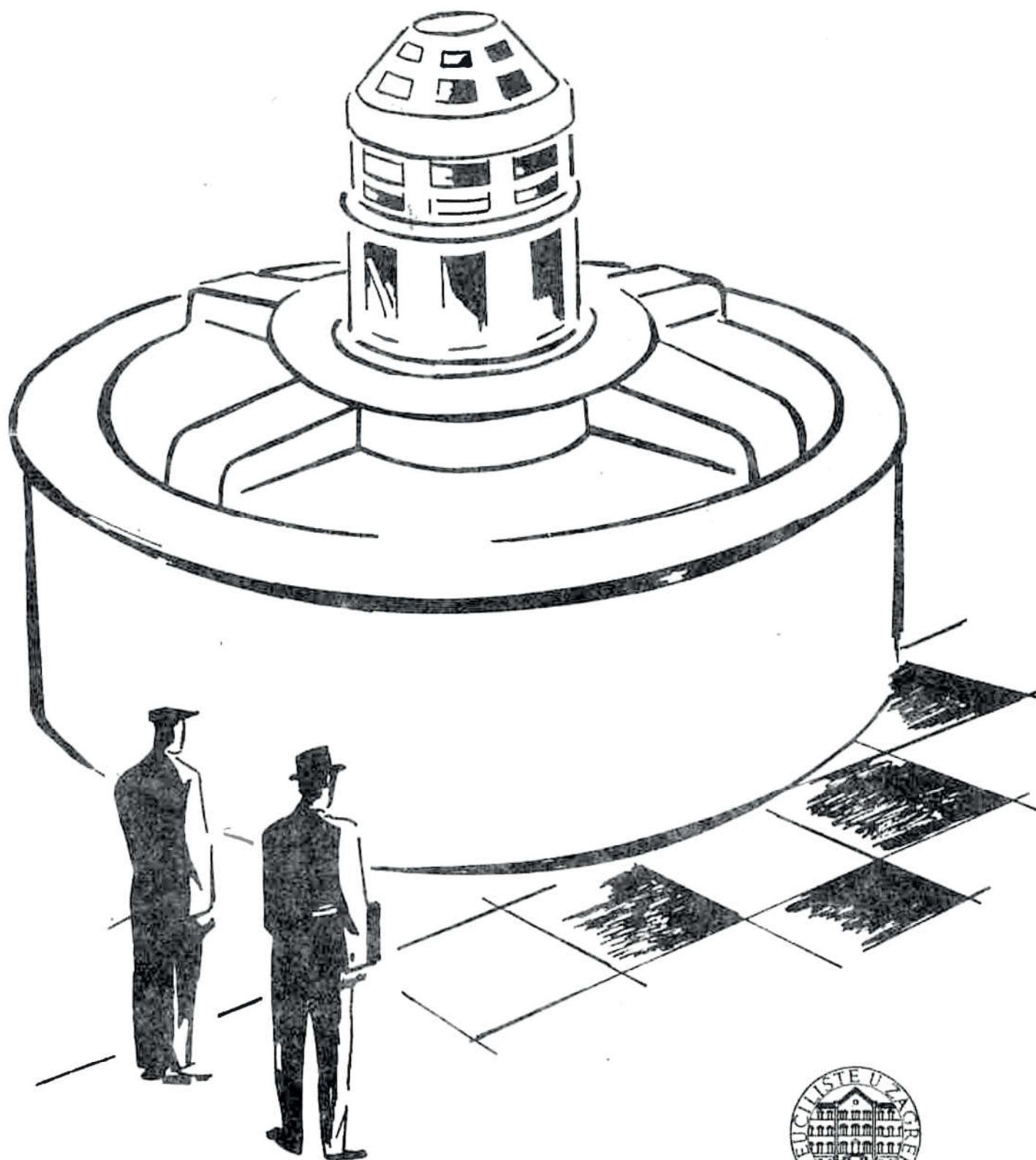


SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Prof. dr h.c., Anton Dolenc

SINHRONI STROJEVI



Zagreb, 1976.

Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu
Manualia Universitatis studiorum Zagrabienis

Odobrenje Odbora za izdavačku djelatnost Skupštine Sveučilišta
Broj 02-1489/1 od 18. 11. 1976.

Cijena za studente Sveučilišta u Zagrebu
Din 42

Tisak: Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, Trg maršala Tita 14
Broj 605/SL

S I N H R O N I S T R O J E V I

1. UVOD

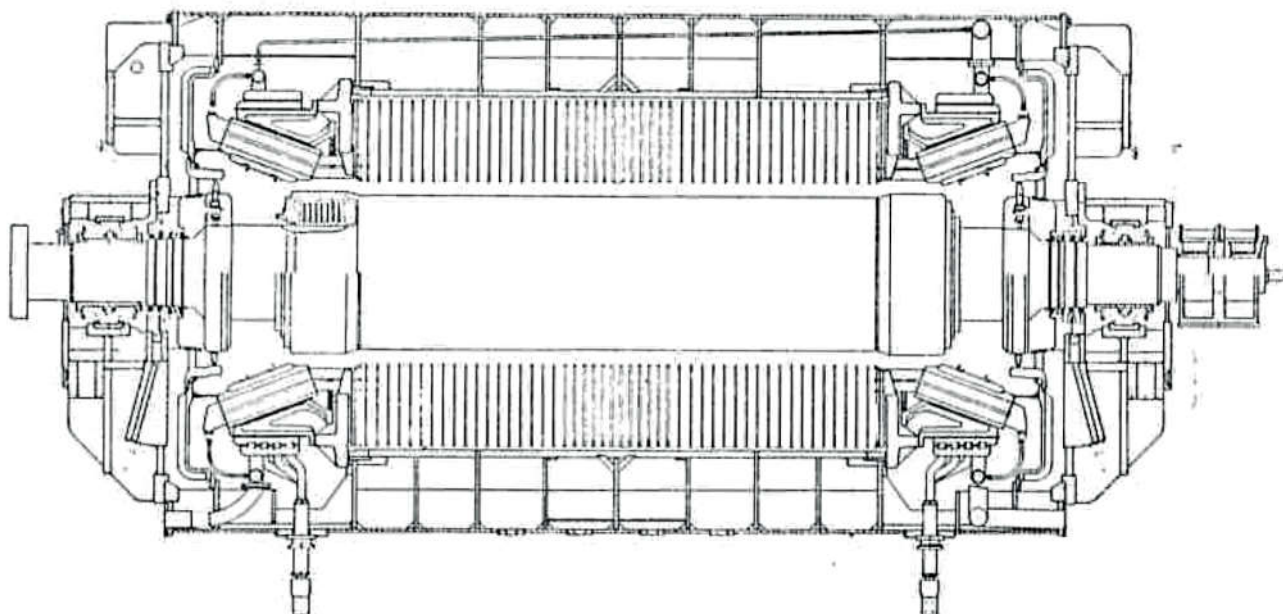
1.1. Općenito

Sinhroni stroj može raditi:

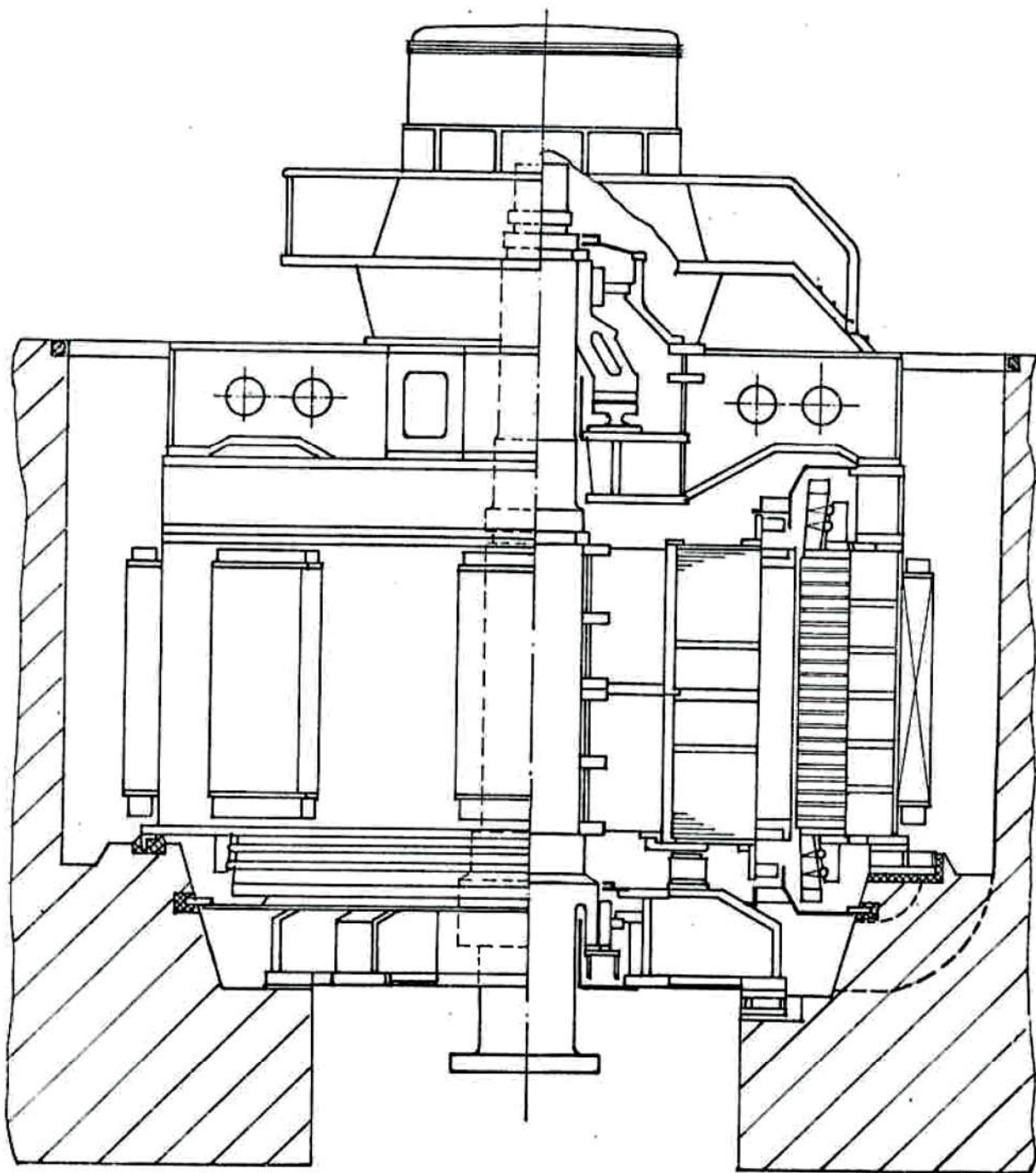
- a) Kao pretvarač mehaničke energije u električnu; u tom slučaju ga zovemo sinhroni generator, jer predstavlja direktan izvor električne energije.
- b) Kao pretvarač električne energije u mehaničku; u ovom slučaju ga zovemo sinhroni motor.

U velikoj većini slučajeva sinhroni stroj se gradi kao generator. On predstavlja danas još uvijek skoro jedini izvor električne energije (samo iznimno, vrlo rijetko, se upotrebljava asinhroni generator) za mreže izmjenične struje.

Razvojem tehnike rastu mreže, raste njihova snaga, pa zato raste i snaga sinhronog generatora. Ona danas dostiže već snagu od 1500000 kVA, a smatra se za budućnost mogućom i gradnja generatora za snagu od 6 milijuna kVA u jednoj jedinici.

