = \frac{1}{2\mu_0} [2b_{\gamma}(x,t) \cdot b_{\lambda}(x,t) + b_{\gamma}^2(x,t) + b_{\lambda}^2(x,t)] \quad (6)$$

Prvi član ove jednadžbe može se napisati u obliku:

$$\sigma(x,t) = \frac{1}{2\mu_0} B_{\gamma} B_{\lambda} \cos(rx - \omega_r t - \varphi_r)$$

Dakle i magnetska je sila val, prostorno i vremenski raspoređen, pri čemu je:

$$r = v \pm \lambda \quad \text{red sile} \quad (7)$$

$$\omega_r = \omega_{\gamma} \pm \omega_{\lambda} \quad \text{frekvencija magnetske sile}$$

s obzirom na mirujući koordinatni sustav na statoru.

Druga i treća komponenta ove jednadžbe također su sile kojima je red r vrlo velik, a ω_r razmjerno malen, tako da u pogledu buke nisu značajne.

Pod djelovanjem magnetskih sila dolazi do elastičnih deformacija paketa a i kućišta stroja, pri čemu je od bitne važnosti red sile r i frekvencija f_r .

Mehanički odziv paketa stroja može se relativno jednostavno izračunati ako se pretpostavi da je paket slobodan cilindar u prostoru. Činjenica je, međutim, da je paket ugrađen u kućište, te da između njih postoje elastične veze kojih karakter ovisi o konstrukciji i izvedbi. Kućište stroja oslanja se na podlogu preko nogu, što također utječe na frekvencijsku karakteristiku odziva, a slično djeluju i ležajni štitovi koji ukružuju kućište. U točnom proračunu mehaničkog odziva stroja sve te elemente treba uzeti u obzir. Proračun vlastitih frekvencija i progiba paketa

znatno je složeniji od proračuna uzбудnih sila.

Treći čimbenik od koje zavisi buka stroja jest sposobnost zračenja zvučne energije. Karakteristike zvučnih izvora mogu se jednostavno izračunati ako oni imaju neku od elementarnih geometrijskih formi: kugla, beskonačno dugačak cilindar, beskonačno velika ravna ploha. Oblik električnog stroja samo u gruboj aproksimaciji može se zamijeniti takvim idealnim oblikom.

Na zračenje paketa kao primarnog izvora također utječe i kućiste stroja koje može, zavisno o konstrukciji, formi vibriranja i frekvenciji pa čak i tehnologiji, djelovati kao sekundarni izvor zračenja i kao akustički izolator.

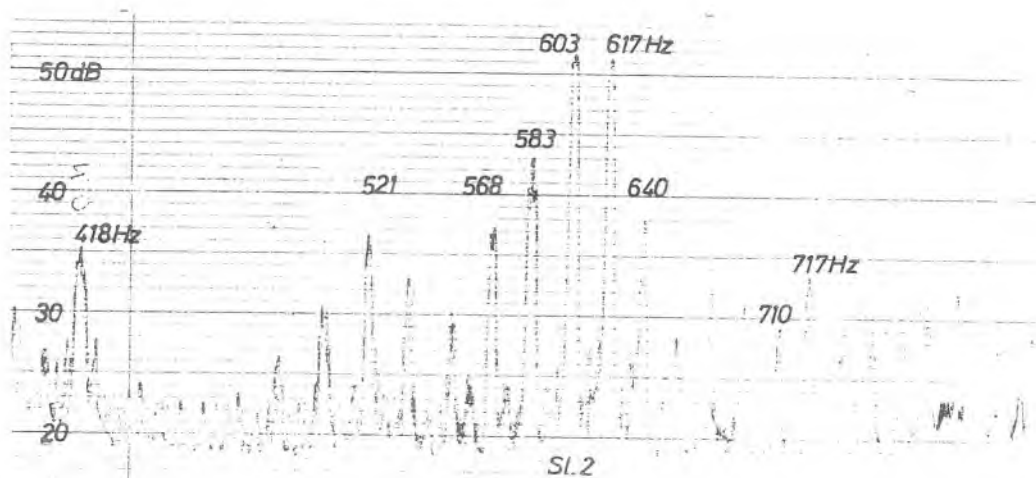
Zvučna snaga magnetske buke općenito je funkcija slijedećih veličina:

$$P_{zv} = f(Y_r, f_r, \gamma_{zv}) \quad (9)$$

pri čemu Y_r označava dinamičku amplitudu progiba izazvanu uzbuđnom silom F_r , frekvencije f_r , a γ_{zv} akustički stupanj zračenja stroja za formu vibriranja r . Progib Y_r razmjeran je uzbuđnoj sili, a obrnuto razmjeran dinamičkom faktoru rezonancije, tako da na točnost proračuna buke znatno više utječe točnost proračuna mehaničkog odziva nego točnost proračuna iznosa uzbuđne sile.

Spektar magnetske buke je diskretan, pri čemu u tom spektru mogu neke frekvencije izrazito dominirati. Na sl.2 prikazan je spektar magnetske buke asinhronog kaveznog motora snimljen uskopojasnim analizatorom pojase širine 5,15 Hz.

Budući da je izvor zračenja magnetske buke plašt paketa, takav izvor ima izraženu usmjernu karakteristiku. Ukoliko magnetsku buku uzrokuje nesimetrija magnetskog ili električnog kruga, može se dogoditi da se frekvencije diskretnih tonova vrlo malo razlikuju, pa dolazi do pulzacije razine zbog interferencije blizih tonova.



Magnetska buka je najznačajnija na asinhronim kaveznim motorima, što je posebno važno jer su ti motori ujedno i najrasireniji električni strojevi. Frekvencijsko područje magnetske buke na asinhronim strojevima je od 400–4000 Hz, dakle upravo ono gdje je ljudsko uho najosjetljivije.

Na turbogeneratorima se pojavljuje magnetska buka uzrokovana radijalnim titranjem uslijed glavnog polja na dvostrukoj frekvenciji mreže.

Na hidrogeneratorima, a posebno onima s razlomljenim brojem utora na pol i fazu, može se pojaviti buka uzrokovana interferencijom harmonika.

Magnetska buka istosmjernih strojeva nastaje zbog radijalnih vibracija i savijanja glavnih polova, koje se prenose na stator, a češća je na sporohodnim strojevima.

4. MEHANIČKA BUKA

U radu električnog stroja javljaju se zbog gibanja njegovih rotacionih dijelova dinamičke sile. Te sile izazivaju vibracije, u prvom redu na frekvenciji rotacije, a zatim i u širem frekvencijskom području i obično su popraćene zračenjem zvuka.

Izvori mehaničkih vibracija mogu biti neuravnoteženi rotacioni dijelovi, ležajevi, te klizni kontakt četkica.

Neuravnoteženost rotora uzrokuje vibracije ležajnih štitova i preko štitova prenosi se na čitav stator. U radu kotrljajućih ležajeva dolazi zbog nesavršenosti izrade do periodičnih sila, zbog kojih sam ležaj postaje zvučnim izvorom. Međutim, značajniji je izvor zvuka ležajni štit na kojeg se prenose vibracije ležajeva, naročito onda ako dođe do rezonancije. Zbog nesavršenosti izrade kolektora ili kliznih prstenova dolazi do vibracija četkica i držača četkica, koje su popraćene intenzivnim zvukom na frekvenciji jednakoj umnošku frekvencije rotacije i broja lamela.

Diskretni tonovi buke mehaničkog podrijetla nalaze se u području nižih i srednjih frekvencija. Zračenje na području viših frekvencija, izazvano mehaničkim uzrocima, ima karakter šuma. Spektar mehaničke buke je složen: diskretne komponente superponiraju se šumu. Ležajevi i ležajni štitovi obično su značajniji izvori mehaničke buke nego kućište, tako da i ta buka ima usmjerenu karakteristiku.

Mehanička je buka ležajeva značajna na brzohodnim strojevima manjih snaga, gdje druge vrste buke ne premašuju 50-60 dB. Na istosmjernim strojevima većih snaga, a pogotovo pri velikim brzinama dominantna je buka držača četkica.

LITERATURA

1. Ellison D.J., Moore C.J.: Acoustic Noise and Vibration of rotating electrical Machines. Proc.IEE, Vol.115,11,1968, 1633-1640.
2. Hamata V.: Magnetic Noise of D-C Machines. Acte technica ČSAV 1966, 2, st. 202-225.
3. Jordan H.: Der geräuscharme Elektromotor, Verlag W Girardet, Essen 1950.
4. Jordan H., Nowack B., Weiss M.: "Über den magnetischen Lärm von synchronmaschinen; Elektrotechnik und Maschinenbau 1967, 84, st.1-8.
5. Judin i suradnici: Borba s šumom; Izd.lit. po stroit. Moskva 1964.
6. Paljan D.: Analiza proračuna magnetske buke asinhronog kaveznog motora; magistarski rad na Sveučilištu u Zagrebu, 1973.
7. Paljan D.: Proračun aerodinamičke buke električnih strojeva; E 32075 elaborat Instituta R.Končar, 1967.
8. Paljan D.: Istraživanje aerodinamičke buke štitova i ventilatora asinhronih motora serije 4A; E 32108 elaborat Instituta R.Končar, 1970.g.

Miloš Rašeta, dipl.inž.
Bojan Marušić, dipl.inž.
Ivan Feri, el.tehn.
"Rade Končar", Zagreb

OSNOVNI PARAMETRI ZA UTVRĐIVANJE I OCJENU STANJA IZOLACIJE NAMOTA VELIKIH ELEKTRIČNIH STROJEVA

Posljednjih decenija postignut je nagli razvoj velikih rotacionih električnih polifaznih strojeva. Jedinične snage u suvremenoj izvedbi već premašuju 1000 MW, a nazivni naponi su 20 kV i više.

Ovakvom razvoju, pored ostalih tehničkih napredaka, bitno je pridonio razvoj materijala i moderne tehnologije izoliranja visokonaponskih namota.

U referatu se navode metode utvrđivanja (mjerjenja) i analiza najvažnijih parametara kao što su: dielektrični gubici, parcijalna pražnjenja i drugi parametri za elemente namota i gotove ugrađene namote. Dat je osvrt na iskustva u poduzeću "Rade Končar" i na iskustva i nacionalne standarde nekih vodećih zemalja u Evropi.

BASIC PARAMETERS FOR DETERMINING AND EVALUATING THE CONDITION OF WINDING INSULATION OF LARGE ELECTRICAL ROTATING MACHINES

In recent decades remarkable progress has been achieved in the development of large electrical rotating machines.

Thanks to advanced design unit outputs exceeding 1000 MW and rated voltages of 20 plus kV can be achieved.

Such a development is also due to modern materials and technology used in insulating high voltage windings.

Methods of determining and analysing the most important parameters are discussed, such as dielectric losses, partial discharge and other parameters for winding components and complete inserted windings.

The experience of "Rade Končar" and other leading European manufacturers, and relevant national recommendations and standards, are outlined.

1. Izolacioni sistemi velikih električkih sinhronih strojeva

Brzi razvoj elektro-strojogradnje u proteklim desetljećima uslovio je pored ostalih tehničkih napredaka i značajan razvoj u području izoliranja aktivnih elemenata namota električkih strojeva. Podsjećamo da su se početkom stoljeća uglavnom izrađivali strojevi desetog dijela snage suvremenih jedinica. Aktivni dijelovi namota statora pri tome su bili izolirani uglavnom kombinacijama tinjca i organskih materijala. Spomenuti materijali, te rješenja s izolacionim vrpčama i asfaltnim vezivom uglavnom su korišteni do 60-tih godina.

Povećanjem jediničnih snaga električkih strojeva i većim iskorištenjem aktivnog materijala, postavljali su se i povećani zahtjevi na dielektrička i termomehanička svojstva izolacija namota. U Americi, a kasnije i u Evropi, razvijan je i primjenjivan u strojogradnji sistem izoliranja aktivnih dijelova namota modernijim materijalima na bazi tinjca i termostabilnih smola.

Daljim usavršavanjem materijala i tehnoloških postupaka izoliranja namota i elemenata namota, moderni sistemi izoliranja pridonijeli su novom porastu jediničnih snaga i višem nivou radnih napona sinhronih električkih strojeva. Današnji su sistemi bazirani na materijalima kombiniranim od tinjčevog papira, anorganskih nosilaca i termostabilnih smola. Elementi namota i namoti, izoliraju se u dva osnovna tehnološka postupka:

1.1.Sistem s impregnacijom u vakuumu (poroznim vrpčama od tinjčevog papira sa staklenim nosiocem formira se izolaciona ljuska elementa namota, koji se zatim u vakuum-uređajima impregnira umjetnom smolom. Element namota se u daljem postupku u mehaničkim napravama termičkim tretiranjem otvrdne).

1.2.Sistem izoliranja s predimpregniranim vrpčama (vrpčama koje već sadrže određenu količinu smole, formira se izolaciona ljuska, koja se u daljem postupku u mehaničkim napravama termičkim tretiranjem otvrdne).

Spomenuti sistemi koriste se i primjenjuju za izoliranje elemenata statorskih namota (svitaka ili štapova) i omogućuju kontinuirano izoliranje vrpčama u za sada nelimitiranim dužinama elemenata (svitaka ili štapova). Ovi moderni sistemi odgovaraju zahtjevima toplinske klase F, imaju visoku probojnu čvrstoću, male dielektričke gubitke, otpornost i postojanost za rad u atmosferi zasićenoj vlagom, uljnim parama, vodikom, a imaju i dobra termomehanička svojstva na pogonskim temperaturama. Sve navedene karakteristike garantiraju zadovoljavajuću životnu dob.

Važnost kvalitetne provedbe tehnološkog procesa izrade svakog pojedinog elementa za aktivni dio namota je izuzetno velika, jer se u pravilu radi o velikim jediničnim snagama stroja, pouzdanost kojega je u eksploataciji od vitalnog značaja.

Mnoge nacionalne privrede, a djelomično i IEC, izradile su ili su u fazi izrađivanja posebnih propisa i metoda za utvrđivanje osnovnih karakteristika izolacionih sistema, vodeći računa o stanju tehnologije i zahtjevima postavljenim pred elektroenergetski sistem.

2. Metode utvrđivanja (mjerjenja) najvažnijih parametara izolacije namota velikih električkih sinhronih strojeva

Zbog limitiranog opsega referata, ovom prilikom ćemo se osvrnuti na utvrđivanje (mjerjenje) najvažnijih parametara na gotovim - izrađenim elementima i na kompletnom namotu stroja.

2.1. Element namota - svitak ili štap

Na elementu namota, tehnološki potpuno formiranom (jednim od spomenutih postupaka), potrebno je primijeniti niz ispitivanja i mjerjenja za utvrđivanje osnovnih parametara glavne izolacije (utorskog dijela i dijela van utora):

- utvrđivanje dielektričke čvrstoće izolacije (visokim izmjeničnim naponom do proboja)
- ispitivanje podnosivim naponom (propisima određeni ispitni naponi) - provjera mehaničke ispravnosti izolacije
- mjerjenje dielektričkih gubitaka u izolaciji (faktor gubitaka - $\tan \delta$)

- ispitivanje termomehaničkih karakteristika izolacije - temperaturne karakteristike
- globalno mjerenje parcijalnih pražnjenja.

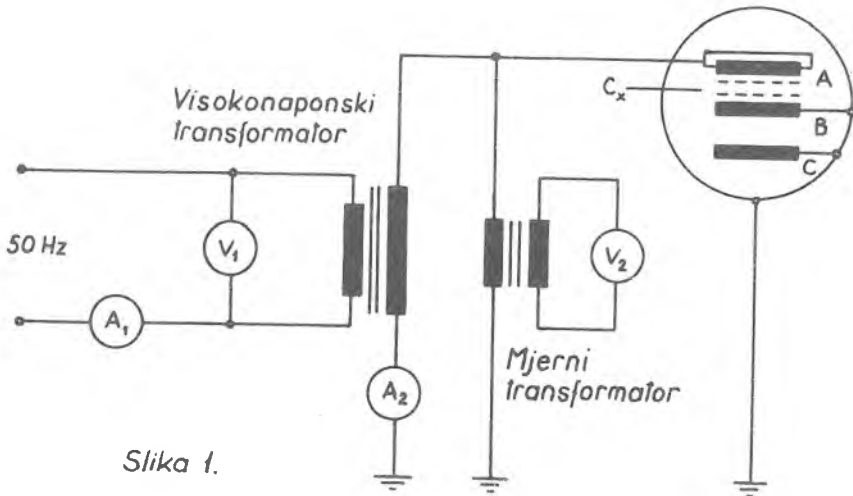
2.2. Kompletiran namot u statoru stroja

Za utvrđivanje (ispitivanjem, mjerenjem) stanja izolacije kompletnog namota podrazumijevaju se dva najkarakterističnija slučaja:

- novo izrađeni namot kompletiran u statoru pomoću elemenata ispitanih prema 2.1.
- kompletan statorski namot stroja, koji radi određeni broj sati (godina) i za čije elemente namota nisu poznati osnovni parametri o izolaciji, spomenuti pod 2.1 .

2.2.1 Novo izrađeni namot kompletiran u statoru.

Za ovaj slučaj, nakon ugrađivanja elemenata (svitaka ili štapova), spojnih vodova te izvoda namota, potrebno je jednom od uobičajenih metoda (sušenje) postići zadovoljavajući nivo izolacionog otpora kompletnog namota po fazama ili granama namota. Kako je praksa pokazala, jedan od najpouzdanijih načina utvrđivanja nivoa otpora izolacije je mjerenje struja odvoda (koeficijent apsorpcije). Po zadovoljavajućim rezultatima, pristupa se visokonaponskom ispitivanju namota faze (ili grane) u odnosu na tijelo statora i ostali dio namota.



Slika 1.

Najraširenija praksa (većina nacionalnih standarda u Evropi) je ta da se visokonaponsko ispitivanje provodi izmjeničnim naponom iznosa:

$$U_{isp} = 2 U_n + 1000 \text{ V, } 50 \text{ Hz, } 60 \text{ sekundi}$$

U zemljama Amerike i onima pod tehnološkim utjecajem Engleske, potpuno ravnopravno gornjem postupku je i visokonaponsko ispitivanje sa istosmjernim naponom iznosa, koji se određuje kao:

$$U_{isp} = k / 2 U_n + 1000 / \text{ u vremenu od } 60 \text{ sekundi,}$$

gdje je uobičajena vrijednost za $k = 1,4$ do $1,6$ max.

Za namot, kojega su elementi ispitani, kao što je spomenuto, i nakon gornjih provjera, može se s velikom sigurnošću tvrditi da je pouzdan i sposoban za pogon.

Uobičajena je praksa, da se kod ovakvih sinhronih generatora nakon 2000 - 4000 sati rada u redovnom režimu elektrane, izvrše slijedeća mjerenja u svrhu određivanja "referentnih (početnih) parametara" za kasnije praćenje stanja izolacije namota i pouzdanosti tog namota kroz godine eksploatacije:

- vizuelna kontrola namota i elemenata koji učvršćuju namot

- izolacioni otpor namota (indeks polarizacije)
- mjerenje struja odvoda (koeficijent apsorpcije)
- mjerenje kuta gubitaka u ovisnosti o naponu
- globalno mjerenje parcijalnih pražnjenja narinutim naponom ili induciranim naponom mjerenog stroja.

Iz podataka mjerenja, pored osnovnih dobivenih karakteristika, mogu se izdvojiti još neki karakteristični parametri, kao što su promjena jediničnog kapaciteta, koeficijent nelinearnosti, prirast kuta gubitaka $\Delta \text{ tg } \delta$ i drugi.

2.2.2 Kompletan statorski namot stroja, koji radi određeni broj sati (godina) i za čije elemente namota nisu poznati osnovni parametri izolacije, spomenuti pod 2.1 . Za generator, koji radi više godina ili se u fazi eksploatacije sprovode kontrolna mjerenja, potrebno je izvršiti obim ispitivanja - mjerenja spomenutih pod 2.2.1 .

Kod mjerenja struja odvoda uobičajeno je da se struja mjeri do napona iznosa $1,5 U_n$, a ponekad i više. Iz struja odvoda određuje se koeficijent apsorpcije i njegova nelinearnost i tako dobiva jedan od prvih uvida u stanje izolacije namota ili grane namota.

Mjerenje kuta gubitaka potrebno je izvršiti za napone do $0,6$ ili $0,8 U_n$, a uobičajeno je u nekim zemljama da se mjerenja vrše i do $1,2 U_n$.

Za globalno mjerenje parcijalnih pražnjenja uobičajeni je nivo napona $0,6 U_n$, a snima se informativno i kod $1,0 U_n$. U najnovije vrijeme u većini zemalja razvijene su aparature, koje mjere parcijalna pražnjenja u određenom frekventnom području (na primjer 10 kHz). Registrira se intenzitet parcijalnih pražnjenja, koji je reducirana kvadratična srednja vrijednost prema određenom referentnom nivou od $10^{-9} \text{ C}^2 \text{ s}^{-1} \text{ F}^{-1}$, a izražava se jedinicom decibel (dB):

$$\delta = 10 \log \frac{dx}{D_0}$$

Dogovorno je uzet referentni nivo:

$$D_0 = 10^{-9} \text{ C}^2 \text{ s}^{-1} \text{ F}^{-1}$$

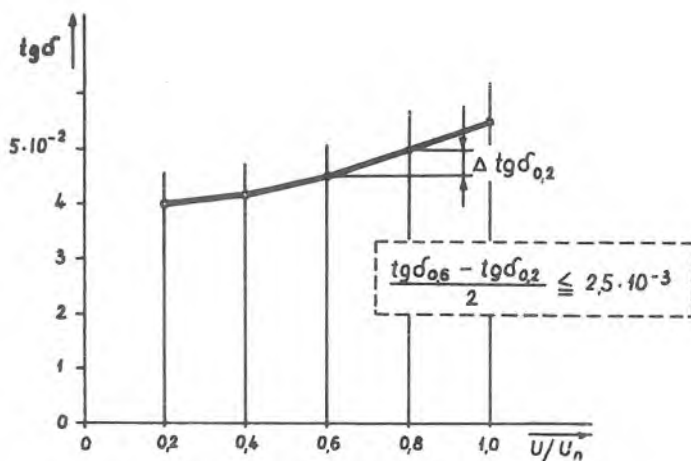
Nakon obavljenih svih mjerenja potrebno je izvršiti detaljnu analizu i usporedbu rezultata s referentnim parametrima, a ako takvih nema, postignute rezultate uspoređivati s eventualno postojećim propisima ili iskustvenim saznanjima. Spomenuta analiza i sud o stanju izolacije, kao i prognoza pogonske sigurnosti bit će puno realniji, ako su za analizirani

generator više puta poznati parametri iz prethodnih kontrolnih mjerenja u toku eksploatacijskog perioda.

Posebna je situacija, kada se na jednom generatoru, koji već radi niz godina, prvi puta vrše spomenuta mjerenja, a potrebno je izvršiti procjenu stanja izolacije i prognozirati pogonsku sigurnost. U slučaju da su snimljeni parametri nepovoljni ili izuzetno loši, smatra se da je za potvrdu pogonske sigurnosti najpouzdanije izvršiti visokonaponsko ispitivanje sniženim ispitnim naponom.

Ispitivanje sniženim ispitnim naponom treba provoditi na početku planiranog remonta ili dužeg zastoja iz nekih drugih razloga. Ovaj pokus spada u grupu destruktivnih kontrolnih mjerenja, ali je u ovakvim slučajevima neizbježan. U tom času treba imati na raspolaganju određeni broj ispravnih rezervnih elemenata namota. U nekim zemljama Evrope, ispitivanja sniženim ispitnim naponom na početku planiranog remonta, provode se u pravilu bez obzira na osnovne parametre stanja izolacije. Kao ispitni naponi preporučuju se iznosi 60 - 70 % ispitnog napona određenog za novi stroj, a u trajanju od 60 sekundi.

U poduzeću "Rade Končar", u toku dugogodišnje prakse na proizvodnji sinhronih generatora, usvojene su sve preporuke (standardi) IEC-a. Međutim, IEC još nije usuglasio i izdao standarde za kompletno područje spomenute problematike. U Evropi je većina zemalja izdala nacionalne standarde (kriterije za vrednovanje spomenutih parametara), koji nisu u potpunosti usuglašeni. Za kriterij po parametru δ i $\Delta \text{tg } \delta$ u evropskim zemljama najčešće je korišten propis VDE (vidi tabelu i diagram - slika 2).



$\text{tg } \delta = f(U)$, maksimalne vrijednosti

1	2	3	4	5
$\text{tg } \delta_{0.2}$ (kod $0.2 U_n$)	$\frac{\text{tg } \delta_{0.6} - \text{tg } \delta_{0.2}}{2}$		$\Delta \text{tg } \delta$ u svakom intervalu $0.2 U$	
	95% ispitanih uzoraka	5% preostalih uzoraka	90% ispitanih uzoraka	5% preostalih ispitanih uzoraka
$4.0 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$

Najviše dopuštene vrijednosti kod mjerenja $\text{tg } \delta$ i $\Delta \text{tg } \delta$

Slika 2.

Za pitanja parametra globalnog parcijalnog pražnjenja, iskustva EdF (Francuska) su vrlo značajna, i za svoju nacionalnu industriju i elektroprivredu EdF je u svojim preporukama izdao komparativne kriterije.

Prof. Zlatko Smolčić, dipl.inž.
OUR "Rade Končar"
Zagreb

SUVREMENI ISTOSMJERNI STROJEVI VELIKIH SNAGA

U referatu se prikazuje osnovna problematika dimenzioniranja istosmjernih strojeva s obzirom na komutaciju, nastajanja kružne vatre na kolektoru, primjenu podijeljenog zračnog rasporeda pomoćnih polova, oblik polne papuče pomoćnog pola, te osvrt na granične snage uz primjenu dvovojnih namota. Nadalje se daje osnovni prikaz napajanja motora istosmjernom i valovitom strujom, te dostignuća proizvodnje istosmjernih strojeva u OUR "Rade Končar".

LARGE DC MACHINES

The problems in designing DC machines are outlined with regard to commutation, the phenomenon of flash-over on the commutator, application of the dual compole air gap, form of compole shoe, and the potential applications of double lap windings for highest outputs.

DC machine feeding with either direct or wave current is reviewed. DC machine manufacture is one of the lines of activity of the "Rade Končar" Company, and a summary progress report is given.

1. Osnovni parametri dimenzioniranja strojeva s obzirom na komutaciju

Dimenzioniranje nekog električkog stroja određuje se na osnovi dozvoljenih specifičnih strujnih opterećenja (gustoća struje, strujni oblog), dozvoljenih specifičnih magnetskih opterećenja (indukcija, stupanj zasićenja) i dozvoljenih obodnih brzina vrtnje rotora s obzirom na mehanička naprezanja. Kod istosmjernih strojeva predstavlja zadovoljavajuća komutacija najteži zahtjev, koji postavlja daljnje uvje-

te za dimenzioniranje i to: dozvoljenu srednju vrijednost napona po lameli, dozvoljeni maksimalni napon medju lamelama, te dozvoljeni napon samoindukcije. Navedeni uvjeti dovoljni su za razmatranje kvalitete komutacije u statičkom stanju, dok se kod prelaznih stanja pojavljuje još napon transformacije i uslijed vrtložnih struja fazno pomaknuti inducirani napon pomoćnih polova. Napon transformacije pojavljuje se zbog vremenske promjene magnetskog toka glavnih polova, dok se fazni pomak inducirano napona od pomoćnih polova pojavljuje samo kao posljedica promjene struje. Strujno preopterećenje motora u statičkom režimu rada određuje dimenzije magnetskog kruga pomoćnih polova, četkica i kolektora, a vezano uz brzinu vrtnje i napon samoindukcije i dimenzije rotora. Iznos strujnog preopterećenja, brzina regulacije i odnos električne i elektromehaničke vremenske konstante definiraju brzinu promjene struje po vremenu, koja nam omogućava donošenje odluke o primjeni kompenzacionog namota i stepenu lameliranja magnetskog kruga pomoćnih polova.

1.1. Polno prekrivanje i širina zone komutacije

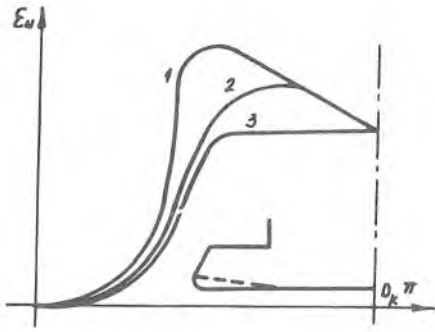
Snaga stroja ovisi o indukciji u zračnom rasporu glavnog pola, strujnom oblogu, kvadratu promjera rotora, dužini paketa, brzini vrtnje i prekrivanju glavnog pola. Sa stanovišta termičkog dimenzioniranja strojeva nastoji se stroj izvesti sa što većim prekrivanjem glavnog pola. Širina zone komutacije ovisi o vrsti namota rotora, koraku svitka i širini četkice. Sa širom četkicom produžava se vrijeme komutacije i smanjuje napon samoindukcije, ali se istovremeno povećava širina zone komutacije. Iz teorije istosmjernih strojeva je poznato da za dobru komutaciju ne smije biti znatnijeg utjecaja magnetskog toka glavnih polova na širini zone komutacije, tj. sa stanovišta komutacionog dimenzioniranja stroja poželjno je stroj izvesti s malim prekrivanjem

glavnog pola. Iz izlaganja se vidi da prekrivanje glavnog pola treba kompromisno odabrati iz termičkog i komutacionog dimenzioniranja stroja i da na postojećem stroju proširenjem četkica u smislu smanjenja napona samoindukcije ne moramo uvijek dobiti poboljšanje komutacije.

1.2. Kružna vatra na kolektoru

Ukoliko srednja vrijednost napona po lameli ili maksimalni napon između lamelama prelaze određene iznose, može doći do kružne vatre na kolektoru. Općenito postoje dva osnovna razloga za nastajanje kružne vatre i to:

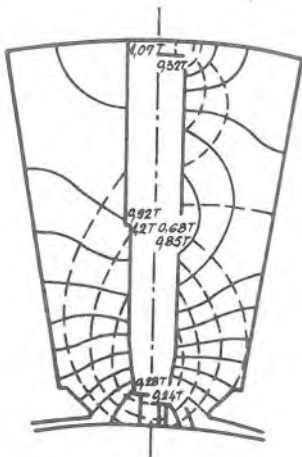
- a) Iskra uzrokovana elektromagnetskom ili mehaničkom pojavom kreće se u smjeru vrtnje. Predpostavlja se da iskra neće ugasnuti već prijeći u luk i nadalje u kružnu vatru, ako luk dostigne kritičnu visinu napona gdje je napon na krajevima luka dovoljno visok za njegovo održavanje. Kritičnom točkom može se smatrati i točka kod koje napon između lamelama dostiže vrijednost cca 25 V, koja je dovoljna za održavanje luka između lamela. Opasnost od kružne vatre možemo smanjiti na taj način da smanjimo strminu krivulja 2 i 3 na sl. 1-1, tj. da smanjimo promjenu napona po obodu kolektora. Smanjenje napona po obodu kolektora možemo ostvariti: povećanjem zračnog raspora glavnih polova na rubovima pola, smanjenjem izobličenja protjecanja u zračnom rasporu, povećanjem promjera kolektora i smanjenjem prekrivanja glavnog pola.
- b) Iskra uzrokovana slučajnom ugljenom ili drugom vodljivom prašinom između lamela kolektora. Ako su napon između lamela i promjena napona po obodu kolektora dovoljno visoki nakon izgaranja mostića između lamela nastaje električni luk, koji može prijeći u kružnu vatru. Opasnost od kružne vatre uzrokovane prašinom možemo smanjiti: održavanjem čistoće kolektora i držača četkica, povećanjem debljine izolacije između lamela kolektora, te već navedenim uvjetima pod "a".



Sl. 1-1. Krivulja promjena napona po obodu kolektora: 1-konstantni zračni raspor nekompensirani stroj; 2-promjenjivi zračni raspor nekompensirani stroj; 3-konstantni zračni raspor kompenzirani stroj.

lektoru već do preskoka na druge dijelove stroja npr. do nosača uređaja četkica, ležajnog štita itd.

1.3. Podijeljeni zračni raspor pomoćnih polova



Sl.1-2. Slika polja medjupolnog prostora jednog konkretnog stroja: lijeva strana-nepodijeljeni zračni raspor; desna strana-podijeljeni zračni raspor.

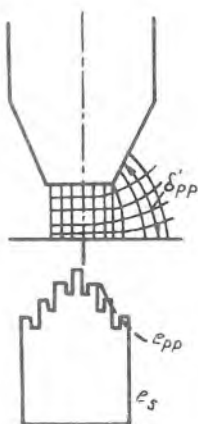
Sa sl.1-1 vidi se da primjena kompenzacionog namota smanjuje vrijednost maksimalnog napona medju lamelama i promjenu napona po obodu kolektora, tj. primjena kompenzacionog namota uz nepromjenjene ostale parametre smanjuje opasnost od kružne vatre. Napominjemo još da svaka iskra ionizira zrak, kojeg struja rashladnog zraka može odnijeti na ostale dijelove stroja, tako da neće doći do kružne vatre na ko-

Kod velikih strojeva zračni raspor pomoćnog pola nalazi se u području 20 do 30 mm. Smanjivanjem zračnog raspora povećava se rasipanje glave zuba i povećava se napon samoindukcije, dakle smanjuje se kvaliteta komutacije. Povećanjem zračnog raspora povećava se upliv magnetskog toka glavnih polova u zoni komutacije, dakle smanjuje se kvaliteta komutacije. Zato kod većih strojeva zračni raspor pomoćnog pola podijelimo na dva dijela. Jedan zrač-

ni raspored nalazi se između polne papuče pomoćnog pola i rotora, a drugi između jezgre pomoćnog pola i jarma statora. Uz ionako smanjenu kvalitetu komutacije (s naslova rasipanja glave zuba), kod podijeljenog zračnog rasporeda ne povećavamo upliv magnetskog toka glavnih polova u zoni komutacije, smanjujemo rasipanje pomoćnog pola, zasićenje u jezgri pomoćnog pola i povećavamo kvalitetu komutacije kod udarnih opterećenja. Na sl. 1-2 prikazana je raspodjela polja u međupolnom prostoru za slučaj nepodijeljenog i podijeljenog zračnog rasporeda pomoćnih polova istog stroja s vrijednostima indukcija u pojedinim presjecima jezgre, odakle se vidi mogućnost većeg preopterećenja stroja s podijeljenim zračnim rasporedom.

1.4. Oblik polne papuče pomoćnog pola

Proračun srednje vrijednosti napona samoindukcije e_s u svitku koji komutira i srednje vrijednosti induciranog napona e_{pp} od magnetskog toka pomoćnih polova ne daje punu garanciju dobre komutacije. Dobru komutaciju dobivamo u slučaju kada je inducirani napon pomoćnih polova u

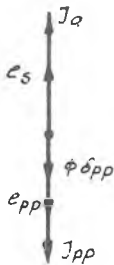


Sl.1-3. Oblik polne papuče pomoćnog pola i prostorna raspodjela napona e_s i e_{pp} .

svakom momentu jednak i suprotnog smjera napona samoindukcije svakog svitka koji komutira. Potrebno je odrediti prostornu raspodjelu napona samoindukcije e_s , a polnoj papuči pomoćnog pola dati takav oblik da raspored indukcije pod pomoćnim polom (u drugom mjerilu e_{pp}) odgovara prostornoj raspodjeli napona samoindukcije, kao što je za jedan skraćeni namot prikazano na sl.1-3.

1.5. Komutacija u statičkom i prelaznom stanju

U statičkom stanju su napon, struja rotora, magnetski tok glavnih i pomoćnih polova, te brzina vrtnje konstantne veličine, pa isčezava utjecaj vrtložnih struja. Nadalje su u komutirajućem svitku konstantni i približno jednaki: napon samoindukcije e_s (u fazi sa strujom rotora I_a) i inducirani napon od pomoćnih polova e_{pp} (u fazi sa strujom pomoćnih polova I_{pp}), kao što je prikazano na sl.1-4.



Sl.1-4. Objašnjenje uz komutaciju u statičkom stanju.

Kod prelaznih stanja koja su u općem slučaju uzrokovana promjenom napona, momenta tereta i uzbudne struje imamo vremensku promjenu: struje rotora (promjena napona samoindukcije e_s u fazi sa strujom rotora I_a), struje pomoćnih polova (fazno zaostajanje magnetskog toka pomoćnih polova u zračnom rasporu ϕ_{pp} i induciraniog napona od pomoćnih polova e_{pp} u odnosu na struju pomoćnih I_{pp}), magnetskog toka glavnih polova (na-
stajanje napona transformacije e_t).

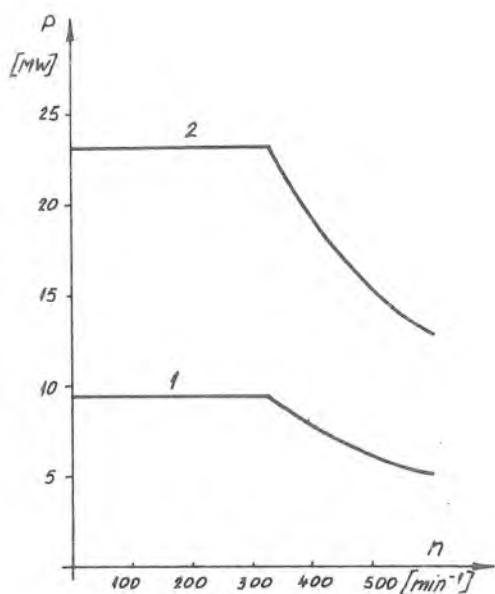
Suma svih napona u komutirajućem svitku, uzevši u obzir njihov fazni pomak, više neće biti jednaka nuli (kao kod komutacije u statičkom stanju prema Sl.1-4.), već će se pojaviti određeni iznos nekompensiranog napona, koji dovodi do pogoršanja komutacije. Koliki će se nekompensirani napon pojaviti u komutirajućem svitku ovisi o vrsti istosmjernog stroja (nezavisna ili mješovita uzbuda), o karakteru prelazne pojave i izvedbi magnetskog kruga pomoćnih polova (utjecaj vrtložnih struja). Nekompensirani napon u komutirajućem svitku može se smanjiti, ako smanjimo utjecaj vrtložnih struja na magnetski tok pomoćnih polova, a to možemo postići na dva načina:

a) lameliranjem jezgre pomoćnih polova i jarma statora kod čega smanjujemo protjecanje vrtložnih struja približno na trećinu.

b) izvedbom drugog zračnog rasporeda između jezgre pomoćnog pola i jarma statora kod čega povećavamo magnetski otpor zračnog rasporeda.

1.6. Granična snaga i primjena dvovojnih namota

Sinhroni i asinhroni strojevi, koji se dimenzioniraju na osnovu termičkih i mehaničkih parametara, imaju relativno velike granične snage u odnosu na istosmjernne strojeve koji se moraju dimenzionirati još i na komutacione parametre. Kod jednovojnog petljastog ili žabljeg namota ar-



Sl.1-5. Granična snaga istosmjernih strojeva.

maturne granična snaga istosmjernog stroja, osim ostalih uvjeta ograničena je naponom između lamela kolektora, pa se zato kod graničnih snaga koriste dvovojni petljasti ili žablji nesimetrični namoti kod kojih između dviju lamela ima pola napona zavoja. Uz danas ostvarive vrijednosti: promjer rotora 4,1 m, strujni oblog 600 A/cm, indukciju u zračnom rasporu 1,1 T, obodnu brzinu rotora 70 m/sek, napon samoindukcije u trajnom radu 8 V, a u kratkotrajnom radu 20 V, srednji napon između lamela, 20 V, faktor prekrivanja glavnih polova 0,72 i jedinični koeficijent induktiviteta $4 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am, dobivamo granične snage za trajni (1) i kratkotrajni (2) režim rada prikazane na sl.1-5.

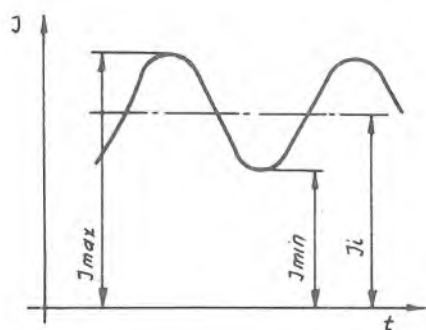
2. Napajanje motora valovitom strujom

Za priključak istosmjernog motora na izmjeničnu mrežu potreban je pretvarač izmjenične struje u istosmjernu. U tu svrhu možemo upotrijebiti:

motor-generator (motor se napaja istosmjernom strujom) ili ispravljački spoj koji istosmjerni motor napaja valovitom strujom.

Kod primjene ispravljačkog spoja regulaciju istosmjernog napona možemo vršiti reguliranjem izmjeničnog napona kojeg dovodimo na transformator (prekapčanjem otcjepa na primarnoj ili sekundarnoj strani transformatora) ili promjenom kuta paljenja (kašnjenjem paljenja) ispravljača kod konstantnog izmjeničnog napona. Prednost prvog načina je manja valovitost napona i struje, a nedostatak je nekontinuirana regulacija i mala brzina regulacije. Prednost drugog načina je mogućnost kontinuirane regulacije velikom brzinom, a nedostatak je povećanje valovitosti ispravljenog napona i struje, skuplji ispravljači, loš faktor snage itd.

Krivulju ispravljenog napona možemo prikazati pomoću Fourier-ovog niza



Sl.2-1. Objašnjenje valovitosti

kao srednju vrijednost i sumu harmoničkih članova. S povećanjem reda harmonika naglo pada valovitost napona, tako da za razmatranje problema možemo uzeti u obzir samo prvi harmonički član. Valovitost neke veličine npr. struje prema sl.2-1. iznosi:

$$v = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}} \quad (1)$$

Analizom valovitosti napona i struja provedenih na kompenziranom i nekompenziranom, nezavisno uzbudjenom motoru za razne spojeve ispravljača dobivamo:

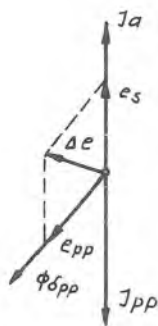
- s povećanjem reda harmonika kod otvorene i zatvorene rešetke ispravljača naglo pada valovitost napona, a još brže pada valovitost struje,
- s povećanjem kuta paljenja valovitosti rastu,
- s povećanjem broja anoda ispravljača (broja pulzacija za vrijeme

jedne periode) valovitosti naglo padaju,

d) uz istu valovitost napona kod kompenziranih strojeva (induktivitet manji cca 4 puta) postoji veća valovitost struje u odnosu na nekompenzirane strojeve.

Elektromagnetsko stanje motora kod valovitog napajanja možemo razmatrati kao superpoziciju dviju komponenata: istosmjerne i izmjenične (samo prvi harmonik). Istosmjerna komponenta definirana je srednjim ispravljenim vrijednostima napona, struje i magnetskog toka, a elektromagnetsko stanje motora poznato je iz teorije istosmjernih strojeva.

Izmjeničnu komponentu možemo razmatrati priključkom nezavisno uzbuđenog motora na izmjenični napon (iznosa i frekvencije prvog harmonika), kod čega postoji: izmjenična struja armature, izmjenični magnetski tok pomoćnih polova, u magnetskom krugu pomoćnih polova nastaju vrtložne struje, a magnetski tok pomoćnih polova nije u fazi sa strujom. U komu-



Sl.2-2. Objašnjenje uz komutaciju kod valovitog napajanja.

mariti zbog velikog induktiviteta i male valovitosti struje uzbuđenog namota. Suma napona samoindukcije e_s i induciranog napona pomoćnih polova e_{pp} u komutirajućem svitku nije jednaka nuli, već se pojavljuje odredjeni iznos nekompenziranog napona Δe , koji pogoršava komutaciju.

tirajućem svitku inducira se napon samoindukcije e_s (približno u fazi sa strujom rotora I_a) i inducirani napon od pomoćnih polova e_{pp} (u fazi s magnetskim tokom $\phi_{\delta pp}$ u zračnom rasporu pomoćnih polova, a fazno pomaknut u odnosu na struju pomoćnih polova I_{pp}) kao što je prikazano na sl.2-2. Kod priključka nezavisne uzbuđe na izmjeničnu mrežu preko ispravljača, promjenu magnetskog toka glavnih polova i napon transformacije u komutirajućem svitku možemo zane-

Ispitivanje dozvoljenog nekompenziranog napona nekog konkretnog stroja vrši se metodom snimanja tamne zone komutacije istosmjernom strujom.

Posljedice izmjenične komponente struje kod nezavisno uzbudjenog motora napajanog valovitom strujom su: povećanje srednje vrijednosti napona i maksimalnog napona između lamela kolektora, nastajanje nekompenziranog napona u komutirajućem svitku, povećanje gubitaka prelaza struje četkica-kolektor, povećanje gubitaka u bakru i željezu, te povećanje strujnog opterećenja četkica.

Kod motora napajanog valovitom strujom ne dobivamo neko ozbiljnije povećanje srednje vrijednosti momenta (mala valovitost uzbudne struje) u odnosu na istosmjerno napajanje, ali izmjenična komponenta momenta s frekvencijom harmonika može dovesti do neželjenih torzionih vibracija osovine.

3. Dostignuća proizvodnje istosmjernih strojeva

Na osnovu kratko izložene problematike dimenzioniranja i vrstama napajanja u OUR "Rade Končar" proizvode se istosmjerni strojevi za režime rada S1 do S7 prema preporukama IEC-a, za opću i specijalnu namjenu (dizalice, vuča, brodarstvo, valjaonice, cementare itd.), sa i bez kompenzacionog namota, s masivnim i lameliranim jarmom statora obzirom na vrstu napajanja. Izolacija strojeva je termičke klase F na bazi epoksida.

U tabeli 1 dani su osnovni podaci nekih do sada isporučenih istosmjernih strojeva srednjih i većih snaga. Prema tehničkim saznanjima, opremljenosti tvornica i laboratorija u OUR "Rade Končar" postoji mogućnost proizvodnje istosmjernih strojeva do graničnih snaga.

TABELA 1

R. br.	Snaga (kW)	Napon (V)	Brzina vrtnje (min^{-1})	Vrsta napajanja	Namjena
1	900	770	1085/1920	valovito	vučni motor
2	535	3000/2	580/1550	istosmjerno	vučni motor
3	700	440/700	1500	-	vučni generator
4	550	380	600	-	propulzioni gener.
5	500	370	390	istosmjerno	propulzioni motor
6	2100	550	260	istosmjerno	propulzioni motor
7	200	500	1000/2200	valovito	valjaonički motor
8	450	600	500/1200	valovito	valjaonički motor
9	660	750	750/1200	valovito	valjaonički motor
10	600	600	400/1000	valovito	valjaonički motor
11	1200	600	400/1000	valovito	valjaonički motor
12	1800	850	175/450	valovito	valjaonički motor

Popis literature:

Smolčić Z.: "Specijalna poglavlja iz kolektorskih strojeva",
Elektrotehnički fakultet Zagreb, 1971 god.

Neven Srb
Poduzeće "Rade Končar", Zagreb
OOUR Elektrotehnički institut

SVOJSTVA ROTORA S NEIZOLIRANIM KRATKOSPOJENIM KAVEZOM

Svojstva rotora s neizoliranim kratkospojenim kavezom, analizirana su primjenom statističkih metoda, teorije kontakata i teorije električnih vodova i mreža. Posebno su istraženi: otpor štapa, kontakti otpor i poprečna impedancija. Postavljene su nove metode za određivanje kontaktnog otpora i poprečne impedancije. Utvrđeni su kriteriji za pojednostavljenje vrlo složene prostorne električne mreže rotora s neizoliranim kratkospojenim kavezom. Izvedena je "opća" nadomjesna shema asinhronog motora. U njoj je asinhroni motor nadomješten s n elementarnih motora. Prelaskom na posebni slučaj - aksijalno homogeni, izolirani i neskošeni štapovi - dobije se poznata nadomjesna shema asinhronog motora. "Opća" nadomjesna shema omogućuje vjerno simuliranje konstrukcijskih i tehnoloških aksijalnih nesimetričnosti rotora.

PROPERTIES OF ROTOR CONTAINING AN UNINSULATED SQUIRREL CAGE

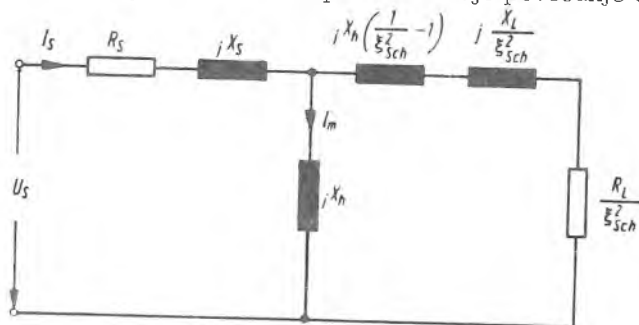
The properties of a rotor containing an uninsulated squirrel cage have been investigated by statistical methods, the theory of contacts and the theory of electrical lines and networks. Bar-resistance, contact resistance and cross impedance have been analysed in particular. New methods for establishing contact resistance and cross impedance are introduced, and criteria established for simplifying the very complex three dimensional electrical network of the rotor containing an uninsulated squirrel cage. A "general" electrical equivalent induction motor circuit has been derived. The induction motor is represented by n elementary motors. By turning to the specific case - axial homogenous, insulated and unskewed bars, the well-known electrical equivalent induction motor circuit is obtained. The "general" electrical equivalent circuit affords an accurate simulation of design and technological axial rotor asymmetry.

1. Višefazni asinhroni motor s idealiziranim kaveznim rotorom

Da bi se dobila što jednostavnija fizikalna slika i nadomjesna shema, slika 1-1, višefaznog asinhronog motora s kaveznim rotorom, pretpostavlja se slijedeće:

Kratkospojni kavez rotora sastoji se iz N radialno simetrično postavljenih jednakih električki dobro vodljivih štapova. Svi štapovi i prstenovi kaveza električki su izolirani prema željeznom paketu rotora i imaju po cijeloj svojoj dužini nepromijenjeni geometrijski oblik, dimenzije, magnetska i električna svojstva.

Aksijalno skošenje rotorskih štapova uzrokuje povećanje omskog otpora



Sl. 1-1 Nadomjesna shema za višefazni asinhroni motor s idealiziranim kaveznim rotorom i aksijalno skošenim rotorskim štapovima

i rasipne reaktancije štapova kao i dodatnu rasipnu reaktanciju.

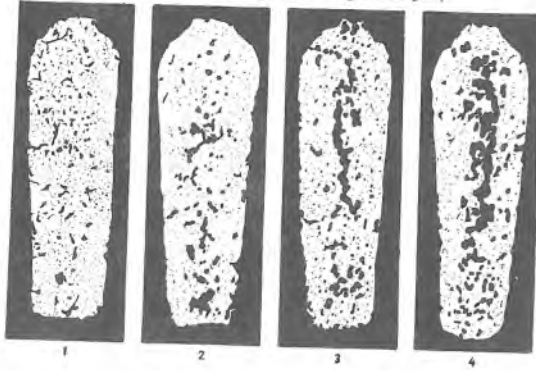
2. Višefazni asinhroni motor s realnim kaveznim rotorom

Kod normalnih izvedbi kaveznih rotora kavez nije izoliran prema željeznom paketu rotora. Posljedica toga je vrlo složena prostorna električna mreža realnog kaveznog rotora. Da bi se ona mogla pojednostavniti, treba analizirati pojedine elemente rotora i nakon toga utvrditi kriterije za pojednostavljenje. Pritom je potrebno imati stalno na umu cijeli rotor kao sasvim poseban mehanički i električni sklop.

3. Električni otpor štapa

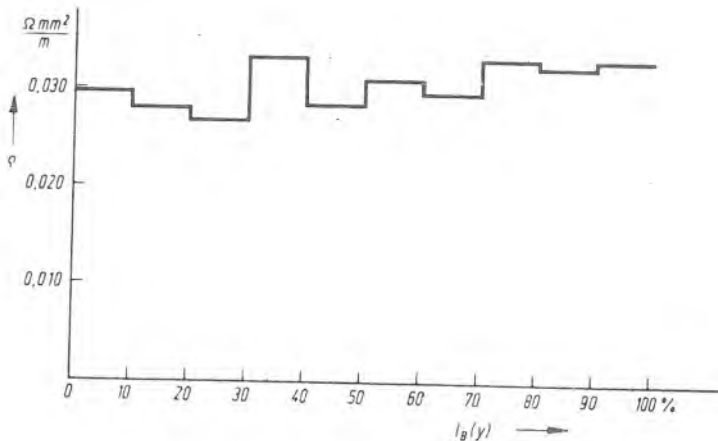
Kod varenih kaveza s uložnim štapovima presjek i vodljivost štapova

praktički su konstantni po cijeloj njihovoj dužini. Situacija je, međutim, mnogo složenija kod lijevanih kaveza. Usljed netočnog paketiranja limova mijenja se uzduž paketa poprečni presjek štapova. Na el. otpor štapova utječu takodjer pukotine i uključine nastale za vrijeme lijevanja, slika 3-1. Lijepo se opaža po-



Sl. 3-1 Poprečni presjeci lijevanog aluminijskog štapa na 1/5, 2/5, 3/5 i 4/5 dužine štapa u smjeru toka taline

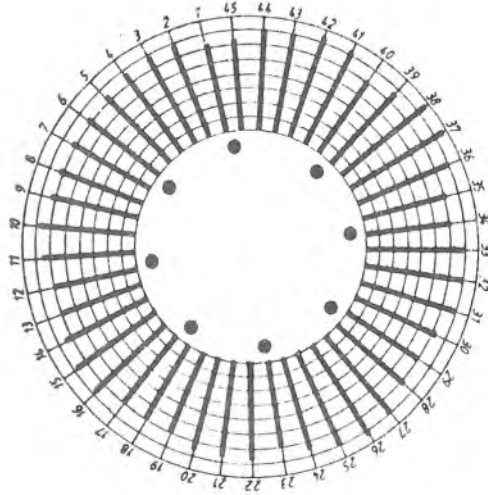
većanje poroziteta u smjeru toka taline. Na slici 3-2 prikazan je karakterističan tok spec. el. otpora uzduž štapa. On je dobiven primjenom metode Monte Carlo i drugih statističkih metoda.



Sl. 3-2 Karakterističan tok spec. el. otpora uzduž lijevanog aluminijskog štapa

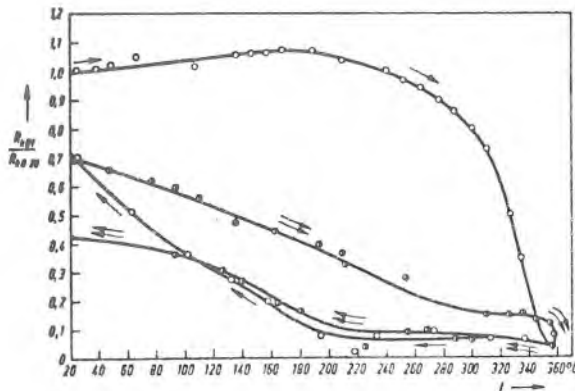
Mjerenjem električnog otpora mehanički izdvojenih lijevanih aluminijskih štapova dobivene su vrijednosti prikazane na slici 3-3. Vidi se da se štapovi s malim el. otporom nalaze u blizini uljevnih mjesta slitine, a oni s većim otporom između njih, tj. udaljeniji od uljevnih mjesta.

Sl. 3-3 Spec. el. otpori lijevanih aluminijskih štapova



4. Kontaktni otpor

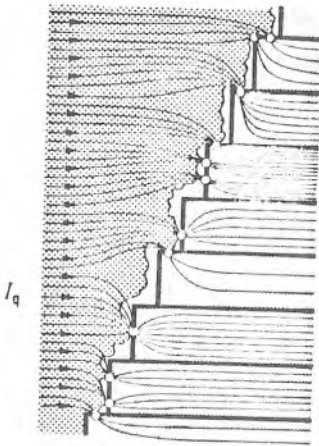
Da bi se odredila priroda kontaktnog otpora izmedju kaveza i željeznog paketa, istražena je njegova ovisnost o mjernoj struji i temperaturi, slika 4-1. Vidljivo je da pokusi nisu reverzibilni. Nejednolikost kontaktnog otpora primjećuje se vrlo lijepo pri mjerenju s velikim strujama. Tada se lokalno zagrijavaju pojedina mjesta uzduž štapa, a neki od limova se i zažare.



Sl. 4-1 Ovisnost kontaktnog otpora jednog lima R_{KB} o temperaturi
Temperaturni koeficijent otpora je "negativan"

4.1. Fizikalna slika kontaktnog otpora

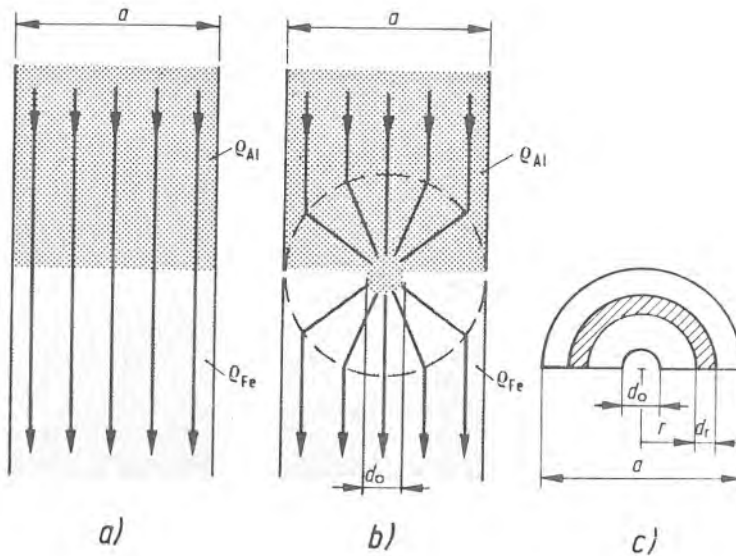
Zona kontaktnog / prijelaznog/ otpora izmedju lijevanog aluminijskog štapa i željeznog paketa rotora prikazana je na slici 4-2. Vidljivo je da se direktni



Sl. 4-2 Zona kontaktnog otpora s označenim mjestima direktnog metalnog kontakta

metalni kontakt ostvaruje tek mjestimično. Otpor između kaveza i paketa sastoji se, dakle, od paralelnog spoja slojnog i provlačnog otpora. Slojni otpor je posljedica slabo vodljivog sloja između aluminija i željeza. Relativno je velik i diskontinuirano raspoređen. Debljina sloja ovisi prvenstveno o debljini oksida na stijenkama utora i štapa te o primijenjenoj tehnologiji lijevanja. Provlačni otpor presudan je za veličinu kontaktnog otpora. Na slici 4-3 dva prizmatična kontakta stranice a i spec. el. otpora ρ_{Fe} i ρ_{Al} prikazuju element aluminijskog štapa i željeznog paketa. Budući da se kontakt ostvaruje samo

na kuglici promjera d_o , zanemarivo malog električnog otpora, strujnice skreću radialno prema kuglici, slika 4-3. Time nastaje provlačno područje, shematski o-

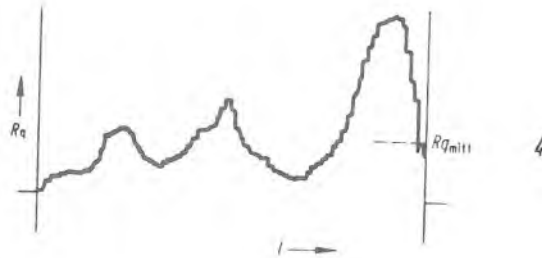


Sl. 4-3 Idealizirano dodirno mjesto aluminija štapa i željeza paketa

graničeno sfernom plohom promjera a /crtkana linija/. Kod malih lijevanih

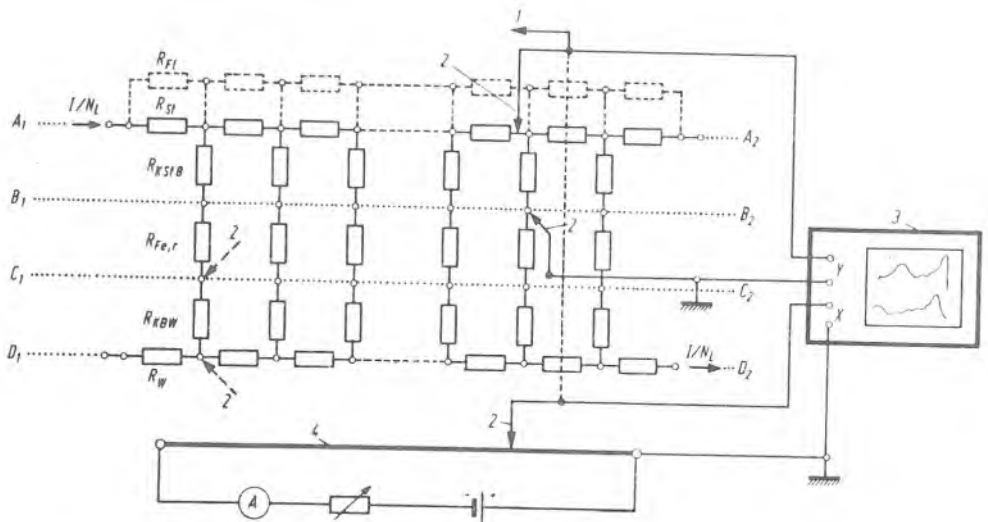
rotora s poluzatvorenim utorima treba uzeti u račun i površinski otpor / otpor pre vlake koja nastaje pri tokarenju/.

Mjerenje kontaktnog otpora i poprečne impedancije rotora s neizoliranim kavezom vrlo je složeno. Posebne poteškoće čine nepristupačnost rotora,



Sl. 5-1 Karakterističan tok kontaktnog otpora uzduž lijevanog štapa

simuliranje stvarnog pogonskog stanja rotora kao i mjerenje relativno malih "poprečnih" napona između pojedinih štapova. Razrada rezultata mjerenja vrši se na temelju teorije električnih vodova i teorije linearnih električnih mreža. Kao pomoćno sredstvo koristi se teorija vjerojatnosti, odnosno metoda Mon-



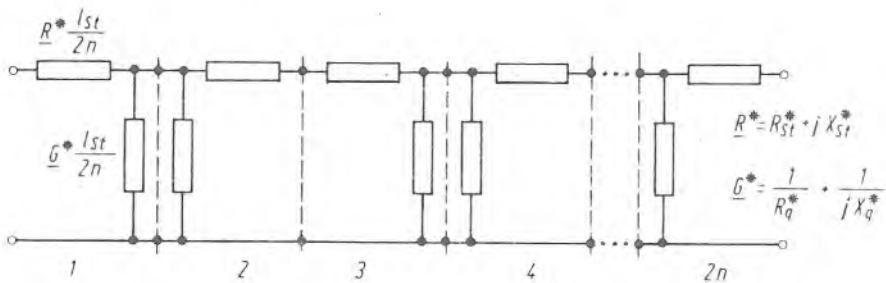
Sl. 5-2 Nadomjesna električna mreža za jedan štap rotora s neizoliranim kavezom, shema naponskog mjernog kruga i pomoćnog kruga pri mjerenju kontaktnog otpora

te Carlo i teorija kontakata. Vrlo složenu električnu mrežu rotora s neizoliranim kavezom treba pritom pojednostavniti. To smanjuje točnost rezultata, ali ona

najčešće ostaje u granicama tehnoloških rasipanja. Na slici 5-1 prikazan je karakterističan tok kontaktnog otpora uzduž lijevanog štapa. Uz pretpostavku radijalno simetričnog rotora može se postaviti električna mreža za samo jedan utorski korak, prikazana na slici 5-2. Ona sadrži obično toliko elemenata u aksijalnom smjeru od koliko se limova sastoji željezni paket rotora. Na slici su točkicama označena mjesta pristupačna elektrodama na cijelom rotoru. Pri mjerenju kontaktnog otpora koriste se, kako metode mjerenja koje se mogu primijeniti na rotore s cijelim kavezom, tako i metode mjerenja primjenljive samo na rotorima s međusobno odvojenim štapovima. Poprečnu impedanciju moguće je mjeriti samo na rotorima s presječenim kratkospojnim prstenima na toliko mjesta da se dobije odgovarajući broj polova.

6. Proračun asinhronog motora s neizoliranim kratkospojnim kavezom

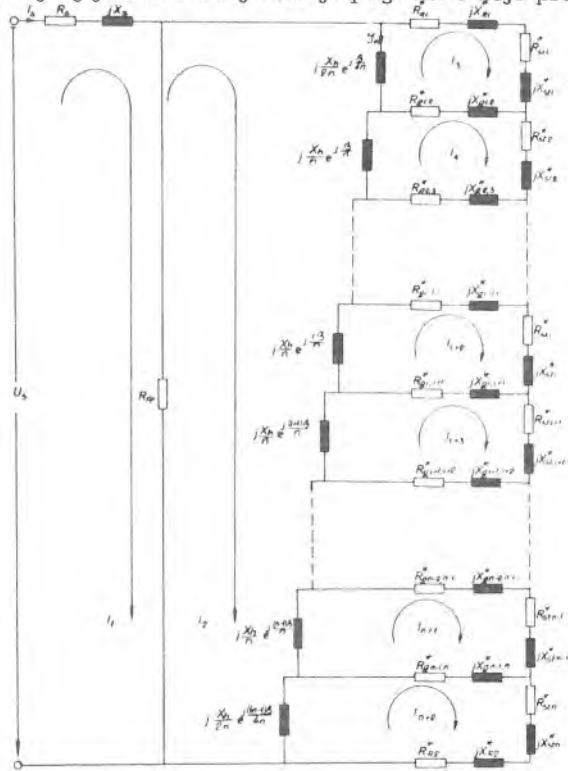
Da bi se dobili točni podaci o karakteristikama motora, bilo bi potrebno uzeti u račun cijeli motor, napose cijeli rotor. Takav bi proračun bio vrlo složen, a i točnost mu ne bi bila velika zbog nepoznavanja točnih vrijednosti pojedinih elemenata nadomjesne sheme i pogrešaka koje se javljaju pri korištenju približnih metoda za rješavanje velikih sistema. Proračunom samo jed-



Sl. 6-1 Lančani spoj nadomjesnih četveropola

nog pola umjesto cijelog rotora smanjuje se broj elemenata za 2 ... 2p puta, što je još uvijek nedovoljno. Ako se pretpostavi da je rotor radijalno simetričan, on se može, kao što je prikazano na slici 1-1, vrlo jednostavno reducirati na jednu fazu statorskog namota. Da bi se nadomjesnom shemom obuhvatila dva osnovna svojstva kaveznog rotora : nedovoljna izolacija između kratkospojnog kaveza i željeznog paketa te nehomogenost rotora u aksijalnom smje-

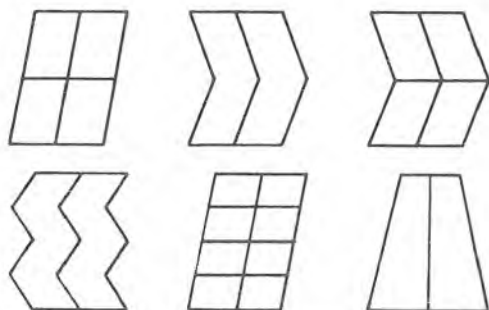
ru, potrebno je rotor podijeliti u aksijalnom smjeru na "n" elementarnih rotora, od kojih se svaki može nadomjestiti četveropolom, prema slici 6-1. Broj elementarnih rotora može se smanjiti korištenjem kriterija za kratki električni vod. U slučaju aksijalno homogenog rotora svaki par štapa predstavlja dugi homogeni električni vod. Odnosi veličina na početku i na kraju štapa određeni su tada izrazima koji u sebi sadrže hiperbolne funkcije. Zamijene li se hiperbolne funkcije prvim članovima Taylorovog reda, dobiju se približne formule za kratki el. vod. Drugi član Taylorovog reda za $\cosh$ u strujnoj jednadžbi mjerilo je pogreške koja pritom nastaje.



Sl. 6-2 "Opća" nadomjesna shema višefaznog asinhronog motora s neizoliranim kratkospojenim kavezom rotora

Na slici 6-2 prikazana je "opća" nadomjesna shema višefaznog asinhronog motora s neizoliranim kratko spojenim kavezom. Ona omogućuje pouzda-

no istraživanje utjecaja poprečnih struja kod bilo kojeg otpora kratkospojnih prstena. Pomoću nje se može izračunati utjecaj aksijalne nesimetričnosti rotora na momentnu krivulju i dodatne "tehnoške" gubitke. Pomoću "opće" nadomjesne sheme mogu se projektirati rotor sa "slobodnim kavezom" kao i rotor ostalih posebnih izvedbi, od kojih su neke prikazane na slici 6-4. "Op-



Sl. 6-4 Posebne izvedbe kaveznih rotora

ća" nadomjesna shema može se koristiti, osim kod višefaznih, i kod jednofaznih asinhronih motora kako za osnovni tako i za više harmonike.

Prelaskom na posebni slučaj - aksialno homogeni, izolirani i neskošeni štapovi - dobije se poznata nadomjesna shema višefaznog asinhronog mo-

tora, prikazana na slici 1-1 ($\xi_{sch} = 1$).

Pri izračunavanju karakteristika motora potrebno je mijenjati vrijednosti svih rotorskih elemenata nadomjesne sheme zavisno o klizanju zbog njihove ovisnosti o frekvenciji rotorske struje i potiskivanju.

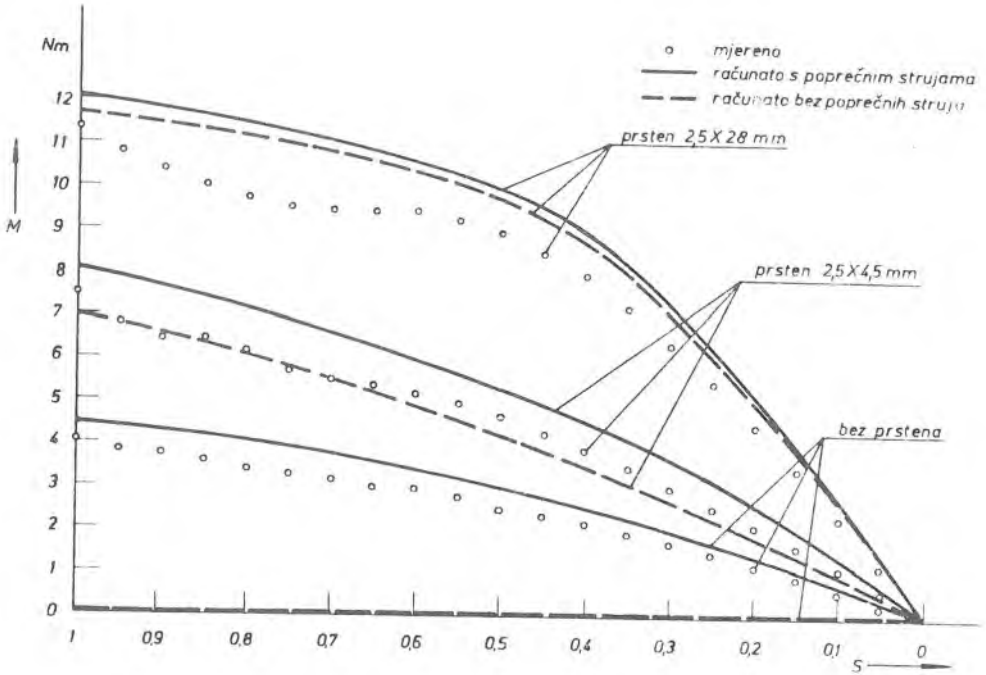
Programi za izračunavanje karakteristika motora kao i oni za razradu rezultata mjerenja kontaktnog otpora i poprečne impedancije izradjeni su na osnovi matričnog računa za elektroničko računalo UNIVAC 1110.

7. Usporedba mjerenih i računskih karakteristika motora

Pri izboru motora za testiranje treba nastojati da motor ima jako izražen utjecaj poprečnih struja osnovnog harmonika / s eventualnom mogućnošću promjene relativnog utjecaja poprečnih struja /, a da utjecaj viših harmonika, nastalih uslijed nesinusne razdiobe namota, statorskog i rotorskog ozublja, zasićenja i ekscentričnosti, bude što manji.

Relativni utjecaj poprečnih struja na karakteristike motora to je veći što je veći otpor kratkospojnih prstena. To je prikazano na slici 7-1, gdje se

vidi dobro podudaranje mjerenih i računskih momentnih krivulja 2-polnog motora MAZ 90SB-2.



Sl. 7-1 Usporedba mjerenih i računskih momentnih krivulja motora MAZ 90SB-2 za tri dimenzije prstena

8. Zaključak

Rotor s neizoliranim kavezom dio je asinhronog motora koji je "srce" mnogobrojnih elektromotornih pogona. Za analizu svojstava ovako sitnog i važnog detalja potrebno je koristiti niz tehničkih disciplina i timski rad veće grupe specijalista da bi se problem tehnički riješio u skladu sa sadašnjim tehnološkim mogućnostima. U ovom kratkom referatu nije bilo moguće spomenuti sve rezultate istraživačkog rada. Stoga je prezentirana samo osnovna fizikalna slika bez matematičke razrade.

Mr Josip Faban, dipl.ing.
OUR "Rade Končar", Zagreb
OOUR Tvornica generatora

ROTACIJSKI OSOVINSKI TRANSFORMATORI I INDUKCIONI UZBUDNICI U SKLOPU BESKONTAKTNE UZBUDE SINHRONIH STROJEVA

U referatu su prikazana rješenja kojima se omogućuje proširenje dinamičkih kvaliteta statičke uzbude i samouzbude (sa ili bez kompaundacije) na beskontaktne uzbudne sisteme s rotirajućim diodama, koji su inače, u pogledu brzine regulacije, u svojoj klasičnoj izvedbi s osovinskim sinhronim uzbudnicima, poznati kao inferiorniji u odnosu na statičke kontaktne.

Oredstva kojima se to postiže jesu rotacijski osovinski transformatori i u izvjesnoj mjeri indukciono osovinski uzbudnici.

Prikazana su neka konstrukcijska rješenja rotacijskih transformatora i neke sheme spoja samouzbude i kompaundacije, što pretendiraju na originalnost.

ROTATING SHAFT TRANSFORMERS AND INDUCTION EXCITERS IN BRUSHLESS SYNCHRONOUS MACHINE EXCITATION

Traditional brushless excitation systems with rotating exciters and rotating diodes are known to be inferior, in comparison with static ones, in view of regulation speed. The designs that carry over the good dynamic qualities of static excitation and selfexcitation (with or without compounding) to brushless excitation systems with rotating diodes are presented.

This is made possible rotating shaft transformers and, to a considerable extent, induction shaft exciters.

Some designs of rotating transformers and some self-excitation and compounding, wiring diagrams pretending to originality, are given.

1. Uvod

U gradnji brzih beskontaktnih uzбудno-regulacijskih sistema⁽¹⁾ s rotirajućim ispravljačima, osovinski sinhroni uzбудnik⁽²⁾ regulirane uzbuđe na statoru i rotirajuće armature nije uvijek idealan izvor za napajanje uzbudnog namota glavnog sinhronog stroja zbog svojih prilično velikih vremenskih konstanti. Naime, da bi se svladali njegovi znatni induktiviteti, usvajaju se velika forsiranja uzbuđe i veliki stropni naponi. Uza sve to ovi sistemi ipak ostaju sporiji od statičkih kliznokontaktne sistema koji nemaju takav rotacijski uzбудnik.

To je jedan od glavnih razloga da se prelazi na upotrebu asinhronog (indukcionog) uzbudnika; ovaj, naime, ima manje vremenske konstante od sinhronog.

Još efikasniji korak ćemo učiniti ako umjesto rotacijskog uzbudnika primijenimo osovinski rotacijski transformator, koji ima bitno manje vremenske konstante od bilo kakvog rotacijskog stroja.

Razumljivo je da su iznosi snaga, kojima se upravlja kod ovakvih rješenja veći, i da to vodi na izvjesno poskupljenje uzbudnog sistema, no u određenim slučajevima ima razloga da se žrtvuje ta cijena, jer ova se beskontaktna rješenja po brzini regulacije mogu mjeriti s najbržim statičkim kontaktne rješenjima.

Postoje naravno još neke mogućnosti za postizanje ekstremno velikih brzina regulacije beskontaktnih uzbudno-regulacijskih sistema, npr. primjena rotirajućih beskontaktno upravljanih tiristora, no to nije tema ovog prikaza.

Govorit ćemo prvo o rješenjima s rotacijskim transformatorima; oni su relativno nova i praktički gotovo nerabljena zamisao zbog određenih konstrukcijskih i tehnoloških problema realizacije⁽²⁾.

Rotacijski transformator je po fizikalnom funkcioniranju običan transformator (bez elektromehaničke konverzije energije), ali je po konstrukciji sasvim poseban, jer omogućava prijenos snage elektromagnetskim (beskontaktnim) putem iz mirujućeg dijela uzbudno-regulacijskog sistema u uzbudni namot stroja, smješten na rotoru. Takav transformator mora imati zračni raspor kojim je njegov feromagnetski krug (jezgra) podijeljen na dva dijela - dio koji miruje (stator) i dio koji rotira (rotor). Primarni i sekundarni namoti su, međutim, smješteni na jezgri galvanski i prostorno odvojeno; jedan se nalazi na dijelu jezgre koji miruje, a drugi na dijelu koji rotira. Ta specifičnost konstrukcije uvijek vodi na nešto povećanu struju magnetiziranja u odnosu na klasičan statički transformator (zbog prisustva zračnog raspora) i na nešto povećano magnetsko rasipanje namota (zbog prilično velike međusobne prostorne razdvojenosti primara i sekundara te njihove znatne oklopljenosti željezom). Zbog neizbježnog izmjeničnog ulaza i izlaza rotacijskog transformatora (tj. izmjeničnog primara i sekundara) uzbudni namot glavnog (sinhronog) stroja se napaja preko rotirajućih ispravljača, najčešće trofaznog diodnog mosta. - Kod punovalnog ispravljanja pomoću mostovnih diodnih spojeva dobiva se manja valovitost ispravljenih veličina, napona i struja nego kod poluvalnog sa zvjezdastim spojevima.

Konstrukcija prigradenog asinhronog uzbudnika nema značajnih specifičnosti u odnosu na uobičajena rješenja u gradnji električkih strojeva. Konstrukcija, kriteriji dimenzioniranja i zaštita rotirajućih ispravljača kod upotrebe asinhronih uzbudnika i rotacijskih transformatora međusobno su vrlo slični.

Kod uzbudnog sistema s asinhronim uzбудnikom značajno je međutim to, da se jedan dio uzbudne snage glavnog (sinhronog) stroja dobavlja pomoću uzbudno-regulacijskog uređaja sa statorskijh (armaturnih) stezaljki dotičnog stroja i prenosi se elektromagnetskim putem (preko asinhronog uzbudnika) na rotor, a drugi dio se posredstvom elektromehaničke konverzije u asinhronom uzбудniku dobiva preko osovine zajedničke uzбудniku i glavnom stroju.

2. Idejna konstrukcijska rješenja rotacijskih transformatora

Postoji niz idejnih konstrukcijskih rješenja rotacijskih transformatora . Ta sličnost rješenja je najpoznatiji dokaz da se još nisu sasvim iskristalizirali kriteriji o prednostima i nedostacima pojedinih zamisli⁽⁴⁾. Ipak, možemo razlučiti dva osnovna tipa konstrukcije: (a) s aksijalnim zračnim rasporom i (b) s radijalnim zračnim rasporom.

Na sl.1 je prikazan najjednostavniji slučaj: jednofazni dvonamotni (s primarom i sekundarom) transformator. Osnovna ideja konstrukcije se sastoji u tome da se nađine dva kolota: jedan (I) se okreće s osovinom (1) koja predstavlja produžetak osovine sinhronog stroja, a drugi (II) stoji pričvršćen uz statorsku konstrukciju sinhronog stroja. Diskovi su međusobno razmaknuti u aksijalnom smjeru za zračni raspor δ , a sastoje se od radijalno složenih transformatorskih ili dinamo limova (2 i 3') stancanih tako da formiraju žlijeb (4), u koji se ulažu izolirani svici (5): primara i sekundara. Složene radijalne jezgre se moraju impregnirati da postanu kompaktne cjeline. Iz mehaničkih razloga one trebaju biti obuhvaćene čvrstim plastevima u obliku šupljih cilindara (6, 7) od nemagnetskog materijala. Nemagnetskim materijalom se općenito služimo kad želimo ograničiti magnetsko rasipanje i induciranje štetnih vrtložnih struja u određenim konstrukcijskim dijelovima. Zatvaranje silnice magnetskog toka prikazano je linijom točka-crta (5).

Naravno da se na tom principu može izgraditi i višefazni transformator. Kod trofaznih se okretanjem smjera motanja namota srednje faze (u odnosu na ostale dvije) može postići ušteda u presjecima dijelova magnetskog kruga - analogno kao kod poznatih ogrnutih transformatora.

Višefazni transformator se može načiniti i tako da se limovi stancaju s više utora jedan do drugog, kao na sl.2 i 3, te da se slažu u jezgre na način prikazan na tim slikama. Kod izvedbe s koncentričnim žljebovima (i svicima) primara, odnosno sekundara, prema sl.2, postoji izvjesna nejednakost rasipanja faznih namota. Način slaganja prema sl.3 daje varijantu s radialnim zračnim rasporedom.

Na sl.4. prikazana je tehnološki atraktivna koncepcija s radialnim zračnim rasporedom (6) između statora (I) i rotora (II). Lamelirani prstenovi koaksijalni s osovinom (8), statorski (3) i rotorski (5), između kojih se nalaze namoti također koaksijalni s osovinom, statorski (2) i rotorski (4), povezani su aksijalnim jarmovima, statorskim (1) i rotorskim (9) tako da se magnetski krug zatvara ulančujući primarni i sekundarni namot, kako to pokazuje silnica simbolizirana linijom točka-crta (7). Aksijalni jarmovi rotora provučeni su kroz otvore (4) u rotorskim prstenovima. Prstenasti limovi statora i rotora imaju prorėze (10 i 11) u radialnom smjeru u svrhu ograničenja vrtložnih struja u njima. Na tom principu moguća je, dakako, i višefazna izvedba (s ostvarenjem ušteda u presjecima magnetskog kruga na prije spomenut način).

Slika 5 prikazuje varijantu netom opisane koncepcije sa sl.4; prikazana je trofazno. Za tu varijantu se usudujemo reći da će po svojoj jednostavnosti i tehnologičnosti vrlo često i ozbiljno konkurirati većini drugih koncepcija. Njena osnovna karakteristika i originalnost, a ujedno i prednost, je u tome, da ima samo jedan statorski aksijalni jaram, a statorski namot se ne mota koaksijalno s osovinom nego oko tog statorskog jarma. Rotor je iste koncepcije kao onaj na sl.4. Put silnice glavnog magnetskog polja simbolizira linija točka-crta. Osim ušteda u vremenu izrade i u količini

bakra statora, kod ove koncepcije je olakšana izrada izvoda i otcjepa na statoru (bez obzira na dimenzije vodiča); olakšano je i izvođenje višenamotnog statora i mogućnost podešavanja zračnog raspora ispod statorskog jarma, što je važno u slučajevima kad se rotacijskom transformatoru povjerava i neka regulacijska uloga (uloga prigušnice ili kompaundnog transformatora) u sistemu samouzbude i kompaundacije (osim uloge beskontaktnog prenošenja uzbudne snage na rotor). Slijedi da je ova koncepcija konstrukcije pogodna i za najsloženije slučajeve primjene, odnosno da je gotovo univerzalno primjenjiva.

Ocjena tehnološkičnosti neke koncepcije je u priličnoj mjeri subjektivna; naime, ona dosta ovisi o samom proizvođaču koji daje tu ocjenu: za jednog proizvođača je lakše izvediva jedna koncepcija za drugog neka druga, ovisno o postojećem iskustvu i navikama dotičnog. Među ovdje opisanim koncepcijama moguć je, dakako, i niz kombinacija. Tako na primjer, izvedba s radijalno slaganim rotorskim limovima i aksijalnim zračnim rasporedom po uzoru na sl.1, može se zgodno kombinirati s konstrukcijom statorskog jarma i njegovog namota analognom koncepciji na sl.5. Takva varijanta je prikazana na sl.6 jednofazno, a može se zamisliti i trofazno.

Zanimljive su također razne izvedbe sa spiralno motanim dijelovima jezgre, te s dijelovima od sinteriziranih mekomagnetskih materijala.

3. Karakteristične sheme uzбудnih sistema s rotacijskim transformatorom i njihova svojstva

Na sl.7 i 8 prikazani su primjeri upotrebe rotacijskih transformatora uz racionalizirane sheme samouzbude i kompaundacije, gdje im je namijenjena samo uloga beskontaktnog prenošenja uzbudne snage na rotor⁽⁵⁾.

Na sl.7 je dan jednopolni prikaz trofazne generatorske sheme uzbude i regulacije, u kojoj je rezonantna shema samouzbude i kompaundacije dopunjena finom regulacijom na principu oduzimanja uzbudne snage pomoću elektroničkog tzv. dodat-

nog regulatora. Osnovni elementi samouzbudno-kompaundnog sistema su kompaundni transformator i kondenzatorska baterija. Oni su odgovorni za grubu regulaciju uzbude, tj. za približno prilagođenje uzbude generatora veličini i $\cos\varphi$ opterećenja, pa su odgovorni i za kompletnu dinamiku uzbude kod prijelaznih stanja, npr. udarnih promjena opterećenja. U slučaju prisustva dodatnog regulatora za finu regulaciju na principu oduzimanja uzbudne snage, osnovni elementi su podešeni tako da se u svakom stacionarnom režimu opterećenja dobiva uzbuda nešto veća od potrebne, pa se upravljanim oduzimanjem viška uzbude postiže dopunska fina regulacija, odnosno korekcija uzbude. Dodatni regulator osigurava i stabilan rad generatora na krutu mrežu.

Kao što je poznato, princip funkcioniranja samouzbudno-kompaundnog uređaja prema sl.7 temelji se na vektorskom sumiranju komponenti uzbudne struje na izmjeničnoj strani ispravljača; točnije: komponenti uzbude praznog hoda, proporcionalnoj naponu generatora (ovisnoj o podešenju induktiviteta kompaundnog transformatora) vektorski se pribraja komponenta opterećenja, proporcionalna struji opterećenja (ovisna o podešenju prijenosnog odnosa kompaundnog transformatora). Kut između komponente opterećenja i vertikale na komponentu praznog hoda jednak je kutu φ faktora snage ($\cos\varphi$) generatora; tako ove komponente uzbude (praznog hoda $\dot{I}_0$ i opterećenja $\dot{I}_t$) sa svojom rezultantom $\dot{I}_{\sim}$ tvore trokut sličan, ili približno jednak, trokutu uzbude sinhronog stroja:

$$\dot{I}_{\sim} = \dot{I}_0 + \dot{I}_t .$$

Rezonancija, kod nazivne frekvencije generatora, između induktiviteta prigušnice i kapaciteta kondenzatorske baterije igra bitnu ulogu u eliminiranju utjecaja termičke promjene otpora uzbudnog namota, te kod početnog uzbudivanja generatora (tj. iniciranja uzbude pomoću remanentnog napona stroja), a povoljno utječe i na brzinu regulacije uzbude u prijelaznim stanjima. No, u načelu može se izostaviti, pogotovo u prisustvu adekvatne dodatne regulacije u sistemu.

Učinski međutransformator služi za usklađenje napona armature generatora i napona njegove uzbude s ciljem racionaliziranja dimenzija elemenata samouzbudno-kompaundnog uređaja, te u svrhu galvanskog odvajanja niskonaponskog dijela uzbudno-regulacijskog sistema od visokog napona. Kod niskonaponskih strojeva ovaj učinski transformator se redovito izostavlja.

Kod visokonaponskih strojeva kompaundni transformator je pogodno postaviti u zvjezdište stroja radi postizanja veće pogonske sigurnosti.

Fina regulacija na principu oduzimanja uzbudne snage vrlo je pogodna kod ovakvih sistema samouzbuđe s kompaundacijom za generatore manjih, eventualno srednjih snaga, gdje iznosi oduzimanih snaga još nisu znatni. Zbog toga se primjenjuje i kod kontaktnih izvedbi sistema samouzbuđe i kompaundacije (tj. kod izvedbi s četkicama i kliznim kolutima), kada se u stacionarnim stanjima traži veća točnost regulacije ili pak paralelni rad generatora s krutom mrežom. Kada takvih zahtjeva nema, (npr. kod samostalnih malih elektro-centrala), ova se dopunska fina regulacija može izostaviti, dakako pod uvjetom adekvatnog podešenja elemenata samouzbudno-kompaundnog sistema.

U slučajevima kad su oduzimane uzbudne snage znatne po iznosu, uređaj za oduzimanje uzbude može se koncipirati tako da se oduzimana snaga šalje ponovo u mrežu. S tako koncipiranim finom regulacijom uzbude, prikazani uzbudno-regulacijski sistem postaje atraktivan i za najkrupnije jedinice, što znači da se može primjenjivati bez ograničenja u pogledu snage uzbude.

Samouzbudno-kompaundni sistem prema sl.7 je upotrebljiv, uz male promjene, i kod sinhronih motora. - Budući da se od motora obično ne traži velika točnost držanja $\cos \varphi$, fina regulacija se može izostaviti, a za osiguranje stabilnosti rada motora na krutu mrežu izvodi se tzv. "križanje" faza u uređaju za samouzbudu i kompaundaciju. Pod križanjem faza podrazumijevamo prespajanje kompaundnog transformatora na takav način da se na naponsku komponentu uzbude jedne faze

vektorski dodaje strujna komponenta susjedne faze, i to uz primjenu takve kombinacije smjerova motanja namotâ kompaundnog transformatora da se kut strujne komponente prema vertikali na naponsku komponentu poveća za 60° . Križanje faza uzrokuje izvjesnu dodatnu netočnost regulacije napona, no ni to kod motora obično ne smeta. Tako se dobiva jednostavan, izvanredno brz, pouzdan i jeftin uzbuđno-regulacijski sistem za sinhronne motore, koji još treba nadopuniti samo s automatskim uređajem za organiziranje asinhronog zaleta.

Na sl.8 prikazana je jednofazna varijanta uređaja za samouzbudu i kompaundaciju sinhronog motora (križanje faza je primijenjeno). Naglasimo odmah da simetričnost opterećenja faza sinhronog motora u stacionarnom radu pruža izvanrednu priliku da se umjesto trofaznog uređaja za samouzbudu i kompaundaciju primijeni jednofazni; tada rotacijski transformator postaje bitno jednostavniji. Učinski transformator, opisan kod generatorske sheme, na sl.8, nije prikazan. Kompaundni jednofazni tronamotni transformator smješten je u zvjezdištu. Za kompaundaciju se koristi razlika struja dviju faza, što može biti korisno kod prijelaznih nesimetričnosti struja sinhronog motora. Komponenta uzbude u praznom hodu tjerana je linijskim naponom. Sklopkama S_1 i S_2 upravlja automatski uređaj za asinhroni zalet. Zbog zaštite elemenata uzbuđnog sistema, sklopke u toku asinhronog zaleta ostaju otvorene sve do uskočnog trenutka, kada se uključuje uzbuda i nastupa etapa sinhronizacije. Na istosmjernim stezaljkama uzbuđnog namota motora, na rotoru, priključen je rotirajući otpornik za zalet. Kroz njega u toku zaleta teče izmjenična struja rotora motora, jer su tiristori rotirajućeg ispravljačkog mosta kroz to vrijeme zatvoreni pomoću poluvodičkog uređaja, smještenog zajedno s ispravljačima na rotoru, odn. na osovini (moguće je naćiniti takav uređaj, koji ne treba nikakvih komandi na statorskoj tj. mirujućoj strani). Kod sinhronog rada motora tiristori su stalno otvoreni i rade kao obićne diode. Rotirajući otpornik za zalet obićno je namotan oko osovine (no tako da njegova struja ne tjera kroz osovinu magnetski tok) i ostaje prikljućen na stezaljkama

uzbudnog namota i u sinhronom (stacionarnom) radu, te služi i za zaštitu od prenapona uzbudnog namota u svim režimima rada motora. Međutim, budući da se prenaponska zaštita može otkkladnije realizirati za druge načine, i budući da opisan otpornik stalno troši snagu, razumljivo je nastojanje projektanta i konstruktora da zaobiđu upotrebu ovako organiziranog asinhronog zaleta.

Jedna od novih zamisli je da se otpornik za zalet priključi na primarne (statorske) stezaljke rotacijskog transformatora, te da se rotirajući ispravljački uređaj koncipira tako da se u toku asinhronog zaleta izmjenična struja rotora motora može zatvoriti preko sekundarnog (rotorskog) namota rotacijskog transformatora, pa otpornik na primarnoj strani postaje potrošač u odnosu na uzbudni namot motora, analogno kao kod klasičnih klizno-kontaktne uređaja za asinhroni zalet te kao kod netom opisanog uređaja s rotirajućim otpornikom. Za odvijanje zaleta je nebitno što je ovdje otpornik priključen na uzbudni namot preko transformatora. No važno je to da otpornik za zalet ne rotira na osovini motora, nego je smješten negdje na kućištu statora ili u razvodnoj ploči postrojenja; to bitno pojednostavljuje njegovu konstrukciju i omogućuje njegovo obilnije termičko dimenzioniranje u svrhu postizanja što veće pogonske sigurnosti. Poznati su, naime, u praksi dosta česti slučajevi oštećenja rotirajućih otpornika za asinhroni zalet. Za mirujući otpornik, osim toga, nije teško projektirati automatiku za njegovo isklapanje (isključenje) nakon zaleta.

Kao što je već spomenuto, postoje sheme u kojima rotacijski transformator nije samo element za beskontaktno prenošenje uzbudne snage na rotor sinhronog stroja, nego ujedno ima i neku regulacijsku funkciju u uzbudnom sistemu. To su sheme u kojima se beskontaktnost rotacijskog transformatora ujedinjuje s funkcijom jednog ili dva osnovna elementa sistema samouzbude i kompaundacije: s funkcijom prigušnice ili istovremeno prigušnice i strujnog transformatora (odn. kompaundnog transformatora).

Takve sheme obično zahtijevaju višenamotne barem tro- ili četveronamotne rotacijske transformatore (pogotovo ako je primijenjena i dodatna, fina regulacija takve koncepcije, kod koje za priključak regulatora postoji poseban namot na statoru rotacijskog transformatora). Nije nam poznato da se ove sheme negdje

komercijalno primijenjuju, no smatramo da imaju svoju perspektivu na dosta širokom području manjih i donekle srednjih snaga sinhronih strojeva.

Na sl.9 je prikazana najjednostavnija moguća rezonantna shema beskontaktna samouzbude s kompaundacijom, u kojoj rotacijski transformator ima ulogu i prigušnice i strujnog transformatora (tj. kompaundnog transformatora). Njena jednostavnost je u tome što sadrži minimalni mogući broj elemenata (vidjeti legendu uz sliku). Shema je pogodna uglavnom za manje niskonaponske jedinice sinhronih strojeva (u prikazanom slučaju - generatora), jer kod ove sheme su struje kroz kondenzatore relativno velikog iznosa. Kod većih jedinica strojeva kondenzatore većinom treba izostaviti iz sheme i opremiti sistem dodatnom regulacijom. Dodatni regulator se može vezati na namot w_2 ili na poseban (četvrti) namot, spojen u zvijezdu ili trokut i namotan na istoj jezgri s namotima w_1 , w_2 i w_3 prikazanim na sl.9. Kod visokonaponskih jedinica napajanje namota w_2 potrebno je ostvariti preko posebnog učinkog transformatora (koji na sl.9 nije prikazan), a primar (w_1) kompaundnog rotacijskog transformatora vezemo u zvjezdište sinhronog stroja.

U slučajevima kada objedinjavanje uloge prigušnice i strujnog transformatora u jednom jedinom elementu (kompaundnom transformatoru) nema konstrukcijskih, ni ekonomskih, ni nekih drugih prednosti, može se uspješno primijeniti ideja prema sl.10. U toj shemi je strujni transformator posebna, statička jedinica, dok rotirajuća transformatorska jedinica (podesivog zračnog rasporeda), prigradena generatoru na osovini, ima funkciju prigušnice (s izvjesnim popratnim utjecajem na kompaundaciju). Zvjezdište sekundarnog namota strujnog transformatora može se, u principu, otvoriti, a krajevi faza tog namota priključiti na stezaljke ABC generatora.

Opisane sheme na sl.9 i 10 mogu se uspješno primijeniti i kod sinhronih motora uz uvjet da se izvrše odgovarajuća prespajanja u cilju postizanja stabilnog rada motora na mreži i bez dopunskih uređaja za paralelni rad; ta prespajanja se sastoje prvenstveno u opisanom "križanju" faza. Potrebne su, dakako, i određene dopune uzbudno-regulacijskog sistema u cilju organizacije asinhronog zaleta sinhronog motora.

Relativno blagi zahtjevi na točnost držanja faktora snage ($\cos \varphi$) motora, omogućavaju, međutim, i značajna pojednostavnjenja samouzbudno-kompaundnih shema u smislu reduciranja broja faza tih shema, namijenjenih dakako za trofazne motore. Na sl.11 je principno prikazana jedna takva rezonantna shema s jednofaznim tronamotnim rotacijskim kompaundnim transformatorom i rotirajućim ispravljačima, koji u mosnom spoju - zbog organizacije asinhronog zaleta - trebaju sadržavati i diodne i tiristorske grane, analogno slučaju sa sl.8.

Na sl.12 je prikazana varijanta ideje sa sl.11, u kojoj je uloga glavnog strujnog transformatora povjerena posebnoj transformatorskoj statičkoj jedinici, što u nekim slučajevima može znatno olakšati konstrukcijske probleme kod rotacijskog kompaundnog transformatora.

Ovdje prikazane i njima slične sheme u sprezi s opisanim (i njima sličnim) konstrukcijskim rješenjima rotacijskih transformatora pružaju mogućnost postizanja beskontaktnosti uz očuvanje poznatih izvanrednih dinamičkih svojstava statičke uzbude i samouzbuđe (sa i bez kompaundacije), ne otežavajući bitno tehničke probleme, koji se susreću već i kod beskontaktnih uzbudnica s rotacijskim uzbudnicima. Mnoga rješenja statičkih kontaktnih sistema samouzbuđe i kompaundacije kod malih sinhronih strojeva predstavljaju najjeftinije i najkvalitetnije uzbudne sisteme uopće; kod velikih strojeva često pružaju znatnih tehničkih i ekonomskih prednosti. Ako postoji mogućnost da se izgradi sistem koji ima sva ta dobra svojstva i još je k tome beskontaktn - nema razloga da takav sistem ne dobije ono mjesto u elektrostrojogradnji i regulacijskoj tehnici koje mu i pripada. Rotacijski transformator je novi element koji to omogućuje.

4. Osobitosti samouzbudno-kompaundnih sistema s asinhronim uzbudnikom

U svakoj od opisanih shema samouzbuđe i kompaundacije (poželjno u trofaznoj izvedbi), umjesto rotacijskog transformatora možemo zamisliti asinhroni uzbudnik iste principne električke sheme spoja; taj uzbudnik možemo shvatiti kao transformator u širem smislu te riječi; naime, u njemu se očigledno, osim trans-

formacije struja i napona, odvija i elektromehanička konverzija energije (što je već u Uvodu naglašeno).

Iako uzbudno-regulacijski sistemi s asinhronim uzbudnicima donekle zaostaju po dinamičkim svojstvima od onih opisanih u tč.3, ipak su za proizvođača električkih strojeva dosta zanimljivi; razlog očigledno leži u tome što se oni konstrukcijski i tehnološki mnogo bolje uklapaju u iskustvo većine proizvođača; konstrukcija, a time i tehnologija, aktivnog dijela (jezgri i namota) ovih uzбудnika gotovo se i ne razlikuje od klasičnih indukcionih strojeva motanog rotora.

Asinhroni uzбудnici normalno rade u režimu kočnice, tj. smjer rotacionog magnetskog polja i smjer vrtnje rotora su suprotni (pozitivno klizanje $s > 1$; u slučaju broja polova uzбудnika jednakom broju polova glavnog stroja $s = 2$).

Analitički tretman shema s asinhronim uzбудnikom u stacionarnim stanjima je relativno jednostavan i potpuno analogan onom kod shema sa samim transformatorima (L.1, L.2); to je potpuno razumljivo ako se sjetimo da je nadomjesna shema indukcionog stroja građena kao i shema transformatora. Tretman u stacionarnom stanju je vrlo važan dio razmatranja u svrhu dimenzioniranja elemenata uzbudnog sistema, uključujući sam uzбудnik.

Tretman prijelaznih stanja je složen, ali ih se (u svrhu brze provjere kvalitete sistema) može simulirati i na analognom računalu.

Iako se način namatanja asinhronog uzбудnika u suštini ne razlikuje od namatanja indukcionog motora, primjena shema u kojima se kompaundacija odvija u samom uzбудniku - na taj način da se čitava struja opterećenja glavnog stroja uvede u stator dotičnog uzбудnika - kod velikih jedinica strojeva može biti vrlo nepoželjna zbog velikih struja i, u vezi s time, velikih presjeka vodiča. Naravno da se izmjenama u shemi takve poteškoće mogu zaobići (vidjeti sheme namijenjene za upotrebu rotacijskih transformatora).

Podsjetimo na činjenicu da, za razliku od drugih vrsta uzбудnika (npr. sinhronih), asinhroni uzбудnik predstavlja element kod kojeg poput običnog transformatora postoji čvrsta obosmjerna veza između primara i sekundara. To može biti

važno svojstvo, npr. u slučaju primjene rezonantnih shema, gdje omogućuje eliminaciju utjecaja termičke promjene radnog otpora uzbudnog namota na veličinu uzbudne struje (kao što je slučaj kod čisto transformatorskih shema).

5. Završne primjedbe i zaključci

Razumljivo je da su mehanički problemi kod brzohodnih strojeva (kod turbogeneratorsa 3000 i 3600 o/min) vrlo izraženi pa će teže doći do upotrebe rotacijskih transformatora; tu su svakako pogodniji asinhroni uzbudnici. Kod hidro- i dizel generatora može biti obrnuto; dakako, uz pretpostavku upotrebe pogodnih koncepcija konstrukcije.

Zaštita ispravljača od prenapona je uvijek potrebna, bez obzira na vrstu sheme. Ponekad je (kod većih jedinica) potrebna i strujna zaštita s dojavom kvara na ispravljaču, te dojava dozemnog spoja u krugu uzbuđivanja. Principi zaštite su isti kao i kod poznatijih (u literaturi) sistema uzbuđivanja sa sinhronim rotacijskim uzbudnicima, a kriteriji su slični kao kod statičkih, odn. kontaktnih sistema samouzbuđivanja i kompaundacije.

Izložena materija je rezultat rada na razvoju novih rješenja uzbudno-regulacijskih sistema, te studija novih mogućnosti na tom polju (u nas se prvenstveno radi na rotacijskom transformatoru). Pokazali smo ukratko ta rješenja i te mogućnosti. Njihovo vrednovanje djelomično prepuštamo vremenu i širem krugu zainteresiranih. Željeli bismo da ovdje opisane koncepcije posluže kao stimulans i okosnica za daljnji razvoj ovih zanimljivih ideja.

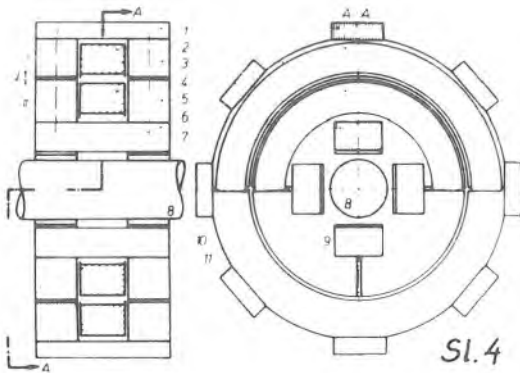
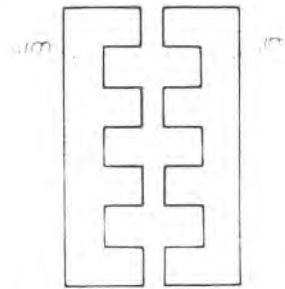
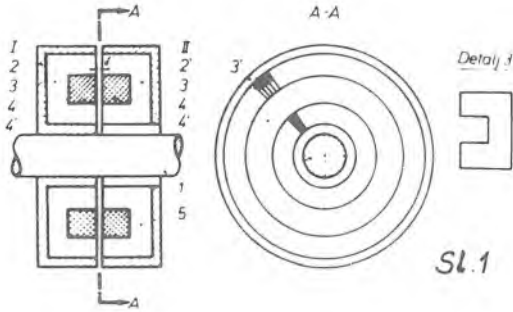
Opaske uz tekst:

- () Beskontaktni uzbuđni sistemi - sistemi bez kliznih kontakata.
- () Osovinski uzbuđnik - uzbuđnik prigraden na osovinu glavnog sinhronog stroja.
- () Ovi problemi su radovima autora ovog referata znatno obilježeni.
- () Neki proizvođači električnih strojeva (pa tako i mi) prijavili su svoja rješenja patentnim uredima u svrhu zaštite. Ovoje smo prikazali samo vlastita originalna rješenja (za koja je izdan patentni list), odnosno rješenja koja u potpunosti ili s nekim elementom pretendiraju na originalnost (prijavljena rješenja u svrhu patentne zaštite). U referatu, dakako, ove originalnosti nisu uvijek naglašavane.
- () Izlaganje u ovoj točki temelji se na nizu originalnih shema samouzbuđne i kompaundacije, za koje smo primili patente ili koje ili su patentni postupci u toku (vidjeti L.2).

6. Literatura

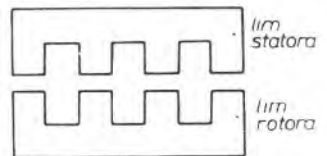
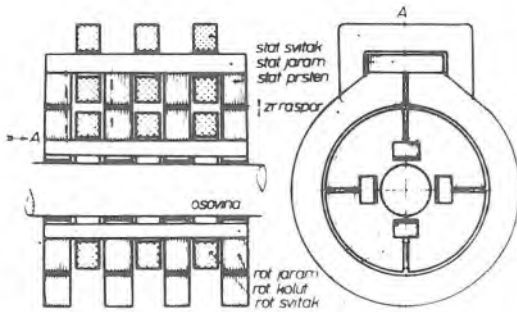
- L.1. Čulig Z., Šaban J.: Svojstva sinhronih kompaundiranih motora. - "Elektrotehnika" br.6, 1975., Zagreb.
- L.2. Šaban J.: Samouzbuđni kompaundirani sinhroni generatori proizvodnje "Rade Končar". - "Elektrotehnika" br.1 i 2, 1974., Zagreb.

Prilog sa slikama (sl. 1÷12)



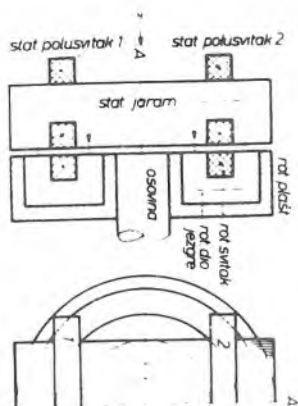
os (centar osovine, oko koje su radijalno složeni limovi i disk)

Sl. 2

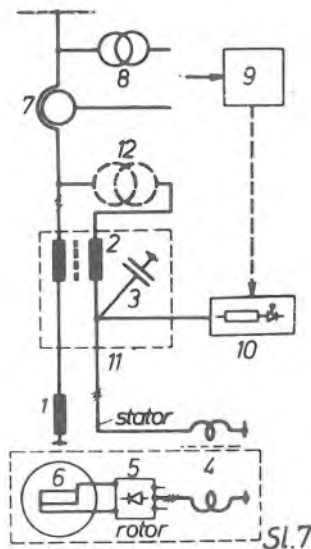


os (centar osovine) oko koje su radijalno složeni limovi u cilindru

Sl. 3



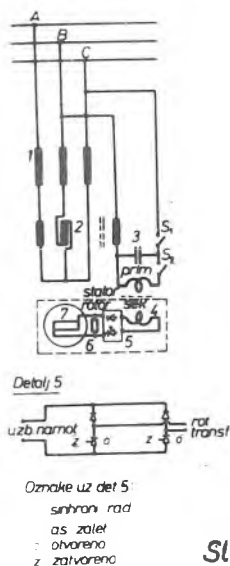
Sl.6



Sl.7

Legenda uz sl.7:

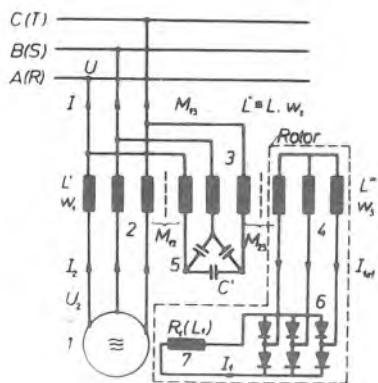
- 1 - armaturni namot sinhronog gen.
- 2 - kompaundni transf.(prigušnica+ strujni transf.); kod VN strojeva smješten u zvjezdištu gen.
- 3 - kondenz.baterija za rezonanciju s induktivitetom elementa 2
- 4 - rotacijski transf.
- 5 - rotirajući ispravljački uređaj
- 6 - uzbudni namot sinhr.stroja
- 7i8 - strujni,odn.naponski transf.
- 9 - elektronički (dodatni) regulator napona
- 10- oduzimanje uzb.snage u svrhu finog reguliranja
- 11- samouzbudno-kompaundni uređaj, sastavljen od elemenata 2 i 3
- 12- učinski međutransformator prisutan kod VN strojeva



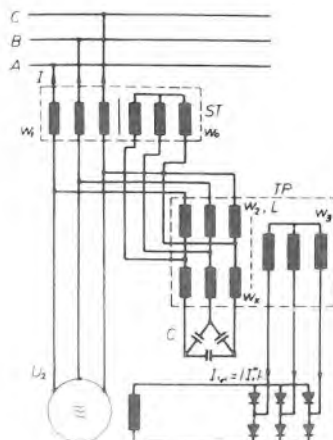
Sl.8

Legenda uz sl.8:

- 1 - armaturni namot sinhronog motora
- 2 - kompaundni transformator (prigušnica + strujni transf.)
- 3 - kondenz.baterija za rezonanciju s induktivitetom elementa 2
- 4 - rotacijski transformator
- 5 - rotirajući ispravljački uređaj (jednofazni most)
- 6 - otpornik za asinhroni zalet (i zaštitu ispravljača)
- 7 - uzbudni namot sinhronog motora



Sl. 9



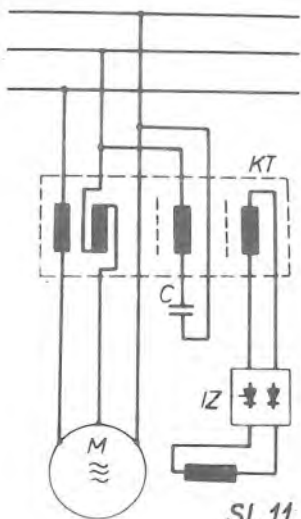
Sl. 10

Legenda uz sl. 9:

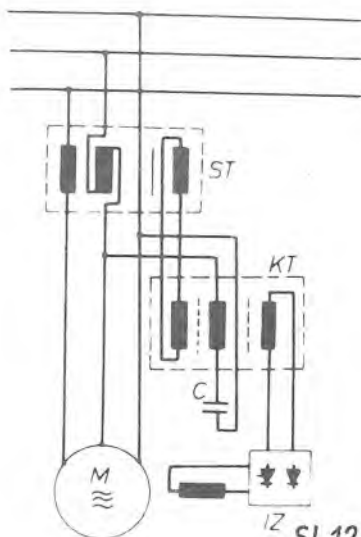
- 1, 7 - armatura, odn. uzb. namota sinh. generatora
- 2, 3, 4 - namoti rotac. komp. transf.
- 5 - kondenz. baterija za rezonanciju
- 6 - diodni rotirajući most

Legenda uz sl. 10:

- TP - rotac. komp. transformator
- ST - strujni transformator
- C - kondenzatorska baterija za rezonanciju



Sl. 11



Sl. 12

Legenda uz sl. 11 i 12:

- KT (sl. 11 i 12) - rotacijski jednofazni kompadni transformator
- C (sl. 11 i 12) - kondenzatorska baterija za rezonanciju
- IZ (sl. 11 i 12) - rotirajući ispravljački uređaj sa zaštitom
- ST (sl. 12) - jednofazni strujni transformator

ALFRED AŠNER
CERN
1211 Genève 23

SUPRAVODLJIVI MAGNETI ZA VISOKOENERGETSKU FIZIKU ELEMENTARNIH
ČESTICA

Magneti za ubrzavanje, transport i detekciju elementarnih čestica visokoenergetske fizike značajno su utjecali na razvoj filamentiranih supravodiča na bazi Nb-Ti i Nb₃-Sn-a, koji su dobrim dijelom razvijeni, da se zadovolje zahtjevi preciznosti tih magneta.

U referatu se najprije definiraju precizna dipolarna i kvadrupolarna polja i njihove tolerancije te rasporedi strujnih obloga duž korisnog otvora magneta.

Iz mehaničkih i konstruktivnih razloga danas je najprikladnija koaksijalna, koncentrična izvedba sa sektorskim namotom te s "hladnim" ili "toplim" željeznim štitom za povećanje magnetskog polja.

Prelazeći na supravodiče, referat se osvrće na kriterije stabilnosti, koji su doveli do realizacije finih filamentiranih supravodiča u stabilizacionoj bakrenoj matrici i na kompaktirane kableske vodiče, koji se u biti ne razlikuju, s obzirom na primjenu za istosmjernu ili pulzirajuću uzbuđu.

Da se postigne nazivna struja i polje i izbjegnu prelazi u normalno stanje, tzv. quenchevi, potrebna je vrlo kompaktna mehanička izvedba aktivnog dijela magneta.

Potrebno je također predvidjeti prikladan rashladni sistem, koji se danas još pretežno zasniva na principu kupke.

Referat se zaključno osvrće na problem širenja normalne zone u namotu i ukazuje na prikladne električke sheme, koje uključuju induktivne sprege između namota, štitova itd., te na mogućnosti zaštite.

Zadnje poglavlje je posvećeno kratkom prikazu supravodljivih namota velikih detektorskih magneta visokoenergetske fizike.

SUPERCONDUCTING MAGNETS FOR ELEMENTARY PARTICLE HIGH ENERGY PHYSICS

Superconducting magnets used to accelerate, transport and detect high energy particles had a decisive influence on the development of fine filamentary Nb-Ti and Nb₃-Sn superconductors.

The requirements concerning high precision dipole and quadrupole fields are defined and adequate current density shapes around the aperture are given. A very suitable design for mechanical reasons is the coaxial, concentric arrangement with sector windings and with a warm or cold iron screen for field amplification. Stability criteria are presented which led to the development of fine filamentary superconductors in a stabilizing copper matrix and in compacted or cable-like conductors, which are basically identical for d.c. or pulsed application.

Compact mechanical design is essential to reach the rated current and field without quenching.

The quench propagating mechanism is explained and electrical schemes introduced, taking into account the different couplings between windings, screens, etc.

The cooling system, based on bath cooling is also discussed. Large detector magnet windings, used in high energy physics are presented in the final chapter.

Supravodljivi magneti za visokoenergetsku fiziku elementarnih čestica

1) Uvod

Otkako su se pred desetak godina pojavili prvi supravodiči za visoka magnetska polja, projektanti uređaja za visokoenergetsku fiziku elementarnih čestica, osobito elektromagneta, zainteresirali su se za njihovu primjenu i znatno pridonijeli razumijevanju i razvoju tehnoloških procesa za dobivanje supravodiča traženih svojstava.

Visokoenergetska fizika je osim toga raspolagala solidnim iskustvom na području rashladnih uređaja, koji su bili potrebni za dobivanje tekućeg vodika H₂ u mjehuravim komorama (bubble chambers). Zbog velikih snaga, koje bi bile potrebne za napajanje klasičnih

magneta za te komore, njihovi su uzbudni namoti danas uglavnom su-
pravodljivi.

Iz zahtjeva za sve višim energijama, tj. za visokim magnet-
skim poljima, nikla je razvojna aktivnost na području supravodljivi-
vih magneta za akceleratora, akumulacione prstene te za elemente
transporta snopova sekundarnih čestica.

Nije pretjerano ako se ustvrdi da su fundamentalni radovi o
kriterijima stabilnosti, koji su dali bazu za uspješan razvoj i pri-
mjenu stabiliziranih multifilamentiranih supravodiča od Nb-Ti i
Nb₃-Sn-a, proizašli iz zahtjeva za preciznošću i drugim karakteri-
stikama tih magnetskih polja.

Spomenimo također da je pretežni dio supravodiča (od Nb-Ti)
još uvijek namijenjen za uređaje visokoenergetske fizike.

Kraj velike raznolikosti supravodljivih magneta u visokoener-
getske fizici ograničit ćemo se u referatu na bitne, tj. na magnete
za vođenje čestica u širem smislu i na namote velikih detektorskih
magneta.

2) Oblikovanje i preciznost magnetskog polja, izbor prikladnog strujnog obloga

Supravodljivi magneti za akceleratora, akumulacione prstene
i za transport čestica obuhvaćaju magnete za vođenje snopa, dipole
konstantne indukcije B_0 te magnete za fokussiranje, kvadropole sa
konstantnim gradijentom indukcije

$$G_0 = \frac{\partial B_0}{\partial x} = -\frac{\partial B_0}{\partial y} = \frac{\partial B_0}{\partial r} \dots\dots\dots (1)$$

Dozvoljena odstupanja ΔB_0 i ΔG_0 su neznatna i iznose $\frac{\Delta B_0}{B_0} \approx 1 \cdot 10^{-4}$
 $\frac{\Delta G_0}{G_0} \approx 10^{-3}$. Time je definirana visoka preciznost tih magnetskih
polja, koja se obično izražava višim harmonicima magnetske induk-
cije i gradijenta B_n i G_n .

Na osnovi analitičkih rješenja u dvodimenzionalnom prostoru
razni su autori definirali raspored linijskog strujnog obloga $\oint \left[\frac{A}{r} \right]$
duž kružnog, eliptičnog, pravokutnog otvora magneta. Slika 1. prik-
azuje neke od tih konfiguracija za dobivanje dipolarnih polja.

Nakon konstrukcije prvih modela brzo se uvidjelo da je većina

rasporeda prema sl.1 neprikladna iz mehaničkih razloga i da ih treba odbaciti. Danas su se održala i afirmirala svega dva, vrlo slična rješenja, koja omogućuju kompaktnu, koaksijalnu, cilindričnu te termodinamički zadovoljavajuću konstrukciju: cilindrički sektorski namot s konstantnom gustoćom struje $J[\frac{A}{m}]$ te sektorski namot promjenljive gustoće struje za aproksimaciju rasporeda $\cos \varphi$, $\cos 2\varphi$.

Spomenimo i ulogu koncentričnog željeznog štita, koji se može smjestiti neposredno oko namota, da bi se dobila što viša korisna indukcija zrcaljenjem strujnog obloga na kružnici polumjera R_{S1} . To je raspored s hladnim željezom na temperaturi tekućeg He. U protivnom slučaju se željezni štit nalazi izvan kriogenskog dijela na temperaturi okoline.

Ako s $R_1[m]$ i $R_2[m]$ označimo polumjere sektorskog namota, s α_1, α_2 njegove kuteve te s $R_{S1} [m]$ unutarnji polumjer štita relativnog permeabiliteta μ_r , onda se uz konstantnu gustoću struje J mogu izvesti sljedeće relacije u polarnim koordinatama za B_0 i G_0 :

$$\frac{B_\varphi[r]}{B_\varphi[r]} = \frac{2\mu_0 J}{\pi} \left\{ \left\{ (R_2 - R_1)(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{2n}}{n^2(2n+1)(2n-1)} \left[\frac{1}{R_1^{2n+1}} - \frac{1}{R_2^{2n+1}} \right] \cdot [\cos(2n+1)\alpha_1 - \cos(2n+1)\alpha_2] \cos(2n+1)\varphi \right\} + \left\{ \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{2n-2}}{R_{S1}^{4n-2} (2n+1)(2n-1)} \cdot (R_1^{2n+1} - R_2^{2n+1}) [\cos(2n-1)\alpha_1 - \cos(2n-1)\alpha_2] \cos(2n-1)\varphi \right\} \right\} \quad \dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial B_\varphi}{\partial r} = \frac{2\mu_0 J}{\pi} \left\{ \left\{ (\cos 2\alpha_1 - \cos 2\alpha_2) \cos 2\varphi \cdot \ln \frac{R_2}{R_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4n+1}{2n(4n+2)} \left[\left(\frac{r}{R_1}\right)^{4n} - \left(\frac{r}{R_2}\right)^{4n} \right] \cdot [\cos(4n+2)\alpha_1 - \cos(4n+2)\alpha_2] \cos[(4n+2)\varphi] + \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4n+1}{2(n+2)(4n+2)} \cdot \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} \cdot \frac{1}{R_{S1}^{4n+4}} \cdot [R_1^{4n+4} - R_2^{4n+4}] [\cos(4n+2)\alpha_1 - \cos(4n+2)\alpha_2] \cos[(4n+2)\varphi] \right\} \right\} \right\} \quad \dots\dots(3)$$

Za ukupnu energiju dipola i kvadrupola po jedinici duljine se dobije:

$$A_d \left[\frac{W_s}{m} \right] = \frac{\pi}{\mu_0} \left\{ (B_0 - B_s)^2 \left[\frac{1}{6} (R_2^2 + 2R_1 R_2 + 3R_1^2) - \frac{(R_2^2 + R_1 R_2 + R_1^2)^2}{16 R_{S1}^2} \right] + \frac{1}{3} (B_0 - B_s) \cdot B_s (R_2^2 + R_1 R_2 + R_1^2) + \frac{1}{2} B_s^2 R_s^2 \right\} \quad \dots\dots(4)$$

gdje je B_s indukcija dobivena djelovanjem štita.

$$A_{kv} \left[\frac{W_s}{m} \right] = \frac{\pi}{\mu_0} \left\{ \frac{R_{s1}^4}{2} G_s^2 - \left[\frac{R_{s1}^2}{2} G_s - \frac{G_s (R_2^4 - R_1^4)}{8 R_{s1}^2 \ln \frac{R_2}{R_1}} \right]^2 + \frac{(G_0 - G_s)^2}{16 (\ln \frac{R_2}{R_1})^2} (R_2^4 - R_1^4 - 4 R_2^2 \ln \frac{R_2}{R_1}) \right\} \dots (5)$$

s G_s gradijentom uslijed djelovanja štita.

Odabiranjem dovoljnog broja sektora s kutevima $\alpha_{21} \dots \alpha_{2n}$, može se kompenzirati proizvoljan broj harmonika i tako postići tražena preciznost.

Danas raspolažemo brzim i pouzdanim računskim programima za proračun magnetskih polja poput programa MAGNET (dra Ch. Iselina), POISSON (dra Halbacha iz Berkeley-a), GFUN (dra Trowbridge-a iz laboratorija Rutherford), od kojih posljednji rješava i trodimenzionalne probleme. Svi ti programi, međutim, polaze od datih konfiguracija strujnog obloga.

Programi poput MIRT-a (dra Halbacha) i TAPCOIL (dra Iselina) optimiraju proizvoljan raspored strujnog obloga, korigirajući njegove parametre metodom minimalne sume kvadrata pogrešaka, dok se ne postigne željena preciznost.

Gornja izlaganja vrijede za dvodimenzionalna polja tj. za magnete kod kojih se mogu zanemariti rubni efekti. Preciznost magnetskog polja, odnosno gradijenta se, međutim, odnosi na integrale

$$\frac{1}{L_{mag}} = \int_{-\infty}^{+\infty} B_z(z) dz; \quad \frac{1}{L_{mag}} = \int_{-\infty}^{+\infty} G_z(z) dz;$$

U tom slučaju se može primijeniti trodimenzionalni računski program npr. GFUN.

Prikladan i jednostavan teorem zahvaljujemo G. Lambertsonu iz Berkeley-a, USA, koji kaže, da će se na gornje integrale moći primijeniti jednačbe 2) i 3), ukoliko će i integral gustoće struje zadovoljiti tražene relacije tipa

$$\frac{1}{L_{mag}} \int_{-\infty}^{+\infty} j(z, \rho, \alpha) dz = j_{2d} \cdot f(\rho, \alpha) \dots (6)$$

pri čemu je $f(\vartheta, \alpha)$ optimalni dvodimenzionalni raspored strujnog obloga. Jednadžba (6) se može koristiti za prikladno formiranje glava namota.

Zaključujući ovo poglavlje treba još spomenuti utjecaj "hladnog" visoko zasićenog željeznog štita i tolerancija izvedbe namota na preciznost B_0 , odnosno G_0 (vidi sl.2). Može se pokazati, da će se jako zasićenje željeza odraziti u negativnom trećem harmoniku polja. Za svaku radnu točku, tj. visinu indukcije B_0 može se odrediti optimalna debljina štita, za koju je taj harmonik jednak nuli. Za cijelo radno područje to nije moguće i stoga će biti potrebno predvidjeti odgovarajući korekturni namot.

Geometrijske tolerancije strujnog obloga, ekscentričnost montaže, ekscentričnost između namota i željeznog štita i sl., prouzročit će daljnje harmonike, koji više nisu simetrični s obzirom na osnovni harmonik. Stoga će najniže od tih harmonika također trebati kompenzirati korekturnim namotima.

3) Dimenzioniranje multifilamentiranih supravodiča od Nb-Ti i Nb₃-Sn-a

Najrašireniji supravodič za uzbudne namote magneta u visokoenergetskoj fizici je Nb-Ti; zadnjih godina postignut je znatan napredak i u tehnologiji filamentiranih supravodiča od Nb₃-Sn-a, koji imaju znatno više T_k , J_k te H_k ; no rezultata o njihovoj uspješnoj praktičnoj primjeni u namotima još nema.

Oba filamentirana supravodiča su rezultat teoretskih i eksperimentalnih istraživanja, naročito grupe laboratorija Rutherford u Engleskoj pod P.Smith-om (1) i M.Wilsonom, koja je sredinom 60-tih godina definirala kriterije stabilnosti. Duchateau i Turk (2) su nedavno korigirali kriterij stabilnosti s obzirom na transportnu struju I_T .

Kriterij adijabatske stabilnosti definira maksimalni promjer supravodiča d_{max} , kod kojeg neznatna promjena temperature ΔT , gustoće struje ΔJ_k ili vanjskog magnetskog polja ΔH_v neće dovesti do lančane reakcije, kako je to prikazano na sl.3.
 d_n je dat jednadžbom 7):

$$d_m [m] = 10^{-2} \cdot 2 \sqrt{\frac{300 T_c C_p}{\mu_0 J_k^2}} \quad \dots (7)$$

sa $T_0 = \frac{J_k}{c_k \mu_0} i c_k \left[\frac{W_s}{n_k k} \right]$ specifičnom toplinom supravodiča. Za supravodiče od Nb-Ti je $d_{max} \leq 50 \mu m$.

Supravodljive filamente treba ispreplitati, da se kod djelovanja promjenljivog vanjskog polja $\dot{H}_v$ -a ne treba zaboraviti, da svaka uzbuda i razbuda magneta za istosmjernu struju također odgovara $\dot{H}_v$ - spriječi otjecanje struje magnetiziranja gustoće J_k kroz stabilizacioni materijal ili bakrenu matricu, kako je to prikazano na sl.4. Korak ispreplitanja je prema tome to kraći, što je $\dot{H}_v$ ili frekvencija viša.

Supravodiči ne vode samo struje magnetiziranja gustoće J_k već i transportnu struju I_T , kojom ostvarujemo traženi strujni oblog i polje H_v . Ispreplitanje vodiča u bakrenoj matrici ne utječe na vlastito polje H_T -vidi sl.5-. Istražujući uvjete ravnoteže, pod kojim male promjene ΔT , $\Delta \frac{T}{T}$ i ΔH_T neće prouzročiti lančanu reakciju i quench, a koji se sad odnose na vođenje I_T u prstenastom vanjskom sloju vodiča, te uzevši u obzir termodinamičke prilike vodiča polumjera R , Duchateau i Turk su izračunali tzv. granični faktor β_g prema sl.6. Za dati vodič treba izračunati

$$\beta = \frac{\mu_0 (n J_k)^2 R^2}{c_k T_0} \dots\dots(8)$$

uz n udio supravodiča u presjeku vodiča te parametar

$$\nu = \frac{D_m}{D_{th}} \dots\dots(9)$$

sa D_m , $D_{th} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ konstantama magnetske, odnosno termičke difuzije i provjeriti da li je ispunjen uvjet $\beta < \beta_g$. Iz sl.6 se zatim može odrediti normirana struja zasićenja I/I_T , iznad koje dolazi do degradacije i quench-a. Smatra se da je taj fenomen bio uzrokom pojave training-a u mnogim izgrađenim magnetima.

Transponiranjem, kao u Roebelovim štapovima, pojedinih elemenata ili kompozita polumjera R_e u vodiču polumjera R se postiže znatno smanjenje efekta transportne struje prema jednadžbi

$$\frac{\beta_{geem}}{\beta_g} :: \left(\frac{R_{eem}}{R} \right)^2 \dots\dots(10)$$

Sličan kriterij se može izvesti i za uzdužnu, aksijalnu komponentu magnetskog polja, paralelnu s vodičem, koja inducira napone u isprepletenim filamentima kao u svitku. Taj će kriterij biti važan kod projektiranja vodiča za namote fuzionih reaktora.

Na osnovu gornjih kriterija se može definirati vodič od Nb-Ti. Vodič se sastoji od kompozita promjera 0.3 ... 0.7 mm, a svaki kompozit od filamenata Nb-Ti promjera 5 ... 50 μm , koji se nalaze u bakrenoj matrici. Omjer bakra i matrice iznosi 1:1 ... 3:1, a za vodiče velikih detektora i 10:1. Korak ispreplitanja iznosi 1 ... 2 cm. Konačan vodič može biti kompaktan ili u obliku isprepletenog kabela. Maksimalni broj filamenata u vodiču ograničen je na $N \leq 8000$.

U pulziranim magnetima indukcije B_v za akceleratora nastaju u supravodiču gubici po ciklusu i jedinici volumena uzbuđenog namota:

$$w = \int_R \cdot \vec{B}_v \cdot \frac{d}{4} \left[\frac{w}{m^2} \right] \dots (11)$$

s d/m prema sl.7.

Gornjim gubicima treba pribrojiti gubitke uslijed vrtložnih struja u matrici.

Izolaciju među kompozitima će, prema tome, trebati odrediti u ovisnosti o B_v . Kod niskih B_v se može predvidjeti "izolacija" od visokoomskog metala ili slitine, dok će kod viših B_v trebati izolirati kompozite u kabelu.

Supravodiči na bazi Nb-Ti se lako izoliraju i namataju poput bakrenih vodiča.

Filamentirani supravodiči od Nb₃-Sn-a, koji se dobivaju difuzijom Sn-a iz brončane matrice, u kojoj se nalaze šipke od Nb-a, imaju znatno povoljnije karakteristike. Filamenti debljine 1 ... 2.5 μm su, međutim, vrlo krhki i danas postoje još neriješeni problemi u vezi izolacije i namatanja, odnosno potrebe da se reakcionni proces izvrši nakon namatanja, a namot izvrgne temperaturama do 750°C.

4) O izboru materijala i mehaničkoj konstrukciji, presudnom elementu kod projektiranja supravodljivih magneta

U par.2 je rečeno da je mehanička koncepcija presudna za uspješno funkcioniranje magneta i da joj treba podrediti sve ostale aspekte. Spomenuto je također da se koncentrična, koaksijalna konstrukcija pokazala vrlo prikladnom u USA i Evropi.

Konstrukciju takvog magneta prikazuje sl.8, koja daje presjek modela supravodljivom kvadrupola Cern-a, zvanog "Castor". Magnet je dug 0,9 m, maksimalna indukcija iznosi 5,2 T, gustoća struje $320 \left[\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right]$ a korisni otvor 9 cm. Taj je kvadrupol već 4 godine ugrađen u liniju transporta čestica i radi bez smetnji.

S nutarnje strane se nalazi potporna cijev od visokovrijednog nemagnetskog čelika, stabiliziranog u tekućem dušiku. Ta je cijev ujedno i dio helijevog tanka. Kod preciznih magneta predviđet će se u toj cijevi utori za supravodljive korekturne namote. Sl. 9 pokazuje nutarnju cijev kvadrupola "Castor" s kanalima za tekući He i izolacijom od $\text{Al}_2\text{-O}_3$. Na cijev su pričvršćeni precizno obrađeni bakreni "polovi" i klinovi, koji definiraju točan azimutalni položaj pojedinih svitaka uzbudnog namota te istovremeno služe, kako će se vidjeti u par.6, za brzu ekstrakciju energije iz namota u slučaju quench-a.

Sam namot se oblikuje na posebnom stroju za namatanje (sl.10). Vodiči se mogu izolirati Kaptonom (polyimidom), staklenom vrpcom ili lakom na bazi epoksida i impregnirati bilo u vakuumu, bilo pod visokim pritiskom. Ako treba impregnirati namot epoksidnom smolom, koja je punjena npr. dolomitom, da se dobije koeficijent termičke kontrakcije jednak onom samog vodiča, onda je bolje provući vodič kroz kupku epoksidne smole.

Duž vanjskog oboda namota nalazimo opet rashladne kanale, a oko njih dva željezna poluprstena. Oko željeza se nalazi stezni obruč od nemagnetskog čelika, koji je dimenzioniran za preuzimanje naprezanja uslijed hlađenja i elektromagnetskih sila. U slučaju kvadrupola "Castor", koji je predviđen za istosmjernu struju, širi na željeznih poluprstena i vanjskog obruča iznosi 3 cm.

Ako se radi o magnetima za pulsirajuću uzbudnu struju, onda treba pune željezne poluprstene nadomjestiti precizno štancanim li-

movima. U oba slučaja su namot i željezo prilikom montaže na istoj temperaturi okoline.

Druga metoda, koja je uspješno primijenjena u američkom laboratoriju u Brookhaven-u, sastoji se u hladnoj fretaži: aktivni dio, tj. namot, pričvršćen na nutarnju cijev s bandažom od čelične vrpce ili od staklene vrpce, impregnirane epoksidnom smolom, se ohladi na temperaturu tekućeg dušika i uvuče u vanjski cilindar od limova koji imaju temperaturu okoline. Tolerancije obih dijelova moraju biti usklađene da se zagrijavanjem hladnog namota ostvare predviđena naprezanja.

Sl.11 prikazuje uvlačenje namota u željezni cilindar. Tlačna i vlačna naprezanja $\mp p \left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$ se mogu izračunati iz sistema jednadžbi za aktivni dio magneta prema shemi sl.12:

$$\begin{aligned}
 & 2\pi R_{n+1} \left[1 - \left(\frac{\Delta l}{l} \right)_n \right] + p_{n+1} \frac{2\pi R_{n+1}^2}{E_n t_n} \left(1 - \frac{\nu_{pn}}{2} \right) - p_{n+1} \frac{2\pi R_{n+1}^2}{E_n t_n} \left(1 - \frac{\nu_{pn}}{2} \right) \\
 & = 2\pi R_{n+1} \left[1 - \left(\frac{\Delta l}{l} \right)_{n+1} \right] + p_{n+1} \frac{2\pi R_{n+1}^2}{E_{n+1} t_{n+1}} \left(1 - \frac{\nu_{p_{n+1}}}{2} \right) - \\
 & \quad - p_{n+2} \frac{2\pi R_{n+1}^2}{E_{n+1} t_{n+1}} \left(1 - \frac{\nu_{p_{n+1}}}{2} \right) \\
 & \dots (13)
 \end{aligned}$$

U toj su jednadžbi R_n polumjeri, E moduli elasticiteta, t debljine, te ν_p Poissonov koeficijent naprezanja za pojedine elemente. Jednadžba 13 kaže da duž svake dodirne površine obodna kontrakcija nutarnjeg i vanjskog elementa mora biti jednaka.

Rezultati tih proračuna pokazuju da će se kod hlađenja najveća naprezanja pojaviti u nutarnjoj cijevi, debljina koje je iz konstruktivnih razloga ograničena. Ako se između nutarnje cijevi i namota stavi tanki prsten od materijala niskog modula elasticiteta poput vetronita, ta se naprezanja mogu smanjiti na 20 ... 25 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$. Mehanička čvrstoća namota ograničena je posmičnim naprezanjem sloja epoksida među vodičima, koje iznosi 1.5 ... 2 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$.

Kod magneta, s indukcijama do 5 T, dobit će se u namotu uslijed kombiniranog djelovanja kontrakcije i elektromagnetskih naprezanja, otprilike, gornje vrijednosti za T . Kod viših induk-

cija treba namot predvidjeti kao elastičan element, dok će sva naprezanja preuzeti stezni obruč.

Sl.13 prikazuje prototipni magnet od 4 T za supravodljivi akcelerator ili udvostručitelj energije američkog centra za nuklearnu fiziku u Bataviji. Konstrukcija je zanimljiva zbog koncepcije "toplog" željeznog štita. Rashladni sustav je smješten unutar željeznog štita, kako bi masa, koju treba ohladiti i održavati na temperaturi tekućeg He bila što manja.

5) O projektiranju rashladnih sistema

U ovom poglavlju neće biti govora o kružnim rashladnim sistemima za akceleratora ili akumulacione prstene od više km te kapaciteta od više desetaka "hladnih" kW, već ćemo se ograničiti na kriogenska rješenja za individualne potrošače.

Rashladni sustav većine magneta bazira na principu kupelji. Tekući He se dobiva iz dewara dovoljnog kapaciteta ili pomoću kombinacije "hladne kutije" (engl.cold box), u kojoj se vrši zadnja Joule-Thomsonova ekspanzija te tamponskog dewara s automatskim punjenjem i napajanjem potrošača.

Aktivni dio namota je sav u tekućem He. Helijev tank od poliranog nemagnetskog čelika je pričvršćen na termički štit od poliranog bakra, nemagnetskog čelika, aluminijski ili sl. Između tankova je vakuum od $10^{-6} \dots 10^{-7}$ torr-a i superizolacija od aluminiziranog mylar-a za smanjenje gubitaka zračenja.

Spomenimo i dva sistema za mehaničko učvršćivanje tankova. Kod kvadrupola "Castor" upotrebljeni su obruč i U-nosači od vetro-nita prema sl.14 i 15, koji imaju malen koeficijent toplinske vodljivosti.

Za veće i teže konstrukcije se može primijeniti princip nogu od koncentričnih cilindara od vetronita i nemagnetskog čelika ili titana, koji su naizmjenice pričvršćeni na tri tanka kriostata. Kod tog rješenja su vetronitni cilindri opterećeni na tlak, a metalni na vlak, što je povoljno s obzirom na njihova mehanička svojstva kod niskih temperatura.

Uslijed gubitaka u magnetu dolazi do isparavanja He. Ti gubici se mogu podijeliti na:

- I) statičke gubitke u kriostatu kod struje $I=0$ $P_S = 1 \dots e \frac{W}{m}$
 II) gubitke u namotu kod pulzirajućeg pogona $P = 15 \frac{mW}{cm^3 Hz}$
 III) gubitke u strujnim dovodima $P_I = 1 \frac{W}{kA}$

Plinoviti He se koristi za hlađenje strujnih dovoda, provodnika za signalne i kontrolne tabele, štita, ukoliko se dotični ne hladi tekućim dušikom te linija za transfer He, koja se u tom slučaju može izvesti s minimalnim gubicima od $0,1 \frac{W}{m}$.

6) O prijelazu supravodljivog namota u normalno stanje i zaštiti magneta

Osnovna fizikalna zbivanja kod prijelaza supravodljivog namota u normalno stanje su poznata. Jedan od prvih računskih programa napisao je M. Wilson (3).

Svrha je ovog poglavlja da pokaže kako je taj problem još uvijek otvoren, jer dosadašnji proračuni baziraju na jednostavnim nadomjesnim shemama namota, pri čemu je zanemarena induktivna sprema između namota pojedinih polova, između namota i bakrenih "polova", pomoćnih namota, kriogenskih štitova itd.

Eksperimentalni rezultati su također oskuđni, osobito rezultati mjerenja širenja normalne zone u supravodljivim magnetima, te provjera principa konstantnog magnetskog toka, prema kojem bi u slučaju quencha jednog polnog namota trebali i ostali namoti postati normalni te sudjelovati u ekstrakciji magnetske energije.

Slika 16 prikazuje shemu širenja normalnog vala u namotu, pri čemu je razumno pretpostaviti, da će se quench širiti simetrično od izvorne točke P_0 , u kojoj je indukcija maksimalna. Normalna zona se širi brzinama u_z, u_x, u_y u uzdužnom i u oba poprečna smjera, pri čemu vrijedi relacija:

$$u_z = \frac{I_T}{A} \sqrt{\frac{k_z P}{A^2 c_k^2 \Delta T_k}} \quad [\frac{m}{s}] \quad \dots\dots\dots(14)$$

U toj je jednadžbi I_T struja u namotu, $k_z [\frac{W}{m^2 K}]$ resultantna toplinska vodljivost u uzdužnom pravcu, $P [W]$ resultantni specifični otpor vodiča, $A [m^2]$ aktivni presjek vodiča, koji sudjeluje kod vođenja struje u normalnom stanju, $c_k [\frac{W}{m^3 K}]$ resultantna specifična toplota vodiča te ΔT_k temperaturni gradijent s obzirom na kritičnu temperaturu T_k .

Normalna zona se širi u poprečnim smjerovima brzinama, koje su znatno manje od v_z zbog izolacije vodiča:

$$\frac{v_x}{v_z} = \sqrt{\frac{k_x}{k_z}}; \quad \frac{v_y}{v_z} = \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

Specifični otpor i temperaturni gradijent u gornjim jednažbama su funkcije temperature, magnetske indukcije i struje: $\rho = \rho(T, B)$

$$\Delta T_k = \Delta T_k(I_m, B).$$

Gubici po jedinici volumena normalnog namota iznose:

$$w \left[\frac{W}{m^3} \right] = \frac{\dot{B}_v J_k d}{8} + \frac{\dot{B}_v^2 R^2}{8 \rho} \quad \dots\dots\dots(16)$$

sa $d[m]$ promjerom filamenata i $h[m]$ visinom namota. Gubici po jedinici volumena w dovode u vremenskom intervalu Δt do povišenja temperature

$$\Delta T = \frac{w \cdot \Delta t}{c_k} [K] \quad \dots\dots\dots(17)$$

Mnogi računski programi, tako i izvorni program "QUENCH" ne idu dalje od gornjih jednažbi i uz pomoć ugrađenih relacija za $\rho(B, T)$, $\Delta T_k(I, B)$ računaju bitne parametre u toku cijelog procesa kao $I_T(t)$, B_v , $\dot{B}_v(t)$ i $\Delta T(t)$.

Naša grupa u Cern-u je modificirala program "QUENCH" i ugradila potrebne električke nadomjesne sheme namota. Modificirani program sadrži:

- I) samoinduktivitet namota L_1 , koji se može lako izračunati iz energije magneta prema jedn. (4) i (5);
- II) samoinduktivitet bakrenih "polova" i klinova $L_{21} \dots L_{2n}$. Treba pripaziti, da to nisu istosmjerni induktiviteti, već induktiviteti za specifičnu strujnu razdiobu u blokovima, koja ovisi o $\dot{B}_v$ odnosno o $\dot{\Phi}_v$;
- III) međuinduktivitete između namota i blokova;
- IV) odgovarajuće parametre, koji definiraju induktivnu spregu između namota, odnosno blokova te korekturnih svitaka.

Daljnje pitanje, na koje bi trebalo odgovoriti, je slijedeće: Treba li prilikom dimenzioniranja zaštitnog sistema kod quench-a polaziti od pesimističke pretpostavke, da će se cjelokupna energija

magneta apsorbirati u jednom, najtanjem sektoru namota jednog pola, u namotu jednog pola ili paralelno u svim polovima, tj. u cijelom namotu.

Zadnja hipoteza je najpovoljnija i konačno povišenje temperature namota i pritiska u helijevom tanku bit će u tom slučaju minimalni. Korelacija rezultata proračuna s oscilogramima quencheva pokazuju da barem jedan polni namot sudjeluje u procesu.

Uključivanjem vanjskog serijskog otpora R_v se postiže djelomična ekstrakcija energije iz magneta od:

$$A_v = \int_0^{\infty} I^2(t) \cdot R_v dt \quad \dots\dots\dots(18)$$

pri čemu je maksimalni napon na stezaljkama magneta:

$$U_{max} = I_m \cdot R \quad \dots\dots\dots(19)$$

7) Detektorski magneti sa supravodljivim namotom

Detektorski magneti za visokoenergetsku fiziku su danas najveći potrošači supravodiča. Volumen, težina i energija njihovih uzbudnih namota daleko nadmašuju ostale uređaje, u kojima se primjenjuju supravodiči.

Uzbudni svici su pretežno Helmholtzovog tipa, a korisna magnetska indukcija iznosi $2 < \beta < 4T$ u volumenu do više $10 m^3$. Magnetski tok se zatvara kroz okolni željezni jaram. Preciznost magnetskog polja je manje važna od poznavanja njezinog iznosa u svakoj točki korisnog volumena, tako da računski programi mogu odrediti putanje čestica u detektoru.

Za ilustraciju će se ukratko opisati dva detektorska magneta Cern-a i to Ω -magnet dra M.Morpurga i velika evropska vodikova komora (BEBC).

Parametri Ω -magneta su slijedeći:

magnetska indukcija u centru	1.8 T
nutarnji promjer svitaka	3 m
slobodna visina među svicima	2.5 m
slobodna visina među polovima	2 m
težina	1400 t
nazivna struja	5000 A
energija	50 Mws

Sl.17 ... pokazuje magnet i namot. Potonji se sastoji od gornjeg i donjeg dijela s po 6 dvostrukih svitaka. Supravodič od Nb-Ti smješten je u bakrenu matricu, koja ima oblik šupljeg vodiča, a hlađenje se vrši protočnim helijem pod pritiskom, slično vodnom hlađenju klasičnih magneta.

Gornji i donji dio namota se nalaze u toroidalnom vakuumskom tanku. Ulazni pritisak He iznosi 10 at, izlazni 5 at, ukupni gubici magneta su 300 W, od toga 180 W u potpornom sistemu namota. Kod hlađenja na 4,5 K treba namotu odvesti 4000 MJ.

 -magnet je u pogonu od 1972.godine.

Velika evropska vodikova komora (BEBC) je dosad najveći supravodljivi magnet sa slijedećim parametrima:

nutarnji i vanjski promjer uzbuđenog svitka	4,7 m ,	6,0 m
nazivna struja	5700	A
indukcija u centru komore, maksimalna indukcija	3,7 T	5,2 T
energija	750	MWs
težina svitaka	400	t
težina željeznog oklopa	2000	t

Sl.18 ... 20 prikazuju komponente jednog zavoja, potpuno namotan svitak te donji kriostat.

Komora je u pogonu od 1973.godine.

8) Zaključak

Na osnovu ovog referata možemo zaključiti da se danas mogu graditi serije vrlo preciznih supravodljivih magneta za akceleratora, akumulacione prstene i za linije transporta čestica kao i pojedinačni veliki elektromagneti za detektore čestica.

Stabilizirani filamentirani supravodiči od Nb-Ti su vrlo prikladni i provjereni za indukcije do 5T. Neće biti osnovne razlike između vodiča za istosmjernu ili pulzirajuću uzbuđu.

Od filamentiranih supravodiča na bazi Nb₃-Sn-a se mogu očekivati značajne prednosti s obzirom na visoke T_K , J_K i B_K tog materijala: razvoj magneta od 8 ... 10 T uz gustoće struje, koje otprilike odgovaraju onoj Nb-Ti kod 5 T, smanjeni oblozi struje magneta za 5 T.

Zahvaljujući relativno visokom ΔT_K Nb₃-Sn-a može se očekivati veća pogonska sigurnost, dozvoliti veći gubici u namotu i predvidjeti rashladni sistemi s protočnim nadkritičnim helijem pod pritiskom od 5 ... 15 at u temperaturnom području od 6 ... 10 K. Za uspješnu primjenu tog supravodiča treba, međutim, riješiti problem njegove krhkosti i namatanja, osobito, ako se pokaže, da vodič treba podvrgnuti procesu reakcije nakon formiranja namota. S obzirom na velike energije takvih magneta trebat će posebnu pažnju posvetiti savladavanju mehaničkih problema, učvršćivanju aktivnog dijela i uspješnoj zaštiti u slučaju quench-a.

9) Popis literature

- (1) P.Smith i ost. Experimental and Theoretical Studies of
Filamentary Superconducting Composites
Rutherford Lab. Preprint RPP/A 73.

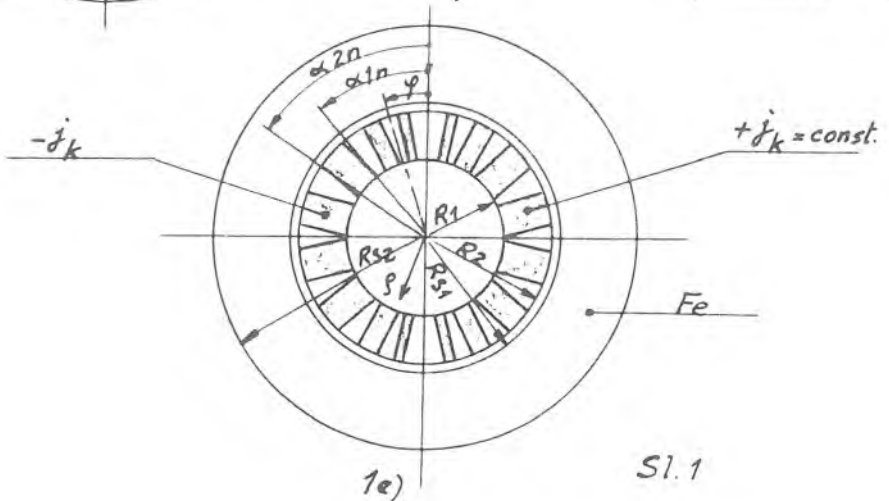
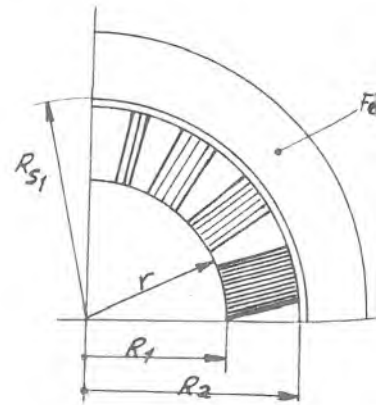
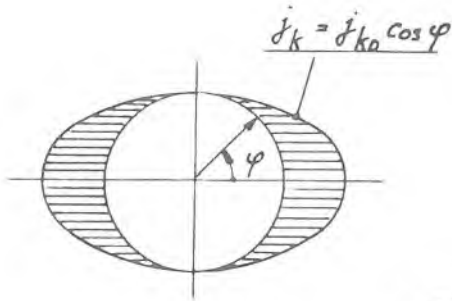
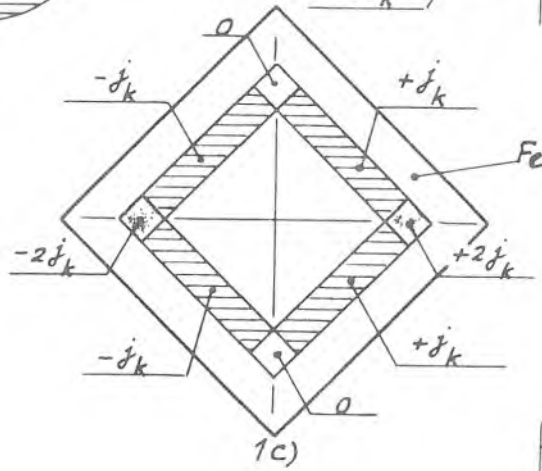
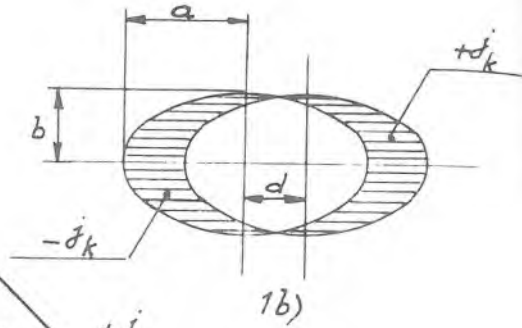
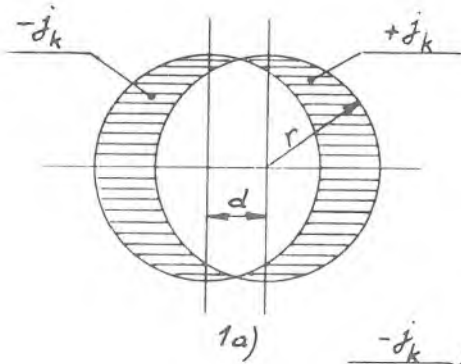
- (2) J.L.Duchateau i Prediction of Maximum Quenching Currents
B.Turk in Coils Made of Composites or Multistran
Cables; V-th Int. Conf. on Magnet Techn.
Frascati, 1975 Italy

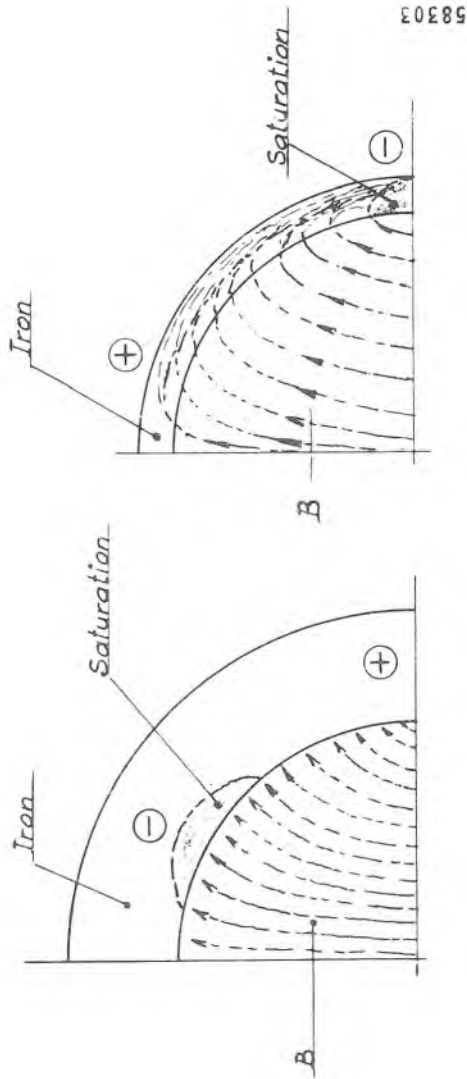
- (3) M.Wilson Computer Simulation of the Quenching of
a Superconducting Magnet.
Preprint Rutherford Lab. 1968.

- (4) A.Ašner i D.Leroy The 55 $\frac{T}{m}$, 9.0 cm aperture, superconducting
quadrupole "Castor", IV-th Int.
Conf. on Magnet Techn. Brookhaven, Long
Island, USA

Tekstovi slika

- Sl. 1 Rasporedi strujnih obloga za dobivanje dvo-dimenzio-nalnih konfiguracija dipola
- Sl. 2 Utjecaj zasićenja "hladnog" željeza
- Sl. 3 Shema za izračunavanje kriterija adijabatske stabil-nosti
- Sl. 4 Struje u matrici i ispreplitanje vodiča
- Sl. 5 Princip vođenja transportne struje
- Sl. 6 Dijagram $i = \frac{I_{zas}}{I_T} = f(\beta, \nu)$
- Sl. 7 Gubici u supravodiču kod B_V
- Sl. 8 Presjek kroz model aktivnog dijela kvadrupola "Castor"
- Sl. 9 Nutarnja cijev "Castor-a"
- Sl. 10 Namot "Castor-a"
- Sl. 11 Uvlačenje hladnog namota u paket limova
- Sl. 12 Model za izračunavanje mehaničkih naprezanja
- Sl. 13 Magnet američkog centra Fermilab, Batavia, sa toplim željezom
- Sl. 14 Tankovi "Castor-a"
- Sl. 15 " "
- Sl. 16 Širenje normalne zone u namotu magneta
- Sl. 17 Željezni oklop, namot i kriostat magneta "L"
- Sl. 18...2. Elementi namota, namotan svitak i kriostat Evropske Vodikove Komore (BEBC)



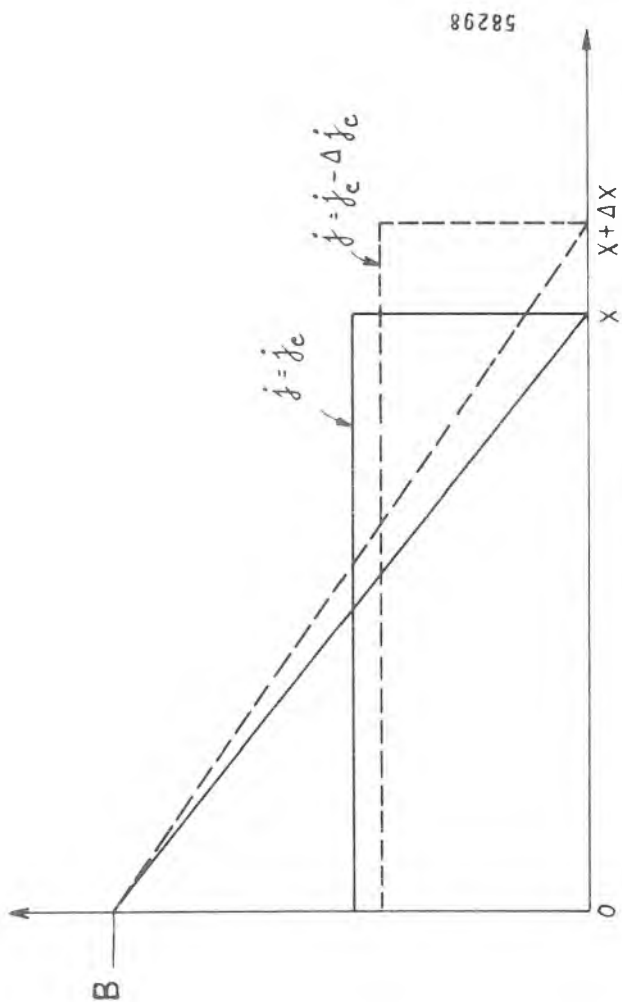


THICK IRON SHIELD POSITIVE
 SEXTUPOLE DUE TO SATURATION.

THIN IRON SHIELD NEGATIVE
 SEXTUPOLE DUE TO SATURATION.

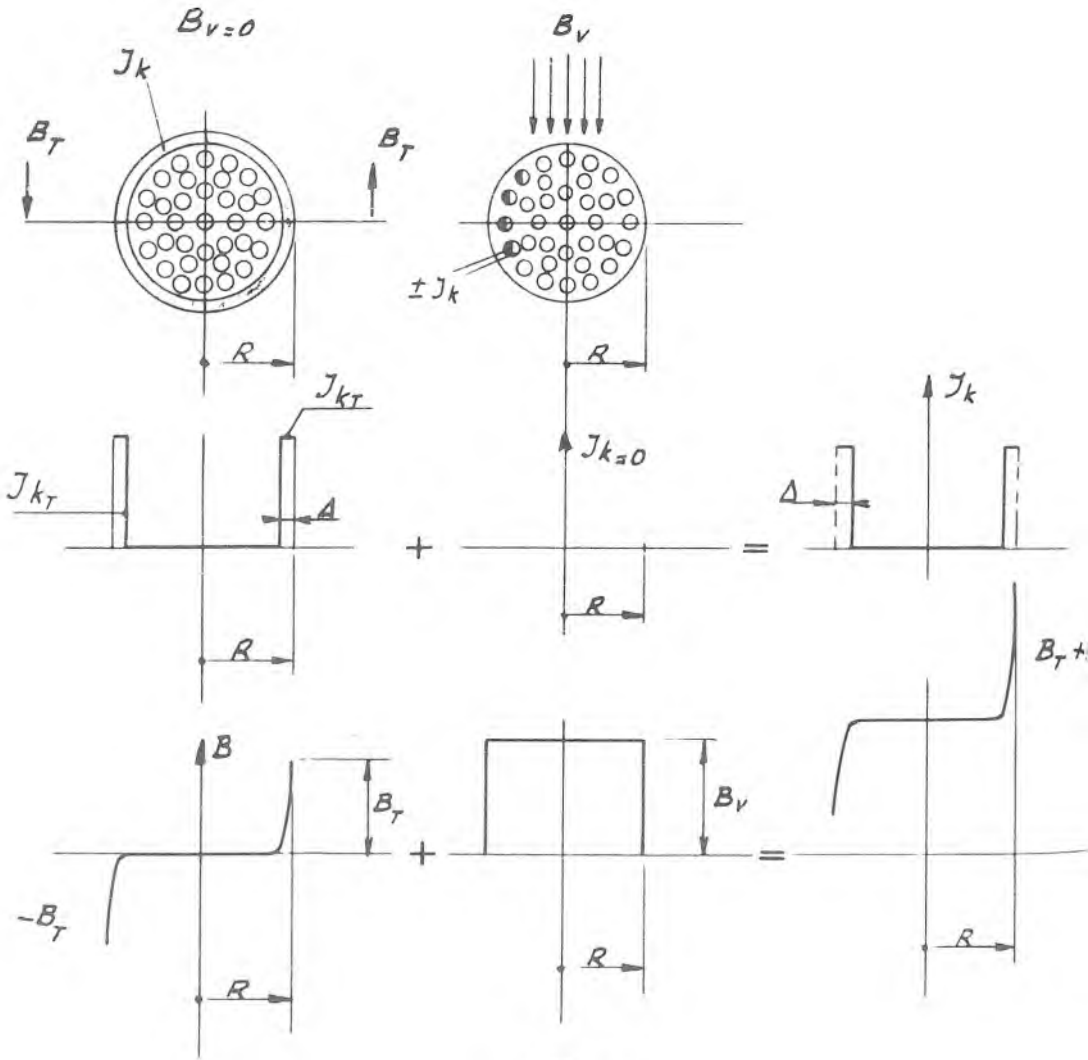
SL. 2

58303

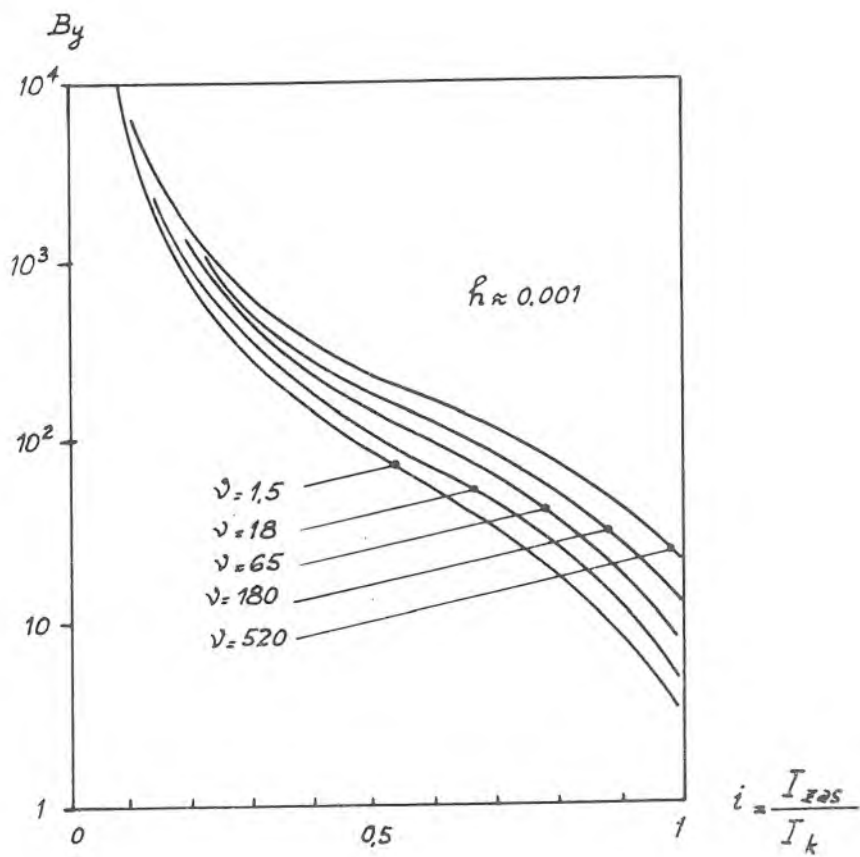


S1.3

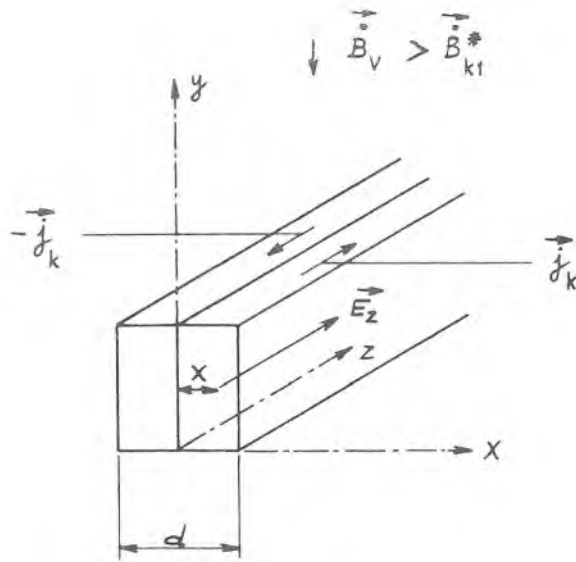
58298



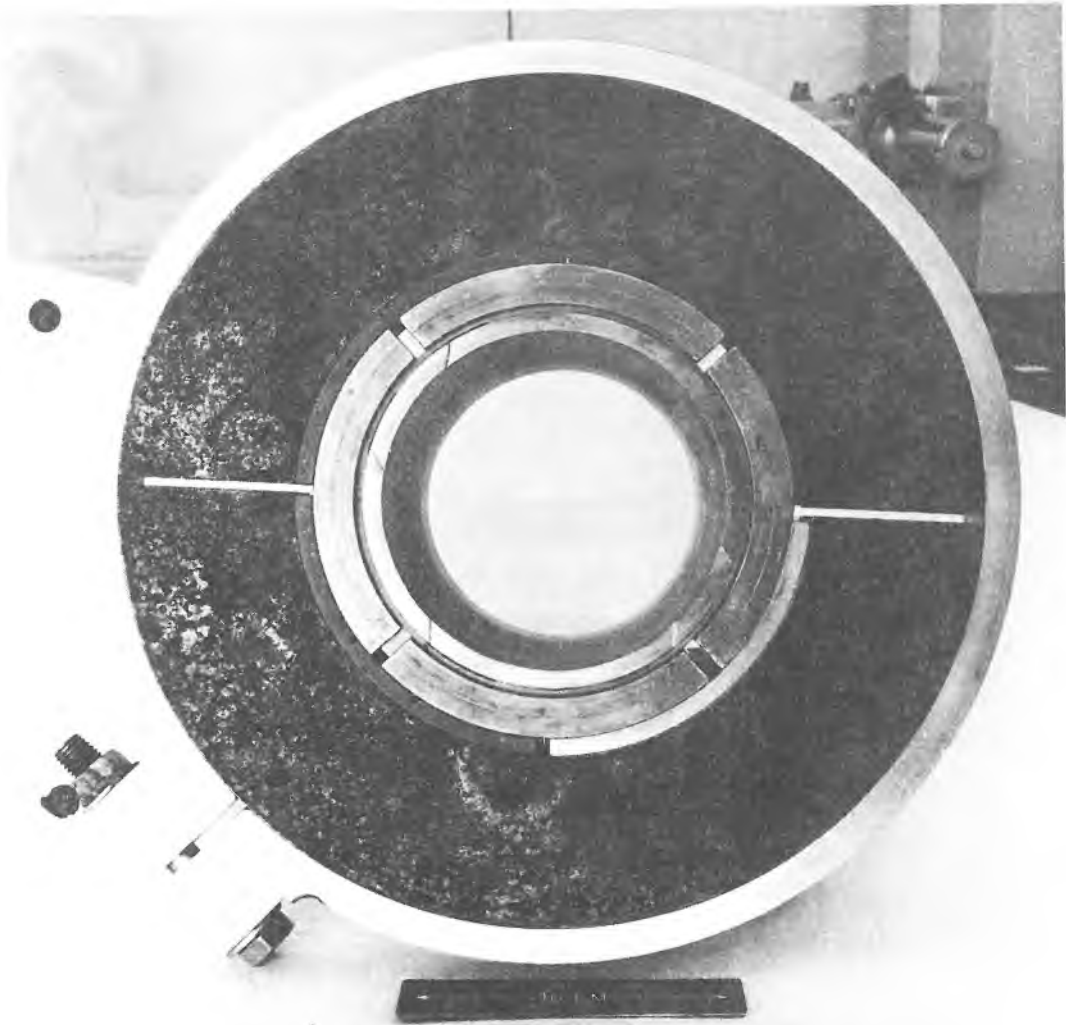
Sl. 5



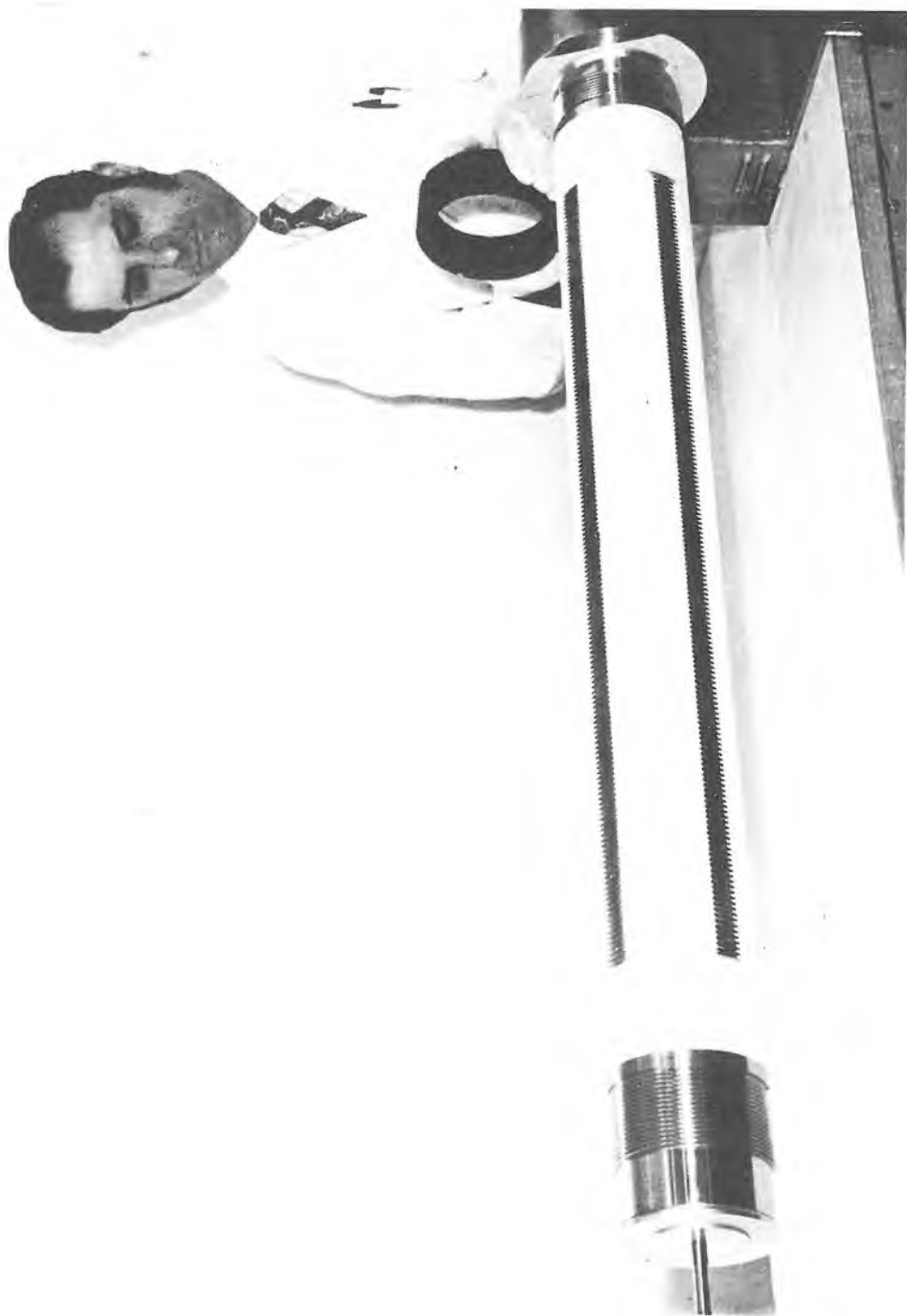
Sl. 6

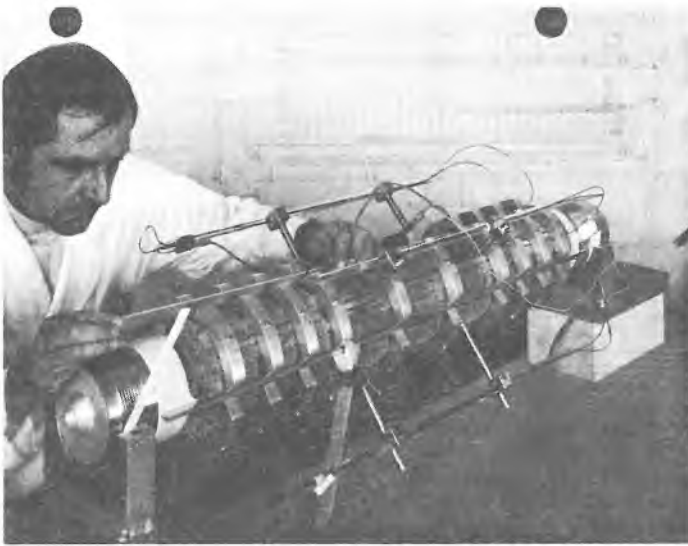


Sl. 7

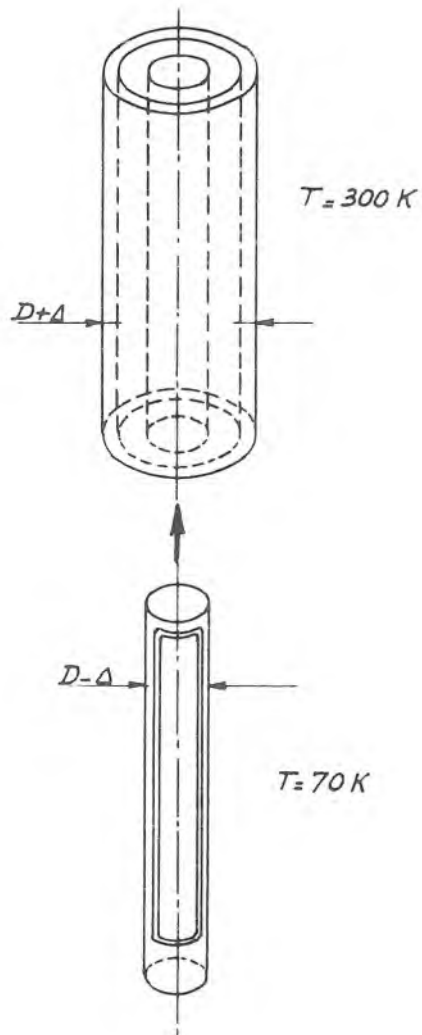


Sl. 8

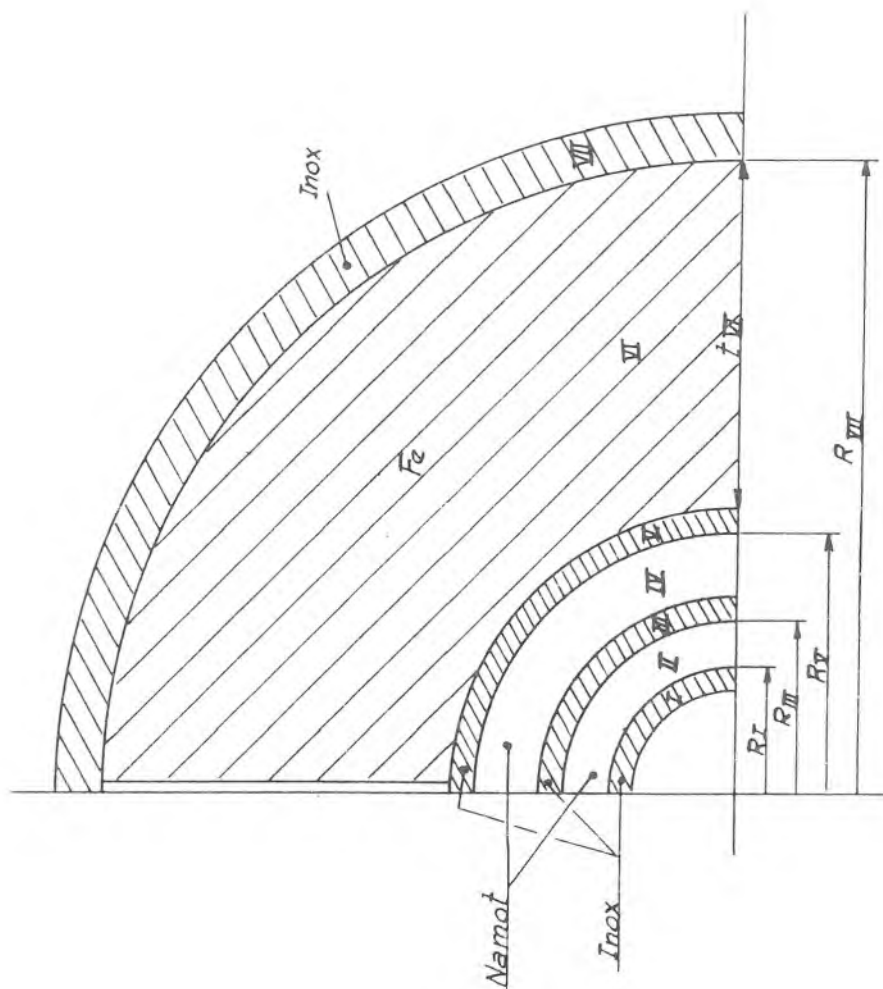




Sl. 10



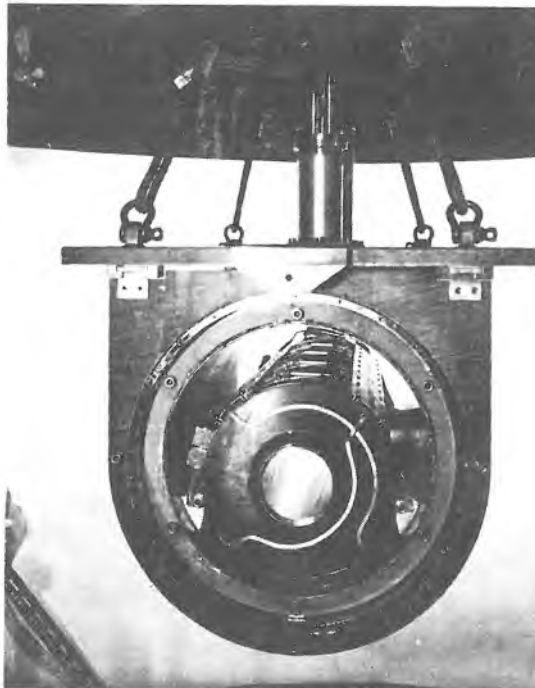
Sl. 11



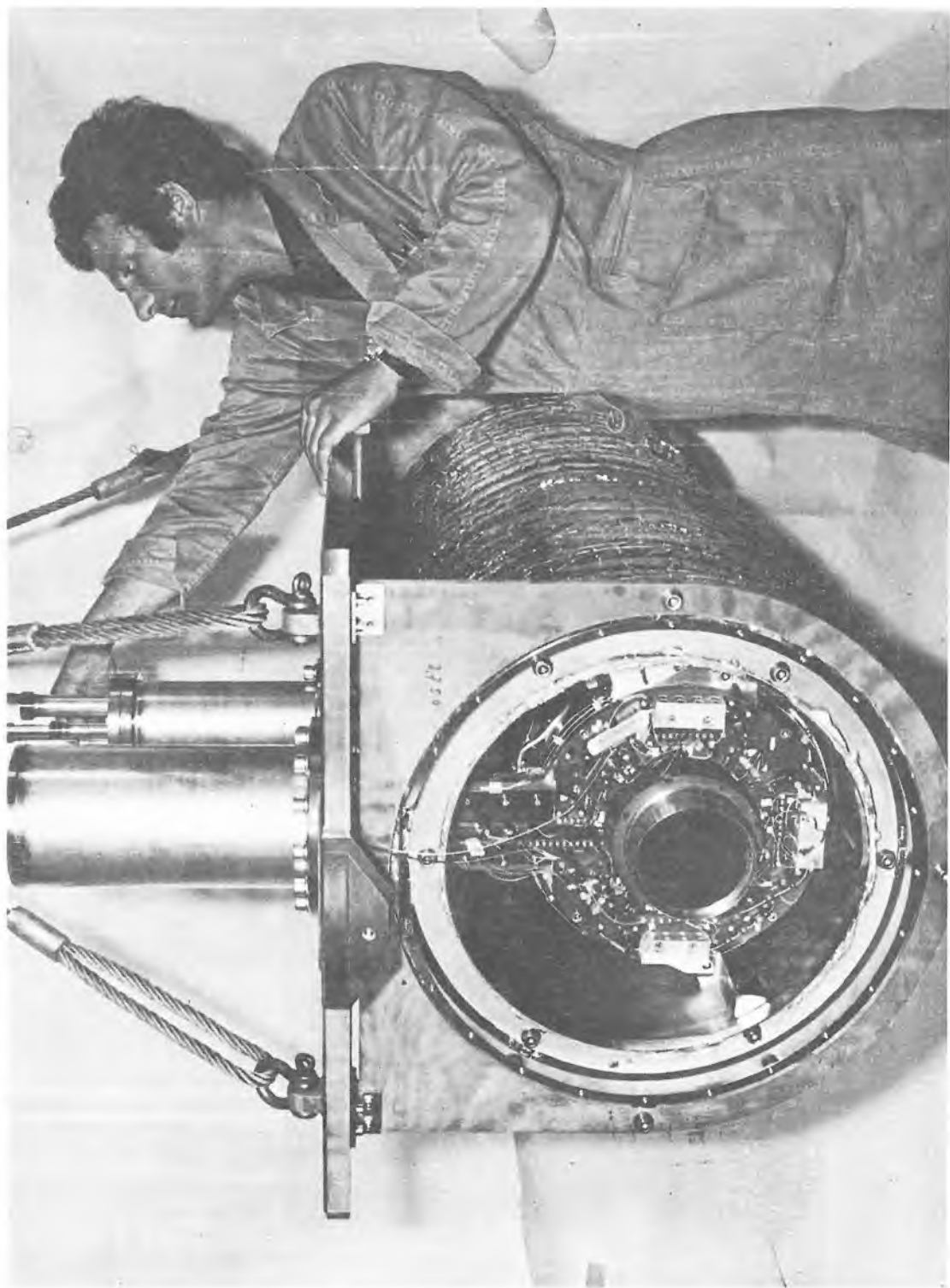
Sl. 12

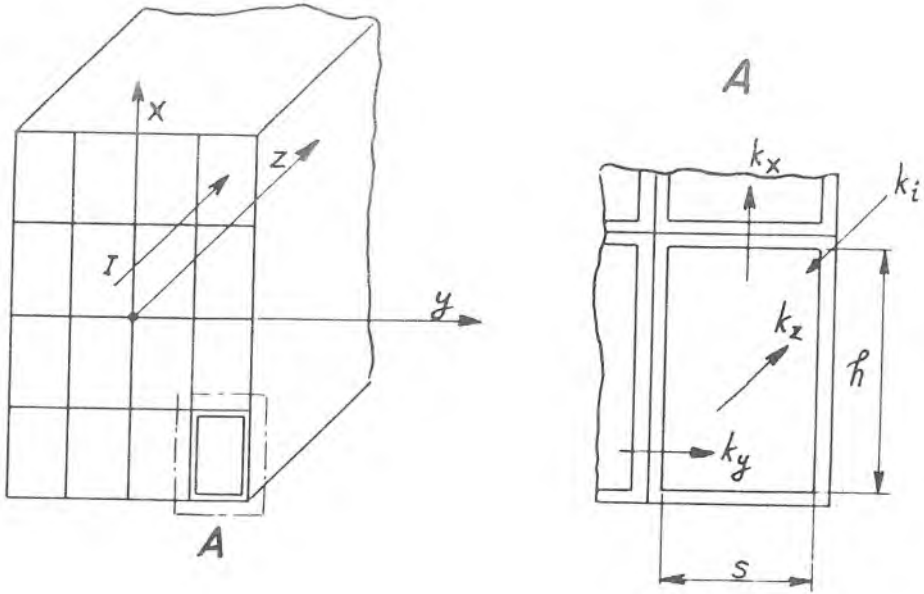


Sl. 13

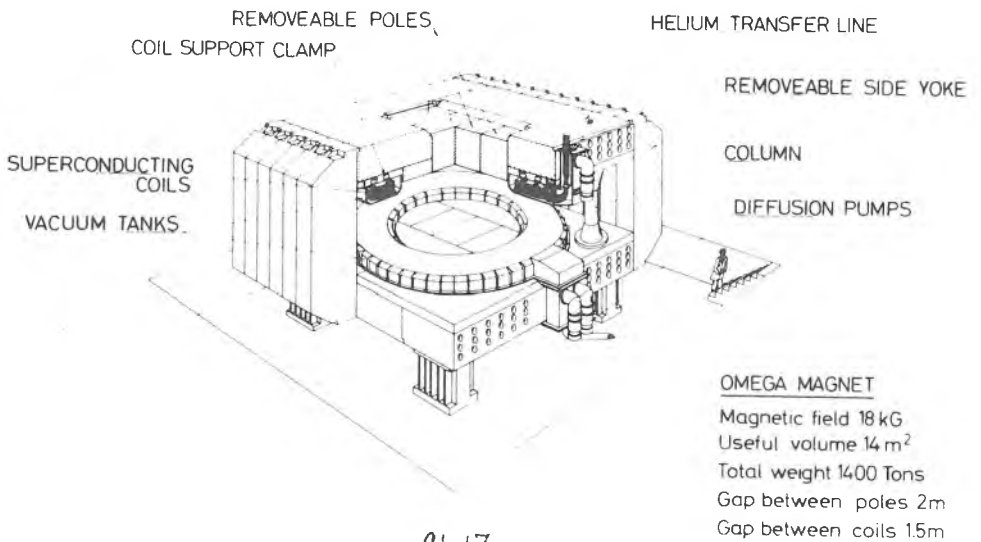


Sl. 14





Sl.16



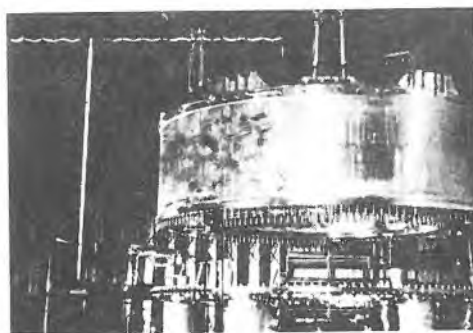
Sl. 17



Sl. 18



Sl. 19



Sl. 20

Tihomir Bratoljić
Brown Boveri & Cie
CH-5400 Baden

SUPRAVODLJIVI ELEKTRIČKI STROJEVI

621.313.322-81:537.312.62

Uvodno poglavlje rekapitulira osnovne pojave supravodljivosti i najvažnija svojstva modernih supravodiča. Konstrukcija supravodljivih električkih strojeva predstavlja sintezu tehnologije supravodljivih namota i tehnike vrlo niskih temperatura, te visokog vakuuma s pojeđinim elementima konvencionalnih električkih strojeva prilagođenim novim uvjetima. Nakon pregleda dosadašnje primjene supravodljivosti u električkim strojevima za istosmjernu i izmjeničnu struju izlaganje se koncentrira na specifične probleme i mogućnosti turbogeneratora sa supravodljivim uzбудnim namotom. Posebno su istaknuta pitanja ponašanja tih generatora na mreži i izložena je nova metoda za točan proračun transientnih pojava u generatoru. Metoda se temelji na upotrebi pojma valnih admitancija u Laplace-ovom području i omogućuje vrlo pregledno formuliranje i rješavanje diferencijalnih jednadžbi elektromagnetskog polja.

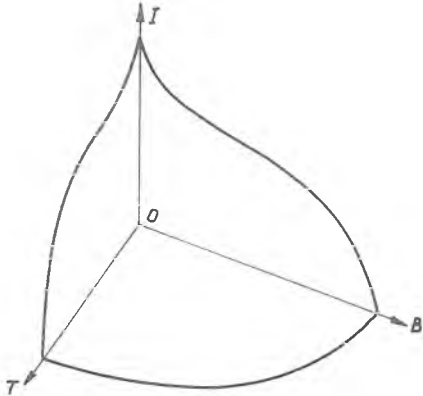
Superconducting electrical machines

The short introduction surveys the basic phenomena of superconductivity and the most important properties of modern superconductors. Although superconducting machines retain a measure of conventional machine design in a **modified form**, they also introduce several new technologies, such as cryogenics and high vacuum techniques. Following a survey-to-date of applications of superconductors to d.c. and a.c. machines, consideration is turned to some specific problems of turbogenerators with superconducting fieldwindings, and especially to their behaviour on the grid. A new method is described for exact calculation of electromagnetic transients in the generator. The method is based on the concept of wave admittance in the Laplace domain and permits a **rational formulation and** solution of the differential equations of the electromagnetic field.

1. Uvod

Godine 1911. je nizozemski fizičar Kamerlingh Onnes otkrio supravodljivost istražujući ponašanje električkog otpora metala prilikom snižavanja temperature. Sljedećih pet decenija bilo je posvećeno istraživanju tog fizikalnog kurioziteta, koji pokazuju mnogi metali i nekoliko tisuća metalnih legura i spojeva. 1957. uspijevaju Bardeen, Cooper i Schrieffer postaviti besprijekornu teoriju koja objašnjava supravodljivost u okviru kvantne mehanike pomoću uzajamnog djelovanja parova elektrona suprotnog impulsa i spina (Cooper-parovi). Tada poznati, tzv. supravodiči 1. vrste, nisu bili upotrebljivi za tehničku primjenu u širim razmjerima, jer ti vodiči gube supra-

vodljivost već u relativno slabom magnetskom polju od nekoliko desetaka mT, te stoga imaju i vrlo nisku strujnu opteretivost. Povezanost supravodljivosti s magnetskim poljem najbolje ilustrira činjenica, da supravodič nije jednostavno vodič bez električkog otpora, nego je on ujedno i idealni



Sl.1 Područje egzistencije supravodljive faze

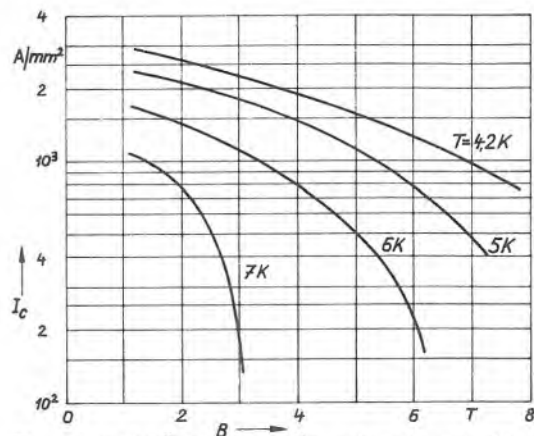
diamagnet. Prilikom nastupa supravodljivog stanja, magnetski tok je potisnut iz unutrašnjosti supravodiča (Meissner-Ochsenfeldov efekt), što se kod običnog vodiča ne bi smjelo dogoditi.

Granične ili "kritične" vrijednosti temperature, magnetskog polja i gustoće struje tvore u trodimenzionalnom diagramu (sl.1) plohu koja definira područje egzistencije supravod-

ljive faze. Za tehničku primjenu interesantnu veličinu tog područja posjeduju tzv. supravodiči 2.vrste, kojih je razvoj počeo tek pred 15 godina. Oni se razlikuju od supravodiča 1.vrste u tome što magnetsko polje, kad je veće od jednog niskog kritičnog polja H_{c1} , prođe u unutrašnjost vodiča, ostaje u obliku kvantova toka ograničeno na diskretne točke jedne pravilne mreže. Međupodručja su još uvijek diamagnetička i supravodljiva. Pomoću prikladnih kemijskih ili fizikalnih inhomogenosti (pinning-centri) postiže se fiksiranje kvantova toka, pa vodič vodi relativno veliku struju bez otpora sve do gornjeg kritičnog polja H_{c2} , koje može biti i više stotina puta jače. Sve do sada rečeno vrijedi za ponašanje supravodiča u stacionarnom polju kod istosmjerne struje. Kod izmjenične ili uopće promjenljive struje nastaju u svakom supravodiču stanoviti gubici, koji su doduše kod malih jakosti polja, ispod H_{c1} , vrlo maleni. Kod jačih polja u mješovitom stanju ($H_{c1} < H < H_{c2}$) pokazuju supravodiči 2.vrste pojavu histereze, koja je tim jača i prouzrokuje tim veće gubitke što je jači njihov pinning-efekt.

U tabeli 1 su dani podaci o kritičnoj temperaturi T_c (pri $B=I=0$) i kritičnoj indukciji B_{c2} (pri $T=I=0$) najpoznatijih supravodiča. Po-

sljednja dva vodiča, koji nisu komercijalni produkti, predstavljaju do sada postignute rekorde kod kritičnog polja, odnosno temperature. Danas najrašireniji supravodič je Nb-Ti (sl.2).



Sl.2 Kritična gustoća struje za Nb-Ti

Tabela 1 Kritična temperatura i kritično polje poznatijih supravodiča

supravodič	T_c (K)	B_{c2} (T)
Nb-Zr	11	9
Nb-Ti	9,5	12
Nb ₃ Sn	18,3	23
V ₃ Ga	15	21
Nb ₃ (Al,Ge)	20,7	41
Nb ₃ Ge	23,2	37

Njegova je velika prednost da se lako daje proizvesti u obliku žice, pa čak i vrlo tankih niti (filamenata) uklopljenih u matricu od električki i toplinski dobro vodljivog materijala (bakar ili aluminij). Ovo je važno radi tzv. stabilizacije, koja se sastoji u sprječavanju opasnog ugrijanja vodiča zbog pomaka kvantova toka prilikom statističkih varijacija temperature, struje ili polja. Moderni vodiči imaju po više stotina ili čak tisuća filamenata, kojih promjer iznosi samo nekoliko μm . Filamenti su u matrici toridirani, kako bi se smanjili dodatni gubici kod promjenljivog transverzalnog polja. Iz tog razloga se katkada upotrebljavaju i mješovite matrice, kod kojih su filamenti okruženi tankim barijerama od materijala većeg otpora. Time se otežava prijelaz vrtložnih struja iz matrice u filamente. Matrica mora imati dovoljan presjek i zbog zaštite supravodiča u slučaju veće smetnje, kod koje on lokalno izgubi supravodljivost. Otpor samog supravodiča je pri tome vrlo velik (dvostruko veći od konstantana), pa je lokalno ugrijanje vodiča na ugroženom mjestu ograničeno samo vodljivošću matrice, sve dok se ne iskopča struja, što naravno treba učiniti čim brže.

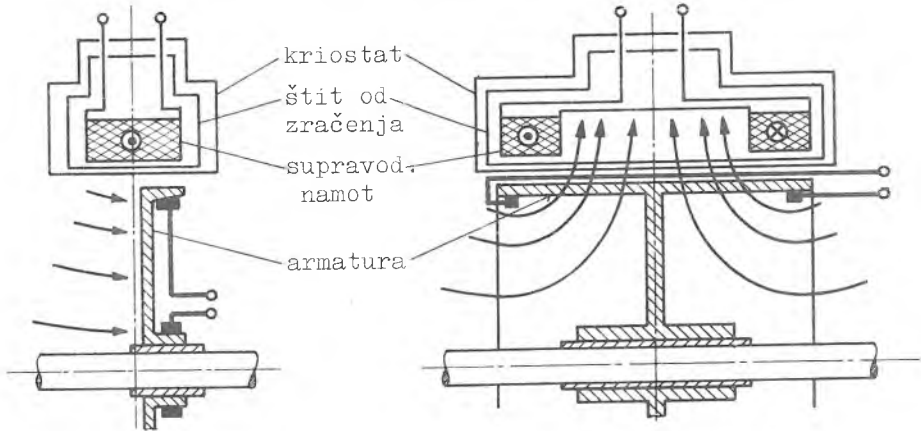
U zadnje doba je pomoću posebnih postupaka, doduše, uspjelo proizvesti i krhke materijale kao Nb₃Sn ili V₃Ga u obliku tankih filamenata, no problem namatanja još nije riješen na zadovoljavajući način.

2. Primjena supravodiča u električkim strojevima

Tek razvoj stabiliziranih supravodiča 2.vrste omogućio je primjenu supravodljivosti u električkim strojevima. Praktički dolazi danas u obzir njihova upotreba samo u namotima za istosmjernu struju. Prikladnim konstruktivnim mjerama mora se spriječiti da do supravodiča prodre jedno jače izmjenično polje. Osim tim "električkim" uvjetom konstrukcija jednog supravodljivog električkog stroja bitno je uvjetovana nužnošću da se stvori i održi potrebna vrlo niska radna temperatura za supravodiče. Jedino rashladno sredstvo, koje danas dolazi u obzir je helij, jer je to jedina tvar, koja se ispod 4 K još nalazi u tekućem ili plinovitom stanju. Isto tako je nužno osigurati što bolju toplinsku izolaciju namota, a to se najbolje postiže - kao u svim kriostatima - visokim vakuumom (10^{-5} do 10^{-6} mbar). Treba suzbiti i toplinu zračenja, koja dolazi od tople okoline, npr. stavljanjem u evakuirani prostor jednog štita, kome se temperatura održava na dovoljno niskom nivou. Posebnu pozornost treba posvetiti dimenzioniranju elemenata, koji prenose sile sa supravodljivog namota na toplu okolinu, jer tim putem obično dolazi najveći dio topline u hladni dio stroja.

Prije pet godina je ostvarena prva primjena supravodljivosti u praktičnom pogonu električkih strojeva. To je bio istosmjerni unipolarni motor od 2400 kW, 200 o/min, sagrađen od engleske tvornice IRD i upotrijebljen u pokusnom pogonu u centrali Fawley, u južnoj Engleskoj. Tip konstrukcije je pločasti (Faradayev disk) sa supravodljivim uzbuđenim namotom u obliku jednog prstenastog koaksijalnog svitka, smještenog unutar stacionarnog kriostata (Sl.3 lijevo). Armatura se sastoji od jednostavne metalne ploče, nalazi se izvan kriostata, na normalnoj temperaturi. Na njenom vanjskom i unutarnjem obodu smješteni su klizni koluti i četkice za dovod i odvod struje. Posebna osobitost ovog motora je podjela armature u veći broj međusobno izoliranih segmenata, koji su spojeni u seriju, kako bi se postigao dovoljan napon (ovdje 430 V) i snizila struja (na 5800 A). Velika prednost unipolarnog stroja pločastog tipa leži u tome što je supravodljivi namot izvrnut samo unutarnjim magnetskim silama. Reakcijski moment kod opterećenja stroja djeluje samo na strujne dovode

do armature, ali ne na uzбудni namot.



Sl.3 Supravodljivi unipolarni strojevi, lijevo pločasti (Faradayev disk), desno cilindrički tip

Kod snaga većih od 5 MW postaje cilindrički tip, s dva u suprotnom smjeru protjecana uzbudna svitka (sl.3 desno), ekonomičniji od pločastog tipa. I ovdje reakcioni moment ne opterećuje supravodljive namote, ali na njih djeluju jake odbojne sile u aksijalnom pravcu. Prema mišljenju graditelja supravodljivih unipolarnih strojeva trebalo bi biti moguće strojeve cilindričkog tipa razviti do razmjerno velikih snaga, 100 do 200 MW u širokom području brzina vrtnje od 100 do 3000 o/min, što odgovara povećanju snage - prema konvencionalnim istosmjernim strojevima - za jedan red veličine.

U principu je moguće, i ima takvih pokušaja, primijeniti supravodiče i kod heteropolarnih istosmjernih strojeva, dakako samo u uzbuđnom namotu. Radi njihovog rasterećenja od reakcionog momenta može se predvidjeti kompenzacioni namot na normalnoj temperaturi. Rotor može biti izveden bez zubi da se dobije više mjesta za namot i smanji reaktancija pri komutaciji. Još bolje bi bilo sagrađiti rotor bez željeza ili uopće bez metala, jer se onda smanjuju i njegovi gubici. Glavni problem tih strojeva, pored mehaničkih i toplinskih poteškoća konstrukcije rotora, leži u svladavanju komutacije, jer se ne mogu upotrijebiti pomoćni polovi u klasičnom smislu. Prema svemu izgleda da su unipolarni strojevi, usprkos bitnog nedostatka niskog napona, prikladniji za supravodljivu izvedbu. Tehnički problemi su kod njih najmanji i nije slučajnost da su oni

prvi - od svih strojeva uopće - i došli u primjenu. Izvedba supravodljivog svitka i čitava kriotehnika odgovara već poznatoj i iskušanoj tehnici stacionarnih magneta za visokoenergetsku fiziku. Glavni tehnički problem predstavljaju zapravo klizni koluti i četkice. Tu obećava razvoj četkica s metaliziranim ugljenim nitima znatno poboljšanje svojstava (malo trošenje i ukupni pad napona 0,5 V uz gustoće struje do 100 A/cm² i obodnu brzinu od skoro 100 m/s).

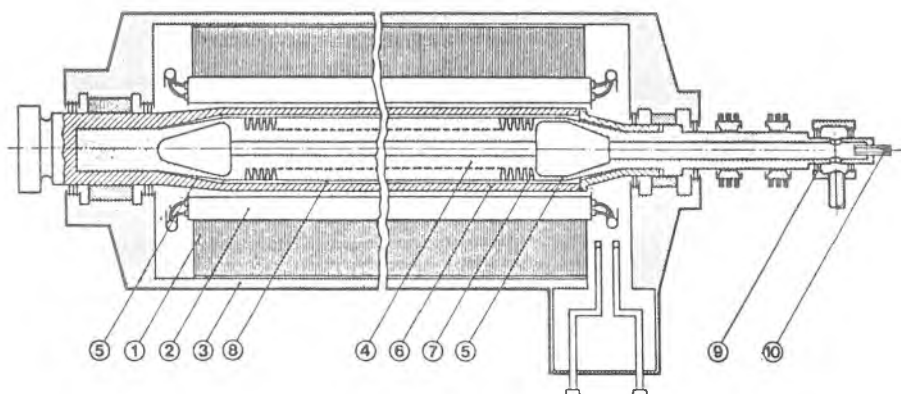
Supravodljivi unipolarni strojevi dolaze u obzir ne samo kod klasičnih primjena istosmjerne struje s niskim naponom (npr. elektrolize), nego i kod srednjih napona, do po prilici 2 kV, pogotovo kod većih snaga. Mnogo nade se polaže u brodske pogone, kod kojih bi primjena supravodljivih strojeva ostvarila prednosti električke propulzije (finoća i opseg regulacije, sloboda u dispoziciji - jednog ili više - primarnih pogonskih strojeva, upotreba njihove snage za druge svrhe, kao npr. utovar i istovar u luci) i otklonila dosadašnje nedostatke (veći volumen, težina i gubici nego kod zupčanog prijenosa). U Engleskoj je sagrađen, po narudžbi ratne mornarice, i nalazi se u tvorničkom ispitivanju pokusni sistem snage 1 MW.

Opisani brodski pogon ima kod primjene supravodljivih strojeva, međutim, i jedan nedostatak u usporedbi s konvencionalnim: brzina reverziranja motora pomoću promjene polariteta uzbude generatora je ograničena svojstvima današnjih supravodiča. Zbog toga su se pojavili i prijedlozi za brodske pogone s primjenom supravodljivih sinhronih strojeva bilo samo kao generator ili i kao motor. Takvi prijedlozi, koji imaju najviše izgleda kod većih snaga, nalaze se u studiju, no do sada još nisu realizirani.

Prije nego prijedemo na opis najvažnijih supravodljivih strojeva, tj. turbogeneratora, kojima je posvećeno slijedeće poglavlje, zanimljivo je spomenuti jednu specijalnu izvedbu sinhronih generatora za mobilne uređaje. Riječ je o 4-polnim generatorima, koji rade kod 12000 o/min (800 Hz) i služe za snabdijevanje električke mreže aviona. Tvornica Westinghouse je 1972. sagrađila jedan pokusni rotor sa supravodljivim namotom za snagu od 5 MVA, a ove godine kompletni generator od 10 MVA. Taj generator je, uključivši rashladni stroj, lakši i manji od konvencionalnog generatora iste snage.

3. Turbogeneratori sa supravodljivim uzбудnim namotom

Ubrzo nakon otkrića supravodiča 2.vrste pojavljuju se razni prijedlozi za njihovu primjenu kod sinhronih strojeva. Pionirskim radom na tom području naročito se istaklo najpoznatije američko tehničko sveučilište M I T . Nakon uspješnih principijelnih pokusa s prvim generatorom (87 kVA) s rotirajućim 2-polnim uzbudnim namotom M I T gradi pokusni turbogenerator snage 3 MVA. Pokusi počinju krajem 1972. Iste godine gradi i ispituje Westinghouse jedan turbogenerator od 5 MVA. Po dimenzijama do sada najveći pokusni generator, koji je međutim deklariran samo s 1 MVA, sagradila je Elektrosila. U gradnji se nalazi jedan generator od 6 MVA u Japanu (Fuji Mitsubishi) i jedan od 20 MVA u U S A (General Electric). Na razvoju supravodljivih turbogeneratorsa danas rade i ostale tvornice velikih električkih strojeva kao i više instituta u cijelome svijetu, a u U S A i elektroprivreda dokazuje svoj interes pomažući financiranje razvoja u industriji. Iako pokusni turbogeneratori, do sada sagrađeni ili u gradnji, već predstavljaju najveće supravodljive strojeve uopće, pravi interes za njihovu praktičnu primjenu usmjeren je na još mnogo veće snage, koje bi mogle konkurirati s najvećim konvencionalnim strojevima ili čak omogućiti gradnju još većih turbogrupa. Sl.4 pokazuje jedan od mogućih koncepata za konstrukciju takvih turbogeneratorsa velike snage. Rotor se sastoji od dva glavna dijela, međusobno kruto spojena na strani turbine. Unutarnji rotor, hlađen tekućim helijem, služi kao nosač supravodljivog uzbudnog namota te je na oba kraja preko tankih koničnih dijelova, koji se hlade jednim dijelom iskorištenog helija, spojen s krajevima osovine. Vanjski rotor se nalazi na normalnoj temperaturi, a međuprostor do unutarnjeg rotora je evakuiran. U tom međuprostoru je smješten i toplinski štit protiv zračenja, koji se također hladi jednim dijelom iskorištenog helija. Vanjski rotor i toplinski štit moraju zajedno imati dovoljnu ukupnu električku vodljivost kako bi mogli prigušiti sva nesinhrona polja uzbuđena u statoru i time spriječiti njihov štetni utjecaj na supravodiče. Na strani kliznih koluta poduprti su vanjski i unutarnji rotor u zajedničkom ležaju, tako da je osigurana njihova koncentričnost i ujedno omogućena aksijalna kontrakcija unutarnjeg rotora



Sl.4 Turbogenerator sa supravodljivim uzbuđnim namotom
1 statosko željezo, 2 statoski namot, 3 kućište
4 unutarnji rotor, 5 konični nastavci, 6 vanjski rotor
7 uzbuđni namot, 8 vakuum, 9 vakuum-priključak, 10 dovod helija

prilikom hlađenja. Dovodi struje od kliznih koluta do uzbuđnog namota, koji su također podvrgnuti velikoj temperaturnoj razlici, hlade se jednim dijelom svježeg helija, jer se samo na taj način može spriječiti velik dovod topline i održati temperaturu spojne točke između bakrenih dovoda i supravodiča na potrebnoj niskoj temperaturi. Na kraju osovine na strani kliznih koluta nalaze se još vrlo važni uređaji za dovod i odvod helija i za evakuiranje rotora.

Stator se nalazi na normalnoj temperaturi i namot je od bakra. Bitna razlika prema statoru konvencionalnih strojeva je u tome što namot nije položen u utore, nego se nalazi u zračnom raspore, pričvršćen u prikladnom nemetalnom nosaču. Jaram od željeznih limova ima oblik jednostavnog prstena, kojega je primarna zadaća zaštititi okolinu od jakog magnetskog polja. Uklanjanje zubi daje više prostora za namot i odstranjuje ograničenje toka zbog zasićenja i gubitaka u zubima. S druge strane, međutim, nestaje magnetske zaštite namota, pa se štapovi nalaze u punom polju. Radi suzbijanja vrtložnih struja moraju se zato i njihovi parcijalni vodiči sagraditi od većeg broja tankih i dobro isprepletenih žica.

Rezultati proračuna generatora, na bazi opisanog koncepta, pokazuju mnoge prednosti supravodljivih generatora prema konvencionalnim. Pored toga, već danas poznati materijali trebali bi omogućiti razvoj generatora od oko 3500 MVA (kod 3000 o/min), što odgovara skoro udvostručenju moguće granične snage, koja se očekuje kod konvencio-

nalnih, vodom hlađenih turbogenerators. U tabeli 2 sabrani su najvažniji podaci supravodljivih generators za 1000 i 3500 MVA te radi usporedbe konvencionalnog od 1000 MVA. Osim očekivanih prednosti u

Tabela 2 Usporedba supravodljivih i konvenc. turbogenerators

izvedba konv. supravod.

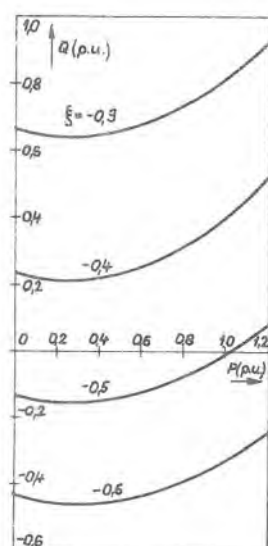
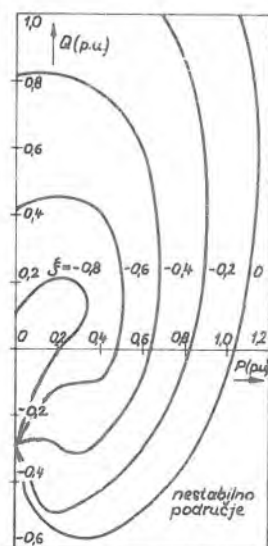
snaga	1000	1000	3500	MVA
težina	580	370	875	t
koef.iskor.	32	80	93	kVAmin/m ³
gubici	12	7	14	MW
korisnost	98,7	99,2	99,5	%
X _d	2,64	0,52	0,54	p.u.
X' _d	0,36	0,4	0,4	p.u.
X'' _d	0,27	0,25	0,25	p.u.

pogledu smanjenja dimenzija i gubitaka treba posebno naglasiti izvanredno povoljne vrijednosti reaktancija supravodljivih strojeva. Dok je sinhrona reaktancija oko 5 puta manja, što je povoljno za statičku stabilnost i regulaciju, zadržavaju tranzientna i subtranzientna reaktancija poželjnu veličinu.

Naravno da su za objektivnu i sveobuhvatnu ekonomsku ocjenu nove izvedbe, pored navedenih, potrebni još mnogi drugi, danas nedovoljno poznati podaci. Nije zato čudo, da su prve procjene najmanje veličine generators, od koje bi supravodljiva izvedba bila ekonomski opravdana, bile vrlo različite, počevši od nekoliko stotina pa do više tisuća MVA. Međutim, u zadnje doba, uz svu rezervu, ipak se pokazuje tendencija u konvergiranju tih procjena prema veličini od oko 1000 MVA. Za konačnu afirmaciju supravodljivih generators u praktičnoj primjeni je neophodno da i njihova pogonska sigurnost dostigne visoki stupanj koji su postigli današnji turbogeneratori. Svaki ispad s mreže i prekid pogona dovodi do ogromnih financijskih gubitaka, koji bitno utječu na ekonomsku bilancu. Da li će supravodljivi generators u tom pogledu zadovoljiti, može pokazati tek praktičan pogon na mreži jednog generators dovoljno velike snage, svakako iznad 100 MVA.

Na pogonska svojstva novih generators može se utjecati ispravnom konstrukcijom i dimenzioniranjem pojedinih dijelova stroja. Kriteriji su pri tome uvjeti rada na mreži, pogotovo pri tranzientnim pojavama. Do stanovite mjere može se ponašanje supravodljivih generators pri smetnjama u mreži obuhvatiti računski ili eksperimentima na manjim pokusnim generatorima. To ponašanje ovisi u daleko većoj mjeri nego kod konvencionalnih generators o prigušnom namotu, ili

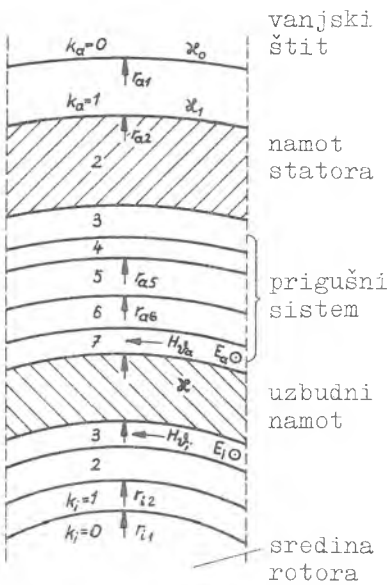
bolje rečeno o čitavom prigušnom sistemu, koji obuhvaća sve elek-



Sl.5 Krivulje prigušenja malih smetnja kod konvencionalnog turbogeneratorsa od 1000 MVA (lijevo) i supravodljivog od 3500 MVA (desno). $Z_{\text{vod}} = (0,04 + j0,4) \text{ p.u.}$

trički vodljive dijelove rotora. Prigušni sistem mora osigurati dovoljnu električku toplinsku i mehaničku zaštitu supravodljivog namota, omogućiti dobro prigušenje njihova rotora i pri svemu tome ne smije mnogo kočiti brzinu regulacije magnetskog toka. Da bi se ispunili svi ti kompleksni i djelomično kontradiktorni zahtjevi, potrebna je složena konstrukcija prigušnog sistema, sastavljenog od više koncentričnih cilindričkih dijelova iz različitog materijala.

Proračun ponašanja generatora prema vani vrši se svrsishodno na isti način kao kod konvencionalnih strojeva, tj. rješavanjem diferencijalnih jednadžbi sistema nadomjesnih koncentriranih krugova, posebno za uzdužnu i poprečnu os. Pri tome je dovoljno prigušni sistem prikazati samo manjim brojem nadomjesnih namota. Za ilustraciju rezultata, dobivenih takvim računima, dana je u sl.5 usporedba statičke stabilnosti, odnosno prigušenja malih smetnji za konvencionalni generator od 1000 MVA i supravodljivi od 3500 MVA. U P-Q-diagram u crtane krivulje konstantnog prigušenja (realni dio signifikantnog korijenja sustava diferencijalnih jednadžbi) pokazuju znatno bolje prilike kod supravodljivog generatora, s dvostruko većim prigušenjem kod nazivnog opterećenja i eliminiranjem nestabilnog područja. Kod proračuna unutarnjih prilika i naprezanja u generatoru prilikom tranzientnih pojava potrebno je naći prostornu razdiobu i vremenske promjene magnetskog i električkog polja. U principu je moguće i te proračune provesti na isti način, samo s profinjenim prigušnim sistemom, uzimajući za njega veći broj nadomjesnih koncentriranih namota.



vanjski štiti

namot statora

prigušni sistem

uzbudni namot

sredina rotora

Postoji, međutim, i prikladnija mogućnost direktnog proračuna elektromagnetskog polja u rotoru, promatranom kao kontinuum. Ograničimo li se pri tome, zbog relativno velikog omjera aksijalne duljine prema promjeru, na razmatranje dvodimenzionalne raspodjele polja, možemo poći od matematičkog modela prikazanog u sl.6, koji se sastoji od većeg broja koncentričnih homogenih slojeva različitih električkih vodljivosti κ (uključivši i nulu) ili magnetskih permeabilnosti μ . U šrafiranim slojevima smješteni su namoti protjecani vanjskim strujama. Uzmimo, da želimo proračunati promjenu polja u praznom hodu pri ne-

Sl.6 Matematski model su-

pravod. turbogenerators koj zadanoj promjeni uzbudne struje. Označimo li sa $S(t)$ amplitudu v -tog vala poznate prostorne podjele gustoće te struje po obodu, vrijedi za traženi v -ti val E električkog polja u rotirajućem cilindričkom koordinatnom sustavu parcijalna diferencijalna jednačba:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} - \frac{v^2}{r^2} E = \mu \frac{\partial}{\partial t} [\kappa E + S(t)] \quad (1)$$

Pomoću Laplace-ove transformacije dobije se obična diferencijalna jednačba:

$$\frac{d^2 E}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE}{dr} - \frac{v^2}{r^2} E = \mu \kappa s E + \mu s S(s) = \alpha^2 E + \mu s S(s) \quad (2)$$

Nakon uvođenja nove varijable $\rho = \alpha r$ vrijede slijedeća rješenja za električko i tangencijalnu komponentu magnetskog polja:

$$E = \frac{S}{\kappa} [C I_v(\rho) + D K_v(\rho) + \Psi_v(\rho)] \quad (3)$$

$$H_\theta = \frac{1}{\mu s} \cdot \frac{\partial E}{\partial r} = \frac{\alpha S}{\mu s \kappa} \left[C \frac{dI_v}{d\rho} + D \frac{dK_v}{d\rho} + \frac{d\Psi_v}{d\rho} \right] \quad (4)$$

I_v i K_v su modificirana Besselova i Kelvinova funkcija reda v , a Ψ_v je partikularni integral normirane nehomogene jednačbe. Slična rješenja (sa $\Psi_v = \Psi_v' = 0$) vrijede i za ostale slojeve s vrtložnim strujama, a još jednostavnija za nemetalne slojeve:

$$E = C_k I_v(\rho) + D_k K_v(\rho) \quad H_g = \frac{\alpha}{\mu s} [C_k I_v'(\rho) + D_k K_v'(\rho)] \quad (5)$$

$$E = C_k r^{\nu} + D_k r^{-\nu} \quad H_g = \frac{\nu}{\mu s r} (C_k r^{\nu} - D_k r^{-\nu}) \quad (6)$$

Integracione konstante C i D moglo bi se u principu odrediti iz opširnog sustava algebarskih jednažbi, koje izražavaju rubne uvjete (kontinuitet električkog i tangencijalnog magnetskog polja) na granicama svih slojeva. Mnogo preglednija je slijedeća metoda, koja koristi rekursione formule za valne admitancije pojedinih slojeva. Ideja je slijedeća: za određivanje konstante C i D iz jednažbi (3) i (4) potrebno bi bilo poznavati dva uvjeta, npr. dvije veličine polja na unutarnjem ili vanjskom rubu područja uzbudnog namota. Sve četiri veličine polja su, međutim, na još nepoznati način ovisne o promjeni uzbudne struje i time same nepoznate. Ali oba omjera magnetskog i električkog polja (valne admitancije) na tim mjestima moraju biti nezavisna od struje i time određiva, svaki posebno, isključivo na temelju konfiguracije područja unutar odnosno izvan sloja s uzбудnim namotom. Iz praktičkih razloga definiramo normirane valne admitancije prema:

$$G_i = \frac{s\mu r_i}{\nu} \left(\frac{H_g}{E} \right)_{r_i} = \left(\frac{\rho}{\nu} \frac{C I_v' + D K_v' + \Psi_v'}{C I_v + D K_v + \Psi_v} \right)_{r_i} \quad (7)$$

$$G_a = -\frac{s\mu r_a}{\nu} \left(\frac{H_g}{E} \right)_{r_a} = -\left(\frac{\rho}{\nu} \frac{C I_v' + D K_v' + \Psi_v'}{C I_v + D K_v + \Psi_v} \right)_{r_a} \quad (8)$$

Faktori normiranja su izabrani tako da se za potpuno nemetalne prostore dobije $G_i = G_a = 1$. Vrlo jednostavne vrijednosti imaju i idealni (t.j. bez gubitaka) magnetski štit ($G = 0$ uz $\mu = \infty$) i idealni električki ili diamagnetički štit ($G = \infty$). Tražene normirane valne admitancije G_i i G_a stvarnih složenih konfiguracija nalaze se tako da se pođe od slojeva, koji su najudaljeniji od uzbudnog namota ($k = 0$ u sl.6), pa se postupnim dodavanjem po jednog sloja izračunava pomoću rekursione formule valna admitancija nastale kombinacije slojeva, sve dok se ne dođe do uzbudnog namota. Postupak ćemo ilustrirati na primjeru područja unutar tog namota. Označimo li sa G_{ik} valnu admitanciju na unutarnjem radiusu (r_{ik})

k-tog sloja, vrijedi, analogno prema jednadžbi (7):

$$G_{ik} = \left(\frac{\rho \cdot C_k I_v' + D_k K_v'}{C_k I_v' + D_k K_v'} \right)_{r_{ik}} \quad G_{i,k+1} = \left(\frac{\rho \cdot C_k I_v' + D_k K_v'}{C_k I_v' + D_k K_v'} \right)_{r_{i,k+1}} \quad (9)$$

Eliminiranjem konstanti C_k i D_k iz ta dva izraza dobiva se rekursiona formula za valnu admitanciju u sloju s vrtložnim strujama:

$$G_{i,k+1} = \frac{\left(\frac{\rho I_v'}{I_v} - L_{ik} \frac{\rho K_v'}{K_v / r_{i,k+1}} \right)}{v(1 - L_{ik})} \quad L_{ik} = \left(\frac{\rho I_v' - v I_v G_{ik}}{\rho K_v' - v K_v G_{ik}} \right)_{r_{ik}} \cdot \left(\frac{K_v}{I_v} \right)_{r_{i,k+1}} \quad (10)$$

Ako je k-ti sloj nemetalni rekursiona formula glasi:

$$G_{i,k+1} = \frac{G_{ik} + v}{1 + G_{ik} v} \quad v = \left| \frac{r_{i,k+1}^{2y} - r_{ik}^{2y}}{r_{i,k+1}^{2y} + r_{ik}^{2y}} \right| \quad (11)$$

Slično građeni izrazi dobivaju se i za područje izvan uzbuđenog namota: U formulama (10) treba, osim promjene indeksa ("a" umjesto "i") uzeti u izrazu za L_{ak} zbrojeve u brojniku i nazivniku i promijeniti predznak kod $G_{a,k+1}$. U formulama (11) mijenja se samo indeks "i" u "a".

Kada su G_i i G_a jednom određeni, lako se iz jednadžbi (7) i (8) nađu C i D , tako da je polje u sloju s uzbuđenim namotom prema jednadžbama (3) i (4) poznato. Iz rubnih vrijednosti polja na granicama prema susjednim slojevima odrede se onda konstante C_k i D_k u tim slojevima i tako postupno dalje do zadnjih slojeva ($k = 0$). Dobiveni izrazi daju Laplace-ovu transformaciju elektromagnetskog polja u bilo kojoj poželjnoj točki generatora. Zbog kompliciranih funkcija, u kojima se pojavljuje Laplace-ova varijabla "s", moguće je izvršiti povratnu transformaciju u vremensko područje samo numerički. Iz tog razloga je svrsishodno i čitav rekursioni postupak provesti jednostavno numerički, u dovoljno širokom području "s"-varijable, što je pomoću computerskog programa lako provedivo.

Prof. Dr.-Ing. H. Jordan
Lehrstuhl und Institut für
Elektr. Maschinen u. Antriebe
Technische Universität Hannover
Welfengarten 1, 3000 Hannover

STATIONÄRE UND TRANSIENTE VORGÄNGE IN ELEKTRISCHEN MASCHINEN

KURZFASSUNG

Die Berechnung des stationären Verhaltens von elektrischen Maschinen führt mit Hilfe der komplexen Darstellung auf ein System von gewöhnlichen Gleichungen, die des transienten Verhaltens auf ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen, nämlich von Spannungs- und Bewegungsdifferentialgleichungen. Das erste System ist leicht, das zweite schwer zu lösen. Im letzteren Fall bedient man sich heute der elektronischen Rechenmaschinen. Man gelangt dann i. a. rasch zu einer Lösung des Systems der Differentialgleichungen, wobei man sich jedoch darüber klar sein muß, daß die so gewonnene Information infolge der vielen Einflußgrößen nicht gerade sehr wertvoll ist. Der physikalische Überblick geht dabei verloren.

Viel vernünftiger scheint zu sein, sich erst einmal die Frage zu stellen, wann darf man stationär und wann muß man transient rechnen?

Um das zu beantworten, empfiehlt es sich, eine dimensionslose Darstellung der Differentialgleichungen anzustreben

und ferner zu versuchen, die Einflußgrößen sozusagen zu "verschweißen". Es handelt sich dabei nicht etwa um die bekannte per-Unit Schreibweise! Als Beispiel sei erwähnt, daß man anstelle der Uhrzeit t besser eine dimensionslose Zeit $\tau = s_k \cdot \omega t$ einführt, die gleich 2 Einflußgrößen, den Kipp-schlupf s_k und die Netzkreisfrequenz ω zusammenfaßt. Macht man Ähnliches mit den anderen abhängigen Veränderlichen, den Strömen und dem elektromagnetischen Drehmoment, dann zeigt sich, daß man das transiente Verhalten der Maschinen i. a. durch einen einzigen Parameter darstellen kann, der eben darüber entscheidet, was "langsam" oder "schnell" ist, oder anders ausgedrückt, wann man stationär rechnen darf oder transient rechnen muß. Das gilt für alle Arten von rotierenden elektrischen Maschinen. Dabei verdient der Fall einer widerstandslosen Anordnung im Hinblick auf die zukünftige Verwendung von supraleitenden Wicklungen eine besondere Beachtung. In diesem Fall verhält sich ein Drehstromasynchronmotor wie ein physikalisches Pendel.

Bezüglich der Lösung des Systems der Spannungsdifferentialgleichungen erscheint noch ein weiterer Umstand wichtig, insbesondere bei Stabilitätsbetrachtungen. Jeder Drehstromasynchronmotor zeigt bei Drehzahlschwankungen synchrone, jeder Synchronmotor asynchrone Eigenschaften. Man darf sich also bei der Untersuchung von selbsterregten Pendelungen nicht auf den Standpunkt stellen, daß Asynchronmotoren nur auf Drehzahländerungen und Synchronmaschinen nur auf Änderungen des Polradwinkels reagieren. Die Nichtbeachtung dieser Tatsache hat in letzter Zeit zu unangenehmen Betriebsstörungen geführt.

Die Berechnung des stationären Verhaltens von Drehstromasynchronmotoren führt mit Hilfe der komplexen Darstellung auf ein System von gewöhnlichen Gleichungen, die des transienten Verhaltens, auf ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen. Das erste System ist leicht, das zweite schwer zu lösen. Im letzteren Fall bedient man sich heute mit Vorliebe der elektronischen Rechenmaschinen. Man gelangt dann i. a. rasch zu einer numerischen Lösung [1, 2].

Dabei muß man sich aber darüber klar sein, daß die so gewonnene Information infolge der vielen Einflußgrößen nicht gerade wertvoll ist. Der physikalische Überblick geht dabei verloren. Viel vernünftiger erscheint es, sich erst einmal die Frage zu stellen, wann darf man stationär, und wann muß man transient rechnen?

Um das zu beantworten, empfiehlt es sich, eine dimensionslose Darstellung der Differentialgleichungen anzustreben, wobei gleichzeitig versucht werden muß, die verschiedenen Einflußgrößen sozusagen zu einer einzigen zu "verschweißen" [3]. Diese dann noch verbleibende Einflußgröße entscheidet dann darüber, was "langsam" (stationär) und was "schnell" (transient) ist. Das gilt im Übrigen für alle Arten von elektrischen Maschinen. Dabei verdient der Sonderfall einer widerstandslosen Idealmaschine im Hinblick auf die zukünftige Verwendung von supraleitenden Wicklungen eine besondere Beachtung.

Einen besonders guten Einblick in die Vorgehensweise liefert die Untersuchung des Leerhochlaufs. Es wird sich nämlich zeigen, daß man damit auch die meisten übrigen technisch interessanten Fälle erfaßt, die sich im Grunde davon nur durch die Anfangsbedingungen unterscheiden.

Wir dürfen bei einer solchen prinzipiellen Untersuchung von der Sättigung, den Oberfeldern und der Stromverdrängung unbedenklich absehen.

Den Ausgangspunkt bilden die Spannungsdifferentialgleichungen der Maschine m. a. W. das Induktionsgesetz (Bild 1):

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + L_{12} \frac{d}{dt} (i_2 \cdot e^{+j p \vartheta}) = U_1 \sqrt{2} \cdot e^{+j(\omega t + \vartheta)} \quad (1)$$

und

$$L_{12} \frac{d}{dt} (i_1 \cdot e^{-j p \vartheta}) + L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = 0 \quad (2)$$

und das dynamische Grundgesetz

$$J \cdot \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = M = \frac{3 \cdot p}{2} \cdot \sqrt{L_{12} \cdot L_{21}} \cdot \left(j i_2 \cdot e^{+j p \vartheta} \right) \circ i_1 \quad (3)$$

↑
skalares Produkt

in der üblichen Schreibweise, wobei $p \vartheta$ den in elektrischen Graden gemessenen Winkel zwischen den willkürlich mit 1 bezeichneten Wicklungsachsen von Ständer und Läufer bedeutet. Dazu gehören Aussagen über i_1 , i_2 , ϑ und $d\vartheta/dt$ zur Zeit $t = 0$, also die sogenannte Anfangsbedingungen.

Anstelle von i_1 kann man auch den Magnetisierungsstrom:

$$i_m(t) = i_1 + \frac{L_{12}}{L_1} \cdot i_2 \cdot e^{+j p \vartheta} \quad (4)$$

einführen. Das empfiehlt sich bei einer Reihe von technisch

interessierenden Aufgaben. Die Spannungsdifferentialgleichungen (1) und (2) gehen dann über in:

$$L_1 \frac{di_m}{dt} + R_1 \cdot i_m - R_1 \frac{L_{12}}{L_1} (i_2 e^{+j p \vartheta}) = U_1 \sqrt{2} \cdot e^{+j(\omega t + \vartheta)} \quad (5)$$

und:

$$L_{21} e^{-j p \vartheta} \frac{di_m}{dt} - j p \frac{d\vartheta}{dt} L_{21} e^{-j p \vartheta} i_m + R_2 \cdot i_2 + \sigma L_2 \frac{di_2}{dt} = 0, \quad (6)$$

wobei $\sigma = 1 - \frac{L_{21} \cdot L_{12}}{L_1 \cdot L_2}$ der Blondelsche Gesamtstreuoeffizient ist (Bild 2). ϑ ist ein Phasenwinkel, der den Schaltmoment andeutet.

Für die Ströme i_m und i_2 machen wir nun versuchsweise den Ansatz:

$$i_m(t) = \underline{I}_m(t) \cdot \sqrt{2} \cdot e^{+j(\omega t + \vartheta)} \quad (7)$$

bzw.

$$i_2(t) = \underline{I}_2(t) \cdot \sqrt{2} \cdot e^{+j(\omega t + \vartheta - p \vartheta)},$$

wobei $\underline{I}_m$ und $\underline{I}_2$ komplexe Funktionen der Zeit sind und angenommen wird, daß i_m die Netzkreisfrequenz ω und i_2 die Schlupfkreisfrequenz ($\omega - p \frac{d\vartheta}{dt}$) besitzt. Unsere Spannungsdifferentialgleichungen (5) und (6) lauten dann viel freundlicher:

$$R_1 \underline{I}_m + L_1 \frac{d\underline{I}_m}{dt} + j \cdot \omega L_1 \underline{I}_m - R_1 \frac{L_{12}}{L_1} \underline{I}_2 = \underline{U}_1 \quad (8)$$

und:

$$L_{21} \cdot \frac{dI_m}{dt} + j(\omega - p \frac{d\varphi}{dt}) \cdot I_m + \mathcal{B} \cdot L_2 \cdot \frac{dI_2}{dt} + j(\omega - p \frac{d\varphi}{dt}) \cdot \mathcal{B} \cdot L_1 \cdot I_2 + R_1 \cdot I_2 = 0, \quad (9)$$

wenn man durch die nicht verschwindenden Faktoren $e^{+j(\omega t + \varphi)}$ und $e^{+j(\omega t + \varphi - p\varphi)}$ kürzt (Bild 3). Wir spalten nun die Ströme I_m und I_2 in Real- und Imaginärteil auf:

$$\underline{I}_m = I_{mw} + j I_{mB} \quad (10)$$

bzw.

$$\underline{I}_2 = I_{2w} + j I_{2B} \quad (11)$$

Im Hinblick auf eine dimensionslose Darstellung (Bild 4) definieren wir:

$$I_m = \frac{U_1}{\omega L_1} = \text{Effektivwert des Magnetisierungsstroms für } R_1 = 0 \quad (12)$$

$$\tau = S_{kstat} \cdot \omega t = \text{Eigenzeit} \quad (13)$$

$$S_{kstat} = \frac{R_2}{\mathcal{B} \cdot \omega L_2} = \text{statischer Kippschlupf für } R_1 = 0 \quad (14)$$

$$s = S / S_{kstat} = \text{bezogener Schlupf} \quad (15)$$

$$\alpha = R_1 / \omega L_1 = \text{bezogener Ständerwiderstand} \quad (16)$$

$$x_m = I_{mw} / I_m, \quad (17)$$

$$y_m = I_{mB} / I_m, \quad (18)$$

$$x_2 = \frac{I_{2w} \cdot \mathcal{B} \cdot L_2}{L_{21} \cdot I_m}, \quad (19)$$

und

$$y_2 = \frac{I_{2B} \cdot \mathcal{B} \cdot L_2}{L_{21} \cdot I_m} \quad (20)$$

Damit gehen dann die Spannungsdifferentialgleichungen in die endgültige Form (Bild 5):

$$\alpha \cdot X_m + s_{kstat} \cdot X_m' - y_m - \alpha \cdot \left(\frac{1-\beta}{\beta} \right) \cdot x_2 = +1, \quad *) \quad (21)$$

$$\alpha \cdot y_m + s_{kstat} \cdot y_m' + x_m - \alpha \cdot \left(\frac{1-\beta}{\beta} \right) \cdot y_2 = 0, \quad (22)$$

$$x_m' - s \cdot y_m + x_2' - s \cdot y_2 + x_2 = 0, \quad (23)$$

$$y_m' + s \cdot x_m + y_2' + s \cdot x_2 + y_2 = 0 \quad (24)$$

und die Bewegungsdifferentialgleichung in:

$$K \cdot s' + x_2 \cdot y_m - y_2 \cdot x_m = 0 \quad (25)$$

über, in der nur noch ein einziger Parameter:

$$K = \frac{j \cdot \omega^4 \cdot s_{kstat} \cdot \beta \cdot L_1}{3\rho^2 \cdot (1-\beta) \cdot U_1^2} \quad (26)$$

auftritt, in dem alle übrigen Einflußgrößen zusammengefaßt sind. Für eine bestimmte Maschine sind nämlich α, β, j und s_{kstat} durch K festgelegt!

Hat man die Lösung dieses Systems für die Anfangsbedingungen $i_1(0) = 0, i_2(0) = 0, \vartheta(0)$ beliebig, und $\frac{d\vartheta}{dt} = 0$ gefunden, d. h. die Abhängigkeit der Größen x_m, y_m, x_2, y_2 und s als Funktionen der Eigenzeit τ , dann kennt man auch die Momentanwerte des Drehmoments:

*) Ableitungen nach der Eigenzeit τ werden mit ' gekennzeichnet.

$$M = 2 \cdot M_{kstat} \cdot (X_2 \cdot Y_m - Y_2 \cdot X_m) \quad (27)$$

als Funktion der Drehzahl:

$$n = n_0 \cdot (1-s) = n_0 \cdot (1 - s_{kstat} \cdot s), \quad (28)$$

n_0 ist dabei die synchrone Drehzahl und:

$$M_{kstat} = \frac{3 \cdot p \cdot (1-\beta) \cdot U_0^2}{2 \cdot \omega^2 \cdot \beta \cdot L_1} \quad (29)$$

das statische Kippmoment für $R_1 = 0$.

Es liegt dann eine Parameterdarstellung der Drehmoment-Drehzahlkennlinie vor (Parameter τ). Da nun K als einzige Einflußgröße auftritt, kann man das ganze transiente und das statische Drehmomentverhalten eines Drehstromasynchronmotors in einem einzigen Kurvenblatt darstellen (Bild 6).

Die Kurven wurden mit Hilfe eines Analogrechners gewonnen. Zu kleinen Werten von K gelangt man bei sehr großen Maschinen (mit kleinen Werten von α und s_{kstat}) von extrem kleinen Läuferdurchmessern und damit kleinen Drehmassen J . Man erkennt aus Bild 6 deutlich die bekannte Tatsache, daß das Kippmoment M_k um so kleiner wird, je schneller der Motor hochläuft (kleine Werte von K). Darauf muß man acht geben, wenn man M_{kstat} mit Hilfe von Hochlaufoszillogrammen zu ermitteln versucht. Darüber hinaus sieht man, daß sich zu Beginn des Anlaufs dem asynchronen Drehmoment Pendelmomente überlagern, die teilweise in den negativen Drehmomentbereich gehen.

Dadurch erklären sich die in den Hochlaufkurven immer wieder beobachteten seltsamen "Treppenstufen" in der Nähe des Stillstands, die von den Prüffeldingenieuren oft als Wirkung klappernder Kupplungen angesehen werden [4] (Bild 7).

Der Einfluß des Ständerwiderstandes R_1 bzw. α spielt, abgesehen von Kleinmotoren, keine nennenswerte Rolle. Das System der Differentialgleichungen (21) bis (24) reduziert sich dann mit $\alpha = 0$, $x_m = 0$ und $y_m = 0$ auf nur zwei Differentialgleichungen.

Die Einflußgröße K läßt sich als Verhältnis zweier Zeiten:

$$T_{\text{mech.}} = J \cdot \frac{\omega}{p} \cdot \frac{s_{\text{kstat.}}}{2 \cdot M_{\text{kstat.}}} = \text{Anlaufzeit} \quad (30)$$

und:

$$T_{\text{magn.}} = \frac{G \cdot L_2}{R_2} = \text{Zeitkonstante des Läuferstrefeldes} \quad (31)$$

darstellen:

$$K = \frac{T_{\text{mech.}}}{T_{\text{magn.}}} \quad (32)$$

oder als Verhältnis zweier Energien:

$$W_{\text{kin.}}(s_{\text{kstat.}}) = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \left(\frac{\omega}{p} \cdot s_{\text{kstat.}} \right) = \quad (33)$$

kinetische Energie des Läufers beim statischen Kippschlupf s_{kstat} bezogen auf einen mit der synchronen Drehzahl rotierenden Beobachter

und:

$$W_{\text{magn.}}(\infty) = \frac{3 \cdot (1-\beta) L_1}{2 \cdot \beta} \cdot \left(\frac{U_s}{\omega L_1} \right)^2 = \quad (34)$$

magnetische Energie des Läuferstrefelfeldes
beim ideellen Kurzschluß ($s \rightarrow \infty$).

$$K = \frac{W_{\text{kin}}(s_{\text{stat.}})}{W_{\text{mag.}}(\infty)} \quad (35)$$

(vgl. Bild 8).

In physikalischer Hinsicht interessiert ferner der Sonderfall einer widerstandslosen Maschine.

Auf den ersten Blick sollte man meinen, daß es sich gar nicht lohnt, diesen Grenzfall überhaupt zu betrachten, da man ja von vornherein zu wissen glaubt, was zu erwarten ist: Der Motor nimmt die ideellen Kurzschlußströme auf und kann nicht anlaufen, weil der Läufer keine Stromwärmeverluste besitzt. Das stellt sich natürlich auch für die üblichen Anfangsbedingungen: $i_1(0) = 0$, $i_2(0) = 0$, $\phi(0)$ beliebig und $d\phi/dt = 0$ heraus. Es zeigt sich jedoch bei näherem Hinsehen, daß diese Untersuchung sehr wohl von technischem Interesse ist, weil sie gerade die mechanischen und elektromagnetischen Vorgänge beim Anfahren eines realen, also widerstandsbehafteten Motors sehr gut beschreibt.

Wir untersuchen dazu, was wohl bei einem Schleifringläufermotor passiert, dessen Ständer bereits den Magnetisierungsstrom führt und dessen Läufer zur Zeit $t = 0$ kurzgeschlossen wird. Es ist dann:

$$i_1(0) = i_m(0) = -j \cdot I_m \cdot \sqrt{2} \cdot e^{+j\vartheta} \quad (36)$$

und:

$$i_2(t) = +j \cdot \frac{L_{12} \cdot I_m \cdot \sqrt{2}}{\delta \cdot L_2} \cdot \left\{ e^{+j(\omega t - p\gamma + \vartheta)} - e^{+j(\vartheta - p\gamma(0))} \right\}. \quad (37)$$

Diese Lösung erhält man ganz einfach aus der Konstanz der Flußverkettungen im Läufer ($R_2 = 0$). $I_m \cdot \sqrt{2} / \delta$ ist dabei der Höchstwert des stationären Ständerkurzschlußstroms. Der Ständerstrom ergibt sich zu:

$$i_1(t) = -j \cdot \frac{I_m \cdot \sqrt{2}}{\delta} \cdot e^{+j(\omega t + \vartheta)} \cdot \left\{ 1 - (1 - \delta) \cdot e^{+j(p\gamma - \omega t - p\gamma(0))} \right\}. \quad (38)$$

Durch Einsetzen von i_1 und i_2 aus den Gln. (37) und (38) in die Bewegungsdifferentialgleichung folgt dann:

$$M(t) = -2 \cdot M_{\text{stat.}} \cdot \sin(p\gamma - \omega t - p\gamma(0)) \quad (39)$$

(vgl. Bild 9), und es hat den Anschein, als ob man i_1 , i_2 und M gar nicht so leicht ermitteln kann, weil ja der Winkel γ nicht bekannt ist. Da hilft nun aber die Einführung eines Hilfswinkels:

$$\Omega = p\gamma - \omega t - p\gamma(0). \quad (40)$$

Ω/p ist der von einem mit der synchronen Drehzahl rotierenden Beobachter aus festgestellte Winkel zwischen den mit 1 bezeichneten Wicklungssträngen von Ständer und Läufer. Für Ω gelten dabei die Beziehungen:

$$\frac{d\Omega}{dt} = p \cdot \frac{d\varphi}{dt} - \omega \quad (41)$$

$$\Omega(0) = 0 \quad (42)$$

und:

$$\left(\frac{d\Omega}{dt} \right)_0 = -\omega. \quad (43)$$

Wie man sieht, sind $\Omega(t)$ und $\frac{d\Omega}{dt}$ anfangs sicher negativ. Damit werden $M(t)$ und $\frac{d\varphi}{dt}$ positiv. Die dynamische Grundgleichung geht dann über in:

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d^2\Omega}{dt^2} + 2 \cdot M_{kstat.} \cdot \sin \Omega = 0 \quad (44)$$

Das ist aber genau die Bewegungsdifferentialgleichung eines physikalischen Pendels! $2p \cdot M_{kstat}$ entspricht also gerade dem maximalen Rückstellmoment des Pendels ($mg \cdot l$) und g/p seiner Drehmasse bezogen auf den Drehpunkt. Das ist doch zumindest eine erstaunliche Tatsache!

Die Lösung der Differentialgleichung Gl. (44) gelingt durch Übergang auf die sog. Phasenebene ($\Omega, \frac{d\Omega}{\omega \cdot dt}$) mit Hilfe des Energiesatzes (Bild 10). Da keine Energieverluste durch Dämpfung vorhanden sind, gilt:

$$W_{kin} + W_{pot} = W_0 \quad (\text{Gesamtenergie}) \quad (45)$$

Im Fall des Drehstromasynchronmotors ist:

$$W_{kin} = \frac{J}{2} \cdot \left(\frac{d\Omega}{dt} \right)^2 \quad (46)$$

und:

$$W_{pot} = \int_{\Omega(0)}^{\Omega} (2 \cdot p \cdot M_{kstat.}) \cdot \sin \Omega \cdot d\Omega = + 2 \cdot p \cdot M_{kstat.} (1 - \cos \Omega). \quad (47)$$

Wir erhalten damit:

$$\frac{J}{2} \cdot \left(\frac{d\Omega}{dt} \right)^2 + 2 \cdot p \cdot M_{kstat.} \cdot (1 - \cos \Omega) = \frac{J}{2} \cdot \omega^2 \quad (48)$$

bzw. etwas umgeformt:

$$\left(\frac{d\Omega}{dt} \right)^2 + k^2 \cdot (1 - \cos \Omega) = \frac{2 \cdot W_0}{J} \quad (49)$$

mit der Maschinenkonstanten:

$$k = \sqrt{\frac{4 \cdot p \cdot M_{kstat.}}{J \cdot \omega^2}} \quad (50)$$

die mit der Einflußgröße K in einem einfachen Zusammenhang steht:

$$K = \frac{2 \cdot s_{kstat}^2}{h^2} \quad (51)$$

Aus Gl. (49) folgt:

$$\frac{1}{\omega} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = \pm \sqrt{(1-h^2) + h^2 \cos \Omega} \quad (52)$$

Das ist die Gleichung der in Bild 11 dargestellten Phasenkurven. Mit h bzw. K als Parameter liefern sie das Phasenporträt des widerstandslosen Motors.

Mit Hilfe dieser Phasenkurven ist es nur möglich, die transienten Drehmomentkennlinien zu ermitteln. Mit:

$$x = \frac{p}{\omega} \cdot \frac{d\tau}{dt} = \frac{n}{n_0} = 1-s \quad (53)$$

und:

$$y = \frac{M}{M_{kstat}} \quad (54)$$

folgt:

$$y = \pm 2 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{h^4} \cdot \{(x-1)^2 - (1-h^2)\}^2} \quad (55)$$

Wir haben damit die Gleichung der transienten Drehmomentkennlinien des widerstandslosen Motors gefunden. Ich übergehe die Einzelheiten der Diskussion dieser Kurven und erwähne nur,

daß je nach Größe von K man ganz verschiedene Drehmomentkennlinien (Bild 12) erhält. In den Drehmomentkennlinien von Bild 6 des realen Motors sind diese Kurven deutlich wieder zu erkennen! Das ist aber nicht weiter verwunderlich, weil man sich ja bei den üblichen Anfangsbedingungen: $i_1(0) = 0$, $i_2(0) = 0$, $\vartheta(0)$ beliebig und $\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_0 = 0$ dem Fall des widerstandslosen Motors nähert.

Der Zeitverlauf des Hilfswinkels Ω (Bild 12) ergibt sich aus der Umkehrfunktion von:

$$\omega t = - \int_0^{\Omega} \frac{d\Omega}{\sqrt{1-k^2(1-\cos\Omega)}} \quad (56)$$

Er ist in Bild 13 für drei verschiedene Werte von k angegeben. Die Periodendauer T_p bzw. die Kreisfrequenz ω_p der Pendelungen ergibt sich aus der Gl. (56) zu:

$$T_p = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_p} = \frac{4}{\omega} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\Omega}{\sqrt{(1-k^2) + k^2 \cos\Omega}} \quad (57)$$

Wie bereits erwähnt, lassen sich nun auch andere technisch interessierende transiente Vorgänge mit Hilfe des Systems der Differentialgleichungen (21) bis (25) berechnen, wenn man die Anfangsbedingungen entsprechend abändert. Ich erwähne nur den Fall der Kurzschlußbremsung und der plötzlichen Belastung eines synchron laufenden Motors.

Ich fasse zusammen: Die Tatsache, daß man transiente Vorgänge in elektrischen Maschinen bei bekannten Einflußgrößen für eine spezielle Maschine schon seit langem numerisch berechnen kann, darf nicht darüber hinweg täuschen, daß man dieses Problem damit auch völlig im Griff hat. Im Grunde ist das kein allzu großes Kunststück, solche Vorgänge mit Hilfe einer elektrischen Rechenmaschine zu ermitteln.

Die hier geschilderte Methode zeigt vor allem, welche Größe darüber entscheidet, wann solche Vorgänge als statisch und wann als dynamisch angesehen werden können. Es ist der Parameter K. Dabei ergeben sich neue Einsichten in den physikalischen Mechanismus der Maschinen. Gerade auf dessen Kenntnis kommt es aber an, wenn man technische Entscheidungen zu treffen hat.

Man sollte sich nicht daran stoßen, daß die Ergebnisse etwas "mager" erscheinen. Alle harten Tatsachen haben es ja bekanntlich nach den Worten des großen Physikers Ernst MACH an sich, daß sie ernüchternd und aufklärend zugleich sind!

Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit!

Literaturhinweise

1. Hanakam, L.: "Übergangsverhalten des Drehstrom-Schleifringläufers",
AEG-Mitt. 7 (1959) H. 11, S. 393-398
und 421-427
2. Bausch, H.,
H. Jordan,
M. Weis: "Digitale Berechnung des transienten Verhaltens von stromverdrängungsfreien Drehstrom-Käfigläufermotoren",
ETZ-A, 89 (1968) H. 15, S. 361-366
3. Jordan, H.,
G. Pfaff: "Dynamische Kennlinien von Drehstrom-asynchronmotoren",
ETZ-A, 83 (1962) H. 12. S. 388-392
4. Putz, W.: "Der Hochlaufversuch beim Drehstrommotor und seine Fehlerquellen",
Elektrotechnik, 2. Jahrg. (1948) H. 1
S. 29-31

Mr Josip Šaban, dipl.inž.
Poduzeće "Rade Končar", Zagreb
OOUR Tvornica generatora

HOMOPOLARNI ILI HETEROPOLARNI STROJ - MOGUĆNOSTI ZA POSEBNA RJEŠENJA

U referatu su dani neki kriteriji izbora principa rada i vrste konstrukcije sinhronih strojeva, u smislu razgraničenja namjene običnih klasičnih heteropolarnih izvedbi i raznih induktorskih i njima srodnih izvedbi, a u ovisnosti o frekvenciji, snazi i brzini vrtnje.

Težište izlaganja nalazi se u razmatranju raznih koncepcija induktorskih (homopolarnih i heteropolarnih) strojeva. Učinjen je i mali osvrt na korištenje induktorskih i njima srodnih pandžastih generatora u ulozi uzбудnika sinhronih strojeva, što je sa stajališta proizvođača i korisnika krupnih izvora električne energije posebno zanimljivo.

Izlaganje je rezultat rada na ovom području elektrostrojarstva, te iskustva stečenog u gradnji induktorskih generatorskih jedinica.

HOMOPOLAR OR HETEROPOLAR MACHINE - POSSIBILITIES OF SPECIAL SOLUTIONS

Some criteria governing the choice of functional principle, kind and design of synchronous machines, in view of required particularities, characteristics and usage, are discussed.

Middle-frequency inductors and similar generators are primarily considered. The use of these machines as exciters in exciting systems for large synchronous machines is also shown.

The subsequent explanation is the outcome of experience in this field of electromechanical engineering.

1. Uvod

Opisi i tretman posebnih izvedbi električkih strojeva slabije su zastupljeni u općoj tehničkoj literaturi. Uzrok je vjero-

vatno u tome što relativno malen broj proizvođača izrađuje takve specijalne strojeve, a ako ih poneki i proizvode, onda je to najčešće povremeni interes potaknut vlastitim potrebama ili eventualno ograničenim potrebama nekog kupca koji traži sasvim određeni stroj za kompletiranje nekog proizvoda ili uređaja. Specijalizirani pak proizvođači imaju redovito ograničen asortiman, što je razumljivo ako se imaju u vidu specifičnosti tehnologije, zastupljene u gradnji strojeva različitih i posebnih koncepcija.

Raznolikost rješenja je također uzrok da se u literaturi rijetko govori na jednom mjestu o širokom dijapazonu različitih koncepcija konstrukcije, pa je zbog toga dosta teško steći ispravnu i cjelovitu sliku o svrhovitosti cijelog tog "šarenila".

Ni ovaj mali napis ne može imati tako velike ambicije da dade kompletan pregled tog širokog područja, nego se zadržava uglavnom na važnijem dijelu onog na čemu se u Poduzeću "R.Končar" povremeno (zavisno od potreba) radilo. Pri tom ćemo nastojati **istaknuti** različitosti i sličnosti između raznih koncepcija, te prednosti odn. nedostatke u vezi s time i u odnosu na upotrebljivost u određene svrhe. Izbor je prepušten autoru, pa je razumljivo da je donekle subjektivan u smislu davanja naglaska onim vrstama specijalnih strojeva, kojima se autor sâm više bavio, a to su razni specijalni sinhroni strojevi: induktorski, reluktantni, pandžasti, strojevi s permanentnim magnetima.

Čak i ovo nabrojeno je preširoka tema za detaljniji pristup, tako da se - nakon podjele strojeva u smislu naslova ovog rada, te nakon osnovnih informacija o tim strojevima s ciljem razgraničenja od običnih klasičnih i s ciljem isticanja razlika među svima njima u pogledu koncepcije, principa rada, osnovnih svojstava i primjenjivosti - posvećuje isključiva pažnja induktorskim (i donekle njima sličnim pandžastim) strojevima.

Zanimljivo je usmjeriti pažnju na to kako se određene posebnosti koncepcije stroja mogu korisno i duhovito upotrijebiti u postizanju određenih karakteristika ili namjene. Također je zanimljivo obratiti pažnju na odabran kriterij podjele strojeva, jer se taj kriterij obično ne postavlja na širu osnovu i rijetko se na strojeve gleda s tog aspekta.

Potreba za izmjeničnim električkim izvorima povišene frekvencije potiče i danas interes za induktorskim generatorima. Obični klasični generatori, naime, kod iole povišenih frekvencija nisu ekonomični. Zbog toga, kao i zbog posebnosti izvedbe, induktorski generatori zauzimaju posebno mjesto među sinhronim strojevima.

Kod frekvencija zastupljenih u elektroenergetici (42; 50; 60 Hz) induktorski izvori su, dakako, sasvim neekonomični. Oni nalaze primjenu uglavnom tamo gdje su potrebne srednje frekvencije u rasponu od 400 do 10.000 Hz, pa i do 20.000-25.000 Hz. Induktorskim generatorima ozbiljno konkuriraju elektronički uređaji, pogotovo kod viših frekvencija, preko 10.000 Hz. Međutim, kod nižih frekvencija (do 8000-10.000 Hz), naročito za veće snage (nekoliko stotina kW ili više), još uvijek se mnogo koriste induktorski izvori, npr. pri indukcionom taljenju metala, zavarivanju, lemljenju, termičkoj obradi, zagrijavanju u razne svrhe, te kod industrijskog korištenja ultrazvuka.

Osim toga, srednjofrekventni generatori od nekoliko stotina Hz služe kao izvori za napajanje raznih servouređaja i motora najvećih brzina, npr. u avijacijskoj tehnici i tekstilnoj industriji. U energetici, povezani s ispravljačima, služe kao uzбудnici velikih generatora, a u distribucionim mrežama se upotrebljavaju kao izvori za napajanje uređaja daljinskog upravljanja potrošačima električne mreže. Moderne ispitne stanice opremljene su takvim srednjofrekventnim generatorima za ispitivanje izolacije električkih strojeva i transformatora.

Treba ipak spomenuti da se generatori srednjih frekvencija, do približno 800 Hz, i snage od nekoliko stotina kW do cca 2 MW, mogu ekonomično izvoditi i kao obični klasični sinhroni strojevi, s velikim brojem rotorskih polova (ovisno o brzini vrtnje). Međutim, s povećanjem broja polova ne može se ići daleko, jer rasipanje uzbuđnog namota postaje preveliko i konstrukcija neekonomična. Potrošak bakra za uzbuđni namot odviše se povećava, a mala širina uzbuđnih svitaka i polnih jezgri otežava izradu. Zbog toga kod projektiranja generatora određene snage, frekvencije i brzine vrtnje treba analizirati kojeg je tipa izvedba ekonomski opravdana. Što je manja brzina vrtnje, to se granica ekonomičnosti između običnih sinhronih generatora i generatora induktorskog tipa nalazi kod nižih frekvencija (veličina snage ima također utjecaj: spomenuta granica se kod manjih snaga

pomiče prema nešto nižim frekvencijama).

U tč.4 prikazana je konstanta iskorištenja induktorskih strojeva u ovisnosti o frekvenciji i brzini vrtnje.

Upotreba induktorskih motora nije naročito raširena. Može biti interesantna u cilju postizanja vrlo niskih brzina vrtnje (npr. uz napajanje od napona industrijske frekvencije) ili pak u cilju postizanja beskontaktnosti bez upotrebe rotirajućih ispravljača (dioda, tiristora).

2. Princip rada, magnetski sistemi i sistemi namota

Za razliku od običnih sinhronih generatora, koji rade na elektrodinamskom principu (gdje je promjena ulančenja magnetskog toka između radnog i uzbuđenog namota uzrokovana njihovim međusobnim gibanjem), princip rada induktorskih generatora možemo nazvati ferodinamskim. Tu su radni namot i uzbuđni namot nepomični jedan u odnosu na drugog (obično oba smješteni na statoru, što omogućuje beskontaktnost⁽¹⁾ izvedbe u slučaju mirujućih stezaljki potrošača), a promjena ulančenja između namotâ slijedi kao posljedica vrtnje nazubljenog rotora, izrađenog od mekog feromagnetnog materijala, na kojem, u principu, ne mora biti smješten nikakav namot. Nazubljenost rotora predstavlja zapravo promjenu reluktancije zračnog raspora generatora, odakle (kod uzbuđenog stroja) slijedi promjena magnetske indukcije u zračnom rasporu duž oboda rotora. Ta promjena indukcije kod vrtnje rotora je uzrok induciranju napona u radnom namotu. Postoji opravdanje da i induktorske strojeve ubrojimo u klasične. Naime, osnovna ideja konstrukcije i princip njihova rada stari su skoro isto toliko kao i koncepcija običnog sinhronog stroja (istaknutih polova ili cilindričnog rotora). No, ipak treba imati na umu da su se neke značajne specifičnosti izvedbe induktorskih strojeva razvile znatno kasnije (njihov daljnji razvoj je donekle zakočen pojavom energetske elektronike).

Induktorske generatore možemo podijeliti na dvije osnovne vrste: istopolne (homopolarne) i raznopolne (heteropolarne).

I s t o p o l n i g e n e r a t o r je shematski prikazan na slici 1.⁽²⁾ Stator stroja se sastoji od dvije lamelirane jezgre a, povezane zajedničkim masivnim cilindričnim jarmom b. Te jezgre imaju utore, u kojima su smješteni radni namoti (namoti izmjenične struje) c međusobno vezani serijski ili paralelno. Uzbuđni namot (namot istosmjernje struje) d smješten je na

statoru koncentrično s osovinom stroja e. Može se smjestiti i na rotoru, ukoliko za to postoje razlozi. Istosmjerni magnetski tok se zatvara putem, koji je na slici 1 označen iscrtkanom-istočkanom linijom. Rotorske jezgre f istopolnog stroja mogu, ali ne moraju, biti lamelirane. One imaju široke otvorene utore, o čijem se obliku i broju u nastavku članka govori. Na slici je prikazan i prigušni namot g, koji se ovdje sastoji od širokih klinova, koji zatvaraju utore rotora, a kratko su vezani kolutima sa svake strane, te čine neku vrstu krletkastih namota.

Malene se jedinice pokatkad grade samo s jednim kompletom jezgara, gdje je samo jedan zračni raspored radni; drugi je oivičen glatkim površinama statora i rotora i nužan je iz čistokonstruktivnih razloga, te ga nastojimo napraviti što manjeg. Takav se generator može nazvati jednopaketnim istopolnim generatorom. Na slici 2 prikazana je izvedba istopolnog generatora s uzбудnim namotom a, smještenim na rotoru. Ovdje stator ima samo jednu jezgru b i jedan radni namot c, što u principu nije ništa novo u odnosu na izvedbu na slici 1.

Važno je napomenuti da kod istopolnih induktorskih strojeva ne smijemo omogućiti magnetskom toku da se zatvara kroz ležajne štitove, jer bismo time izgubili znatan dio korisnog toka, a ujedno bi ležajevi ubrzo stradali od ležajnih struja.

Unipolarni generatori istosmjerne struje podsjećaju u izvjesnom smislu na homopolarne induktorske strojeve. Sličnost se sastoji u tome što se armaturni vodič unipolarnog stroja giba uvijek u magnetskom polju istog smjera. No, ovdje postoji i jedna bitna različitost, a ta je da je to polje uvijek iste jakosti duž puta po kojem se giba armaturni vodič. Zbog te specifičnosti unipolarni istosmjerni strojevi imaju napon izlaza jednak naponu jednog zavoja, (odn. jednog vodiča) namota. To je glavni razlog što se ovi strojevi dosta rijetko upotrebljavaju. Pogodni su samo u slučajevima kad se traže velike istosmjerne (sasvim glatke, bez harmonika) struje i relativno mali naponi (ovi strojevi nemaju kolektora; imaju klizne prstenove s četkicama). Napredak u tehnici supravodljivosti potaknuo je zanimanje za ovom vrstom strojeva jer je omogućio postizanje vrlo jakih magnetskih polja uzбудnih svitaka (supravodljivih, bez željezne jezgre). Time je omogućeno dobivanje znatnijih iznosa induciranih napona

izlaznih stezaljki generatora, kao i gradnja generatorskih jedinica velike specifične iskoristivosti aktivnog volumena stroja. Unipolarne istosmjerne strojeve ostavljamo van okvira ovog napisa.

R a z n o p o l n i g e n e r a t o r je shematski prikazan na slici 3. Takvi generatori imaju samo jednu statorsku a i jednu rotorsku jezgru b. Na statoru ima više uzbudnih svitaka c, raspoređenih u utorima tako da dobijemo višepolno magnetsko polje u zračnom rasporu. Područje pod svakim polom možemo smatrati dionim istopolnim strojem. Put magnetskih silnica prikazan je na slici iscrtkanom-istočkanom linijom. Radni namot d je smješten u posebnim utorima ili pak u utorima s uzbudnim namotom. Rotor je izlijebljen na sličan način kao i kod istopolnog stroja, ali mora biti lameliran, jer se okreće u raznopolnom magnetskom polju. Prigušni sistem e obuhvaća tok svakog pola.

Lako je uočiti da kod induktorskih strojeva, za razliku od običnih sinhronih strojeva, srednja indukcija u zračnom rasporu, promatrajući dužinu dva polna koraka (luk između simetrala dvaju susjednih utora rotora), nije jednaka nuli, nego postoji jedna istosmjerna komponenta indukcije na koju je superponirana izmjenična komponenta. Ta je izmjenična komponenta jedina zanimljiva za induciranje napona u radnom namotu. Istosmjerna komponenta je posljedica međusobne nepomičnosti uzbudnog i radnog namota, ne sudjeluje u induciranju napona u radnom namotu i samo beskorisno opterećuje magnetske putove. Slično vrijedi i za induktorske strojeve s uzбудom pomoću permanentnih magneta umjesto uzbudnog namota.

I obični sinhroni strojevi, kako istaknutih polova tako i cilindričnog rotora, u skladu s ovdje formuliranim definicijama, u suštini su raznopolni (heteropolarni) strojevi. No, iz netom izloženog se vidi da induktorski raznopolni strojevi predstavljaju posebnost i po principu rada i po konstrukcijskoj koncepciji. Zbog toga termin 'induktorski' ne možemo izostaviti, ako želimo pobliže označiti vrstu stroja. Podsjetimo da u običnim sinhronim strojevima postoje osim elektrodinamskih također i ferodinamski efekti (u većoj ili manjoj mjeri), ali ovdje dakako kao nepoželjni i parazitski u vidu induciranja viših harmonika uslijed utorenja statora i rotora (utorski harmonici u na-

ponu generatora). Ti efekti su, međutim, u induktorskim strojevima iskorišteni kao osnovni princip na kojem se temelji funkcija induktorskih strojeva.

Izvjescna srodnost s induktorskim strojevima može se naći i kod reakcijskih (tj. reluktantnih) sinhronih strojeva, kod kojih se, kao što je poznato, koristi tzv. reakcijsko tj. reluktantno djelovanje, koje je posljedica promjene reluktancije zračnog raspora duž oboda rotora (poznato iz teorije običnih sinhronih strojeva istaknutih polova). Ovu vrst strojeva, kao i prije spomenute istosmjerne unipolarne, ostavljamo van okvira ovog napisa.

Negdje između običnih i induktorskih strojeva nalaze se strojevi s pandžastim rotorom; slika 4. Taj tip se razlikuje od običnog po tome, što polovi imaju jedan zajednički namot a, postavljen između dva rotorska diska b koji na sebi nose pandžaste istake (polove) c. Diskovi rotora, a prema tome i istaci, imaju raznoimeni polaritet. Istaci ulaze jedni među druge, te se na taj način postiže promjena polariteta duž oboda rotora kao i kod običnog sinhronog stroja. Uzbudni namot se okreće oko svoje osi, ali bi isto tako mogao i mirovati, a da se okreću samo feromagnetski dijelovi rotora (pandže i diskovi) - što nije teško polučiti. Mirujući uzbudni namot (uz mirujući radni namot) je, kako znamo, karakterističnost induktorskih strojeva; ipak po principu djelovanja ne mogu se ubrojiti u induktorske.

3. Nazubljenja i radni namoti induktorskih strojeva

Raspodjela magnetske indukcije duž oboda provrta induktorskog stroja određena je nazubljenjem statora i rotora. Proračun te raspodjele je prilično složen. Upotrebljavaju se uglavnom slijedeće metode proračuna magnetskih polja: komforno preslikavanje, numerički postupci pomoću elektroničkog računala, crtanje mreže silnica i ekvipotencijalnih ploha, odnosno grafoanalitički postupak baziran na približnoj slici magnetskog polja u zračnom rasporu uzimajući (prema R.Pohl-u) kružni luk i pravac kao jedine oblike magnetskih silnica. Većinom se smatra da se slika polja u smjeru osi stroja ne mijenja; to je dakako samo približno točno, jer postoji efekt krajeva paketa, a postoji i nejednakost duljina putova silnica oko uzbudnog namota, što se kod istopoli-nih strojeva odražava, naravno, kao nejednakost indukcija u aksijalnom smjeru stroja.

Osim analitičkih, numeričkih i grafičkih metoda istraživanja raspodjele polja u zračnom rasporu upotrebljavaju se i elektrolitske kupelji s modelima. Ta je metoda pogodna osobito u slučaju kompliciranih nazubljenja rotora i statora.

Na slici 5 je dan najjednostavniji primjer nazubljenja rotora, s utorskim korakom τ_r koji je jednak dvostrukom 'polnom' koraku. Lako je uočiti da je ovdje frekvencija f osnovnog člana u induciranoj EMS stroja

$$f = n \cdot N_r / 60 ; \quad (1)$$

gdje je n broj okretaja u minuti, N_r - broj utora na rotoru, odnosno broj pari 'polova' (ulogu polova za induciranje EMS u radnom namotu imaju ovdje, naime, zubi i utori rotora - svaki zub i svaki utor predstavlja po jedan 'pol'. Promatrajući samo frekvenciju osnovnog harmoničkog člana napona na stezaljkama radnog namota, možemo zamišljati da su ti polovi suprotnog polariteta).

Isto polni strojevi ne previsokih frekvencija obično imaju klasično nazubljenje statora i klasičan radni dvoslojni ili jednoslojni namot, kakve susrećemo i kod običnih sinhronih strojeva. Budući da je broj utora po polu i fazi obično malen, treba paziti da taj broj bude pravi razlomak sa što većim brojnikom, kako bi krivulja inducirane EMS u radnom namotu bila što bliža sinusoidi. Međutim, grade se strojevi i sa samo jednim utorom po polu i fazi, ukoliko se na oblik EMS ne postavljaju strogi zahtjevi. Skraćanjem koraka namatanja, kao i kod običnih strojeva, poboljšavamo oblik inducirane EMS. Isto se postiže i prikladnim skošenjem utora statora ili rotora.

Često je kod višefaznih strojeva nemoguće napraviti stator koji bi imao broj utora po polu i fazi veći ili jednak jedinici. Tada broj utora statora N_s i rotora N_r odabiremo tako, da zadovoljavaju jednadžbe:

$$N_s = m \cdot k_1 ; \quad (2)$$

$$N_r = m \cdot k_2 \pm 1 ; \quad (3)$$

k_1 i k_2 su cijeli pozitivni brojevi, m je broj faza. Broj utora rotora N_r predstavlja ujedno i broj pari 'polova' koji je uz zadanu frekvenciju i zadan broj okretaja potpuno određen izrazom (1), te se može desiti da iz jednadžbe (3) k_2 ne izlazi cio broj. Tada k_2 trebamo zaokružiti na najbliži cijeli broj,

svjesni toga, da uz fiksno zadani broj okretaja ne ćemo imati sasvim točnu, traženu frekvenciju. Ako odaberemo, na primjer $k_1 = 2 \cdot k_2$, onda je broj utora statora svega za 2 veći ili za 2 manji od dvostrukog broja utora rotora. Kod takva namatanja, naravno, nemamo velike mogućnosti biranja veličine skraćanja koraka namatanja u cilju smanjenja određenih viših harmonika u induciranoj EMS.

Radni se namot trofaznog generatora 300 Hz može, na primjer, uz 25 pari polova i 720 o/min smjestiti u 48 utora; slika 6. Tada je $k_2 = 8$, a $k_1 = 16$. Vidimo da taj namot nije više običan klasični trofazni namot. Izvode možemo, već prema veličini potrebnog napona, spojiti serijski ili paralelno. Umjesto spajanja u seriju dviju grupa svitaka (iste faze), koje su međusobno udaljene za 180° po obodu statorskog provrta, mogli smo namotati i tako da svaka faza ima samo jednu grupu svitaka. Naravno, tada bismo imali drugi faktor namota. Namatanje s više grupa svitaka, serijski vezanih u jednoj fazi, ima svojih prednosti. Naime, kod takva namatanja dolazi manje do izražaja eventualna nejednolikost širine zračnog raspora u induciranoj EMS. Kod paralelnog spajanja, međutim, mogu se pojaviti znatne struje izjednačenja u paralelnim granama. Te struje dodatno zagrijavaju namot.

Napomenimo još da kod istopolnih strojeva s dvije jezgre možemo neki od viših harmonika poništiti i međusobnim zakretanjem jezgara za odgovarajući kut (uvjet za to je, dakako, serijsko spajanje radnih namota dviju jezgri).

Utori statora induktorskih strojeva s klasičnim namotom obično su poluzatvoreni, kako bi se pulzacije toka zbog nazubljenosti statora svele na što manju mjeru. Budući da je uz to broj utora po polu i fazi kod ovih strojeva malen broj, rasipanja radnog namota su obično relativno veća nego kod običnih sinhronih strojeva.

R a z n o p o l n e s t r o j e v e možemo namotati po istom principu kao istopolne, držeći na umu da svaki pravi pol raznopolnog stroja predstavlja jedan dioni istopolni stroj, te da namote tih dionih strojeva treba međusobno spajati vodeći uvijek računa o smjeru magnetskih silnica u području svakog dionog stroja, tj. pravog pola.

S t r o j e v i i z r a z i t o v i s o k i h f r e k v e n c i j a (kako istopolni tako i raznopolni) ne mogu se namatati na opisane načine, jer bi zbog velikog broja polova morali imati vrlo velike promjere ili vrlo malene utor-ske korake, neekonomične s obzirom na punjenje utora. Zubi bi kod toga bili dugački i uski i u njima bi se trošilo mnogo amperzavoja za tjeranje magnetskog toka, što izbjegavamo kod induktorskih strojeva. Gubici u statorskim zubima mogu također postati preveliki. Zbog toga takve strojeve namatamo raznim 'originalnim' namotima koji su se razvili od klasičnih, a suština je njihova u tome da se pojedini utori uopće ne štancaju i na račun toga se postojeći utori mogu napraviti širi. Proširuju se na jednu ili na obje strane od simetrala otvora utora. EMS inducirana u svim vodičima u utoru jednaka je onoj koja bi se u njima inducirala kad bi svi bili smješteni točno u simetrali otvora utora. Neki strojevi s 'originalnim' tipovima namota, na statoru imaju osim utora za namote još i prikladno oblikovane prazne utore, koji zajedno s rotorskim sudjeluju u stvaranju potrebne raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu, koja se u tom slučaju i vremenski mijenja. Proračun raspodjele indukcije u zračnom rasporu kod takvih strojeva je nešto otežan. Sudjelovanje i rotorskog i statorskog nazubljenja u stvaranju pulzacija indukcije u zračnom rasporu zajednička je karakteristika takozvanih grebenastih nazubljenja. Grebenasta nazubljenja su vrlo prikladna za strojeve s najvišim frekvencijama. Primjer jednog jednostavnog grebenastog nazubljenja (kakvo je prvi put primijenila firma Westinghouse) dan je na slici 7. Na slici 8 prikazan je shematski jedan jednostavan raznopolni generator s grebenastim nazubljenjem. U detaljnija opisivanja raznih 'originalnih' namota i grebenastih nazubljenja ne ćemo ulaziti; detaljnije o tome možemo naći u L.1-6. Da bismo dobili sinusoidalni napon na stezaljkama radnog namota u praznom hodu i pod teretom, i kod grebenastih se nazubljenja radni namot može izvesti s odgovarajućim skraćanjem koraka namatanja. Takve namote neki nazivaju noniusnim. Primjer takva namota prikazan je na slici 9.

U duhu slike 8 mogu se izraditi strojevi sastavljeni od više parova nazubljenih rotorskih i statorskih jezgara naniza-

nih na osovinu, a radni namot i uzбудni namot se pri tom mogu postaviti koaksijalno s osovinom. Svi zavoji ovih namota, poput namotâ na slici 8, obuhvaćaju čitav glavni tok i registri-
raju njegovu promjenu. Međusobna dispozicija nazubljenja paro-
va jezgri mora biti dakako uvijek takva da se ukupno ulančenje
toka s uzbuđnim svitkom mijenja vrlo malo (po mogućnosti da se
ne mijenja) a ulančenje svakog radnog namota da se mijenja
znatno (zapravo - što je više moguće) - jer je to potrebno za
funkcioniranje stroja. Ti strojevi su pogodni za e k s t r e -
m n o visoke frekvencije.

Za prikaz proračuna oblika polja u zračnom rasporu za raz-
ne spomenute slučajeve nazubljenja, kao i za proračun ostalih
dijelova magnetskog kruga, nemamo ovdje prostora; o tome vidje-
ti u L.1-6. - U ovoj literaturi se mogu naći i **zanimljive**
specifičnosti o magnetskim krugovima i protjecanju radnih namo-
ta u smislu upozorenja na opasnost (po ležajeve) od aksijalne
komponente magnetiziranja kod nekih izvedbi, te načini otklanja-
nja spomenutih opasnosti, a posvećena je pažnja i načinu prora-
čuna uzbude pod teretom, te koncipiranju i dimenzioniranju pri-
gušnih namota itd.

4. Kriteriji dimenzioniranja

Mnogo prostora bi trebalo da pokušamo sasvim egzaktno i
argumentirano govoriti o kriterijima dimenzioniranja induktor-
skih strojeva, odnosno o ekonomskom razgraničenju primjene po-
jedinih koncepcija (različitih induktorskih, te običnih klasič-
nih i dr.). - Dajemo samo jedan dijagram (slika 10), na kojem se
vidi konstanta iskorištenja induktorskih strojeva u ovisnosti
o frekvenciji i brzini. Dijagram je rezultat našeg iskustva i
analiza, kao i podataka primljenih preko literature. Us-
poredbom iskorištenja iz ovog dijagrama s iskorištenjem npr.
raznih klasičnih elektrođinamskih izvedbi (s kojim podacima se
uglavnom ne oskudijeva) - može se zaključiti na ekonomsku gra-
nicu između promatranih koncepcija. Treba imati na umu da se
upotrebom ekstremno tankog lima (npr. 0,2 mm) za gradnju stator-
skih paketa induktorskih strojeva visokih frekvencija i speci-
jalnih pletenih bakrenih profiliranih užeta (od okrugle žice)
za izradu radnih namota, te primjenom specijalnih sistema hla-
đenja paketa - mogu postići i nešto bolja iskorištenja od ovdje
navedenih. Specijalizirani proizvođači induktorskih strojeva

postiću tu zavidne rezultate kontinuiranim razvojem i dotjerivanjima.

5. Specifičnosti primjene induktorskih i pandžastih generatora u ulozi izmjeničnih uzбудnika u uzbudnim sistemima krupnih sinhronih strojeva

S obzirom na specifičnosti koncepcija konstrukcije usmjerenih na rješavanje problema povišene frekvencije, odn. dispozicije namotâ i dijelova magnetskih krugova, te s obzirom na posebne zahtjeve u tehnologiji (često velika točnost štancanja nazubljenih zona statora i rotora, a i točnost zračnog raspora), kao i s obzirom na upotrebu specijalnih materijala (vrlo tanki lim malih gubitaka za jezgre, specijalni vodiči - pletena užeta s okruglom žicom - za radne namote), interes proizvođača velikih sinhronih strojeva (krupnih hidro- i turbogeneratora) teško bi se usmjerio na ovako specijalnu vrstu strojeva, kad ovi ne bi otvarali neke nove mogućnosti u rješenjima uzbudnih sistema velikih sinhronih strojeva, pogotovo beskontaktnih. Na slikama 11 i 12 dane su principne sheme nekih primjera upotrebe pandžastih i induktorskih generatora u ulozi osovinskih, tj. na zajedničku osovinu s glavnim strojem prigradenih uzбудnika, u cilju postizanja beskontaktnosti, i u cilju primjene kompaundacije uzbuđe uzbudnika uzbudnom strujom glavnog stroja, čime se postižu izvanredna dinamička svojstva uzbuđno-regulacijskih sistema.

Brojkama 1 i 4 je označena armatura i uzbuđni namot glavnog sinhronog stroja, 2 i 5 je armatura i uzbuđni namot uzbuđnika, 6 i 9 je intervencija regulatora. Pri upotrebi sheme na slici 11 najpogodnije je primijeniti pandžasti uzbuđnik konstrukcije, shematski prikazane na slici 13. Armaturni namot 2 uzbuđnika se vrti na osovinu g (tj. na rotoru a, b), a polovi-pandže (e, f) se nalaze na statoru (c, d) (invertirana uloga statora i rotora u odnosu na normalnu izvedbu prema slici 4). Uzbuđni namot 5' i 5" se vrti koncentrično s osovinom (5' služi za kompaundaciju, a 5" za samouzbuđu). Linija točka-crta prikazuje zatvaranje silnica magnetskog kruga (a je nemagnetski cilindar-glavina), h i i su izvodi uzbuđnih namota. Naravno da se kod sheme na slici 11 može primijeniti i induktorski (homo- ili heteropolarni) uzbuđnik s invertiranom ulogom rotora

i statera u odnosu na koncepcije prema slikama 1 i 3.

Na slici 12 se može primijeniti 'invertirani' homopolarni uzбудnik ili pak pandžasti uzбудnik prema slici 13; pri tom uzbudni namot 5" miruje.

Naravno da time nisu iscrpljene sve zanimljive mogućnosti primjene induktorskih i pandžastih strojeva u uzbudnim sistemima, kako u beskontaktnim tako i u kontaktnim (s kliznim kolutima i četkicama). Kod kontaktnih sistema se ovakvi uzbudnici koriste pretežno zbog potrebe za povišenim frekvencijama napajanja ispravljača, povezano s izbjegavanjem upotrebe istosmjernih kolektorskih uzbudnika što otklanja probleme komutacije kod većih snaga i brzina vrtnje.⁽³⁾

6. Pogovor

Ovim kratkim prikazom željeli smo pokazati dokle seže naše zanimanje za specijalnim rješenjima na jednom području elektrostrojarstva. Naravno da je mnogo zanimljivih rješenja i mogućnosti primjene ostalo netaknuto, no ako ovaj napis samo podsjeti na neke, donekle zanemarene, mogućnosti posebnih rješenja i ako potakne zanimanje za onim novitetima, koje suvremena tehnologija pruža, postignut je naš cilj.

Neki važni i značajni problemi u vezi s ovim strojevima samo su dotaknuti ili proizlaze iz fizikalne slike, a neki nisu mogli biti ni spomenuti (paralelni rad, rad induktorskih motora, prijelazne pojave, buka itd.), pa je čitalac upućen na literaturu.

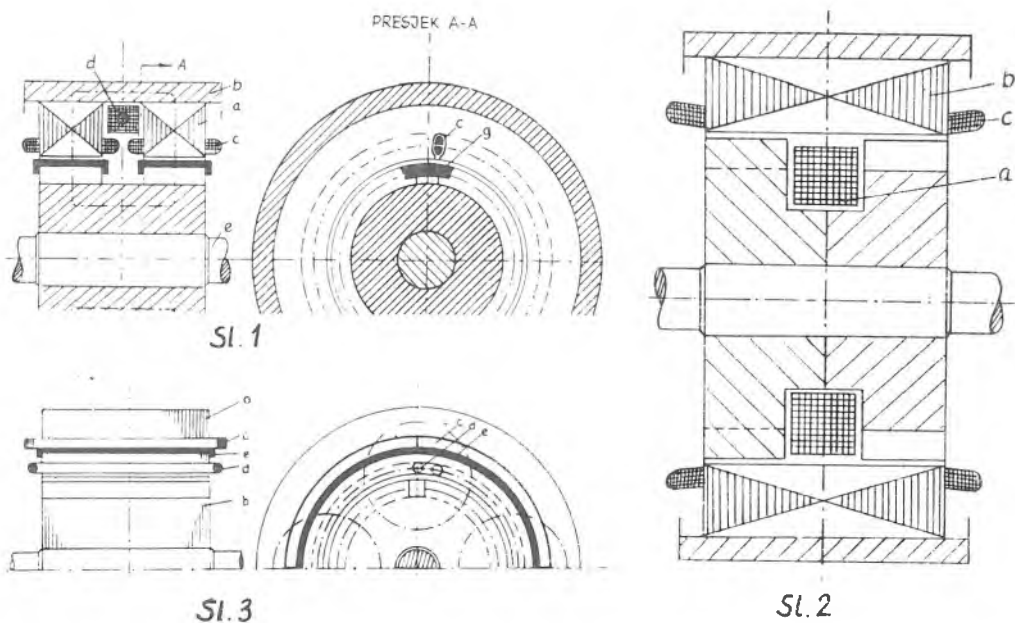
Opaske uz tekst:

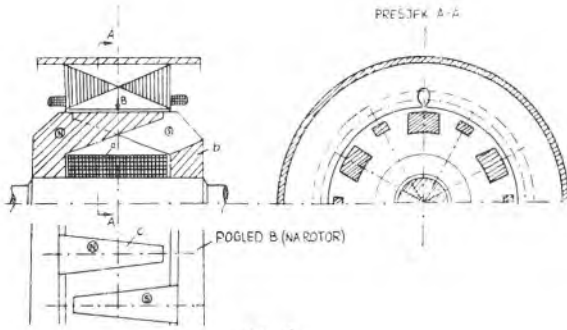
- (1) Beskontaktnost - odsustvo kliznih kontakata: četkica, kolektora i kliznih koluta.
- (2) Slike 1-9 su prenijete iz L.2.
- (3) Neke originalnosti u primjeni kompaundacije uzbuđivanja strujom uzbuđivanja glavnog stroja, vezane na primjenu specijalnih koncepcija konstrukcije uzbuđivanja, prijavili smo u svrhu patentne zaštite.

7. Literatura

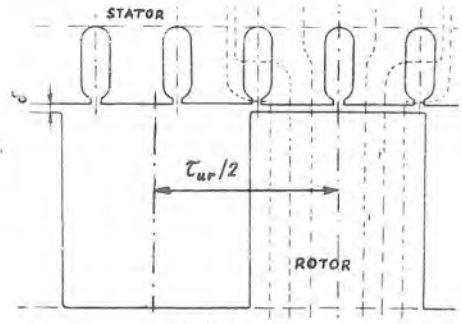
1. Doklady konferencii sozvannoj v 1957.g. v g. Durskhejme: Električeskie mašiny specijalnogo naznačenija. - Gosenergoizdat, 1960., Moskva - Lenjingrad.
2. Šaban J.: Induktorski generatori. - "Elektrotehnika" br.2, 1965., Zagreb.
3. Šaban J.: Jednofazni induktorski generator. - "Elektrotehnika" br.2, 1967., Zagreb.
4. Šarov V.S.: Elektromašinnye induktornye generatory. - Gosenergoizdat, 1961., Moskva - Lenjingrad.
5. Zbornici (I - X) radova niza autora latvijskog "Instituta energetike": Beskontaknye električeskie mašiny. - Izd. Akademii nauk Latvijskoj SSR, 1961+1971., Riga.
6. Žežerin R.P.: Induktornye generatory. - Gosenergoizdat, 1961., Moskva - Lenjingrad.

Prilog sa slikama (1 ÷ 13)

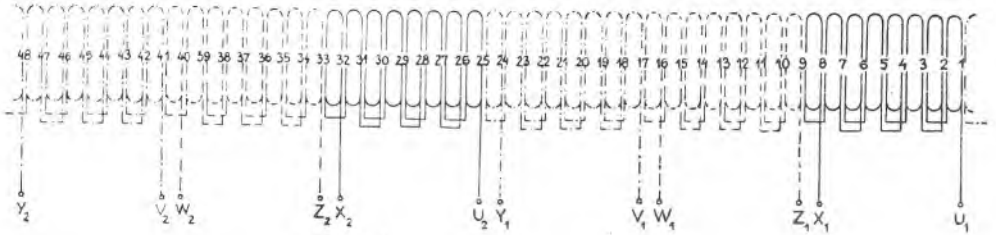




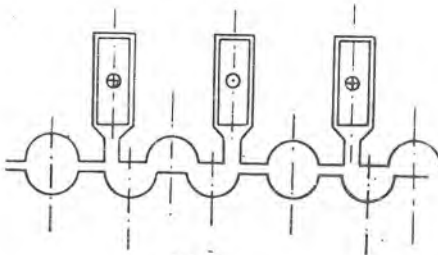
Sl.4



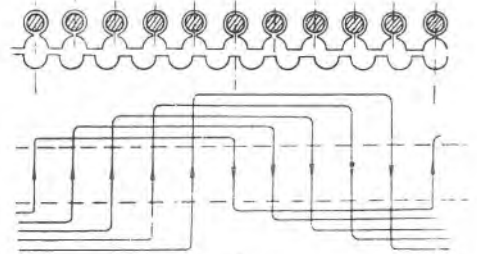
Sl.5



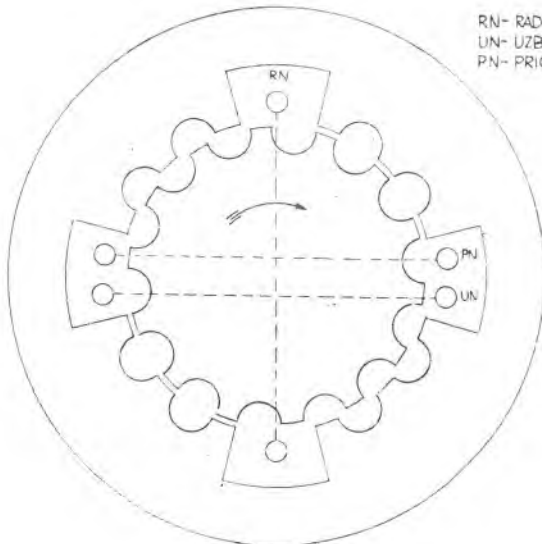
Sl.6



Sl.7

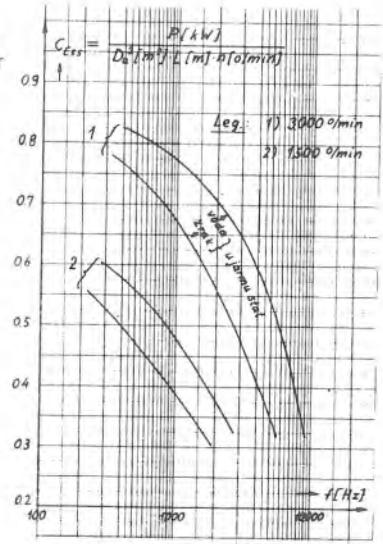


Sl.9

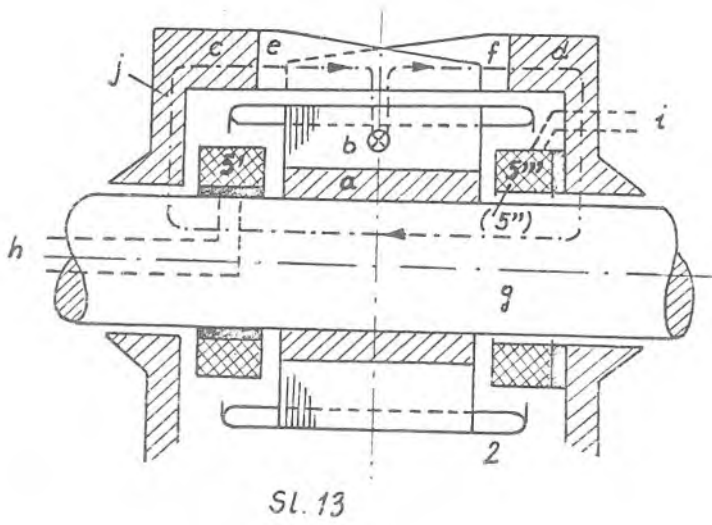
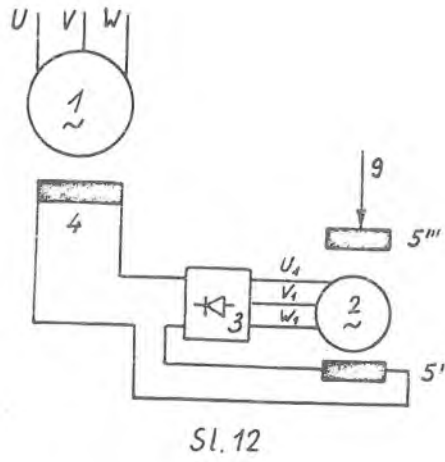
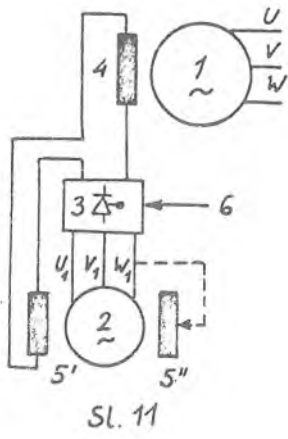


Sl.8

RN- RADNI NAMOT
UN- UZBUDNI NAMOT
PN- PRIGUSNI NAMOT



Sl.10



IV. Poglavlje

ENERGETSKA ELEKTRONIKA

Zvonko Benčić
Ivan Flegar
Antun Lisac
Stevo Mikac
Elektrotehnički institut
"Rade Končar" Zagreb

POLUVODIČKI PRETVARAČI - PROŠIRENJE MOGUĆNOSTI UPRAVLJANJA ISTOSMJERNIH ELEKTRIČNIH MOTORA

Razvoj poluvodičkih ventila - dioda, tranzistora i tirstora - otvorio je nove mogućnosti izgradnje pretvarača. U odnosu na klasična rješenja s vakuumskim i ionskim ventilima, pretvarači s poluvodičkim ventilima imaju bitno manju težinu i zapreminu kao i veću pouzdanost.

Prikazan je pregled razvoja pretvarača koji se koriste za upravljanja istosmjernih električkih strojeva. Pokušano je sagledati tendencije razvoja poluvodičkih pretvarača u neposrednoj budućnosti.

SEMICONDUCTOR CONVERTERS - EXPANSION OF DC MOTOR CONTROL

The development of semiconductor valves - diodes, transistors and thyristors - has provided new opportunities for converter design. In relation to conventional designs with vacuum and ionic valves, converters with semiconductor valves are of a considerably smaller weight and volume, and much more reliable. The development of converters used in DC electrical machine control is reviewed, and the anticipated trends in semiconductor converters outlined.

Uvod

Temeljne relacije koje određuju brzinu vrtnje n i moment M istosmjernog motora su:

$$n = f_1 \left(\frac{U_d}{\phi} \right)$$

$$M = f_2 (I_d \cdot \phi)$$

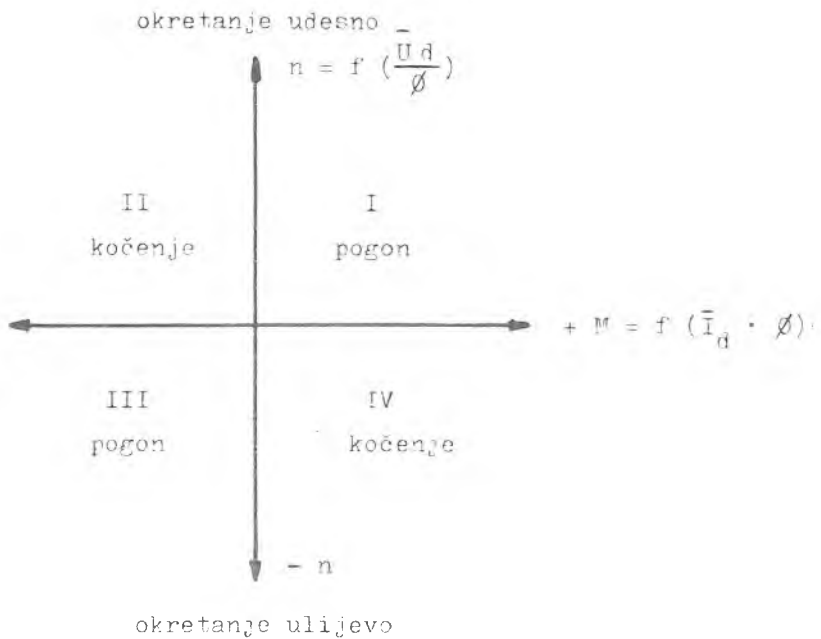
gdje je

U_d = napon armature,

I_d = struja armature,

ϕ = magnetski tok.

Gledano općenito elektromotorni pogon može zahtijevati vrtnju u jednom smjeru, vrtnju u oba smjera, te pogonski i kočni moment. Ove pogonske prilike pokazuje tablica I i ilustrira dijagram na slici 1.



Sl. 1. Pogonska stanja istosmjernog motora

Tablica I: Pogonska stanja istosmjernog motora i korespondentni zahtjevi na pretvarač

		pogon udesno		kočenje udesno		pogon ulijevo		kočenje ulijevo	
Zahtjevi pogona	n m	+		+		-		-	
		+		-		-		+	
Zahtjevi na polu- vodički pretvarač	$\bar{I}_d$	+	-	-	+	-	+	+	-
	$\bar{u}_d$	+	-	+	-	-	+	-	+
	ϕ	+	-	+	-	+	-	+	-

Za izgradnju reguliranih istosmjernih elektromotornih pogona potrebni su izvori promjenljivog istosmjernog napona - pretvarači. Sve do pojave živinih upravljivih ventila kao pretvarač je služio poznati Ward-Leonardov agregat. Između dva rata, pojavom upravljivih živinih ventila, Ward-Leonardov agregat je bio djelomično potisnut. Tek pojavom tiristora prevagnuli su u istosmjernim elektromotornim pogonima poluvodički pretvarači nad strojnim pretvaračima. Neke od osnovnih prednosti poluvodičkih pretvarača su: veći stupanj djelovanja, bolje regulacijske karakteristike te manja težina i volumen.

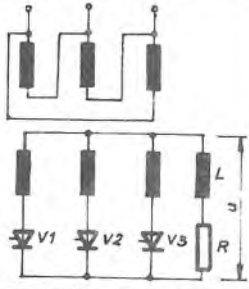
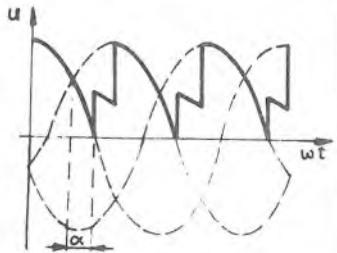
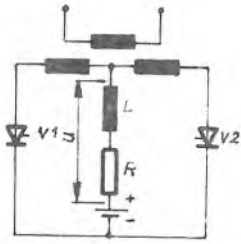
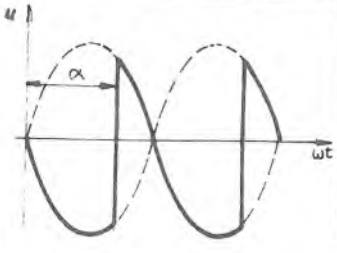
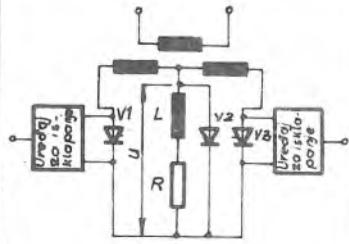
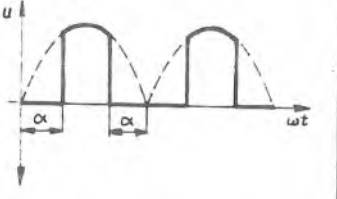
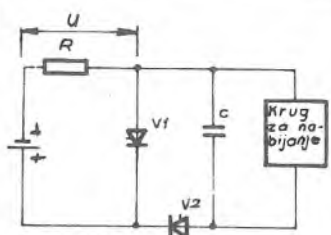
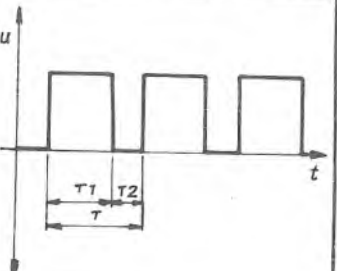
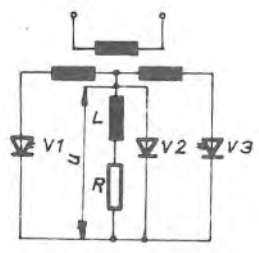
1. Razvoj pretvarača za napajanje istosmjernih motora

Tablica II prikazuje etape razvoja pretvarača koje su doprinijele i razvoju reguliranih istosmjernih elektromotornih pogona.

Prvu etapu razvoja pretvarača za napajanje reguliranih istosmjernih elektromotornih pogona omogućili su živini ventili s upravljačkom elektrodom. S upravljivim živinim ventilima bilo je moguće kontrolirati pretvorbu izmjeničnog napona u istosmjerni, tj. upravljati veličinom ispravljenog napona (Thomas, 1903).

Do prirodnog puta daljnjeg razvoja pretvarača došlo je odgovorom na pitanje: da li upravljivi ispravljač može raditi pri velikim kutevima upravljanja α kod kojih je ispravljeni napon negativan. Time je ostvaren drugi stupanj razvoja pretvarača

Tablica I: Etape razvoja pretvarača za napajanje istosmjernih motora

STU- PAN/ 847- 004	Naziv sklopa	Pronala- zač	Shema sklopa	Oblik napona
1	Uprav- ljivi isprav- ljač	Thomas, 1903.		
2	Mrežom vođeni izmje- njivač	Prince, 1925.		
3	Uprav- ljivi isprav- ljač koji radi s $\cos \varphi = 1$	Babat i Kazman 1937.		
4	Čoper	Tröger, 1936.		
5	Uprav- ljivi isprav- ljač s malim sadržaj- em vi- ših harmon.	Techni- sche Hochsch- ule in Wien, 1973.		

(Prince, 1925).

Ispravljači, koji rade s dubljom regulacijom napona, opterećuju mrežu s lošim faktorom snage. Izlaz iz ovih teškoća našli su već 1937. godine Babat i Kazman. Oni su predložili da se upravljivi ispravljači nadopune uređajem za prisilnu komutaciju. Kombinacijom regulacije napona zatezanjem prirodne komutacije s regulacijom napona metodom prisilne komutacije, moguće je realizirati ispravljač koji radi s $\cos \varphi = 1$. Dapače, moguće je opterećivati mrežu strujom koja prethodi naponu. Ovaj korak predstavlja treći stupanj razvoja pretvarača.

Primjena prisilne komutacije omogućuje i regulaciju istosmjernog napona sjeckanjem (čoper) (Tröger, 1936), što označujemo kao četvrti stupanj razvoja pretvarača za napajanje istosmjernih motora. Tako je otvoren put reguliranim elektromotornim pogonima napajanim iz istosmjernih izvora.

Iako su pretvarači trećeg i četvrtog stupnja razvoja razvijeni u doba živinih ispravljačkih ventila, oni nisu u to vrijeme našli širu primjenu. Sklop za prisilnu komutaciju (isklapanje) je to veći što je duže vrijeme oporavljanja. Ovo je razlog zašto su sklopovi s prisilnom komutacijom našli širu primjenu tek izumom tiristora, odnosno specijalnih brzih tiristora.

2. Tendencije razvoja pretvarača za napajanje istosmjernih motora

Promatramo li proces razvoja pretvarača, vidjet ćemo da bi idealni električki ventil bio onaj, koji bi mogao s dosta visokom frekvencijom ukapčati i iskapčati struju i preuzimati dovoljno visoki napon u zapornom, odn. blokiranom smjeru. Današnji tranzistori i tiristori su mnogo bliže ovom idealnom ventilu nego li su to bili tiratroni ili živini ventili.

Što danas od učinskih ventila imamo na raspolaganju, ilustrirat ćemo s nekoliko primjera. General Electric ima za područje frekvencija 60-400Hz tiristor izrazite strujne opteretivosti $I_F = 1900 \text{ A}$ i

$u_{RM}=2000V$, tiristor izrazite naponske opteretivosti $I_F=900A$ i $u_{RM}=2800V$ i tiristor izrazite učinske opteretivosti $I_F=1500A$ i $u_{RM}=2400V$. Švedska firma ASEA ima za elektromotorne pogone izvanredan tiristor $I_F=740A$ i $u_{RM}=1800V$. Westinghouse posjeduje brzi tiristor slijedećih podataka: $I_F=1000A$, $u_{RM}=1300V$ i $t_q=25\mu s$. Za malu električnu vuču (čoperi) japanska firma Mitsubishi je razvila tranzistor slijedećih podataka: $500V$, $200A$ i jediničnog pojačanja kod približno $5MHz$.

Tako povoljan razvoj učinskih poluvodičkih ventila doveo je do novih ideja u razvoju pretvarača izmjeničnog napona u istosmjerni, etapa 5. Na Visokoj tehničkoj školi u Beču razvijen je 1973.g. ispravljač s malim sadržajem viših harmoničkih članova, što možemo smatrati petim stupnjem razvoja. Ovaj ispravljač radi s $\cos \varphi = 1$, a eliminacija drugog harmonika u ispravljenom naponu vrši se podešavanjem kuteva α i β .

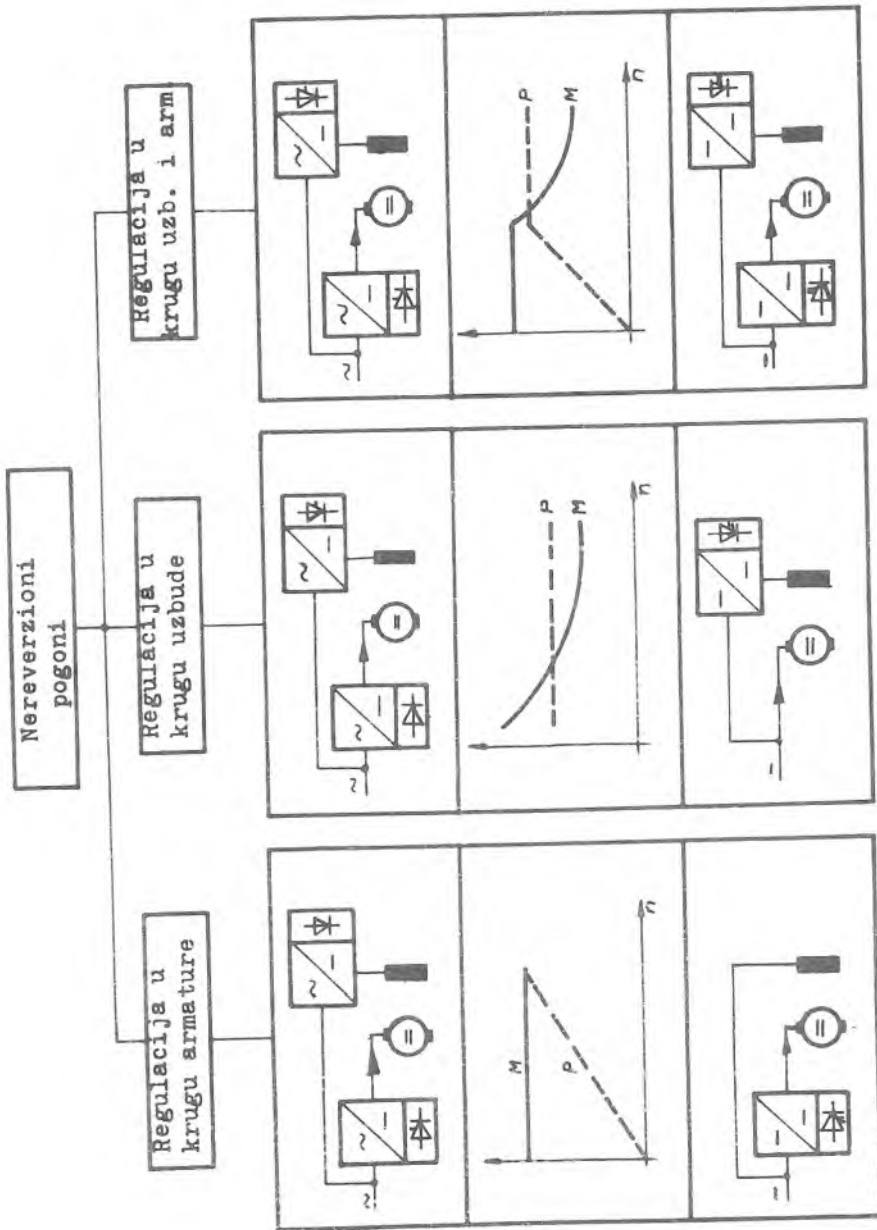
Daljnji napredak bit će sigurno potaknut razvojem učinskih tranzistora. Tako su primjerice tranzistorski čoperi počeli zamjenjivati tiristorske čopere u manjim ($20-30 kW$) elektromotornim pogonima, posebno tamo gdje se postavljaju oštri zahtjevi na težinu i volumen uređaja.

3. Pregled metoda upravljanja istosmjernim elektromotornim pogonima, te područja njihove primjene

Pregled metoda upravljanja daje tablica III. Motor se može napajati iz izvora istosmjernog ili izmjeničnog napona. Ovisno o zahtjevima na brzinu regulacije i/ili reverziranja, upravljanje se vrši u krugu armature ili u krugu uzbude.

Zahvaljujući elastičnosti istosmjernih motora na promjenu brzine vrtnje u širokom opsegu uz lako prilagođenje radnom mehanizmu, istosmjerni motori dominiraju u reguliranim elektromotornim pogonima. Evo nekih primjena:

- valjaonice (teški uvjeti rada, teska opterećenja, nagle promjene opterećenja): glavni i pomoćni pogoni, valjački stano-
vi,

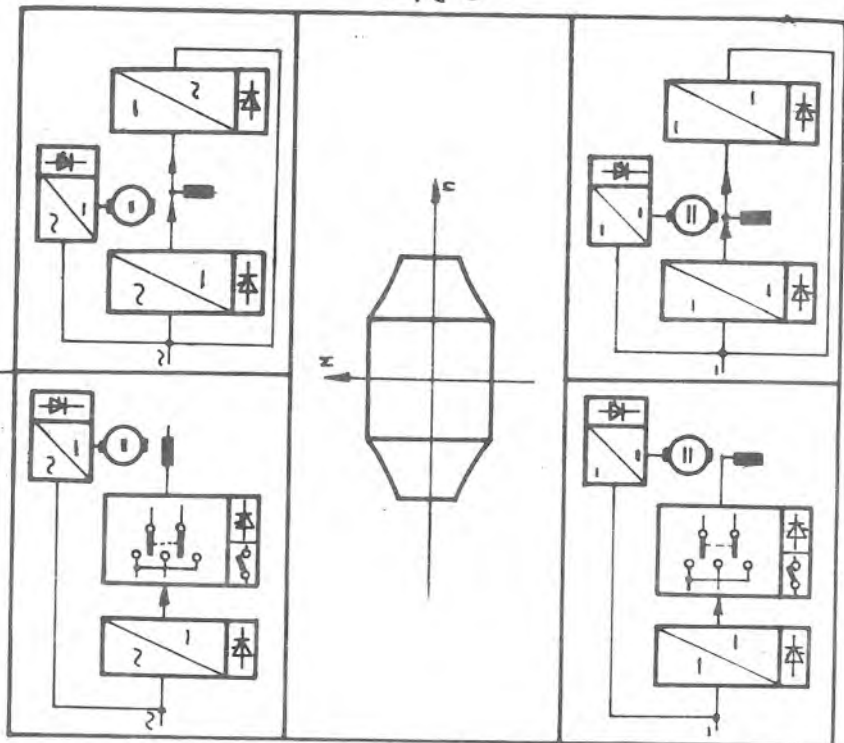
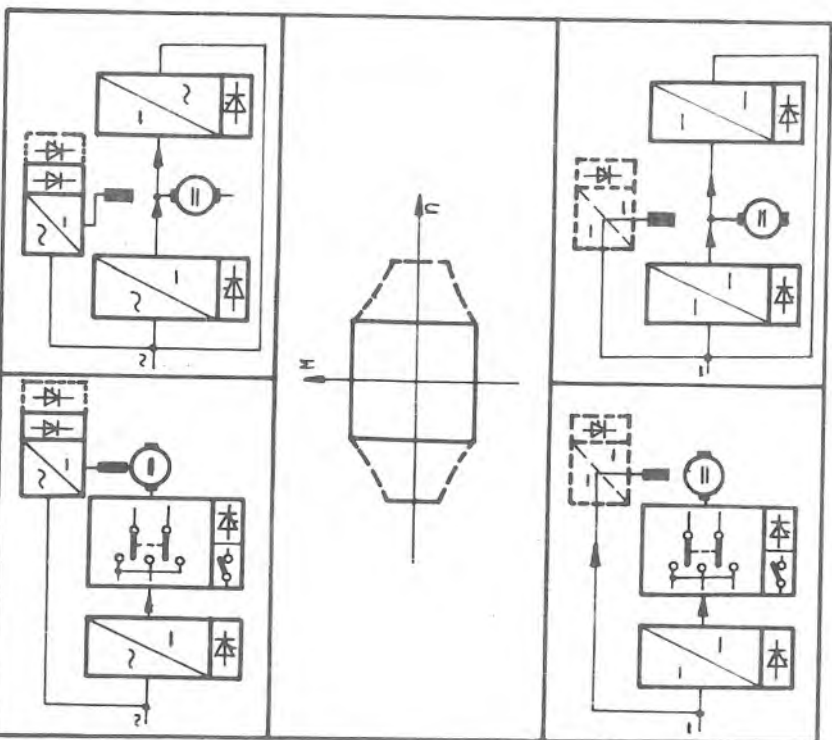


Tablica III/1 - Pregled mogućnosti upravljanja brzine vrtnje istosmjernih motora

Reverzioni pogoni

Reverziranje u krugu
uzbude

Reverziranje u krugu
armature



- tiskarska industrija (siroko područje brzine - 60:1),
- industrija papira ("jednoliko namatanje i odmatanje papira"),
- industrija gume i plastike (velika točnost: ekstruderi).

4. Neki problemi priključka pretvarača na izmjeničnu energetska mrežu

Posebne poteškoće priključka pretvarača na izmjeničnu energetska mrežu javljaju se kod mrežom komutiranih pretvarača (usmjerivača). Ovi problemi su danas naročito istaknuti jer se prelazi na sve veće i veće snage (megavati) i vjerojatno će potaknuti razvoj novih spojeva pretvarača. Ovo je razlog zašto te probleme ovdje iznosimo.

4.1. Usmjerivač kao element energetske mreže

Regulirani usmjerivač predstavlja za pojnu energetska mrežu nelinearni potrošač s varijabilnim faktorom snage.

Nelinearni karakter usmjerivača očituje se u nesinusoidalnoj struji koju usmjerivač uzima iz mreže. Na ovaj način generirani viši harmonički članovi u struji mreže:

- dodatno opterećuju izvore, prijenosna i rasklopna postrojenja u mreži,
- uzrokuju distorziju mrežnog napona,
- a kod stanovitih konfiguracija mreže mogu dovesti do rezonantnih pojava.

Varijabilnost faktora snage ima slijedeće posljedice:

- korisnik pogona plaća proizvođaču i distributeru električke energije dodatno naknadu za povećane gubitke prijenosa,
- potrebno je jače dimenzioniranje izvora, te prijenosnih i rasklopnih postrojenja u mreži,
- kod brzih promjena faktora snage (kočenje odnosno ubrzavanje u reverzionim pogonima) dolazi zbog udara jalove snage

do pojave supharmonika u naponu mreže.

4.2. Mjere za smanjenje viših harmonika u mreži

Smanjenje viših harmonika u mreži je moguće pomoću:

- serijskih rezonantnih filtera ugođenih na više harmonike struje u mreži,
- izborom snage kratkog spoja mreže na mjestu priključka usmjerivača ili
- izborom usmjerivačkog spoja.

Iznesimo samo to da su u Velikoj Britaniji donesene preporuke, tablica IV, o naponskom nivou na koji se preporuča priključiti usmjerivač. Uz pridržavanje ovih preporuka nije potrebno poduzeti posebne mjere za smanjivanje harmonika u mreži.

Tablica IV: Maksimalna dopuštena snaga usmjerivačkog sklopa

Napon mreže na mjestu priključka usmjerivača, V	Maksimalna dopuštena snaga usmjerivačkog sklopa, kVA	
	efektivni broj pulzacija	
	6	12
415	250	750
3300	300	900
6600	600	1800
11000	1000	3000
33000-66000	3000	7000
132000	-	14000

4.3. Mjere za poboljšanje faktora snage

Poboljšanje faktora snage je moguće kompenzacijom jalovine pomoću:

- fiksnih kondenzatorskih baterija,
- sinhronih kompenzatora,

- statički upravljivih kondenzatorskih baterija ili
- izborom usmjerivačkog spoja.

U EMP gdje su promjene tereta brze (a time i primjene jalove snage) supharmonički članovi u naponu mreže se mogu kompenzirati samo s uređajima čija je jalova snaga varijabilna. Faktor snage se može poboljšati prijelazom na druge pretvaračke spojeve. U nekim primjenama u vuči razvijeni su posebni usmjerivački spojevi s reguliranim faktorom snage (LUB).

5. Literatura

1. Ivner, S.: The influence of thyristor converters on supply networks, ASEA Journal 1971 : 2, pp 37-40.
2. Smith, I.R., Creighton, G.K.: Reactive-current compensation by switched capacitors, IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. IECI-22 N^o 1, February 1975, pp. 75-78.
3. Stretton-Downes, J.N.: Harmonic distortion and notching of the supply voltage by thyristor convertors, LSE Engineering Bulletin (GB) 1973, Vol 12, Part 4, pp. 12-18.
4. Zach, F.: Entwicklungsproblematik der modernen Leistungselektronik, E und M, Jahrgang 92, Heft 2, s. 79.
5. Förster, J.: "Löschbare Fahrzeugstromrichter zur Netzentlastung und -stützung", Elektrische Bahnen 1972, Heft 1, str. 13-19.
6. Förster J.: "Zur Stromrichter-Netzbelastung", Elektrotechnische Zeitschrift ETZ-A 1975, Heft 1, str. 52-57.

Zvonko Benčić
Ivan Flegar
Antun Lisac
Stevo Mikac

Elektrotehnički institut
"Rade Končar" Zagreb

POLUVODIČKI PRETVARAČI- PROŠIRENJE MOGUĆNOSTI UPRAVLJANJA IZMJENIČNIH ELEKTRIČNIH MOTORA

Mnogi spojevi pretvarača, koji se danas koriste za napajanje izmjeničnih električnih strojeva bili su poznati još u eri korištenja vakuumskih i ionskih ventila. No, do njihove intenzivnije primjene kao i do razvoja novih spojeva došlo je tek pronalaskom upravljivih poluvodičkih ventila - tranzistora i tiristora. Poluvodički ventili, s kratkim vremenom oporavljanja, otvorili su nove mogućnosti upravljanja izmjeničnim električkim strojevima (primjerice: frekvencijska regulacija).

Prikazan je pregled razvoja pretvarača koji se koriste za upravljanje izmjeničnih električnih strojeva. Pokušano je sagledati tendencije razvoja poluvodičkih pretvarača u neposrednoj budućnosti.

SEMICONDUCTOR CONVERTERS - EXPANSION OF AC MOTOR CONTROL

Many converter connections currently used for AC electrical machine supply were known as early as the time of vacuum and ionic valves. It was the discovery of controllable semiconductor valves - transistors and thyristors, that brought about their intensive application and the development of new connection types. Semiconductor valves with a short recovery time have opened up new opportunities for AC electrical machine control (e.g., frequency control).

The development of converters used in AC electrical machine control is reviewed. An attempt is made at perceiving the trends of semiconductor converter development in the near future.

Uvod

Principi upravljanja izmjeničnim motorima proizlaze iz fizikalnih principa njihovog rada. Postoje dva osnovna principa upravljanja brzinom vrtnje izmjeničnih motora: s promjenljivom frekvencijom napona napajanja i s promjenljivim klizanjem.

Prvi princip zasniva se na temeljnoj postavci izmjeničnih motora da okretno magnetsko polje u zračnom rasporu rotira brzinom vrtnje

$$n_s = \frac{60 f}{p},$$

gdje je

f = frekvencija napona napajanja

p = broj polova.

Kod sinhronih motora rotor motora se vrti brzinom n_s , a kod asinhronih motora nešto nižom brzinom (klizanje). Dakle, mijenjanjem frekvencije napona napajanja mijenjamo brzinu vrtnje motora.

Drugi princip mijenjanja brzine vrtnje primjenljiv je samo kod asinhronih motora i zasniva se na činjenici da moment motora ovisi o veličini narinutog napona i o veličini rotorskog otpora

$$M \approx \frac{K \cdot U^2 \cdot s}{R_2'},$$

gdje je

K = konstanta

U = efektivna vrijednost napona statora

s = klizanje

R_2' = rotorski otpor.

Proporcionalno smanjenju brzine vrtnje motora povećavaju se gubici u rotorskom krugu

$$P_g = P_m \frac{s}{1-s},$$

gdje je

P_m = mehanička snaga na osovini motora

s = klizanje

1. U ČEMU JE PROŠIRENJE MOGUĆNOSTI UPRAVLJANJA

Na osnovi ova dva principa zasnivaju se različite varijante upravljanja brzinom vrtnje izmjeničnih motora. Prikaz tih mogućnosti daje slika 1. U prvom redu tiristorski izmjenjivači su poboljšali klasične načine regulacije; primjerice, podsinhrona kaskada omogućuje mijenjanje klizanja motora bez znatnijih gubitaka u rotorskom krugu. No, tiristorski izmjenjivači s prisilnom komutacijom su omogućili frekvencijsku regulaciju izmjeničnih motora, što je predstavljalo novu kvalitetu u reguliranim izmjeničnim elektromotornim pogonima.

Vidimo da su poluvodički pretvarači otvorili nove mogućnosti upravljanja izmjeničnim motorima.

2. RAZVOJ PRETVARAČA ZA NAPAJANJE IZMJENIČNIH MOTORA

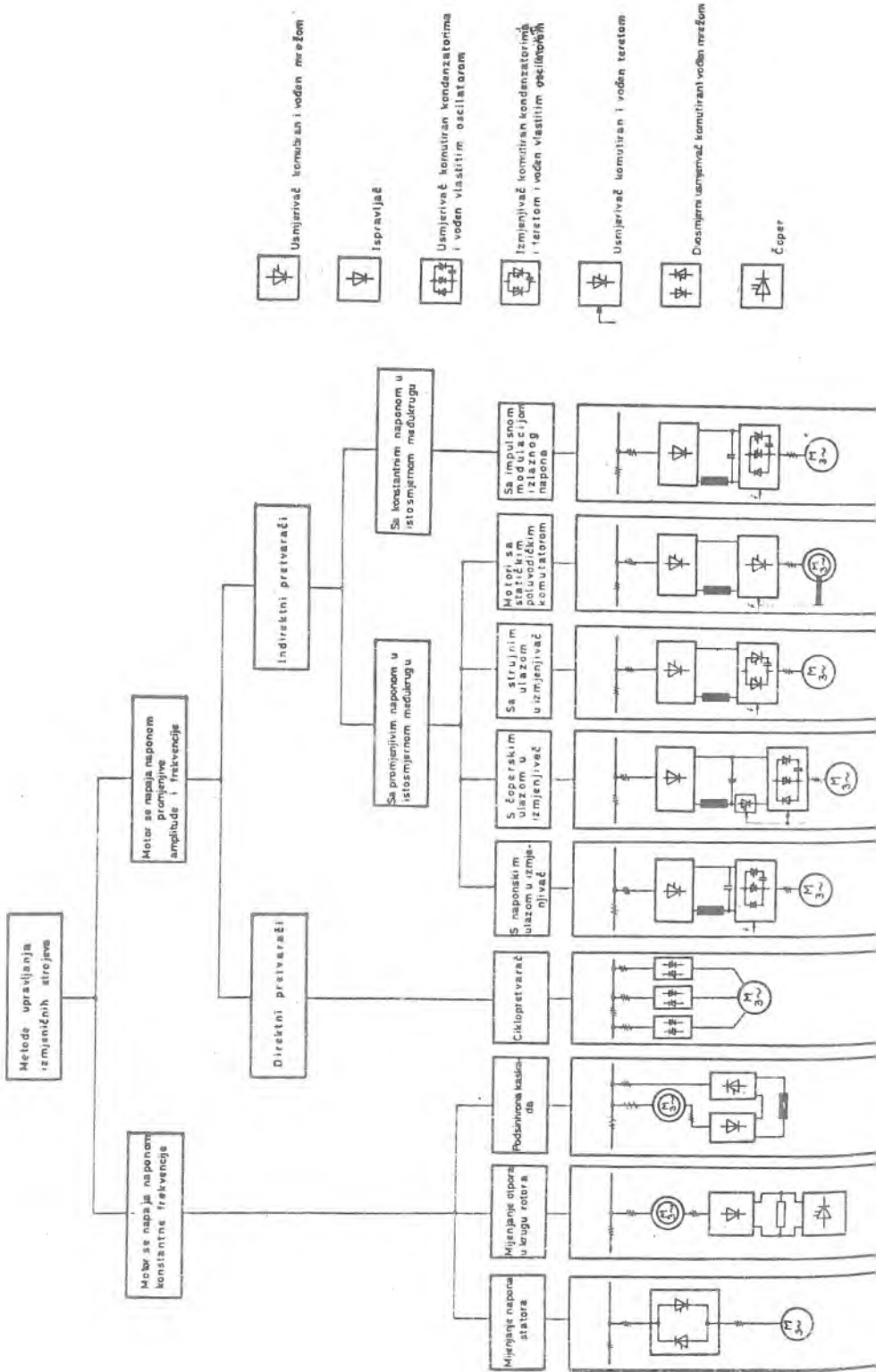
Problem pretvorbe energetskeg sistema jedne frekvencije u sistem neke druge frekvencije moguće je općenito riješiti samo pretvaračima s istosmjernim međukrugom, tj. izmjenični napon treba najprije ispraviti, a zatim pomoću izmjenjivača s vlastitim vođenjem pretvoriti opet u izmjenični. Izmjenjivače s vlastitim vođenjem moguće je realizirati samo primjenom prisilne komutacije. Metoda prisilne komutacije, čija primjena datira iz 1920. g, otvorila je put prema novim, revolucionarnim načinima pretvorbe jednog energetskeg sistema u drugi.

Slika 2. prikazuje etape razvoja izmjenjivača na principu prisilne komutacije.

Era izmjenjivača s prisilnom komutacijom započela je 1920. g. kada su Alexanderson i Prince u SAD objavili tzv. paralelni izmjenjivač, etapa 1. U ovom izmjenjivaču dva tiratrona naizmjenice gase jedan drugog spajanjem nabijenog kondenzatora paralelno onom tiratronu koji je do tog trenutka vodio struju.

Do prirodnog puta daljnjeg razvoja izmjenjivača došlo je odgovorom na pitanje: što treba poduzeti da bi izmjenjivač Alexan-

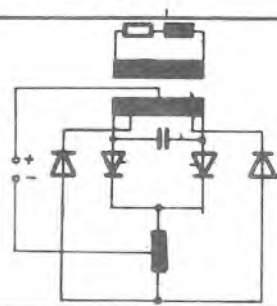
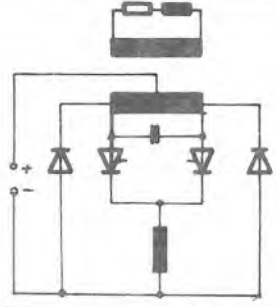
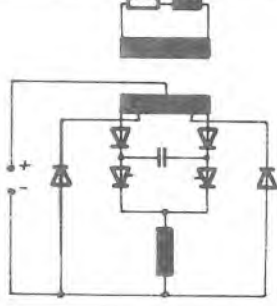
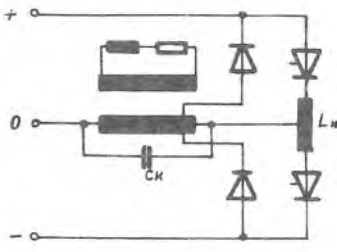
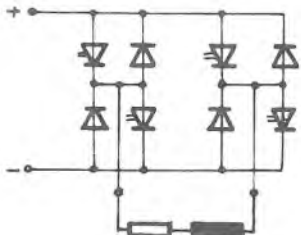
Slika 1. PREGLED MOGUĆNOSTI UPRAVLJANJA BRZINE VRTNJE IZMJENIČNIH MOTORA POMOĆU PRETVARAČA



Slika 2. Etapa razvoja izmjenjivača s prisilnom komutacijom

	STUPANJ RAZVOJA	Naziv sklopa	Pronalazač	Shema sklopa
Era tiratrona Era živinih ventila	1	Paralelni izmjenjivač	Alexander-son, 1923. Prince, 1928.	
	2	Paralelni izmjenjivač s povratnim diodama	Peterson, 1932.	
	3a		1932.	
	3b		1932.	
	7		Tröger, 1936.	

Slika 2. Etape razvoja izmjenjivača s prisilnom komutacijom
(nastavak).

	Naziv sklopa	Pronalazac	Shema sklopa
Era živinskih ventila	4	Tröger, 1936.	
	5	Bedford - McMurray, 1961.	
	6	Bedford - McMurray, 1961.	
	8a		
	8b		

derson-a i Prince-a mogao raditi kod induktivnih opterećenja. 1932. Peterson po prvi puta spominje tzv. povratne diode koje omogućuju izmjenjivaču napajanje ili induktivnih ili kapacitivnih potrošača, etapa 2. Ovaj izmjenjivač nema komutacijskog kondenzatora. Komutacija upravljivih ventila se vrši dodavanjem izmjeničnog napona u seriju s istosmjernim izvorom. Time se približilo pomisli da se izmjenjivaču Alexanderson-a i Prince-a dodaju povratne diode, no jednostavno dodavanje **povratnih dioda nije uspješno** jer bi se komutacijski kondenzator trenutno izbio. Zbog toga je **trebalo** uvesti novi element - tzv. komutacijsku prigušnicu, etapa 3. Posebice je pogodna shema (b), u kojoj komutacijska prigušnica ima srednji izvod, jer se komutacija struje između upravljivog ventila i diode odigrava praktički trenutno.

Daljnjem poboljšavanju sheme doprinio je Tröger 1938. g. (etapa 4). On je spojio povratne diode na otcjepe transformatora. Time je smanjio kružnu struju koja se razvija u krugu komutacijske prigušnice i povratnih dioda.

1961.g. Bedford i McMurray objavili su izmjenjivač s tiristorima, koji je sličan Tröger-ovom izmjenjivaču sa živinim ventilima, etapa 5. Uvođenjem tzv. blokirnih dioda, etapa 6, koje **sprečavaju** izbijanje komutacijskog kondenzatora preko transformatora, postigla se neovisnost napona komutacije o uvjetima opterećenja.

Prvi korak prema upravljivim izmjenjivačima glede napona i frekvencije učinio je Tröger 1936. (etapa 7). Umjesto jednog komutacijskog kruga za dva ventila ovdje svaki ventil ima svoj komutacijski krug. Tako se trenutak uklanjanja i isklapanja svakog ventila može **birati po volji**.

Iako su svi sklopovi osim Bedford-McMurray-evog razvijeni u doba tiratrona i živinih ventila, oni nisu u to vrijeme našli širu primjenu. Sklop za prisilnu komutaciju je to veći što je duže vrijeme oporavljanja. Zbog **ovog razloga** su sklopovi s prisilnom komutacijom našli širu primjenu tek izumom tiristora, odnosno speci-

jalnih brzih tiristora. Danas Tröger-ov i Bedford-McMurray-ev princip izmjenjivača imaju veliki značaj. Na osnovu ovih izmjenjivača sintetizirani su mnogi složeniji izmjenjivači, etapa 8.

3. PODRUČJA PRIMJENE TIRISTORSKI UPRAVLJANIH IZMJENIČNIH ELEKTROMOTORNIM POGONA

U reguliranim izmjeničnim elektromotornim pogonima dolaze do punog izražaja sve prednosti izmjeničnih motora, ali to zahtijeva složenije pretvarače, kao i regulacijske krugove, a time i složeniji cijeli elektromotorni pogon. Prema tome postavlja se pitanje kada i gdje primijeniti izmjenični elektromotorni pogon umjesto istosmjernog.

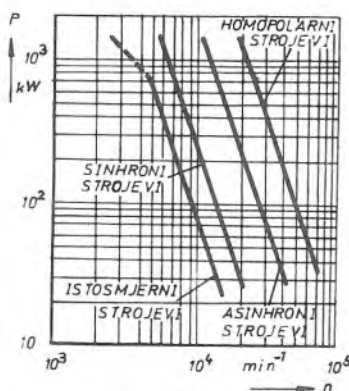
Izmjenični elektromotorni pogon primijenit ćemo, naravno, tamo gdje su nam neophodne prednosti izmjeničnog motora naspram istosmjernog, te gdje nam je izmjenični elektromotorni pogon jeftiniji od istosmjernog istih karakteristika. Glavne prednosti izmjeničnih motora naspram istosmjernih su:

- male potrebe za održavanjem,
- veće granične snage,
- mogućnost većeg broja okretaja,
- lakša realizacija eksplozione zaštite,
- manje zamašne mase,
- manja težina po jedinici snage i
- apsolutni sinhroni rad više motora.

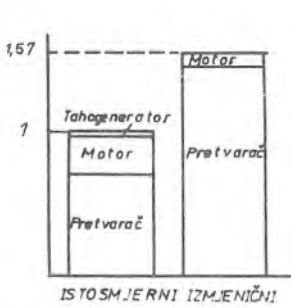
U mnogim područjima primjene reguliranih elektromotornih pogona ove prednosti izmjeničnih motora su neophodne, tablica 1.

Znatnija složenost izmjeničnih elektromotornih pogona upućuje nas na činjenicu da su oni znatno skuplji. Međutim, to uvijek nije točno, npr. kod višemotornih pogona ili kod motora u eksploziornoj zaštiti. Slika 3. daje usporedbu cijena izmjeničnog i istosmjernog pogona istih karakteristika za različite uvjete.

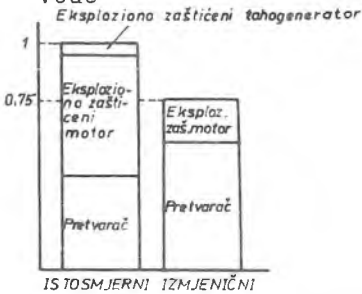
Tablica 1. Prednosti izmjeničnih motora pred istosmjernima koje su značajne za regulirane elektromotorne pogone

PREDNOST	PODRUČJE PRIMJENE
Male potrebe za održavanje	U primjenama gdje motor treba biti smješten na tesko ili potpuno nepristupačnom mjestu (primarni krug reaktora).
Veće granične snage	Granične snage zrakom hlađenih električnih strojeva u ovisnosti o broju okretaja  Rotacione peći cementara, valjaoničke pruge i ostali teški elektromotorni pogoni.
Mogućnost većeg broja okretaja	Alatni strojevi, brzohodni alatni strojevi, centrifuge.
Lakša realizacija eksploziona zaštite	Kemijska industrija, rudarstvo.
Manje zamašne mase	Pogoni s dobrim dinamičkim svojstvima.
Manja težina po jediničnoj snazi	Vuča, brodovi i u onim slučajevima gdje su ograničeni gabariti i težina stroja.
Apsolutni sinhroni rad više strojeva	Tekstilna industrija, industrija papira.

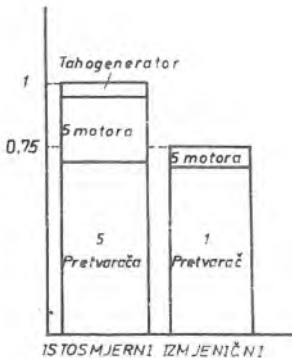
Slika 3. Usporedba cijena izmjeničnih i istosmjernih elektromotornih pogona za različite uvjete



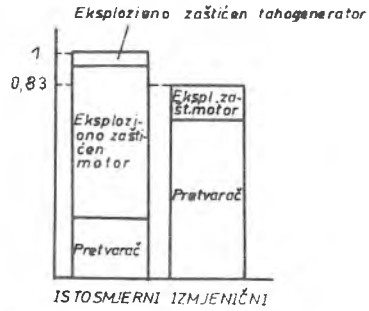
- a) Jednomotorni nereverzioni pogon 50 KS, 1750 o/min, motor zaštićen od kapajuće vode



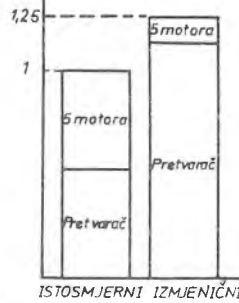
- c) Jednomotorni reverzioni pogon 50 KS, 850 o/min, motor eksploziona zaštićen



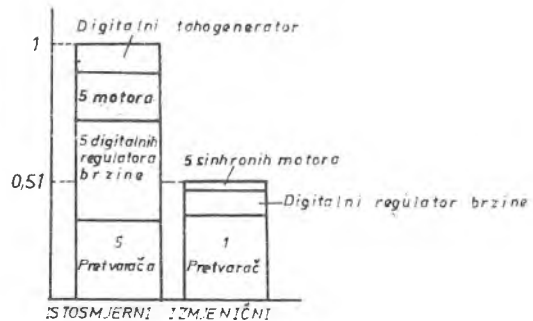
- e) Pogon sa 5 motora po 10 KS, područje regulacije brzine vrtnje 10:1, odstupanje brzine 10:1, zahtijeva se apsolutni sin-vrtnje između pojedinih motora hroni rad svih motora 5%



- b) Jednomotorni nereverzioni pogon 50 KS, 850 o/min, motor eksploziona zaštićen



- d) Pogon s. pet motora po 10 KS, područje regulacije brzine vrtnje 4:1, odstupanje brzine vrtnje između pojedinih motora 10%



- f) Pogon s. pet motora po 10 KS, područje regulacije brzine vrtnje 4:1, odstupanje brzine vrtnje između pojedinih motora hroni rad svih motora 5%

4. TENDENCIJE RAZVOJA PRETVARAČA ZA NAPAJANJE IZMJENIČNIH MOTORA

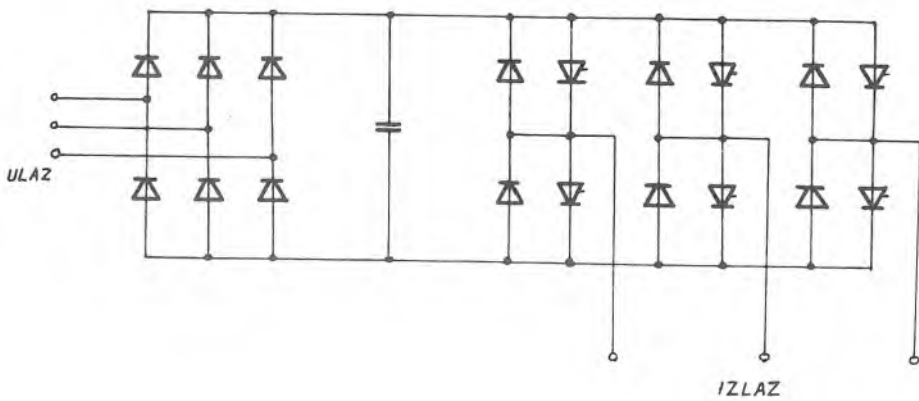
U vrijeme kada učinski poluvodički ventili - diode, tranzistori i tiristori nisu bili poznati, promjena frekvencije mogla se vršiti praktički samo strojnim pretvaračima, što je iziskivalo upotrebu grupe od nekoliko strojeva, a time instaliranu snagu nekoliko puta veću od snage pogonskog stroja. Dakle, takovi pretvarači su bili vrlo skupi i neekonomični, pa su u to vrijeme izmjenični elektromotorni pogoni nalazili svoju primjenu samo u nekim specifičnim i perifernim područjima gdje se istosmjerni motor ni u kom slučaju nije mogao upotrijebiti.

Promatramo li razvoj izmjenjivača od prve do osme etape, to vidimo da se tek pojavom poluvodičkih ventila - dioda i tiristora - dobila mogućnost objedinjavanja visoke kvalitete podesavanja s pogonskim i ekonomskim prednostima izmjeničnih motora.

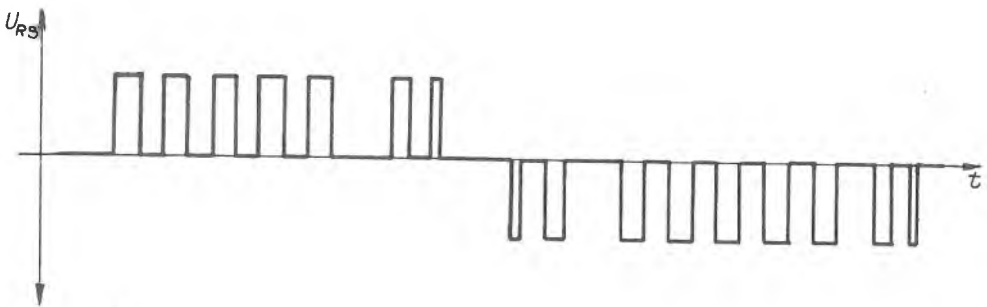
Pojavom dinamičkih tiristora u zadnjih nekoliko godina dobili su na važnosti izmjenjivači s tzv. širinsko impulsnim upravljanjem. Kod ovih pretvarača, slika 4, valni oblik izlaznog napona je slijed impulsa konstantne amplitude čiji polaritet se mijenja u skladu s frekvencijom motora, slika 5. Vrijednost izlaznog napona se podešava u ovisnosti o frekvenciji s upravljanjem širine impulsa. Odbiranjem broja impulsa i širine impulsa moguće je eliminirati neželjene harmonike iz struje motora. Ovakovi pretvarači znatno su poboljšali karakteristike izmjeničnih elektromotornih pogona (npr. bolje iskorištenje motora, stabilniji rad kod nižih frekvencija).

Pojavom učinskih tranzistora u posljednje vrijeme ostvareni su neki manji izmjenični elektromotorni pogoni (granična snaga: 15-20 kW) s tranzistorskim pretvaračima. Rješenja pretvarača su u načelu jeftinija i imaju manju težinu jer nisu potrebni komutacijski krugovi. No, vrijeme tranzistorskih pretvarača moglo bi tek doći, što ovisi o napretku tehnologije tranzistora.

Analizirajući etape razvoja vidjeli smo da su poluvodički ventili doveli do nove dimenzije u slobodi izbora shema izmjenjivača. Kakve ventile imamo danas na raspolaganju i što ćemo imati u neposrednoj budućnosti?



Slika 4. Principijelna shema pretvarača sa impulsnom modulacijom izlaznog napona



Slika 5. Valni oblik izlaznog napona pretvarača na slici 4.

Što danas od upravljivih poluvodičkih ventila imamo na raspolaganju, ilustrirat ćemo s nekoliko primjera. International Rectifier ima brzi tiristor sljedećih podataka: $I_F = 758$ A, $u_{RM} = 1200$ V i $t_q = 30$ μ s. Tako dobre dinamičke karakteristike postignute s novom konstrukcijom gelta, tzv. "divergence gate" (omski priključak gelta obuhvaća poput paukove mreže cijelu površinu emitorskog p-n prijelaza). General Electric ima za područje viših frekvencija nekoliko zaista impresivnih tiristora: za 10 kHz tiristor $I_F = 700$ A i $u_{RM} = 600$ V, a za 3 kHz tiristor

$I_F = 1250$ A i $U_{RM} = 1400$ V. Firma Mitsubishi je razvila tranzistor 500 V, 200 A i jediničnog pojačanja kod približno 5 MHz.

Daljnjem usavršavanju izmjenjivača sigurno bi mogli doprinjeti tiristori koji bi se mogli uklopiti i isklopiti strujnim impulsom na geitu. Geitom uklopivi i isklopivi tiristori već danas postoje u laboratoriju (Kao i Brewster, 1973; Storm i Clair, 1974). Neki proračuni pokazuju, da bi se zamjenom konvencionalnih tiristora, s danas postojećim laboratorijskim geitom, isklopivim tiristorima kod trofaznog izmjenjivača 200 kVA i 400 Hz dobilo slijedeće: gubici praznog hoda bi pali za 90 %, gubici pri nazivnom opterećenju za 50%, volumen i težina za 20%, dok bi cijena energetske elektronike pala za 30%.

LITERATURA

1. Andrienko P.D., Bogatyrev V.P., Rogovoj V.I., Epstein I.I.:
"Sostojanie i perspektivy razvitiya invertornykh pereobrazovatel'nei častoty dlja elektroprivoda"
Naučno-tehničeskaja konferencija po avtomatizirovannomu elektroprivodu", SSSR, 1976.
2. Dolenc A.: "Asinhroni strojevi" Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1967.
3. Eder E.: "Stromrichter zur Drehzalsteuerung von Drehfeldmaschinen", SIEMENS Aktiengesellschaft, Berlin und München 1975.
4. Jurković B.: "Elektromotorni pogoni", Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1968.
5. Yao Y.C., Brewster J.B.: "Recent development in gate controlled switches", IEEE Power Electronic Specialist Confer. 11-13 June 1973, Pasadena, USA,

6. Kaye, D.N.: ICs and transistors provide brain and muscles for motor control", Electronic Design 21, October 11, 1974.
7. King K.G. "Variable Frequency Thyristor Invertors for Induction Motor Speed Control", Direct current, February 1965, str. 26-35.
8. Penkowski, L.J., Pruzinsky K.E.: "Fundamentals of a Pulsewidth Modulated Power Circuit", IEEE Transactions on Industry Applications Vol. IA-8, No. 5. 1972.
9. Pollack J.J.: "Some Guidelines for the Applications of Adjustable - Speed AC Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-9, No. 6, 1973. str. 704-710.
10. Schnörr R.: "Der Drehstrommotor mit Umrichterspeisung", VDE Fachberichte 23. Band 1964. str. 225-237.

Stjepan Čunko, dipl.inž.

Elektrotehnički institut
poduzeća "Rade Končar"

Zagreb

OSOBITOSTI U ISTOSMJERNOM STROJU NAPAŽANOM IZ POLUVODIČKIH PRETVARAČA

Suvremeni elektromotorni pogoni s istosmjernim strojevima koriste za napajanje poluvodičke pretvarače /dioda, tiristor, čoper/ koji imaju znatnu valovitost ispravljenog napona. Posljedica valovitog napona je valovita struja napajanja, koja izaziva dodatne poteškoće u pogledu kvalitete komutacije i povećanog zagrijavanja stroja. U referatu su obrađeni uobičajeni spojevi poluvodičkih pretvarača koji se primjenjuju za napajanje istosmjernih strojeva s osvrtom na posljedice valovitog napajanja na karakteristike i konstrukciju stroja. Za ilustraciju opisanih pojava dani su usporedni rezultati ispitivanja zagrijavanja i komutacije jednog istosmjernog motora uz istosmjerno i valovito napajanje.

PECULIARITIES IN THE DC MACHINE FED BY A SEMI - CONDUCTOR INVERTER

Contemporary DC electric drives are fed by semiconductor inverters /diodes, thyristors, choppers/ which have substantial ripple content in the DC voltage. The consequence of the ripples in the supply voltage are ripples in the supply current, which cause additional difficulties in commutation and additional heating of the machine. The paper deals with the usual connections of semiconductor inverters which are used for supplying of DC machines, with regard to the effect of ripples to the characteristics and desing of the machine. The results of tests of commutation and heating for one machine fed by smooth DC voltage and also by voltage with some ripple content are compared for the illustration purpose.

1. Poluvodički pretvarači za napajanje istosmjernih motora

Brzi razvoj tehnologije proizvodnje poluvodičkih elemenata unatrag nekoliko godina uvjetovao je njihov prodor u mnoge grane tehnike pa tako i u područje elektromotornih pogona. Danas sklopovi s poluvodičkim elementima svojom cijenom i karakteristikama naglo istiskuju klasična rješenja napajanja motora.

Prednosti poluvodičkih pretvarača pred ostalim rješenjima su:

- mali zahtjevi pri održavanju u pogonu /poluvodički elementi su praktički vječni/,
- veća korisnost cijelog sistema, a time i manji utrošak energije,
- male dimenzije, što povlači i manje troškove za električnu instalaciju,
- brži odziv pri regulaciji.

Nedostaci koji ograničavaju njihovu upotrebu su slijedeći:

- zbog relativno velike valovitosti izlaznog napona izazivaju dodatna naprezanja istosmjernih motora s obzirom na zagrijavanje i komutaciju,
- nepovoljan faktor snage $\cos \varphi$ /,
- manja preopteretivost nego istosmjernog generatora,
- izobličenje ulaznog izmjeničnog napona, što može dovesti do nepoželjnih posljedica kod ostalih trošila priključenih na istu mrežu.

Ipak su prednosti značajnije od nedostataka, pogotovo ako se uzme u obzir da je veći dio nedostataka moguće otkloniti upotrebom izolacionog transformatora i uključivanjem dodatnih induktiviteta u seriju s armaturom motora, posljedica čega je smanjenje valovitosti struje napajanja.

Danas je razvijeno mnogo tipova poluvodičkih pretvarača za poluvalno i punovalno ispravljanje, za jednofazni i trofazni sis-

tem. Najčešće se upotrebljavaju u elektromotornim pogonima za napajanje istosmjernih motora ispravljački sklopovi s tiristorima i to:

- jednofazni poluvalni tiristorski ispravljački sklop je poluvalni ispravljač s jednim tiristorom i nul-diodom, /sl.1/.

Promjena srednje vrijednosti ispravljenog napona postiže se promjenom kuta paljenja tiristora.

Nul-dioda je spojena paralelno teretu i ona vodi struju tereta zamjenjujući izvor kad god ispravljeni napon padne na nulu. Ako struja kroz nul-diodu teče sve do slijedećeg impulsa na tiristoru, onda motor radi s kontinuiranom strujom, što ovisi o ukupnom induktivitetu i rijetko se dešava u ovakvom spoju. Zbog svojih relativno loših karakteristika ovaj spoj se upotrebljava za napajanje malih motora do oko 2 kW, koji služe za precizna pomicanja određenih uređaja u procesnoj industriji:

- jednofazni poluupravljivi tiristorski ispravljački sklop u mosnom spoju upotrebljava se za napajanje motora snage do 10 kW, kojima se pretežno koristi tekstilna industrija i kod velikih alatnih strojeva /sl.2/,
- trofazni poluupravljivi tiristorski ispravljački sklop u mosnom spoju ima u jednoj grani mosta 3 tiristora, a u drugoj grani 3 diode, /sl.3/.

U području malih kutova upravljanja α , pa sve do $\alpha=60^\circ$, ispravljeni napon ima šest osnovnih nadvalova za jedan period izmjeničnog napona, a za $\alpha > 60^\circ$ samo tri osnovna nadvala. Upotrebljava se u elektromotornim pogonima za napajanje motora malih i srednjih snaga /do 100 kW/ koji se koriste u alatnim strojevima, tvornicama papira, tekstilnoj industriji i dr.

- trofazni punoupravljivi tiristorski ispravljački sklop u mos-

nom spoju najkvalitetniji je od svih do sada opisanih spojeva, a razlikuje se od trofaznog poluupravljivog sklopa samo po tome što su diode zamijenjene tiristorima /sl.4/.

Iz vremenskog toka krivulje ispravljenog napona vidi se da taj spoj ima najmanji faktor oblika /ima uvijek 6 osnovnih nadvalova u jednom periodu/ u odnosu na druge spojeve. Zbog toga je valovitost struje napajanja motora znatno manja i oblik joj se približava obliku struje napajanja motora iz istosmjernog generatora. Upotrebom ovoga spoja smanjuju se naprezanja motora s obzirom na zagrijavanje i komutaciju, pa su takvi spojevi prikladni za napajanje motora većih i najvećih snaga, te onih s otežanom komutacijom. Upotrebljavaju se uglavnom u linijama procesne industrije, pri galvanizaciji čelika i u valjaoničkim pogonima.

Osnovna karakteristika svih ispravljačkih sklopova s tiristorima je znatna valovitost ispravljenog napona, koja je prikazana u zajedničkom dijagramu valovitosti napona na sl.5.

Kao što je na sl.5 vidljivo, valovitost napona ovisi o vrsti spoja i kutu upravljanja. Posljedica valovitosti ispravljenog napona je valovitost struje napajanja, koja još ovisi o ukupnom induktivitetu u krugu armature motora.

Postoji više definicija valovitosti struje napajanja, a najčešće se upotrebljavaju faktor oblika, tj. omjer efektivne i srednje vrijednosti ispravljene struje $/F_i = I_{ef}/I_{sr}/$ koja je bitna za dodatno zagrijavanje i maksimalnu valovitost

$V_i = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}}$ koja je bitna za kvalitetu komutacije motora.

Pojedine veličine definirane su oscilogramom $i=f/t/$ na sl.6.

2. Posljedice napajanja istosmjernih motora valovitom strujom

Posljedice valovitosti struje i magnetskog toka su: povećanje srednje vrijednosti napona i maksimalnog napona među lamelama kolektora, nastajanje nekompenziranog napona u svitku koji komutira, povećanje gubitaka u bakru i željezu i povećanje strujnog opterećenja četkica.

Utjecaj valovitog napajanja na rad istosmjernog motora ovisi o konstruktivnoj izvedbi magnetskog kruga. Kod takvih konstrukcija, kod kojih su pojedini dijelovi magnetskog kruga masivni, valovito napajanje izaziva u motoru:

- povećana komutaciona naprezanja u stacionarnom pogonu
- dodatna termička naprezanja
- velika komutaciona naprezanja zbog brzih promjena struje koja pomoću regulacionog kruga može biti nametnuta motoru.

Kod konstruktivnih izvedbi s lameliranim magnetskim krugom problemi komutacije se znatno ublaže, ali i dalje ostaju dodatna termička naprezanja.

Komutaciona naprezanja kod valovitog napajanja nastaju zbog toga što tok pomoćnih polova ne slijedi promjene struje armature. Izmjenična komponenta toka pomoćnih polova inducira u masivnim dijelovima magnetskog kruga pomoćnih polova vrtložne struje koje izazivaju njegovo prigušenje i fazno zaostajanje u odnosu na struju armature.

Da bi se ova problematika mogla obuhvatiti proračunom, uveden je pojam kompleksnog magnetskog otpora za izmjeničnu komponentu magnetskog toka. Kompleksni magnetski otpor definiran je kao omjer izmjenične komponente magnetomotorne sile i izmjenične komponente magnetskog toka.

Obzirom na izraženi površinski efekt, tj. potiskivanje izmjeničnog toka na površini, kod masivnih dijelova magnetskog kruga, magnetski otpor se može zamijeniti valnim otporom.

Kod lameliranog magnetskog kruga može se uvažiti pretpostavka da je debljina lima mnogo manja od njegove dužine i širine i time promatrati prodiranje vala s obje strane lima. Valni otpor lima se dobije kao omjer električkog i magnetskog napona polja na granici. Naravno da ovako teorijski dobivene izraze treba korigirati odgovarajućim koeficijentima povećanja otpora, koji uzimaju u obzir nesavršenost izolacije među limovima, te utjecaj elemenata za stezanje i učvršćenje limova.

Za određivanje izmjenične komponente toka pomoćnih polova koriste se nadomjesne sheme ovisno o konstrukciji stroja, čiji su pasivni elementi magnetski otpori, a aktivni elementi magnetomotorne sile. Ovako određen tok pomoćnih polova inducira u svitku, koji komutira napon E_{ppk} , koji zaostaje za protjecanjem E_{ppk} za neki kut β_k , što je prikazano vektorskim dijagramom na sl.7.

Osim napona E_{ppk} u svitku koji komutira, inducira se još napon samoindukcije E_{sk} /zbog izmjenične komponente struje rotora/, napon transformacije E_{tk} /zbog izmjenične komponente glavnog toka/. Na sl.8 prikazan je vektorski dijagram napona u svitku koji komutira za nekompenzirani serijski motor sa šentiranim uzбудnim namotom. Vektor ΔE_k je rezultatni nekompenzirani napon koji ne smije prijeći određenu granicu ΔE_{gr} da bi komutacija motora bila bez iskrenja. Ova granična vrijednost ΔE_{gr} određuje se eksperimentalno, a veličina joj je ovisna o vrsti i konstrukciji motora.

Osim što otežava komutaciju, napajanje valovitom strujom povećava gubitke u bakru i željezu aktivnih dijelova motora.

Za stvaranje okretnog momenta njerodavna je srednja vrijednost struje armature I_a , a za gubitke u bakru efektivna vrijednost valovite struje I_e :

$$I_e = \sqrt{I_1^2 + I_k^2}$$

I_k - efektivna vrijednost struje
k-tog harmonika

$$P_{Cuk} = I_e^2 \cdot R =$$

R - otpor namota mjeren istosmjernom strujom

U namotima motora stvaraju se pored ovih povećanih gubitaka ka P_{Cuk} još i dodatni gubici P_{Cudk} uzrokovani potiskivanjem:

$$P_{Cudk} = K_p \cdot I_e^2 \cdot R =$$

K_p - koeficijent povećanja otpora namota zbog potiskivanja

Gubici u željezu magnetskog kruga zbog vrtložnih struja mogu se odrediti na osnovu povezanosti električkih i magnetskih parametara ulančenog kruga:

$$P_{Fe} = \omega_k \cdot \phi_k^2 \cdot Z_k \sin \varphi_k$$

gdje su: ϕ_k - izmjenična komponenta magnetskog toka

ω_k - kružna frekvencija

$Z_k \sin \varphi_k$ - modul i argument kompleksnog magnetskog otpora elementa u kojem se računaju gubici.

3. Usporedba zagrijavanja i kvalitete komutacije istosmjernog motora uz napajanje iz poluvodičkih pretvarača

Povišeno zagrijavanje istosmjernih motora kod valovitog napajanja uzrokovano je povećanim gubicima u bakru i željezu. Provedena eksperimentalna istraživanja pokazala su da povećanje zagrijavanja ovisi o vrsti poluvodičkog pretvarača i o dubini regulacije $/D/$, što naravno utječe na valovitost struje /vidi sl.5/. Radi usporedbe i ocjene utjecaja pojedinih vrsta poluvodičkih

pretvarača, odabran je istosmjerni motor snage 5 kW, 1500⁰/min, na kojem su izvršena ispitivanja zagrijavanja uz napajanje iz različitih izvora i za različite kutove upravljanja tiristora α .

Da bi se izbjegao utjecaj brzine vrtnje na zagrijavanje, pokusi su vršeni uz vanjsku ventilaciju. Rezultati ispitivanja, prikazani zajedničkim dijagramom na sl.9, u velikoj mjeri potvrđuju teorijske pretpostavke o kvaliteti pojedinih izvora.

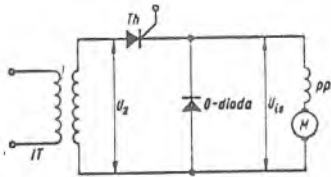
Na istom motoru / 5 kW, 1500 min⁻¹/ provedena su ispitivanja komutacije uz napajanje iz različitih izvora metodom snimanja tamnog pojasa. Ispitivanje provedeno uz konstantnu brzinu vrtnje /1500 min⁻¹/ i konstantan faktor upravljanja α , tj. omjer napona napajanja prema idealnom naponu pretvarača $\alpha = \frac{U}{U_{di}}$.

Rezultati ispitivanja prikazani su zajedničkim dijagramom na sl.10. Može se uočiti da kod napajanja iz jednofaznog polu-upravljivog mosta struja ima tako veliku valovitost ($\gamma = 0,6$) da motor već kod 15% nazivne struje ne može raditi bez iskranja.

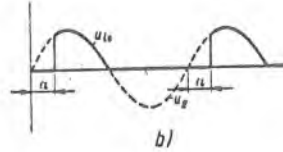
Na osnovu provedenih ispitivanja može se konstatirati da klasični istosmjerni motor /s masivnim jarmom statora/ može ispravno raditi samo onda ako mu se ograniči valovitost struje napajanja dodavanjem vanjskih prigušnica za glađenje u armaturni krug. Kod potpuno lameliranog magnetskog kruga nije potrebno zbog kvalitete komutacije smanjivati valovitost struje napajanja, ali je potrebno sniziti snagu zbog povišenog zagrijavanja, što može biti vrlo neekonomično kod motora velikih snaga /1 do 5 MW/.

Literatura:

1. Smolčić Z.: Specijalna poglavlja iz kolektorskih strojeva, skripta, Zagreb 1971.



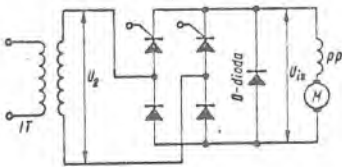
a)



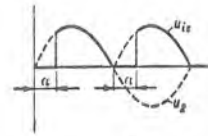
b)

Sl.1.1. Jednofazni poluvalni ispravljački sklop.

a/ Shema spoja: U_2 =napon transformatora, U_{is} - napon na izlazu ispravljača, α - kut upravljanja; b/ Oblik ispravljenog napona.

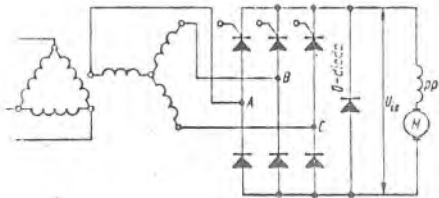


a)

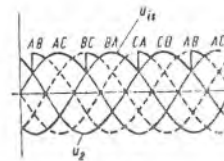


b)

Sl.1.2. Jednofazni tiristorski ispravljački sklop u mosnom spoju. a/ Shema spoja; b/ Oblik ispravljenog napona.

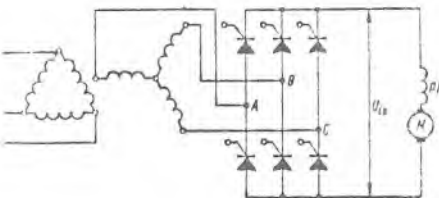


a)

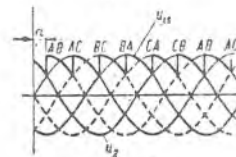


b)

Sl.1.3. Trofazni ispravljački poluupravljivi sklop u mosnom spoju. a/ Shema spoja; b/ Oblik ispravljenog napona.

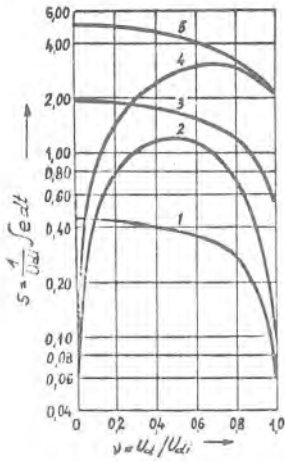


a)



b)

Sl.1.4. Trofazni punoupravljivi ispravljački sklop u mosnom spoju. a/ Shema spoja; b/ Oblik ispravljenog napona.



U_d - napon motora

U_{di} - idealni napon ispravljača

1 - punoupregljivi trofazni most

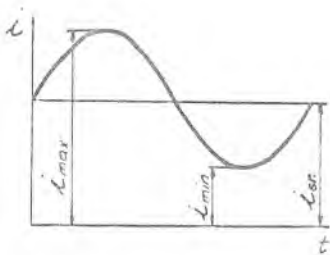
2 - poluupregljivi trofazni most

3 - upregljivi trofazni spoj u zvijezdu

4 - poluupregljivi jednofazni most

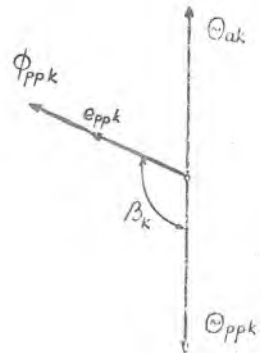
5 - punoupregljivi jednofazni most

Sl.5. Zajednički dijagram valovitosti napona u ovisnosti o faktoru upravljanja α

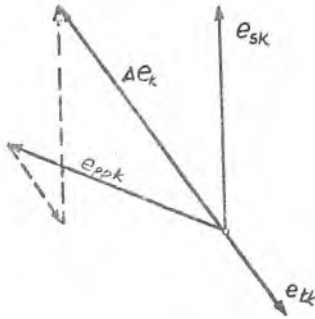


Sl.6. Uz objašnjenje definicije valovitosti struje

$$V_i = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}}$$



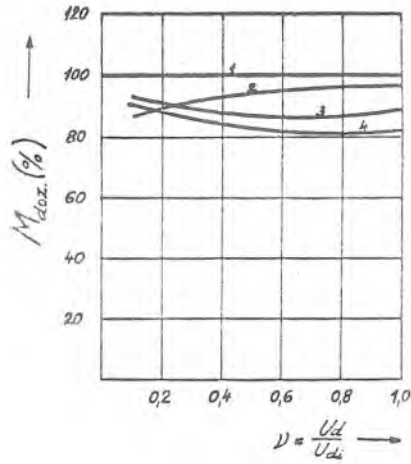
Sl.7. Vektorski položaj inducirane napona od toka pomoćnih polova E_{pk}



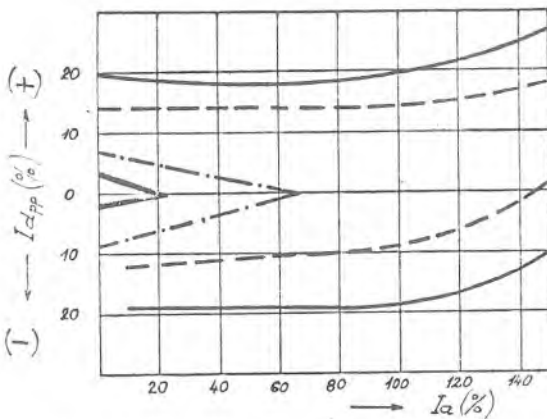
Sl.8. Nekompenzirani napon u svitku koji komutira Δe_k

$$\Delta \bar{e}_k = \bar{e}_{sk} + \bar{e}_{ppk} + \bar{e}_{tk}$$

Sl.10. Dozvoljeni moment opterećenja motora kod raznih vrsta napajanja obzirom na nadtemperaturu $\theta = 100^\circ\text{C}$ u ovisnosti o faktoru upravljanja ν



- 1 - istosmjerni generator
- 2 - trofazni punoupravljivi most
- 3 - trofazni poluupravljivi most
- 4 - jednofazni poluupravljivi most



- istosmjerni generator
- - - trofazni punoupravljivi most
- · - trofazni poluupravljivi most
- jednofazni poluupravljivi most

Sl.10. Tamni pojas komutacije za razne vrste napajanja kod $n=1500 \text{ min}^{-1}$

Prof.dr Milojko Ćišić
Fakultet elektrotehnike, strojarstva
i brodogradnje, Split

PREDNOST AC ELEKTROMOTORNIH POGONA NA BRODOVIMA

U suvremenoj brodogradnji postoji sve veći problem snižavanja investicionih i pogonskih troškova uz skoro potpunu elektrifikaciju svih operacija i funkcija na brodu (sve do potpune automatizacije). Stoga će prednost imati oni uređaji koji snižavaju investicione i pogonske troškove. Početkom četrdesetih godina nastala je dilema DC ili AC pogoni pa su istraživanja i neposredna iskustva pokazala da uvođenje AC sistema donosi mnogo prednosti. Osnovni nedostatak DC sistema je u većoj težini postrojenja (za istu snagu) te visoki troškovi održavanja motora radi veoma osjetljivog komutatora. Prednost je bila izražena samo u dobrim mogućnostima regulacije brzine vrtnje. Pokazalo se da se uvođenjem AC sistema (trofazni četverovodni sistem) postižu značajne prednosti u početnim investicijama (oko 20% manje prema DC sistemu), a troškovi održavanja padaju ispod 50% prema DC sistemu.

Glavni nosilac prednosti AC sistema je asinhroni kratkospojni motor koji ujedinjuje sve prednosti: pogonsku sigurnost, spremnost za rad, skoro nikakav nadzor, jednostavno pokretanje, jednostavnu instalaciju. Zbog ovoga proizilazi visok stupanj sigurnosti broda u navigaciji.

Za regulabilne pogone upotrebljava se polnopreklopivi kratkospojni AC motor (zadovoljava najveći dio potreba), a za specijalne potrebe se upotrebljavaju DC motori, napajani iz odgovarajućih pretvarača (motorgeneratori ili u najnovije vrijeme tiristorski ispravljači). AC sistem je konačno osvojio trgovačku i ratnu flotu svijeta i donio velike koristi te je danas primijenjen na preko 95% tonaže svjetske flote (osim malih brodova gdje je još ponekad primijenjen DC sistem).

Ovo je još jedan primjer Teslinog vizionarskog gledanja na elektrotehniku i dalekosežnosti njegovih otkrića.

ADVANTAGES OF AC ELECTRIC SYSTEMS ON SHIPS

A problem of growing importance in present-day shipbuilding is how to reduce investment and operating costs with a simultaneously almost complete electrification and automation of all ship operations. Accordingly, priority will be given to installations reducing such costs. The DV vs. AC dilemma dates from the early forties; subsequent research and operating experience have shown the AC system to be very advantageous. The basic shortcomings of DC equipment are greater weight (for the same power) and high motor maintenance cost because of the very sensitive commutator; its main advantage is very good motor speed control. By applying the AC system (three-phase with insulated middle point) the initial investment cost is reduced by 20 percent, and the maintenance cost by 50 percent, as against the DC system.

The advantages of the AC system are principally attributable to the asynchronous squirrel cage motor (short-circuit rotor): operating safety; ready and simple starting; hardly any supervision; simple installation. All these provide for a very high navigation safety.

Two-speed short-circuit AC motors are used for controllable drives, as they meet most of the requirements; DC motors supplied by converters (motor generators or, most recently, thyristor converters) are used for special purposes. The AC system has finally conquered the world's merchant marine and navy, and is being applied to major advantage on 95 percent of the world's shipping (the DC system is only occasionally used on smaller craft).

The application of the AC system to shipping is another example of Tesla's visionary views about electrical engineering and of the far-reaching impact of his discoveries.

U suvremenoj brodograđnji postoji sve veći problem sniženja investicionih i pogonskih troškova s jedne strane, a s druge udio elektrifikacije na brodu sve više raste, tako da je brod danas elektrificiran do takvog stupnja koji se nije mogao ni zamisliti prije dvije decenije. Stoga je izvanredno poraslo zanimanje za sve onakve uređaje koji bi mogli sniziti investicione i

pogonske troškove broda u eksploataciji. Otuda se i pojavila želja koncem tridesetih godina da se za pogon pomoćnih strojeva upotrijebe onakvi uređaji koji se proizvode u velikim količinama za standardne kopnene uređaje, koji su cijenom niži i jednostavniji za rukovanje i održavanje od to tada uobičajevnih tzv. "brodskih" uređaja istosmjerne struje. Pri analizi raznih osobina motora i uređaja izmjenične struje došlo je do veoma zanimljivih rasprava, rezultat kojih je danas uvedena izmjenična struja za pogon pomoćnih strojeva na trgovačkim teretnim brodovima.

1. Osobine sistema izmjenične struje na brodu

Prema ranijim standardnim uređajima istosmjerne struje glavni nedostatak, koji se ozbiljno može pripisati uređajima izmjenične struje, bio bi taj da se motorima ne može dati ona elastičnost u pogledu regulacije broja okretaja, koja je ponekad veoma potrebna za izvjesne pogone na brodu. Danas industrija elektromotora izrađuje takve motore, kojima se može regulirati brzina u razmjeri 10:1. Ovi motori imaju primjenu u mnogobrojnim uređajima na kopnu i daju veoma zadovoljavajuće rezultate. Primjenom principa tzv. magnetskog kontrolera postignut je veliki opseg radnih brzina s relativno malim brojem kontakta za ukapčanje rotorskog otpora preko kontrolera i kliznih koluta motora. Ovo se postiže postepenim smanjivanjem otpora u geometrijskom omjeru. Ako imamo otpornik s četiri stupnja poredanih u odnosu 1:2:4:8, onda se može kontrolerom od samo 4 kontakta postići kombinacijom jednog ili više segmenata otpora ravno 15 (petnaest) brzina motora. Ovim se dobije motor izmjenične struje, koji je dorastao najvećem broju zahtjeva kako na kopnu tako i na brodu.

Međutim, ako se dublje analiziraju zahtjevi, koje stavljaju pojedini pomoćni strojevi s obzirom na pogon, onda se može vidjeti da ima relativno malo pomoćnih strojeva koji bi zahtijevali naročito finu regulaciju broja okretaja. U najvećem broju slučajeva je dovoljno imati dvije ili najviše tri brzine (pumpe za naftu i sl.). Za efikasno funkcioniranje pomoćnog kompleksa na brodu dovoljno je imati motore s kratkospojenom kotvom, s jednom ili dvije brzine (za neke svrhe možda čak i četiri). Time iskorišćujemo najvažniju prednost pogona izmjeničnom strujom - nisku cijenu i malu težinu kratkospojenog motora i izvanredno male troškove

uzdržavanja. Upotrebom ovakvih motora postaje pogon nešto manje elastičan ali ipak sasvim zadovoljava, kao što su to pokazali brojni izvedeni primjeri.

Približno svega 1% (na velikim brodovima) strojeva zahtijevaju motore s regulacijom. Ovaj procenat raste na manjim brodovima tako da na teretnim brodovima iznosi i do 25% od ukupnog instaliranog učina. To otuda što se takvi motori upotrebljavaju za vitla, dizalice, sidrena vitla i sl. Dugo vremena se smatralo da se za ovakve svrhe mogu upotrijebiti samo motori istosmjerne struje, pa je ovo područje bilo i najžešće poprište polemike o upotrebljivosti izmjenične struje na brodu.

Naime, brodske dizalice mogu jako povećati svoju radnu sposobnost, ako se omogući veoma brzo povraćanje prazne kuke dizalice prilikom utovara ili istovara. Kod modernih brodskih dizalica na izmjeničnu struju, motor radi normalno s 1000 O/min (sinhrona brzina) i regulira se na gore opisani način. Kod povraćanja prazne kuke prekopča se broj polova statora tako da motor sad ima sinhronu brzinu 1500 O/min. Na taj način se postiže veoma jednostavno da se kuka povрати što brže na radno mjesto.

Ukoliko se ipak želi provesti naročito fina regulacija sa skoro kontinuiranom karakteristikom, onda se može pribjeći upotrebi kolektorskih motora i raznim spojevima s tiristorskom regulacijom i nizom drugačijih rješenja. Međutim, tako se gubi osnovna prednost motora izmjenične struje: njihova izvanredna jednostavnost, lakoća i mali troškovi investicija i uzdržavanja.

Napokon, postoji još nekoliko uređaja koji imaju hidraulični prijenos, kao npr. elektro-hidraulički stroj za kormilo. Tu se može upotrijebiti i normalni motor s kratkospojenom kotvom, jer hidraulički organ sa svojom regulacijom omogućava dovoljnu regulaciju uređaja kao cjeline.

Iz svega navedenog se može sažeto reći da je glavna prednost sistema izmjenične struje za pogon pomoćnih strojeva motor s kratkospojenom kotvom s direktnim napuštanjem. Ovaj motor zadovoljava najveći broj pogona. Time se dobiva najrobustniji i najjednostavniji pogon s najjednostavnijim kontrolnim uređajem. Ovakav pogon je jeftiniji i lakši po težini nego jedan ekvivalent istosmjerne struje, jer su troškovi uzdržavanja svedeni na minimum.

Ostale osobine sistema izmjenične struje bi se dale sažeti ovako:

a) kod velikih instalacija gdje se upotrebljava trofazni, trovodni sistem distribucije s naponom od 440 V ekonomično je upotrijebiti transformatore za napajanje raznih sektora broda. Ovo znatno smanjuje riziko požara na brodu. Ovaj sistem ipak ima smisla samo gdje utjecaj dodatnih investicionih troškova na transformatore ne iznosi velik udio prema ostalim instaliranim postrojenjima. Međutim, kod manjih brodova, s manjom instaliranom snagom, upotrebljava se trofazni sistem, trovodni 230 V, naročito kod onih brodova gdje je najveći dio instaliranog učina rasvjeta i grijanje;

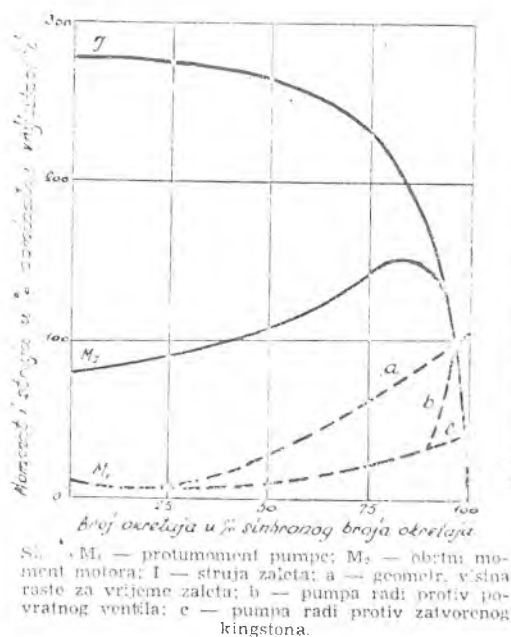
b) zbog sve većeg instaliranog učina i mnoštva raznih uređaja nastao je problem od velikog značaja kako smjestiti ogromnu količinu kablova na ispravan način u relativno male prostorijske. Upotrebom viših napona izmjenične struje broj i dimenzije kablova su se jako reducirali. Ovo ima za posljedicu manju težinu kablova, manje investicione troškove i velike olakšice za ispravno polaganje kablovske mreže;

c) elektrolitički efekt, koji je uzrok i izvor mnogih smetnji i grešaka izolacije kod instalacije istosmjernog struje, praktički je sasvim izbjegnuto.

2. Osobine kratkospojnog motora

Općenito, svaki kratkospojni motor ima to osnovno svojstvo da mu je polazni moment, a s tim i polazna struja, uvijek ista i nezavisna od protumomenta radnog stroja. Kod prilagođenog dimenzioniranja nastaje višak momenta motora, tj. razlika između protumomenta radne mašine i polaznog momenta motora. Ovaj višak (ili pretičak) momenta služi za ubrzavanje motora tako da je vrijeme zaleta utoliko manje ukoliko je veći ovaj pretičak. Ovo, međutim, ima za posljedicu prilično osjetan udar pri polasku motora, što može biti neugodno kod nekih pogona, kao npr. kod pumpa, dizalica i sl. Da bi se izbjegli ovi neugodni udari kod pumpa, sačuvali zupčasti prijenosi a i sami rotor pumpa,

mora se svakako spriječiti preveliko ubrzanje. Taj je problem kod kratkospojenih motora do sada bio rješavan u najvećem broju slučajeva naročitim prekapčanjem motora pomoću sklopke Y/ Δ . Međutim, ovaj način ne zadovoljava s tehničke točke gledišta jer su kod upotrebe većih motora udari ipak toliki da manje električne centrale (a to bi bile baš brodske) ne dopuštaju tolike udarce. Stoga je razvijen drugi tip motora s kratkospojenim rotorom koji ima dva namotaja u rotoru (dvostruki štapni rotor, Boucherot-rotor, rotor s potiskivanjem struje). Njegova osnovna karakteristika je ta da baš u momentu polaska nastaje potiskivanje struje u rotoru u sistem koji ima veći otpor (slika 2.), te se na taj način smanjuje ubrzanje motora i strujni udar. Nakon što motor dostigne puni zalet, struja rotora protječe i kroz drugi sistem, smanjujući tako otpor, te motor radi normalno. Ovakav motor ima veoma povoljne karakteristike, naročito s obzirom na one radne strojeve koji imaju tzv. ventilatorsku karakteristiku (centrifugalne pumpe, ventilatori i sl.), a brodski pomoćni strojevi spadaju u većini u takve vrste strojeva. Protumoment ovih strojeva raste kvadratično sa zaletom motora, pa kratkospojni motor s dvostrukim kavezom zaslužuje naročitu pažnju pri ovim razmatranjima. Danas elektroindustrija raspolaže s tako usavršenim tipovima ovih motora da se oni mogu potpuno usporediti s odgovarajućim motorima istosmjernje struje, s obzirom na pogonske osobine, dok ih daleko premašuju jednostavnošću napuštanja, težinom, cijenom i troškovima uzdržavanja i nadzora. Konstruktivne prednosti ovog motora dopuštaju da se on može ugraditi na nepristupačna mjesta (to su najčešće ventilatori) jer otpada potreba stalnog nadzora i čišćenja komutatora, što inače zadaje velike teškoće ako se u pogonu nalazi veći broj motora na istosmjernu struju.



3. Neka ekonomska uspoređenja

S obzirom da je nekim pogonskim motorima potrebna izvjesna regulacija (za pumpe do 25%, a za dizalice do 50%), to se pojavljuje pitanje gubitaka, odnosno troškova koji nastaju tokom pogona pri izvjesnom režimu regulacije. Ovo je veoma važan moment s obzirom na ekonomiju pogona brodskog kompleksa. Uzeta su u razmatranje dva slučaja: regulacija do 25% i do 50%. Razmatranje pokazuje da je u osobito povoljnom položaju motor izmjenične struje za 2000 do 3000 pogonskih sati (tj. 85 do 125 dana po 24 sata). Kao podloga uzeta je cijena od 0,33 din./kWh, što približno odgovara mnogim brodskim pogonima (na osnovi različitih izvještaja i godišnjaka, preračunato po službenom kursu).

Tab. 1)

TABLICA 1

Regulacija %	25 %			50 %		
Vrsta motora	istosmj.	izmjenič. klizni	izmjenič. kratkospoj.	istosmj.	izmjenič. klizni	izmjenič. kratkospoj.
vrsta regulac.	polje	klizanje	gušenje	polje	klizanje	gušenje
troškovi nabavke u % za motor i pribor	100	69	42	100	58	49
težina u %	100	79	43	100	62	48

Uspoređenje koštanja i težina raznih motora kod 25% i 50% regulacije dato je u tabeli 1. Vrijednosti za motore istosmjerne struje uzete su kao 100% pa su prema tome izračunate vrijednosti za ostale tipove motora izmjenične struje. Naročito pada u oči neobično povoljan odnos u korist kratkospojnog motora s regulacijom gušenja dok motor s kliznim kolutima stoji sasvim povoljno.

Veoma je ilustrativno vidjeti u kakvom se odnosu nalaze razne vrste motora s obzirom na dužinu roka amortizacije te godišnjih troškova za rezervne dijelove i uzdržavanje. Tabela 2. pokazuje da se motori izmjenične struje nalaze u daleko povoljnijem odnosu nego motori istosmjerne struje. Naročito su upadljivi skoro tri puta manji godišnji troškovi za rezervne dijelove i uzdržavanje kod motora s kratkospojnim rotorom kao i četiri puta manji troškovi nadzora i pregleda. Ovo može imati veliki značaj ako je broj motora velik, što se i događa na svim većim modernim brodovima gdje je elektrifikacija potpuna.

Tab. 2)

TABLICA 2

Vrsta motora	Otplata u godini	Za otplatu, kamate i osiguranje godišnje %	Za rezervne dijelove i održavanje godišnje %	nadzor i pregled godišnje %
istosmjerni	10	14,9	5	4
izmjenični klizni kol.	14	12,1	3	2
izmjenični kratkospojni	16	11,9	1,5	1

Veoma je teško uspoređivati s ekonomske točke gledišta sistem istosmjerne struje sa sistemom izmjenične struje. Naročito danas, kad na tržištu vladaju veoma promjenljive prilike i kad je naročito nepouzđano uspoređivati cijene, pogotovu kod elektromotora i kablova gdje je u pitanju bakar. Pa ipak, na osnovi cijena i drugih podataka, bilo je moguće dati neka uspoređenja između jednog i drugog sistema.

U literaturi postoji veoma mnogo ovakvih razmatranja i uspoređenja. Ona sva, usprkos nekim neslaganjima, pokazuju jednu zajedničku crtu - naime, motori i uopće uređaji izmjenične struje su ipak jeftiniji od sličnih ili ekvivalentnih istosmjerne struje. Ovo skupa s drugom važnom činjenicom, da se uređaji izmjenične struje masovno proizvode i mogu lakše dobiti, daje sistemu izmjenične struje prednosti koje se ne mogu zanemariti.

Troškovi oko električne opreme na brodu se dijele na investicione i troškove uzdržavanja. Tablica 2. pokazuje potpunu prednost motora izmjenične struje. Međutim, nije potrebno naročito naglašavati da se prednosti potpuno iskorišćavaju samo ako je u većini slučajeva upotrijebljen kratkospojni motor. Što god je veći udio ovih motora prema ostalima koji se iz pogonskih razloga moraju upotrijebiti, to je sve ekonomičnija takva instalacija izmjenične struje. Iz toga proizlazi da su najekonomičnije instalacije velikih brodova gdje ima bezbroj mogućnosti da se upotrijebi kratkospojni motor. Kod manjih brodova već se gubi ova prednost jer procentualno raste udio ostalih skupljih vrsta motora prema kratkospojnim motorima. Kod velike primjene kratkospojnog motora padaju veoma naglo i troškovi uzdržavanja, koji su minimalni u uspoređenju s troškovima koje valja podnijeti za ispravno uzdržavanje u pogonu kolektorskih motora istosmjerne struje.

Postojala je bojazan da će se povećati kvarovi zbog grešaka izolacije kod povišenja napona s 220 V istosmjerne

struje na 440 V izmjenične struje. Međutim, praksa je pokazala da to nije bio slučaj jer su svuremene izolacione materije sasvim dorasle brodskoj primjeni. Ako se uz ovo uzme još i činjenica da kod upotrebe izmjenične struje nema elektrolitičkog djelovanja, onda se može instalacija trofazne izmjenične struje 440 V smatrati, s pogonske točke gledišta, isto tako pouzdana kao i instalacije istosmjerne struje 220 V.

4. Zaključni pregled

Na osnovi svega rečenog (poslije svih razmatranja učinjenih s obzirom na razna pogonska svojstva raznih tipova motora, rasklopnih postrojenja, mreža i generatora) napravljen je pregled troškova i težine postrojenja izmjenične struje na brodovima raznih vrsta i veličina u uspoređenju s odgovarajućim postrojenjima istosmjerne struje.

Slika 3. prikazuje vrijednosti koštanja i težine za razna postrojenja. Kao osnov računanju uzeto je da odgovarajuća postrojenja istosmjerne struje imaju vrijednost 100% pa su prema tome uspoređivane ostale vrijednosti za izmjeničnu struju.

Na slici je snaga generatora i potrošača (u kW) predstavljena površinom, pri čemu je, zbog velikih razlika u snazi pojedinih postrojenja, širina polja predstavljena logaritmom snage glavnog generatora. Visina polja potrošača odgovara odnosu njihovih snaga prema glavnom generatoru. Brojevi iznad slike pokazuju da je izmjenična struja u troškovima montaže i težine u toliko povoljnija što je veći udio pogona pomoćnih strojeva prema ukupnoj instaliranoj snazi. U korist izmjenične struje ide također povećanje generatorske snage (turboelektrični brod br.8). Jasno je vidljiv utjecaj na cijenu zbog teretnih dizalica na izmjeničnu struju. Kod teretnjaka od 4000 do 6000 tona (brod br.2), koji osim kormilarskog uređaja ima parne dizalice, udio elektrifikacije pomoćnih strojeva ipak daje izvjesnu prednost izmjeničnoj struji. Za brod iste veličine, koji ima motorni pogon (brod br.4), troškovi postrojenja za izmjeničnu struju su viši. Kod teretnog motornog broda od 10.000 tona (brod br.5) su izjednačeni veći troškovi dizalica na izmjeničnu struju tako da s obzirom na odnose cijena troškovi postaju niži nego za istosmjernu struju.

Kod generatora je naglašena uloga zamašnog momenta za generatore izmjenične struje s obzirom na cijenu i težinu. Kod generatora, koji su pogonjeni parnim strojem ili dizel motorom potrebne su dodatne zamašne mase (izuzev broda br.2) za izmjenične generatore. Kod broda br.2 dovoljan je zamašni momenat generatora u normalnoj izvedbi.

Odnos težina rasklopnog postrojenja je viši nego odnos cijena zbog jednostavnije građe izmjeničnih postrojenja i zbog manjeg udjela troškova na jedinicu težine.

Slika zatim pokazuje da kod manjih brodova kojih električno postrojenje služi samo za rasvjetu i napajanje nekoliko pomoćnih aparata, izmjenična struja nema nikakve prednosti u cijeni i težini. To, međutim, još nije dovoljno odlučujuće s obzirom na znatne pogonske prednosti izmjenične struje. Stoga će za male brodove istosmjerna struja ipak ostati jedino ispravno rješenje, jer se generatori za vrijeme mirovanja broda stavljaju izvan pogona i akumulatorska baterija preuzima napajanjem rasvjete i nekih aparata. Takav pogon kod izmjenične struje nije praktičan. Osim toga, izmjenična struja zahtijeva simetrično opterećenje faza, što opet vodi do velikog broja strujnih krugova, a to kod malog broda poskupljuje kabelsku mrežu.

Navedena izlaganja dokazala su veliku prednost izmjenične struje nad istosmjernom u brodskom pogonu, s obzirom na pogonske sposobnosti. Ispitivanja troškova postrojenja i odnosa težina pokazala su i ovdje da izmjenična struja ima prednost, izuzev mala postrojenja. Ta prednost je utoliko veća ukoliko je veći stupanj elektrifikacije broda.

Pogonske prednosti sistema izmjenične struje mogu se sažeti ovako: veća pogonska sigurnost, stalna spremnost za pogon, skoro nikakav nadzor za njegu i stavljanje u pogon, jednostavna posluga i veoma pregledan način gradnje izmjeničnih postrojenja. Iz ovoga proizlazi veoma velika sigurnost plovidbe što je od izuzetnog značaja.

Glavni nosilac prednosti sistema izmjenične struje je motor s kratkospojenim rotorom koji sve naprijed navedene prednosti ujedinijuje u sebi, pa mu je zato i data važnost u ovom razmatranju.

Koštanje

Troškovi %	104	92	105	102	98,5	93,5	90	86
Težine %	115,5	98	107	103	98	95,5	93	88

Brod	1	2	3	4	5	6	7	8
	R 4 PS 9 G 2x10	ET 5 R 8 D 5 PS 30 G 2x25	ET 20 R 10 D 100 PS 70 G 2x50 1x10	ET 180 R 14 D 300 PS 200 G 3x100 1x20	ET 390 R 24 D 400 PS 450 G 3x200 1x20	ET 780 R 160 545 PS 960 G 3x400 1x50	ET 1440 R 400 D 600 PS 1920 G 4x600 1x100	ET 2000 R 800 D 800 PS 3600 G 4x1000 kW 1x400 1x200
	teretni p/b 1-200	teretni p/b 4-600	teretni m/b 1-2000	teretni m/b 4-6000	teretni m/b sa putn. 6-10000	teretni i putn. m/b 12-16000	putnički m/b 20000	veliki putn. parobrod
	tona	tona	tona	tona	tona	tona	tona	

Sl. 2. G — generator; PS — pomoćni strojevi; D — palubni strojevi; R — rasvjeta; ET — elektrotermija.

Dobra iskustva, stečena s brodovima, koji imaju pomoćne strojeve na izmjeničnu struju, pokazuju bitne prednosti sveopćeg uvođenja izmjenične struje na brodovima s neposrednim parnim ili dizel pogonom. Osim toga, smanjeni nadzor i uzdržavanje izmjeničnih postrojenja donose znatnu uštedu u personalu. Najnovija iskustva svjetske brodogradnje upućuju nas da razumijemo zašto su u poslijeratnoj brodogradnji i konstruktori odabrali izmjeničnu struju kao isključivi izvor električne energije na brodovima srednje i velike tonaže.

Literatura:

- Čišić M.: Istosmjerna ili izmjenična struja na brodu, Brodogradnja br.11-12, pp 339-350, 1951.
- Rickover: Alternating current in the U.S. navy, Transactions Soc.Naval Arch. & Mar. Eng., vol.49, 1941.
- Sass: Wechselstrom auf Handelsschiffen, Werft, Reederei, Hafen, No.5, 1938.
- Savage: Alternating current for ships auxiliaries, Transactions North East Coast Inst. vol.64, 1948.
- Vogler, W.; Luetge H.: Automatische Stromerzeugeranlagen für Schiffe, Schiff und Hafen, No.5, pp 493-498, 1964.
- Wangerin A.: Messungen auf dem Drehstrom-Trockenfrachter "Cap Blanco", Schiff und Hafen, No 11, pp 756-763, 1955.

Franc GAL, dipl. ing.
Viša Tehnička škola
SUBOTICA

MODEL ASINHRONOG MOTORA UPRAVLJANOG PROMENLJIVOM PRIMARNOM FREKVENCIJOM

U budućnosti će se asinhroni motor više nego ikada primenjivati u pogonima sa regulacijom brzine obrtanja. U proteklim godinama bili su razvijeni statički pretvarači frekvencije, koji spojeni sa asinhronim motorom sačinjavaju pogon sa promenljivom brzinom obrtanja, konkurentan pogonu sa jednosmernim motorom. Za analizu dinamičkog ponašanja takvog sistema potrebno je opisati dinamičko odazivanje asinhronog motora.

Ovaj referat opisuje prenosne funkcije asinhronog motora upravljanog promenljivom primarnom frekvencijom, koje funkcije se mogu upotrebiti npr. za analizu stabiliteta takvog tipa pogonskog sistema. U slučaju asinhronog motora su prenosne funkcije četvrtog stepena, razmatrajući samo elektromagnetne pojave i petog stepena, uzevši u obzir i uticaj tromih masa.

Blok shema motora u primeru upravljanja brzine obrtanja prikazana je na sl. 4. Usvajajući metod malih odstupanja od stacionarne tačke rada mogu se veličine a , φ_s i φ_r uzeti kao ulazne veličine. U koordinatnom sistemu rotirajućem zajedno sa rotorom mogu se računati iz jednačina motora izlazne veličine kao promena brzine obrtanja w , momenta m , struje i itd. Izvršiće se proračun tranzijentnog odziva, koji pokazuje vezu između spomenutih ulaznih veličina i promene brzine obrtanja kao izlazne veličine.

MODEL OF ASYNCHRONOUS MOTOR WITH VARIABLE PRIMARY FREQUENCY CONTROL

In the future asynchronous motors will be applied in drives with speed or rotation control much more than ever before. Static frequency converters have been developed in recent years which, connected with asynchronous motors, make up a variable speed of rotation drive, competing with AC motor drives. The analysis of the dynamic behaviour of such a system calls for a description of dynamic asynchronous motor response.

The transmission functions of variable primary frequency controlled asynchronous motors are described; such functions can be used, e.g., in analyzing the stability of such types of drive systems. In the asynchronous motor case the transmission functions are of the fourth degree if only electromagnetic phenomena are considered, and of the fifth degree if the influence of inert masses is also taken into account.

A block diagram of a motor with speed of rotation control is shown in Fig. 4. By adopting the method of small deviations from the stationary operating point the magnitudes a , φ_s and φ_r can be assumed as input values. In the coordinate system which rotates together with the rotor, motor equations can be used to compute output values such as change of speed of rotation, w , torque, m , current, i , etc. Transient response is computed, which shows the link between these input values and the change in speed of rotation as an output value.

U v o d

Matematičko određivanje dinamike sistema asinhronog motora napajanog iz tiristorskog pretvarača komplikovano je već na samom početku analize, razmatrajući prvo dinamičke osobine regulisanog objekta - asinhronog motora, pošto se predstavlja mašina u regulacionom kolu kao nelinearni član. Još 1974.g. se je smatralo da nije moguće matematički u zaključenom obliku rešiti problem dinamičkog odziva asinhronog motora u općenitom slučaju npr. kod promene statorskog napona ili napona i frekvencije na ulazu u sistem /1/. Ipak treba spomenuti, da su autori Lipo i Krause /2/ postigli značajne teorijske rezultate, koji su bili kasnije eksperimentalno provereni. Na složenost matematičke analize ukazuje činjenica, da su ustanovili odstupanja od 50 do 100% između rezultata, dobivenih proračunom. odn. merenjem.

U ovom radu primenjen je metod analize pomoću trofaznih (Parkovih) vektora /4/, a polaznu osnovu predstavljaju radovi /3/, /5/ i /6/.

Oznake veličina

Indeks "s" u oznakama veličina odnosi se na stator, a indeks "r" na rotor mašine. Velika slova označuju iznos veličina u pogonskoj tački, a mala slova njihove trenutačne vrednosti ili njihova mala odstupanja od pogonske tačke, koja mogu biti naznačena još sa posebnim znakom Δ . Crtica ispod velikog ili malog slova označuje trofazni (Parkov) vektor dotične veličine, a zvezda uz oznaku vektora konjugovanu kompleksnu veličinu.

Upotrebljene su sledeće oznake:

$\underline{U}$, $\underline{u}$ napon, a promena iznosa i ψ_s promena faznog položaja vektora statorskog napona, $\underline{I}$, $\underline{i}$ struja, R otpornost namotaja, L odn. X ukupna induktivnost, odn. reaktansa namotaja, L_m odn. X_m

induktivnost, odn. reaktansa glavnog polja, L_σ , odn. X_σ rasipna induktivnost, odn. rasipna reaktansa namotaja, σ sačinilac ukupnog rasipanja, $L'_s = \sigma L_s$ tranzijentna induktivnost, T'_s odn. T'_r tranzijentna vremenska konstanta statora odn. rotora, T_{so} odn. T_{ro} vremenska konstanta praznog hoda statora, odn. rotora, Ψ , $\underline{\Psi}$ ukupni magnetni obuhvat (fluks), $\underline{\Psi}_m$ glavni fluks, $\underline{\Psi}_\sigma$ rasipni fluks, f_1 primarna frekvencija ili učestanost, $\omega_1 = 2\pi f_1$ sinhrona kružna frekvencija obrtnog polja statora, ω_1 ili $\Delta\omega_1$ promena kružne frekvencije obrtnog polja statora, ω ugaona brzina rotora u pogonskoj tački, ω ili $\Delta\omega$ promena ugaone brzine rotora, φ_r ili $\Delta\varphi_r$ promena ugaonog položaja rotora, ω_k ugaona brzina zajedničkog koordinatnog sistema, ω kružna frekvencija električnih ili mehaničkih oscilacija, M_n nominalni moment, m ili Δm promena momenta motora, m_t ili Δm_t promena momenta tereta, P_n nominalna snaga, p promena snage motora, J moment tromosti motora, J_t moment tromosti tereta, T_z vremenska konstanta zaleta, S klizanje te s Laplaceov operator, $l_s(s)$ operatorska induktivnost asinhronog motora.

Osnovne jednačine

U radu su uzete sledeće pretpostavke za uprošćivanje analize sistema: Sinusna raspodela polja duž vazdušnog procepa, simetrična mašina bez nulte komponente struje u zvezdi motora, konstantno zasićenje mašine, zanemarenje trenja i ventilacije, kapacitivnosti, gubitaka u gvoždju i dodatnih gubitaka, skoncentrisanost i konstantnost parametara, razmatranje dvopolne mašine, na koju se redukuju mašine sa više pari polova.

Sve zavisnosti definišemo u opštem koordinatnom sistemu, koji je zajednički za statorske i za rotorske veličine te se obrće sa ugaonom brzinom ω_k (sl. 1), dok se rotor mašine obrće brzinom ω . Pripadajuće relacije:

$$w_k = \frac{dx_k}{dt}, \quad w = \frac{dx}{dt}, \quad w_k - w = \omega_1$$

Za asinhronu mašinu su merodavne sledeće jednačine:

$$\underline{u}_s = \underline{i}_s \underline{R}_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt} + j w_k \underline{\psi}_s \quad (1a)$$

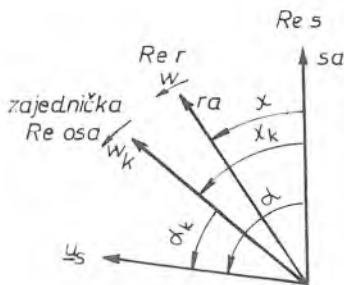
$$\underline{u}_r = \underline{i}_r \underline{R}_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt} + j (w_k - w) \underline{\psi}_r \quad (1b)$$

$$\underline{\psi}_s = L_s \underline{i}_s + L_m \underline{i}_r \quad L_s = L_{os} + L_m \quad (1c)$$

$$\underline{\psi}_r = L_m \underline{i}_s + L_r \underline{i}_r \quad L_r = L_{or} + L_m \quad (1d)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{m - m_t}{J} \quad (2a) \quad m = \underline{\psi}_s \times \underline{i}_s = I_m \{ \underline{\psi}_s^* \underline{i}_s \} \quad (2b)$$

Jednačine 1 i 2 opisuju sistem sa pet skladišta energije, četiri elektromagnetna i jedno mehaničko. Kada se u prelaznim stanjima menja brzina obrtanja, sistem ovih jednačina je nelinearan. Izvodjenje će biti jednostavnije, ako je u jedn. (1a) brzina w_k rotirajućeg koordinatnog sistema konstantna, dakle $w_k = \text{konst.}$ te je u jedn. (1b) $w_k - w = \text{konst.}$, što znači, da je relativna brzina zajedničkog koordinatnog sistema prema rotoru konstantna.



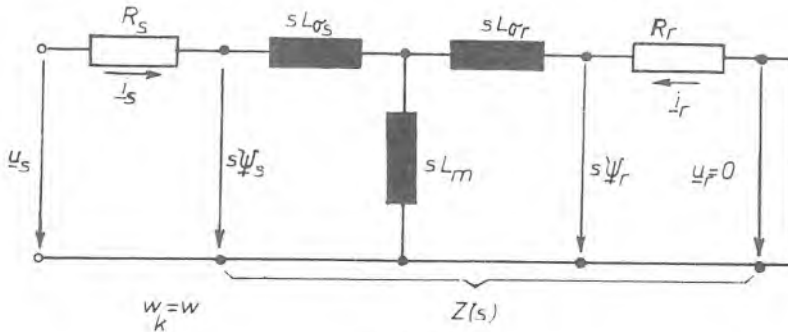
Sl. 1

Posle Laplaceove transformacije, jedn. (1a) i (1b) dobije se (sa jednakim oznakama za transformisane veličine kao za vremensko promenljive):

$$\underline{u}_s = \underline{i}_s R_s + (s + j w_k) \underline{\psi}_s \quad w_k = \text{konst} \quad (3a)$$

$$\underline{u}_r = \underline{i}_r R_r + |s + j(w_k - w)| \underline{\psi}_r \quad w_k - w = \text{konst} \quad (3b)$$

Pomoću jed. (3a), (3b), (1c) i (1d) moguće je izvesti operatorski ekvivalentni spoj asinhronne mašine sa kaveznim rotorom (sl. 2)



Sl. 2

Značajno pojednostavljenje proračuna donosi uvođenje pojma rezultirajuće operatorske impedancije iza otpornosti statora R_s :

$$Z_s(s) = \frac{s \underline{\psi}_s}{\underline{i}_s} = s L_{\sigma s} + \frac{s L_m (s L_{\sigma r} + R_r)}{s L_m + s L_{\sigma r} + R_r}$$

odn. operatorske induktivnosti asinhronne mašine:

$$l_s(s) = \frac{\underline{\psi}_s}{\underline{i}_s} = L_{\sigma s} + \frac{L_m (s L_{\sigma r} + R_r)}{s L_m + s L_{\sigma r} + R_r} \quad (4)$$

koja u odabranom koordinatnom sistemu $w_k - w = \text{konst} = W_1 - W$ glasi:

$$l_s(s) = \frac{\underline{\psi}_s}{\underline{i}_s} = L_s \frac{1 + |s + j(W_1 - W)| T_r'}{1 + |s + j(W_1 - W)| T_{ro}} \quad (5)$$

Operatorska induktivnost $l_s(s)$ daje tokom čitavog tranzijent-

nog procesa važeću zavisnost izmedju struje statora $\underline{i}_s$ i fluksa statora $\underline{\psi}_s$.

Strukturna shema asinhronne mašine kod promene amplitude i frekvencije napona na stezaljkama.

U koordinatnom sistemu w_k - w = konst ima jednačina statorskog napona posle promene iznosa za vrednost a i faznog položaja za vrednost φ_s oblik:

$$u'_s = \underline{U}_s e^{jW_1 t} (1+a) e^{j\varphi_s} e^{-jx_k} = \underline{U}_s (1+a) e^{j(\varphi_s - \varphi_r)}$$

pošto je $x_k = \int w_k dt = W_1 t + \varphi_r$.

Promena statorskog napona sa zanemarenjem dvostruko malenih veličina biće:

$$\Delta \underline{u}_s = \underline{u}'_s - \underline{u}_s = \underline{U}_s |a + j(\varphi_s - \varphi_r)| \quad (6)$$

Naponska jednačina statorskog kola glasi:

$$\underline{u}_s = \underline{i}_s R_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt} + j(W_1 + \frac{d\varphi_r}{dt}) \underline{\psi}_s$$

$$\text{pošto je } w_k = W_1 + \frac{d\varphi_r}{dt} \text{ i } \frac{d\varphi_r}{dt} = w$$

a kod malih promena je:

$$\Delta \underline{u}_s = \Delta \underline{i}_s R_s + d \frac{\Delta \underline{\psi}_s}{dt} + j W_1 \Delta \underline{\psi}_s + j \frac{d\varphi_r}{dt} \underline{\psi}_s$$

Sa primenom operatorske induktivnosti prema jedn. (5) u izrazu $\Delta \underline{\psi}_s = l_s(s) \Delta \underline{i}_s$, dobija se za promenu statorske struje

$$\Delta \underline{i}_s = \frac{\Delta \underline{u}_s - j \underline{\psi}_s s \varphi_r}{Z_s(s)} \quad (7)$$

gde je $Z_s(s) = R_s + (s + jW_1)l_s(s + jW_1 - jW)$.

Za moment mašine važi jedn. (2b), te se dobija kod malenih promena oko pogonske tačke:

$$\Delta m = \Psi_s \times \Delta \underline{i}_s + \Delta \underline{\psi}_s \times \underline{I}_s = \underline{\Psi}_s \times \Delta \underline{i}_s - \underline{I}_s \times \Delta \underline{\psi}_s$$

$$\Delta m = \operatorname{Re} \{ -j \underline{\Psi}_s^* \Delta \underline{i}_s - (-j \underline{I}_s^* \Delta \underline{\psi}_s) \}$$

Sa primenom operatorske induktivnosti prema jedn. (5) za $\Delta \underline{\psi}_s = l_s(s) \Delta \underline{i}_s$, dobije se promena momenta

$$\Delta m = \operatorname{Re} \{ \Delta \underline{i}_s [-j \underline{\Psi}_s^* + j \underline{I}_s^* l_s(s + jW_1 - jW)] \} \quad (8)$$

Dalje važe jednačine:

$$\Delta w = \frac{\Delta m - \Delta m_t}{s J} \quad (9)$$

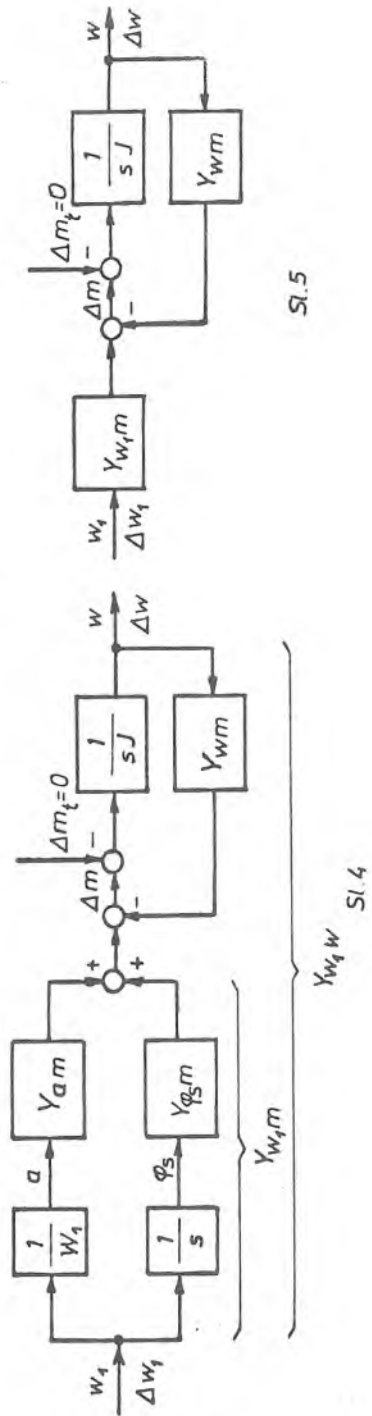
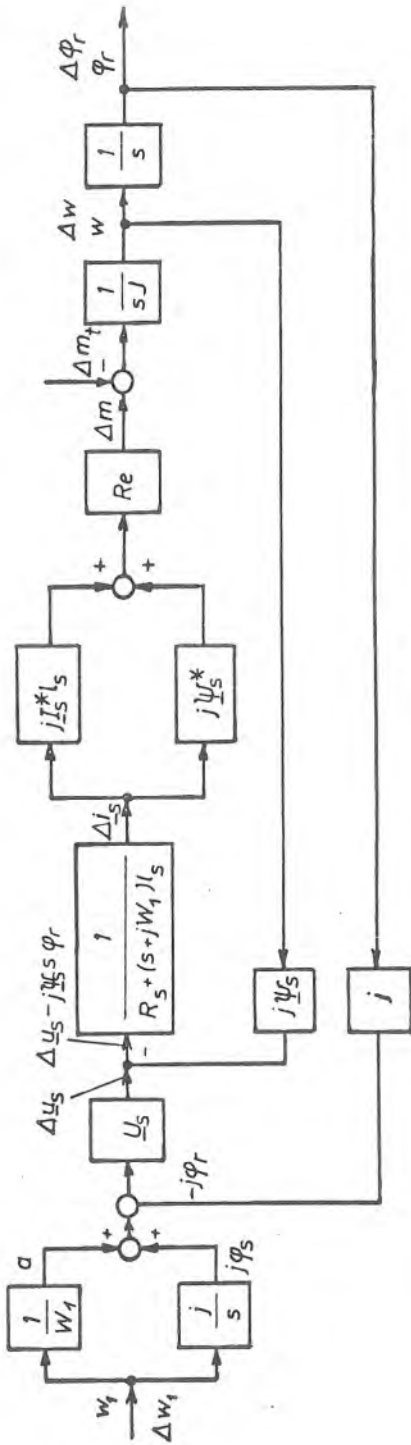
$$\varphi_r = \frac{1}{s} w \quad \text{odn.} \quad \Delta \varphi_r = \frac{1}{s} \Delta w \quad (10)$$

$$j \varphi_s = \frac{j}{s} w_1 \quad (11) \quad a = \frac{w_1}{W_1} \quad (12)$$

Na osnovu jedn. (6) do (12) može se nacrtati kompleksna strukturna shema asinhronne mašine (sl. 3). Da bi se olakšao daljnji proračun, smatraćemo promenu momenta motora kao da se formiše iz signala a , φ_s i $w = s\varphi_r$:

$$\Delta m = Y_{am} a + Y_{\varphi sm} \varphi_s + Y_{wm} w \quad (13)$$

gde su Y_{am} , $Y_{\varphi sm}$ i Y_{wm} prenosne funkcije sa prvo naznačenom veličinom kao ulaznom i drugo naznačenom veličinom kao izlaznom veličinom, u indeksu. Blok shema mašine će s time dobiti oblik prema sl. 4.



Proračun prenosnih funkcija asinhronne mašine

Iz strukturne sheme asinhronog motora prema sl. 3 mogu se računati prenosne funkcije Y_{am} , $Y_{\varphi sm}$, Y_{wm} i $Y_{w_1 w}$, prikazane u blok shemi na sl. 4. Funkciju Y_{wm} računamo tako, da postavimo signale a te φ_s jednake nuli, dakle $a = 0$ i $\varphi_s = 0$. Slično dobijemo funkciju Y_{am} sa $\varphi_s = 0$ i $w = s\varphi_r = 0$ odn. $\varphi_r = 0$ te funkciju $Y_{\varphi sm}$ uz uslov $a = 0$ i $w = s\varphi_r = 0$ odn. $\varphi_r = 0$. Zbog ograničenog prostora dajemo samo rezultate proračuna:

$$Y_{wm} = \frac{\Delta m}{\Delta w} = -K_1 \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}{d_0 + d_1 s + d_2 s^2 + d_3 s^3 + d_4 s^4} \quad (14)$$

$$Y_{am} = \frac{\Delta m}{a} = -K_2 \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3}{d_0 + d_1 s + d_2 s^2 + d_3 s^3 + d_4 s^4} \quad (15)$$

$$Y_{\varphi sm} = \frac{\Delta m}{\varphi_s} = -K_2 \frac{c_0 + c_1 s + c_2 s^2 + c_3 s^3}{d_0 + d_1 s + d_2 s^2 + d_3 s^3 + d_4 s^4} \quad (16)$$

gde su sačiniooci:

$$K_1 = \frac{|\psi_s|^2 T_r' (1-\sigma)}{R_s T_s' (1+r^2)} ; \quad K_2 = \frac{|\psi_s|^2 (1-\sigma)}{R_s T_s' (1+r^2)} ; \quad \text{te je } r = (W_1 - W) T_s'$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \sigma^2 + t_1^2 - t_1^2 r^2 - r^2 ; & a_1 &= 2\sigma T_s' + \sigma T_r' - 2r^2 T_s' + t_1^2 T_r' \\ a_2 &= T_r' + T_s' + \sigma T_r' - r^2 T_s' ; & a_3 &= T_s'^2 T_r' ; \quad \text{gde je } t_1 = W_1 T_s' \\ b_0 &= 2(r^3 + r\sigma^2 + r t_1^2 + 2r^2 t_1 - 2r^2 \sigma t_1 + r^3 t_1^2) \\ b_1 &= 2(r\sigma T_s' + r\sigma T_r' + r t_1^2 T_r' + r^3 T_s') \\ b_2 &= r T_s' T_r' + r\sigma T_s' T_r' + r t_1^2 T_r'^2 + r T_r'^2 - r^2 t_1 T_s' T_r' + t_1 T_s' T_r' + t_1 T_r'^2 - \sigma t_1 T_r'^2 \\ b_3 &= r T_s' T_r'^2 + t_1 T_s' T_r'^2 \end{aligned} \quad (17)$$

$$c_0 = 0 ; \quad c_1 = \sigma^2 T_r' + t_1^2 T_r' - 2rt_1 T_s' - 2r^2 T_s' - r^2 t_1^2 - r^2 T_r' + 2r^2 \sigma T_s' - 2r^3 t_1 T_s'$$

$$c_2 = \sigma T_s' T_r' + \sigma T_r'^2 + t_1^2 T_r'^2 - 2rt_1 T_s' - r^2 T_s' T_r'$$

$$c_3 = \sigma T_s' T_r'^2 - rt_1 T_s' T_r'^2$$

$$d_0 = \sigma^2 + t_1^2 + 2t_1 r - 2t_1 \sigma r + t_1^2 r^2 + r^2 ; \quad d_1 = 2(\sigma T_s' + \sigma T_r' + r^2 T_s' + t_1^2 T_r')$$

$$d_2 = T_s'^2 + r^2 T_s'^2 + 2\sigma T_s' T_r' + 2 T_s' T_r' + t_1^2 T_r'^2 + T_r'^2 ; \quad d_3 = 2(T_s'^2 T_r' + T_s' T_r'^2)$$

Sve tri prenosne funkcije prema jedn. (14) do (16) imaju jednak imenitelj (karakterističnu jednačinu) četvrtog stepena

$$D(s) = d_0 + d_1 s + d_2 s^2 + d_3 s^3 + d_4 s^4.$$

Detaljnija analiza je pokazala, da pripada ovoj karakterističnoj jednačini dva para konjugovano kompleksnih polova odnosno četiri pola:

$$s_{1,2} \approx -\frac{1}{T_r'} \pm j SW_1 \quad (18a)$$

$$s_{3,4} \approx -\frac{1}{T_s'} \pm j W_1 \quad (18b)$$

Položaj ovih polova u kompleksnoj ravni određuje karakter elektromagnetnih prelaznih procesa asinhronog motora. Polovi $s_{1,2}$ odnose se npr. na slobodne jednosmerne komponente rotorske struje a polovi $s_{3,4}$ statorske struje. Konkretni proračuni su pokazali da predstavlja asinhroni motor sistem 0-tog reda sa jakim, malo prigušivanim oscilacijama.

Za regulaciju brzine obrtanja važno je poznavati ponašanje motora kod konačne promene primarne frekvencije, narinute od strane tiristorskog pretvarača. U ovu svrhu je potrebno odrediti prenosnu funkciju $Y_{w_1 w}$, što je moguće izvesti na osnovu blok sheme na sl. 4:

$$Y_{w_1 m} = \frac{Y_{am} a + Y_{\varphi s m} \varphi_s}{w_1}$$

Kod istovremene i proporcionalne promene statorskog napona U_s i primarne frekvencije $f_1 = \omega_1 : 2\pi$ važi:

$$a = \frac{aU_s}{U_s} = \frac{d\varphi_s/dt}{\omega_1} = \frac{\omega_1}{\omega_1} ; \quad \varphi_s = \frac{\omega_1}{s}$$

dakle je

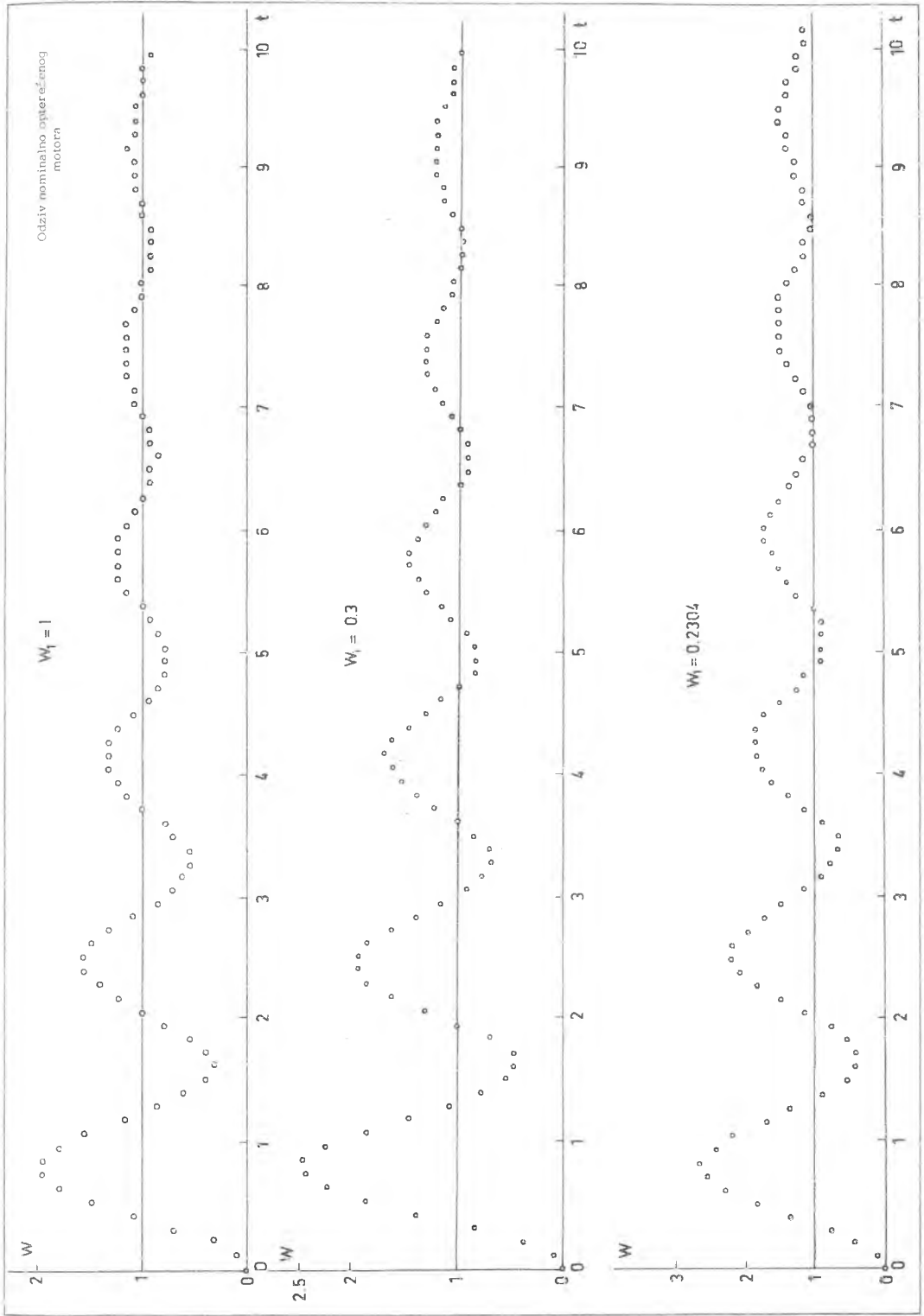
$$Y_{\omega_1 m} = \frac{Y_{am} \frac{\omega_1}{\omega_1} + Y_{\varphi s m} \frac{\omega_1}{s}}{\omega_1} = \frac{Y_{am}}{\omega_1} + \frac{Y_{\varphi s m}}{s}$$

S time dobije blok shema motora oblik prema sl. 5 iz koje sledi rezultirajuća prenosna funkcija:

$$Y_{\omega_1 \omega} = Y_{\omega_1 m} \frac{\frac{1}{sJ}}{1 - \frac{1}{sJ} Y_{wm}} = Y_{\omega_1 m} \frac{1}{sJ - Y_{wm}}$$

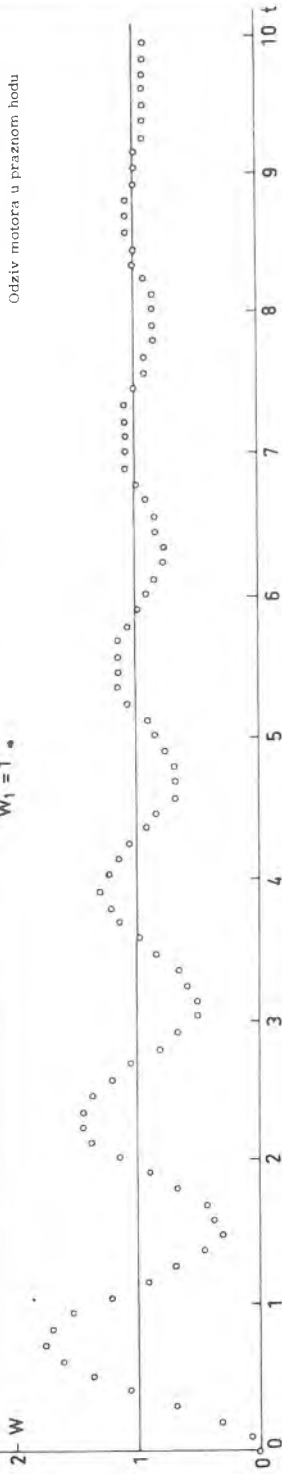
$$Y_{\omega_1 \omega} = \left(\frac{Y_{am}}{\omega_1} + \frac{Y_{\varphi s m}}{s} \right) \frac{1}{sJ - Y_{wm}} \quad (19)$$

Ova prenosna funkcija pri zadatim početnim uslovima te usvojenim pretpostavkama u potpunosti određuje zakon promene brzine obrtanja kod odskočne promene primarne frekvencije i statorskog napona asinhronog motora kao sistema sa pet skladišta energije. Slično je moguće pomoću strukturne sheme računati promenu momenta m , struje itd. pri promeni vodeće veličine. Za proračun dinamičnog odziva motora kod promene momenta tereta ova prenosna funkcija nije upotrebljiva, pošto tada uslov $\omega_k - \omega = \text{konst.}$ nije ispunjen. U ovom slučaju se preporučuje izvršiti proračun u koordinatnom sistemu, rotirajućem sinhrono sa obrtnim poljem statora, kada je $\omega_k = \omega_1$.

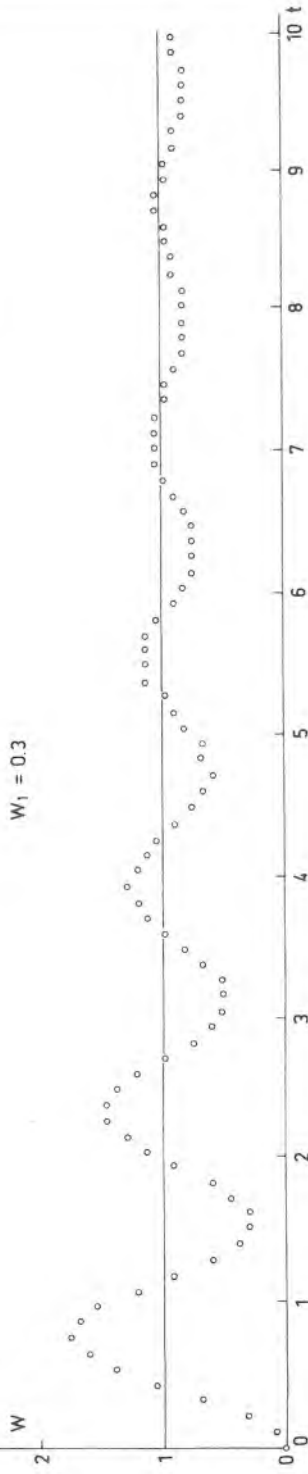


Odziv motora u praznom hodu

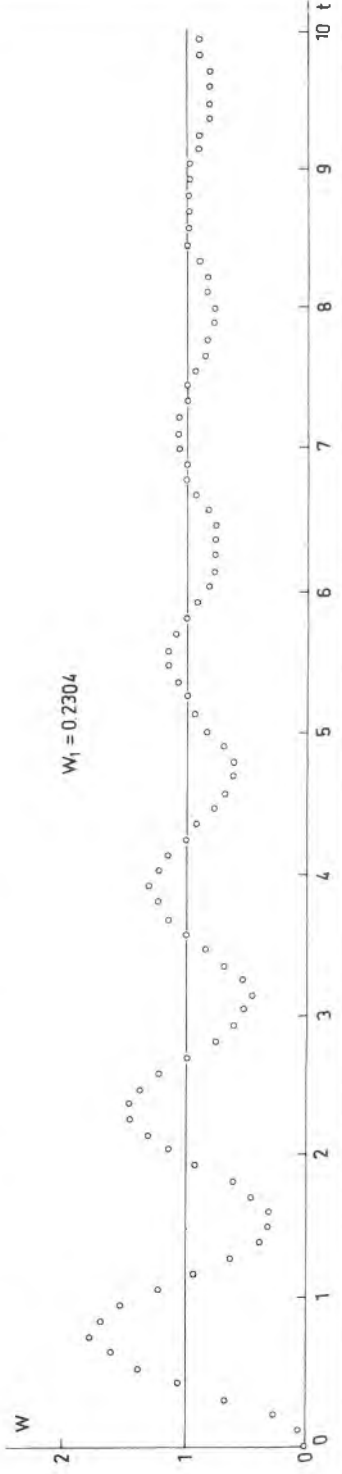
$W_1 = 1$



$W_1 = 0.3$



$W_1 = 0.2304$



L i t e r a t u r a

- /1/ H.Bühler: Umrichter gespeiste Antriebe mit Asynchronmaschinen, Neue Technik, Zürich, Nr. 4/1974 str. 134
- /2/ T.A.Lipo, P.C.Krause: Stability Analysis of a Rectifier-Inverter Induction Motor Drive IEEE Transactions, Vol.PAS-88, No.1, Jan. 1969
- /3/ K.P.Kovács, I.Rácz: Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen, Band I und II, Verlag der ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest 1959
- /4/ I.Rácz: Primena trofaznih (Parkovih) vektora za analizu strujnih kola sa tiristorima. Prvo savetovanje Energetska elektronika, Beograd 1973, Zbornik radova
- /5/ I.Rácz: Dynamic Behaviour of Inverter controlled Induction Motors, IFAC-Symposium 1965, paper 4.B, session 4.
- /6/ I.Rácz: Automatizált villamos hajtások (Automatizovani električni pogoni), Izd. Tankönyvkiadó, Budapest 1970.

Napomena

U Laboratoriji za analognu i hibridnu računsku tehniku Fakulteta za elektrotehniku u Ljubljani u toku je simulacija sistema konkretnog motora prema opisanom modelu te će se na Simpoziju referisati o postignutim rezultatima.



Dr Petar N. Miljanić,
Dr Đorđe D. Kalić,
Elektrotehnički institut
"Nikola Tesla", Beograd

PODSINHRONA TIRISTORSKA KASKADA: ISKUSTVA U PRIMENI KRATKOSPAJAJUĆIH INVERTORA

Izložen je princip rada podsinkrone kaskade kod koje se energija klizanja asinkronog motora vraća u mrežu pomoću kratkospajajućeg invertora i na taj način reguliše brzina obrtanja. Navedeni su industrijski pogoni kod kojih primena ovakve kaskade ima izrazita preimućstva u odnosu na druga rešenja. Posebno se razmatra rad kratkospajajućeg invertora i ukazuje na (1) smanjenje potrošnje reaktivne snage, (2) smanjenje instalacione snage kablova, prekidača i transformatora, (3) uticaj sadržaja viših harmonika i (4) jednostavnost upravljanja. Izlaže se blok šema kaskade i daju osnovne jednačine za proučavanje dinamike pogona. Na kraju je prikazano iskustvo Instituta "Nikola Tesla" sa desetak uređaja u raznovrsnim pogonima: laboratorije za ispitivanje hidrauličnih pumpi i motora, crpne stanice gradskog vodovoda, cirkulaciona postrojenja u toplanama. Snage regulisanih motora se kreću od 11 kW do 415 kW.

SUBSYNCHRONOUS THYRISTOR CASCADE - EXPERIENCES IN THE APPLICATION OF SHORT-CIRCUIT INVERTERS

The principle of operation of a subsynchronous cascade is shown; here the asynchronous motor slip energy returns to the network by a short-circuit inverter and, thus, regulates the speed of rotation. Industrial drives are listed where the application of such cascades offers marked advantages over other designs. The operation of the short-circuit inverter is considered in particular, and the following features are pointed out: 1/ reduction of creative power consumption; 2/ reduction of rated cable, circuit breaker and transformer

capacity; 3/ impact of higher harmonics content; 4/ simple control. The block schematic of the cascade is shown, and the basic equations for the study of drive dynamics listed.

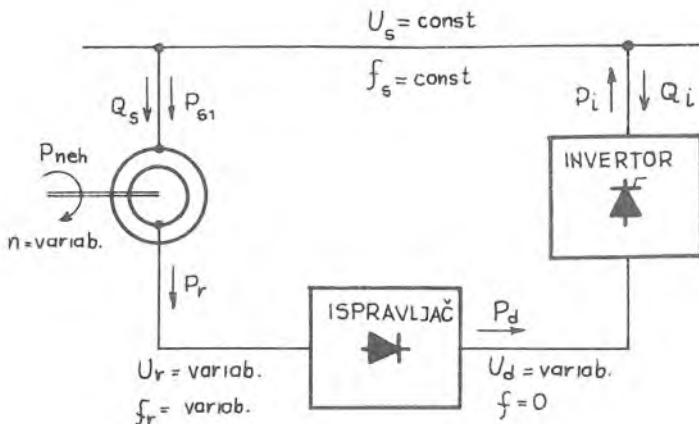
The experience of the Nikola Tesla Electrical Engineering Institute is reviewed finally, involving a variety of applications and drives: hydraulic pump and motor testing laboratories; pumping stations of the city water supply system; circulation plants in heating stations. The power ratings of the controlled motors are in the 11 to 415 kW range.

1. Uvod

Statičke podsinkrone kaskade se sve češće primenjuju pri regulaciji brzine asinhronih motora. Namera autora je da u ovom radu prikažu iskustva stečena na osnovu niza realizacija originalnih konstrukcija kaskada, u kojima se primenjuje mrežom komutujući inverter sa kratkim spajanjem na jednosmernoj strani [1]. Dosad stečeno iskustvo omogućilo je više uporednih i pratećih analiza [2,3,4].

Princip rada podsinkrone kaskade je, kao što je poznato, sledeći. Kada se elektromotornoj sili rotora asinhronog motora, koja je srazmerna s klizanjem, suprotstavi jedan spoljni napon /sl. 1/, brzina motora će opadati sve dok se ne uspostavi nova naponska ravnoteža. Pošto je, s druge strane, momenat na vratilu približno linearna funkcija struje rotora, ograničavanjem struje postići će se i ograničenje momenta. Stoga je moguće da se, regulisanjem napona i struje rotora, regulišu kako brzina tako i momenat. Radi ekonomičnosti, snagu rotora treba vratiti u mrežu, što nije jednostavno, jer ni napon ni učestanost rotora nisu konstantni. Stoga se rotorske struje ispravljaju i tako dobijena jednosmerna struja se preko tiristorskog invertora pretvara u struju čija je učestanost jednaka mrežnoj. Prilagođenje promenljivog napona rotora stalnom naponu mreže postiže se menjajući ugao paljenja tiristora.

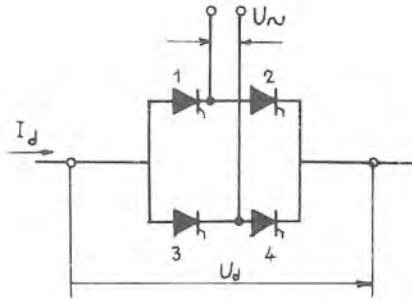
Skoro svi konstruktori ovakvih uređaja upotrebljavaju



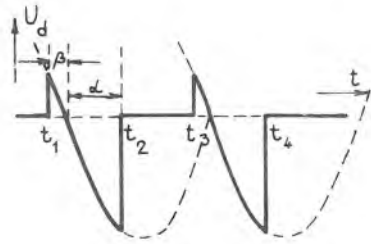
SLIKA 1.

trofazne konvertore koji rade u invertorskom režimu. Pri manjim brzinama, kada je ispravljeni napon rotora velik, faktor snage pretvarača je dobar; na većim brzinama, međutim, kada je ovaj napon mali ili jednak nuli i kada se malo ili nimalo energije vraća u mrežu, faktor snage postaje vrlo loš i mreža se, bez potrebe, opterećuje reaktivnom strujom. Upotrebom kratkospajajućeg invertora mogu se postići znatne uštede u reaktivnoj snazi kao i drugi korisni efekti.

U ovom invertoru se, u svakoj poluperiodi, smenjuju intervali invertorskog rada i intervali kratkog spoja. Nasuprot klasičnom invertoru kod koga se pomeraju impulsi svihtiristora mosta na isti način, kod kratkospajajućeg invertora jedna polovina tiristora dobija impulse čiji se fazni stav ne menja, a protok energije se reguliše faznim pomeranjem impulsa druge polovine tiristora. Na tiristore 1 i 3 /sl.2/ dovode se nepomični impulsi koji se pojavljuju neposredno pred kraj pozitivne poluperiode, u trenutku t_1 i t_3 /sl.3/. Impulsi na tiristorima 2 i 4 menjaju svoj položaj u odnosu na sinusoidu mrežnog napona, recimo u intervalu od 20 do 160 električnih stepeni, tj. pojavljuju se u trenucima t_2 i t_4 . Ovakav način paljenja dovodi do kratkotrajnih kratkih spojeva, posmatrano sa jednosmerne strane. Odnos intervala inverzije prema intervalu kratkog spoja određuje veličinu jednosmernog napona koji se suprotstavlja isprav-



SLIKA 2.



SLIKA 3.

ljenjoj elektromotornoj sili rotora.

Lako se može uvideti da ne postoji velika reaktivna struja, kada je jednosmerni napon blizak ili jednak nuli, jer tada jednosmerna struja rotora ide praktično sva samo kroz jednosmerno kolo i skoro da ne prolazi kroz mrežu naizmjenične struje.

2. Primene

Podsinkrone tiristorske kaskade našle su primenu prvenstveno kod motora velikih snaga i kod pogona gde je opseg brzine koja se reguliše mali, recimo od 70 do 100%, ili drukčije izraženo 1 : 1,4. Tada je instalisana snaga uređaja za regulisanje brzine relativno mala jer je srazmerna sa klizanjem / u uzetom primeru iznosi 30% od snage motora/ što je ekonomski veoma povoljno.

Ovakvi pogoni se nalaze u sledećim oblastima industrije:

- u komunalnim postrojenjima, kao što su vodovodi i toplane; koriste se za crpke koje napajaju vodovodnu mrežu, odnosno služe za cirkulaciju tople vode;
- u sistemima za navodnjavanje zemljišta, takođe za crpke;
- u elektranama, za crpke, ventilatore i mlinove uglja;
- u industriji cementa, za drobilice i mlinove;
- u rudarskoj industriji, za ventilatore za provetranje, crpke za isušivanje podzemnih tunela i kompresore;

- u metalurgiji za pogon raznih ventilatora, i drugde.

U Institutu "Nikola Tesla" je još 1964. godine ostvarena regulacija brzine elektromotora od 1,7 kW uz upotrebu novog sistema sa kratkim spajanjem, posle čega je izrađen niz uređaja za primenu u industriji. Najpre je napravljen niz uređaja za potrebe ispitne laboratorije Fabrike pneumatskih i hidrauličnih uređaja "Prva petoletka" u Trsteniku. Glavne karakteristike ovih kaskada jesu: puni dijaazon regulacije brzine /od nule do nominalne/, mogućnost generatorskog rada /elektrodinamičko kočenje jednosmernim pobudjivanjem statora i vraćanjem energije u mrežu sa istim inverterom kao u motorskom radu/, i mogućnost priključenja više motora /sukcesivno, ne istovremeno/ na jedan tiristorski uređaj. Ovaj niz uređaja prekrivao je nominalne snage motora od 8 kW do 125 kW, pri čemu su upotrebljena samo tri tipa statičkih pretvarača, urađena u po dva primerka. Sažeti opisi ovih uređaja dati su na više mesta [5, 6].

Za razliku od gore opisanih uređaja, koji se opterećuju raznim pumpama, ventilatorima ili pokreću hidromotorima, uređaji o kojima će sada biti reči, namenjeni su samo jednoj primeni - pogonu crpki, bilo za napajanje gradske vodovodne mreže, bilo za cirkulaciju tople vode pri daljinskom grejanju prostori-ja iz toplane. Ovakvi statički tiristorski uređaji imaju dakle zadatak da rade praktično bez prestanka u pogonu tako važnih komunalnih objekata kakvi su vodovod i grejanje. To znači da je i pouzdanost izrade i pouzdanost i trajnost komponenata od izvanrednog značaja.

1973. godine pušteno je u rad postrojenje u vodovodu grada Pančeva. Tokom 1975. godine izrađena su tri uređaja za regulaciju brzine cirkulacionih crpki. Dve statičke podsinkrone kaskade su u Beogradu /Toplana "Konjarnik"/, a jedna u Novom Sadu /Toplana "Jug"/. Snaga zatvorenih asinhronih motora, sa naponom 3 x 380 V, u ovim komunalnim primenama varirala je od 220 do 415 kW, a opseg regulacije brzine od 75 do 100% ili od 80 do 100%.

Sva ova postrojenja imaju sledeće zajedničke glavne crte:

Rotorske struje se ispravljaju pomoću diodnog trofaznog

mosta a inverter se gradi rednim spajanjem 2 ili 3 monofazna mosta, što zavisi od toga da li se energija vraća u mrežu pomoću prilagodnog trofaznog transformatora ili Skotovih transformatora. Između ovih poluprovodničkih pretvarača, u jednosmernom kolu, nalazi se prigušnica za ograničavanje struje pri kratkom spoju invertora i akumulaciju energije koja tada pristiže iz rotora. Dioda i tiristori hlade se prisilnim strujanjem vazduha iz jednog ventilatora. Primenjene su, pored uobičajene prenaponske i ureko-strujne zaštite, još i zaštita od ispada ventilatora za hladjenje energetskih poluprovodnika, zaštita od prevelikog klizanja rotora i zaštita od nesimetrije napona napajanja.

Automatski regulator brzine je dvoslojni, sa ograničenjem struje i uglova paljenja tiristora, a izrađen je u tehnici tranzistora i integrisanih kola. Tahogenerator je montiran na motor i daje signal brzine u vidu jednosmernog napona. Signal rotorske struje dobija se pomoću transduktorskog strujnog transformatora. Kod ovih kaskada struja rotora nije proporcionalna mrežnoj struji invertora pa se zbog toga ne mogu koristiti obični strujni transformatori.

Pored automatskog upravljanja iz regulatora pritiska ili protoka koji ostvaruje crpka, i koji je nadređen spomenutom regulatoru brzine tako da se dobija troslojni regulator, predviđena je i mogućnost ručnog menjanja referentne brzine iz komandne sale.

3. Neke osobine kaskade sa kratkospajajućim inverterom

3.1. Reaktivna snaga

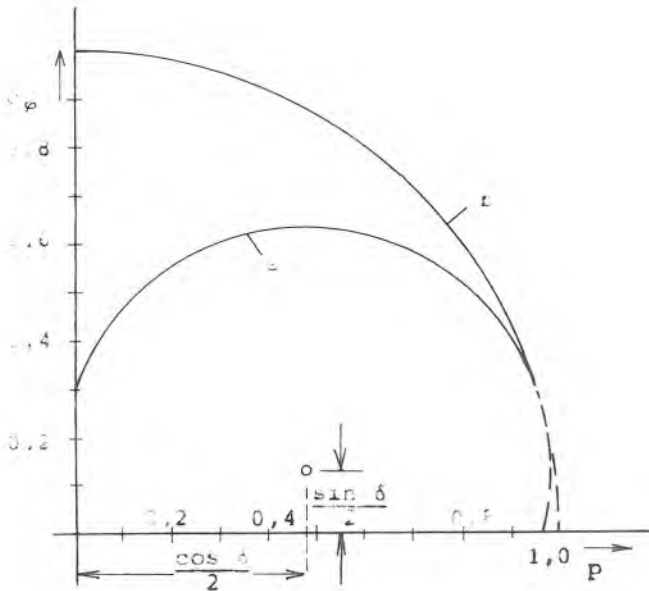
Bitna prednost kratkospajajućeg invertora u poređenju sa klasičnim inverterom se manifestuje smanjenjem potrošnje reaktivne snage. Ovo osobito dolazi do izražaja pri malim klizanjima, tj. pri malim rotorskim naponima. Bliže razmatranje ovih odnosa, izvedeno je u radu [4], i to za sledeće slučajeve:

/a/ - konstantan momenat opterećenja kada rotorska struja ne zavisi od brzine, i

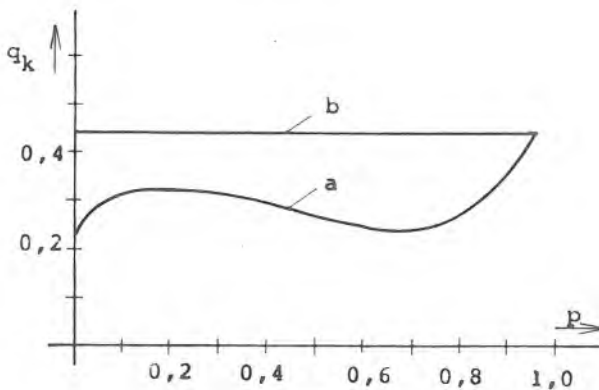
/b/ - otporni momenat zavisi od kvadrata brzine, odnosno struja rotora raste srazmerno kvadratu brzine.

Posebno je posmatrana reaktivna snaga usled faznog pomeraja, a posebno usled viših harmonika. I jedna i druga kompo-

nenta su kod kratkospajajućeg invertora manje nego kod klasičnog. Zavisnosti relativnih vrednosti reaktivne q i aktivne p snage su prikazane na sl. 4, odnosno sl. 5, gde je sa a označen



sl. 4.



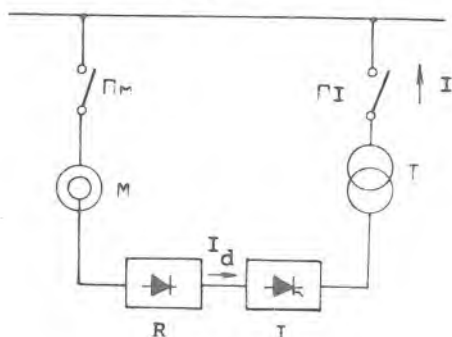
sl. 5.

kratkospajajući, a sa b klasični inverter. Ovi dijagrami važe za konstantnu struju rotora. Za slučaj kada je struja srazmerna sa kvadratom brzine, maksimum krive a na sl.4 smanjuje se za oko 19% /u slučaju maksimalnog klizanja od 25%/. Ovo važi samo za kratkospajajući inverter, jer za klasični /krive b / maksimum na sl.4 ostaje nepromenjen.

3.2. Instalisane snage na naizmeničnoj strani

Kod kratkospajajućeg invertora može se izvući još jedna korist u slučaju kada momenat opterećenja nije konstantan, nego srazmeran, na primer, sa kvadratom brzine. Struja rotora, tj. momenat opterećenja, ima najveću vrednost pri nominalnoj, tj. maksimalnoj brzini, a oboje opadaju kada se brzina smanjuje.

Već je rečeno da naizmenična struja invertora ima najmanje trajanje pri maksimalnoj brzini, a najveće pri najmanjoj brzini za koju je uređaj predviđen. Ako se sad uzme u obzir da amplituda opada sa brzinom, doći će se do zaključka da se maksimalna vrednost naizmenične struje ne poklapa sa najvećom strujom rotora, već da se nalazi negde između maksimalne i minimalne brzine obrtanja rotora. Zahvaljujući tome mogu se primetno smanjiti instalacione snage transformatora T , prekidača Π_I i poveznih kablova invertora sa naizmenične strane /sl.6/, što je detaljno obrađeno u [4]. U tamo iznetom primeru, za maksimalno klizanje



Sl. 6.

0,25, dobija se relativna efektivna vrednost struje, koja se vraća u mrežu nešto ispod 50% od vrednosti struje, kada je motor opterećen konstantnim momentom, odnosno kada se primeni klasični unos-to kratkospajajućeg invertora.

3.3. Pulsacioni momenti usled viših harmonika struje rotora

Uticaj viših harmonika struje stvorenih dejstvom ispravljača, tretiran je u literaturi [7]; o uticaju viših harmonika rotorske struje usled izobličenja koje unosi inverter i o njihovoj interakciji sa harmonicima prve vrste referisali su autori [3]. Komponente obrtnog momenta usled vremenskih harmonika mogu se, slično onima usled prostornih harmonika podeliti na asinhronne i sinhronne. Poslednji mogu biti neprijatni u pogonu, jer dovode do njihanja rotora u blizini individualne sinhronne brzine, i u istom taktu oscilacije aktivne i reaktivne snage, što se i na instrumentima primećuje. Iako regulator brzine, prema našim iskus-

tvima, može da savlada ove teškoće, korisno je ukazati kako se izračunavaju brzine u čijoj okolini može doći do njihanja.

Najveći harmonici usled prisustva ispravljača su 1., 5., 7., 11. i 13. Najpre se izračuna njihova brzina obrtanja u odnosu na rotor, pa joj se doda brzina rotora i tako dobija brzina obrtanja komponentnih obrtnih polja u odnosu na stator, vodeći računa o smerovima.

Što se tiče harmonika usled dejstva invertora, pokazano je [3] da su najznačajniji oni čija je učestanost $f_1 \pm f_r k$, gde su f_1 i f_r učestanosti osnovne pulsacije naizmenične komponente usled invertora /200 Hz za dvofazni i 300 Hz za trofazni most/ odnosno osnovna učestanost rotora, a k neparan ceo broj nedeljiv sa tri. Pomoću ovih podataka sračunavaju se brzine pojedinih obrtnih polja.

Izjednačavajući brzine pojedinih parova ovih obrtnih polja, formiranih iz obe ove grupe, dobijaju se "sinhrone" brzine, pri kojima dolazi do relativnog mirovanja dva obrtna polja istog broja parova polova. U blizini ovih brzina, sa obe strane, dolazi do njihanja, odnosno oscilacija snage, koje su utoliko značajnije utoliko su harmonici koji ih stvaraju veći.

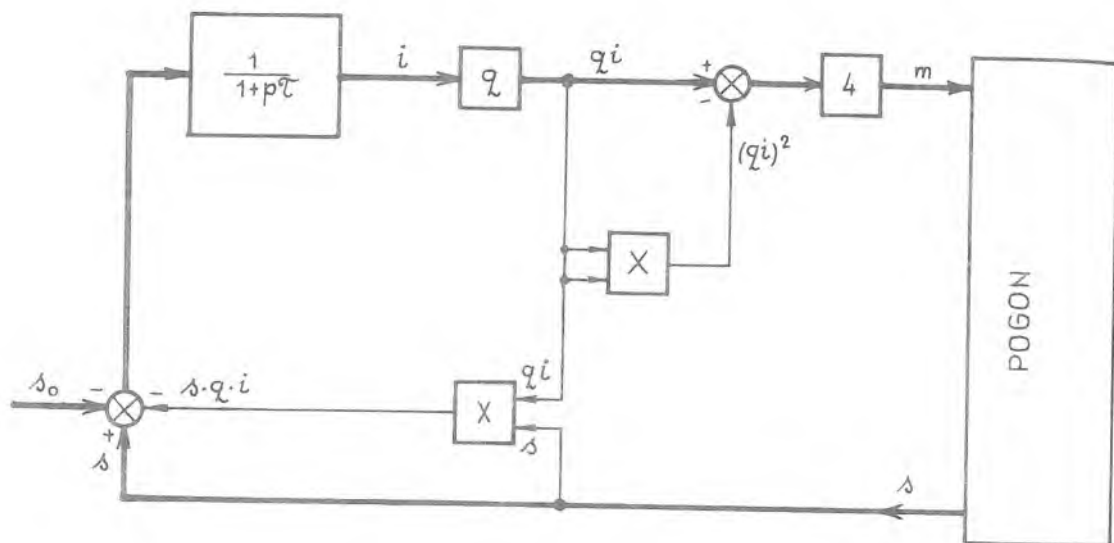
3.4. Uprošćena blok-šema

Radi boljeg shvatanja prirode rada, a i u cilju dobijanja što jednostavnijih kvantitativnih odnosa električnih i mehaničkih veličina, pri čemu tačnost treba da je dovoljna za inženjerske proračune, jedan od autora je u radu [1] razvio uprošćenu blok-šemu. Navešćemo kako se do ovih rezultata došlo.

Polazeći od jednačine naponske ravnoteže u jednosmernom kolu koja obuhvata pored elektromotorne sile rotora sE i suprotstavljenog napona invertora E_d sve padove napona, uspostavljena je sledeća zavisnost između relativne struje i relativnog klizanja

$$s - s_0 - sqi - i - \tau \frac{di}{dt} = 0$$

gde su



SLIKA 7.

s - relativno klizanje

$$s_0 = \frac{E_d + (\Delta V + \Delta V')}{R}$$

R - zbir ekvivalentnih otpora rotora, prigušnice i invertorskog kola;

$\Delta V + \Delta V'$ - pad napona na četkicama, diodama i tiristorima;

$$i = \frac{I_d}{L/R}, \text{ gde je } I_d \text{ jednosmerna struja rotora;}$$

$q = R_x/R$ gde je R_x zbir otpora statora i ekvivalentnih otpora usled pada napona zbog komutacije, sve svedeno na jednosmernu stranu;

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ gde je } L \text{ prigušnica u jednosmernom kolu.}$$

Moment motora se izračunava deleći snagu rotora sa brzinom obrtanja. Njegova relativna vrednost iznosi

$$m = 4 q i (1 - q i) = \frac{4}{E_d^2} 4 R_x \Omega_s$$

Ovi izrazi daju mogućnost relativno lakog proučavanja ponašanja kaskade i eksperimentalno su potvrđeni radom [8]. Iz jednačina neposredno proizlazi blok šema prikazana na sl. 7. Za $q i \ll 1$, može se koristiti samo deo blok šeme izvučen debelim linijama. Blok šema nije obuhvaćeno dejstvo regulatora brzine i struje.

4. Literatura

1. P.N.Miljanić: The through-pass inverter and its application to the speed control of wound rotor induction machines, Trans. IEEE, PAS 87, No 1, Jan. 1968, str. 234-239.
2. Đ.Kalić, P.Miljanić, V.Vučković, D.Rajković: Podsinhrona tiristorska kaskada sa automatskom regulacijom brzine za pogon crpki gradskog vodovoda, Elektrotehnika XXIX, 1975, br.3, str. 7-9.
3. P.Miljanić, Đ.Kalić, V.Vučković: Some aspects of sub-synchronous drives with through-pass inverters. IFAC Symposium Control in Power Electronics and Electrical Drives, Düsseldorf, Oktobar, 1974, Vol. 2, str. 31-40.
4. Đ.Kalić, P.Miljanić: Uštede u investicijama i poboljšanje korisnog dejstva podsinhronih kaskada primenom kratkospajajućih invertora. II Savetovanje o energetskej elektronici, Beograd, 1975, Zbornik radova, str.105-117.
5. V.Vučković: Tiristorski asinhroni motor. Saopštenje na XIII jugoslovenskoj konferenciji ETAN, Subotica, 1969.
6. Rad Elektrotehničkog instituta Nikola Tesla u Beogradu u 1968.godini, str.10-11; isto, u 1969.godini, str.12-13; isto, u 1966.godini, str.11-12.
7. M.Petrović: Ponašanje asinhronne mašine pri regulaciji pomoću tiristorske rekuperacije energije klizanja. Doktorska disertacija. Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 1974.
8. T.Krishnan, B.Ramaswami: Slip ring induction motor speed control using a thyristor inverter, Automatica, Vol.11, No.4, July 1975, str. 419-424.



Danijel Smiljanić, dipl.ing.
Ivka Šaban, dipl.ing.
Poduzeće "Rade Končar", Zagreb
OOUR Elektrotehnički institut

FREKVENCIJSKO UPRAVLJANJE ASINHRONOG MOTORA ZA POTREBE REGULIRANJA NUKLEARNOG REAKTORA

Upravljanje nuklearnog reaktora zahtijeva vrlo širok raspon reguliranja brzine vrtnje asinhronog motora.

S tog aspekta razmatran je problem frekvencijskog upravljanja kolutnog i kaveznog asinhronog motora i dani su rezultati ispitivanja primjeraka motora iz standardne serije. Primijenjeni uređaj za napajanje je tiris-torski ciklokonvertor.

FREQUENCY CONTROLLED ASYNCHRONOUS MOTOR DRIVE FOR USE IN NUCLEAR REACTOR CONTROL

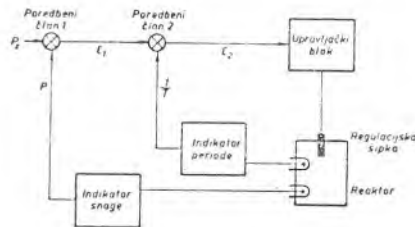
Nuclear reactor control demands a very wide range of asynchronous motor speed control.

Frequency control of squirrel cage and slip ring asynchronous motors is considered from this point of view. The results of testing on serial motors fed by a thyristor cycloconverter are given.

1. UVOD

Nuklearni reaktor s energetskeg stajališta je kontrolirani izvor toplinske energije. Snaga reaktora se kontrolira pomoću apsorpcijskih šipki: sigurnosne šipke naglo gase reaktor, kompenzacijske šipke grubo reguliraju snagu reaktora, a regulacijskim šipkama se postiže fina kontrola snage nuklearnog reaktora.

Upravljanje regulacijskim šipkama je vrlo zanimljiv problem sa stajališta regulacije. Na slici 1 je prikazana blok shema sistema za automatsko upravljanje regulacijskim šipkama.



Sl. 1 Blok shema sistema za automatsko upravljanje regulacijskim šipkama

Nuklearni reaktor se regulira kombiniranim sistemom sa dvije povratne petlje: za snagu i za period reaktora. Pri analizi sheme može se uzeti da reaktor radi na razini snage P_z i da je nastao poremećaj u reaktoru, na primjer promjena neutronskega toka uslijed povećanja zatrovanja. Promjena neutronskega toka u reaktoru indicira promjenu snage od vrijednosti P_z na P . Poredbeni član 1 daje u tom slučaju na svom izlazu razliku $\mathcal{E}_1$ koju nazivamo pogreškom snage reaktora. Upravljački blok reagira na svaku vrijednost $\mathcal{E}_1$ i to u smjeru njenog smanjenja na nulu tj. vraćanja snage P na početnu vrijednost P_z .

Reguliranje perioda reaktora u odnosu prema određenoj vrijednosti potrebno je zato, jer promjena snage može biti takva da bi reaktor mogao izaći van domaćaja kontrole, a to bi dovelo do havarije.

Pojačanje povratne petlje za period je promjenljivo i ovisi o zadanom periodu kojim reaktor treba raditi prilikom promjene snage. Ako je period reaktora određen stanovitom vrijednošću pojačanja u povratnoj petlji perioda, onda na upravljački blok djeluje signal pogreške perioda $\mathcal{E}_2$ sve dok pogreška ne izčezne.

Promjena snage reaktora na razinu zadane snage s određenom vrijednošću perioda reaktora izvodi se pomicanjem regulacijskih šipki. Pomak šipki pri tom kompenzira promjenu neutronskega toka, tako da u stacionarnom stanju reaktor uvijek radi u kritičnom režimu i na zadanoj snazi. Drugi primjer primjene istog sistema je promjena snage reaktora prema želji manipulant, te prilikom puštanja reaktora u pogon kao i kod njegova zaustavljanja.

2. PRIMJENA FREKVENCIJSKOG REGULIRANOG ELEKTROMOTORNOG POGONA U SISTEMU ZA AUTOMATSKO UPRAVLJANJE NUKLEARNOG REAKTORA

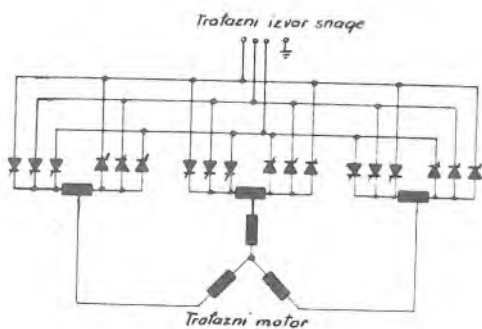
Regulacija snage nuklearnog reaktora je poziciona. Promjena snage obavlja se promjenom položaja regulacijskih šipki, koja se može ostvariti stalnom brzinom ili promjenjivom brzinom u ovisnosti o veličini odstupanja snage. Prvi način je jednostavniji i pruža mogućnost primjene diskontinuiranih regulatora s jeftinijom opremom. Kod drugog načina koristi se brzinski regulirani postavni motor, regulacijski proces je stabilniji, točnost regulacije veća, ali su potrebni kompliciraniji sustavi za upravljanje.

U diskontinuiranom sustavu primjenjuju se razne vrste kočnica. Kod kontinuiranih sustava moguće je kočnicu zamjeniti trajnim signalom, koji proizvodi upravo potreban zakretni moment za održavanje tereta u mirovanju.

Ako se u sistem za automatsko upravljanje nuklearnog reaktora koristi motor kao izvršni član, koji pomiče regulacijsku šipku u reaktoru, brzina pomicanja regulacijske šipke ovisi o brzini vrtnje motora. Brzina vrtnje motora ovisi o narinutoj frekvenciji u naponu napajanja, a ona je proporcionalna signalu pogreške u regulacijskom sistemu.

Kako se radi o malim pomacima regulacijske šipke u reaktoru, frekvencije u naponu napajanja motora su niske, reda desetak Hz.

Izvor promjenjive niske frekvencije koji daje niske frekvencije na potrebnoj razini snage za pogon motora je tiristorski ciklokonvertor pokazan na slici 2.



Slika 2 Tiristorski ciklokonvertor

Male izmjere, mehanička čvrstoća i velika pouzdanost tiristora i integriranih krugova u krugu upravljanja tiristora osiguravaju pouzdanost rada ciklokonvertora u regulacijskim sistemima kakav je i sistem za automatsko upravljanje nuklearnog reaktora.

Jedan tiristorski ciklokonvertor može napajati više motora odjednom, što je značajan podatak za primjenu ciklokonvertora za pogon regulacijskih šipki energetskog reaktora.

Tiristorski ciklokonvertor udovoljava svim uvjetima frekvencijskog upravljanja motora općenito:

- proizvodi nisku frekvenciju (opseg $0 \div 10$ Hz) u ovisnosti o vrijednosti signala na ulazu u ciklokonvertor,

- daje konstantni izlaz odgovarajuće amplitude i znaka kada nema signala na ulazu u ciklokonvertor,

- trenutno osigurava inverziju faze kada signal na ulazu u ciklokonvertor promjeni predznak.

Usvojeni tiristorski ciklokonvertor ima dvousmjerivački antiparalelni spoj s tiristorima što osigurava izmjenu energije iz mreže u potrošač i obratno tj. može reverzirati smjer energije.

U svakom trenutku jedna grupa tiristora u krugu radi kao ispravljač, a druga kao izmjenjivač, ovisno o motoru kao potrošaču. Glavni problem za ovaj spoj je uskladjivanje kuteva kašnjenja paljenja tiristora i to kako u smislu kontinuiranog prijelaza između vanjskih karakteristika ispravljača i izmjenjivača tako i u smislu pojave kružne struje u krugu usmjerivačkih grupa.

Tiristorski ciklokonvertor zahtjeva pri formiranju niske frekvencije poseban način upravljanja tiristora.

Tiristori se, naime, u prikazanom spoju na slici 2 moraju upravljati naponom iste frekvencije, koja se zahtjeva na izlazu iz ciklokonvertora. To znači da se signal pogreške treba prvo prevesti u određenu frekvenciju na niskoj razini snage pri kojoj će se upravljati tiristori na slici 2.

Rezultat toga će biti ista frekvencija, ali ne većoj razini snage potrebnoj za rad motora.

3. ODABIRANJE MOTORA ZA POGON REGULACIJSKE ŠIPKE

U okviru sistema za automatsku regulaciju reaktora motor je izvršni član koji pokreće regulacijsku šipku. Karakterizira se jednostavnost konstrukcije, trajan rad bez revizije, odsustvo četkica, mogućnost hladjenja vodom ili drugom tekućinom, velika čvrstoća, izdržljivost i pouzdanost. Ovim osobinama udovoljavaju u potpunosti sinhroni motori i to reluktantni, i asinhroni kavezni motor.

U pogonu motor regulacijske šipke treba držati šipku, pomicati je u smjeru naviše ili naniže zadanom brzinom te trenutno mijenjati smjer vrtnje (reverzirati). Sinhroni reluktantni motor udovoljava svim zahtjevima pogona regulacijske šipke.

Promjena brzine vrtnje i promjena smjera vrtnje je trenutna. Držanje šipke je ostvareno kod frekvencije nula a tada sinhroni reluktantni motor stabilno održava položaj tereta koji ga opterećuje jednostranim momentom (težina tereta).

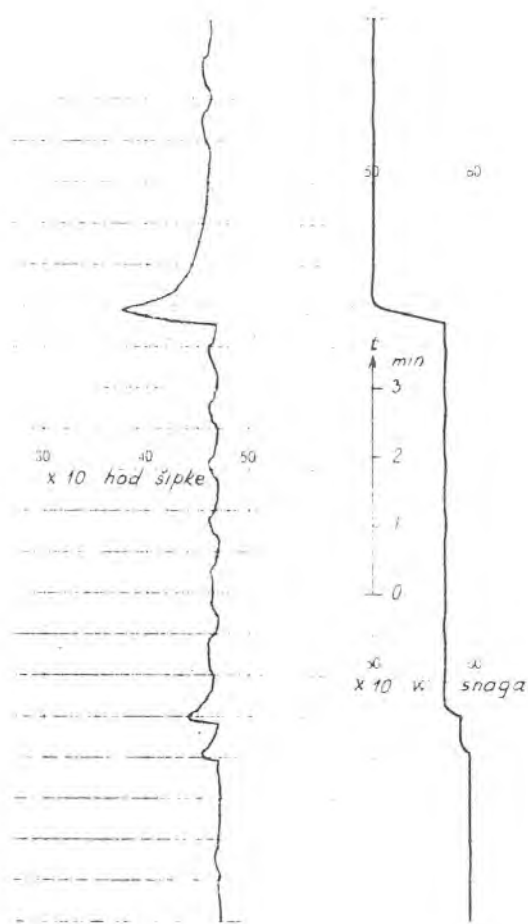
Upotreba samokočnih reduktora ili kočnice ovdje je nepotrebna. Asinhroni motor takodjer slijedi frekvenciju napajanja linearno ovisnom brzinom vrtnje. Promjena smjera vrtnje je trenutna. Jedinim nedostatkom asinhronog motora se može smatrati nemogućnost držanja šipke tj. mirovanja motora. No ovdje se problem rješava na dva načina: upotrebom samokočnog prijenosa do regulacijske šipke ili svojstvom regulacijskog sistema da trenutno reagira na svaki pomak regulacijske šipke kod frekvencije nula.

Prednost asinhronog pred sinhronim motorom je ta što ne može kod naglih promjena frekvencije u naponu napajanja ispasti iz koraka, što znači da može podnositi proizvoljno nagle promjene frekvencije u naponu napajanja.

4. PRIMJENA FREKVENCIJSKOG REGULIRANOG POGONA NA REAKTORU TRIGA

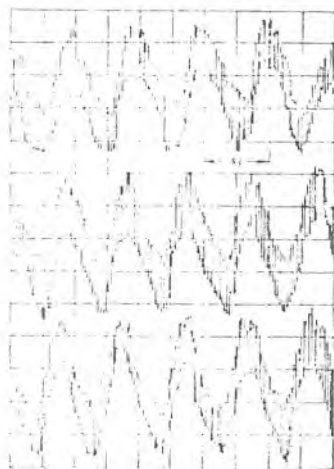
Frekventno regulirani pogon sa sinhronim reluktantnim motorom, razvijen u Elektrotehničkom institutu poduzeća "Rade Končar", provjeren je na istraživačkom reaktoru TRIGA kraj Ljubljane. Pokusi su bili izvedeni tako da se reaktoru mijenjala snaga a regulacijski sistem je kompenzirao nastale poremećaje u reaktoru. Raspon frekvencija u naponu napajanja sinhronog reluktantnog motora bio je od 0.01 do 1.5 Hz. Maksimalnoj frekvenciji od 1.5 Hz

odgovarala je maksimalna brzina gibanja regulacijske šipke od 450 mm/min. Hod regulacijske šipke je bio 380 mm. Primjer iz serije ispitivanja frekven-
cijski reguliranog pogona pokazan je na slici 3.



Slika 3 Oscilogrami hoda šipke i snage reaktora

Oscillogram napona napajanja motora kod frekvencije 1 Hz pokazan je na slici 4.



Slika 4 Oscilogram napona iz tiristorskog ciklokonvertora kod frekvencije 1 Hz

5. ISPITIVANJE FREKVENCIJSKI REGULIRANOG POGONA S ASINHRONIM MOTOROM

Asinhroni motor, bez obzira na nedostatak koji se sastoji u nemogućnosti mirovanja pod opterećenjem, je vrlo zanimljiv za primjenu ne samo u regulacijskom sistemu nuklearnog reaktora nego i u drugim elektromotornim pogonima.

Širok interes za primjenu asinhronog motora pospješila je pojava tiristora u poluvodičkoj tehnici. Stvoreni su uvjeti za razvoj najraznovrsnijih spojeva s tiristorima pa su dobiveni statički izvori napona promjenjive frekvencije prikladni za asinhronne motore.

U konkretnom slučaju asinhroni motor je priključen na tiristorski ciklokonvertor.

Teorijska razmatranja su provedena za asinhroni kolutni i kavezni motor, a potom izvršena ispitivanja s njima. Asinhroni kavezni motor je, sa stajališta primjene, interesantniji, ali kako se teorija frekvencijskog upravljanja asinhronog kaveznog motora nadovezuje na teoriju asinhronog kolutnog motora, uzet je za analizu i ispitivanje i asinhroni kolutni motor.

U teorijskoj postavci problema frekvencijski reguliranog asinhronog motora pošlo se od motora od kojeg se traži da ima konstantan moment u čitavom području frekvencije koju daje tiristorski ciklokonvertor. Uvjeti, koji kod toga moraju biti ispunjeni, proizlaze iz opće teorije asinhronog motora. Da bi asinhroni motor bio konstantnog momenta za sve frekvencije napona napajanja, mora biti ostvaren uvjet s kojim će rotoraska struja kod svih frekvencija biti konstantna. Iz ovoga slijedi održavanje konstantnog magnetskog toka u zračnom rasporu i omjera trenutne frekvencije u rotoru prema nominalnoj frekvenciji u statoru. To znači da se u cijelom području frekvencije statora klizanje rotora proporcionalno povećanju, odnosno smanjenju frekvencije statora povećava, odnosno smanjuje. Time je određena donja granična frekvencija kojom se asinhroni motor upravlja. Ona je u toliko niža ukoliko će asinhroni motor razvijati potrebne radne momente uz malo klizanje u nominalnom režimu rada (50 Hz).

Treba k tome dodati da se kod vrlo niskih frekvencija mijenjaju energetske prilike u motoru u odnosu na napajanje, uslijed čega se javlja povišeni kočni moment, pa se teoretska donja granica pomiče naviše.

Iz uvjeta održavanja konstantnog magnetskog toka u zračnom rasporu dobija se zakonitost promjene napona s frekvencijom asinhronog kolutnog motora

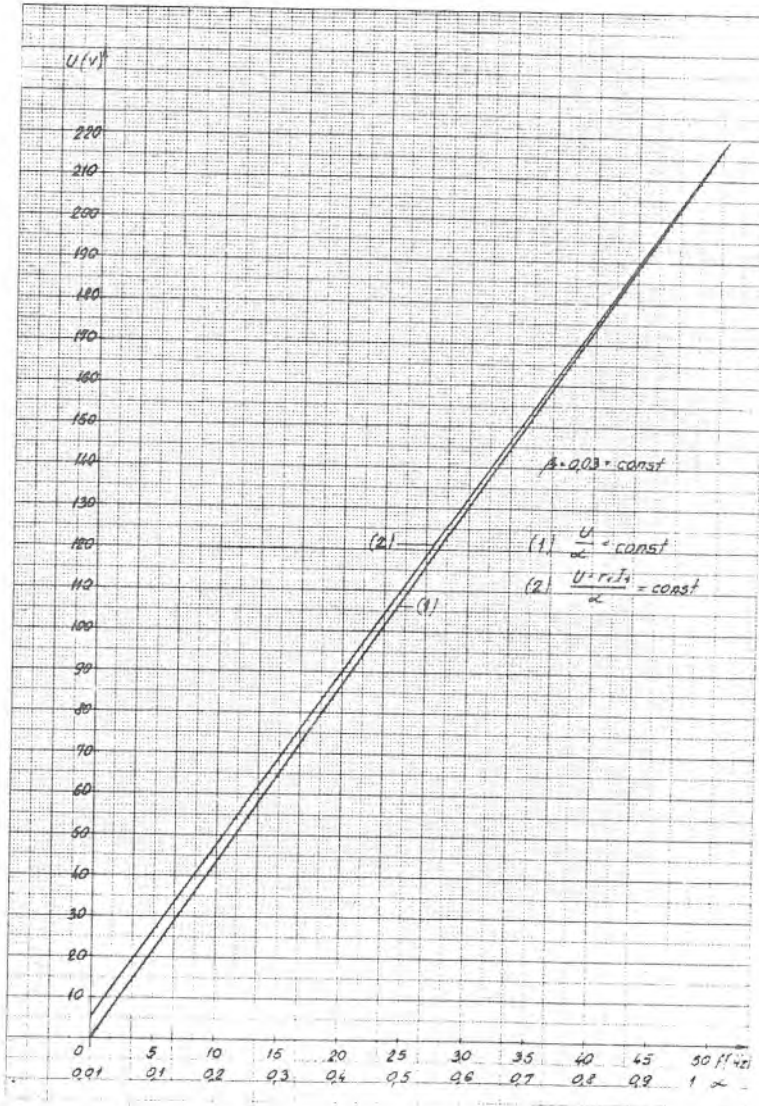
U slučaju asinhronog kaveznog motora, odnos napona prema frekvenciji se nešto mijenja, jer se mora uzeti u obzir promjena svih otpora s frekvencijom.

Asinhroni kavezni motor zbog potiskivanja nema konstantne rotorske parametre kod svih klizanja a time i kod svih frekvencija kojima se motor upravlja. Teorijskom analizom izvedena je zakonitost promjene rotorskih otpora s frekvencijom. Vidjelo se da se kod malih asinhronih kaveznih motora može

utjecaj potiskivanja u potpunosti zanemariti.

Provjera teorije frekvencijskog upravljanja izvršena je na primjercima asinhronih motora standardne serije poduzeća "Rade Končar".

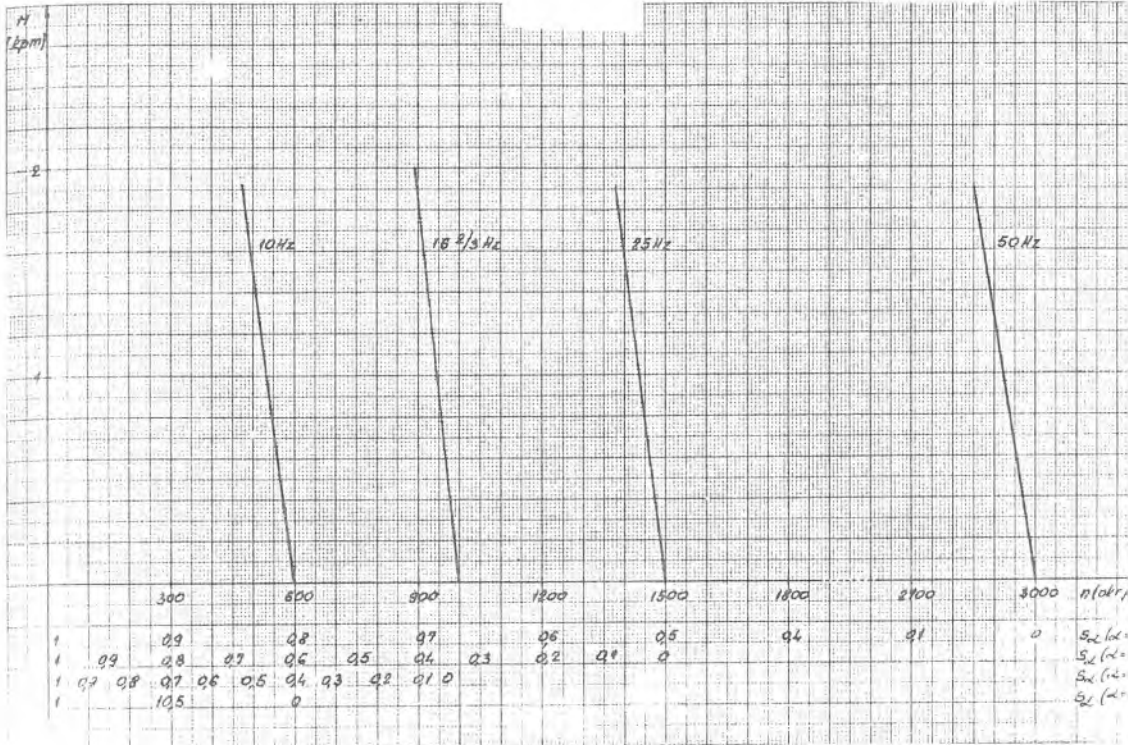
Iz serije asinhronih kolutnih motora uzet je motor koji nosi tipsku oznaku AKZ 235 - 2 snage 5.5 kW. Na slici 5 su pokazane izračunate vrijednosti promjene napona s frekvencijom. Minimalni potrebn napon iznosi 5.82 V.



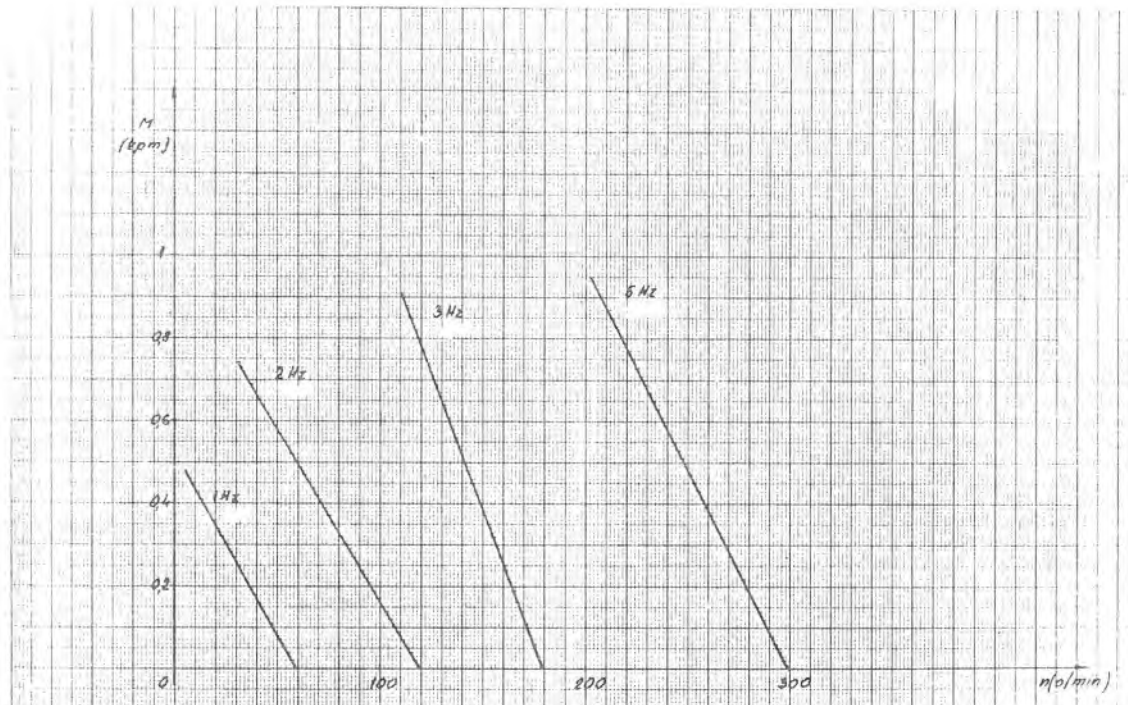
Slika 5 Promjena napona s frekvencijom za asinhroni kolutni motor

- 1 grafička metoda analize
- 2 analitička metoda analize

Na slici 6 su pokazane snimane momentne karakteristike kod 50, 25, 16 2/3 i 10 Hz. Na slici 7 pokazane su momentne karakteristike za frekvencije 5, 3, 2 i 1 Hz.

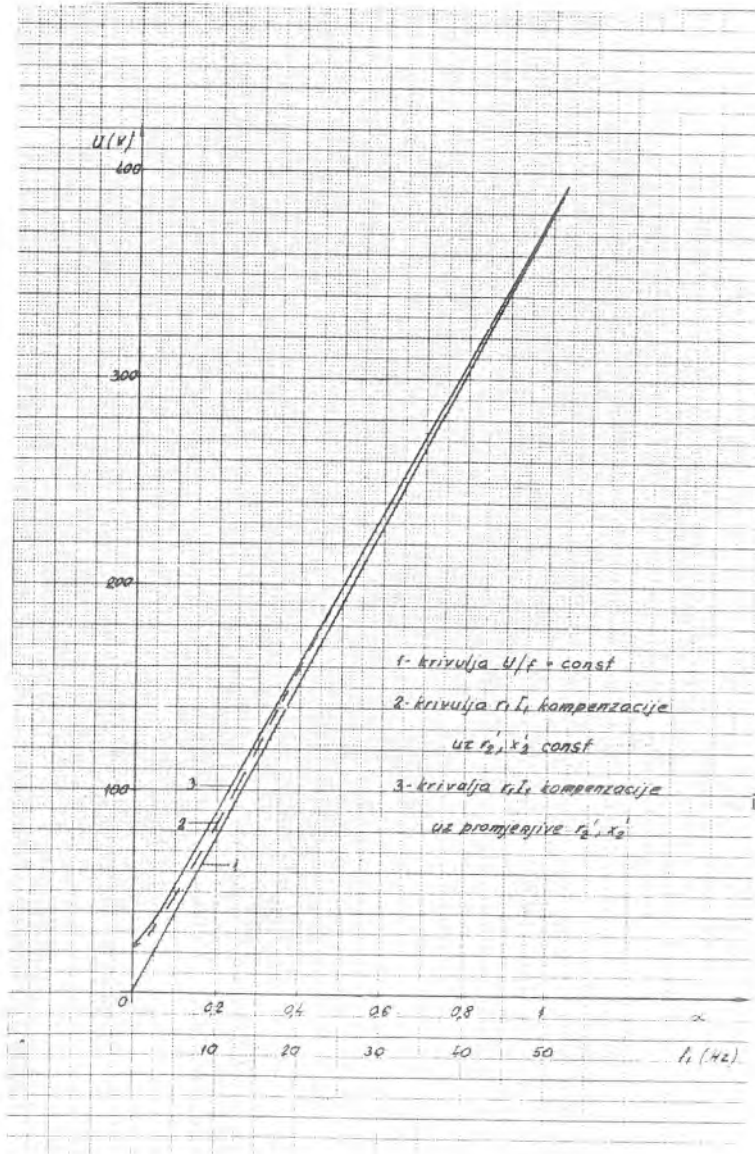


Slika 6 Momentne karakteristike asinhronog kolutnog motora za frekvencije 50, 25, 16 2/3 i 10 Hz

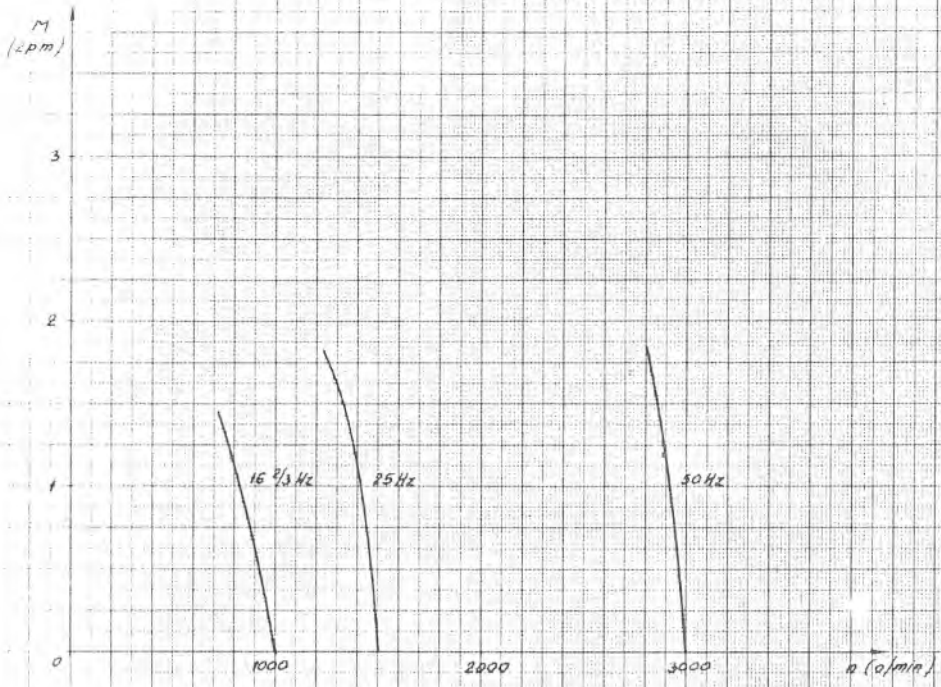


Slika 7 Momentne karakteristike asinhronog kolutnog motora za frekvencije 5, 3, 2 i 1 Hz

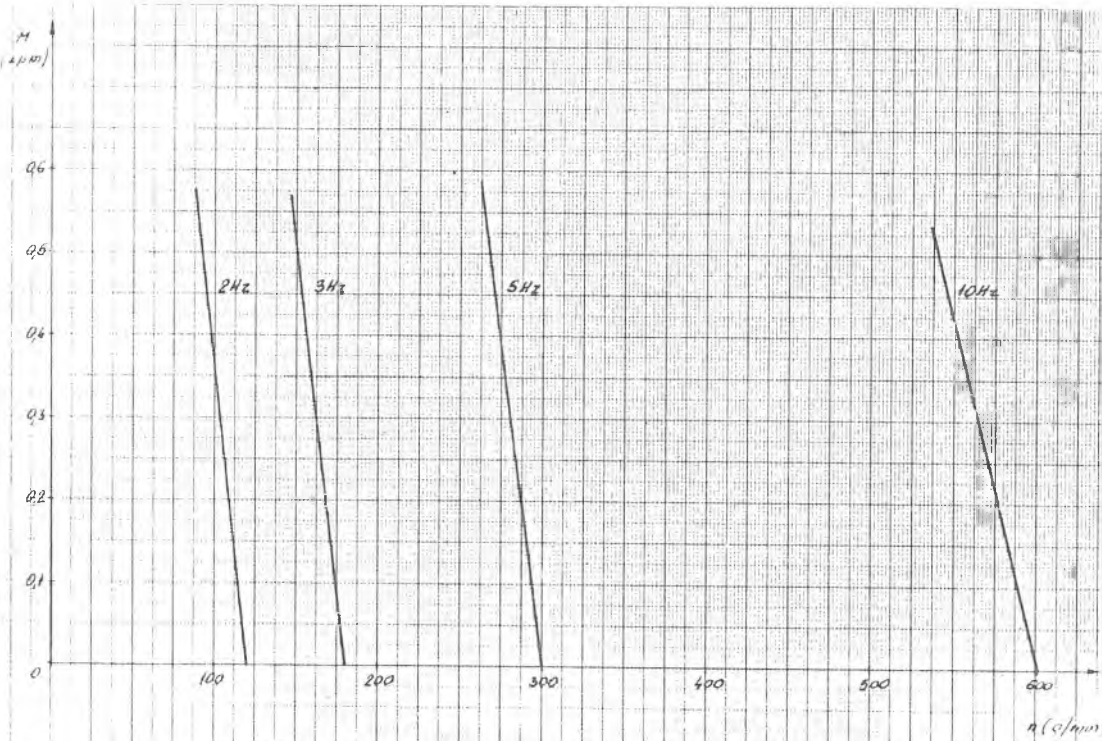
Rezultati ispitivanja asinhronog kaveznog motora tipske oznake 4AZ 112 M-2 snage 4 kW pokazane su na slikama 9 i 10. Na slici 8 je prikazana dobivena potrebna promjena napona s frekvencijom da bi asinhroni kavezni motor razvijao u cijelom području frekvencija isti moment. Usporedbe radi unijet je pravac $U/f = \text{const}$. Krivulja 2 na slici 8 pretpostavlja otpore rotora konstantnim. Krivulja 3 pokazuje promjenu napona s frekvencijom, kada se otpori kaveza rotora mijenjaju s frekvencijom.



Slika 8 Promjena napona s frekvencijom za asinhroni kavezni motor



Slika 9 Momentne karakteristike za asinhroni kavezni motor kod 50, 25 i 16 2/3 Hz



Slika 10 Momentne karakteristike za asinhroni kavezni motor kod 10, 5, 3 i 2 Hz

6. ZAKLJUČAK

Potreba reguliranja nuklearnog reaktora utjecala je na izbor i razvoj sistema za automatsko upravljanje, izradu komponenata regulacijskog sistema, razvoj najmodernijih tiristorskih rješenja te provela široka teorijska razmatranja frekvencijskog upravljanja. S tog aspekta razmatran je problem frekvencijskog upravljanja asinhronog motora posebno kaveznog motora.

Provedena analiza frekvencijskog upravljanja asinhronog motora s ispitivanjima zanimljiva je u prvom redu zbog primjene ovakvog motora u regulacijskim sistemima u kojima je izvršni član.

7. LITERATURA

1. M.Brezinščak, I.Šaban : Razvoj sistema RK za automatsku regulaciju snage nuklearnog reaktora:
Automatika 9 (1968), broj 2, str. 36-44
2. M.Brezinščak, D.Lavicki, I.Miljan, D.Smiljanić, I.Šaban: Development of the "Rade Končar" Automatic Power Control System of Triga Reactor. Third International Meeting on Electronics and Automation, Herceg Novi, June 24-25, 1968.
3. M.Brezinščak, D.Lavicki, D.Smiljanić, I.Šaban: Razvoj sistema za automatsku regulaciju snage nuklearnog reaktora i studij reaktorske instrumentacije. Prvi Simpozijum o razvoju opreme i projektiranju nuklearnih elektrana u Jugoslaviji, Herceg Novi, 21-23 oktobar 1968, str. 47-64.
4. M.Brezinščak, D.Lavicki, D.Smiljanić, I.Šaban: Automatska regulacija snage nuklearnog reaktora i adaptacija reaktora TRIGA za ispitivanje regulacijskog sistema RK. Referat, JUREMA 1969, str. 137 - 143.
5. M. Brezinščak, D.Lavicki, D. Smiljanić, I. Šaban: Primjena asinhronog motora umjesto sinhronog kao izvršnog člana automatskog sistema za frekventnu regulaciju snage nuklearnog reaktora, Informacije "Rade Končar" 50-51, 1970., str. 32-38.

Vladislav Teodorović
Fakultet tehničkih nauka
Univerziteta u Novom Sadu

NA PRAGU NAJŠIRE PRIMENE TESLINOG OBRITNOG POLJA I KOD MOTORA S UPRAVLJANOM BRZINOM

Svojstva silicijumskih poluprovodničkih električkih ventila obezbeđuju njihov sadašnji prodor za upravljanje brzinom jednofaznih kaveznih motora regulacijom nametnutog napona, a brzinom kliznokolutnih rekuperacijom energije rotora. Ciklokonvertori prodiru za startovanje i regulaciju brzine sinhronih i kaveznih motora, ali još nisu dovoljno ekonomski opravdani. Primenom sinhronih motora sa permanentnim magnetima mogu se izbeći poteškoće ciklokonverzije pobudne (reaktivne) energije (u odnosu na kavezne motore) i komplikacije sa pobudnim sistemom jednosmerne struje (u odnosu na sinhronu motore snage do stotinjak kilovata). Tranzistori za energetske svrhe će navedeno poboljšati. Asinhroni motori nemaju ograničenja u vezi sa dužinom paketa limova (komutacija) ni njegovog prečnika (transport), jer se mogu izraditi na mestu upotrebe. Može se očekivati i menjanje broja polova, možda i vremenski kontinualna, primenom poluprovodnika.

ON THE THRESHOLD OF THE BROADEST APPLICATION OF TESLA'S ROTATING FIELD IN CONTROLLED SPEED MOTORS AS WELL

Thanks to their performance semiconductor silicon electric valves are being used at an ever increasing rate for speed control of monophase squirrel-cage motors/by stator voltage regulation/ and slip-ring motors /by rotor energy recovery/. Cycloconverters are also being used for the starting and speed control of synchronous and squirrel-cage motors, but have not yet proved to be sufficiently economical. The application of synchronous motors with permanent magnets can help to avoid difficulties with cycloconversion of excitation (reactive) energy (in relation to squirrel-cage motors), and complications with d.c. excitation systems /in relation to synchronous motors with ratings to several hundreds kW/. This will be improved by power transistors. Asynchronous motors are not affected by limitations of lamination

length (commutation) or diameter (transport) because they can be assembled on the spot of installation. The application of semi-conductors can also be expected to lead to a change of pole numbers, perhaps also on a time continual basis.

O početku prodora sistema naizmjenične struje

Danas su uobičajeni polifazni elektroenergetski sistemi, u principu, razrađeni na Teslinim patentnim prijavama priznatim 1. maja 1888. godine u Americi, nešto kasnije, atraktivno - ali ekonomsko-tehnički ubedljivo - demonstrirani u Evropi i, zasada, praktički nepobitno zasnovani u primeni Teslinim generatorima hidroelektrane na Nijagari 1895. godine. Ovo se, zatim, nadopunjava pripadajućom opremom za visokonaponsku transformaciju i transport kao i za distribuciju. I konačno, što je za ovaj napis najznačajnije, u tom sistemu se nalaze sekundarni, to jest električni motori polifaznih (i monofaznih) struja bez komutatora i komutacije, bez ekscitacije izdvojene od mreže, odnosno bez magnetskih polova induktora, koji bi bio poseban deo mašine namenjen isključivo za pobudnu svrhu.

Sinhrona i asinhrona brzina

Frekvencija mreže je relativno vrlo konstantna i iznosi $100 \pi \text{ s}^{-1}$ ili 50 Hz za "decimalni" sistem i $120 \pi \text{ s}^{-1}$ ili 60 c/s za "tucetni". Broj pari polova električkih mašina je ceo broj: $p=1, 2, 3, \dots$

Područja svih pari polova ravnomerno su raspoređena na $2\pi_g$ radijana geometrijskih, odnosno predstavljaju prostorno pun krug. Zbog navedenog postoji skokovitost brzine Teslinog obrtnog magnetnog polja u sasvim određenim iznosima i to: $100 \pi_g, 50 \pi_g, 33,3 \pi_g, \dots$ za struje "decimalnog" sistema i $120 \pi_g, 60 \pi_g, 40 \pi_g, \dots$ za "tucetni". Ovde indeksi g podsećaju na geometrijske mere za uglove (radiane).

Brzina obrtnog magnetnog polja sinhronih i asinhronih (beskomutatorskih) mašina je kruto povezana s frekvencijom električne struje i iznosi ω_e električkih radijana po svakoj sekundi, odnosno za prolaz područjem jednog para polova za potrebno je $2\pi_e: \omega_e$ sekundi. Iz ovoga se dobije zavisnost za kružnu frekvenciju u

geometrijskim jedinicama ugla:

$$\omega_g = \omega_e : p$$

Tu indeks s podseća na električne mere (radijane) za uglove.

Brzina obrtnog magnetskog polja određuje u potpunosti brzinu obrtanja rotora sinhronih mašina i one su, po prirodi stvari, identične. Izražene u uobičajenim praktičarskim jedinicama iznose: $n_s = 3\,000, 1\,500, 1\,000, \dots$ i $3\,600, 1\,800, 1\,200, \dots$ obrtaja u minutu. Kod asinhronih mašina brzine obrtanja rotora razlikuju se od navedenih, takozvanih sinhronih brzina, za klizanje s . Klizanje iznosi do dela procenta ili do nekoliko procenata, već u zavisnosti od opterećenosti mašine i njene snage. Za motorsko opterećenje uzima se da je klizanje pozitivno:

$$\omega_{ga} = \omega_{gs} \cdot (1 - s)$$

Ovde indeksi a i s ukazuju na takozvanu asinhronu i sinhronu brzinu obrtanja.

U vezi s prostiranjem područja svih pari polova na pun prostorni krug treba naglasiti da je to nužnost kod mašina, koje imaju izdvojen pobudni deo - induktor sačinjen od magnetnih polova, kao što je to tipično za sinhronne mašine, komutatorske mašine jednosmerne struje, a i neke naizmenične struje. Za njih važi:

$$p \cdot 2\pi_e = 2\pi_g$$

Za one, pobuđene iz mreže primenom obrtnog magnetnog polja takozvanim Teslinim induktorom, ne postoji, u principu, takva nužnost. To jest, za asinhronne mašine područje jednog para polova statorskog namota, odnosno primarnog indukta ne mora biti p -ti deo punog kruga kada je sekundarni indukt kaveznog tipa. Naime, taj primarni indukt je ujedno i induktor i on, zbog toga, može biti bilo koje lučne dužine. Ili, za asinhronne kavezne mašine važi:

$$p \cdot 2\pi_e \neq 2\pi_g$$

To se koristi kod takozvanih segmentnih motora (asinhronog tipa), mada nije od naročitog značaja, jer se radi o relativno mnogopolnim mašinama gde je i izbor sinhronih brzina vrlo velik.

O mogućnostima promene sinhronne i asinhronne brzine

Brzina obrtanja sinhronih i asinhronih mašina, odnosno motora može da se menja promenom brzine obrtnog magnetnog polja,

takozvane sinhronne brzine, na dva načina:

- menjanjem frekvencije napajanja ω ,
- promenom broja pari polova p .

Kod asinhronih motora ovo je dopunjeno još jednom mogućnošću, to jest izborom područja para polova za koje važi:

$$p \cdot 2N_e \neq 2N_g \times$$

Sa ovom mogućnošću može i da se besprekidno upravlja i podešava sinhrona brzina kod takozvanog sfernog motora. Ovaj je jedna varijanta (nažalost komplikovana) segmentnog motora sa feromagnetnim zazorom u obliku sferične kalote. Zaokretanjem segmenta menja se električna lučna dužina u odnosu na nepromenljivu geometrijsku, a time i brzina obrtanja obrtnog magnetnog polja i rotora, izražena pomoću geometrijskih jedinica.

Pojava klizanja, kao neizbežno nužna za rad asinhronih mašina, prouzrokuje gubitke električne energije proporcionalne klizanju. Zbog toga postoji mogućnost promene klizanja uticanjem na menjanje električne energije u rotorskom strujnom kolu asinhronog motora (ili generatora).

Kod sitnih, kaveznih motora to se iskorišćuje menjanjem magnetnog fluksa promenom iznosa nametnutog napona. Kod kaveznih motora sa spoljnim rotorom to se primenjuje i za snage od više kilovata.

Kod kliznokolutnih asinhronih motora može da se utiče na klizanje apsorbovanjem električne energije iz sekundarnog indukta. Pri tome to može da bude otpornikom ili ispravljačem. Moguće je da se energija dovede u rotor i klizanje učini negativnim.

O primeni poluprovodnika

Za jednofazne kavezne motore široko se primenjuje promena klizanja pomoću tiristorskih regulatora napona nametnutog na primarni indukt. Uslov za praktičnu primenu je taj da moment opterećenja opada sa brzinom (ventilatori, pumpe). Povećanjem mase motor se prilagođava: lošijem iskorišćenju materijala zbog nesinusoidnosti kao i dodatnim gubicima usled toga, gubicima usled klizanja i smanjenja intenziteta hlađenja.

Za kliznokolutne motore nešto većih snaga (100 kW i više) već je odomaćena regulacija klizanja odvođenjem električne energije iz rotora pomoću ispravljača od silicijumskih dioda. Električna energija jednosmerne struje može da se nametne motoru, čiji moment doprinosi savlađivanju momenta opterećenja kliznokolutnog motora. U drugoj varijanti električnu energiju jednosmerne struje tiristorski inverter pretvara u energiju mrežne frekvencije i rekuperiše je preko prilagodnog (adaptivnog) transformatora.

Određivanjem visine jednosmernog napona pomoću invertora i adaptivnog transformatora diktira se napon sekundarnog indukta, a time i frekvencija klizanja kliznokolutnog motora. Osim toga, može se uticati i na režim u vezi s dodatnom jalovom (reaktivnom) snagom - nesinusoidnom radi postizanja ekonomsko-tehničkog optimuma. Jedan konvertor (ispravljač + inverter + adaptivni transformator) može da se primeni uslovno i za grupu motora, čiji broj se može tokom vremena menjati i prilagođavati potrebama pogona.

Poluprovodička rekuperacija energije sekundarnog indukta vrlo je povoljna za pogone sa opadajućim momentima opterećenja (ventilatori, pumpe, turbokompresori - $M :: n^2$) i sa ograničenim područjem regulacije (1:2).

Za širok dijapazon promene brzine obrtanja (praktički od nule) iskorišćuju se poluprovodički pretvarači frekvencije - ciklokonvertori za direktnu kontinualnu promenu frekvencije ograničenog dijapazona, a primenom međukola jednosmerne struje od nule do željene frekvencije.

Navedeno frekventno upravljanje je ponegde već prihvaćeno, a još šire se i nudi, kao opravdano tehničko rešenje u funkcionalnom smislu, a i u pogledu pogonske pouzdanosti. Svakako da se paralelno stižu i iskustva, odnosno izrađuju se prvenstveno u tu svrhu i normalno eksploatišu postrojenja sa ciklokonvertorskim upravljanjem brzine.

Treba pomenuti dizel-električne lokomotive sa sinhronim generatorima čiju energiju promenljive frekvencije ispravljači pretvaraju u jednosmernu, a invertori diktiraju frekvencijom brzinu kaveznih motora.

Od posebnog interesa su i mogućnosti da se poluprovodičkim ciklokonvertorima startuju dvopolni motori najvećih snaga ili

turbogeneratori gasnih elektrana zbog problema u vezi s akumulacijom toplote zaleta u delovima rotora ili radi upravljanja trajanja zaleta gonjenog uređaja. Zbog toplote zaleta i manjeg naprežanja elektroenergetskog sistema kao celine, zanimljiv je zalet na opisani način agregata reverzibilne hidroelektrane u svojstvu motor-pumpe. Poluprovodičkim ciklokonvertorima za svrhe zaleta dvopolnih sinhronih mašina zasada se ekonomski suprotstavljaju elektromašinski sistemi po Clark-u ili Unger-u.

Ciklokonvertorima za trajan rad, zasada, uspešno konkurišu poluprovodičke jedinice s jednosmernim motorima (kompakt-motori za manje snage). Kod ovih je mehanička komutacija (rotirajući komutator sa nalegajućim četkicama) sa elektromagnetnom prisilom (komutacijskim - pomoćnim polovima) zamenjena odgovarajućom statičkom komutacijom silicijumskih poluprovodnika, tako da se umesto Leonardovog motor-generatora pojavljuje silicijumski usmerivač (sa ili bez invertorskog dela) a na motoru (ili generatoru), čija se brzina upravlja, ostalo je u suštini klasično rešenje komutacije jednosmerne struje u naizmeničnu (ili obratno).

O nekim specifičnostima i mogućnostima upravljanja asinhronih i sinhronih motora pomoću poluprovodnika

Čini se neospornim daljnji prodor poluprovodičkih ciklokonvertora, koji se usavršavaju u celini na osnovu iskustava iz eksploatacije, a u detaljima (izrada poluprovodičkih ventila) zbog unapređenja tehnologije. Zbog ovog, a i zbog većih proizvodnih serija snižava se cena. Navedenim, kao i prilagođavanjem mašina "tistoriskom" napajanju teži se takvim rešenjima upravljanja brzine obrtanja beskomutatorskih mašina koja će i ekonomski biti sasvim opravdana. Ova se rešenja, već danas, po tehničko-funkcijskim performansama mogu izjednačiti sa mogućnostima jednosmernih mašina, ne samo u pogledu brzine obrtanja nego i u pogledu momentne karakteristike.

Tranzistori za energetske svrhe će sigurno ubrzati prodor naprava sa poluprovodičkim ventilima, poboljšati njihove performanse, proširiti mogućnosti u eksploataciji.

Kao najprimamljivije rešenje pojavljuje se ciklokonvertorski upravljan asinhroni kavezni motor, jer je opšte prihvaćen kao

najjeftiniji, po konstrukciji i manipulaciji kao najjednostavniji, a u pogonu - uz najmanje nege i održavanja - smatra se najpouzdanijim. U takvom sklopu specifičnu poteškoću predstavlja obezbeđenje energije za pobuđivanje magnetnog kola motora, odnosno njenog prenošenja iz mreže u motor ili proizvođenja unutar ciklokonvertora.

Problem ciklokonverzije pobudne (reaktivne) energije u navedenom smislu ne postoji kod kliznokolutnog motora sa konvertorom u sekundarnom induktu. Drugi način da se izbegne ciklokonverzija pobudne energije jeste upotreba frekvencijom upravljanih sinhronih motora. Ovi se danas, uopšteno gledano, praktički ne primenjuju za snage od oko nekoliko pa do stotinak kilovata zbog komplikacija u vezi s pobuđivanjem i sa zaletom.

S obzirom na ciklokonvertor zalet sinhronih motora može da se obavlja sa frekvencijom od nulte vrednosti ili kao rad koračnih motora. U vezi s tim ne postoje ni problemi s primenom permanentnih magneta, koji se za pomenute snage sinhronih motora ne primenjuju zbog poteškoća u vezi s asinhronim zaletom. Permanentnim magnetima se izbegava jednosmerni pobudni sistem, a sam motor nije komplikovaniji od kaveznog.

Završne napomene i razmišljanja

Treba dodati da iznos startnog momenta i momenta sedla gube na značaju i da lamelirani (izlistani) paket limova rotora kaveznog motora upravljanog frekvencijom, u principu, sasvim gubi smisao u odnosu na masivan feromagnetik. Izbor između uobičajenog otpadnog lima iz rupe statora, debljih limova, odnosno ploča i jedinstvenog masivnog feromagnetika odlučiće tehnološko-ekonomski razlozi i eventualan zahtev mogućnosti rada, odnosno zaleta bez ciklokonvertora.

Za specijalne slučajeve ili za postizanje snaga, odnosno obrtnih momenata iznad onih koji su danas limitirani dužinom (komutacija) i prečnikom (transport) paketa limova rotora jednosmerne struje, može biti odlučujuće da se delovi mašina naizmenične struje mogu proizvoditi ili sastavljati na licu mesta, to jest tamo gde će se i montirati radi upotrebe. Pri tome su granice za dužinu i prečnik paketa znatno iznad vrednosti jednosmernih motora.

Ciklokonvertori sa jednosmernim međukolom omogućuju i izbor broja faza (na primer, $m = 2$ za $90^\circ/270^\circ$ ili simetrične sisteme za $m \geq 3$). To može da doprinese optimalizaciji u najširem smislu.

Na svršetku se može zamisliti da će poluprovodičke naprave biti iskorištene i za promenu broja polova, koja bi, možda, mogla i vremenski kontinualno da se odvija. To bi značilo kontinualno menjanje odnosa geometrijske lučne dužine područja jednog para polova.

Karl Woschnagg

ASEA, Ludvika Sweden

THE DEVELOPMENT OF HVDC-TECHNOLOGY FROM MERCURY-ARC VALVES TO THYRISTOR VALVES

Power transmission by means of HVDC is today being considered by system planners around the world with the same confidence as AC power transmission. The operational capabilities have been proven by the 6 000 MW of HVDC transmission capacity operating with mercury-arc valves around the world since the 1960's.

Through the introduction of the thyristor valves quite a new concept for convertor station design has been possible. The convertor stations have been simplified which means increased reliability and reduced maintenance requirements.

The thyristor permits greater flexibility in the design of an HVDC valve. The valve voltage ratings can easily be chosen to match the most economical transmission line voltage.

These important steps in convertor equipment development coincide with the progressive demand for more HVDC-transmissions all over the world. Only until the end of this decade about 8 000 MW of additional HVDC-installations will be commissioned.

1. Introduction

Up to about twenty years ago all electric power transmission was carried out with three-phase alternating current. Today, however, the transmission system planners have an alternative in high voltage direct current technology.

The world's first commercial HVDC-transmission was commissioned in 1954 and linked the island of Gotland to the Swedish mainland. The power

transmitted was 20 MW and the direct voltage 100 kV. The introduction of this new technique was made possible by the development of the mercury-arc valve. All HVDC transmissions built before 1970 used mercury-arc valves in the convertors and the total transmission capability of the HVDC projects using such valves amounts to more than 6 000 MW (Fig. 1).

The rapid development of semiconductors for power application during the latter part of the 1960's made it possible to build high voltage thyristor valves. After the promising operation of a test valve in the Gotland transmission put into service in 1967 and replacing one of the mercury-arc valves, the first commercially operating thyristor installation was successfully commissioned for the same transmission in May 1970. Since then HVDC projects with thyristor valve convertors for about 8 000 MW transmission capacity have been commissioned or ordered all over the world (Fig. 2).

The reasons why HVDC was chosen for these projects differ from case to case. However, there are three main fields where HVDC can offer a favourable alternative to AC-applications. These are

- long-distance bulk power transmission from remote energy sources
- asynchronous interconnections between AC-power systems
- high-power underground or submarine cable transmissions.

The advantages offered by HVDC in these cases are both economical, technical and environmental.

2. Comparison Between Mercury-Arc and Thyristor Valve Installations

From the system point of view the use of mercury-arc valves or thyristor valves has no direct bearing on the transmission of power. Although the main circuits and controls are continuously being improved the basic concepts already established in the Gotland transmission in 1954 are still valid. The experiences gained from the mercury-arc valve stations are therefore of great value when designing today's stations with thyristor valves.

However, the introduction of thyristor valves has resulted in many advantages both from the design and from the operational point of view.

Mercury-arc valves were designed for a certain voltage level and the development of valves for higher voltage ratings was always combined with extensive and costly research work and valve testing. Thyristor valves consist of a number of series connected thyristor elements and can therefore much easier be matched to almost any required voltage and current rating.

In case of mercury-arc valves a certain probability of arc-backs can never be avoided. Arc-backs always mean a disturbance for the operation of a power transmission and increased current stresses on the rest of the convertor equipment.

The temporary disturbances caused by arc-backs made it necessary to use series connected six-pulse bridges. This allows partial transmission of power also when one six-pulse group is blocked. Arc-backs do not occur in thyristor valves and, therefore, it became possible to build thyristor convertors as 12-pulse units, thereby simplifying the convertor stations.

Mercury-arc valves need external damping circuits for the reduction of transient voltage stresses across the valves; thyristor valves have built-in damping circuits, and no external apparatuses are needed. Furthermore, the current divider and the separate by-pass valve are deleted in thyristor convertors.

The structural design of the thyristor valve makes it possible to stack several valves within a valve group on top of each other to form double valves or even quadruple valves.

The above factors have led to a simplification of the layout both for the valve hall and for the outdoor switchyard.

In figure 3 the difference in station layout for mercury-arc valves and thyristor valves is shown for a 250 MW 250 kV convertor. The much greater simplicity of the thyristor convertor is obvious. One 12-pulse group only for the full line voltage instead of two series-connected 6-pulse groups which need switching devices on the DC-side and also much large filters on the AC-side, reduces the totally required area considerably.

The AC-harmonic filters can be kept much smaller in thyristor convertor terminals. The reason is the exclusive use of 12-pulse operation, which allows for the exclusion of filters for the 5th and 7th harmonics (Fig. 4). Modern bipolar convertor stations can even be equipped with redundant filters, which means that the filters for each pole are thermally dimensioned to carry the harmonics from both poles if the filters for one pole are out of service. Filter faults, therefore, do not longer lead to a reduction in the transmission of power.

The much smaller output of harmonics from a 12-pulse convertor also allows a considerable reduction of the size of the DC-smoothing reactor and in most cases makes it possible to delete the DC-filter completely.

3. Thyristor Valve Design

Modern thyristor valves are designed to meet the following general requirements:

- The design shall be reliable, simple and flexible to permit the same well-tested modules to be used for different HVDC applications.
- The design must have the capability of withstanding full short-circuit current without any additional short-circuit arrangements.
- The valve must be designed for minimum maintenance, which also implies easy access to, and automatic monitoring of, all vital parts.

An example how these requirements can be met are the valves for some of the projects now under construction i.e. the Skagerrak transmission between Norway and Denmark, the Inga-Shaba transmission in Zaire and the CU-project in the United States. All these transmissions will be equipped with indoor air-cooled and air-insulated valves.

The structural design of these valves is very simple with the modules being mounted in racks on both sides of the central air duct. Each thyristor module contains six thyristors with their heat sinks, gate control units and damping circuits. The valve is divided into valve sections which include the

thyristor modules and into control sections where the valve control circuits are located. Several valves can be built together to form double or quadruple valves (Fig. 5).

Simultaneous firing of the series-connected thyristors is necessary to avoid excessively high voltage stresses on the thyristors. Since all thyristors are placed on different potential, the simplest way to meet this demand is to use light for the transmission of the triggering signals. Each thyristor is provided with a thyristor control unit which converts the light signal into an electrical gate signal.

Automatic monitoring of the thyristors is arranged in such a way that if any of the thyristors becomes short-circuited, the time of the event and the identification number of the thyristor are automatically printed out in the control room. This is achieved by transmitting the information through light guides in the opposite direction, i.e., from the thyristor control units to the control room. Each valve contains a number of redundant thyristors, which means that the convertor does not have to be taken out of service because of a faulty thyristor. The thyristor module is exchanged at the next scheduled maintenance.

4. HVDC Converter Station Design

Because of the simplification in circuit arrangement that has been made possible by the introduction of thyristor valves the station area now required is only one third of that needed for previous mercury-arc valve converter stations. In cases where space is not a critical factor, a converter station today will occupy an area in the order of $15 \text{ to } 20 \text{ m}^2/\text{MW}$. A reduction of the total area down to $8 \text{ m}^2/\text{MW}$ is possible without the basic design having to be changed. The major part of this area is occupied by harmonic filter capacitors and shunt capacitors for reactive power support. The valve hall occupies an area in the order of $1 \text{ to } 2 \text{ m}^2/\text{MW}$ (Fig. 6).

The central part of the converter station is the valve hall containing the thyristor valve bridges. To achieve a compact design the converter trans-

formers are located close to the valve hall with the valve side bushings passing through the wall. Similarly, the smoothing reactor is placed close to the wall on the opposite side of the valve hall with one of its bushings passing through the wall. With this arrangement the size of the interconnecting bus structures is minimized and the busbars are kept indoors in a controlled environment, thereby reducing their exposure to ground faults (Fig. 7).

5. Availability of Modern Converter Stations

The overall availability of a thyristor converter terminal is expected to be higher than for a mercury-arc valve terminal mainly because of the reduced number of apparatuses installed in the thyristor converter and because of the fact that no forced outages caused by the valves have to be expected due to the redundancy built into the valves.

Modern converter stations are designed to minimize the outage time due to forced outage and maintenance. This aim is achieved by

- simple and compact station design
- use of reliable components
- automatic supervision.

The availability of a converter station is determined by the availability of its three main parts, which are conventional electrical equipment, converter control equipment and thyristor valves.

Conventional high-voltage equipment in a converter terminal such as breakers, transformers, capacitors, etc., is comparable to that used in AC-installations. It will, therefore, also show the same reliability figures.

The availability of control equipment in existing HVDC installations has always been high.

The thyristor valve is built up of a large number of series-connected thyristors whose number depends on valve insulation. In order to provide redundancy, additional thyristors are always added. Therefore, a breakdown of a thyristor will not affect the operation of the valve; the failing thyristor can be replaced within regular maintenance.

As mentioned earlier, a convertor station is composed of different types of equipment. The main principle to be followed in design is to keep high availability and to prevent a single fault from causing a complete station shut-down. Hence the two poles in a bipolar station will be separated as far as possible and a failure in one pole will not affect the operation of the other.

The maintenance intervals will be one to two years and it is estimated that the check-out of all thyristors and their control equipment together with the replacement of modules with faulty thyristors, will require approximately 120 man-hours for a 500 kV 12-pulse convertor.

The overall availability for bipolar thyristor convertor stations is estimated to be about 98.3 % for 100 % power transmission and as high as 99.9 % for 50 % power transmission.

6. Future Development

Two main tendencies can be observed today; first, additional reduction of ground area required for the terminals; second, growth of the power handling capability of the thyristor elements.

The change-over from mercury arc valves to thyristor valves has led to more compact station design. A development towards further compaction of convertor terminals is noticeable. By introducing sulphur hexafluoride as the insulation medium large savings of the necessary ground area are possible especially for the AC-filters and shunt capacitors banks. A total ground area of about $1.3 \text{ m}^2/\text{MW}$ could probably be achieved.

The development of thyristors has progressed very rapidly during the last few years and thyristors with still higher current and voltage ratings will be available in the future. This will mean a favourable cost development for HVDC convertor terminals in comparison to conventional AC equipment, making HVDC a still more interesting tool for the power industry.

Commissioned HVDC Projects based on Mercury Arc Valves

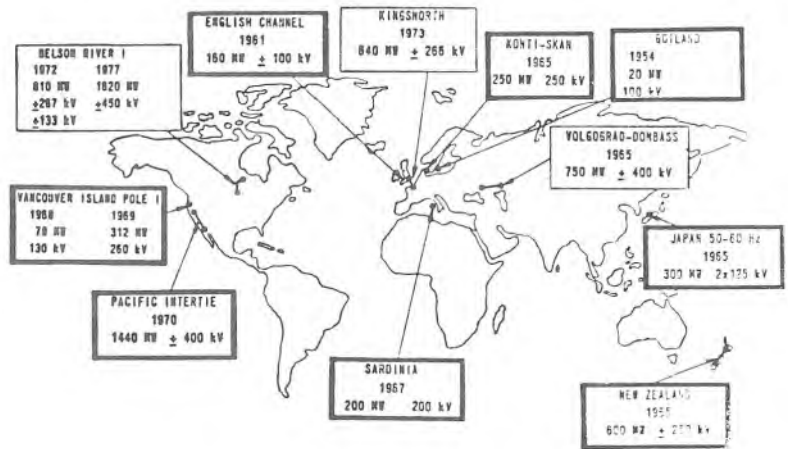


Fig 1.

Committed HVDC Projects based on Thyristor Valves

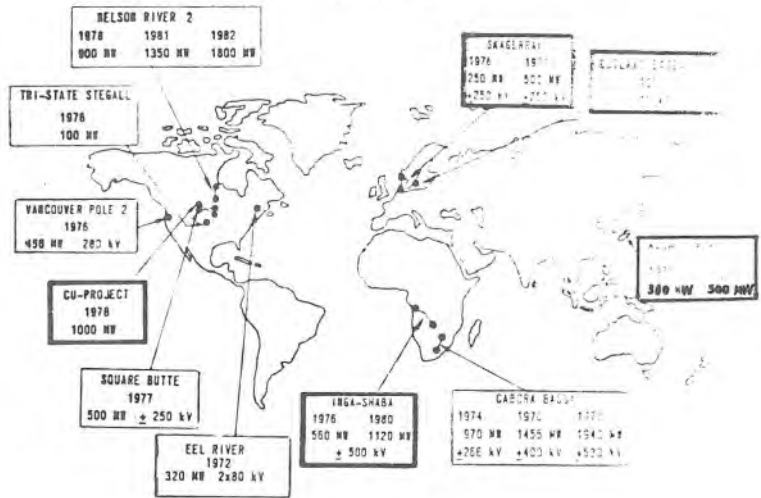


Fig 2.

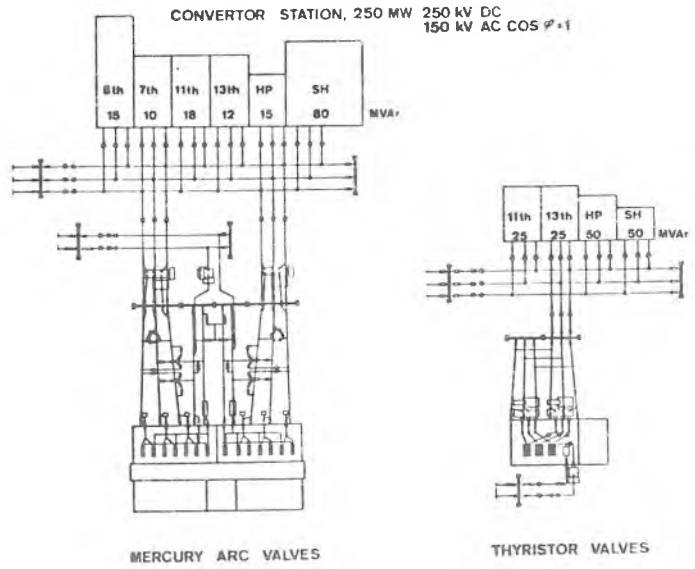


Fig 3

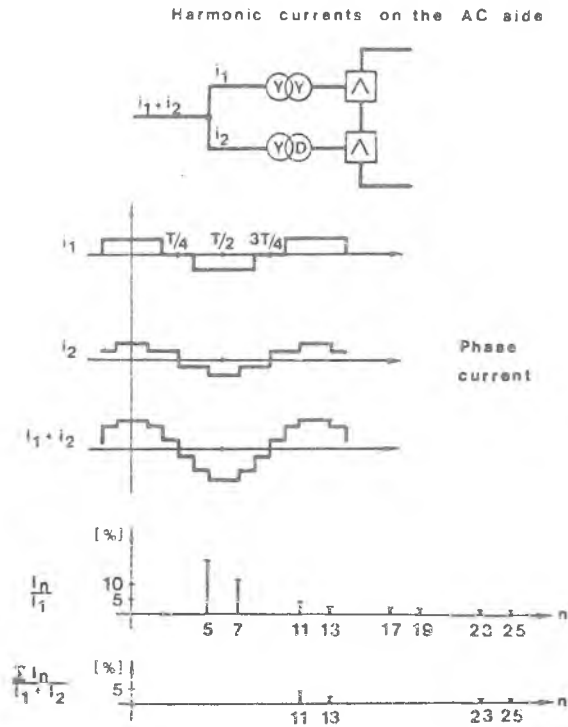


Fig 4

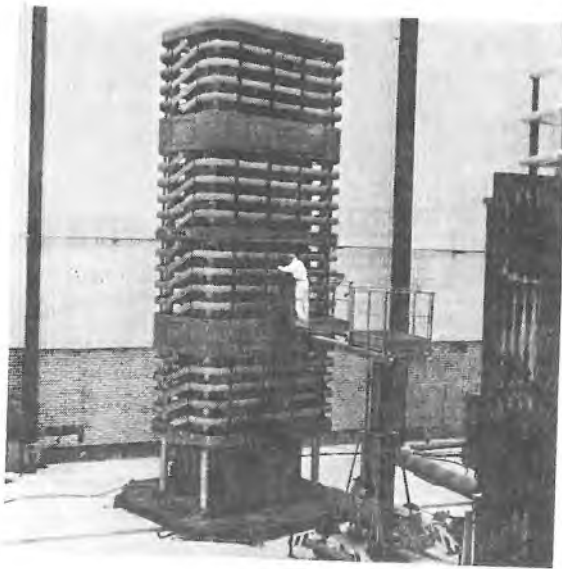


Fig 5 Quadruple valve for 250 kV 1000 A (Skagerrak)

Schematic station layout for a bipolar HVDC station

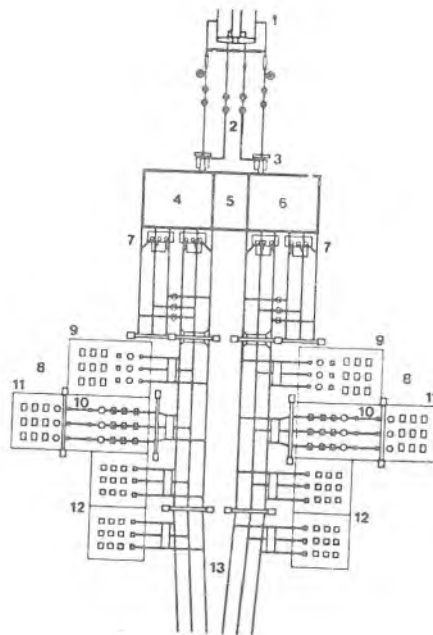


Fig 6

1 D.C. and electrode lines	7 Converter transformers
2 D.C. switchyard	8 A.C. harmonic filters
3 D.C. smoothing reactors	9 High-pass filter
4 Valve hall, pole 1	10 11th harmonic filter
5 Service building with control room	11 13th harmonic filter
6 Valve hall, pole 2	12 Shunt capacitors
	13 A.C. switchyard

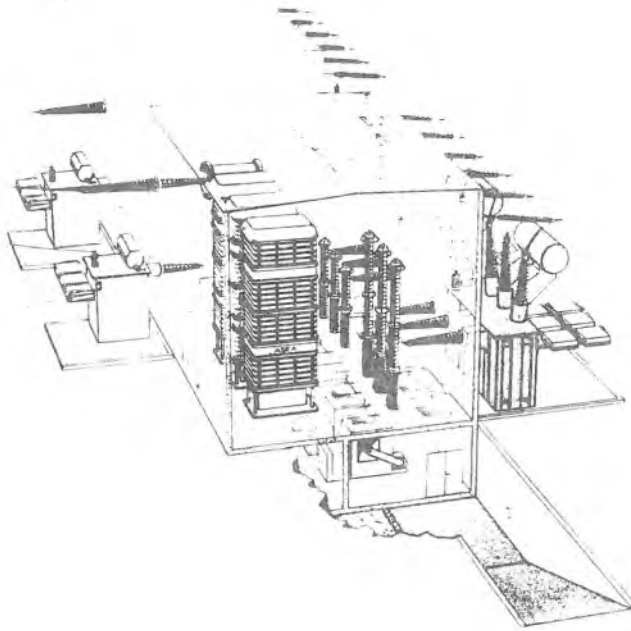
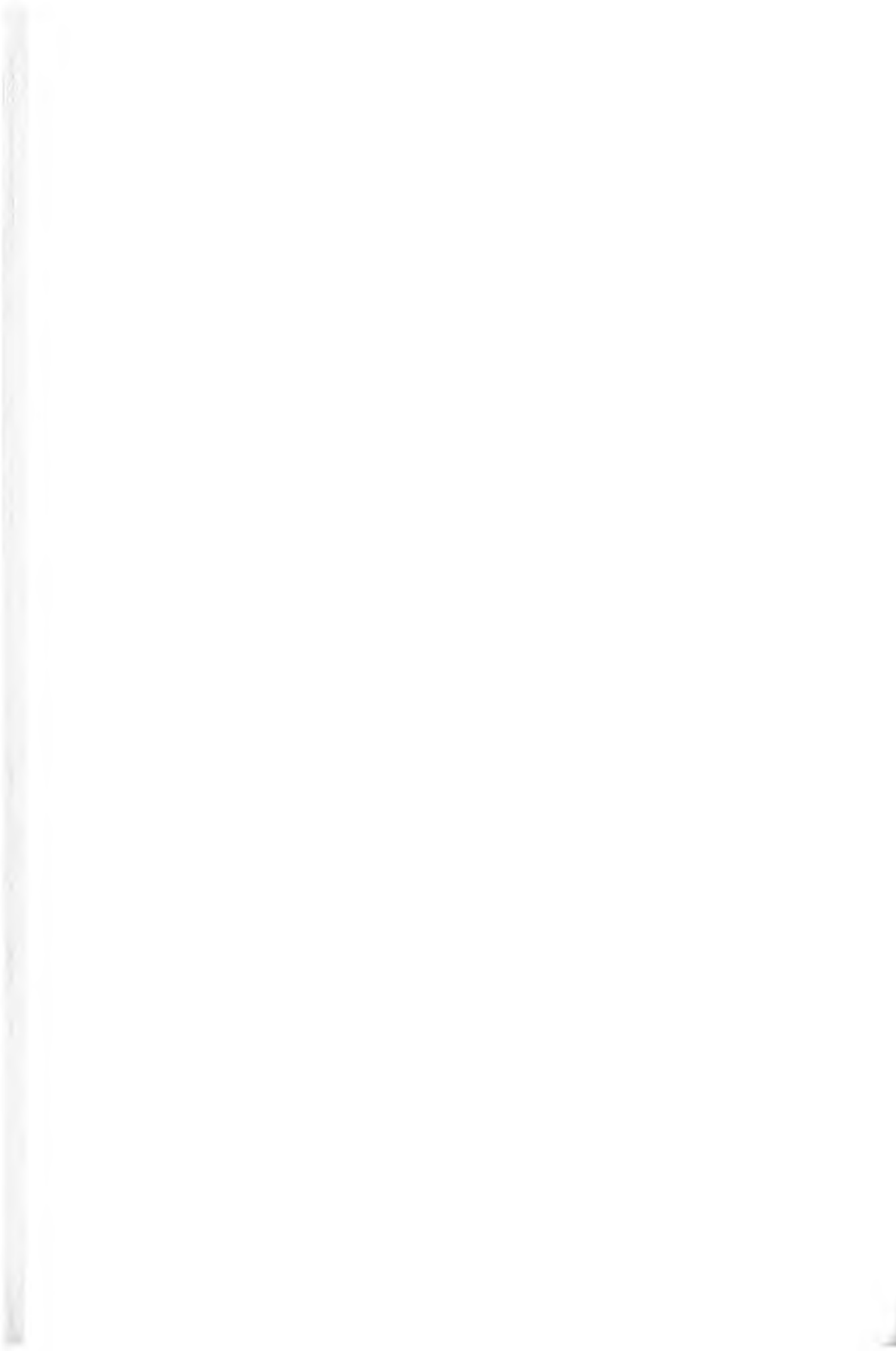


Fig 7 Layout of 12-pulse convertor with quadruple valves



Werner Leonhard
Institut für Regelungstechnik
Technische Universität
Braunschweig, Germany

THE IMPACT OF ELECTRONICS ON THE EVOLUTION OF TODAY'S ELECTRICAL DRIVES

Summary

In the report it is shown how the rapid development of semiconductor electronics has affected the field of controlled electric drives in two ways: 1. The power conditioning side, where thyristors with ever increased ratings and improved characteristics are employed to convert the fixed frequency AC line voltages to the adjustable voltages and frequencies required in electrical machines, and 2. the signal processing electronics which make realization of more flexible and production-oriented decentralized control strategies possible.

1. General

Energy is a prerequisite of industrialization; only by ample supply of energy can productivity be increased sufficiently to free man from the burden of heavy physical labour. Electricity is ideally suited for carrying this energy in nonmaterial form from the point of origin to the areas of consumption because it can be produced with acceptable efficiency, transported and distributed with low losses and easily converted into any desired final form; thus electricity represents energy of particularly high quality serving as medium in regional or international power pools.

A large portion of the electrical energy produced is eventually converted into mechanical form in order to solve the many tasks in materials forming and handling, production, transportation and household appliances. This calls for electromechanical energy convertors (electric drives) with power ratings from less than a Watt to several hundred Megawatts, with rotary speeds between 10 min^{-1} to 10^5 min^{-1} . Electrical drives exhibit properties which in their combination are unmatched by any other type of drive: Operation in all four quadrants of the speed torque plane (regeneration), easy controllability, good

efficiency, no environmental problems, flexibility of design. This makes it possible to generate mechanical power exactly at the point where, when, and in what form it is needed. The main restriction of electrical drives is, of course, the dependency on a continuous power supply, which, due to insufficient capacity of presently available storage media, is most noticeable in vehicle drives.

A common feature of all electrical drives is the periodicity of motion in steady state operation. Therefore, apart from minor exceptions, all electrical machines require at least one of the torque producing variables to be an alternating quantity. This fact, a historic recognition of N. Tesla, has contributed to the predominance of the AC electrical system. The polyphase AC line voltages of fixed frequency permit the construction of electrical motors of unsurpassed simplicity, accounting for more than two thirds of the total installed drive capacity. However, their operational characteristics are quite rigid while many applications call for controlled drives with continuously variable acceleration, torque speed or position. This report deals only with these controlled drives.

In order to perform the control function with good efficiency, which is most important at higher power rating, it is essential to vary, depending on operating conditions, the amplitude, frequency and phase of the alternating voltage applied to the motor windings. This is achieved by interposing electrical convertors between the fixed frequency AC lines and the drive proper. For greater flexibility, two convertors with intermediate DC circuit are most often used. In order to keep the power losses down, only convertors employing switching elements are of interest. For supervising the conversion equipment and protecting it from overloading, controllers are indispensable.

Besides the drives supplied from three phase AC lines, there exists a large and diverse group having DC or single phase AC supply; these drives, used mainly for the propulsion of vehicles, are not considered here.

2. Convertor-Fed DC Drives

The classical and - due to continued improvement - still predominant type of controlled drive employs a DC machine, where the inverter, i. e., the device connecting the DC circuit to the windings of the rotor, is realized by a mechanical commutator. This simple and ingenious switching device allows reversible current flow; it features - with today's nomenclature - natural as well as forced commutation at very good efficiency and with a minimum of components. Its main disadvantages are, apart from the wear and the hazards of arcing, the restrictions on the maximum induced voltage between adjacent commutator bars, limiting the realizable power ratings and speeds.

The task of converting the AC line voltages to DC (and in reversed direction for regeneration) is in most cases assigned to line commutated semiconductor switching devices (thyristors) which have almost completely superseded mercury-arc valves and rotating generators. Thyristors are now fully proven components with rated currents from a few amperes to 1000 A and peak blocking voltages up to about 3000 V. Since the voltage drop in conducting state is only 1 to 2 Volts, compared to 20 V of Hg-valves, very good efficiency is achieved. Hence the thyristor represents an almost ideal switch, blocking current until it is electronically turned "on", when it begins conducting in forward direction. By arranging these components in polyphase circuits and combining these, the power may be increased as desired. For HVDC transmission, thyristor convertors with ratings of up to 1000 MW have been built.

A particular advantage of solid state thyristor convertors is besides their compact construction, insensitivity to shock and ambient conditions — the possibility of electronically controlling large blocks of electric power (MW) in short time (ms) requiring very little control power (mW). Hence thyristor convertors serve not only for power conversion but for power amplification as well. This makes them ideally suited as actuators in high performance control systems as required for

electrical machines and drives. With today's large AC grids, the reactive current and harmonics generated by controlled converters no longer present serious problems as they did in the past.

After the disappearance of the Hg-valves, the variety of converter circuits in use for the supply of DC machines has been reduced to only a few standard ones, of which the three phase, six pulse bridge connection is most common. When operated directly from the 380 V line it produces a variable DC voltage between ± 500 V, which is suitable for medium size drives. In order to step up the output power, complete bridge circuits are often combined; using a line transformer with suitable secondaries, a 12 pulse operation may be realized. For supplying the armature of a DC motor with current of alternate polarity (4 quadrant drive), a second converter is required. These so called dual converters are usually operated without circulating current, where only one converter conducts at any one time, supplying current of the polarity required, while the other converter remains blocked. In addition there may be a third converter of reduced power for supplying the field winding.

The control function of the converter is performed by delaying the firing pulses through a phase shifting device operating under the supervision of an electronic controller. By setting up a current control loop, in which the current is smoothed by the inductive load, the strongly nonlinear dynamic behaviour of the converter is suppressed. Apart from this linearizing function, the current control loop is required for protective reasons because of the high power density in the active part of thyristors and the steep current transients; this makes a fast acting control essential for limiting the steady state current to safe values.

Due to the rapid progress in the field of signal processing electronics in recent years, signified by miniaturization and large scale integration, there have also been changes at the control end of drives, whose consequences match those on the power side. This has made it possible to fulfill - within

physical limitations - all conceivable specifications with regard to flexibility, accuracy or operational properties; at the same time the compactness of the equipment and its reliability have been increased. The differences between the various types of motors (shunt, series) are receding since the operational properties may be determined by the control; in principle, every motor may be given any operational characteristics. Due to the reduced size and for cost reasons it has become common practice, except for the very large ratings, to mount the power and control components in the same cabinets, to be shipped as complete assemblies to the customer. In view of the current transients and the close proximity between high and low power components, severe effects of interference had to be overcome.

As an example of the kind of problem, that may be solved with a convertor-fed DC motor and modern control techniques, the drive for a flying shear in a rolling mill is mentioned, where the task consists in controlling the shear motion such that the tools cut the moving material at the specified target point. Since the velocity of the tools must match that of the material, this constitutes a simple form of a rendez-vous problem. In order to fully utilize the drive, the shear motion should be time-optimal, regardless of its initial state before the cut. At low production rate, the drive will rotate discontinuously, coming to intermittent stops, while with increasing cutting frequency it converts to a nonuniform continuous motion. The power of a shear drive may exceed 1000 kW.

This time optimal position control problem with moving target may be solved with the help of several superimposed control loops for current, acceleration, speed and position, whose reference values are prescribed by electronic controllers. In addition there must be a feed forward speed signal in order to achieve time-optimal acceleration of the shear approaching the moving target point. The outer position control loop is usually

digital in order to meet the accuracy requirements. With the help of integrated circuits, a control system even of this complexity is of very compact construction.

The next step to a fully automatic shear control is the on-line computation of the next target point, to be selected by a process computer on the basis of the known material weight and the choice of admissible section lengths; the criterion for optimization is minimum scrap. Controls of this type have been built in recent years.

This example which could easily be extended to other areas, such as machine tools or drives in the processing industry, clearly demonstrates, how signal electronics are enlarging the potential of control engineering by embedding local control tasks into higher levels of automation. In view of the programmable microcomputers now available, which make a decentralized solution of logic and computational problems economically feasible, there is little doubt that this tendency will continue at a rapid pace.

3. Convertor-Fed AC Drives

The disadvantages of the mechanical commutator have long since created a strong incentive to find an electronic substitute, thus eliminating all moving contacts from the power conditioning equipment connecting the motor to the AC line. Almost half a century ago there have been first attempts with thyratrons, which, in today's perspective, were bound to fail because of the unsuitability of the valves then available and the complexity of the control equipment required. Today the necessary power and control components are on hand to design and build electronically commutated AC drives, which are comparable and in some respects superior to convertor-fed DC drives. Still, for economic reasons, they have not yet been able to supplant DC drives, except for special applications.

While the circuits and control procedures of DC drives are now highly standardized, the situation is quite different with AC drives where a number of basic schemes and still countless

variations exist. This reflects the state of the art and the fact that a variable frequency AC supply is of necessity more involved than a variable DC supply; also an AC machine represents a highly nonlinear multivariable control plant, where some variables cannot be directly measured. Of the many possibilities existing with static AC motor control, only three types believed to exhibit particular potential will be briefly discussed.

3.1 Converter-Fed AC Drive Without Intermediate DC Circuit

The power conversion from the fixed frequency line to the variable frequency motor windings may be performed in only one static converter, called a cycloconverter. This, however, is a simple scheme only if natural commutation can be employed, which in turn requires the ratio between input (line) and output (machine) frequency to be sufficiently large. The basic arrangement consists in several line-commutated, four quadrant dual converters, each supplying one phase of the AC machine with low frequency AC current. Each of the dual converters is part of a current feedback loop with a sinusoidal (in steady state) current reference signal. The type of load (synchronous or induction motor, reversible, active and reactive power flow, sequence of phases) presents no difficulties, as long as the load impedance is inductive, smoothing the current harmonics.

Due to the limited number of firing instances during each output period, the tracking of the reference signal is by necessity imperfect and worsens as the output frequency rises. A six pulse circuit supplied from the 50 Hz line may be used up to about 20 Hz. Hence there are only few applications, for example large low speed gearless motors driving cement kilns; otherwise the low frequency represents a serious obstacle. The large amount of equipment required, six converter bridges with the associated control gear, restricts the application of this scheme to large machines, where a subdivision of the converter would be necessary anyway. It is noted that slip rings for the field winding can be avoided by inductive coupling and rotating rectifiers if a synchronous motor is used.

The current control loop in each stator phase of the machine causes the cycloconverter output to look like a variable frequency three phase current source. This is no disadvantage; by eliminating the effects of primary resistance and leakage reactance, it even serves for decoupling and thus simplifying the control dynamics of the motor. Since the current reference is synchronized by the angular position of the rotor, the converter acts very similar to the mechanical commutator. Auxiliary control conditions, such as maximum torque, minimum voltage or zero reactive power may be introduced.

3.2 Converter-Fed AC Drives with Intermediate DC Circuit

3.2.1 Convertors with Natural Commutation

In order to extend the frequency range of the converter, it is possible to decouple the machine from the AC line by interposing a DC circuit containing passive smoothing devices. By restricting the DC circuit to one direction of current only, the expense of a dual converter at the line end can be avoided. With proper control, the drive can still be operated in all four quadrants of the speed-torque-plane. For the machine-side inverter, the advantages of natural commutation, i. e., simplicity and low losses, are only available if sufficiently large source voltages are induced in the windings of the machine. This limits this mode of operation to machines of synchronous type above a certain minimum speed, say 10 % of rated speed. During startup, additional means for commutation are required, for example intermittent current flow in the DC circuit allowing the inverter to switch at zero current. The commutation may be facilitated by employing a series field winding, even though this creates a stability problem in the regenerative quadrants. Torque reversal at low speed requires more time than with a DC machine because the machine-side converter may have to transfer from rectifier to inverter mode at low frequency.

Of particular interest with this type of drive are synchronous machines without rotor windings, for example reluctance type machines, having stator field windings. Drives of this kind pose

difficult problems in the development stage because of the strong interactions between convertor and machines; for this purpose digital simulations can be very helpful.

It is believed that the potential of variable speed drives employing convertor supplied synchronous machines with passive rotors is not yet fully recognized and that new types of drives may still evolve.

3.2.2 Convertors with Forced Commutation

The restrictions in controlling the convertor circuits discussed so far may be overcome by resorting to forced commutation; at the expense of additional components - thyristors, inductors, capacitors - firing or extinction of the main thyristors is then possible at almost any instant of time. Of course, this freedom entails also, apart from the complexity and added cost, increased and frequency dependent commutation losses as well as higher stresses on the components. Techniques of this kind call for thyristors with short recovery time which may mean compromises with regard to other thyristor parameters, e. g., forward voltage drop.

A convertor with forced commutation can serve as a variable frequency AC supply for loads generating no source voltages, for example a squirrel cage induction motor, which is considered as the ideal drive motor because of its rugged design, simplicity and low inertia.

By rapid pulse-width modulated switching between the positive and negative bus of the DC circuit, a strong subharmonic voltage component may be generated at the motor terminals which, after filtering by the leakage reactance of the stator winding, results in fairly sinusoidal stator currents. This subharmonic control mode involves a trade-off between the remaining harmonics in the currents, the maximum output frequency and the switching losses. With present day power thyristors, a useful frequency range of a few hundred Hz is attainable. Employing an inverter of this type, the motor may operate in all four speed-

torque quadrants; however, by restricting the range of operation, considerable simplifications of the inverter are possible.

An induction motor poses difficult control problems which were not satisfactorily solved for a long time. This is due to the fact that an AC machine is a nonlinear multivariable control plant with nonlinear interactions; a squirrel cage motor offers the additional problem that important variables cannot be directly measured.

Of the numerous solutions proposed in recent years only the TRANSVEKTOR control scheme, a particular systematic approach, may be mentioned. Its main feature is the introduction of field coordinates, which are defined by the instantaneous position of the direct and quadrature axes and detected by field measuring sensors in the airgap of the machine. The control action takes place in this field coordinate system; it is only at the output of the control part that the DC signals are converted back to stator coordinates, i. e., to AC currents. When employing a pulsed converter with fast current control, the transformed plant becomes effectively noninteracting and the induction motor dynamics lose most of their complexity; the control is then analogous to that of a DC machine. A converter-fed induction motor with this type of control is fully equivalent to a converter-fed DC motor. The elimination of all moving contacts and the reduced inertia make it a most interesting drive, particularly under difficult ambient conditions (traction) and for high dynamic performance.

The drawbacks are of course the highly complex power converter and the equally complicated controls, particularly the components required for field measurement and coordinate transformation.

It is for these reasons that this drive, in spite of its striking advantages, has not yet been able to supplant the DC drives for standard applications. In order to make the converter-fed squirrel cage motor a viable alternative, considerable simplifications and cost reductions are essential; with the

current advances of integrated circuitry this seems possible.

4. Summary and Outlook

This brief overview indicates that the rapid development of semiconductors has decisively affected the field of electro-mechanical power conversion. The changes stem from two sides: Compact and powerful solid state convertors are now available operating in close interaction with the machines. On the other hand, the ever smaller and less expensive electronic control components permit the realization of more flexible, reliable and application oriented control schemes. This development has by no means come to its final state. On the power side it may eventually result in integrated designs of convertor-motors, while at the control end programmable microcomputers are certain to cause further advances.

In the field of controlled electrical drives, the old controversy - direct current or alternating current of fixed frequency - has thus been overcome by flexible schemes, where the power is optimally conditioned by solid state equipment and where the complete conversion from the AC line to the drive shaft is controlled according to the requirements of the load and fully integrated into the overlaying levels of automation.



NIKOLA TESLA'S THEORY OF
BALL LIGHTNING (COLORADO SPRINGS, 1899)

Robert W. Bass

Brigham Young University, Provo, Utah 84601

and

Robert K. Golka

Golka Associates, Brockton, Massachusetts 02401

Tesla's theory of ball lightning as a gaseous energy storage process involves a stable spherical region or bubble of ionized air at an elevated temperature ($10^4 - 10^6$ °K) but density lower than ambient ($10^9 - 10^{13}$ cm⁻³). Using Tuck's conclusion that surface tension must be involved, and Rose and Clark's theory of electrostatic plasma sheath surface tension, we perfect Tesla's conceptual model by a rigorous mathematical demonstration of its absolute, asymptotic, fluid-dynamical stability, and ability to bounce.

In 1899, Nikola Tesla experimented at his laboratory in Colorado Springs with a Tesla coil characterized by a 50,000 watt input and a peak current of 1,100 amperes at 1.25×10^7 volts. He stated in his diary¹ that on numerous occasions "fireballs" were observed. These fireballs are described similarly to more contemporary anecdotal data^{2,3,4} regarding kugelblitzen, a subject on which many serious investigations^{5,6,7}^{7bis} have appeared. After reviewing scores of proposed physical models, including one of his own (a Hill spherical vortex mechanism) J. L. Tuck⁸ concluded that no model could adequately explain the observed bouncing of fireballs unless it included a surface tension effect.

Tuck states: "I am now proposing that the very unusual plasma . . . can develop a surface tension, i.e., like a soap bubble. This is a very novel idea, gases have never known to exhibit surface tension."

Actually, it has already been convincingly demonstrated by D. J. Rose and M. Clark, Jr.⁹ that any finite plasma volume must exhibit a very small but quite definite surface tension effect due to the Debye shielding mechanism in a thin space-charge layer of electrostatic energy at the plasma boundary (sandwiched in between and in balance with the internal plasma pressure and the external ambient pressure).

We attempt to perfect Tesla's theoretical model by addition of Tuck's surface-tension conclusion, made quantitative by the Rose-Clark theory. It is well known in hydrodynamics¹⁰ that surface tension can stabilize local "ripple" (or Rayleigh-Taylor) instabilities; by including the Rose-Clark electrostatic surface tension energy in the Bernstein-Frieman-Kruskal-Kulsrud Energy Principle formalism¹¹ in a manner suggested to us by William A. Newcomb¹², we can demonstrate that Tesla's theoretical model represents a valid fluid-dynamical equilibrium which is asymptotically stable to

arbitrary (sufficiently small) internal or external perturbations.

Our conclusion is that if r denote's the plasma bubble's radius in cm, if n denotes its mean density in particle/cm³, and if T denotes its mean temperature in °K, then at standard atmospheric pressure ($p_a = 1.013 \times 10^2$ newtons/m²)

$$n = 5.287 \times 10^{10} / [\eta(1-\eta)^{1/2}]r \quad (\text{cm}^{-3}),$$

$$T = 1.388 \times 10^8 \times [\eta/(1-\eta)^{1/2}]r, \quad (^\circ\text{K}),$$

where η ($0 < \eta < 1$) is the percentage pressure gradient across the plasma bubble's surface. Two typical examples are:

$$r = 3 \text{ cm}, \eta = 10^{-3}, n = 1.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}, T = 4.2 \times 10^5 \text{ } ^\circ\text{K};$$

$$r = 1 \text{ cm}, \eta = 0.7, n = 1.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}, T = 1.8 \times 10^8 \text{ } ^\circ\text{K},$$

where the second example appears to be of possible direct interest to the controlled thermonuclear research program.

After observing the formation of numerous fireballs, Tesla concluded that the creation of a kugelblitz involved two phases. In the first, or transient phase, Tesla hypothesized that a tremendous expansion of air in some portion of a sudden and powerful streamer discharge channel, followed by a subsequent and rapid cooling and condensation, creates a "partial vacuum" or region of lowered particle density. (Such a region may have a high electrical resistivity; in fact, as density is lowered, resistivity decreases until a certain threshold density is reached, at which¹³ resistivity increases again.) In the second, or equilibrium phase, Tesla hypothesized that a second (or third, or further) discharge(s) in the same channel resistively or otherwise heats this low density region of the air to such an elevated temperature that its kinetic pressure matches that of the ambient medium. It is now proposed to complete Tesla's theory by

inclusion of the surface tension effect mentioned above, which makes the fireball a dynamically stable equilibrium.

To prove this, let P denote the plasma region, assumed to be a solid sphere of radius R and surface Σ , and let A denote a surrounding region of air. Let p_0 denote the plasma pressure, and let $p_a < p_0$ denote the ambient atmospheric pressure. Let $\Delta p/p_a = (p_0 - p_a)/p_a = \eta$ denote the logarithmic pressure gradient across the plasma surface, i.e., η denotes the percentage decrease in pressure compensated for by the surface tension. The total energy W of this system is given by (Rose and Clark⁹)

$$W = \iiint_{P \cup A} \left\{ \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{p}{\gamma - 1} \right\} dV + \iiint_P \frac{1}{2} \epsilon E^2 dV \quad (1)$$

where ρ denotes mass density; v , fluid velocity; E , electrical field strength; $\epsilon \approx \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$, permittivity; and γ , the ratio of specific heats. At the plasma surface, a space charge (due to greater electron than ion loss) builds up a plasma potential $\phi = kT/e$, where $k = 1.3804 \times 10^{-23}$ denote the Boltzmann constant, $e = 1.6021 \times 10^{-19}$ the electronic charge, and T the electron temperature. (After the build-up of ϕ , ion and electron loss rates are equal.) Most of this potential ϕ is observed to appear in a thin sheath of thickness d at the plasma surface. Hence $E = \phi/d = kT/ed$, and, also, the second volume integral becomes d times a surface integral over the plasma surface Σ , i.e., after reduction,

$$\iiint_P \frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 dV = \frac{1}{2} \sigma^2 \iint_{\Sigma} dS = \frac{1}{2} \sigma^2 |\Sigma|, \quad (2)$$

where, by definition, the surface tension energy per unit area, σ^2 , is

$$\sigma^2 = \epsilon_0 (kT)^2 / e^2 d, \quad (3a)$$

and where we can prove that, for pressure balance,

$$\sqrt{2} d = (\epsilon_0 kT/e^2 n)^{1/2} \equiv \lambda_D, \quad (3b)$$

the Debye shielding length, where n denotes particle density; in fact, using the perfect gas law,

$$p_0 = nkT = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2}\epsilon_0 \frac{k^2 T^2}{e^2 d^2}, \quad (4)$$

we find readily that (3b) must hold, whence, by (3a),

$$\sigma^2/p_0 = \sqrt{2} (\epsilon_0^{1/2}/e)(kT/n)^{1/2}. \quad (5)$$

For a stable static equilibrium, necessary and sufficient conditions are that

$$W = \iiint_{PuA} \frac{p}{\gamma-1} dV + \frac{1}{2} \sigma^2 |\Sigma| \quad (6)$$

should have a vanishing first variation δW and a positive-definite second variation $\delta^2 W$.

Now (correcting an erroneous formula in the standard literature¹⁴) it can be shown that

$$\delta |\Sigma| = - \iint_{\Sigma} \zeta_n (2H) dS, \quad (7a)$$

$$\delta^2 |\Sigma| = \iint_{\Sigma} (\zeta_n^2 (2\bar{K}) + |\nabla_{(2)} \zeta_n|^2) dS, \quad (7b)$$

where ζ_n denotes the normal component on Σ of a displacement vector $\vec{\zeta}$ which vanishes outside of A , and where, if $\vec{n}_0$ denotes the outward-pointing normal vector to Σ ,

$$2H \equiv (k_1 + k_2) = - \nabla \cdot \vec{n}_0 = - 2/R, \quad (7c)$$

$$2K \equiv 2(k_1 k_2) = (\nabla \cdot \vec{n}_0)^2 + |\nabla \times \vec{n}_0|^2 + n_0 \cdot \nabla^2 \vec{n}_0 = 2/R^2 \quad (7d)$$

$$2\bar{K} \equiv 2(2H^2 - K) \equiv (k_1)^2 + (k_2)^2 = (2H)^2 - 2K = 2/R^2, \quad (7e)$$

where $\kappa_i (i=1,2)$ are the principal curvatures of Σ . (Also, if the element of arc on Σ is $(ds)^2 = E(du)^2 + 2F(du)(dv) + G(dv)^2$ where $W^2 = EG - F^2 > 0$, then $dS = Wdudv$, and, by definition,

$$|\nabla_{(2)}\phi|^2 = [G(\phi_u)^2 - 2F\phi_u\phi_v + E(\phi_v)^2]/W.)$$

Now, as usual, $\delta W = 0$ if and only if

$$\nabla p_o = 0 \quad \text{in } P, \quad \nabla p_a = 0 \quad \text{in } A \quad (8a)$$

$$p_o = p_a + 2 \sigma^2/R \quad \text{on } \Sigma \quad (8b)$$

while, using (8a,b),

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\delta^2 W = & \frac{1}{2} \iiint_P \gamma p_o (\nabla \cdot \vec{\zeta})^2 dV + \frac{1}{2} \iiint_A \gamma p_a (\nabla \cdot \vec{\zeta})^2 dV^2 + \\ & + \frac{1}{4} \sigma^2 \iint_{\Sigma} \left\{ \frac{2}{R^2} \zeta_n^2 + |\nabla_{(2)} \zeta_n|^2 \right\} dS. \end{aligned} \quad (8c)$$

In the interior of $P \cup A$ the linearized equation of motion for the fluid displacement $\vec{\zeta}$ is

$$\rho_o \partial^2 \vec{\zeta} / \partial t^2 = \gamma p_o \nabla (\nabla \cdot \vec{\zeta}). \quad (8d)$$

Every displacement $\vec{\zeta}$ can be expressed in the form (assuming $\vec{\zeta} \equiv 0$ outside A)

$$\vec{\zeta} = \nabla \phi + \nabla \times \vec{\eta} \quad \text{in } P \cup A, \quad (9a)$$

$$\partial \phi / \partial n = \zeta_n, \quad \vec{n}_o \cdot \nabla \times \vec{\eta} = 0 \quad \text{on } \Sigma. \quad (9b)$$

The displacements having initial conditions

$$\vec{\zeta}(0) = \nabla \times \vec{\eta}_o, \quad [\partial \vec{\zeta} / \partial t](0) = \nabla \times \vec{\eta}_1 \quad (10a)$$

lead by inspection to unique corresponding solutions

$$\vec{\zeta}(t) = \nabla \times \vec{\eta}_0 + t(\nabla \times \vec{\eta}_1), \quad (0 \leq t < +\infty), \quad (10b)$$

which, although growing linearly with time, do not affect the equilibrium (since they merely rotate the boundary surface Σ into itself without changing the volumes P or A). Hence, by linearity of (8d), we can without loss of generality assume that

$$\vec{\zeta} = \nabla \phi \text{ in } PuA \quad (11a)$$

in which case $\delta^2 W$ (which by inspection of (8c) is non-negative) can vanish only if

$$\nabla^2 \phi = 0 \text{ in } PuA, \partial \phi / \partial n = 0 \text{ on } \Sigma, \phi \equiv 0 \text{ outside } A \quad (11b)$$

i.e., by the theory of Neumann's problem, only if $\phi \equiv 0$, i.e., only if

$$\vec{\zeta} \equiv 0. \quad (11c)$$

Therefore $\delta^2 W$ is strictly positive-definite and the linearized equilibrium $\vec{\zeta} \equiv 0$ is neutrally stable. It can be shown that this conclusion remains true of the original nonlinear system, also; furthermore, if viscosity is included, then¹⁰ the stability becomes actually asymptotic rather than merely neutral.

Thus, finally, recalling the definitions preceding (1), and using (8b) and (4),

$$n = \frac{\Delta p}{p_0} = \frac{2}{R} \left(\frac{\sigma^2}{p_0} \right) = \left(\frac{\epsilon_0^{1/2}}{e} \right) \left(\frac{kT}{n} \right)^{1/2} \frac{2^{3/2}}{R} \quad (12a)$$

$$p_a = (1-n)nkT, \quad (12b)$$

which pair of equations can be solved, uniquely, to yield the density n and temperature T of the stable equilibrium as

$$nR = 2^{3/2} (\epsilon_0^{1/2}/e) (p_a)^{1/2} / [\eta(1-\eta)^{1/2}], \quad (13a)$$

$$kT/R = \{ (p_a)^{1/2} / 2^{3/2} (\epsilon_0^{1/2}/e) \} [\eta/(1-\eta)^{1/2}]. \quad (13b)$$

Upon letting $R = 10^{-2}r$, and replacing n by $10^6 n$ (to convert from m to cm) one obtains the numerical results shown in Table 1 and quoted at the beginning.

Experiments are presently underway to attempt to duplicate Tesla's apparatus and the conditions under which ball lightning was created.

Acknowledgments. We thank Dr. James L. Tuck for helpful discussions, and we thank Dr. William A. Newcomb for equation (6) and the suggestion to compute the apparently new mathematical results (7 b,c,d,e) leading to the main physical results (8 b,c). We also thank Mr. Charles Cagle for additional references.^{7bis}

POSTSCRIPT. In the theory¹⁵ of Surface Tension, our (8b) is Laplace's Formula. Dmitriev, et al¹⁶ find optical emissions from ball lightning consistent with a temperature of 5×10^3 to 1.5×10^4 K; they assume a plasma ball surrounded by a "compressed shell of negative oxygen and ozone ions." Stakhanov¹⁷ postulates $T = 10^3$ °K, $r = 15$ cm, invokes surface tension by a qualitative phenomenological argument, and says that "a calculation, which will be published later" shows stability when the shape is spherical; contaminants (e.g., water droplets) may give mean density approximately equal to ambient, explaining why balls do not rise. However, he assumes $\sigma^2 \propto n^{2/3}$ whereas our quantitative theory (4) - (5) yielded $\sigma^2 \propto n^2$.

REFERENCES

- ¹ Museum Nikola Tesla, Belgrade, Yugoslavia
 - ² W. Brans, Der Kugelblitz, Henri Grand, Hamburg, 1923.
 - ³ M. Rosenweld, Z. Meteorol., 8 (1954), 24.
 - ⁴ J. R. McNally, Preliminary Report, Ball Lightning, unpublished.
 - ⁵ P. A. Silberg, J. Geophys. Res., 67 (1962), 4941.
 - ⁶ E. R. Wooding, Nature, 199 (1963), 272.
 - ⁷ D. Finkelstein and J. Rubinstein, Phys. Rev., 135 (1964), A39
 - ⁸ J. L. Tuck, "Ball Lightning: A Status Summary to November 1971," LA-4847-MS, Los Alamos Scientific Laboratory, New Mexico.
 - ⁹ D. J. Rose and M. Clark, Jr., Plasmas and Controlled Fusion, MIT Press, 1961 (p.291).
 - ¹⁰ S. Chandrasekhar, Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability, Oxford U. Press, 1961.
 - ¹¹ I. Bernstein, E. A. Frieman, M. D. Kruskal, and R. M. Kulsrud, Proc. Roy. Soc., A, 244 (1957), 17.
 - ¹² William A. Newcomb (private communication).
 - ¹³ S. C. Brown, "Breakdown in Gases," Handbuch der Physik, 22 (Gas Discharges II), 534.
 - ¹⁴ W. Blaschke, Vorlesungen Über Differentialgeometrie, Dover, 1945 (p. 256).
- ¹⁵ { ^{dis} For an additional 594 references, not all consulted by us, see:
- Stanley Singer, The Nature of Ball Lightning, Plenum Press, 1971.
- A collection of translated Russian references may be found in Donald J. Kitchie (ed), Ball Lightning, Consultants' Bureau Enterprises, Inc. 1961.
- L. D. Landau and E. M. Lifschitz, Fluid Mechanics (trans.), Pergamon/Addison-Wesley, 1959.
- ¹⁶ M. T. Dmitriev, V. M. Deryugin, and G. A. Kalinkevich, "Optical emission from ball lightning," Sov. Phys. - Tech. Phys., vol. 17, No. 10 (April 1973), pp. 1724-1727.
 - ¹⁷ I. P. Stakhanov, "Concerning the nature of ball lightning," Sov. Phys. - JETP Letters, July 1973, pp. 114-116.

η	nr	T/r
0.7	1.38×10^{11}	1.77×10^8
0.1	5.57×10^{11}	1.46×10^7
0.01	5.31×10^{12}	1.39×10^6
0.001	5.29×10^{13}	1.39×10^5
0.0001	5.29×10^{14}	1.39×10^4

TABLE I

Plasma bubble particle density $n(\text{cm}^{-3})$ and temperature $T (^{\circ}\text{K})$ as functions of bubble radius $r(\text{cm})$ and percent pressure drop η across surface.

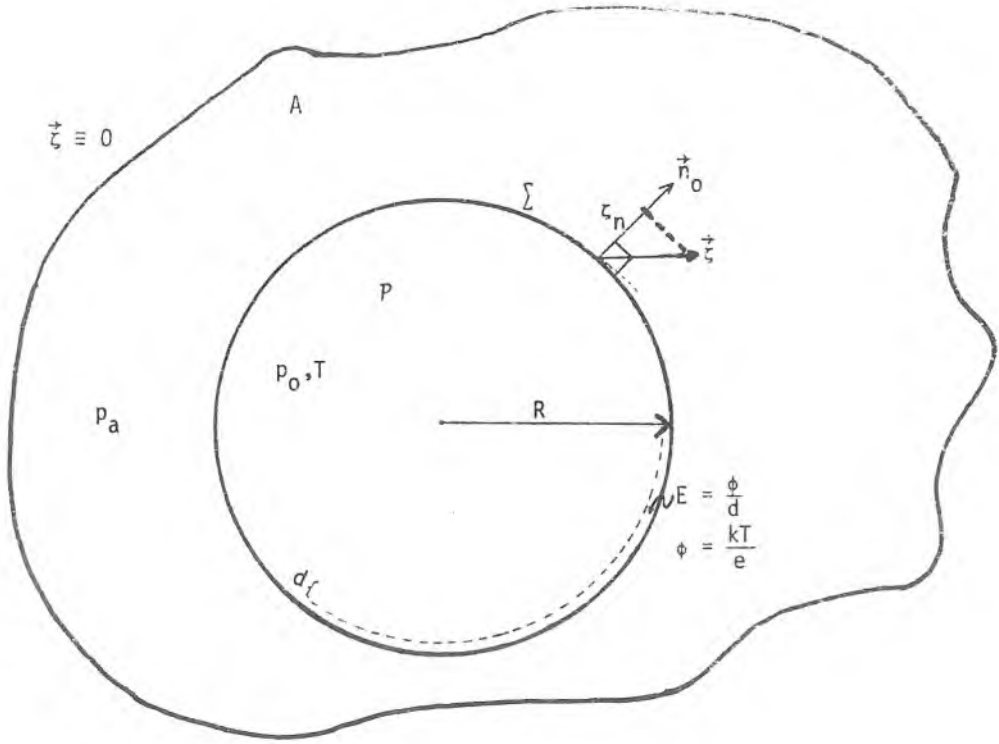


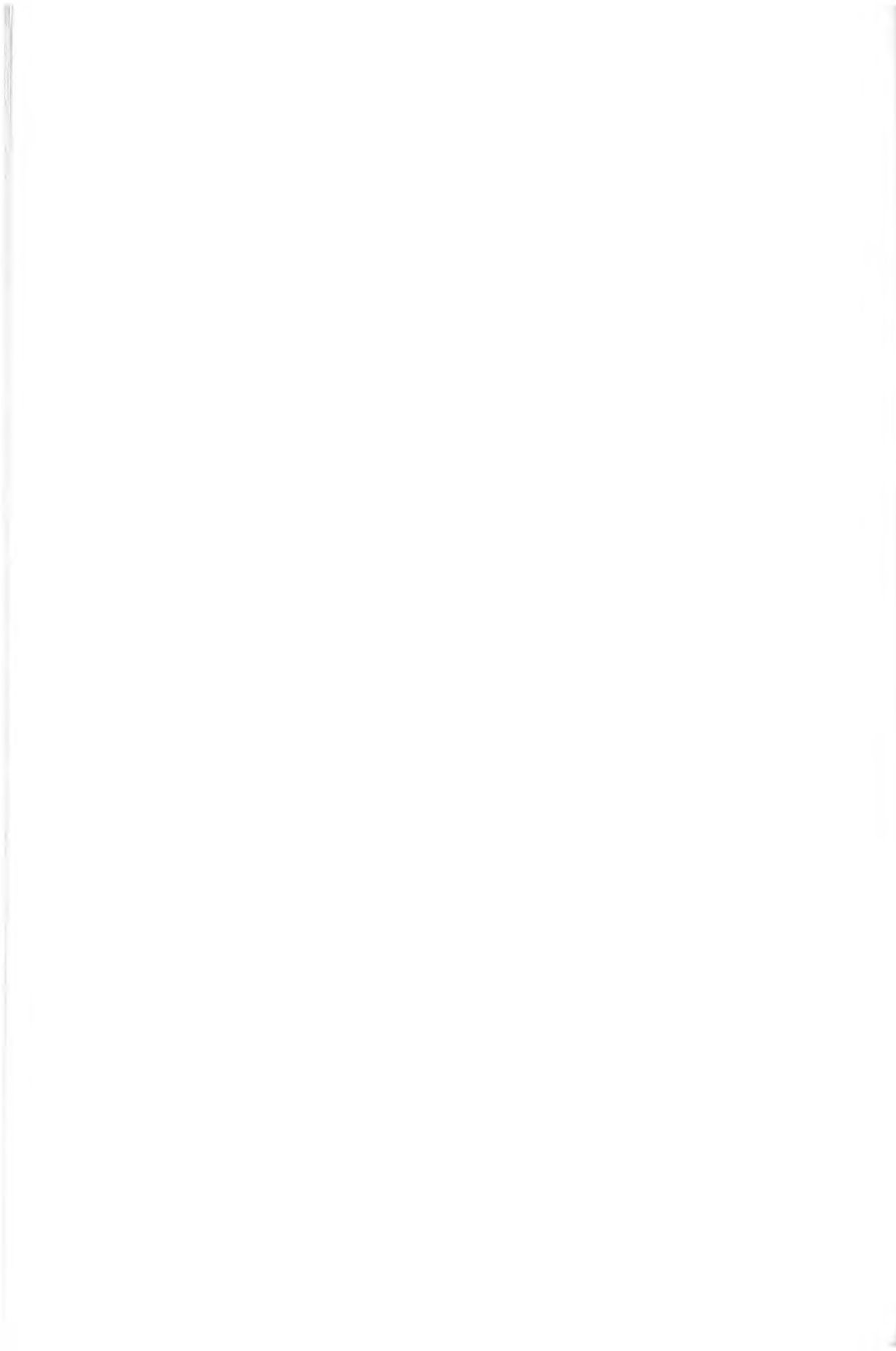
FIGURE 1

Geometry of low-density, high-temperature ionized air bubble relative to ambient air, and nomenclature. Note that pressure balance $p_o = \frac{1}{2}\epsilon_o E^2$ implies that $\sqrt{2} d = \lambda_D$, the Debye shielding length.



V. Poglavlje

TEORIJA MAŠINA



Zvonko Čulig, dipl.inž.
Elektrotehnički institut
pod. "Rade Končar"-Zagreb

SUVREMENA ANALIZA DINAMIČKIH STANJA VELIKIH GENERATORA

Prikazan je proračun dinamike sinhronog generatora pomoću digitalnog računala. Proračun se zasniva na potpunom sistemu diferencijalnih jednačbi sinhronog stroja koji paralelno radi na krutu mrežu. Posebno su razmotreni primjeri simetričnih i nesimetričnih prijelaznih pojava koje nastaju kod raznih vrsta udarnih kratkih spojeva, uključivanja generatora u elektroenergetski sistem i drugih pogonskih smetnji.

MODERN ANALYSIS OF DYNAMIC CONDITIONS OF LARGE SYNCHRONOUS GENERATORS

The dynamic conditions of synchronous generators have been calculated on a digital computer. The calculation is based on a complete system of differential equations of the synchronous machine operating parallel on a hard network. Examples of symmetrical and non-symmetrical transient phenomena are considered in detail.

1. UVOD

Za racionalno projektiranje, izbor zaštite i eksploataciju sinhronih generatora, neophodno je poznavati karakter prijelaznih pojava za vrijeme izvanrednih pogonskih stanja i smetnji (asinhroni rad i resinhronizacija, gruba sinhronizacija, udarni kratki spojevi, demagnetizacija i dr.). Dublje poznavanje raznih vrsta prijelaznih stanja u sinhronim strojevima postalo je

posebno važno posljednjih godina, kad se njihova konstrukcija zasniva na velikim specifičnim opterećenjima aktivnog materijala i uvođenju osjetljivih elemenata energetske poluvodičke tehnike u uzbudne sisteme. U najopasnije smetnje mogu se ubrojiti sve vrste udarnih kratkih spojeva, od kojih su nesimetrični /jednofazni, dvofazni i dvofazni dozemni/ najčešći. Pri tome je poznato da je trofazni kratki spoj najteži sa stanovišta održanja dinamičke stabilnosti elektroenergetskog sistema, zbog čega i služi kao jedan od kriterija pri njezinu proračunu.

Nesimetrični kratki spojevi ne služe kao kriterij za određivanje dinamičke stabilnosti. Međutim, oni su također opasni za stroj zbog pojave velikih struja i izmjeničnih komponenata elektromagnetskog momenta, izobličenja reakcije armature i povišenja napona u slobodnoj fazi /značajno za sinhronne strojeve sa slabim prigušenjem u poprečnoj osi/. Intenzitet harmonijskog spektra armaturene struje i izobličenja reakcije armature može se naročito povećati pri nesimetričnim kratkim spojevima prethodno kapacitivno opterećenog generatora.

Asinhrona stanja dosta često nastupaju u suvremenoj eksploataciji sinhronih strojeva. Ona mogu biti uzrokovana raznim pogonskim situacijama, od kojih su najpoznatije:

- neispunjeni uvjeti za točnu sinhronizaciju pri uključivanju u paralelni rad;
- vanjske smetnje /npr. veliki padovi napona uslijed udarnih kratkih spojeva u mreži, velike udarne promjene opterećenja/;
- slučajno ili namjerno izazvan gubitak uzbudnog napona.

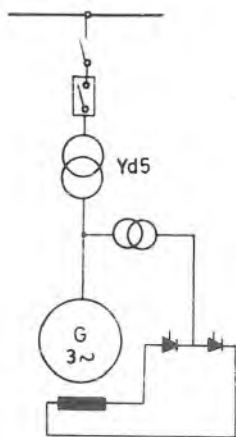
Pri tome asinhrona stanja mogu imati karakter:

- prijelaznog preskoka polova i gubitaka sinhronizma;

- kontinuiranog asinhronog rada kroz dulji vremenski interval, u trajanju do čak nekoliko desetina minuta.

Kako stanje asinhronog gibanja rotora ima veliki utjecaj na iznose struja, elektromagnetskog momenta, zagrijavanja i elektrodinamskih sila, to njegova detaljnija analiza ima posebni praktički značaj za eksploataciju sinhronih strojeva. Naime, poznavanje tih prilika omogućuje da se odredi dozvoljeno trajanje asinhronog stanja i racionalni način na koji se može ponovno uspostaviti normalni režim sinhronog stroja.

Na osnovi matematičkog modela opisanog u [L.1] izvršeni su proračuni prijelaznih stanja sinhronih generatora, čiji podaci su dani u tabeli I.



Sl. 1 Pojednostavljena shema spoja generatora

Tabela I. Podaci generatora, transformatora za samouzbuđivanje i blok-transformatora

Velikina	Hidro-generator	Turbo-generator
S_n (MVA)	167	257
U_n (kV)	18	15,75
$\cos \varphi$	0,9	0,85
n (o/min)	136,4	3000
U_{fn} (V)	275	420
I_{fn} (A)	1890	1930
$U_{f \text{ faz}}$ (V)	$231 \cdot 10^3$	$199 \cdot 10^3$
$I_{f \text{ faz}}$ (A)	721,5	1240
r_a (rv)	0,00240	0,00169
x_l (rv)	0,162	0,195
x_d (rv)	0,795	1,932
x_d' (rv)	0,30	0,288
x_d'' (rv)	0,22	0,198
x_q (rv)	0,50	1,74
x_q'' (rv)	0,25	0,286
r_f (rv)	0,00045	0,00126
x_{lf} (rv)	0,176	0,16
x_f (rv)	0,809	1,327
r_{kd} (rv)	0,0129	0,0025
x_{lkd} (rv)	0,100	0,943
r_{kq} (rv)	0,007	0,0025
x_{lkq} (rv)	0,119	0,131
x_{σ} (rv)	0,136	0,068
T_m (s)	7,627	2,496
Transformator za samouzbuđivanje		
U_{i11}/U_{i12} (V/V)	18000/ $\sqrt{3}$ 540	15750/ $\sqrt{3}$ 425
Blok-transformator		
spcj	Yd3	Yd5
w_k (rv)	0,12	0,11

2. SIMETRIČNI I NESIMETRIČNI KRATKI SPOJEVI

Na slici 1 je prikazana pojednostavljena shema spoja generatora pri paralelnom radu s elektroenergetskim sistemom. Oba generatora su samouzbudna, tj. njihov uzбудni namot je priključen na tiristorski usmjerivački sklop, koji se napaja od usmjerivačkog transformatora vezanog na izlazne stezaljke armaturnog namota.

U proračunima kratkih spojeva je uračunata zavisnost uzbudnog napona od faznih napona generatora:

$$u_r = f(u_g).$$

Naime, pretpostavlja se da pri pojavi vanjske smetnje nastupa forsiranje uzbude, kad se ventili otvaraju prema prirodnom slijedu vođenja bez kašnjenja /idealni usmjerivački transformator/, a fazni naponi imaju takve trenutne vrijednosti koje odgovaraju realnom stanju za vrijeme trajanja smetnje.

Prikazat ćemo slijedeće primjere proračuna simetričnih i nesimetričnih udarnih kratkih spojeva:

- na stezaljkama armaturnog namota hidrogeneratora /HG/, prethodno opterećenog nazivnim teretom;
- na stezaljkama armaturnog namota HG prethodno opterećenog kapacitativnim teretom;
- na stezaljkama mrežne strane blok transformatora turbogeneratora /TG/, prethodno opterećenog nazivnim teretom.

2.1. Simetrični i nesimetrični kratki spojevi na stezaljkama armaturnog namota hidrogeneratora, prethodno opterećenog nazivnim teretom

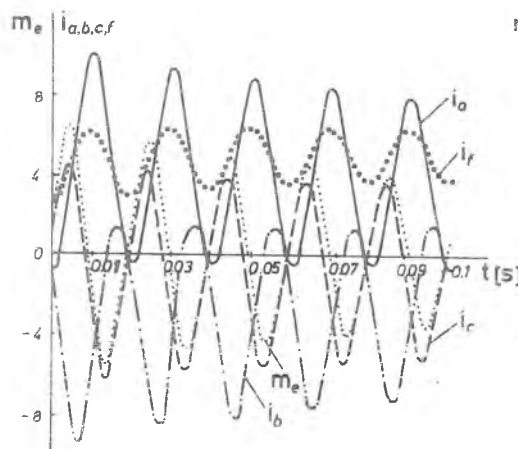
Rezultati proračuna su prikazani tabelarno i na slikama.

U tabeli II su dane maksimalne vrijednosti elektromagnetskog momenta, klizanja i struja u armaturnom uzбудnom i priguš-

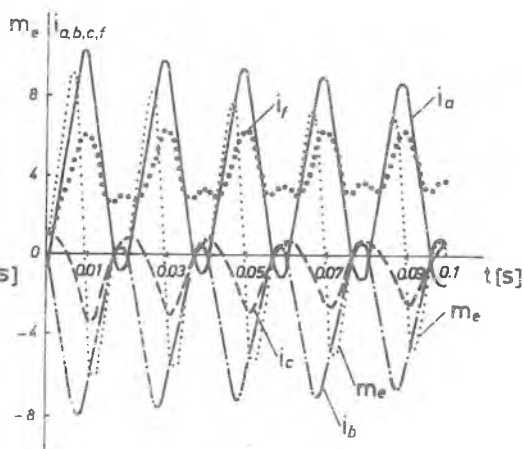
Tabela II. Struje, klizanje i elektromagnetski moment pri različitim vrstama udarnih kratkih spojeva hidrogenatora prethodno opterećenog nazivnim teretom

Red. br.	Vrste udarnog kratkog spoja	Maksimalne vrijednosti					
		i	i_f	i_{ka}	i_{kg}	s	m_e
1	Trofazni	10,161	6,414	5,25	4,20	+0,004 -0,019	+6,53 -5,57
2	Dvofazni	10,386	6,335	5,61	4,46	0,005	+9,17 -6,04
3	Dvofazni dozemni (OGU, OSI)	10,606	6,335	5,61	4,46	+0,005 -0,0002	+9,17 -6,04
4	Dvofazni dozemni (OGI, OSU)	10,168	6,369	5,49	4,29	+0,005 -0,004	+8,15 -5,77
5	Dvofazni dozemni (OGU, OSU)	10,391	6,369	5,49	4,29	+0,005 -0,004	+8,15 -5,77
6	Jednofazni dozemni (OGU, OSI)	15,544	3,912	1,05	-1,11	0,009	+3,20 -0,56
7	Jednofazni dozemni (OGI, OSU)	7,773	5,433	3,93	3,06	0,006	+6,81 -3,71
8	Jednofazni dozemni (OGU, OSU)	12,028	5,433	3,93	3,06	0,006	+6,81 -3,71

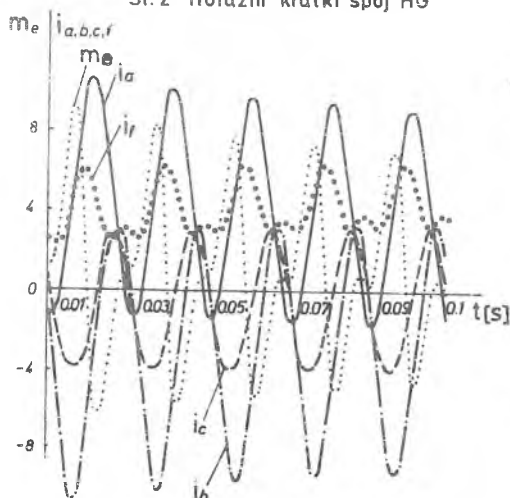
Oznake: OGI — nultočka generatora izolirana, OGU — nultočka generatora uzemljena
OSI — nultočka sistema izolirana, OSU — nultočka sistema uzemljena



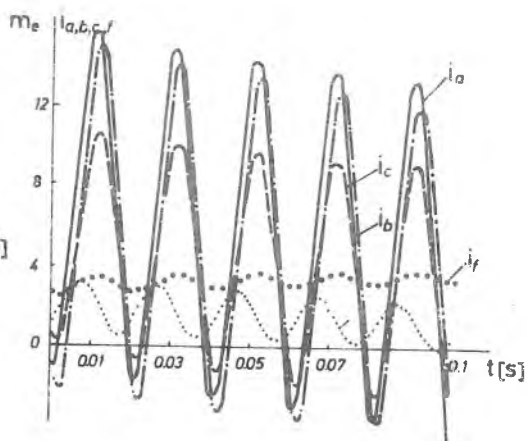
SI.2 Trofazni kratki spoj HG



SI.3 Dvofazni kratki spoj HG



SI.4 Dvofazni dozemni kratki spoj HG (OGU, OSI)



SI.5 Jednofazni dozemni kratki spoj HG (OGU, OSI)

nom namotu, dok su na slikama 2 do 5 prikazane vremenske promjene elektromagnetskog momenta i struja u armaturnom i uzbudnom namotu za pojedine karakteristične vrste udarnih kratkih spojeva na stezaljkama armaturnog namota. Pri međusobnoj usporedbi dobivenih rezultata možemo zapaziti slijedeće.

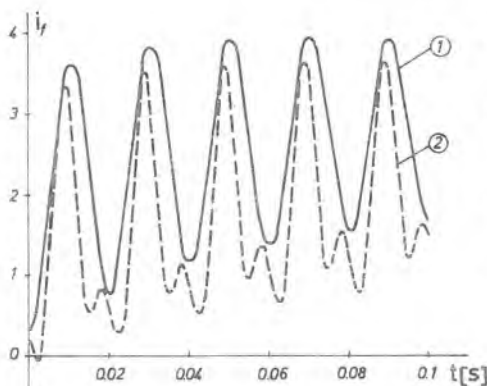
Udarne nesimetrične kratke spojeve generatora karakteriziraju velike promjene elektromagnetskog momenta i struja u armaturnom, uzbudnom i prigušnom namotu. U odnosu na trofazni kratki spoj, kod nesimetričnih kratkih spojeva, susrećemo veće maksimalne iznose elektromagnetskog momenta i struja u armaturnom namotu. Tako najveći udarac struje u armaturnom namotu nastupa pri jedno-faznom dozemnom kratkom spoju uz izoliranu nultočku sistema. Pri toj vrsti kratkog spoja ne postoje uobičajeni fazni pomaci između struja armaturnog namota, već se struje praktički fazno podudaraju. To ujedno objašnjava činjenicu zbog čega jedine ova vrsta kratkog spoja uzrokuje najmanje promjene elektromagnetskog momenta i struja u rotoru. Visoke vrijednosti struja u armaturnom namotu potječu od velikih iznosa struja nulte i aperiodeske komponente, od kojih ne zavisi polje u zračnom rasporu, odnosno elektromagnetski moment i struje rotora stroja. Registrirane promjene struja rotora i elektromagnetskog momenta, u ovom našem primjeru kratkog spoja, nastaju zbog forsiranja uzbude, koje je nastupilo uslijed pojave vanjske smetnje na armaturnom namotu.

2.2. Simetrični i nesimetrični kratki spojevi na stezaljkama armaturnog namota hidrogeneratora, prethodno opterećenog kapacitativnom teretom

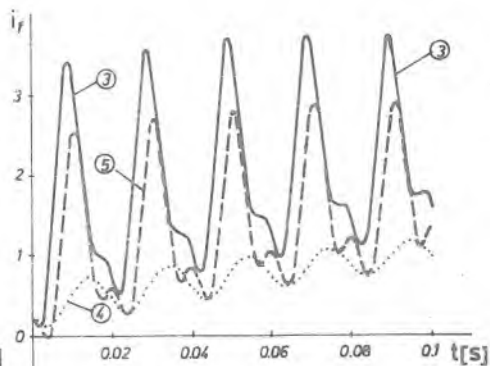
Pretpostavljeno je da generator prije nastanka kratkog spoja ima takav kapacitativni teret da njegova uzbudna struja iznosi svega 10% nazivne vrijednosti. U času nastanka kratkog spoja uzbudni sistem se prevodi u režim forsiranja.

Tabela III. Struje, klizanje i elektromagnetski moment hidrogeneratora prethodno opterećenog kapacitivnim teretom

Red. br.	Vrste udarnog kratkog spoja	Maksimalne vrijednosti					
		i	i_f	i_{kd}	i_{kq}	s	m_e
1	Trofazni	8,152	3,982 0,263	4,98	3,08	0,003	3,87 -3,27
2	Dvofazni	7,207	3,693 -0,080	4,86	-3,90	0,005	4,90 -3,61
3	Dvofazni dozemni (OGU, OSI)	9,288	3,693 -0,080	4,86	-3,90	0,005	4,90 -3,61
4	Dvofazni dozemni (OGI, OSU)	7,423	3,738 0,139	4,90	-3,62	0,004	4,56 -3,17
5	Dvofazni dozemni (OGU, OSU)	8,902	3,738 0,139	4,90	-3,62	0,005	4,56 -3,17
6	Jednofazni dozemni (OGU, OSI)	15,496	1,627 0,139	0,55	-0,91	0,004	1,00 -0,12
7	Jednofazni dozemni (OGI, OSU)	5,397	3,045 -0,029	3,64	-3,11	0,005	3,69 -2,49
8	Jednofazni dozemni (OGI, OSU)	10,143	3,045 -0,029	3,64	-3,11	0,005	3,69 -2,49



Sl. 6 Struja u uzбудnom namotu HG
1—trofazni kratki spoj;
2—dvofazni kratki spoj;
dvofazni dozemni kratki spoj (OGU, OSI).



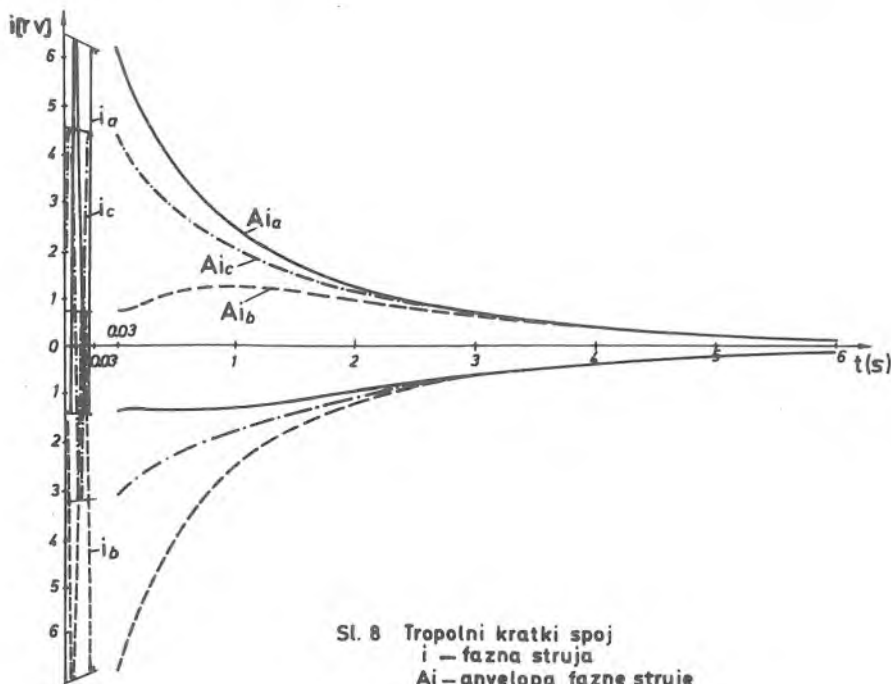
Sl. 7 Struja u uzбудnom namotu HG
3—dvofazni dozemni kratki spoj (OGI, OSU),
—dvofazni dozemni kratki spoj (OGU, OSU),
4—jednofazni dozemni kratki spoj (OGU, OSI),
5—jednofazni dozemni kratki spoj (OGI, OSU),
—jednofazni dozemni kratki spoj (OGU, OSU).

U tabeli III dani su iznosi izračunatih karakterističnih veličina, a na slikama 6 i 7 prikazane su vremenske promjene struje u uzbudnom namotu. Ovdje su posebno zanimljivi slučajevi dvofaznih i jednofaznih kratkih spojeva, kada struja u uzbudnom namotu mijenja smjer. Za uzbudni sistem s usmjerivačima to je ekvivalentno trenutnom prekidu strujnog kruga i pojavi velikih prenapona na uzbudnom namotu i usmjerivačkim ventilima. Zbog toga je pri projektiranju uzbudnih sistema s usmjerivačima neophodno poznavanje takvih prijelaznih pojava, kod kojih postoje realni uvjeti za promjenu smjera uzbudne struje, da bi se mogla predvidjeti i dimenzionirati odgovarajuća zaštita uzbudnog sistema.

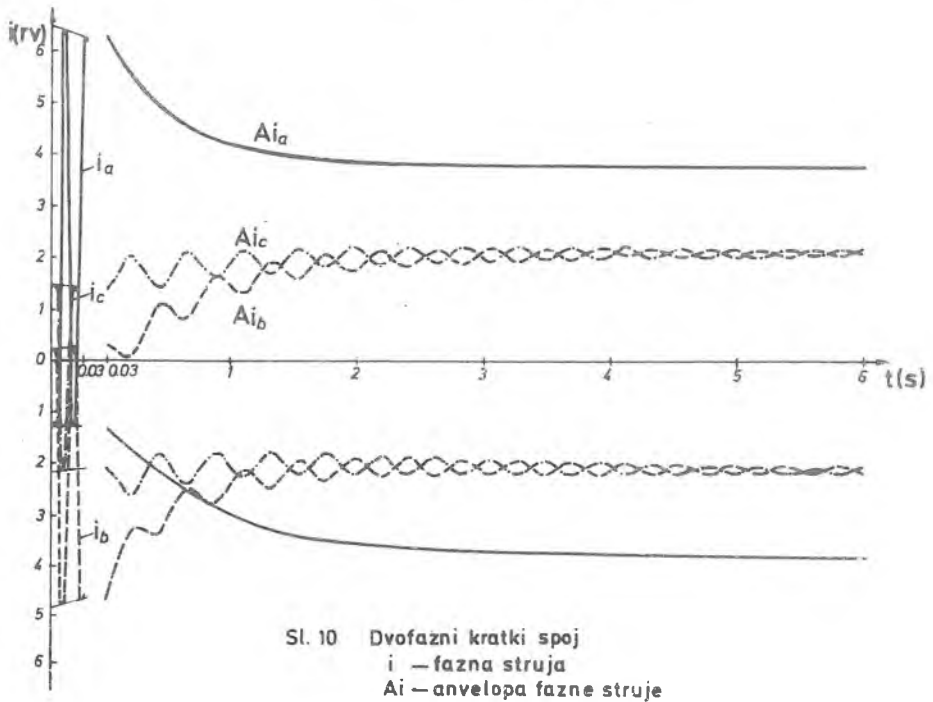
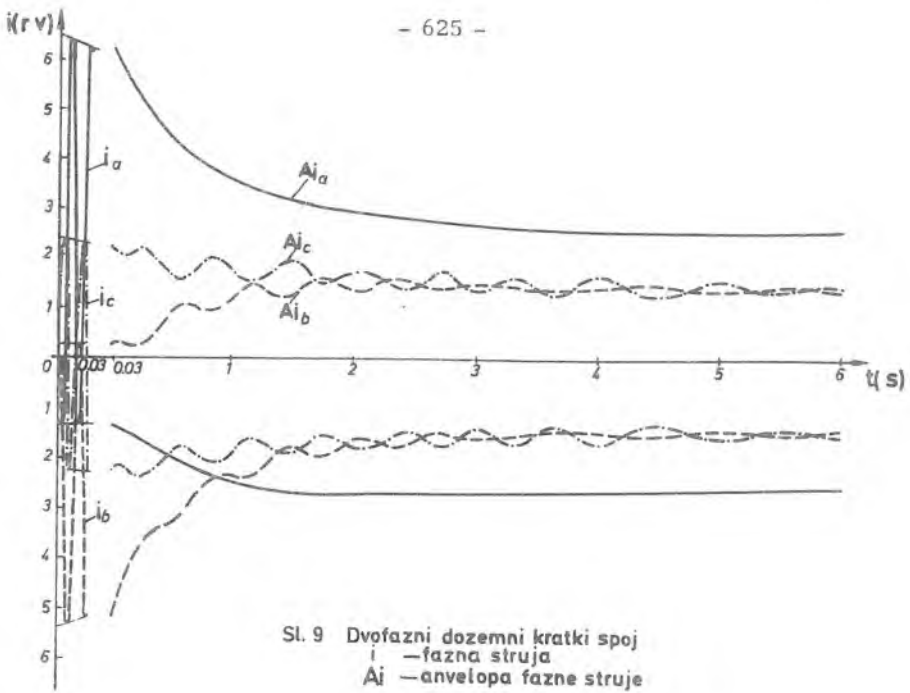
2.3. Simetrični i nesimetrični kratki spojevi na stezaljkama mrežne strane blok-transformatora turbogeneratora

Svrha ovog primjera proračuna je ta da se dobije uvid u vremenski tok struja kratkog spoja samouzbudnog generatora, što je važno za izbor zaštite i projektiranja njezine selektivnosti.

Na slikama 8 do 11 prikazani su rezultati proračuna faznih struja turbogeneratora za četiri vrste kratkih spojeva na stezaljkama mrežne strane blok-transformatora /spoj Yd5/. Kod nesimetričnih kratkih spojeva, preko faze koja nije zahvaćena smetnjom, odražava se bitan utjecaj vanjskog energetskog sistema na uzbudni napon generatora, tako da u toku prijelazne pojave može nastupiti i forsiranje uzbude koja ima tendenciju ne samo da podržava stalnu veliku vrijednost armaturne struje /slučajevi dvopolnog i dvopolnog dozemnog kratkog spoja - slika 9 i 10/, već da je i povećava /jednofazni dozemni spoj - sl.11/. Jasno je da će u realnim uvjetima trajno održanje ili porast velikog iznosa armaturne struje kod dvopolnih i jednopolnih kratkih spojeva biti spriječeno djelovanjem odgovarajuće zaštite i automatskoj regulatora uzbude.

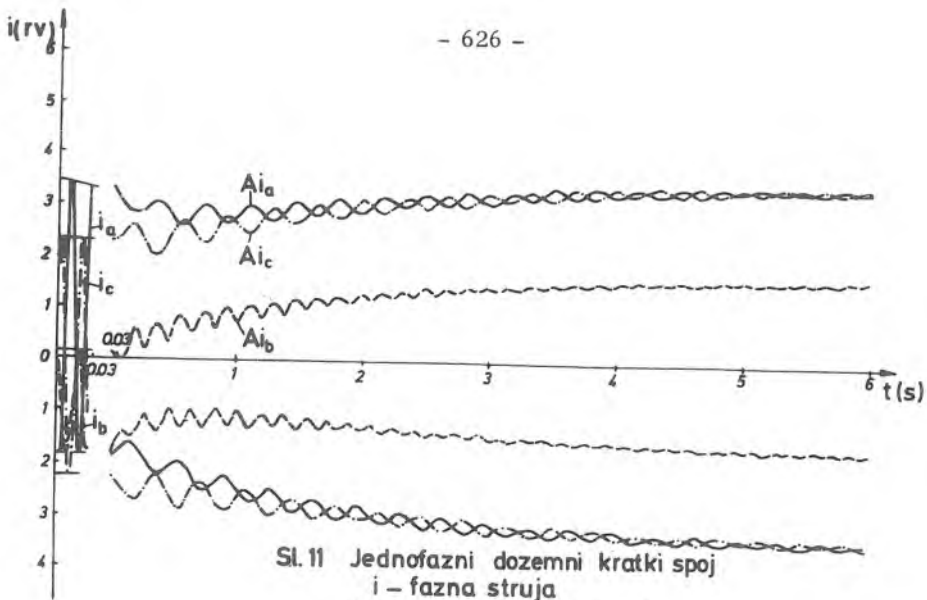


Sl. 8 Trofazni kratki spoj
i — fazna struja
A_i — anvelopa fazne struje



3. PRIJELAZNO ASINHRONO STANJE PRI NETIČNOJ SINHRONIZACIJI

Pri uključivanju sinhronih strojeva u paralelni rad pojavljuju se slučajevi, kad je ispunjenje uvjeta za točnu sinhronizaciju,



Sl. 11 Jednofazni dozerni kratki spoj
i – fazna struja
A_i – anvelopa fazne struje

ponekad povezano sa znatnim teškoćama. Realizacija takvog postupka sinhronizacije odgađa uključivanje u paralelni rad, ponegdje zahtijeva i znatnije povećanje investicije, a može da ugrozi i sveukupnu stabilnost elektroenergetskog sistema. Ovo vrijedi ne samo za generatore u malim autonomnim niskonaponskim mrežama, već i za sve vrste sinhronih strojeva u velikim sistemima.

3.1. Netočna sinhronizacija uzbuđenog sinhronog stroja

Primjeri proračuna su izvedeni za turbogenerator. Pretpostavljene su različite varijante početnih uvjeta pri nastupu netočne sinhronizacije uzbuđenog generatora. Rezultati proračuna su prikazani u tabeli IV i jedan na slici 12.

Na osnovi ovih nekoliko ilustrativnih primjera slijedi, da primjena netočne sinhronizacije uzbuđenog sinhronog stroja dolazi u obzir samo kod manjih i srednjih jedinica i to uz upotrebu prigušnice. Prigušnica se mora tada dimenzionirati tako, da armaturna struja ne prekorači iznos koji bi mogao u mreži uzrokovati pad napona veći od dozvoljenog, uz istovremeno ispunjeni uvjet da prigušenje titrajnog procesa završi do najviše 5 sek.

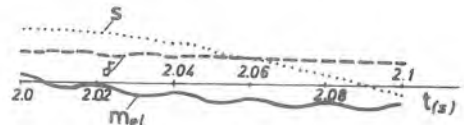
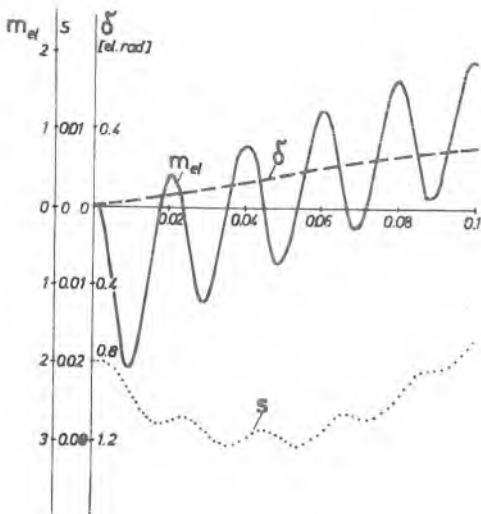
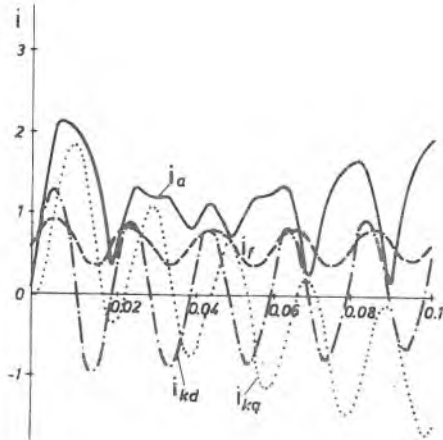
Tabela IV. Rezultati proračuna procesa netočne sinhronizacije uzbuđenog turbogeneratorsa pri njegovom uklapanju na krutu mrežu preko blok transformatorsa

Br.	Konstantne veličine		Početno stanje			Sinhronizacija									
						maksimalne vrijednosti ($t \leq 1$ sek)					$t = 1$ sek				
	u_f	m_f rv	δ_0 rad	s_0 %	i_{f0} rv	i_{am} rv	i_{fm} rv	$m_{f/m}$ rv	s_m %	δ_m rad	i_a rv	i_f rv	m_{el} rv	s %	δ rad
1	u_{f00}	0,02	0	-2	0,57	2,13	0,93	-2,00	-3,05	0,90	0,37	0,55	-0,36	0,62	0,10
2	u_{f0}	0,02	0	-2	0,57	2,13	1,25	2,29	-3,31	0,98	0,735	1,23	-0,624	-0,54	0,088
3	$2u_{f0}$	0,02	0	-2	0,57	2,20	2,97	-2,17	-3,07	0,89	1,88	2,97	1,16	-1,47	0,57
4	u_{f00}	0,02	-4	0,57	3,32	1,18	3,26	-4,84	1,25	0,65	0,53	-0,62	1,04	0,06	
5	u_{f00}	0,02	$\pi/2$	-2	0,57	6,31	1,81	6,41	6,69	1,62	1,54	6,72	-1,33	-1,91	-0,09
6	u_{f00}	0,02	$\pi/2$	-4	0,57	6,32	1,90	6,32	7,23	1,79	1,89	6,74	-1,59	-0,21	-0,26
7	u_{f00}	0,02	$3\pi/4$	0	0,57	9,02	2,59	9,61	10,3	2,36	1,50	0,61	-1,06	3,96	-0,00
8	u_{f00}	0,02	π	0	0,57	12,34	3,39	9,01	12,08	3,14	0,073	0,52	-0,04	-4,67	0,145
9	u_{f00}	0,02	π	-2	0,57	12,41	3,69	9,74	11,29	3,14	0,34	0,48	0,20	-4,74	0,50
10	u_{f00}	0,02	π	-4	0,57	12,48	4,06	0,63	-9,21	8,88	1,62	0,65	0,89	0,23	0,79

Oznake:

u_{f00} — uzbuđni napon pri praznom hodu generatora,
 u_{f0} — nazivni uzbuđni napon generatora,
 m_f — moment turbine,

$i_a = i$ — rezultirajuća armaturna struja,
 i_f — struja u uzbuđnom namotu,
 i_{kd}, i_{kq} — struje u prigušnom namotu u d q osima.



Sl.12 Prijelazna pojava pri netočnoj sinhronizaciji uzbuđenog turbogeneratorsa

$u_f = u_{f00} = \text{konst.}, i_{f0} = i_{f00}, m_f = \text{konst.} = 0.02, \delta_0 = 0, s_0 = -0.02$

3.2. Netočna sinhronizacija neuzbuđenog sinhronog stroja

Rezultati proračuna, koji su samo djelomično prikazani u tabeli V i na slici 13 svjedoče o tome da prijelazna pojava pri netočnoj sinhronizaciji neuzbuđenog turbogeneratorsa ima znatno slabiji intenzitet nego u slučaju uzbuđenog stroja.

Dakle, elektrodinamičke prilike pri netočnoj sinhronizaciji neuzbuđenog stroja su znatno povoljnije nego pri uzbuđenom. To je osnovni razlog zbog kojeg je ovaj način netočne sinhronizacije našao primjenu pri uključivanju u paralelni rad ne samo manjih već i velikih sinhronih strojeva.

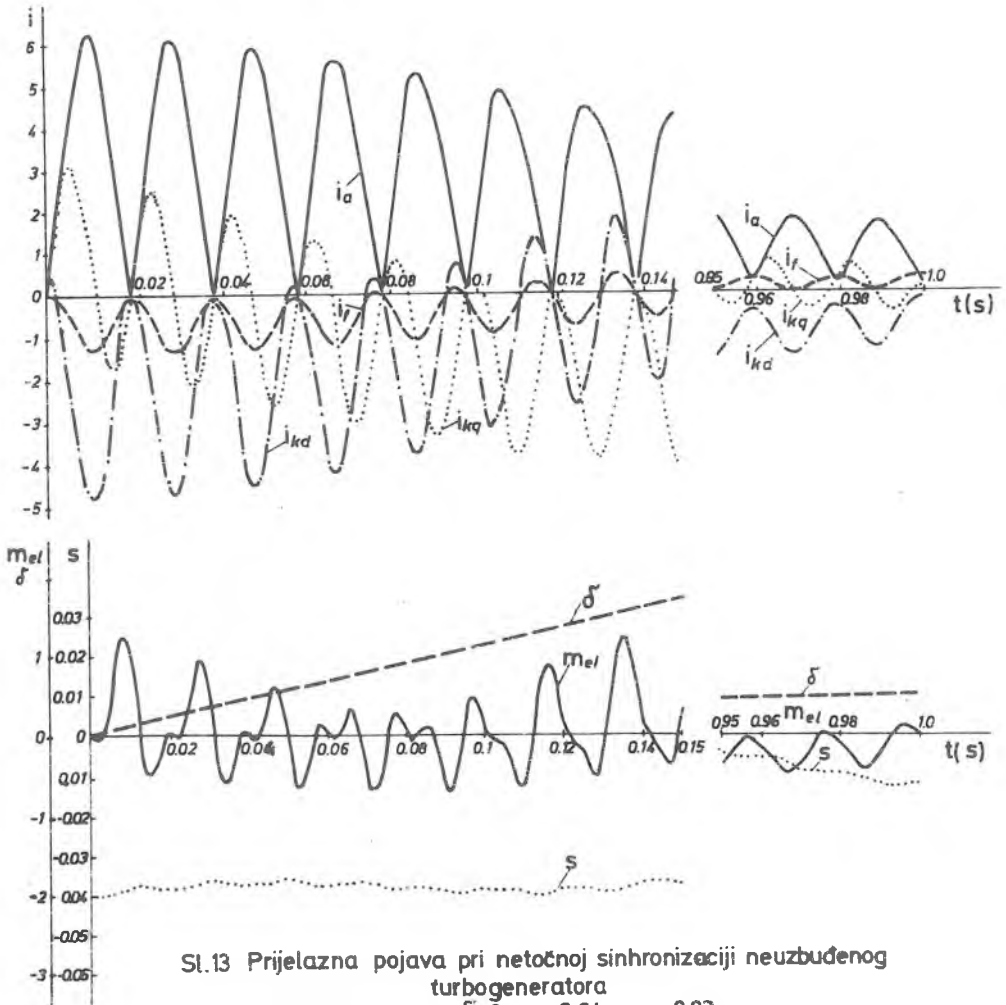


Tabela V. Rezultati proračuna procesa netočne sinhronizacije neuzbuđenog turbogeneratorsa pri njegovom uklapanju na krutu mrežu preko blok transformatora

Br.	Konst. vel.	Početno stanje			Uključivanje uzbuđe			Sinhronizacija									
								maksimalne vrijednosti ($t \leq 0,5$ sek)					$t = 0,5$ sek				
								i_{sm} rv	i_{fm} rv	m_{sim} rv	s_m %	δ_m rad	i_s rv	i_f rv	m_{ef} rv	s_e %	δ rad
1	0,02	0	0	r_{fo}	0,1	u_{fo}	r_{fo}	6,21	-1,53	1,35	2,09	-1,26	0,21	0,019	0,083	-0,84	-0,69
2	0,02	0	-4	r_{fo}	0,1	u_{fo}	r_{fo}	6,31	-1,50	1,28	-4	2,74	0,92	0,11	-0,22	1,32	1,41
3	0,02	0	-4	r_{fo}	0,1	u_{fo}	r_{fo}	6,31	-1,51	1,28	-4,08	2,69	0,92	0,06	-0,36	1,12	1,34
4	0,02	0	-4	$5r_{fo}$	0,1	u_{fo}	r_{fo}	6,30	-1,29	0,2	-4	2,50	0,87	-0,06	-0,37	0,47	1,10
5	0,02	0	-4	$5r_{fo}$	0,1	u_{fo}	r_{fo}	6,30	1,58	2,15	-4	2,47	0,85	0,21	-0,37	0,67	0,88
6	0,02	0	-4	$5r_{fo}$	0,2	u_{fo}	r_{fo}	6,30	1,50	2,12	-4	2,54	0,89	0,23	-0,38	0,85	0,98
7	0,02	π	-4	$5r_{fo}$	0,1	u_{fo}	r_{fo}	6,30	1,28	1,94	-4	5,72	0,90	0,65	-0,40	0,11	4,69

Oznaka: r_{fo} — otpor uzbuđenog namota u hladnom stanju, r_f — otpor uzbuđenog kruga.

4. ZAKLJUČAK

Razvoj tehnike brzih digitalnih računskih strojeva omogućio je posljednjih godina da se znatno djelotvornije i kvalitetnije pristupi analizi dinamičkih stanja električnih strojeva. Prikazani primjeri ilustriraju jedan takav suvremeni pristup analizi izvanrednih pogonskih stanja velikih sinhronih generatora, kojima bitni značaj za točnije poznavanje prilika u elektroenergetskom sistemu.

LITERATURA

Z.Čulig: Istraživanje izvanrednih pogonskih stanja i smetnji sinhronih generatora. "Elektrotehnika" br.4-6, 1975. Zagreb.

Prof.Dr Zijad Haznadar
Doc.mr Kemal Hot
Mr Josip Matjan
Mr Marijan Djurek
Elektrotehnički fakultet, Zagreb

NUMERIČKE METODE PRORAČUNA POLJA U ELEKTRIČNIM STROJEVIMA

U referatu su opisani numerički postupci za preračunavanje elektromagnetskih polja u transformatorima i rotacionim električnim strojevima.

U prvom dijelu upotrebljen je postupak konačnih elemenata za rješenje integralnih jednažbi osno simetričnog rasporeda električnog polja u 380 kV transformatoru. U drugom dijelu upotrijebljen je postupak konačnih diferencija da se riješi sustav diferencijalnih jednažbi magnetskog polja u poprečnom prerezu istosmjernog stroja s permanentnim magnetima.

NUMERICAL METHODS OF FIELD CALCULATIONS IN ELECTRICAL MACHINES

The numerical methods used for the evaluation of electromagnetic fields in transformers and rotating electric machines are described. In the first part the finite elements method for the calculation of integral equations of axially symmetrical electrical fields in a 380 kV transformer is used.

In the second part the finite difference method is applied in the numerical solution of the differential equations system for the magnetic field of the dc motor cross section with permanent magnets excitation.

1. UVOD

Naprave i uređjaji za konverziju energije, kao što su asinhroni, sinhroni i istosmjerni rotacioni strojevi te transformatori svih veličina, vrsta i različite namjene, projektiraju ./. .

se danas uz pomoć elektroničkih računala. Usporedo s upotrebom računala u projektiranju razvijali su se i usavršavali različiti numerički postupci preračunavanja.

Kvalitetnu promjenu i napredak u projektiranju električkih strojeva predstavljao je postupni prelazak na proračun polja u strojevima, bilo u pojedinim zonama stroja ili u cijelosti. Razvoj numeričkih postupaka za proračun električkih i magnetskih, u osnovi kvazistatičkih polja, odvijao se u dva glavna pravca. Prvi pravac je išao k upotrebi metoda konačnih diferencija za rješavanje sustava Maxwellovih diferencijalnih jednačbi polja, a drugi je vodio k primjeni metode konačnih elemenata za rješavanje sustava diferencijalnih i integralnih jednačbi polja. Oba postupka imaju svoje prednosti i nedostatke i odgovarajuća područja primjene, iako u osnovi oni predstavljaju samo različite vidove iste metode.

U radu su opisana oba postupka i izvedeni su primjeri njihove primjene.

2. POSTUPAK KONAČNIH ELEMENATA

2.1. Integralne jednačbe

Promatrajmo zadaću u kojoj je zadana vrijednost ϕ_0 potencijala svuda na rubu S_0 zatvorenog područja V ispunjenog različitim dielektricima, stalne dielektričnosti po dionom području.

Takva zadaća može se opisati sustavom integralnih jednačbi što ih zadovoljavaju izvori polja, u ovom slučaju istovaljani plošni naboj na rubu S_0 te inducirani polarizacioni naboj na međuplohama različitih dielektrika S_1 . Ti naboji u praznom prostoru dielektričnosti ϵ_0 zadovoljavaju dvije osnovne vrste integralnih jednačbi. Prvu zadovoljava plošna gustoća naboja $\sigma(\bar{r})$ na rubu; ima oblik Fredholmove integralne jednačbe prve vrste i glasi:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{S_0} \frac{\sigma(\bar{r}') dS'}{|\bar{r} - \bar{r}'|} = \phi_0(\bar{r}) - \phi_u(\bar{r}), \quad \bar{r} \in S_0, \quad (1)$$

ϕ_0 je zadana vrijednost potencijala na rubu, ϕ_u je doprinos svih izvora unutar S_0 potencijala na rubu

$$\phi_u(\vec{r}) = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{S_i} \frac{\sigma_{pi}(\vec{r}') dS'}{|\vec{r}-\vec{r}'|}. \quad (2)$$

Drugu vrst integralnih jednadžbi zadovoljava inducirani polarizacioni naboj na medjuplohama različitih dielektrika $\sigma_{pi}(\vec{r})$

$$\begin{aligned} \sigma_{pi}(\vec{r}) - 2\lambda_{i12} \frac{1}{4\pi} \int_{S_i} \sigma_{pi}(\vec{r}') \frac{(\vec{r}-\vec{r}') \cdot \vec{n}_{i12}(\vec{r})}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3} dS' = \\ = 2\lambda_{i12} [\vec{D}(\vec{r}) \cdot \vec{n}_{i12}(\vec{r})], \quad \vec{r} \in S_i, \end{aligned} \quad (3)$$

gdje je $\vec{D}(\vec{r})$ vektor električne indukcije kojeg u točki $\vec{r}$ tvore svi ostali izvori

$$\vec{D}(\vec{r}) = \sum_{\substack{j=0,1,\dots \\ j \neq i}} \frac{1}{4\pi} \int_{S_j} \sigma_j(\vec{r}') \frac{(\vec{r}-\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3} dS', \quad (4)$$

$\vec{n}_{i12}(\vec{r})$ je jedinični vektor okomit na medjuplohu S_i u točki $\vec{r}$, s tim da gleda iz područja 1 u područje 2, dok je

$$\lambda_{i12} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}. \quad (5)$$

Integrali u (1) do (4) su nepravi ali stječivi, višeznačnost graničnog prijelaza $\vec{r} \rightarrow \vec{r}'$ (ovisno o putu prijelaza) integrala u (3) već je uzeta u obzir, tako da podintegralna funkcija na mjestu $\vec{r}=\vec{r}'$ poprima vrijednost ništa.

2.2. Integralne jednadžbe osnosimetričnog rasporeda

U osnosimetričnim rasporedima nepoznate gustoće plošnog naboja σ ne ovise o obilaznom kutu α , pa se može obaviti neovisna integracija jezgara integralnih operatora po α . Dobiju se nove integralne jednadžbe, koje povezuju izvore u točkama izvodnica C_1 suosnih ploha S_i i koje u sebi sadrže eliptičke

integrale kao jezgre.

Matrički izražene, jednačbe (1) i (3) glase:

$$[P]\vec{\sigma} = \vec{\phi}_0 - \vec{\phi}_u \quad (6)$$

$$\vec{\sigma}_i^{(k+1)} = 2 \lambda_{i12} [DN] \vec{\sigma}_i^{(k)} + 2 \lambda_{i12} \vec{d} \quad (7)$$

Jednačba (7) već je napisana u obliku u kojem se rješava iterativnim postupkom. Za $\lambda_{i12} \ll 1$ postupak stječe, a za vrijednosti λ_{i12} koje se pojavljuju pri proračunima električnog polja u transformatoru, stječivost je vrlo brza, i zadovoljavajuće rješenje dobiva se u nekoliko koraka, uz čvrsti vektor $\vec{d}$.

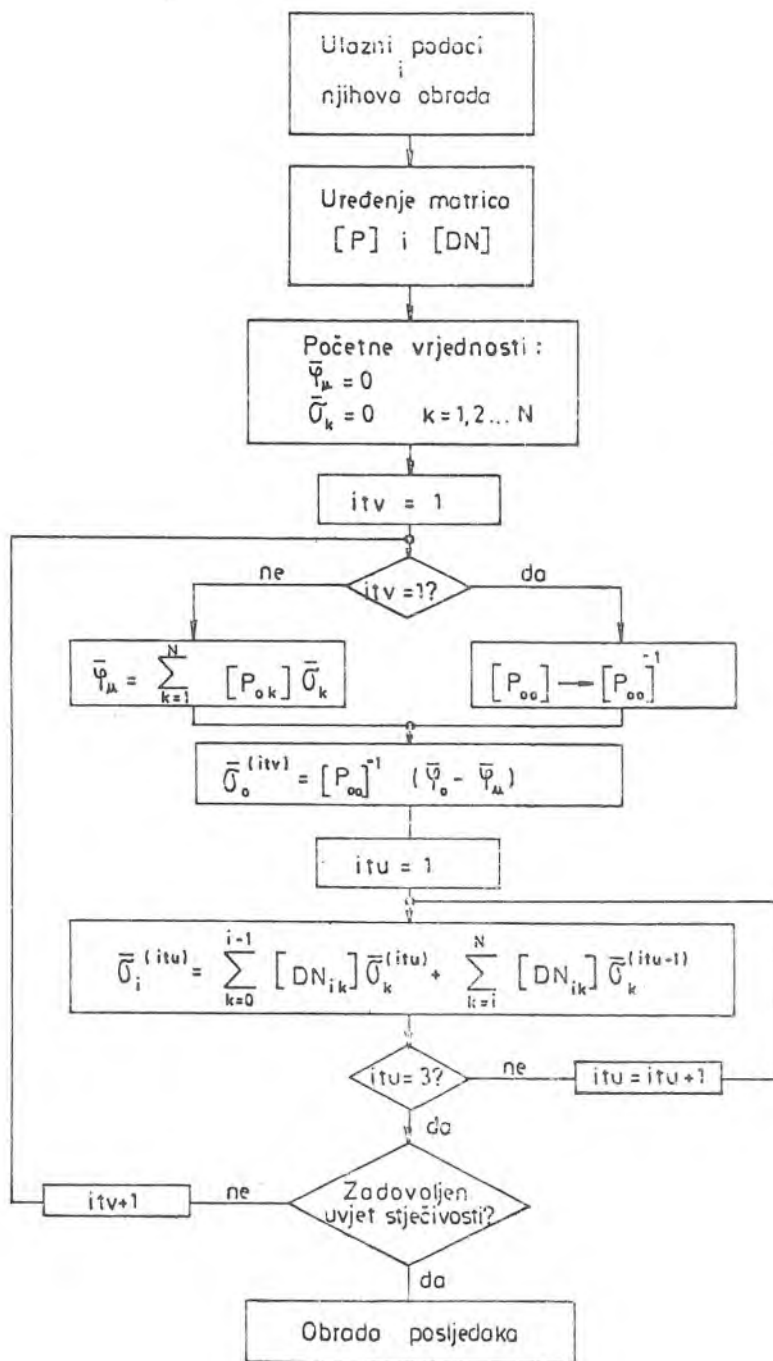
2.3. Opći sustav programa

Na temelju naprijed opisanih teoretskih razmatranja, i uredjenih programa za dione zadaće (6) i (7), razvijen je općeniti sustav programa, koji rješava osnosimetričko električno polje zadanog potencijala ϕ_0 na zatvorenoj izvodnici ruba C_0 , unutar kojega se nalazi N dielektrika s izvodnicama rubnih ploha C_i .

Na slici 1. dan je blok-dijagram iterativnog postupka proračuna. S ITV označen je vanjski, a s ITU unutrašnji iterativni postupak.

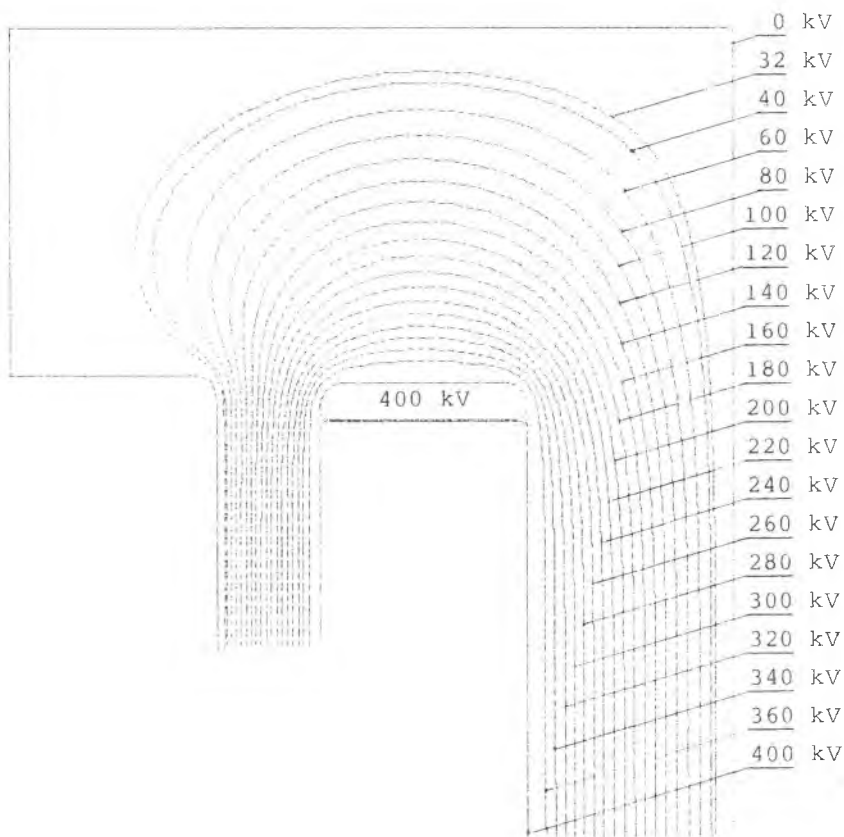
2.4. Proračun električnog polja u 380 kV transformatoru

Za ilustraciju, kako opisani sustav programa radi, načinjen je proračun električnog polja u međjunamotnom prostoru 380 kV transformatora, gdje sustav elektroda tvore namoti pojedinih svitaka i zaštitnih elektroda, zatim stupovi i jaram jezgre te ostali pasivni dijelovi. Naponsko stanje ovisi o namotnom spoju, mjestu i obliku narinutog napona. Najveća dielektrička naprezanja u izolaciji su kod ispitnih napona.



slika 1

Na slici 2. prikazan je raspored linija istog potencijala u međjunamotnom prostoru. Koordinate točaka istog potencijala dobivene su pomoću naprijed opisanog sustava programa.



Slika 2

3. PQSTUPAK KONAČNIH DIFERENCIJA

3.1. Diferencijalne jednačbe

U kvazistatičkom dvodimenzionalnom magnetskom polju, u području mekog magnetskog materijala protjecanom strujama $\vec{J}$, vektorski potencijal određen je diferencijalnom jednačbom

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \bar{A} \right) = \bar{J} , \quad (8)$$

dok je u području tvrdog magnetskog materijala (permanentni magnet) određen s

$$\frac{1}{\mu_p} \text{rot} \text{rot} \bar{A} = \bar{J} + \frac{1}{\mu_p} \text{rot} \bar{M} \quad (9)$$

Da se dobiju jednačbe diferencija koje će poslužiti kao algoritam za numerički postupak, polazi se od jednačbi (8) i (9) pisanih u integralnom obliku uz korištenje poznatog Stokes-ovog teorema

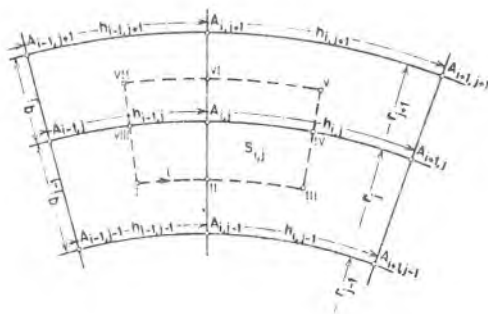
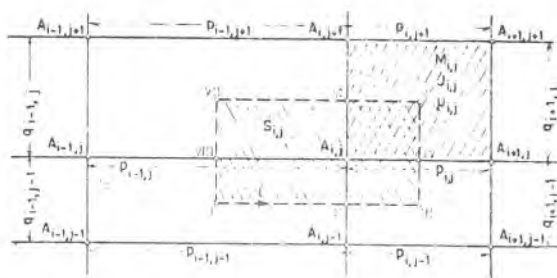
$$\oint_S \frac{\text{rot} \bar{A}}{\mu} d\bar{s} = \int_S \bar{J} n dS \quad (10)$$

$$\oint_S \frac{\text{rot} \bar{A}}{\mu_p} d\bar{s} = \int_S \bar{J} n dS + \frac{1}{\mu_p} \oint_S \bar{M} d\bar{s} \quad (11)$$

Da se provede proračun, potrebno je odabrati odgovarajući broj točaka u računatom području za određeni raspored koji daje mrežu polja, čiji je dio pokazan općenito na slici 3. Za određivanje kružnog integrala prema jednačbi (10) oko točke s koordinatama (i,j) daje ovakva mreža samo po dvije vrijednosti vektorskog potencijala. Zato je nužno pretpostaviti konstantnu magnetsku indukciju uzduž svakog pravocrtnog dijela putanje "1" prema slici 3. ukoliko se želi odrediti veza između vektorskog potencijala u točki (i,j) i vektorskih potencijala u susjednim točkama.

3.2. Rubni uvjeti

Kod određivanja rubnih uvjeta postoje dva karakteristična slučaja. Prvi nastaje kada je magnetsko polje okomito na granicu, tako da vrijedi $\partial A / \partial n = 0$. Mada ovo vrijedi za samu granicu, dozvoljeno je smatrati da vrijedi i za neposrednu vrlo usku okolinu uz granicu. Tako se ustvari pojavljuje efekt preslikavanja polja na drugu stranu granice, što omogućava ustanovljavanje potencijala na liniji mreže izvan granice, te se na



Slika 3

samoj granici može vršiti izračunavanje potencijala.

Drugi karakterističan slučaj rubnih uvjeta nastaje kada su granice područja paralelne magnetskom polju tako da vrijedi $A = \text{const}$. Tada je dovoljno u bilo kojoj točki odrediti iznos vektorskog potencijala za cijelu granicu.

3.3. Provedba proračuna

Za mreže do oko 500 točaka je u najširoj upotrebi metoda određivanja potencijala točku po točku, dok za veće mreže ona pokazuje isuviše sporo približavanje konačnim vrijednostima potencijala, te je povoljnije provesti linijsku iteraciju. Ova se osniva na svojstvu odabrane mreže da se vrijednosti potencijala određenih linija po jednoj koordinati

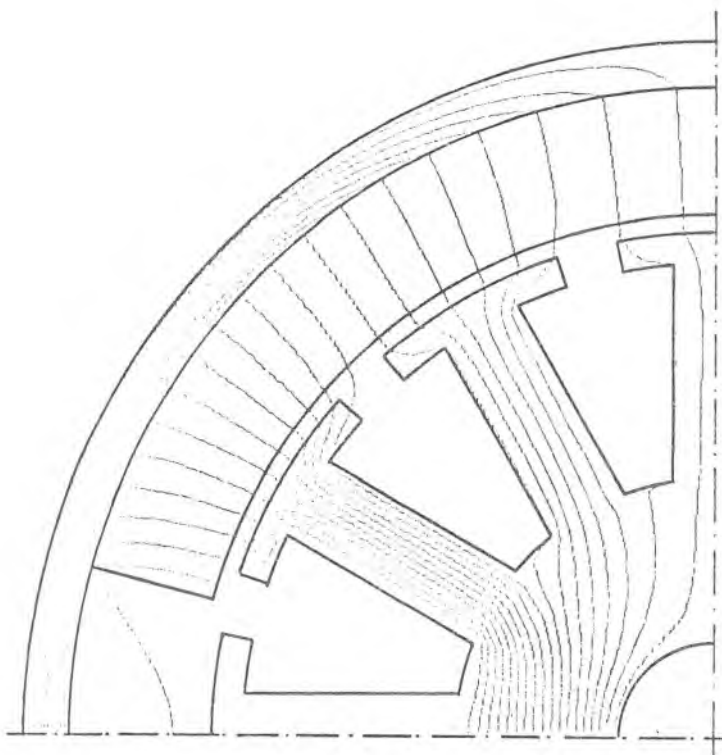
moгу predstaviti u funkciji vrijednosti potencijala neposrednih susjednih linija, što se najjednostavnije može pokazati pomoću tridijagonalne matrice koeficijenata sistema diferencijalnih jednađbi.

U toku provodjenja iteracija potrebno je pospješiti i kontrolirati konvergenciju proračuna, što se može jednostavno postići korištenjem omjera desne i lijeve strane jednađbe (11) prilagodjenog odabranoj petlji. Izbor petlje se vrši tako da vektorski potencijal bude što izjednačeniji ili jednak nuli, te da se obuhvate svi izvori. Ovo vodi na potrebu da se petlja postavi uz granicu magnetskog materijala, odnosno po simetrali zračnog raspora ili izmedju polova. Kako se kod ovakvog postupka redovito primjenjuje nadrelaksacija vektorskog potencijala, to je potrebno vršiti korekciju pomoću faktora konvergencije

$$C = \frac{\int \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{1}{\mu} \oint \vec{M} \cdot d\vec{s}}{\oint \vec{H} \cdot d\vec{s}} \quad (17)$$

3.4. Proračun polja u stroju s permanentnim magnetima

Na slici 4 pokazan je primjer proračuna magnetskog polja u prerezu istosmjernog stroja s permanentnim magnetima za jedan polni korak. Područje sadrži 4400 točaka i karakterizira stanje odredjenog opterećenja stroja. Za različita opterećenja je bilo moguće odrediti radna stanja i izračunati statičku karakteristiku stroja, uzimajući u obzir različite položaje rotora prema statoru i strujna protjecanja uvjetovana komutacijom.



Slika 4

LITERATURA

1. Z.Haznadar: Teoretska elektrotehnika - Elektromagnetska teorija polja, Liber, Zagreb, 1972.
2. J.Matjan: Numerički proračun električnih polja u visokonaponskim energetskim transformatorima, Teoretska priprema, elaborat, Zagreb, 1974.
3. J.Matjan, M.Djurek, Z.Haznadar: Proračun osnosimetričkih električnih polja s pomoću integralnih jednačbi, elaborat, Zagreb 1974.
4. M.Djurek: Proračun Laplaceovog potencijala za sustav rotaciono simetričnih tijela s pomoću integralnih jednačbi, elaborat, Zagreb 1975.
5. M.Djurek, J.Matjan, Z.Haznadar: Općeniti program za numerički proračun električnih stacionarnih osnosimetričkih polja, elaborat, Zagreb 1975.
6. M.Djurek, J.Matjan: Brzi proračun funkcija koje sadrže eliptičke integrale postupkom interpolacije, elaborat, Zagreb, 1974.
7. M.Djurek: Skraćenje vremena proračuna specijalnih i drugih funkcija na elektroničkom računalu primjenom interpolacije kubnim polinomima, referat, Informatica 75, Bled 1975.
8. R.F.Harrington: Matrix Methods for Field Problems, PROC. IEE, Feb. 1967, str. 136-149
9. J.R.Mautz, R.F.Harrington: Computation of Rotationally Symmetric Laplacian Potentials, PROC. IEE, April 1970, str. 850-852
10. J.R.Mautz: Rotationally Symmetric Potentials, opis programa, Syracuse University, Syracuse, USA 1969.
11. R.P.Kanwal: Linear Integral Equations, Academic Press, New York and London 1971.
12. J.H.Ahlberg, E.N.Nilson, J.L.Walsh: The Theory of Splines and Their Applications, ruski prijevod, Mir, Moskav 1972.

13. O.V.Tozoni, I.D.Maergojc: O proračunu statičkih polja metodom integralnih jednadžbi, Elektromehanika, Novočerkask, 1967. str. 1187-1197
14. R.Smythe: Static and dynamic electricity, McGraw-Hill, New York, 1950.
15. D.W.Peaceman, H.H.Rachford: The numerical solution of parabolic and elliptic diferential equations, J.Soc.Ind. Appl. Math., Vol. 3, 1955., pp. 28-41.
16. F.de la Vellée Poussin: An accelerated relaxation algorithm for iterative solution of elliptic equations, SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 5, No. 2, 1968.
17. K.Reichert: Ein numerisches Verfahren zur Berechnung magnetischer Felder, insbesondere in Anordnung mit Permanentmagneten, Archiv für Elektrotechnik, Band 52, 1968., S. 176-195.
18. E.A.Erdélyi, E.F.Fuchs: Nonlinear magnetic field analysis of dc-machines, IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, 1970, pp. 1546-1583.

Martin Jadrić
Fakultet elektrotehnike, strojarstva
i brodogradnje, Split

MODERNA ISTRAŽIVANJA VLADANJA ASINHRONOG MOTORA

Idealizirani asinhroni stroj sa zanemarivim potiskivanjem struje u vodičima predstavlja u općem slučaju fizikalni sistem koji se može opisati pomoću pet običnih nelinearnih diferencijalnih jednažbi. Asinhroni kavezni motor s izraženim djelovanjem vrtložnih struja u rotoru predstavlja, i uz pretpostavku idealiziranog stroja, sistem s distribuiranim parametrima, pa ga se u općem slučaju može egzaktno opisati samo sistemom parcijalnih diferencijalnih jednažbi. Međutim, ako se masivni rotorski štap prikaže pomoću pogodne nadomjesne sheme s konačnim brojem koncentriranih parametara, može se i kavezni motor dovoljno točno opisati sistemom običnih diferencijalnih jednažbi. Rezultati istraživanja, pomoću tako dobivenih složenijih modela, pokazali su da analiza dinamičkih stanja asinchronog motora, koja se zasniva na odvojenom razmatranju pojedinih prijelaznih pojava (mehaničke i elektromagnetske), može u odredjenim slučajevima dati velike pogreške u rezultatima.

MODERN STUDIES OF ASYNCHRONOUS MOTOR BEHAVIOUR

The idealized asynchronous motor with a negligible skin effect in the conductors represents generally a physical system which can be described by five common non-linear differential equations. The asynchronous squirrel-cage motor with a marked skin effect in the rotor represents (supposing an idealized motor) a system with distributed parameters; generally, therefore, it can be exactly described only by a system of partial differential equations. If, however, a massive rotor bar is shown by an equivalent scheme with a finite number of concentrated parameters, the squirrel-cage motor can then too be described by common differential equations. Results of investigations using such complex models have shown that an analysis of dynamic asynchronous motor behaviour based on a separate consideration of transients (mechanical and electromagnetic) could lead, in specific cases, to substantial errors.

1. UVOD

Mogućnosti istraživanja vladanja asinhronog motora u složenijim režimima rada (npr. dinamički režimi) bile su veoma ograničene sve do pojave modernih elektroničkih računala. Mehaničke prijelazne pojave istraživane su na osnovi statičkih karakteristika motora, tj. uz zanemarenje elektromagnetskih prijelaznih pojava. Pri razmatranju elektromagnetskih prijelaznih pojava, koje je bilo moguće samo za motore sa zanemarivim potiskivanjem struje u vodičima, nužno se pretpostavljala konstantna brzina vrtnje.

Moderna elektronička računala potakla su istraživanja dinamičkih stanja asinhronog motora pomoću složenijih matematičkih modela, kod kojih se takodjer zanemaruje odredjeni broj utjecajnih faktora. Pretpostavlja se sinusna raspodjela protjecanja i indukcije po obodu stroja (idealizirani stroj).

Uvodjenjem zajedničkog koordinatnog sistema za stator i rotor (transformacija koordinata) postižu se značajna pojednostavljenja matematičkih modela. Asinhroni motor sa zanemarivim potiskivanjem struje u vodičima može se u tom slučaju opisati sistemom od pet običnih diferencijalnih jednačbi. Ako se masivni rotorski stap prikaže pomoću nadomjesne sheme s konačnim brojem parametara, može se kavezni motor s izraženim potiskivanjem struje u rotoru takodjer opisati s konačnim brojem običnih diferencijalnih jednačbi. Ovi sistemi diferencijalnih jednačbi mogu se danas bez teškoća rješavati pomoću elektroničkih računala.

Pogodan koordinatni sistem može znatno olakšati fizikalno razmatranje rezultata, dobivenih numeričkim proračunom. Koordinatni sistem koji rotira sinhronom brzinom vrtnje, najpogodniji je za sve slučajeve kada je motor napajan trofaznim sistemom napona.

2. METODA RAČUNANJA

Uvodjenjem transformacije koordinata dobiva se za kliznokolutni motor (rotorski namot kratko spojen) i za kavezni motor bez

potiskivanja struje u rotoru formalno isti oblik vektorskih naponskih jednadžbi i jednadžbi za rezultirajuće vektore ulančenih tokova. Napisane u koordinatnom sistemu, koji rotira sinhronom brzinom vrtnje ($\omega_k = \omega_s$), te jednadžbe glase [6], [3] :

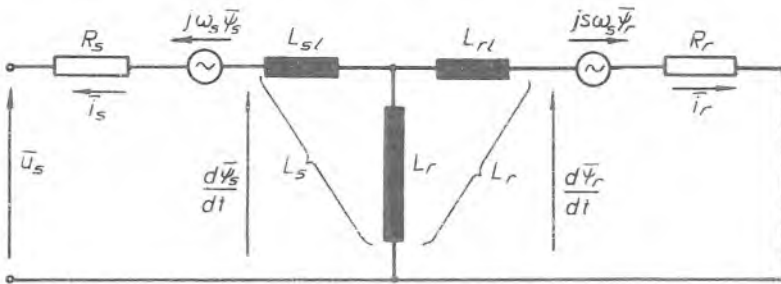
$$\bar{u}_s = \bar{i}_s R_s + j\omega_s \bar{\psi}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \quad (1)$$

$$0 = \bar{i}_r R_r + j\omega_s \bar{\psi}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} \quad (2)$$

$$\bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r \quad (3)$$

$$\bar{\psi}_r = L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r \quad (4)$$

Jednadžbe (1) do (4) napisane su uz pretpostavku da su rotor-ske veličine i medjuinduktivitet reducirane na statorsku stranu. Na temelju tih jednadžbi možemo konstruirati nadomjesnu shemu asinhronog motora sa zanemarivim potiskivanjem struje u rotoru za nestacionarna stanja, koja je prikazana na slici 1.

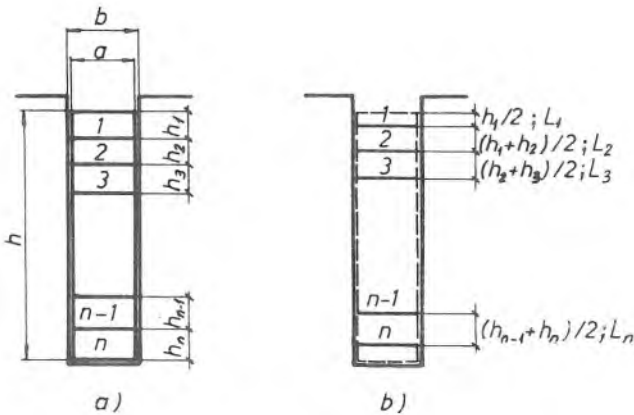


Sl.1. Nadomjesna shema asinhronog motora bez potiskivanja struje u rotoru za nestacionarna stanja

Asinhroni kavezni motor s izraženim djelovanjem vrtložnih struja u rotoru predstavlja fizikalni sistem s distribuiranim parametrima i može ga se egzaktno opisati samo sistemom parcijal-

nih diferencijalnih jednačbi. Zbog toga je, za proračun i analizu prijelaznih pojava u kaveznom motoru s potiskivanjem struje u rotoru, potrebno masivni štap nadomjestiti odgovarajućom shemom s konačnim brojem koncentriranih (R, L) parametara.

Promatrat ćemo visoki štap u utoru pravokutnog oblika. Možemo zamisliti da je taj štap u području utora duljine λ podijeljen na n dionih vodiča koji leže jedan na drugome (Sl. 2a). Ako se zanemari potiskivanje struje unutar jednog dionog vodiča, te pretpostavi da je struja svakog dionog vodiča skoncentrirana u njegovoj sredini, može se štap nadomjestiti s n dionih vodiča zane-marive visine, koji su rasporedjeni po dubini utora i na krajevima paralelno spojeni (Sl.2b).



Sl.2. Zamjena visokog štapa u utoru dionim vodičima

Na krajevima svih dionih vodiča vlada isti napon u , a općenita naponska jednačba za k -ti dioni vodič glasi [3]:

$$u = R_k i_k + \frac{d}{dt} \left(\sum_{j=1}^k L_j i_j + \sum_{p=j}^n i_p \right). \quad (5)$$

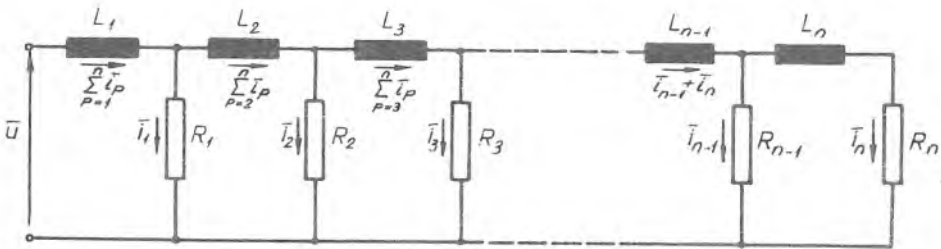
Otpor pojedinih dionih vodiča obrnuto je proporcionalan njihovoj visini:

$$R_k = \frac{h}{h_k} R_0, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

a induktivitet L_j ($j = 1, 2, \dots, n$) pripada dijelu utora izmedju zamišljenih dionih vodiča (zanemarive visine) " $j-1$ " i " j " :

$$L_1 = \frac{3}{2} \frac{h_1}{h} L_0, \quad L_j = \frac{3}{2} \frac{h_{j-1} + h_j}{h} L_0 \text{ za } j > 1. \quad (7)$$

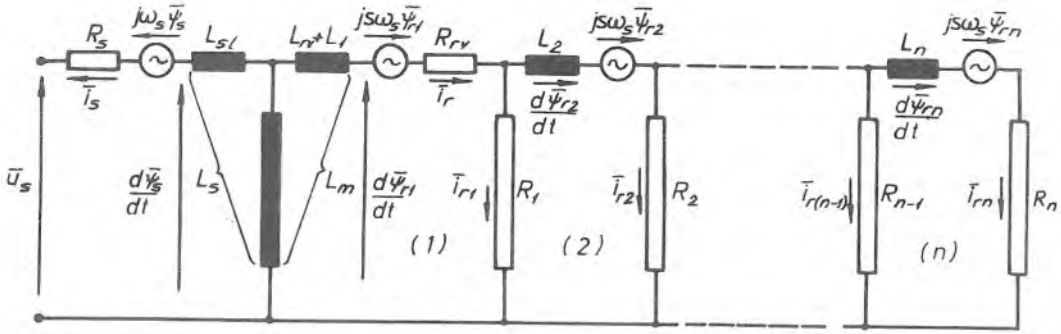
Ako indeks k u jednađbi (5) poprimi vrijednosti $k = 1, 2, \dots, n$, dobit ćemo sistem od n diferencijalnih jednađbi, kojem odgovara nadomjesna shema štapa prikazana na slici 3.



Sl. 3. Nadomjesna shema visokog štapa u utoru

Nadomjesnu shemu kaveznog motora s izraženim potiskivanjem struje u rotoru za nestacionarna stanja (Sl. 4.) možemo dobiti pomoću slika 1 i 3. U tu svrhu potrebno je u nadomjesnoj shemi na slici 1, izdvojiti dio otpora i rasipnog induktiviteta rotora koji pripadaju utoru, i na njihovo mjesto dodati nadomjesnu shemu štapa prema slici 3. Pri tome treba sve veličine na slici 3 reducirati na statorsku stranu, te zbog transformacije koordinata u seriju s induktivitetima dodati odgovarajuće izvore elektromotorne sile. Nadomjesna shema prikazana na slici 4 može se dobiti egzaktnim postupkom, ako se podje od naponskih jednađbi za strujne krugove statora i rotora i nadomjesne sheme štapa prema slici 3 [3].

Na temelju nadomjesne sheme na slici 4 dobivamo sistem vektorskih naponskih jednađbi kaveznog motora koji je prikazan matričnom jednađbom (8). Veza izmedju struja i ulančenih tokova odredjena je matričnom jednađbom (9).



Sl.4 Nadomjesna shema kaveznog motora s potiskivanjem struje u rotoru za nestacionarna stanja

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & R_{rv} + R_1 & R_{rv} & \dots & \dots & \dots & R_{rv} \\ 0 & -R_1 & R_2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -R_2 & R_3 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & -R_{n-1} & R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{i}_{r1} \\ \bar{i}_{r2} \\ \bar{i}_{r3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \bar{i}_{rn} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{\psi}_s \\ \bar{\psi}_{r1} \\ \bar{\psi}_{r2} \\ \bar{\psi}_{r3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \bar{\psi}_{rn} \end{bmatrix} + j\omega_s \begin{bmatrix} \bar{\psi}_s \\ s\bar{\psi}_{r1} \\ s\bar{\psi}_{r2} \\ s\bar{\psi}_{r3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ s\bar{\psi}_{rn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\psi}_s \\ \bar{\psi}_{r1} \\ \bar{\psi}_{r2} \\ \vdots \\ \bar{\psi}_{rn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m & \dots & \dots & L_m \\ L_m & L_{r1} & \dots & \dots & L_{r1} \\ 0 & 0 & L_2 & \dots & L_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & L_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{i}_{r1} \\ \bar{i}_{r2} \\ \vdots \\ \bar{i}_{rn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Ako vektore struja u jednadžbama (1) i (2), odnosno (8) izrazimo pomoću vektora ulančenih tokova, dobit ćemo sistem vektorskih naponskih jednadžbi, u kojem se kao varijable javljaju vektori ulančenih tokova i klizanje. Da bi taj sistem bio određen, treba mu pridružiti jednadžbu gibanja koja glasi:

$$-J \frac{\omega_s}{p} \frac{ds}{dt} = m_{el} + m_t \quad (10)$$

Elektromagnetski moment možemo izraziti pomoću vektora ulančenog toka statora i rotora [6]:

$$\bar{m}_{el} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L'_s L_r} (\bar{\psi}_r \times \bar{\psi}_s) \quad (11)$$

Za motor s potiskivanjem struje u rotoru treba u jednadžbu (11) uvrstiti $\bar{\psi}_{r1}$ i L_{r1} .

U slučaju motora bez nulvodiča na statoru i rotoru mogu se vektori napona, struja i ulančenih tokova prikazati pomoću komponentata u realnoj i imaginarnoj osi na način kao što slijedi za vektor napona statora:

$$\bar{u}_s = u_d + ju_q$$

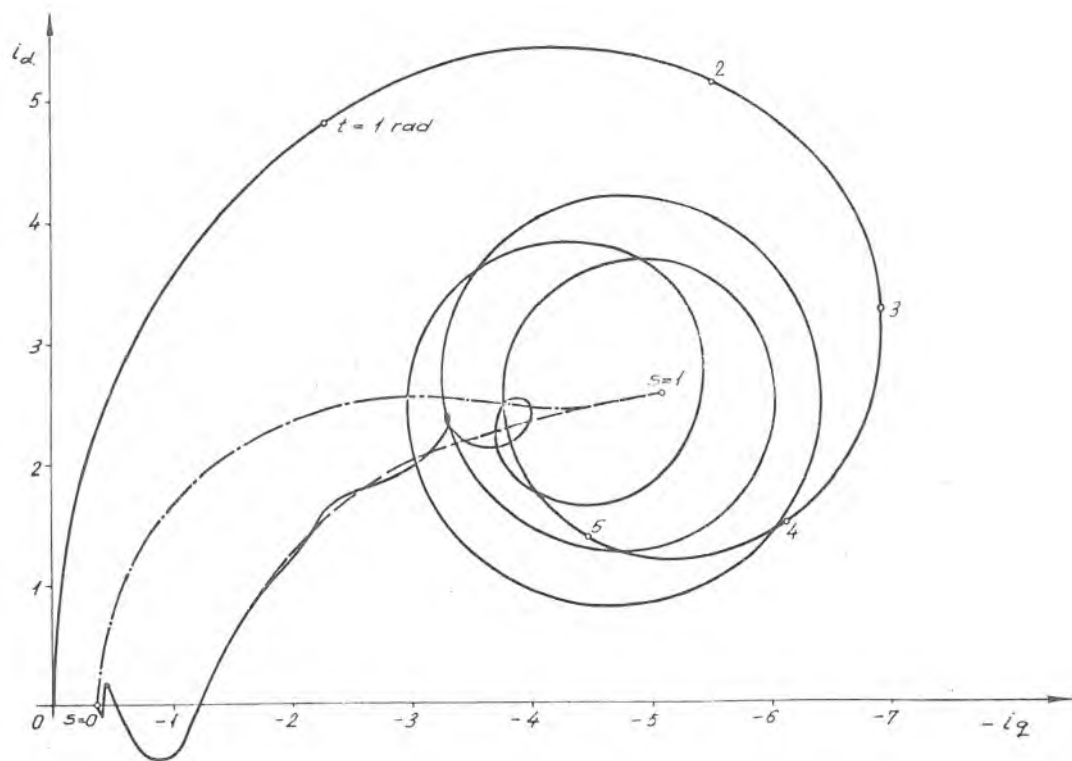
Na taj način dobivamo za motor bez potiskivanja struje u rotoru sistem od pet, a za motor s potiskivanjem struje u rotoru sistem od $2n + 3$ običnih diferencijalnih jednadžbi, u kojem se kao varijable javljaju komponente ulančenih tokova i klizanje. Da bi se tako dobiveni sistem diferencijalnih jednadžbi mogao rješavati numeričkim metodama pomoću digitalnih računala, potrebno je poznavati komponente narinutog napona u osi "d" i osi "q" i moment opterećenja te početne uvjete za ulančene tokove i klizanje.

3. REZULTATI NUMERIČKOG PRORAČUNA ZALETA KAVEZNOG MOTORA

Ovdje ćemo prikazati neke rezultate proračuna zaleta dvaju kaveznih motora s pravokutnim oblikom rotorskog štapa (motor A: 22 kW, 380 V, $2p = 6$; motor B: 4500 kW, 6300 V, $2p = 4$, [3]), dobivene po metodi opisanoj u poglavlju 2. i usporediti ih s rezultatima koje daje proračun sa statičkim karakteristikama

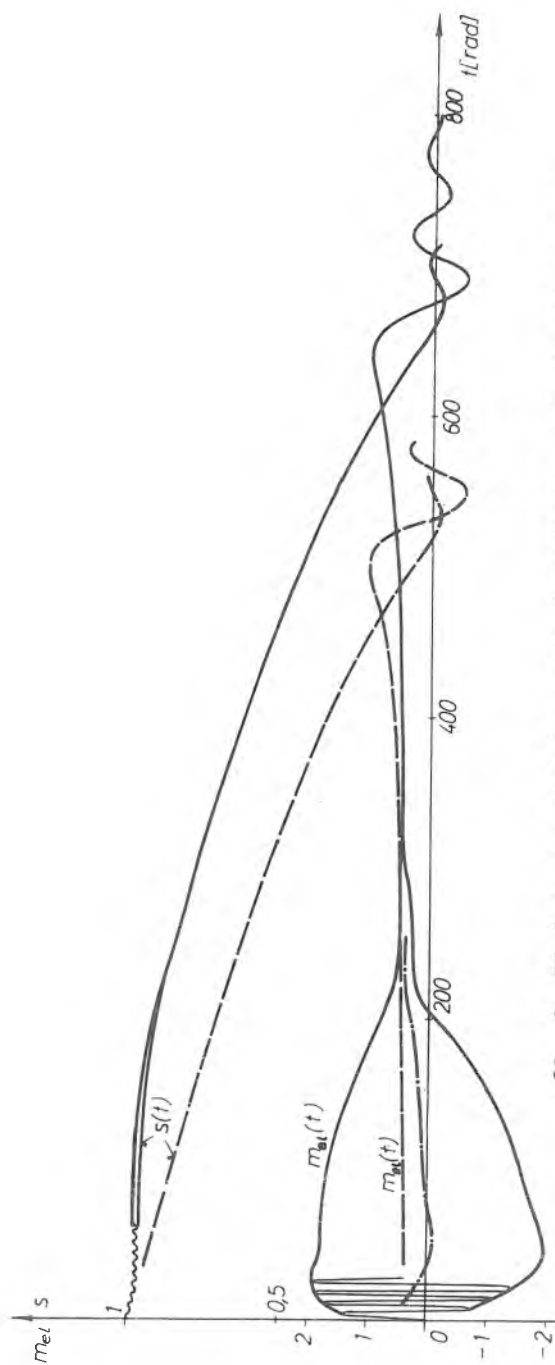
motora. Sve veličine dane su u relativnim vrijednostima [2].

Na slici 5 prikazan je hodograf rezultirajućeg vektora struje statora u toku zaleta motora A. Vektor struje statora može se predložiti sumom jednog vektora, koji pripada narinutim komponentama struje i rezultirajućim vektorom slobodnih struja, koji rotira u odnosu na d,q sistem u smjeru gibanja kazaljke na satu praktički sinhronom brzinom vrtnje. Naime, vektor koji pripada narinutim komponentama, mijenja se u zavisnosti o klizanju prema hodografu dobivenom za slučaj zaleta bez slobodnih struja. Odstupanje vektora struje statora za zalet bez slobodnih struja od statičke karakteristike posljedica je utjecaja ubrzanja rotora na narinute struje.



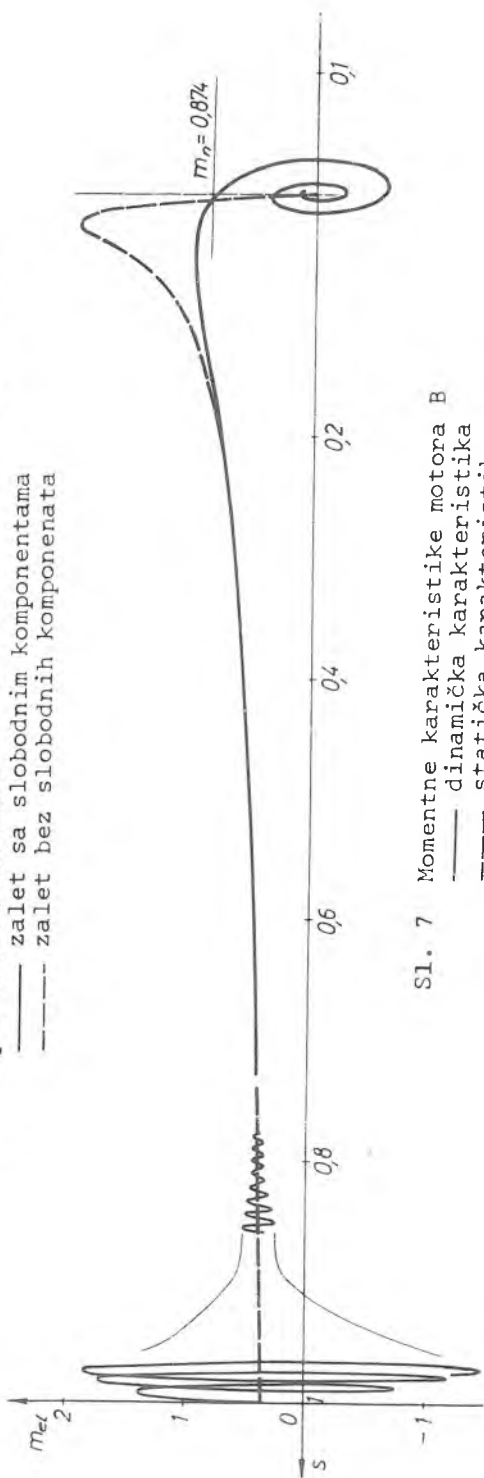
Sl.5 Hodograf rezultirajućeg vektora struje statora pri zaletu motora A

- zalet sa slobodnim komponentama
- - - zalet bez slobodnih komponentata
- · - kvazistacionarni zalet



Sl. 6 Elektromagnetski moment i klizanje u funkciji vremena pri zaletu motora B

— zalet sa slobodnim komponentama
 ---- zalet bez slobodnih komponentata



Sl. 7 Momentne karakteristike motora B
 — dinamička karakteristika
 ---- statička karakteristika

Uslijed djelovanja slobodnih struja statora i rotora javlja se u elektromagnetskom momentu motora, pored izmjenične komponente približno nominalne frekvencije, i jedna jednosmjerna komponenta koja ima kočni karakter. Zbog toga je srednja vrijednost dinamičkog momenta u području trajanja slobodnih struja znatno manja od odgovarajućeg statičkog momenta, a kao što se vidi na slici 6, ona može poprimiti i negativnu vrijednost. To je razlog kraćeg trajanja zaleta bez slobodnih struja.

Nakon izčezavanja slobodnih struja, dinamička i statička momentna karakteristika motora B (slika 7) poklapaju se sve do pred kraj zaleta. Odstupanja pri kraju zaleta posljedica su djelovanja ubrzanja rotora na narinute struje, odnosno ulančene tokove.

Zbog kočnog djelovanja momenta slobodnih struja dinamički zalet traje duže nego što to daje proračun sa statičkom momentnom karakteristikom. Za motor B iznosi to povećanje 39%. Osim toga, dinamički proračun daje veće gubitke u statoru i rotoru. Na primjer, za gubitke u rotoru motora A iznosi to povećanje cca 24%, a za gubitke u rotoru motora B cca 40% [3].

4. ZAKLJUČAK

Matematički modeli idealiziranog asinhronog motora (kliznokolutnog i kaveznog) pružaju, zahvaljujući modernim elektroničkim računalima, široke mogućnosti za istraživanje vladanja motora u najrazličitijim režimima rada. Pri tome je, prema opisanoj metodi, potrebno poznavati narinuti napon i moment tereta kao funkcije vremena. Medjutim, uz odredjeno podešavanje matematičkog modela, metoda pruža mogućnosti i za istraživanje vladanja složenijih sistema, u kojima je asinhroni motor dio sistema.

Premda su rezultati proračuna zaleta pokazali dosta dobro slaganje s rezultatima mjerenja [3], može se u budućnosti očekivati daljnje proširenje matematičkog modela; npr. uzimanjem u obzir nesinusne raspodjele protjecanja u zračnom rasporu i zasićenja u željezu.

POPIS OZNAKA

- $h_1, h_2, \dots, h_n$ - visina prvog, drugog, ... , n-tog dionog vodiča
- $i_1, i_2, \dots, i_n$ - struja prvog, drugog, ... , n-tog dionog vodiča
- $\vec{i}_s$ - rezultirajući vektor struje statora
- $\vec{i}_r$ - rezultirajući vektor struje rotora
- $\vec{i}_{r1}, \vec{i}_{r2}, \dots, \vec{i}_{rn}$ - rezultirajući vektori parcijalnih struja rotora
- J - moment tromosti
- L_m - medjuinduktivitet namota statora i rotora
- L_o - utorski induktivitet rotorskog štapa pri klizanju $s = 0$
- L_{rv} - dio rasipnog induktiviteta rotora koji je neovisan o potiskivanju struje
- L_s - ukupni induktivitet namota statora
- L'_s - tranzijentni induktivitet namota statora
- L_r - ukupni induktivitet namota rotora
- L_{r1} - ukupni induktivitet u krugu rotorske petlje (1) u nadomjesnoj shemi motora ($L_{r1} = L_m + L_{rv} + L_1$)
- $L_1, L_2, \dots, L_n$ - induktiviteti u nadomjesnoj shemi štapa, odnosno motora
- m_{el} - elektromagnetski moment motora
- m_t - moment tereta
- n - broj dionih vodiča
- p - broj pari polova
- R_o - otpor štapa u utoru pri klizanju $s = 0$
- R_r - otpor namota rotora
- R_s - otpor namota statora
- $R_1, R_2, \dots, R_n$ - otpori u nadomjesnoj shemi štapa, odnosno motora
- s - klizanje
- t - vrijeme
- u_d, u_q - napon u osi d i osi q statora
- $\vec{u}_s$ - rezultirajući vektor napona statora
- $\vec{\psi}_s$ - rezultirajući vektor ulančenog toka statora
- $\vec{\psi}_r$ - rezultirajući vektor ulančenog toka rotora
- $\vec{\psi}_{r1}, \vec{\psi}_{r2}, \dots, \vec{\psi}_{rn}$ - rezultirajući vektori ulančenog toka rotora za petlju (1), (2), ..., (n) u nadomjesnoj shemi motora
- ω_s - kružna frekvencija statora
- ω_k - kutna brzina rotirajućeg koordinatnog sistema

LITERATURA

- [1] *Bausch H., Jordan H., Weis M.*, Digitale Berechnung des transienten Verhaltens von stromverdrängungsfreien Drehstrom - Käfigläufermotoren, ETZ-A Bd.89 H.15, pp. 361-366, 1968.
- [2] *Jadrić M.*, Dinamički zalet kolutnog asinhronog motora, "Elektrotehnika" br. 1., pp. 24-32, Zagreb, 1971.
- [3] *Jadrić M.*, Dinamika kaveznog asinhronog stroja s uračunatim potiskivanjem struje u rotoru, doktorska disertacija, Zagreb, 1976.
- [4] *Jurković B.*, Elektromotorni pogoni, Sveučilište u Zagrebu (skripta), 1968.
- [5] *Klingshirn E.A., Jordan H.E.*, Simulation of Polyphase Induction Machines with Deep Rotor Bars, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 1038-1043, July/August 1970.
- [6] *Kovács K.P., Rácz I.*, Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen, Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest, 1959.
- [7] *Probst R.*, Übergangsverhalten von Asynchronmotoren bei Netzumschaltung unter Berücksichtigung der Stromverdrängung in den Läuferstäben, ETZ-A Bd. 94 H.9, pp. 515-520, 1973.
- [8] *Vogt K.*, Elektrische Maschinen, VEB Verlag Technik, Berlin, 1972.

Ivan Mandić, dipl.inž., Ph.D.
"Rade Končar" Zagreb
OOUR Elektrotehnički institut

ELEKTRIČNI STROJ KAO KONTINUALNA FIZIKALNA SREDINA

U referatu se u osnovi obradjuje mogućnost analize električnih strojeva pomoću jednadžbi polja. Od svih metoda rješavanja ovih jednadžbi, numeričke su najprikladnije. Nakon pregleda razvoja ovih metoda razmatraju se prednosti i nedostaci praktične primjene. Na primjeru odredjivanja struje kratkog spoja asinhronog motora prikazana je jedna mogućnost povezivanja teorije polja i teorije krugova.

ELECTRICAL MACHINE AS A PHYSICAL CONTINUUM

The paper is principally concerned with the possibility of electrical machine analysis by field equations. As compared with other methods, numerical ones are most suitable for the solution of these equations. The advantages and disadvantages of practical application are considered after a survey of the development of these methods. One possibility of combining the theory of electrical circuits and the field theory is presented on an example involving the computation of short-circuit current of an induction motor.

x x x x

1. Uvod

Ponašanje električnog stroja u pogonu odredjuju njegove fizikalne karakteristike i pogonski uvjeti. Pri projektiranju analizira se rad stroja na osnovu matematičkog modela koji se temelji na svojstvima materijala, konstrukciji i pretpostavljenim pogonskim uvjetima. Idealno, matematički model morao bi u sebi uključiti sve fizikalne pojave u stroju, njihovu interakciju i

vanjske utjecaje. Takav matematički model nije moguće stvoriti, i u praksi je nužno uvesti pojednostavljenja. Tako se najčešće elektromagnetske, termičke i mehaničke pojave u stroju analiziraju zasebno, ili se uzimaju u obzir samo primarni efekti interakcije, dok se sekundarni zanemaruju.

Analiza pojedine pojave provodi se tako da se stroj predstavi nadomjesnom shemom, sastavljenom od relativno malenog broja koncentriranih elemenata. Parametri nadomjesnih shema određuju se približnom analizom pojava u stroju i nerijetko korigiraju empiričkim koeficijentima.

Potpuni matematički modeli pojedinih pojava u stroju obično su sistemi parcijalnih diferencijalnih jednačbi. Tako npr. Maxwell-ove jednačbe opisuju elektromagnetske pojave u stroju, jednačbe strujanja topline, toplinske pojave itd. Rješenja tih jednačbi predstavljaju raspored nekih veličina u volumenu stroja i nazivaju se poljima. Postavlja se pitanje nije li moguće odrediti ponašanje stroja direktnim rješavanjem jednačbi polja, analizirajući stroj kao fizikalni kontinuum. Treba dakle razmotriti koje metode rješavanja polja stoje danas na raspolaganju i kakve su njihove potencijalne mogućnosti.

2. Rješavanje jednačbi polja

2.1. Tipovi jednačbi polja

Jednačbe polja najčešće se mogu, uz neka zanemarenja i uvođenje novih veličina, pojednostaviti. Tako se za proračun magnetskog polja veoma često može uspješno koristiti jednačba vektorskog magnetskog potencijala A u dvije dimenzije

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \quad (1)$$

gdje je ν magnetska reluktivnost (inverzna permeabilnost) koja je općenito funkcija magnetske indukcije, a J funkcija gustoće struje. Jedn. (1) lako se izvodi iz Maxwell-ovih jednačbi uz zanemarivanje pomaćnih struja, trodimenzionalnog karaktera polja i vrtložnih struja.

Slično se za proračun toplinskog polja može upotrijebiti jednačba:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -q \quad (2)$$

gdje je T iznos temperature, a koeficijenti vodjenja topline k_x , k_y i k_z određuju se iz svojstava materijala. q je funkcija izvora topline. Do jednadžbe (2) dolazi se iz jednadžbi strujanja topline uz pretpostavku stacionarnosti i zanemarenja nelinearnosti koeficijenata vodjenja.

Uz jedn. (1) i (2) treba takodjer propisati i odgovarajuće granične uvjete, koji će se obično razlikovati od slučaja do slučaja.

Jednadžbe (1) i (2) su eliptičnog tipa. Uvodenjem nestacionarnosti dobivaju se jednadžbe parabolitnog tipa. Iako se i one mogu odgovarajućim metodama rješavati, u ovom prikazu zadržat ćemo se na eliptičnim jednadžbama.

2.2. Metode rješavanja eliptičnih parcijalnih diferencijalnih jednadžbi

Metode za rješavanje polja mogu se prikladno klasificirati u četiri grupe: analitičke, analogne, grafičke i numeričke. Iako svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i nedostatke, numeričke metode nude, uz upotrebu digitalnih kompjutera, najveće mogućnosti. Kod većine numeričkih metoda postupak je slijedeći: područje koje se rješava razdijeli se na podregije (diskretizira se) prikladnom mrežom, te se funkcija koja se traži, definira na neki jednostavan način u odnosu na mrežu. To omogućuje da se polazna diferencijalna jednadžba zamijeni sistemom algebarskih jednadžbi. Rješenje sistema je tada približno rješenje polazne diferencijalne jednadžbe.

Sistemi algebarskih jednadžbi koji se pri tome javljaju često su veoma veliki i praktički ih je moguće riješiti jedino numerički pomoću kompjutera. Ovisno o analitičkom postupku zamjene polazne jednadžbe algebarskim jednadžbama, numeričkom postupku rješavanja, autoru ili primjeni, metode su dobile različite nazive. Tako se danas sreće metoda iteracije, metoda konačnih razlika, metoda konačnih dijelova, Releigh-Ritz metoda, Galjorkinova metoda, metoda kolokacije, metoda reakcije, metoda najmanjih kvadrata, metoda perturbacije i niz drugih. Dvije numeričke metode ipak se po svojoj praktičnosti i širini primjene ističu među ostalima; to su metoda konačnih razlika i, naročito u posljednje vrijeme, metoda konačnih dijelova.

2.3. Metoda konačnih razlika i metoda konačnih dijelova

Kompletan prikaz ovih metoda znatno nadmašuje opseg ovog izvještaja, tim više što postoji nekoliko raznih objašnjenja i definicija ovih metoda. Citi-rat ćemo zato definicije koje J. Walsh daje u L 7: "U metodi konačnih razlika algebarske jednačbe se dobiju direktnom aproksimacijom diferencijalne jed-nadžbe u točkama mreže ... " i " ... ako je potrebno rješenje u svim točka-ma područja ono se dobije interpolacijom između vrijednosti na mreži". Za metodu konačnih dijelova stoji: "U metodi konačnih dijelova područje je podi-jeljeno na podregije i približno je rješenje predstavljeno polinomom u svakoj podregiji, s podudarnim uvjetima na njihovim granicama. Svaki polinom defi-niran je s nekim koeficijentima, ili ekvivalentno vrijednostima funkcije i nje-nih derivacija u odredjenim točkama. Algebarski izrazi za odredjivanje ovih vrijednosti dobiju se ili iz varijacionog principa (Ritz-ova metoda) ili pomoću Galjorkinove metode".

Iako je analitički pristup različit sa stanovišta praktične primjene, ove se metode ne razlikuju značajno. Prvi je korak odabiranje mreže za proračun (odnosno podjele na podregije) i stupnja aproksimacije rješenja. Zatim se od-redjuje sistem algebarskih jednačbi koje treba numerički riješiti.

Ukoliko je mreža za proračun nepravilna, pristup preko računa varija-cija je obično jednostavniji. To je i osnovni razlog da se metoda konačnih ele-menata povezuje prvenstveno s nepravilnom mrežom trokuta, koja ima niz prednosti u odnosu na druge tipove mreža, prvenstveno u pogledu praktičnosti primjene. Zato se u posljednje vrijeme sve više koristi.

3. Pregled razvoja numeričkih metoda

Iako su se numeričke metode za proračun polja počele intenzivnije ko-ristiti tek u pedesetim godinama, teoretski osnovi nisu novi. Tako metodu ko-načnih razlika spominje već C.F. Gauss početkom devetnaestog stoljeća (L 3). Osnutkom metode konačnih dijelova smatra se obično rad R. Couranta iz 1943. g. (L 1), iako su teoretske osnove postavljene znatno ranije.

Da bi se numeričke metode počele znatnije koristiti za proračun elektromagnetskog polja u rotacionim strojevima, uvjet je bio veća rasprostranjenost digitalnih kompjutera. Prvi radovi, kojima je započela era šire primjene, pojavili su se tek 1963. g. (L 5, L 6, L 2). U tim se radovima koristi metoda konačnih diferencija uz pravilnu ortogonalnu mrežu. 1965. objavljen je rad u kojem se opisuje proračun magneta za akceleratora čestica pomoću mreže trokuta (L 8), ali se o primjeni ove metode na proračun polja u strojevima prvi izvještaji pojavljuju tek 1970. (L 8). U posljednjih pet godina broj objavljenih radova na ovom području se veoma povećao, tako da danas iznosi više stotina, od kojih se nekolicina odnosi na trodimenzionalna polja ili nestacionarne pojave.

Na području proračuna toplinskog polja objavljeno je znatno manje. Može se, međutim, smatrati da je numerički proračun toplinskog polja teoretski i praktički riješen, jer zbog nelinearnosti predstavlja jednostavniji zadatak od proračuna magnetskog polja.

Slično toplinskim i elektromagnetskim pojavama, mehanička naprezanja se mogu prikazati poljima odgovarajućih veličina. Pri tome se najčešće koriste tenzori naprezanja. Iako pristup nije jednostavan, koristi se u znatnoj mjeri i velik dio objavljenih radova s područja primjene metode konačnih dijelova, odnosi se na mehaničke probleme.

Kod električnih strojeva ova metoda bila bi interesantna sa stanovišta vibracija i buke. Izgleda ipak da je kompleksnost zadatka suviše velika da bi opravdala ovakav način računanja za električne strojeve i zasada nema na tom području objavljenih radova.

Može se ukratko reći da danas raspoložemo metodama proračuna polja koje su dovoljno efikasne i točne da opravdaju upotrebu u mnogim slučajevima. Pokušat ćemo razmotriti kakve su prednosti i nedostaci takvog pristupa sa stanovišta praktične primjene.

4. Prednosti i nedostaci praktične primjene numeričkih metoda proračuna polja

Osnovna prednost pri primjeni numeričkih metoda proračuna polja je povećana točnost. Nju je moguće postići zbog više razloga: eliminacijom nepo-

uzdanih parametara, točnijim razmatranjem zasićenja, utora ili npr. rashladnih kanala. Slično vrijedi i za analizu toplinskog stanja stroja.

Cijena, koju se plaća za povećanu točnost, nije mala. To je prvenstveno razvoj odgovarajućih programa za rješavanje polja, koji je dugotrajan i skup. U usporedbi s klasičnim načinom računanja, cijena proračuna na kompjuteru takodjer je visoka. Na kraju, tu je i problem prikazivanja rezultata.

Za potrebe analize toplinskog stanja stroja raspored temperatura i tokova topline u stroju u većini slučajeva zadovoljava kao konačan rezultat. Nasuprot tome, vektorski magnetski potencijal nema fizikalno značenje i ne zadovoljava kao konačan rezultat. Dobiveno polje potrebno je dalje analizirati. Raspored indukcija dobije se lako iz rasporeda potencijala, i jedan od mnogih pristupa je harmonička analiza indukcije u zračnom rasporu, koja omogućuje analizu ponašanja stroja. Iako se ovakav pristup može sresti u literaturi, čini se da proračun polja omogućuje jednostavniji i direktniji pristup.

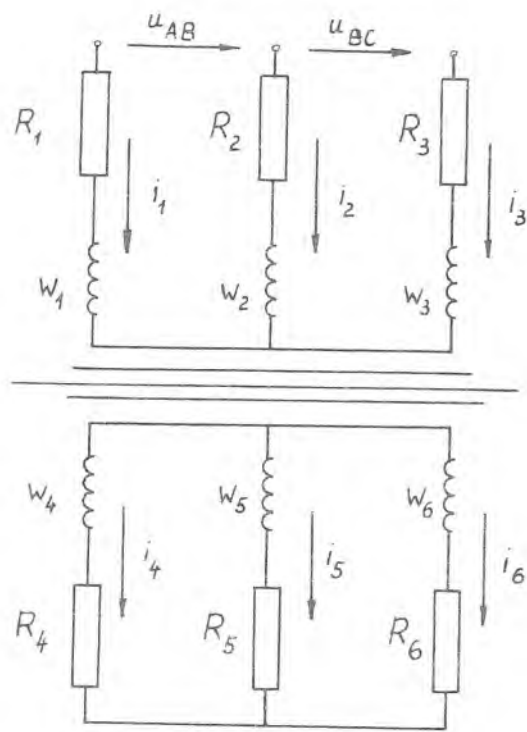
5. Primjer

Jedan od mogućih načina rješavanja razmotrit ćemo na problemu određivanja struje kratkog spoja trofaznog asinhronog klizno-kolutnog motora prikazanog shematski na sl. 1. Strujno-naponske prilike u stroju opisuje sistem od šest običnih diferencijalnih jednačbi, koje u sebi uključuju samoinduktivitete i međjuinduktivitete svih namota, dok magnetsko polje u stroju (izuzevši područje glava namota, koje se mora posebno obraditi) opisuje jednačba:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\psi \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\psi \frac{\partial A}{\partial y} \right) = f(x, y, i_1 \dots i_6) \quad (3)$$

gdje su $i_1 \dots i_6$ struje u namotima.

Ovaj matematički model može se riješiti iterativnim postupkom u kojem se naizmjenice rješavaju jednačba (3) i sistem strujno-naponskih diferencijalnih jednačbi. Iz rješenja jedn. (3) direktnom integracijom dobivaju se iznosi svih međjuinduktiviteta, dok rješenje strujno-naponskih jednačbi omogućuje slijedeći korak proračuna jedn. (3). Ovakvim načinom može se razmatrati



Sl. 1

6. Zaključak

Zahvaljujući pojavi digitalnih kompjutera danas raspoložemo sredstvima koja omogućuju direktnu analizu rada električnih strojeva pomoću proračuna polja u stroju. Osnovna prepreka široj primjeni ovih metoda je dugotrajna priprema i relativno visoka cijena takve analize.

Može se očekivati da će se u bliskoj budućnosti pojaviti gotovi sistemi programa, koji će skratiti trajanje pripremnih radova za dva reda veličine. Daljnje usavršavanje numeričkih metoda, kao i povećanje kapaciteta i brzine kompjutera, omogućit će tada široku primjenu ovih metoda u razvoju i projektiranju rotacionih strojeva.

stacionarno stanje ili prijelazna pojava, a kao ilustraciju spominjemo da je ovaj zadatak rješavan za slučaj napajanja sinusoidalnim naponom. Trajanje proračuna za rješenje stacionarnog stanja iznosilo je oko 1 sat na kompjuteru ICL 1907 (ovaj kompjuter ima access-time oko 3,2 sec), dok je razrada odgovarajućih programa trajala oko godinu dana.

Popis literature

1. COURANT, R.: "Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations", Bulletin of the American Mathematical Society, sv. 49, str. 1-23, 1943.
2. ERDELYI, E.A., TRUTT, F.C., HOPKINS, R.E.: "Flux Distribution in Saturated High Speed Homopolar Alternators with Purely Reactive Loads", IEEE Transactions on Aerospace, sv. 1, str. 407-416, 1963.
3. GAUSS, C.F.: "Brief an Gerling", Werke, sv. 9, str. 28-81, 1823.
4. SILVESTER, P., CHARI, M.V.K.: "Finite Element Solution of Saturable Magnetic Field Problems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, sv. PAS-89, str. 1642-1651, 1970.
5. TRUTT, F.C., ERDELYI, E.A.: "No Load Flux Distribution in Saturated High Speed Alternators", IEEE Transactions on Aerospace, sv. 1., str. 417-429, 1963.
6. TRUTT, F.C., ERDELYI, E.A., JACKSON, R.F.: "The Non-Linear Potential Equation and its Numerical Solution for Highly Saturated Electrical Machines", IEEE Transaction on Aerospace-Support Conference Procedures, sv. 1, str. 430-440, 1963.
7. WALSH, J.: "Finite-Difference and Finite-Element Methods of Approximation", Proceedings of the Royal Society of London, Series A (Mathematical and Physical Sciences), sv. 323, str. 155-165, 1971.
8. WINSLOW, A.: "Magnetic Field Calculations in an Irregular Triangle Mesh", Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology, Stanford, California, 1965, str. 170-181.

Muharem Mehmedović
"Rade Končar" Zagreb
OOUR Elektrotehnički institut

MODELIRANJE VLADANJA SINHRONIH GENERATORA S REGULIRANOM UZBUDOM U VIŠEMAŠINSKOM ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU

Opisan je model elektroenergetskog sistema i sinhronih generatora s reguliranom uzbudom u svrhu proučavanja njihovog ponašanja u prijelaznim procesima. Opisani su i sistemi uzbude generatora koji se danas većinom koriste i to: sistem samouzbude i sistem nezavisne uzbude s rotirajućim diodama. Model je tretiran pomoću metode varijabli stanja, koja je podobna suvremenim pristupima modeliranja. Pomoću izloženog modela istražen je niz problema, vezanih za tranzijentnu i dinamičku stabilnost elektroenergetskih sistema.

MODELLING THE BEHAVIOUR OF SYNCHRONOUS GENERATORS WITH CONTROLLED EXCITATION IN A MULTIMACHINE ELECTRIC POWER SYSTEM

A model of an electric power system and synchronous generators with controlled excitation is described with the purpose of studying their behaviour in transient processes. The excitation systems of generators mostly used today are described: the self-excitation system and the independent excitation system with rotating diodes. The model is treated with the state variable method which is compatible with modern approaches to modelling. The presented model has been used to investigate a number of problems associated with the transient and dynamic stability of electric power systems.

UVOD

Elektroenergetski sistem danas po svojim fizičkim, fizikalnim i pojmovnim dimenzijama je kompleksna kategorija. Ona je u temelju današnje tehničke i ekonomske revolucije.

Osnovna svojstva elektroenergetskog sistema :generiranje, konvertiranje, prijenos i potrošnja električne energije su se u vrlo kratkom vremenskom periodu integrirala sa svojstvima informacionih, regulacionih, računarskih itd. sistema. Razumljivo je da se je to javilo kao posljedica povećanih zahtjeva na elektroenergetski sistem.

Izučavanje elektroenergetskih sistema se javlja kao važan korak u ispunjavanju tih zahtijeva. Danas više ne možemo donositi odluke o razvoju i projektiranju elektroenergetskih sistema bez prethodnog studiranja aktualne i buduće situacije u njemu. Studirajući upoznajemo interaktiranje elemenata i struktura elektroenergetskog sistema.

Sinhroni generatori imaju jednu od najodlučujućih uloga u ukupnom ispoljavanju sistema u najraznovrsnijim režimima rada. Samo studiranje počinjemo identifikacijom sistema, a zatim njegovim modeliranjem. Na ovom mjestu je od posebnog interesa modeliranje sinhronih generatora uz pretpostavku da je identifikacija izvršena na zadovoljavajući način.

Osnova je "linearni" sinhroni stroj opisan pomoću Parkovih jednadžbi koje su prilagodjene kompleksnom prikazu cijelog elektroenergetskog sistema. Opis prijenosnog sistema radi se na osnovu Kirchhoffovih zakona pisanih u posebnom obliku. Tehnika i teorija automatske regulacije, optimalnog upravljanja i stabilnosti omogućuju nam tretiranje i opis ostalih podsistema elektroenergetskog sistema u jedinstvenom obliku.

1. Stanja i stabilnost elektroenergetskih sistema

Stanje elektroenergetskog sistema određeno je sveukupnošću procesa koji se u njemu dešavaju i koji u svakom trenutku određuju njegovo ponašanje. Izvjesni elektroenergetski sistem može imati mnogo stanja. Gotovo se sva

mogu svrstati u dvije, bitno različite grupe, u ispoljavanju i izučavanju stanja: stacionarnih i prijelaznih. U realnom sistemu pod stacionarnim stanjem možemo smatrati i ono stanje u kojem se parametri režima (stanja) mijenjaju u okolišu neke srednje vrijednosti, te u prvom približenju kod proučavanja takvih stanja pretpostavljamo da su parametri stanja konstantni.

Takvo stacionarno stanje karakterizirano je balansom snaga u sistemu i konstantnošću svih parametara režima. Stacionarno stanje određeno je stacionarnom raspodjelom napona, struja, snaga, kuteva itd. Prijelazna stanja mogu biti normalna prijelazna i kvarna prijelazna stanja. Njima odgovaraju bliža određenja: normalni prijelazni i kvarni prijelazni procesi. Normalni prijelazni procesi se odvijaju u okolišu ravnotežnog stanja. Parametri režima mijenjaju se u okolišu stacionarnih vrijednosti. Ovakva stanja su posljedica malih poremećaja izazvanih izvana ili nastalih unutar sistema. Kvarni prijelazni procesi se razvijaju poslije većih poremećaja (konačno velikih), kao na primjer, poslije isključenja magistralnih linija elektroprijenosa pod opterećenjem, većih proizvodnih jedinica, kratkih spojeva i slično. Takve smetnje dovode do velikih promjena parametara režima. Zbog činjenice da su elektroenergetski sistemi nelinearni, ovakve promjene mogu dovesti, za razliku od malih promjena, do bitno drugačijeg ponašanja sistema.

U vezi s normalnim prijelaznim stanjima, koja nastaju poslije malih poremećaja, susreće se pojam dinamičke stabilnosti, a u vezi s velikim promjenama parametara režima, pojam tranzijentne stabilnosti. Uopće, stabilnost sistema je njegova sposobnost da nastavi ishodno ili njemu blisko stanje poslije izvjesnog poremećaja (smetnje). Za linearni sistem pojam tranzijentne i dinamičke stabilnosti se ne razlikuju.

U višemašinskom sistemu govorimo često o sinhronoj tranzijentnoj stabilnosti. Takva stabilnost je određena stabilnošću međusobnog gibanja rotora sinhronih strojeva u sistemu. Takvo gibanje može biti opisano međusobnim kutnim položajima rotora.

Kažemo da je sinhrona tranzijentna stabilnost sačuvana, ako tako definirani

kutni položaji ne pokazuju tendenciju razilaženja u dovoljno dugom intervalu promatranja za vrijeme i poslije poremećaja. Apsolutni kutevi koji bi se mjerili prema nekoj osi koja se vrti nekom konstantnom brzinom ne karakteriziraju sinhronu tranzijentnu stabilnost. Sistem može biti sinhrono stabilan, a da ti kutevi monotono rastu ili padaju.

Pretpostavka sinhronne tranzijentne stabilnosti je ta da se elektromehanički procesi, nastali naglim promjenama stanja sistema, razvijaju uz male promjene brzine vrtnje sinhronih strojeva u sistemu (najviše 2 - 3% sinhronne brzine). Naravno da to podrazumijeva određeni nivo tretiranja jednih i nivo zanemarenja nekih drugih procesa. Ovaj čas je jasno da tranzijentna stabilnost ne obuhvaća asinhrona stanja elektroenergetskog sistema. Ta stanja je potrebno obuhvatiti na drugi način.

2. Model elektroenergetskog sistema

Model nekog fizikalnog sistema je posljedica pridjeljivanja smisla nedefiniranim specifikacijama sistema. Na taj način model postaje funkcija interpretacije sistema odnosno njegovih svojstava. Definirati model elektroenergetskog sistema znači odabrati konfiguraciju sistema koja sadrži sve bitne parametre sistema. Izbor stupnja modela je čisto praktične naravi, a ovisi o cilju postavljenog zadatka. Model elektroenergetskog sistema ima i svoju povijesnu pozadinu. I danas se često susreću modeli koji tretiraju samo jednadžbu gibanja. Elektromagnetski moment stroja se izražavao pomoću "tranzijentne EMS-e" definirane kao:

$$\vec{E}' = \vec{U} + j X_d \vec{I} \quad (2.1)$$

dakle "napon iza tranzijentne reaktancije". Bez obzira na to što se stacionarna vrijednost elektromagnetskog momenta stroja može izraziti pomoću $\vec{E}'$,

ako želimo ispitivati utjecaj uzbudnog kruga i procesa u njemu na situaciju u elektroenergetskom sistemu, onda to ne možemo učiniti s takvim modelom. $\vec{E}'$ u (2.1) ne možemo vezati ni za jednu fizikalnu veličinu u stroju. Tek projekcija $\vec{E}'$ u poprečnu os ima vezu s tokom ulančenim s uzbudnim namotom (proporcionalna mu je) i može biti korištena za opis

procesa u uzbudnom krugu.

Odabirući model fizikalnog sistema, bitno je poznavati kvalitativne odnose između nekih parametara režima. Poznavajući osnovne fizikalne zakone, možemo uvidjeti da se brzine odvijanja procesa nalaze u vrlo širokom spektru. Odbacivanje suviše brzih ili suviše sporih pojava može nam pomoći da postupak modeliranja bude jednostavniji, lakši i brži, a i inženjerski prihvatljiv i zadovoljavajući. Tako, na primjer, kod tretiranja elektroprijenosne mreže pretpostavljamo da su njeni parametri (r , L , C elementi) konstantni, te da ta mreža ne generira slobodna njihanja pri nekom poremećaju i to u skladu sa zanemarenjem sličnih pojava u modelu sinhronog stroja (generatora). S druge strane, imajući u vidu vremenski interval u kojem se odigravaju tranzijentne elektromehaničke pojave (1 – 3 sek), često zanemarujemo promjenu momenta pogonskog stroja.

Analiza vlastitih vrijednosti sinhronog stroja (naravno linearizirane jednadžbe) bi pokazala da su vlastite vrijednosti armaturnog kruga po apsolutnom iznosu najveće, a odgovarajući parametri režima se vrlo brzo prigušuju. Tipične vlastite vrijednosti za armaturni krug su $-500 \pm j 3000$, što znači da se ove pojave odvijaju za jedan do dva reda veličine brže od osnovnih elektromehaničkih pojava te elektromagnetskih pojava u prigušnim i uzbudnim konturama. Tako je model sinhronog stroja, podoban ovakvim studijama, petog reda, odnosno opisan s pet diferencijalnih jednadžbi prvog reda i to dvije jednadžbe gibanja (brzina i kut), te tri jednadžbe za rotorske konture (dvije prigušne i jedna uzbudna kontura). Konzervativniji model od ovog je model trećeg reda nastao iz prethodnog tako da su zanemareni procesi u prigušnim konturama. Za pojave, vezane za tranzijentnu stabilnost, ovaj model je već zadovoljavajući. Međutim, zbog svoje konzervativnosti ne odražava prijelazni proces na zadovoljavajući način za dulje vrijeme promatranja. U području sinhronih gibanja (dinamička i tranzijentna stabilnost) model petog reda za sinhroni stroj je zadovoljavajući. Jednadžbe armaturnog kruga, a i prijenosne mreže, još su uvijek algebarske. Zadovoljavajući model stroja za

asinhronu režimu je sedmog reda, a prijenosna mreža je opisana ne algebarskim već diferencijalnim jednačinama.

2.1 Matematički opis

Matematički opis modela elektroenergetskog sistema obuhvaća slijedeće probleme:

- rješavanje linearnih naponsko-strujnih jednačina prijenosnog sistema;
- integriranje nelinearnih (i linearnih) diferencijalnih jednačina sinhronih strojeva i regulacionih krugova;
- zadovoljenje nelinearnih graničnih uvjeta za potrošače koji nemaju karakteristike konstantne impedancije već su neka drugačija funkcija napona, struje ili frekvencije.

Pretpostavimo li da imamo potrošače konstantne impedancije, tada se postupak matematičkog opisa pojednostavljuje.

Naponsko strujne jednačine za prijenosni sistem se mogu pisati na osnovu II Kirchhoffovog zakona (admitantna formulacija) :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_G \\ \bar{I}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{GG} & \bar{Y}_{GP} \\ \bar{Y}_{PG} & \bar{Y}_{PP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_G \\ \bar{V}_P \end{bmatrix} \quad (2.1.1)$$

Indeks "G" odnosi se na generatorske, a "P" na potrošačke čvorove.

Operator koji ostvaruje vezu između napona $(\bar{V}_G \ \bar{V}_P)^T$ struja čvorova $(\bar{I}_G \ \bar{I}_P)^T$ jeste matrica admitancija čvorova ("T" je ovdje oznaka za transponiranje). Netom spomenuta pretpostavka omogućuje nam da izvršimo redukciju broja čvorova (M) na broj jednak općem broju generatora (L) prema izrazu:

$$(\bar{Y}'_{GG}) = (\bar{Y}_{GG}) - (\bar{Y}_{GP}) (\bar{Y}_{PP})^{-1} (\bar{Y}_{PG}) \quad (2.1.2)$$

Ako redukciju vršimo korak po korak, tada nam nije potrebna posebna inverzija submatrice $(\bar{Y}_{PP})$. Koristimo li realni oblik od (2.1.2), tada se naponsko -

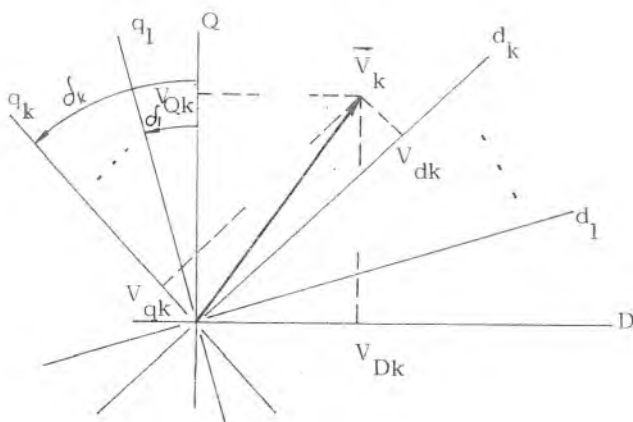
- strujne jednačine dađu pisati u obliku:

$$\begin{pmatrix} I_{D1} \\ I_{Q1} \\ \vdots \\ I_{DL} \\ I_{QL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & -B_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & -B_{1L} \\ B_{11} & G_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & G_{1L} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ G_{LL} & -B_{LL} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ B_{LL} & G_{LL} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{D1} \\ V_{Q1} \\ \vdots \\ V_{DL} \\ V_{QL} \end{pmatrix}$$

Ovdje su V_{Dk} , V_{Qk} , I_{Dk} , I_{Qk} komponente napona $\bar{V}_k$ odnosno struja $\bar{I}_k$ ($k = 1, 2, \dots, L$) u referentnom (D,Q) sistemu. (2.1.3) se može pisati i skraćeno kao:

$$(I) = (YGB) (V) \quad (2.1.4)$$

Da bismo povezali jednadžbe stroja s ovim jednadžbama, moramo izvršiti transformaciju komponenti iz jednog u drugi sistem prema sl. 1:



Sl. 1

$$\begin{pmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta_k & \sin \delta_k \\ \sin \delta_k & \cos \delta_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{Dk} \\ V_{Qk} \end{pmatrix} \quad (2.1.5)$$

ili : $(V_G) = (RT) (V)$, a to također vrijedi i za struje:

$$(I_G) = (RT) (I) \quad (2.1.6)$$

Koristimo još Parkove jednadžbe koje vrijede za stacionarno stanje (k -ti stroj):

$$\begin{pmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_{dk} \\ \Psi_{qk} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r_k \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{dk} \\ I_{qk} \end{pmatrix} \quad (2.1.7)$$

pri čemu je r_k serijski ohmski otpor do točke na kojoj se definira V_{dk} i V_{qk} .

Ispuštajući indeks "k" i poopćavajući dobijamo:

$$(V_G) = (M) (\Psi_G) - (R) (I_G) \quad (2.1.8)$$

Koristeći još algebarski odnos između tokova (Ψ_G) , rotorskih struja $(I_p) = (I_{fd} \ I_{ld} \ I_{lq})^T$ te armaturnih struja (I_G) :

$$(\Psi_G) = (XAD) (I_p) - (XDQ) (I_G) \quad (2.1.9)$$

možemo doći do matrične jednadžbe:

$$((E) + (YGB) (RT) ((R) + (XDY)) (RT)^T) (I) = (YGB) (RT) (M) (XAD) (XP) (\Psi_p)$$

(E) je ovdje jedinična matrica reda L. Ostale matrice iz (2.1.9) i (2.1.10) su redom (za k-ti stroj):

$$(XAD_k) = \begin{pmatrix} X_{adk} & X_{adk} & 0 \\ 0 & 0 & X_{aqk} \end{pmatrix} \quad (2.1.11)$$

$$(XDQ_k) = \begin{pmatrix} X_{dk} & 0 \\ 0 & X_{qk} \end{pmatrix} \quad (2.1.12)$$

$$(XDY_k) = (M_k) ((XDQ_k) - (XAD_k) (XP_k)^{-1} (XAD_k)^T) \quad (2.1.13)$$

$$(\Psi_{pk}) = (\Psi_{fdk} \ \Psi_{ldk} \ \Psi_{lqk})^T \quad (2.1.14)$$

$$(X P_k) = \begin{pmatrix} X_{fdk} & X_{adk} & 0 \\ X_{ad} & X_{lld} & 0 \\ 0 & 0 & X_{llq} \end{pmatrix} \quad (2.1.15)$$

Matricna jednadžba (2.1.10) se rješava po $(I) = (I_{D1} \ I_{Q1} \ \dots \ I_{DL} \ I_{QL})^T$. Vektor na desnoj strani (2.1.10) mora biti poznat u trenutku rješavanja. Ovaj vektor je komponiran od veličina čije diferencijalne jednadžbe opisuju vremensko ponašanje sistema. To je vektor (Ψ_p) , vektor magnetskih tokova ulančenih s rotorskim konturama te matrica transformacije (RT) čiji su elementi trigonometrijske funkcije kuteva strojeva $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_L$ koji karakteriziraju položaje rotora sinhronih strojeva prema nekoj sinhronoj osi. Za k-ti stroj diferencijalne jednadžbe od (Ψ_p) i (δ) po vremenu (t) su:

$$\frac{d(\Psi_{pk})}{dt} = \omega_s ((E_{fdk}) - (R_{pk})(I_{pk})) \quad (2.1.16)$$

Ovdje je :

$$(E_{fdk}) = (u_{fdk} \ 0 \ 0)^T \quad \text{vektor napona uzbude}$$

rotorskih kontura i

$$(R P_k) = \begin{pmatrix} r_{fdk} & 0 & 0 \\ 0 & r_{lldk} & 0 \\ 0 & 0 & r_{llqk} \end{pmatrix} \quad (2.1.17)$$

Iz algebarskog odnosa :

$$\begin{aligned} (\Psi_{pk}) &= - (XAD_k)^T (I_{Gk}) + (X_{pk})(I_{pk}) = \\ &= - (XAD_k)(RT_k)^T (I_k) + (X_{pk})(I_{pk}) \end{aligned} \quad (2.1.18)$$

eliminira se (I_{pk}) i uvrsti u izraz na desnoj strani od (2.1.16) pa se dobija (ako se ispusti indeks k i jednadžba poopći za cijeli sistem):

$$\frac{d(\Psi_p)}{dt} = \omega_s ((E_{fd}) - (R_p)(X_p)^{-1} ((\Psi_p) + (XAD)(RT)^T (I)) \quad (2.1.19)$$

Koristimo još jednađžbe gibanja razbijene u po dvije diferencijalne jednađžbe prvog reda i to po brzini ($\mathbf{v}_k$) i kutu (δ_k):

$$\frac{d\mathbf{v}_k}{dt} = \frac{1}{T_{Mk}} ((m_{ok}) - (\Psi_{Gk})^T (M_k)^T (I_{Gk})) \quad (2.1.20)$$

$$\frac{d\delta_k}{dt} = \omega_s (\mathbf{v}_k - 1), \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (2.1.21)$$

Izraz $(\Psi_{Gk})^T (M_k)^T (I_{Gk})$ u (2.1.20) je elektromagnetski moment za k-ti generator. Stacionarno stanje je određeno sa:

$$m_{ok} = (\Psi_{Gk})_o^T (M_k)^T (I_{Gk})_o \quad \text{te}$$

$$\delta_k = \delta_{ko}, \quad \mathbf{v}_k = 1, \quad k = 1, 2, \dots, L$$

$$(\Psi_{pk}) = (\Psi_{pk})_o \quad (2.1.22)$$

T_{Mk} je konstanta inercije normalizirana s baznom snagom (S_B), koja je jedinstvena za cijeli elektroenergetski sistem, a definirana je prema

$$T_{Mk} = \frac{J_k \omega_{msk}^2}{S_B} \left(\frac{Ws}{VA} \right) \quad (2.1.23)$$

J je moment tromosti ($\frac{mD^2}{4}$, kgm^2), a ω_{msk} ($\frac{rad}{sek}$)

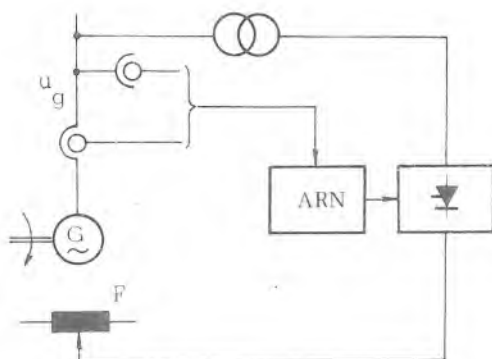
mehanička sinhrona brzina, a S_B (VA) je bazna snaga. Skupovi diferencijalnih jednađžbi (2.1.19), (2.1.20) i (2.1.21) kojih ima ukupno $5L$, opisuju elektromagnetski i elektromehanički proces u elektroenergetskom sistemu. S njima još nije obuhvaćen opis regulacionih krugova za napon i brzinu vrtnje.

Diferencijalne jednađžbe (2.1.19), (2.1.20), i (2.1.21) su već pisane u obliku pogodnom za numeričko rješavanje. Varijable čije vremenske derivacije (prvog reda) opisuju ponašanje modela sistema, jesu varijable stanja. Skup varijabli

stanja (Ψ_{pk}), v_k , δ_k ($k = 1, 2, \dots, L$) bit će još nadopunjen s varijabla-
ma koje opisuju uzбудni sistem. O tome će biti riječi u idućem dijelu.

2.2 Modeliranje sistema uzbude sinhronih generatora

U derivacijama tokova, ulančenih s konturama rotora (2.1.19), pojavljuje se vektor (E_{fd} odnosno u_{fd}) kao napon uzbude. Osnovno je na ovom mjestu definirati zakon po kojem se mijenja napon uzbude. S obzirom na način uzimanja snage potrebne za uzбудni sistem, razlikujemo samouzbudu i neza-
visnu uzbudu. Samouzbuda (sl. 2) je sistem uzbude, kod kojeg se snaga potrebna za uzбудni sistem, uzima sa stezaljki tog istog generatora kod kojeg je maksimalni napon uzbude (stropni napon) zavisna od trenutne vrijednosti napona generatora. Nezavisna uzbuda (sl. 3) je sistem uzbude, kod kojeg je izvor za uzbudu nezavisan od smetnji u mreži.



Sl. 2

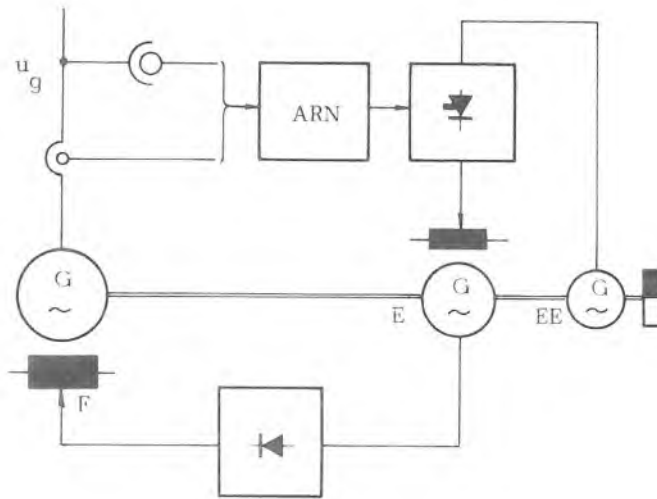
Vezu napon generatora - napon uzbude na sl. 2 možemo smatrati bezinercio-
nom kada se radi o proporcionalnoj regulaciji. Neka je pojačanje po odstupanju napona generatora :

$$K_u = - \frac{\Delta u_{fd}}{\Delta u_g} \quad (2.2.1)$$

Ovdje je

$$\Delta u_{fd} = U_{fdo} - u_{fd} \quad \text{odstupanje napona uzbude;}$$

$$\Delta u_g = U_{go} - u_g \quad \text{odstupanje napona generatora}$$



Sl. 3 Nezavisna uzbuda – sistem s rotirajućim diodama

Neka su faktori stropnog napona uzbude:

$$V_{\max} = \frac{U_{f\max}}{U_{f\text{nom}}} \quad \left| \quad u_g = U_{g\text{nom}} \right. \quad (2.2.2)$$

$$V_{\min} = \frac{U_{f\min}}{U_{f\text{nom}}} \quad \left| \quad u_g = U_{g\text{nom}} \right. \quad (2.2.3)$$

Za samouzbudu možemo postaviti jednadžbu koja odražava zakon po kojem se mijenja napon uzbude:

$$u_{fd} = U_{fdo} + K_u \Delta u_g \quad (2.2.4)$$

i to za:

$$K_2 u_g \leq u_{fd} \leq K_1 u_g \quad (2.2.5)$$

te:

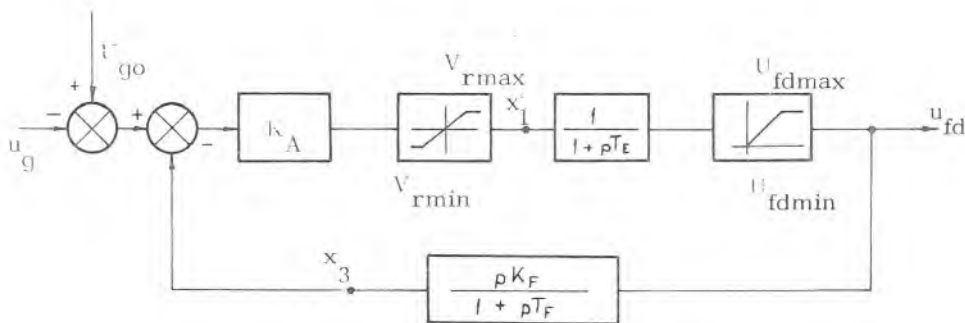
$$\begin{aligned} u_{fd} &= K_1 u_g & \text{za } u_{fd} \geq K_1 u_g & \text{ i} \\ u_{fd} &= K_2 u_g & \text{za } u_{fd} \leq K_2 u_g & \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

Iz (2.2.6) zaključujemo da su iznosi $K_1 u_g$ i $K_2 u_g$ trenutni maksimalni odnosno minimalni napon uzbude za slučaj samouzbude, pri čemu je u_g trenutna vrijednost napona generatora. K_1 i K_2 su definirani prema izrazima:

$$\begin{aligned} K_1 &= V_{\max} / u_{fd\text{nomrel}} & \text{ i} \\ K_2 &= V_{\min} / u_{fd\text{nomrel}} \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

Nezavisna uzbuda prema sl. 3 se neće moći predstaviti na ovaj način, budući veza napon generatora - napon uzbude generatora nije više bezinerciona zbog kašnjenja koje unose uzbudnik (E) i uzbudnik uzbudnika (EE).

Zanemarimo li kašnjenje koje unosi automatski regulator napona (ARN) i uzbudnik uzbudnika te zasićenja u uzbudniku i generatoru, možemo nacrtati analognu shemu uzbudnog sistema kao što je to načinjeno na sl. 4.



Sl. 4

Prigušni član u povratnoj vezi služi za internu stabilizaciju regulacionog kruga. Opis uzbudnog sistema na sl. 4 izvršit ćemo pomoću varijabli stanja i prilagoditi načinu rješavanja na elektroničkom računalu, kako je to načinjeno u dijelu (2.1), kada je opisan elektroenergetski sistem. Prije prijelaza sa

simboličkog na diferencijalni oblik, napišimo veličinu X_3 (izlaz iz prigušnog člana) na slijedeći način:

$$X_3(p) = \frac{pK_F}{1 + pT_F} u_{fd} = \left(\frac{K_F}{T_F} - \frac{1}{1+pT_F} \right) u_{fd} \quad (2.2.8)$$

ili uvođenjem nove varijable:

$$X_2(p) = \frac{1}{1+pT_p} u_{fd} \quad (2.2.9)$$

$$X_3(p) = \frac{K_F}{T_F} (u_{fd} - X_2(p)) \quad (2.2.10)$$

Iz (2.2.9) izlazi diferencijalna jednačina:

$$\frac{dX_2}{dt} = \frac{1}{T_F} (u_{fd} - X_2) \quad (2.2.11)$$

a sa sl. 4 još i:

$$\frac{du_{fd}}{dt} = \frac{1}{T_E} (X_1 - u_{fd}) \quad (2.2.12)$$

pri čemu je :

T_E - vremenska konstanta uzbudnika i:

$$X_1 = K_A (U_{go} - u_g - \frac{K_F}{T_F} (u_{fd} - X_2)) \quad (2.2.13)$$

Za ovu veličinu imamo limite V_{rmax} i V_{rmin} koji moraju biti inkorporirani u računu derivacije (2.2.12) i to tako da je:

$$V_{rmin} \leq X_1 \leq V_{rmax} \quad (2.2.14)$$

i

$$X_1 = V_{rmax} \quad \text{za} \quad X_1 \geq V_{rmax} \quad (2.2.15)$$

$$X_1 = V_{rmin} \quad \text{za} \quad X_1 \leq V_{rmin} \quad (2.2.16)$$

Za napon uzbude u_{fd} postoje takodjer ograničenja:

$$u_{fd} = U_{fdmax} \quad \text{za} \quad u_{fd} \geq U_{fdmax} \quad (2.2.17)$$

$$u_{fd} = U_{fdmin} \quad \text{za} \quad u_{fd} \leq U_{fdmin} \quad (2.2.18)$$

koja se moraju postaviti i u računu derivacija i u računu konačne vrijednosti napona uzbude na kraju integracionog koraka kod korištenja numeričkih metoda integriranja.

Treba zapaziti da je $U_{fdmin} = 0$, budući se radi o neupravljivim usmjerivačkim ventilima (diodama) preko kojih se napaja uzbudni namot generatora (F).

2.3 Postupak rješavanja

Za integriranje diferencijalnih jednadžbi koje opisuju ponašanje modela elektroenergetskog sistema u obliku

$$\frac{d(X)}{dt} = (F(X, Y, t)) \quad (2.3.1)$$

$$(G(X, Y)) = (0) \quad (2.3.2)$$

gdje je (X) vektor varijabli stanja, potrebno je poznavati početne uvjete tj. vektor (X) $t=t_0 = (X_0)$.

Dobijanje početnih uvjeta vodi preko rješavanja još jednog problema, a to je proračun stacionarnog stanja elektroenergetskog sistema. Matematički to je skup $2M-2$ nelinearnih algebarskih kompleksnih jednadžbi (M je ukupni broj nezavisnih čvorova prijenosnog sistema). Opći pristup rješavanju ovog problema je Newton-Raphsonova metoda.

Konvergencija iterativnog procesa i stabilnost rješenja mogu se pratiti iz predznaka jakobijane. Tek pošto je riješen problem stacionarnog stanja možemo računati vektor početnih uvjeta (X_0) , koji obuhvaća varijable stanja svih agregata i njihovih regulacionih krugova u trenutku $t = t_0$.

Uobičajen postupak integriranja diferencijalnih jednadžbi (2.3.1) je metoda Runge - Kutta ili Runge - Kutta - Merson s diskretnim reguliranjem integracionog koraka.

Integriranje diferencijalnih jednadžbi (2.3.1) ne možemo provesti direktno, budući moramo računati vektor (Y) posrednih algebarskih veličina povezanih vektorom (X) preko neeksplicitnog sistema algebarskih jednadžbi (2.3.2) $(G(X, Y)) = (0)$. Ove jednadžbe su dane izrazom (2.1.10) pri čemu je vektor (Y) vektor struja (I) čije se komponente odnose na zapis u referentnom

koordinatnom sistemu. Sreća je što je ovaj sistem algebarski, pa se struje iz (2.1.10) mogu uspješno riješiti pomoću metode Gauss-Jordanove eliminacije i slično. Tek pošto je dobijen vektor (Y) može se prići računu derivacija prema (2.3.1) i numeričkom integriranju. Rezultat numeričkog integriranja je vremenski tok vektora varijabli stanja ($X(t)$), koji odražava procese koji se razvijaju poslije nekih smetnji. Te smetnje mogu biti, kao što je već spomenuto, kratki spojevi, isključenje prijenosnih linija, trajno isključenje generatora, asinhroni zaleti većih jedinica i slično.

Izučavanje normalnih prijelaznih režima bismo sprovedi pomoću lineariziranih jednažbi, izvedenih u ovom članku. Linearizacija u okolišu neke radne točke sistema bi nam omogućila da sistem opišemo pomoću linearnih diferencijalnih jednažbi:

$$\frac{d}{dt} (X) = (A) (X) + (B)(u) \quad (2.3.3)$$

(A) je matrica sistema, a (u) vektor upravljačkih varijabli (ili varijabli smetnje). Svojstva sistema u radnoj točki proučavamo pomoću svojstva matrice sistema (A), a ta se mogu istražiti uobičajenim tehnikama numeričke matematike.

Izloženi model ne pretendira da bude potpun, ali u visokom stupnju može odraziti, s našeg stanovišta, dinamičke i tranzijentne procese. Modeliranje regulacije brzine vrtnje upotpunilo bi model za proučavanje još šireg spektra pojava u modernim elektroenergetskim sistemima. Samo modeliranje turbin-ske strane nije teško provedivo, kada se poznaju parametri tog dijela elektro-energetskog sistema.

Literatura

1. M. Mehmedović : Analiza utjecaja parametara uzbudnih sistema sinhronih generatora na dinamičku stabilnost (magistarski rad), Zagreb 1974;
2. J.M. Undrill: Structure in the Computation of Power System Nonlinear Dynamical Response, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, No 1, 1969;

Dr Borivoje Rajković, dipl.inž.
"Rade Končar" Zagreb
OOUR Elektrotehnički institut

OSOBITOSTI ELEKTROMOTORNOG POGONA S NAPONOM UPRAVLJANIM ASINHRONIM MOTOROM

Pri upravljanju asinhronog motora promjenom napona napajanja statora preko tiristorskih konfiguracija postižu se ograničeni rezultati zbog povećanih gubitaka snage na nižim brzinama vrtnje.

Komutacija statorskih faza pri upravljanju asinhronog motora tiristorskim sklopovima postavlja na upravljačke impulse tiristora specifične zahtjeve.

Uvjeti za vođenje struje kroz asinhroni motor bitno se razlikuje za spojeve statora sa i bez nul-vodiča.

Sistemu za regulaciju brzine vrtnje asinhronog motora promjenom napona napajanja statora pridružuju se, obično, dvije povratne veze: unutrašnja (strujna) i vanjska za regulaciju brzine vrtnje.

PECULIARITIES OF THE VOLTAGE CONTROLLED INDUCTION MOTOR DRIVE

Control of induction motor speed by stator voltage variation using thyristor circuits yields limited results due to higher energy losses with lower rotation speeds.

The commutation of stator phases in thyristor controlled induction motor drives poses specific requirements on thyristor control pulses.

The conditions of induction motor current flow differ essentially for stator circuits with and without a return conductor.

In an induction motor speed control system two feedbacks are usually included: an internal feedback for current and an external feedback for speed control.

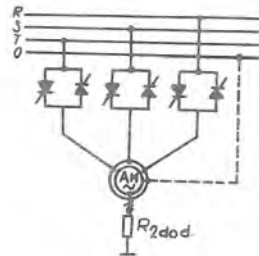
1. Uvod

Primjenom tiristora, dioda i trijaka (a ranije transduktora i magnetskih pojačala) u određenim simetričnim i asimetričnim konfiguracijama možemo mijenjati napon, koji se priključuje na stezaljke asinhronog motora, i na taj način podešavati brzinu vrtnje motora.

Pri upravljanju, odnosno regulaciji brzine vrtnje asinhronog motora (AM), ovom metodom postižu se ograničeni rezultati: radne točke u području malih brzina vrtnje mogu se postići, uz nominalni moment tereta, ili uz relativno velike dodatne otpore u rotorskom krugu ili rotorom specijalne konstrukcije.

Regulacija brzine vrtnje AM napona statora, iako se plaća povećanim gubicima, privlačna je zbog relativno jednostavnih sklopova sistema automatskog upravljanja i zbog primjenljivosti i na kliznokolutne i na kavezne motore. Povećani gubici limitiraju primjenljivost ovog rješenja na pogone manjih snaga i na sisteme u kojima stupanj iskorištenja nije presudan.

Principijelna shema glavnih strujnih krugova prikazana je na sl.1. Između mreže i motora priključeni su antiparalelno spojeni tiristori. Ako je namot statora spojen u zvijezdu, zvjezdište se može spojiti s nul-vodičem (crtkane linije na sl.1). Tiristorski sklop na sl. 1 (TT ili 6T spoj) se najviše proučava i najčešće primjenjuje.

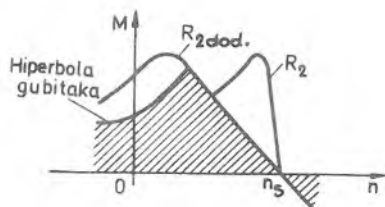


Sl. 1 Principijelna shema glavnih strujnih krugova naponom upravljanog AM

Ovisno o kutu kašnjenja okidanja tiristora, struja pojedinih faza teče neometano ili u cijeloj ili samo u dijelu poluperiode, odnosno periode napona mreže; time se mijenja srednja i efektivna vrijednost napona, priključenog na motor. Napon na stezaljkama motora je izobličen, dakle, u ovisnosti o veličini kuta kašnjenja okidanja, ali njegovo ponašanje određuje, uglavnom, osnovni sinusni val struje, odnosno napona.

U M-n koordinatnom sistemu na sl. 2 prikazano je moguće područje rada naponom upravljanog asinhronog motora.

Da bi se proširilo područje rada u motorskom režimu, na klizne kolute se priključuje otpor R_{2dod} (sl. 1 i 2); kod kaveznih motora ovo se postiže pogodnom konstrukcijom (dvokavezni rotor, povećan otpor kaveza). Promjenom kuta kašnjenja



Sl. 2 Područje rada naponom upravljanog AM

okidanja tiristora moguće je postići bilo koju radnu točku unutar šrafiranog područja na sl. 2, ako se pogonu osigura reverziranje.

Hiperbola gubitaka - granična krivulja opterećenosti asinhronog motora pri promjeni klizanja - najbolje se približuje $M-n$ karakteristikama onih pogona kod kojih se sa smanjenjem brzine vrtnje drastično smanjuje opterećenje. Međutim, ova metoda upravljanja koristi se i kod pogona s konstantnim momentom opterećenja, ali s intermitencijom u kojoj je motor kratko vrijeme uključen, ili je postrojenje rijetko u pogonu i ograničena je na motore manjih snaga (do cca 150 kW za kliznokolutne motore) (L5).

Rezultati, prezentirani u ovom radu, dobiveni su eksperimentalnim istraživanjima. Za eksperimente je odabran trofazni asinhroni kliznokolutni motor (serijske proizvodnje) tvornice "Rade Končar" u Zagrebu, tipa APZ 267 - 6 : snaga 9 kW, nominalni moment $M_n = 9,2 \text{ kpm}$, $n_n = 960 \text{ o/min}$, $I_s = 20 \text{ A}$, $I_r = 39 \text{ A}$, $\cos \varphi = 0,8$, $R_{2dod} = 1,1 \Omega^*$.

2. Specifičnosti komutacije statorskih faza pri upravljanju asinhronim motorima naponom statora

Za približne proračune napona, kojim se napaja asinhroni motor pri upravljanju tiristorima, moguće je AM predstaviti kao specifični radno-induktivni

- *
s - indeks za parametre statora
r,2 - indeksi za parametre rotora
n - indeks za nazivnu vrijednost

teret. Veličine radnog i induktivnog otpora u tom slučaju nisu konstantne nego zavise o brzini vrtnje motora i mogu se odrediti iz nadomjesne sheme asinhronog motora.

Odnosi napona i struja, položaj kuta kašnjenja okidanja tiristora α i kut vodjenja λ za jednofazni radno-induktivni teret, prikazani su na sl. 3. Na-
pišimo diferencijalnu jednađbu za krug na sl. 3:

$$U_m \sin \omega t = i R + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Struja, koja teče kroz jedan od tiristora (uz pretpostavku da je to idealni ventil) u intervalu $\alpha \leq \omega t \leq \beta$, dobiva se iz jednađbe (1):

$$i = \frac{U_m}{R} \cos \varphi \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t - \alpha}{\tan \varphi}} \right], \quad (2)$$

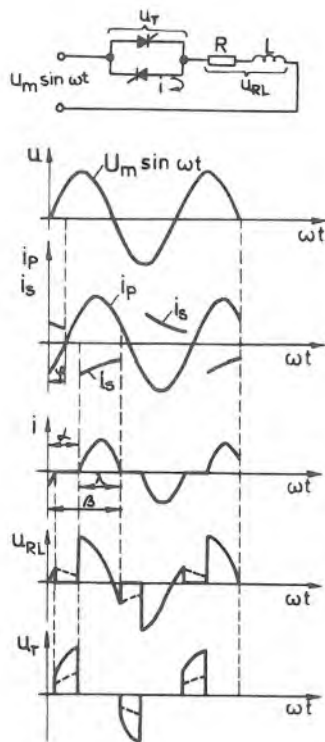
gdje je $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ - odre-

djen parametrima tereta.

Dakle, struja kroz RL krug, na koji je priključen napon $U_m \sin \omega t$, sastoji se od dvije komponente : slobodne i_s i prisilne i_p (jednađba 2 i slika 3).

Slobodna komponenta struje prigušuje se vremenskom konstantom, koja zavisi o faznom kutu tereta. Ako je kut kašnjenja okidanja tiristora $\alpha = \varphi$, ne pojavljuje se slobodna komponenta struje. Ovaj kut kašnjenja okidanja naziva se kritičnim kutem α_{kr} ; za $\alpha > \alpha_{kr}$ struja je diskontinuirana, a za $\alpha < \alpha_{kr}$ kontinuirana.

Kod trofaznih potrošača oblici napona i struje tereta ovise, osim o veličini kuta okidanja tiristora, još i o spoju.



Sl. 3 Naponsko-strujni odnosi u jednofaznom tiristorskom sklopu

Kod spojeva s nul-vodičem struja kroz antiparalelno spojene tiristore u jednoj fazi ne zavisi od struja drugih faza i određena je odnosima kuteva $\mathcal{L}$ i $\mathcal{A}$ ili $\mathcal{B}$ i $\mathcal{V}$, kao što je to prikazano na sl. 3. Zato kažemo da u spoju s nul-vodičem postoji nezavisna komutacija u svakoj fazi.

Maksimalni kut vodjenja $\mathcal{A}$ u stacionarnom stanju iznosi π° el. Samo u prelaznim stanjima ovaj kut može biti i veći od π za jedan od tiristora; npr. pri uključenju napona $U_m \sin \omega t$ na tiristorski sklop i teret koji su prikazani na sl. 3.

Kod asinhronih motora pri $\mathcal{A} < \pi$ elektromagnetsko polje, koje nastaje od struja rotora, pri prekidu napajanja, ne prigušuje se u potpunosti i inducira elektromotornu silu u namotima statora. Zato će realna vremenska promjena napona na statoru i na tiristorima biti približno onakva kako je to na sl. 3 prikazano crtanim linijama.

U shemama bez nul-vodiča tiristori su priključeni na linijski napon. Struja može teći samo za istovremeno okidanje dvaju tiristora, uključenih u različite faze. Zato u trofaznim spojevima bez nul-vodiča teče struja šest puta u toku jedne periode napona u svim fazama (režim 3 F) ili samo u dvije faze (režim 2 F), ovisno o kutevima $\mathcal{L}$ i $\mathcal{V}$.

3. Zahtjevi na upravljačke impulse tiristorskih sklopova

Jasno je da se upravljačkom impulsu u prvom redu moraju osigurati takvi parametri koje tiristor, odnosno statička karakteristika njegovog gejta, zahtijeva da se dostigne područje sigurnog okidanja tiristora i ne prekorači dozvoljena repetitivna i srednja disipacija.

Ostale parametre upravljačkog impulsa određuju: konfiguracija tiristorskog sklopa, karakter tereta i režimi rada asinhronog motora. Impulsi tiristora moraju slijediti frekvenciju napona napajanja i osigurati pouzdano uključivanje tiristora svaki put poslije prolaska struje kroz nulu.

Kritičan parametar je širina impulsa $\mathcal{J}$. Minimalna širina impulsa određena je razlikom kuteva $\mathcal{V} - \mathcal{L}$. Ako ovaj uvjet nije ispunjen, impuls završava prije prolaska struje kroz nulu i tiristor ostaje u stanju blokiranja. Širina impulsa $\mathcal{J}$, ne manja od 60° el., osigurava pouzdano okidanje tiristora za sve

spojeve namota statora u cijelom dijapazonu promjene kuta α i u motornom i u protustrujnom režimu rada asinhronog motora.

"Češljasti" oblik impulsa osigurava manji volumen impulsnom transformatoru i manju disipaciju tiristora u zapornom smjeru kod postojanja struje impulsa, dok je anoda prema katodi negativna.

Poznato je da u generatorskom režimu rada postoji fazni pomak između napona i struje statora asinhronog motora $\varphi > \frac{\pi}{2}$. Potrebna minimalna širina impulsa u generatorskom režimu rada, za većinu asinhronih motora i u praksi realno ostvarivih negativnih klizanja, iznosi 90° el. (L5).

4. Trajektorije Parkovih vektora naponom upravljanog asinhronog motora

Poznato je da se pomoću Parkovih vektora, koji se podudaraju sa smjerovima fizikalnih veličina u stroju, a mogu se snimiti na ekranu osciloskopa, mogu efikasno istraživati nesimetrični nesinusoidalni stacionarni režimi rada i prelazne pojave u trofaznim strojevima (L4).

Iz teorije izmjeničnih strojeva poznato je da se Parkov vektor struje, npr. struje statora $\bar{i}_s$ može dobiti iz momentanih vrijednosti i_a, i_b, i_c faznih struja pomoću jednadžbe:

$$\bar{i}_s = \frac{2}{3} (i_a + \bar{a} i_b + \bar{a}^2 i_c), \quad (3)$$

$$\text{gdje su: } \bar{a} = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \bar{a}^2 = e^{-j2\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4)$$

jedinični vektori u smjeru osi b i c trofaznog sistema.

Rezultantni vektor struje $\bar{i}_s$, definiran jednadžbom (3), invarijantan je s obzirom na postojanje nul-komponente u sistemu. Međutim, nul-komponentu struje trofaznog sistema možemo uzeti u obzir pomoću jednadžbe, poznate u teoriji simetričnih komponenti:

$$\bar{i}_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c). \quad (5)$$

Dakle, umjesto faznih struja i_a, i_b, i_c , uveli smo transformacijom koordinata veličine $\bar{i}_s$ i i_0 tako da je:

$$\vec{i}_a = \text{Re} \left\{ \vec{i}_s \right\} + i_o; \quad \vec{i}_b = \text{Re} \left\{ a^2 \vec{i}_s \right\} + i_o; \quad \vec{i}_c = \text{Re} \left\{ a \vec{i}_s \right\} + i_o. \quad (6)$$

Za spoj statora asinhronog motora bez nul-vodiča $i_o = 0$ pa su momentane vrijednosti struja u pojedinim fazama jednake projekciji Parkovog vektora na odgovarajuće osi.

Ako u sistemu ne postoji nul-komponenta struje, tj. ako je $i_o = 0$, $\vec{i}_a + \vec{i}_b + \vec{i}_c = 0$, onda Parkov vektor možemo rastaviti na realnu i imaginarnu komponentu u smjeru mirujućeg koordinatnog sistema $\mathcal{L}, \mathcal{B}$:

$$\vec{i}_s = i_{\mathcal{L}} + j i_{\mathcal{B}} \quad (7)$$

i prema jednadžbi (3) izračunati ove komponente:

$$i_{\mathcal{L}} = i_a = - (i_b + i_c); \quad i_{\mathcal{B}} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_b - i_c). \quad (8)$$

Ako kroz nul-vodič protiče struja koja ima momentanu vrijednost $3 i_o$, onda će momentane vrijednosti struja pojedinih faza biti: $i_a + i_o, i_b + i_o, i_c + i_o$.

Ove struje stvaraju na tri opteretna omska otpora u sekundarna strujnih transformatora (sl.4) napone proporcionalne upravo tim strujama; zato su i neophodna tri strujna transformatora.

Prema spoju na sl. 4

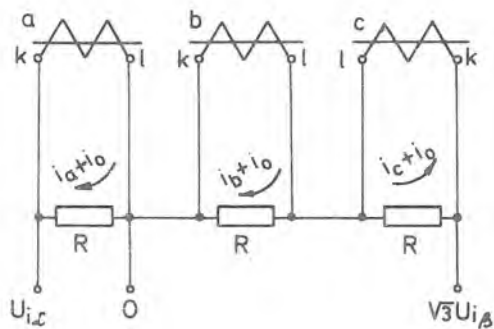
dobit ćemo na ekranu osciloskopa

vrh Parkovog vektora struje, ako na horizontalni otklonski sistem

priključimo napon $U_{i_{\mathcal{L}}}$ propor-

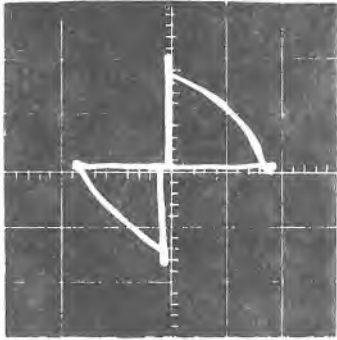
cionalan s $R (i_a + i_o)$, a na vertikalni otklonski sistem napon $\sqrt{3} U_{i_{\mathcal{B}}} = R (i_b - i_c)$; 0 je zajednička stezaljka osciloskopa.

Napon, proporcionalan razlici struja u fazama b i c, ne sadrži nultu komponentu, jer ona pripada sistemu istofaznih veličina. Ova metoda može se koristiti i kod snimanja Parkovog vektora struje za spoj namota statora u trokut, a evidentno je i za spoj "zvijezda bez nul-vodiča".

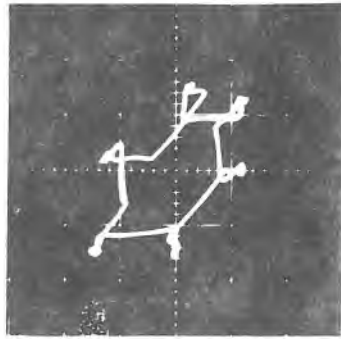


Sl. 4 Shema sklopa za snimanje Parkovog vektora struje

U stacionarnom režimu rada vrh Parkovog vektora struje $\bar{i}_s$ opisuje zatvorenu krivulju, jer se struja periodički mijenja. Trajektorija vektora struje, snimljena prema shemi na sl. 4 za spoj namota statora "zvijezda s nul-vodičem", strogo uzevši, predstavlja modifikaciju Parkovog vektora struje. Naime, projekcija snimljenog vektora na os a daje pravu momentanu vrijednost struje ($i_a + i_o$) samo u toj fazi. Ovo je redovito i dovoljno, jer se struje u ostalim fazama periodički ponavljaju (L5).



Sl. 5 Parkov vektor struje AM za TT spoj s nul-vodičem; motor opterećen



Sl. 6 Parkov vektor struje AM za TT spoj bez nul-vodiča; motor opterećen

Parkovi vektori struje, naponom upravljanoj AM, snimljeni (prema shemi na sl. 4) za stacionarni režim rada (povratne veze po struji i brzini vrtnje su zatvorene) za spoj sa i bez nul-vodiča, prikazane su na slikama 5 i 6.

Pomoću ovih trajektorija može se jednostavno odrediti sadržaj viših harmoničkih komponenti struje.

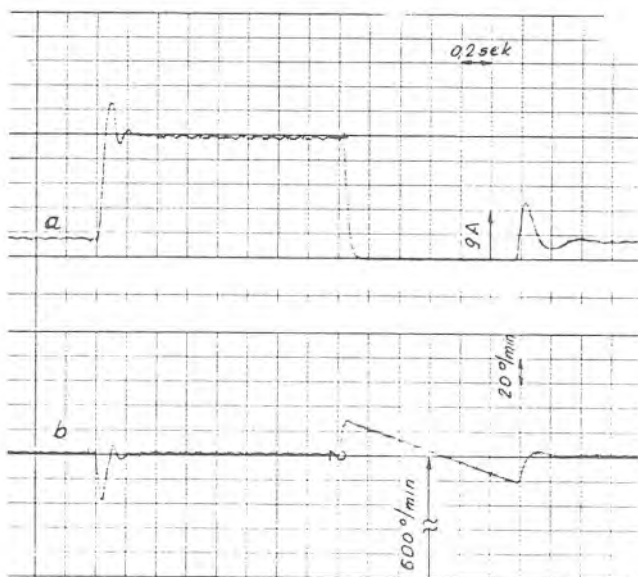
Poznato je da se u trofaznim strojevima simetrične konstrukcije mogu pojaviti samo viši harmonici rednog broja: $\nu = 1 \pm gk$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$), gdje g označava g - stranu simetriju krivulje. Dakle, vektor struje statora AM s nul-vodičem opisuje dvostranu simetričnu krivulju, a kod spoja bez nul-vodiča šestorostranu krivulju (sl. 5 i 6). Iz ovih simetrija može se zaključiti da su u TT spoju prisutni viši harmonici određeni odnosom $\nu = 1 \pm 2k$, a to znači: $\dots, 9, -7, -5, -3$, odnosno $3, 5, 7, 9$ itd. (za spoj s nul-vodičem),

odnosno odnosom $\nu = 1 + 6k$ (za spoj bez nul-vodiča) pa se pojavljuju slijedeći viši harmonici: ... , -17, -11, -5, i 7, 13, 19 itd. Negativni predznak kod nekih viših harmonika kaže da je okretno polje, koje stvara struja tih harmonika, suprotno smjeru rotacionog polja osnovnog harmonika.

Mjerenja na asinhronom motoru APZ 267 - 6 pokazuju da motor u spoju "zvijezda bez nul-vodiča" (kada kroz namote statora ne teku harmonici struje, koji su višekratnici od 3) ima u području brzina vrtnje 0 - 300 o/min nešto povoljnije energetske karakteristike, tj. manju potrebnu efektivnu vrijednost struje statora, uz isti moment opterećenja, od spoja s nul-vodičem. Napomenimo da AM razvija cca 20% veći moment kod jednakih nižih napona i manjih brzina vrtnji, ako su namoti statora spojeni u zvijezdu s nul-vodičem. Možemo općenito reći da momenti, struje, $\cos \varphi$ i stupanj djelovanja u funkciji brzine vrtnje značajno odstupaju, u usporedbi s ovim parametrima pri sinusoidalnom napajanju motora, samo pri drastičnom smanjenju brzine vrtnje.

5. Povratne veze naponom reguliranog asinhronog motora

Sistemu za regulaciju brzine vrtnje AM promjenom napona napajanja statora pridružuju se, obično, dvije povratne veze: unutrašnja (strujna) i vanjska za regulaciju brzine vrtnje. Struktura sklopova i povratne veze, naponom reguliranih asinhronih motora, u principu su iste kao i one kod reguliranih istosmjernih motora. Razlike u parametrima i podešavanju krugova određuje struktura i dinamičko ponašanje asinhronog motora.



Sl. 7 Odziv struje (a) i brzine vrtnje (b) pri $n = 600 \text{ o/min}$ za skokovitu promjenu tereta od praznog hoda do $0,8 M_n$ i skokovito rasterećenje

Rezultat eksperimentalnih podešavanja unutrašnje i vanjske povratne veze za naponom regulirani asinhroni motor APZ 267 - 6, prikazan je na sl. 7. Pri snimanju zvjezdište statora je bilo spojeno s nul-vodičem.

Informacija o struji, da bi se lakše procijenio karakter nje-
ne prelazne pojave, snimana je na kondenzatoru filtra u grani povratne
veze. S oscilograma se vidi da je postignuto statičko odstupanje brzine vrtnje

manje od $\pm 1\%$. Dinamičko odstupanje kod opterećenja na nižim brzinama vrtnje, npr. pri 250 o/min iznosi cca 10%, a pri 600 o/min iznosi 6% (sl. 7).

Za podešenje koje je prikazano na sl. 7 postoje u struji statora prisilne oscilacije. Krug je, naime, podešen kompromisno s obzirom na veličinu dinamičkog odstupanja, vremena regulacije i veličine prisilnih oscilacija u unutrašnjoj povratnoj vezi.

Višestruka nelinearnost parametara AM uzrok je potrebi za kompromisnim podešavanjem regulacionih krugova. Dobro podešenje, postignuto uz određene parametre regulatora struje i brzine vrtnje, pri npr. 500 o/min, ima za posljedicu nestabilan pogon uz isto opterećenje pri 300 o/min (L5). Ovakvo različito ponašanje asinhronog motora u dvije bliske radne točke ne susreće se kod reguliranih istosmjernih motora.

Podešavanje sistema regulacije za naponom upravljani AM, znatno je jednostavnije, ako je zvjezdište statora motora spojeno s nul-vodičem. Iako je promjenom napona napajanja statora AM moguće regulirati brzinu vrtnje u cijelom dijapazonu (ograničenje je, ipak, dodatni otpor rotora), neki autori predlažu kao najpovoljnije rješenje, smanjenje brzine vrtnje u omjeru 3:1 ili 4:1; ostvarivi su i bitno veći omjeri (npr. 20:1).

Iako se u laboratorijima već duže vrijeme eksperimentalno istražuju, a postoje i pogonska iskustva o naponom reguliranim asinhronim motorima, ipak teoretska istraživanja obuhvaćaju uski krug problema, zaostaju za potrebama u praksi i ne mogu dati eksplicitne odgovore o ponašanju motora u novim režimima rada.

Metode rješavanja linearnih sistema (Bode, Nyquist) izvanredna su i pouzdana pomoć pri analizi i sintezi reguliranih istosmjernih motora. Nažalost, takve jednostavne metode za sintezu reguliranih asinhronih motora, zbog složenosti elektromagnetskih prelaznih pojava, ne postoje.

Provjerene klasične metode koriste se pri istraživanju karakteristika motora u stacionarnom stanju, a prelazne pojave mogu se istraživati u okviru generalizirane teorije električnih strojeva. U tom slučaju dinamičko ponašanje AM opisuje se pomoću matematičkog modela s pet, odnosno šest diferencijalnih jednačbi za AM bez, odnosno s nul-vodičem (L 1). Evidentno da su, zbog

postojanja tiristorskih sklopova, naponi na stezaljkama motora nesinusoidalni, i model se usložnjava. Zato moramo u matematičkom modelu mijenjati otpor statora pojedinih faza motora već prema tome da li se odgovarajući tiristor nalazi u stanju vodjenja ili zapiranja.

Za analizu naponom upravljalog AM u zatvorenom krugu (ako su primjenjeni elementi tipa P, I, D) potrebno je matematički model proširiti varijablama intercionih članova regulatora, odnosno filtera u povratnim vezama, koje određuju kut kašnjenja okidanja $\angle$ tiristora. Ovako, ipak, pojednostavljeni model dovodi do toga da dobiveni rezultati omogućuju i dopuštaju samo kvalitativnu ocjenu varijacija osnovnih parametara, a ne pružaju veliku pomoć inženjerima pri projektiranju.

Sintezu naponom reguliranih AM, na današnjem stupnju razvoja teorije, treba izvršiti na osnovi eksperimentalnih istraživanja, a kontrolu nekoliko kritičnih točaka pomoću opisanog matematičkog modela na digitalnom računalu.

Literatura

1. Kovács K.P., Rácz I., Tranziente Vorgänge in Wechselstrommaschinen, Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest, 1959.
2. Kovács L., Spannungsgeregelte Halbleiter - Asynchron motorantriebe, 1. Konferenz für Leistungselektronik, Budapest, 1970.
3. Petrov L.P., Ladenzon B.A., Obukovskij M.P., Podzolov K.G., Asinhronnyj elektroprivod s tiristornymi kommutatorami, Izdatel'stvo "Energija", Moskva, 1970.
4. Rácz I., Oszillographische Aufnahme und Harmonische Analyse von Dreiphasen - Vektoren, Periodica Polytechnica, Vol. 8, No 4, Budapest, 1964.
5. Rajković B., Dinamičko ponašanje naponom reguliranog asinhronog motora, Doktorska disertacija, Zagreb, 1973.
6. Silizium Stromrichter Handbuch, Aktiengesellschaft Brown, Boveri und Cie., Baden (Schweiz), 1971.

Ivka Šaban
Poduzeće "Rade Končar"
OOUR Elektrotehnički institut
Zagreb, Baštijanova bb

SASTAVLJANJE PRIKLJUČNOG PLANA POMOĆU ELEKTRONIČKOG RAČUNALA

U referatu je opisan prvi u nizu zadanih radova na projektiranju energetskih postrojenja pomoću elektroničkog računala. Ovaj zadatak je vrlo jednostavno definiran: iz strujne sheme s upisanim aparatima i preglednog nacрта s upisanim prostornim rasporedom aparata treba se dobiti priključni plan. To znači dobiti dokument koji daje veze odredjenog dijela razvoda kod rednih stezaljki prema aparatima u samom razvodu kao i veze prema van, uz odgovarajuće zahtjeve na pisanje dokumenta, opisa veza, kabela i sl.

U članku su opisane mogućnosti rješavanja ovog, na očigled jednostavnog ali vrlo kompleksnog zadatka, te je dano jedno rješenje ovog problema na računalu IBM 360 - 40. Od mogućih programskih jezika uzet je ASSEMBLER kao najprikladniji za rješavanje ovoga tipa problema.

WORKING OUT THE WIRING SCHEDULE BY THE COMPUTER

A basic approach to composing the switch board wiring schedule by the computer is presented.

This task is defined very simply: the control circuit diagram showing all apparatus and the general plan with the layout of the apparatus should give us the wiring schedule - that is - a document containing all the connections of the switch board from the terminal blocks to the apparatus in the switch board and out. The document also includes a convenient description of the connections and cables.

The description of possible solutions to these problems, which seem to be simple but are really very complex, is also given. One solution to the problem is given, as an example, which has been worked out on an IBM 360-40 computer in ASSEMBLER, the most convenient language for this purpose.

1. UVOD

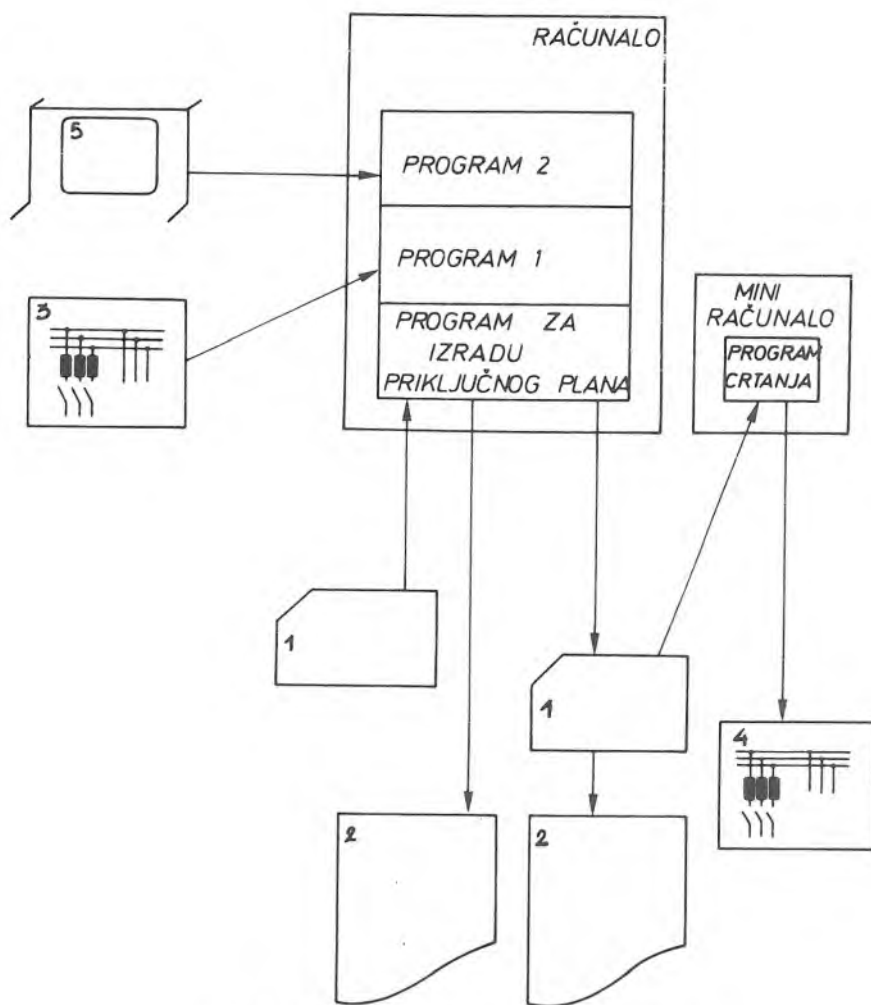
Priključni plan je formular potreban kod šemiranja postrojenja. Formira se u fazi izrade projektne dokumentacije. Uvjet je poznavanje razvoda (polja) postrojenja, odnosno svih elemenata razvoda, njihovog prostornog rasporeda unutar razvoda, te međusobnih veza aparata kojima se organizira funkcioniranje postrojenja.

Kada je postrojenje projektom definirano, projektant izrađuje pregled veza (priključni plan) među aparatima i razvodima – ručno. Očigledno je da je izrada priključnih planova čisto rutinski posao kojega se projektant treba osloboditi. Zbog toga, mogućnost rješavanja ovog zadatka pomoću elektroničkog računala, zaslužuje pažnju. U tu svrhu potrebno je definirati obradu (tj. izraditi program za računalo) i osigurati ulazne podatke. Tada projektant treba dati samo upute, a priučena osoba će ispunjavati određene formulare za računalo.

Budući da u praksi dolazi ponekad do izmjena u projektnoj dokumentaciji, potrebno je programom predvidjeti mogućnost unošenja naknadnih promjena u izlaznim listama (pomoću računala) – bez potrebe ponavljanja obrade cijelog projekta. Posljednji i konačni izlaz iz računala može predstavljati službeni obavezni dokument.

2. OSVRT NA ULOGU ELEKTRONIČKOG RAČUNALA NA PROJEKTIRANJU POSTROJENJA

Pogledajmo sliku 1. Sadašnje mogućnosti upotrebe elektroničkog računala na izradi projektne dokumentacije ograničuju se na izradu priključnih planova postrojenja. Posao je organiziran na slijedeći način: svi potrebni podaci se ili unose u računalo u vidu ulaznih kartica ili se uzimaju iz memorije računala, ukoliko takvi (standardizirani) podaci u računalu postoje. Uz definiranu obradu ovih ulaznih podataka (vidjeti PROGRAM ZA IZRADU PRIKLJUČNOG PLANA na slici 1.) iz elektroničkog računala se dobivaju izlazne liste, zapravo priključni planovi postrojenja i bušene kartice koje takodje predstavljaju priključne planove postrojenja.



Sl. 1 Organizacija elektroničkog računala na izradi projektne dokumentacije

- 1 - ulazno/izlazne kartice
- 2 - izlazne liste
- 3 - formular za crtanje shema
- 4 - crtanje shema na ploteru
- 5 - display

Daljnji korak u primjeni elektroničkog računala pri projektiranju (vidjeti sliku 1.) je crtanje električkih shema u pogodne formulare, prikladne za komunikaciju s računalom. U tom slučaju se postojeći program proširuje programom (PROGRAM 1 na slici 1.), koji ima zadatak da nacrtanu shemu s podacima prevede u takav oblik ulaznih podataka koji će koristiti isti program za izradu priključnih planova.

Elektroničko računalo može crtati električke sheme ukoliko ima odgovarajuću opremu za crtanje (ploter). U tom slučaju su izlazne kartice priključnih planova ulazni podaci za ploter. Na ovaj način se dobivaju potpuno definirane strujne sheme projektne dokumentacije (PROGRAM CRTANJA na slici 1.), koje uz priključne planove, dobivene takodjer pomoću elektoničkog računala, čine značajni dio projektne dokumentacije.

Korak dalje u razmatranju primjene elektroničkog računala na izradi projektne dokumentacije je sastavljanje postrojenja i odabiranje elemenata pomoću display-a, što zahtijeva izradu programa (PROGRAM 2 na slici 1.) koji će unijete podatke preko konzole display-a prevesti u oblik, pogodan za upotrebu istog programa za izradu priključnih planova te programa crtanja.

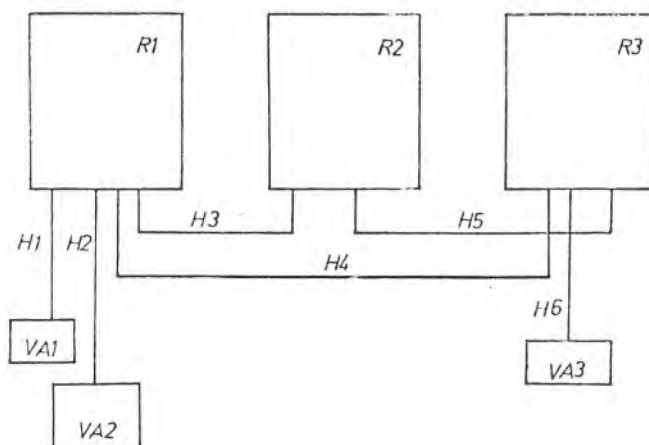
3. PODACI POTREBNI ZA IZRADU PRIKLJUČNOG PLANA

U izradi priključnog plana polazi se od dvije sheme: preglednog nacrta koji pokazuje prostorni raspored aparata u razvodu i strujnog lista koji opisuje medjusobne veze aparata. Budući da se aparati medjusobno povezuju vodičima, kada se nalaze unutar istog razvoda, i kabelima, kada se nalaze u različitim razvodima, potrebno je poznavati presjeke vodiča, vrste kabela te broj žila kabela. Pri ručnoj izradi priključnog plana projektant uredjuje ove podatke kod upisivanja aparata. Strojna obrada priključnog plana na elektroničkom računalu zahtijeva unošenje u računalo svih onih podataka (u obliku ulaznih podataka) koji nisu definirani kao stalni podaci u računalu. Ovo se takodjer odnosi i na opisivanje aparata koji se nalaze van razvoda (vanjski aparati-motori, otpornici i sl.) a trebaju biti detaljno opisani u priključnom planu.

Podaci za opisivanje sastavnice priključnog plana su uvijek uključeni u ulazne podatke, jer se ime projekta, imena razvoda, pripadni njihovi brojevi (šifre) te imena ljudi koji sudjeluju u izradi projekta, mijenjaju od projekta do prijekta.

4. ODNOSI APARATA UNUTAR POSTROJENJA

Energetsko postrojenje (slika 2) je skupina razvoda (polja) i vanjskih aparata, tj. aparata koji ne pripadaju ni jednom razvodu.



Sl. 2 Blok shema energetskog postrojenja

$R1, R2, R3$ - razvodi

$VA1, VA2, VA3$ - vanjski aparati

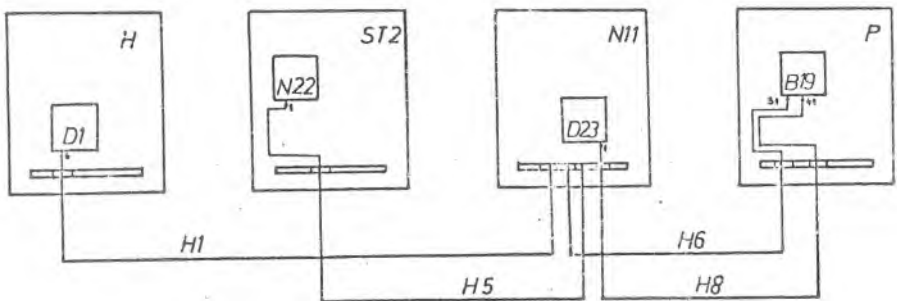
$H1, H2, \dots, H6$ - oznaka s tekućim brojem kabela

Aparati unutar svakog razvoda se nalaze u odredjenom prostornom rasporedu. Općenito, jedan aparat može biti direktno povezan s drugim, ukoliko je drugi aparat vanjski ili je to aparat koji se nalazi u nekom drugom razvodu.

Neke veze aparata u razvodu se izvode direktno van mimorednih stezaljki i to onda kada je presjek vodiča velik (npr. od 25 mm^2 pa na više) ili kada vanjski aparati imaju stezaljke "nula" (0) ili "zemlja" ($\perp$).

Općenito važi da se, po želji, svaki aparat može dovesti na rednu stezaljku.

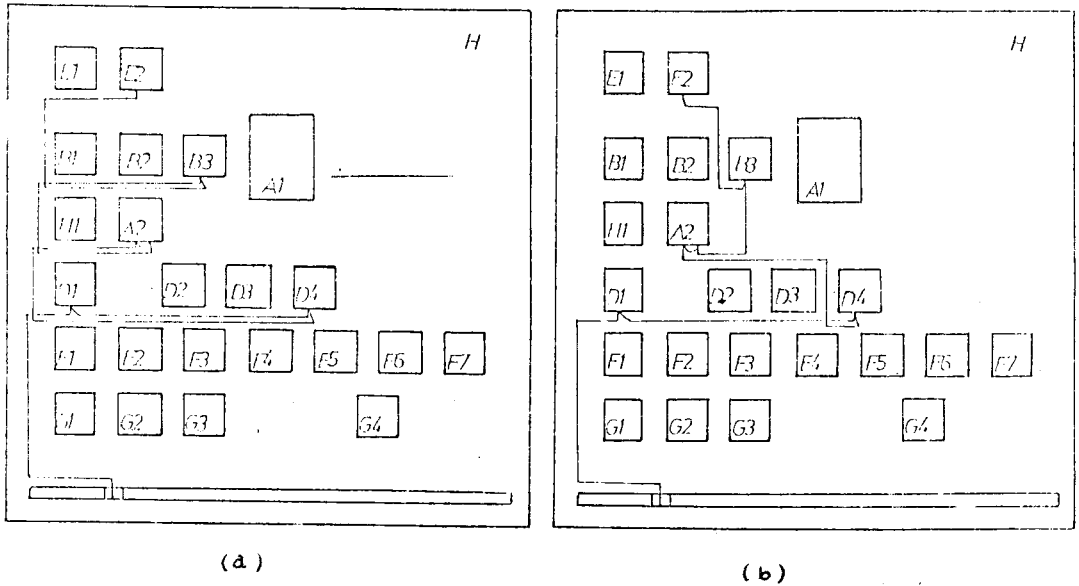
U energetsom postrojenju aparati se mogu međusobno povezivati preko jednog ili više razvoda kako bi se uštedilo na kabelima (slika 3, slučaj 1). Pri tom i ovi razvodi mogu imati aparate koji se na određeni način povezuju (slika 3, slučaj 2).



Sl. 3 Povezivanje aparata preko razvoda za veze

1. slučaj: HD1(6) - N11 - PB19(31)
2. slučaj: PB19(41) - N11 - ST2N22 (1) - N11 D23 (1)

Unutar jednog razvoda aparati se mogu međusobno vezati tako da aparat, najbliži rednoj stezaljci, ide na tu rednu stezaljku, dok se ostali aparati mogu međusobno vezati direktno, i to dvojako: jedan način povezivanja aparata je taj da se najprije vežu aparati koji se nalaze u istom redu, zatim se prelazi na gornji red počevši uvijek od prvog aparata s lijeve strane u datom redu (slika 4a); drugi način je taj da se najprije vežu aparati koji se nalaze u istom redu, zatim se prelazi na gornji red, i to najprije na onaj aparat koji je najbliži jednom od aparata u prethodnom redu, da bi se zatim povezali



Sl. 4 Povezivanje aparata unutar razvoda

H - razvod

E1, E2, ... - aparati

4a - povezivanje aparata po redovima
počev od prvog s lijeve strane

4b - povezivanje aparata najkraćim mogućim
putem

ostali aparati reda itd. (slika 4b). Kada se međusobno vežu aparati na način prema slici 4a, snop vodiča po vertikali nalazi se na lijevoj strani razvoda, a veze izgledaju uredno. U slučaju povezivanja aparata na način prema slici 4b postiže se minimalni utrošak vodiča.

5. PREGLED ULAZNIH PODATAKA ZA IZRADU PRIKLJUČNOG PLANA

Za izradu priključnog plana pomoću elektroničkog računala potrebni su oni isti podaci kojima raspolaže projektant pri ručnoj izradi priključnog plana. To su:

- pregledni nacrt s upisanim razmještajem aparata,
- strujni list s opisom međusobnog odnosa aparata,
- poznavanje vrste vodiča, kabela i opis vanjskih aparata te
- naziv i ostali podaci projekta.

Svi ovi podaci se moraju unijeti u elektroničko računalo da bi se priključni plan dobio u obliku izlazne liste elektroničkog računala. Pri tome treba imati u vidu da svi oni podaci koji se ne mijenjaju od projekta do projekta, mogu biti stalni podaci u elektroničkom računalu. Pohranjeni podaci u elektroničkom računalu se ne moraju upisivati kod obrade novog projekta. Ovo se za sada, uglavnom, odnosi na opis vodiča, kabela te vanjskih aparata.

Ulazni podaci se upisuju u za to predviđene formulare. Svakoj grupi podataka pripada zaseban formular. Primjer upisivanja podataka iz preglednog nacrtu i strujnog lista pokazan je na slici 5.

Upis određenog redoslijeda je predviđen za svaku grupu podataka zato da se izbjegne premještanje podataka, preskakivanje redova kod bušenja kartica i sl. Tako se izbjegava unošenje netočnih informacija u računalo.

1.UPIŠIVANJE ULAZNIH PODATAKA IZ PREGLEDNOG NACRTA

LIST:

REDNI BROJ KARTICE	P O G O N S	R A Z V O D X	NAZIVI APARATA U REDU																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
			15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				</

2.UPIŠIVANJE ULAZNIH PODATAKA IZ STRUJNIH LISTOVA

LIST:

REDNI BROJ KARTICE	NAZIV NIVOA	NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA				NAZIV APARATA			
--------------------------	----------------	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--	------------------	--	--	--

Sl. 5 Primjeri formulara za upis ulaznih podataka

6. POSTUPAK IZRADE PROGRAMA ZA IZRADU PRIKLJUČNOG PLANA

Principni dijagram toka programa za izradu priključnog plana pomoću elektroničkog računala prikazan je na slici 6.

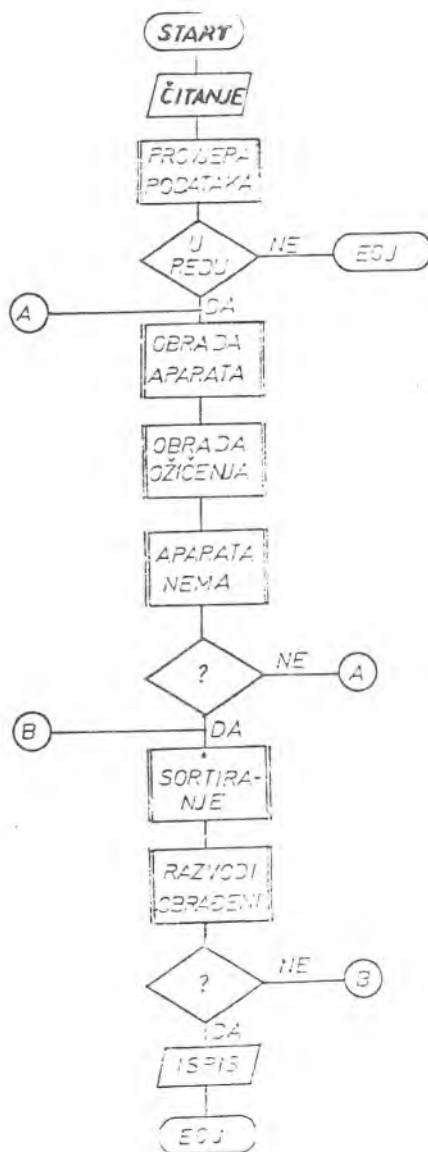
Prvi korak u programu je učitavanje svih podataka u računalo te detaljna provjera uskladenosti svih unijetih podataka. To znači da svi aparati u razvodima moraju biti jednoznačno određeni, a svi vanjski aparati trebaju imati detaljni opis. Vodiči i kabeli koji se upisuju uz vanjske aparate i razvode, moraju takodjer biti jednoznačno određeni. Svaki podatak koji nije definiran, ispisuje se u izlaznu listu. Na osnovu izlazne liste, osoba koja popunjava formulare za računalo, ispravlja ulazne kartice te nanovo testira ulazne podatke. Kada je rezultat na izlaznoj listi zadovoljavajući i nema pogrešaka, program prelazi na obradu podataka. To je obrada podataka po razvodima, pridruživanje vodiča i kabela te obrada onih vanjskih aparata koji se međusobno vežu direktno. Obrada podataka traje tako dugo dok ima podataka u osnovnom polju podataka.

Osnovno polje podataka su podaci dobiveni na osnovi učitavanja podataka iz strujnih listova. Strujni list se preslikava u niz nivoa istoga potencijala. Jedan nivo potencijala čini, dakle, skupina aparata čije su stezaljke vezane međusobno. Program obrađuje ove podatke, pridružuje vodiče, ako se aparati nalaze u istom razvodu, kao i kabele, ako se aparati nalaze u različitim razvodima.

Redoslijed obrade razvoda u programu je određen redoslijedom učitavanja podataka po razvodima iz preglednih nacрта. Ovaj se redoslijed nešto mijenja kada postoje razvodi koji služe za vezu među razvodima, te razvodi sa i bez sabirnice.

Kada unutar jednog nivoa istog potencijala postoji razvod za vezu, program najprije obrađuje razvode koji se direktno međusobno povezuju, pa tek onda prelazi na obradu razvoda koji se vežu preko međurazvoda.

Kada neki razvodi sadrže sabirnice, uvijek se najprije obrađuju oni razvodi koji nemaju sabirnice, a onda tek oni koji sadrže sabirnice. Na taj način aparat u razvodu koji nema sabirnicu, veže se na razvod sa sabirnicom.



Slika 6 Principni dijagram toka programa za izradu priključnog plana

Nakon obrade podataka, program prelazi na sortiranje podataka na rednoj stezaljci za svaki razvod i vanjske aparate. Sortiranje unutar jednog razvoda je grupiranje podataka koji idu van iz razvoda na takav način da se dobije optimalna iskorištenost kabela na rednoj stezaljci. To znači da se kabele prostorno grupiraju na međusobno blize stezaljke.

Rutina kraja programa je izlistavanje rezultata i bušenje kartica. To su liste i kartice priključnih planova.

Izlistan priključni plan se može odmah koristiti za šemiranje postrojenja. Bušene kartice se pohranjuju pa prema potrebi koriste za ponovno dobivanje lista priključnih planova ili korekciju rezultata do konačnog oblika priključnog plana.

Priključni plan svakog razvoda sastoji se iz tri dijela. Prvi dio se odnosi na veze aparata razvoda preko rednih stezaljki (slika 7). Drugi se odnosi na međusobno veze aparata unutar razvoda (sl. 8). Treći dio pokazuje iskorištenost kabela s obzirom na njegov broj žila (slika 9).

Vanjski aparati, ako se direktno povezuju, imaju posebno izlistan priključni plan.

Na slikama 7, 8 i 9 je pokazan priključni plan za razvod H dobiven pomoću elektroničkog računala. Razvod H je jedan od pet razvoda testiranog primjera. Strujna shema je opisana slikom 10. Na slici 11 je pokazan dio priključnih planova za razvode N11, P i N02. Tako se mogu s lakoćom pratiti veze aparata, opisane nivoom 24 (0024) na slici 11, u kome su razvodi H i N02 povezani s razvodom P preko razvoda N11. Detaljniji opis ćemo izostaviti jer evidentno slijedi iz danih priključnih planova.

7. POGOVOR

Programom izrade priključnih planova na elektroničkom računalu i dobivenim rezultatom pokazano je da se priključni plan, do sada radjen samo ručno, može uspješno izraditi pomoću elektroničkog računala. Ukazuju se mogućnosti da se elektroničko računalo angažira u izradi projektne dokumentacije znatno šire nego što je to ovdje prikazano.

VANJSKI OBJEKTI:		* R A D E K O D I R A S *									
NAZIV OBJEKTA, BROJ KABELA, VRSTA, PRESJEK I BROJ ŽILA		SPOJEVI MEĐU APARATIMA IZ RAZVOJNE GRADNJE II									
		PRIKLJUČAK ODMATA STEZALICA		VRSTA		PRIKLJUČAK		VRSTA		PRIKLJUČAK	
		NA STEZ.		VODICA		POSREDOVAČI		POSREDOVAČI		POSREDOVAČI	
RAZVOJNI ODMAS N11	H0001 NSSHU/N	2,5	* 03	N11	002			001		002	01 1,5
RAZVOJNI ODMAS N11	H0001 NSSHU/N	2,5	* 03	N11	007			002		001	01 1,5
CONTACT THERMOMETER TC-M1	H0002 NSSHU/N	2,5	* 03	M01	01			003		001	04 1,5
BUCHHOLZ RELAY BU-M1	H0003 NSSHU/N	2,5	* 04	M01	A			004			
BUCHHOLZ RELAY BU-M1	H0003 NSSHU/N	2,5	* 04	M01	C			005			
CONTACT THERMOMETER TC-M1	H0002 NSSHU/N	2,5	* 03	M01	03			005		001	02 1,5
CONTACT THERMOMETER TC-M1	H0002 NSSHU/N	2,5	* 03	M01	02			007		002	02 1,5
BUCHHOLZ RELAY BU-M1	H0003 NSSHU/N	2,5	* 04	M01	B			008		001	02 1,5
BUCHHOLZ RELAY BU-M1	H0003 NSSHU/N	2,5	* 04	M01	D			009		001	02 1,5
								010		002	02 1,5
RAZVOJNI ODMAS S12	H0004 NSSHU/N	2,5	* 03	S12	003			011		002	01 1,5
RAZVOJNI ODMAS N02	H0005 NSSHU/N	2,5	* 03	N02	005			012		001	07 1,5
								013		001	06 1,5

Sl. 7 Izgled priključnog plana za razvod H
list 1 - veze preko redne stezaljke

VANJSKI OBJEKTI:		* R A Z V O J N I K A B *	
NAZIV OBJEKTA, BROJ KABELA, VRSTA, PRESJEK I BROJ ŽILA	SPOLJEVI MEĐU APARATIMA ZA RAZVOJNI OMARE	H	
PRIKLJUČAK ODMORA STEPALJKA VERZ. 220/410/10/5 PRESJEK NA STEZ. VOĐICA VRSIA BRUJ SLIJEZ. NA STEZ. MM2			
D01 01	004 04	004 04	1.5
D04 04	004 04	004 04	1.5
A02 03	004 04	004 04	1.5
A02 23	004 04	004 04	1.5
A02 25	004 04	004 04	1.5
B03 31	004 04	004 04	1.5
D01 03	004 04	004 04	1.5
D04 03	004 04	004 04	1.5
A02 05	004 04	004 04	1.5
D01 01	004 04	004 04	1.5
D02 01	004 04	004 04	1.5
D03 01	004 04	004 04	1.5
D04 01	004 04	004 04	1.5
H01 0	004 04	004 04	1.5
A02 06	004 04	004 04	1.5
H01 01	004 04	004 04	1.5
H01 02	004 04	004 04	1.5
D01 07	004 04	004 04	1.5
D02 07	004 04	004 04	1.5
D03 07	004 04	004 04	1.5
D01 06	004 04	004 04	1.5
D02 06	004 04	004 04	1.5
D03 06	004 04	004 04	1.5

Sl. 8 Izgled priključnog plana za razvod H
list 2 - veze unutar razvoda H

* R A D E K O N Z A R *

RAZVOHIT ORHAR: H

NAZIV KABELA RE BR. NAZIV TIPIA PRESEK B2 IILA BROJ UPOTREBJENIH KABELA

H	0001	MSHU/N	2.5	* 003	002
H	0002	MSHU/N	2.5	* 003	003
H	0003	MSHU/N	2.5	* 004	004
H	0004	MSHU/N	2.5	* 003	001
H	0005	MSHU/N	2.5	* 003	001

Slika 9 Izgled priključnog plana za razvod H
list 3 - lista iskorštenosti kabela za razvod H

LIST : 003

PROJEKT: KARDIA GRČKA NO DNKT/5100E H

RADE KONČAR
POSREDOVANJE ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE OPREME
PROJEKTOVANJE I MONTAŽU POSTROJENJA

DATUM: 22/04/75

PROJEKTANT: ING. VIKI
PRAVILNOSTI: ING. VIKI
ISPITAO: ING. VIKI
VIDIO: ING. ČULHOVIĆ

PROJEKT: KARDIA GRČKA NO DNKT/5100E H

BROJ PROJEKTA: 008323393

PRIKLJUČNI PLAN: 6 KV SCHERAK
CUBICLE H

PRIKLJUČNICA: H
LISTOVA: 003

BROJ NACRTA: 000001403
PRAVILNOSTI NACRTI: 000001209 000001209

mr Marija Šantak dipl.ing.
Poduzeće "Rade Končar"
OOUR Elektrotehnički institut

ODREDJIVANJE MOMENTNE KARAKTERISTIKE JEDNOFAZNOG ASINHRONOG MOTORA POMOĆU VIŠIH HARMONIČKIH KOM- PONENTI POLJA

U ovom referatu prikazuje se postupak odredjivanja momentne karakteristike jednofaznog asinhronog motora pomoću viših harmoničkih komponenti polja.

Primjenom metode simetričnih komponenata provedena je analiza rada jednofaznog asinhronog motora koji se predstavlja nesimetričnim dvofaznim sistemom. Pomoću digitalnog kompjutera računaju se momentane karakteristike motora s utjecajem viših harmoničkih komponenti polja u ovisnosti o brzini vrtnje.

Uzima se u obzir nesinusna raspodjela protjecanja statora, nejednoliki zračni raspor te nesinusna raspodjela protjecanja rotora.

Usporedba izračunane momentne karakteristike s mjerenom karakteristikom pokazuje da dobiveni rezultati zadovoljavaju.

THE DETERMINATION OF SINGLE-PHASE SQUIRREL-CAGE ASYNCHRONOUS MOTOR TORQUE - SPEED CHARACTERISTICS BY HIGHER HARMONIC FIELD COMPONENTS

An approach to the determination of momentum characteristics of the single-phase induction motor is presented. The influence of higher harmonic components of the magnetic field is taken into account.

The operation of the single-phase induction motor has been analyzed by means of the method of symmetric components. In this case the induction motor has been represented as a non-symmetrical two-phase system. Higher harmonic components of the magnetic field are calculated in dependence upon the speed of rotation. Momentum characteristics of the motor are given based on the influence of higher components of the magnetic field. Nonsinusoidal distribution of the magnetomotive force of the stator, the non-uniform air gap and nonsinusoidal distribution of the magnetomotive force of the rotor are taken into account in the calculation.

The comparison of the calculated and measured momentum characteristics has shown a satisfactory correspondence.

1. Uvod

Primjenom metode simetričnih komponenata provedena je analiza rada jednofaznog asinhronog motora, koji se predstavlja nesimetričnim dvofaznim sustavom.

Na temelju te analize sastavljen je program za digitalni kompjuter, kojim se računaju karakteristike motora s utjecajem viših harmoničkih komponenti polja u ovisnosti o brzini vrtnje.

Nesinusna raspodjela protjecanja statora, nejednolik zračni raspored daju čitav niz direktnih i inverznih valova indukcije u rasporu različitih dužina i brzine vrtnje određene redovima prostornih i vremenskih članova koji su uzrokovani rotacijom.

Računa se i s povratnim djelovanjem rotora na stator, koje je uzrokovano nesinusnom raspodjelom protjecanja rotora. Uzimaju se u obzir viši harmonički članovi struje rotora.

U radu je zanemaren utjecaj zasićenja željeza na raspodjelu polja u rasporu, te utjecaj poprečnih struja u kavezu, koje mogu bitno promijeniti karakteristike motora.

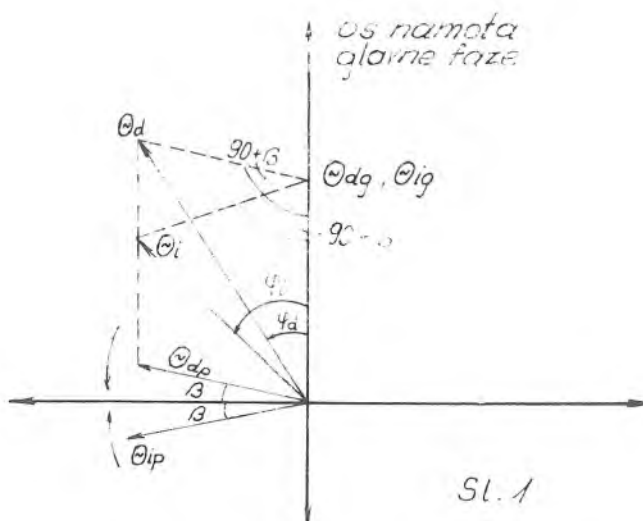
Izračunana momentna karakteristika se uspoređivala s mjerenom karakteristikom. Usporedba je pokazala da te dvije ne odstupaju bitno, te da dobiveni rezultati zadovoljavaju.

2. Opis postupka

Jednofazni asinhroni motor s pomoćnom fazom može se promatrati kao nesimetrični dvofazni sistem. Analiza rada se može provesti metodom simetričnih komponenata ili metodom dvoosnog prikazivanja. Odabrana je metoda simetričnih komponenata.

2.1 Protjecanje

Rezultantno protjecanje namota glavne i pomoćne faze je prikazano okretnim protjecanjem direktnog i inverznog smjera (sl. 1).



Sl. 1

Iz vektorske slike (koja se odnosi na osnovni harmonički član protjecanja) slijede rezultirajuće amplitude komponenti direktnog θ_d i inverznog θ_i okretnog protjecanja, te kutevi ψ_d i ψ_i između θ_d i θ_i i osi namota glavne faze.

Budući da protjecanje svake faze odstupa od sinusoide (zbog raspodjeljenog strujnog obloga) rastavlja se funkcija protjecanja na prostorne više harmoničke članove općenito reda ν različitog iznosa u glavnoj $\omega_{vg} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot \omega_p \cdot J_p}{2p \cdot \nu} \cdot f_{vg}$ i pomoćnoj fazi $\theta_{vp} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot \omega_p \cdot J_p}{2p \cdot \nu} \cdot f_{vp}$

Rezultirajuće direktno i inverzno protjecanje ν -tog harmoničkog prostornog člana određuje se prema formulama:

$$\theta_{d\nu p} = \frac{\theta_{vp}}{2} ; \quad \theta_{i\nu p} = -\frac{\theta_{vp}}{2}$$

$$F_\nu = \frac{\omega_p \cdot f_{vp} \cdot J_p}{\omega_g \cdot f_{vg} \cdot J_g} \quad L_\nu = \nu \cdot \frac{\pi}{2}$$

$$\theta_{d\nu} = \frac{\theta_{vg}}{2} \cdot \sqrt{1 + F_\nu^2 - 2F_\nu \cos(L_\nu + \beta)}$$

$$\theta_{i\nu} = \frac{\theta_{vg}}{2} \cdot \sqrt{1 + F_\nu^2 - 2F_\nu \cos(L_\nu - \beta)}$$

$$\tan \psi_d = \frac{\theta_{d\nu p} \cdot \cos \beta}{\theta_{vg} + \theta_{d\nu p} \cdot \sin \beta} = \frac{F_\nu \cdot \cos \beta}{1 + F_\nu \cdot \sin \beta}$$

$$\tan \psi_i = \frac{\theta_{i\nu p} \cdot \cos \beta}{\theta_{vg} - \theta_{i\nu p} \cdot \sin \beta} = \frac{F_\nu \cdot \cos \beta}{1 - F_\nu \cdot \sin \beta}$$

2.2 Magnetska vodljivost

Slično je prikazana magnetska vodljivost po obodu, koja odstupa od konstante u slučaju zubi na statoru ili rotoru. Ona se sastoji od članova Fourierovog reda, koji miruju (utjecaj statora) i koji se kreću (utjecaj rotora)

$$\lambda_x = \sum_{\xi=0}^{\infty} \lambda_{2\xi} \cos 2\xi \frac{N}{2p} \left(\frac{\pi}{\tau_p} x - K\omega t \right)$$

Magnetska vodljivost je veza između okretnih polja protjecanja i okretnih polja indukcije.

2.3 Magnetska indukcija

Jakost indukcije u zračnom rasporu je, uz zanemaren napon željeza i uz zamašljene samo radijalne silnice, određena protjecanjem i dužinom raspora.

$$B_{x,t} = \lambda_x \cdot \Theta_{x,t}$$

Protjecanje je već zbog nesinusne raspodjele strujnog obloga prikazano sumom prostornih harmoničkih članova, zračni raspor nije konstantan, jer postoje utori na rotoru i na statoru, pa će se indukcija prikazati trostrukim beskonačnim redom.

$$B_{x,t} = \sum_{\xi=0}^{\infty} \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} \lambda_{2\xi} \Theta_{\nu\mu} \cos 2\xi \frac{N}{2p} \left(\frac{\pi}{\tau_p} x - K\omega t \right) \cdot \cos \left(\nu \frac{\pi}{\tau_p} x - \mu\omega t - \varphi_{\nu\mu} \right)$$

Uvodjenjem sume od $\mu = -\infty$ do $\mu = +\infty$ uzeti su u obzir članovi jednog i drugog smjera rotacije.

Rezultirajuća prostorna i vremenska raspodjela indukcije u zračnom rasporu predstavljena je tako beskonačnim redom okretnih polja magnetskih indukcija različitih amplituda, dužina vala, kutne brzine i smjera vrtnje.

2.4 Inducirana EMS

S odredjenim vrijednostima indukcije računaju se pripadni iznosi magnetskih

TOKOVA

$$f_v = B_v \cdot \frac{D \cdot l}{\rho \cdot \lambda} \cdot 10^{-6} [\text{Vs}]$$

Naprije se određuju inducirani naponi od okretnih polja indukcije dobivenih od statorskog protjecanja prema izrazu

$$E_{vu} = 4,44 \cdot \omega_g \cdot f_{nv} \cdot \alpha_g \cdot f_{nv}$$

gdje je ω_g broj zavoja, f_{nv} faktor namotazav -ti član a f_{vu} frekvencije valova indukcije.

2.5 Struje glavne, pomoćne faze i struje rotora

Nakon toga se mogu postaviti naponske jednadžbe za strujni krug glavne i pomoćne faze za osnovni harmonički član. Pomoću sustava linearnih jednadžbi se određuju takve struje glavne i pomoćne faze, koje zadovoljavaju naponske jednadžbe.

Omjerom srednjih protjecanja s utjecajem željeza i bez tog utjecaja korigira se dužina zračnog raspora. S povećanim zračnim rasporom se ponavlja cijeli proračun.

Pri tome se osim osnovnog harmoničkog člana struje rotora računaju i struje viših harmoničkih članova, inducirane EMS viših harmoničkih članova, koje se zbrajaju s induciranom EMS osnovnog člana, ako su njihove frekvencije jednake frekvenciji mreže.

Za sve struje kaveza takodjer se određuju električki gubici u kavezu.

Iz izračunanih induciranih EMS viših harmoničkih se određuju amplitude indukcije glavnog polja, te dalje gubici u željezu zbog histereze, vrtložnih struja, površinskih i pulzacioni.

2.6 Moment na osovini motora

Moment motora predstavlja srednju vrijednost trenutnih vrijednosti momenta.

Moment na osovini motora jednak je sumi razvijenog momenta motora M_{mv} i momenata viših harmoničkih komponenti $M_{dod v, se}$

Iz direktne i inverzne komponente snage okretnog polja

$$P_{okr,d,v} = \frac{P_{el,d,v}}{S_{d,v}} \quad i \quad P_{okr,i,v} = \frac{P_{el,i,v}}{S_{i,v}}$$

se određuje razvijen moment motora

$$M_{mv} = k_v (P_{okr,d,v} - P_{okr,i,v})$$

za svaki harmonički član prostornog reda v uz red vremenskog člana $\mu = 1$, to jest za svaki član koji je proizveden induciranim strujama rotora, koje svojim protjecanjem induciraju u statoru napon frekvencije jednake frekvenciji mreže. Nešto je zapaženiji utjecaj petog i sedmog člana na momentnu karakteristiku.

Dodatni gubici u željezu i bakru rotora te u željezu i bakru statora, koji su uzrokovani induciranim strujama viših harmoničkih komponenti indukcije različitih frekvencija od frekvencije mreže, ne mogu se zbog toga direktno kompenzirati elektromagnetskom snagom iz mreže.

Ti se gubici pokrivaju iz mehaničke snage motora, pa će se pripadni momenti viših harmoničkih odrediti pomoću stvarne kutne brzine $\omega_2 = \omega(1-s)$

Odredjujemo sume gubitaka

$$P_{dod,d,v,\alpha} = \sum_v P_{cu,z,d,v} + P_{ov,z,d,v} + P_{pul,z,d,v} + \sum_{\alpha} P_{cu,i,d,\alpha} + P_{ov,i,d,\alpha} + P_{pul,i,d,\alpha}$$

analogno za inverznu komponentu, te dalje i snage okretnih polja viših harmoničkih komponenti.

$P_{okr,dod,d,v,\alpha}$ u direktnom i $P_{okr,dod,i,v,\alpha}$ u inverznom smjeru.

Direktna komponenta ukupnog momenta viših harmoničkih

$$M_{dod,v,d} = k (P_{okr,dod,d,v,\alpha} \cdot s - P_{dod,d,v,\alpha})$$

i inverzna komponenta

$$M_{dod,v,i} = k (P_{okr,dod,i,v,\alpha} \cdot s - P_{dod,i,v,\alpha})$$

gdje je $k = \frac{10,2 p}{\omega(1-s)}$

Ukupni moment viših harmoničkih (utorskih i reakcija rotora) iznosi

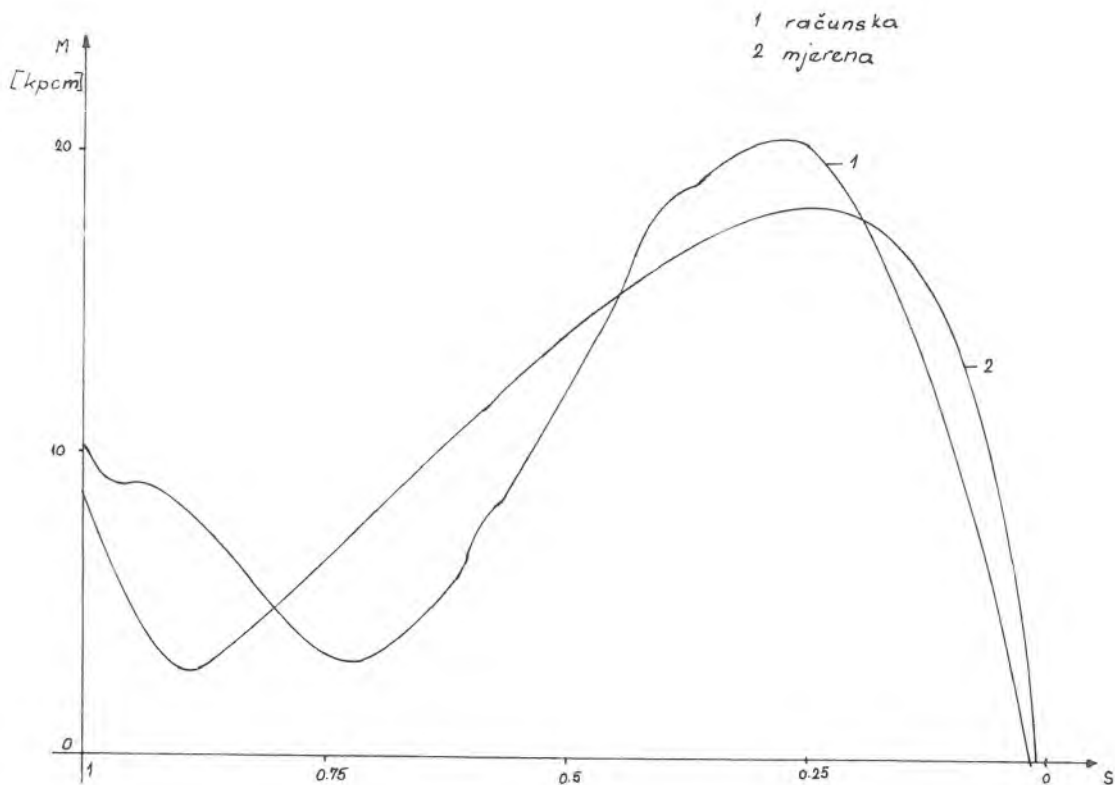
$$M_{dod,v} = M_{dod,v,d} - M_{dod,v,i}$$

Moment na osovini motora glasi: $M = M_{mv} + M_{dod'v}$

3. Usporedba momentne karakteristike računске i mjerene

Na sl. 2 je dan prikaz računске i mjerene karakteristike za motor s 24 utora na statoru.

Unatoc tome sto postoje odstupanja od mjerene karakteristike, proračun je ipak dao karakteristiku momenta, koja kvalitativno odgovara mjerenoj.



sl. 2

4. Zaključak

U radu se uzima da protjecanja glavne i pomoćne faze nisu sinusno raspodijeljena, te se osim osnovnog harmoničkog člana uzimaju i viši prostorni članovi.

Računa se s nekonstantnim zračnim rasporom, to jest s utorskim harmoničkim članovima. Povratno djelovanje rotora na stator, koje je uzrokovano nesinusnim raspodjelom protjecanja rotora, također se uzima u obzir.

Razlike u rezultatima proračuna i mjerenja se pojavljuju zbog određenih zanemarenja u računskom postupku.

Zanemaren je utjecaj zasićenja željeza na raspodjelu polja u rasporu, te utjecaj poprečnih struja, koje mogu bitno promijeniti karakteristike motora.

5. Literatura

1. Wolf R. : Utjecaj viših harmoničkih članova na rad jednofaznih asinhronih motora
- Predstudija
- Elaborat RK E 3227o
2. Taegen F. : Zusatzverluste von Asynchron maschinen (članak)
ACTA TECHNICA ČSAV
3. Jordan H,
Taegen F.: Messung der Zusatzverluste von Asynchron maschinen (članak) ETZ-a (196
4. Wolf R.: Podloge programa za proračun jednofaznih kondenzatorskih asinhronih motora
Elaborat RK E 32118
5. Pustola Sliwinski : Kleine Einphasemotoren
6. Šantak M. : Utjecaj viših harmoničkih komponenti polja na karakteristike jednofaznog asinhronog motora , Magistarski rad 1975.

Dr ing. Stjepan Štefanko
Elektrotehnički institut
"Rade Končar" - Zagreb

PRILIKE U ZONI ZRAČNOG RASPORA I NJIHOV UTJECAJ NA BILANCU SNAGA U ASINHRONOM STROJU

Uz zonu zračnog raspora vezana je pretvorba energije u električnim strojevima, pa sve analize rada strojeva polaze od polja u zračnom rasporu. Kod asinhronih strojeva, s relativno malim zračnim rasporom, istaknute su parazitne pojave: dodatni gubici, buka i vibracije. Njih uzrokuju nazubljenost statora i rotora, zasićenje željeza i ekscentrični položaj rotora u statoru. Parazitne pojave mogu i onemogućiti rad stroja, te je kod asinhronog stroja pored osnovnog harmonika s p pari polova potrebno poznavati i ostale harmonike polja u zračnom rasporu. U referatu je opisan pristup određivanja polja u zračnom rasporu, koji omogućuje uvid u složenu bilansu snaga asinhronog stroja.

CONDITIONS IN THE AIR-GAP AND THEIR INFLUENCE ON THE POWER BALANCE OF THE INDUCTION MACHINE

The electromechanical conversion of energy in electrical machines is related to the air-gap region and analyses of the principle of operation start, therefore, with the air-gap fields. Undesirable phenomena such as stray losses, magnetic noise and vibrations are emphasized in induction machines with relatively short air-gaps. These are caused by the stator and rotor slotting, magnetic saturation in the iron and the eccentricity of the air-gap. Undesirable phenomena can also prevent normal operation of the induction machine, so that the other harmonic fields in the air-gap, besides the fundamental one, have to be known. An approach is described to the determination of the air-gap fields, which provides an insight into the complex balance of power of the induction machine.

1. Uvod

Visoko iskorištenje materijala u suvremenim strojevima zahtijeva točno poznavanje procesa koji se u njima odvijaju. Ekonomika gradnje i korištenja asinhronih motora vodi na sve manje zračne raspore. Uz manji zračni raspor jače su istaknute i parazitne pojave u stroju: dodatni gubici, buka i vibracije. Njih uzrokuju nazubljenost statora i rotora, zasićenje glavnog i rasipnih magnetskih puteva te ekscentričnost zračnog raspora. Da bi se te neželjene pojave mogle suzbiti ili bar smanjiti, potrebno je poznavati mehanizam njihova nastajanja i raspolagati s odgovarajućim metodama mjerenja i proračuna.

Proračun asinhronog motora razvijao se u dva smjera. Kod prvog načina utjecaji (npr. utjecaj zasićenja željeza) istraživani su zasebno. Nepremostive matematičke teškoće kod analitičkog rješavanja ukupnog polja u stroju uvjetovale su pristup proračunu polja po zonama (zona jarma, zona zubi i zračnog raspora). Od posebnog je značaja zona zračnog raspora, jer je u njoj sadržan pretežni dio energije magnetskog polja stroja, koja sudjeluje u elektromehaničkoj pretvorbi energije.

Zasebno istraživanje pojedinačnih utjecaja (npr. zasićenja, utjecaja otvora utora) pretpostavlja linearne odnose u električnom stroju, odnosno mogućnost primjene principa superpozicije, što nije ispunjeno. Nadalje, razdioba proračuna polja na pojedine zone zahtijeva dovoljno točno definiranje graničnih uvjeta za svako područje zasebno, što ponekad nije moguće. Posebno je taj problem

izražen kod proračuna viših harmonika /npr. definiranja efektivne širine zuba uz zračni raspor za proračun gubitaka u željezu/.

Međutim, takav način istraživanja ima određene prednosti. On omogućuje upoznavanje mehanizma nastajanja pojedinih pojava, što dopušta predviđanje rezultata svakog pojedinog zahvata u projektu stroja.

Drugi pristup proračuna polja je direktno rješavanje jednadžbi elektromagnetskog polja za cijeli stroj metodama numeričke matematike pomoću digitalnih kompjutera. Za sada takvim proračunima nisu obuhvaćene vrtložne struje u željezu, koje je nužno uzeti u obzir kod proračuna parazitnih pojava.

Zato se i analiza parazitnih pojava temelji na istraživanju pojedinačnih utjecaja.

2. Raspodjela indukcije u zračnom rasporu

Za polje u zračnom rasporu pretpostavlja se da je jednodimenzionalno, jer je duljina zračnog raspora mala u odnosu na provrt stroja. Ta pretpostavka omogućuje primjenu Fourierove analize. Indukcija u zračnom rasporu određuje se uz poznatu vodljivost i magnetski napon po jednadžbi:

$$(1) \quad b(x,t) = \lambda(x,t) \cdot v(x,t)$$

Izraz (1) dobije se primjenom I Maxwellove jednadžbe na zatvorenu krivulju, koja prolazi zračnim rasporom i obuhvaća namote stroja, uz pretpostavku da ne postoji unipolarni tok u stroju.

Vodljivost zračnog raspora je zbog vrtnje rotora, funkcije kuta x i funkcija vremena t . Prema [1] možemo je prikazati kao sumu konstantnog člana i valova vodljivosti:

$$(2) \quad \lambda(x,t) = \Lambda_0 \left\{ 1 + 2 \sum_k c_k \cos(p_{Lk} x - \omega_{Lk} t - \varphi_{Lk}) \right\},$$

gdje je:

Λ_0	srednja vodljivost zračnog raspora,
$2c_k$	relativna amplituda vala vodljivosti zračnog raspora,
ω_{Lk}	kružna frekvencija vala vodljivosti zračnog raspora,
φ_{Lk}	fazni kut vala vodljivosti zračnog raspora.

Kod proračuna asinhronog stroja preko elemenata nadomjesne sheme za osnovni harmonik [2] uzima se samo konstantni član vodljivosti zračnog raspora Λ_0 . Utjecaj otvora utora uzima se kod takvog načina proračuna samo preko Carter-ovog faktora kao povećanje geometrijskog zračnog raspora δ . Jednako se postupa i s utjecajem zasićenja glavnog magnetskog puta [3].

Za proračun motora u području većih klizanja, a osobito u području kočnog rada, račun s osnovnim harmonikom kao jedinim nosiocem pretvorbe energije ne zadovoljava, pa je najprije uzeta u obzir reakcija rotora na više harmonike statorskog protjecanja [1,2,4], a kasnije i reakcija statora na više harmonike rotorskog protjecanja [3,5,6].

Djelovanjem namotnih harmonika indukcije nisu se mogla objasniti sva opažanja dobivena mjerenjima u pogledu asinhronih i sinhronih sedla u momentnoj karakteristici, dodatnih gubitaka, buke i vibracija, pa su u obzir uzimani i harmonici indukcije, koji prema (1) nastaju djelovanjem protjecanja i valova vodljivosti zračnog raspora.

U tu svrhu bilo je potrebno što točnije odrediti funkciju vodljivosti zračnog raspora.

Analitički proračun valova vodljivosti, uzrokovanih otvorima utora, temelji se na metodi koju je dao F.W.Carter. To je model otvorenog, beskonačno dubokog utora bez struje i beskonačno širokih zubi. Takav model zadovoljava i kod proračuna vodljivosti

jednostrano nazubljenog zračnog rasporeda s konačnom dubinom utora i širinom zuba uz dodatne pretpostavke: da je omjer utorskog koraka prema širini zračnog rasporeda dovoljno velik tako da deformacija polja pod jednim utorom nema utjecaja na polje pod susjednim utorom, te da je dubina utora za više od 60% veća od širine utora. Navedene dodatne pretpostavke su redovito ispunjene kod suvremenih asinhronih strojeva.

Proračun valova vodljivosti kod dvostranog nazubljenja prema [1] temelji se na istom modelu, a izveden je pod pretpostavkom da deformacija polja uslijed statorskih utora ne utječe na deformaciju polja uslijed rotorskih utora. Zbog malog zračnog rasporeda kod suvremenih asinhronih motora, ta pretpostavka u većini slučajeva nije ispunjena.

Točniji proračun polja za dvostrano nazubljeni zračni raspored i Fourier-ova analiza vodljivosti provedeni su u [7] odnosno [8]. U tu svrhu je rješavano dvodimenzionalno polje u zračnom rasporedu, a nadomjesna vodljivost zračnog rasporeda definirana je ukupnim tokom po jedinici površine kroz srednju površinu zračnog rasporeda, uz jedinični magnetski napon između statorskog i rotorskog paketa.

Određivanje valova vodljivosti uslijed zasićenja glavnog magnetskog puta istraženo je u [9].

Za svaki od pojedinačnih utjecaja /otvori utora, zasićenje i ekscentricitet/ mogu se odrediti valovi vodljivosti. Množenje valova vodljivosti s uzбудom prema (1) daje odgovarajuće harmonike indukcije u zračnom rasporedu. Za razliku od namotnih harmonika, koji nastaju djelovanjem protjecanja na glatki zračni raspored, harmonici, nastali djelovanjem uzbude na valove vodljivosti, prozvani su u [10] parametarski uzbuđeni valovi indukcije.

Za točan proračun indukcije prema jednadžbi (1) potrebno je

pored protjecanja uzbudnog namota uzeti u obzir i reakcije ostalih namota u stroju. Pri tome se misli i na statorski i rotorski paket limova, koji znatno prigušuju polja visokih frekvencija.

3. Naponske jednadžbe i bilanca snaga

Dva namota uz konstantnu vodljivost zračnog rasporeda mogu biti magnetski povezana jedino ako su "namotani" za isti polaritet. Promjenljiva vodljivost zračnog rasporeda omogućava i vezu dvaju namota različitog polariteta. Takve veze nazivaju se parametarskim, jer se javljaju kod parametarski uzbuđenih harmonika.

Uzme li se u obzir da realni namoti električnih strojeva pored protjecanja osnovnog harmonika /za koji su namotani/ stvaraju i više harmonike protjecanja, uz višestrukosti parametarskih veza između pojedinih namota /a i unutar jednog namota/, dolazi se do nerazmrsivo složenih odnosa.

Zato je u [11] uvedeno ograničenje da jedan namot stvara samo jedan harmonik protjecanja /za koji je namot "namotan"/, odnosno da samo harmonik indukcije s istim brojem pari polova može u njemu inducirati napon.

Uz navedene pretpostavke promatrane su veze "n" simetričnih višefaznih namota, koji stvaraju protjecanje

$$(3) \quad v(x,t) = r \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{p_i} \cos(p_i x - \omega_i t - \varphi_i),$$

preko "m" valova vodljivosti prema jedn. (2). Izvedene su naponske jednadžbe i provedena je bilanca snaga.

Na temelju općenito izvedenih jednadžbi u [11] je primjerice riješen slučaj dvostranog nazubljenja. Napisane su naponske jednadžbe, analizirana je bilanca snaga i nacrtana nadomjesna shema, koja pored elemenata za osnovni harmonik polja u zračnom rasporu sadrži i elemente koji su posljedica dvostranog nazub-

ljenja. Na ovom mjestu treba napomenuti da takvo rješenje predstavlja tek korak k točnijem proračunu asinhronog stroja, jer su u skladu s navedenim pretpostavkama promatrani samo parametarski uzbuđeni harmonici indukcije, a zanemareni su namotni harmonici /osim osnovnog/. Bilanca snage pokazuje da je i kod parametarski uzbuđenih utorskih harmonika ključ cijepanja snage klizanje, dakle isti kao i kod namotnih harmonika.

Opće jednadžbe u [11] obuhvaćaju i parcijalno promatranje utjecaja zasićenja u [10]. Provedene bilance energije u [10] i [11] ukazuju na dosad nepoznate tokove energije u asinhronim strojevima. Tako se npr. dio gubitaka u željezu statora uslijed zasićenja pokriva direktno iz mreže, a dio iz mehaničke snage na osovini stroja. Isto tako se dio visokofrekventnih gubitaka u statorskom paketu, uzrokovanih nazubljenjem rotora, pokriva direktno iz mreže.

4. Zaključak

Opisani pristup određivanja indukcije u zračnom rasporu, u svrhu proračuna parazitnih pojava u asinhronom stroju, pokazuje da se već kod istraživanja pojedinačnog utjecaja nazubljenja dolazi do vrlo složenih veza između pojedinih namota. Za sada je moguć samo odvojeni proračun djelovanja namotnih utorskih harmonika i parametarski uzbuđenih utorskih harmonika, premda oni imaju isti broj pari polova i istu kružnu frekvenciju. Teškoće nastaju zbog različitog mehanizma njihova nastajanja. Međutim, povećani zahtjevi na točnost proračuna parazitnih pojava u asinhronom stroju zahtijevaju i rješenje tog složenog problema.

Literatura

1. Heller, B., V. Hamata: "Pridavna pole, sily a straty v asynchronim stroji". Nakladatelstvi Československe akademie ved Praha 1961.
2. Richter, R.: "Elektrische Maschinen". Bd. IV Springer Verlag, Berlin 1936.
3. Alger, P. L.: "Induction Machines". Gordon and Breach, Second Edition, 1970.
4. Odok, A.: "Stray-Load Losses and Stray Torques in Induction Machines". Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs., 1958, Pt II, S. 43-53.
5. Oberretl, K.: "Die Oberfelder theorie des Käfigsmotors unter Berücksichtigung der durch die Ankerrückwirkung verursachten Statoroberströme und der parallelen Wicklungs zweige". Arch. f. Elektrotechn. Bd. 49, 1965, S. 343-364.
6. Jordan, H., W. Raube: "Zum Problem der Zusatzverluste in Drehstrom-Asynchronmotoren", ETZ-A, Bd. 93, 1972, H. 10 S. 541-545.
7. Haznadar, Z., J. Matjan: "Linearna analiza polja u zračnom rasporu u rotacionim električnim strojevima", br. 3, 1969.
8. Hot, K.: "Analiza magnetske vodljivosti u zračnom rasporu asinhronog stroja". Magistarski rad ETF, Zagreb, 1972.
9. Purkemani, M.: "Beitrag zur Erfassung der Sättigungsoberfelder in Drehstromasynchronmaschinen". Disertacija, TU Hannover 1971.

10. Jordan, H., Klima, V., Raube, W., Röder, G.:
"Über parametrische erzeugte Oberfelder".
ETZ-A, Bd. 82, 1971, S. 451-455.
11. Stefanko, J.: "Beitrag zur Klärung der parametrischen
Vorgänge in Drehstromasynchronmaschinen und ihre
Anwendung auf die NutungsOberfelder".
Disertacija, TU Hannover, 1974.

Bogdan Zelenko

Poduzeće "Rade Končar"

OOOUR Elektrotehnički institut

PRORAČUN MAGNETSKOG POLJA U JARMU ROTACIONOG STROJA

Rupe za hladjenje u jarmu rotacionog stroja povećavaju potreban magnetski napon, a taj se uobičajenim računom ne da uvijek dovoljno točno odrediti. Zato se prešlo na određivanje magnetskog polja u jarmu. Područje je dvodimenzionalno, i to sektor kružnog vijenca, a polje i magnetski napon se određuju numeričkom metodom uz pomoć digitalnog kompjutera. Nakon određivanja magnetskog polja može se nastaviti s određivanjem toplinskog polja za isti dio.

U primjeni su dobiveni rezultati koji su u većem skladu s mjerenjima od onih koji su dobiveni uobičajenim približnim računom.

MAGNETIC FIELD COMPUTATION FOR THE ROTATING MACHINE CORE BACK

Holes in the rotating machine core back improve cooling but increase the m.m.f. which cannot always be determined with sufficient accuracy by the usual approximate calculation. Therefore, we have determined the magnetic field for the core back by the numerical method. The two-dimensional area is a sector of an annulus, and the field and the m.m.f. are determined by means of a digital computer. When the magnetic field is determined we can continue with the computation of the temperature field for the core back.

The application of the described method gives results which are in better accordance with the measurements than those obtained by usual calculations.

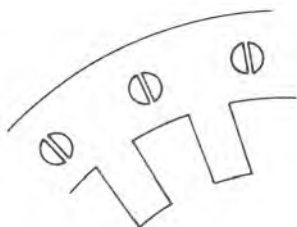
1. UVOD

Kod proračuna električkih rotacionih strojeva važno je da se odredi potreban magnetski napon i toplinski gubici. Obje veličine su u vezi s indukcijama koje se pojavljuju u pojedinim dijelovima stroja. Budući da je određivanje razdiobe indukcije težak zadatak, većinom se zadovoljavamo time da se odrede neke prosječne indukcije. U nepravilnijim slučajevima se takve "prosječne" indukcije ne mogu dovoljno točno izračunati pomoću rutinskih jednostavnih računa, nego se magnetsko polje mora točnije odrediti. Posljednjih petnaestak godina razvile su se razne numeričke metode za određivanje magnetskog polja uz primjenu digitalnih kompjutera. Ispočetka su se takvi računi odnosili na dvodimenzionalna područja uz upotrebu metode konačnih diferencija, a područje koje se promatralo, bilo je pravokutno s pravokutnom mrežom. Numeričkim metodama izračunavali su se magnetski potencijali u čvorovima mreže. Kasnije se prešlo na područja i mreže drugih oblika, a upotrebljavale su se metode konačnih diferencija i konačnih elemenata. U novije doba promatraju se i trodimenzionalna područja, ali pojedina metoda ne rješava opći slučaj, nego se posebni problemi rješavaju metodama koje su prikladne po fizikalnom sadržaju, matematički i numerički.

U ovom će se radu prikazati metoda numeričkog određivanja dvodimenzionalnog polja na području koje je sektor kružnog vijenca.

Takvo polje se vrlo dobro može primijeniti na pojedine dijelove rotacionih strojeva, ako se promatra srednji presjek stroja ravninom, koja je okomita na os stroja.

Zbog boljeg hladjenja stroja mogu se u jarmu statora ili rotora izbušiti rupe



Slika 1. Skica jarma
s rupama hladjenje

kroz koje struji zrak (sl. 1). Uz nepromijenjeni tok jarma time se povećava magnetski napon jarma, a taj se može odrediti pomoću približne formule. Međutim, ako su rupe velike s obzirom na visinu jarma, i u slučaju da na pojedinim mjestima u jarmu dolazi do jačeg zasićenja, približne formule daju drugačije rezultate od onih koji se dobivaju rješavanjem magnetskog polja u jarmu. Dakako da u slučaju rješavanja polja trebaju biti poznati

osnovni prostorni harmonički član toka i još bar treći harmonički član.

Viši harmonički članovi toka mogu djelovati bitno na rezultat u slučajevima kad je željezo uz rupe za hladjenje jako zasićeno.

Magnetsko se polje određuje numeričkim metodama koje zahtijevaju vrlo mnogo računanja, pa se za određivanje polja moraju upotrijebiti digitalni kompjuteri.

Povećanje indukcije uzrokuje i povećanje gubitaka. Tako se dolazi do pitanja kako konačno djeluju rupe na hladjenje stroja. Zbog toga treba odrediti i toplinsko polje u jarmu. Fizikalno gledano, toplinsko je polje jednostavnije od magnetskog jer je približno linearno, dok je magnetsko polje nelinearno zbog nelinearnog svojstva magnetskih materijala. Na prvi se pogled čini da se istim proračunom može riješiti i magnetsko i toplinsko polje. Međutim, pokazalo se da za proračun toplinskog polja treba za kompjuter sastaviti drugi program budući da se kod jednog računa traže bitno drugačiji rezultati nego kod drugog. Naime, kod magnetskog se proračuna traže magnetski napon za polni korak i srednji gubici u pojedinim malim dijelovima jarma, dok se kod toplinskog proračuna traži npr. toplinska snaga koja se odvodi kroz rupe za hladjenje uz zadanu temperaturu zraka za hladjenje. Prilike u oba slučaja nisu međusobno potpuno analogne, pa se nakon programa za magnetski proračun morao sastaviti drugačiji program za toplinski proračun.

2. OPIS METODE PRORAČUNA

Diferencijalna jednačba za magnetski potencijal A dvodimenzionalnog polja glasi:

$$\frac{\partial(\nu \frac{\partial A}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\nu \frac{\partial A}{\partial y})}{\partial y} = -\Gamma, \quad (1)$$

gdje je: $A = A(x, y)$ magnetski potencijal

$\nu = \nu(B, x, y)$ reluktancija: $H = \nu B$,

$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$ indukcija s komponentama:

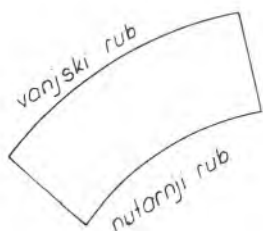
$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} :$$

$\Gamma = \Gamma(x, y)$ gustoća struje

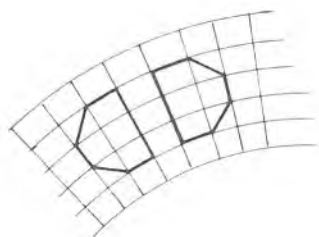
U polarnom koordinatnom sustavu ta jednačba prelazi u

$$\frac{\partial(r \cdot \frac{\partial A}{\partial r})}{\partial r} + \frac{\partial(\frac{r}{r} \cdot \frac{\partial A}{\partial \varphi})}{\partial \varphi} = -r \cdot \Gamma. \quad (2)$$

Područje koje se promatra, skicirano je na slici 2. Magnetski potencijal A se zadaje na nutarnjem i vanjskom rubu, dok je na ravnim dijelovima ili A zadan



Slika 2. Područje koje je sektor kružnog vijenca



Slika 3. Područje prekriveno mrežom

ili postoje pravilnosti koje su unaprijed poznate: periodičnost nakon jednog polnog koraka, okomitost silnica na jedan rub ili slično.

Unutar područja zadaje se konfiguracija tako da se područje prekrije mrežom kružnih lukova i pravaca (sl. 3). Tako nastaju pravokutni dijelovi, od kojih se svaki može posebno razdijeliti na dva dijela lukom Arhimedove spirale. U tim dijelovima se mogu posebno zadavati magnetska svojstva materijala.

Jednačbe (1) ili (2) mogu se rješavati na razne načine. Mi smo odabrali metodu koja je fizikalno jasna i svakom inženjeru prihvatljiva, a koja se neposredno ne osniva na tim jednačbama. Ako je potencijal A određen u svakom čvoru mreže, ona se može bilinearно interpolirati u malom području mreže pomoću potencijala u čvorovima

na rubu tog područja :

$$A = a + b \cdot r + c \cdot \varphi + d \cdot r \cdot \varphi. \quad (3)$$

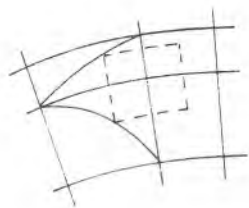
U slučaju da je četverokutno područje razdijeljeno lukom spirale na dva trokutna dijela, za svaki takav dio vrijedi odgovarajuća formula (3) uz $d = 0$.

Za svaki čvor mreže primjenjuje se formula

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I. \quad (4)$$

Tu je $\vec{H}$ jakost magnetskog polja, integrira se po luku koji ide po sredinama susjednih dijelova, a I je struja koja je obuhvaćena tim lukom (sl. 4). Zbog

toga što su lukovi Arhimedove spirale, krivulja preko koje se integrira, ima vrhove baš na tim spiralama.



Slika 4. Skica uz formulu (4)

Pomoću izraza (4) dobiva se za svaki čvor po jedna jednačba koja veže do 9 nepoznatih vrijednosti od A u susjednim čvorovima. Broj jednačbi jednak je broju čvorova, a u praksi iznosi oko 1000. Te se jednačbe rješavaju iterativnim postupkom. One su zapravo nelinearne budući da još nepoznate reluktancije ν ovise od B , dakle i od A . Nakon svake iteracije u kojoj se ν smatra

konstantnim i zadanim, korigiraju se iznosi ν , ali ne na novi iznos ν_N koji bi pripadao fiktivnoj računskoj vrijednosti od B nakon pojedine iteracije, nego se reluktancija korigira od stare vrijednosti ν_S na vrijednost $\nu_S + (\nu_N - \nu_S) / F$, gdje je F npr. 20, faktor "podrelaksacije".

Dobivene se jednačbe nešto razlikuju od onih koje bi se dobile metodom konačnih elemenata, kod koje se u račun uzimaju sve vrijednosti od H unutar pojedinih dijelova, a ne samo one koje pripadaju točkama na krivulji preko koje se integrira (sl. 4). Odlučili smo se za metodu prema (4) zato jer je lako shvatljiva i lako se provjerava. Ovo je važno zato jer svaka približna metoda vodi do odstupanja rezultata od točnog rješenja. Povoljnije je ako se za takvo odstupanje može jednostavno provjeriti da je posljedica odabrane metode, a nije sistematska pogreška (pogreška programa).

Osim toga, konačni cilj čitavog računa je određivanje magnetskog napona, a taj će se određivati za krivulje koje su sastavljene od lukova po sredinama dijelova mreže (sl. 4). Zbog toga što će jednačbe, koje se dobivaju iz (4) i (3) uz

$H = \nabla B$, iterativnim postupkom biti približno riješene, računanjem magnetskog napona preko raznih lukova moći će se provjeriti, da li je postupak dao dovoljno točan rezultat.

Prema tome, kad bi se našlo točno rješenje jednadžbi prema (4), magnetski naponi duž dva različita luka morali bi se razlikovati za iznos struje koja je obuhvaćena tim lukovima. U slučaju jarma bi, dakle, takva dva napona duž lukova s istim krajnjim točkama trebala biti jednaka. Kod numerički točnog rješenja, uz upotrebu metode konačnih elemenata, takva dva napona bi bila samo približno jednaka. Budući da se problem rješava iterativno, a te se iteracije prekidaju nakon konačno mnogo koraka, to metoda prema (4) omogućuje da račun raznih magnetskih napona odmah daje uvid u "konvergenciju" iterativnog postupka.

Ako je nemagnetski materijal unutar područja okružen magnetskim, onda iterativni postupak sporo konvergira [3]. Zato se rupe moraju posebno zaokružiti krivuljama (sl. 5) na koje se opet primjenjuje formula (4) i



Slika 5. Zaokruživanje rupe krivuljom zbog zajedničke korekcije potencijala unutar krivulje

to tako da se svi potencijali unutar tih krivulja zajedno korigiraju istim iznosom.

Na taj način čitav iterativni proces razmjerno brzo konvergira. Nakon izračunavanja potencijala u čvorovima određuje se magnetski napon

$$\theta = \int_{(k)} \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (5)$$

za krivulje (k) koje prolaze sredinama dijelova mreže.

Na kraju računa se određuju srednji toplinski gubici za pojedine dijelove mreže.

3. PRIMJENA PRORACUNA

Magnetski napon za jaram s rupama (sl. 1) može se odrediti uobičajenim približnim računom i usporediti taj rezultat s rezultatom koji je dobiven opisanim proračunom. Često puta su odstupanja tih dvaju rezultata znatna, pa

približni račun daje neki puta i preko dva puta manje, neki puta dva puta veće iznose magnetskog napona.

U jednom primjeru izvedenog motora dobila se struja praznog hoda znatno veća od proračunate. Međutim, kad je motor bio priključen na nešto niži električki napon, struja se znatno smanjila.

to je kvalitativno u skladu s proračunom na način koji je ovdje opisan, jer je pomoću njega izračunano da je uz 5% manji tok opao magnetski napon jarma čak za 30%. Ovakve velike razlike magnetskog napona nastaju zbog jakog zasićenja željeza na sinanjenom presjeku uz rupe za hladjenje.

Na ukupni magnetski napon ovakva razlika od 30% magnetskog napona jarma djeluje manje. Citav proračun uz rezultate koji su dobiveni opisanom metodom, bolje se poklapa s mjerenjima nego uz upotrebu uobičajenog približnog računa za magnetski napon s rupama.

Nakon određivanja magnetskog polja jarma može se nastaviti račun time da se odredi toplinsko polje jarma. Ovo je važno zato da se utvrdi koliko su rupe za hladjenje korisne toplinski, budući da se zbog rupa povećavaju gubici u jarmu i time se smanjuje odvođenje topline kroz jaram. Proračun toplinskog polja sastavljen je sličnom metodom kao proračun magnetskog polja: kroz neku zatvorenu površinu u jarmu struji toplinska snaga koja se stvara unutar te površine. To pravilo je vrlo slično onom koje je sadržano u formuli (4). Ipak, sam program za kompjuter je sastavljen sasvim drugačije nego program za magnetsko polje. Naime, kod toplinskog proračuna sa zrakom za hladjenje pojavljuje se računanje sa "zračnim filmom", a analogni pojam kod magnetskog polja ne postoji. Rezultati toplinskog proračuna pokazuju da je upotreba rupa za hladjenje toplinski znatno povoljnija nego upotreba jarma bez rupa.

4. ZAKLJUČAK

U ovom se članku ukratko prikazuje numerička metoda za proračun dvodimenzionalno magnetskog polja na sektoru kružnog vijenca.

Takvo je područje naročito prikladno za polja u rotacionim strojevima. Zbog mogućnosti diobe područja na trokutaste dijelove, magnetska konfiguracija se može vrlo dobro prikazati.

Računanje se osniva na fizikalnom zakonu o magnetskom naponu i struji. Ovo je naročito povoljno zbog toga što je baš ukupni magnetski napon izmedju dviju točaka glavni rezultat proračuna.

Na magnetski se proračun može nadovezati proračun toplinskog polja, koji se takodjer osniva na jednostavnom fizikalnom zakonu.

Pokazalo se da iznos magnetskog napona jarma koji je izračunan na ovdje opisani način, daje rezultate koji se slažu s izmjerenim veličinama više nego uobičajeni približni proračun iznosa magnetskog napona. Toplinski proračun je opravdavao primjenu rupa za hladjenje.

L i t e r a t u r a

- [1] Ahmed S.V., Erdelyi E.A.: Nonlinear theory of Salient Pole Machines - IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS 85, (61 - 70), January 1966.
- [2] Mandić, I.: Izrada programa za proračun magnetskog polja u zoni zuba za digitalno računalo C 90 - 40, elaborat E 32052, Elektrotehnički institut poduzeća "R.Končar", 1967.
- [3] de la Vallée-Poussin P., Lion A.: Calcul itératif de l' induction magnetique dans les machines électriques, Revue générale de l' électricité, (731-739), avril 1967.
- [4] Zelenko B.: Proračun utjecaja rupa za hladjenje u jarmu statora na magnetski napon jarma, za motor 4 AH 500 M-4, elaborat E..39. poduzeće "R.Končar", Elektrotehnički institut, 1974.
- [5] Zelenko B.: Proračun odvodjenja topline u jarmu motora 4 AH 500 M-4 elaborat E 214, poduzeće "R.Končar", Elektrotehnički institut, 1975.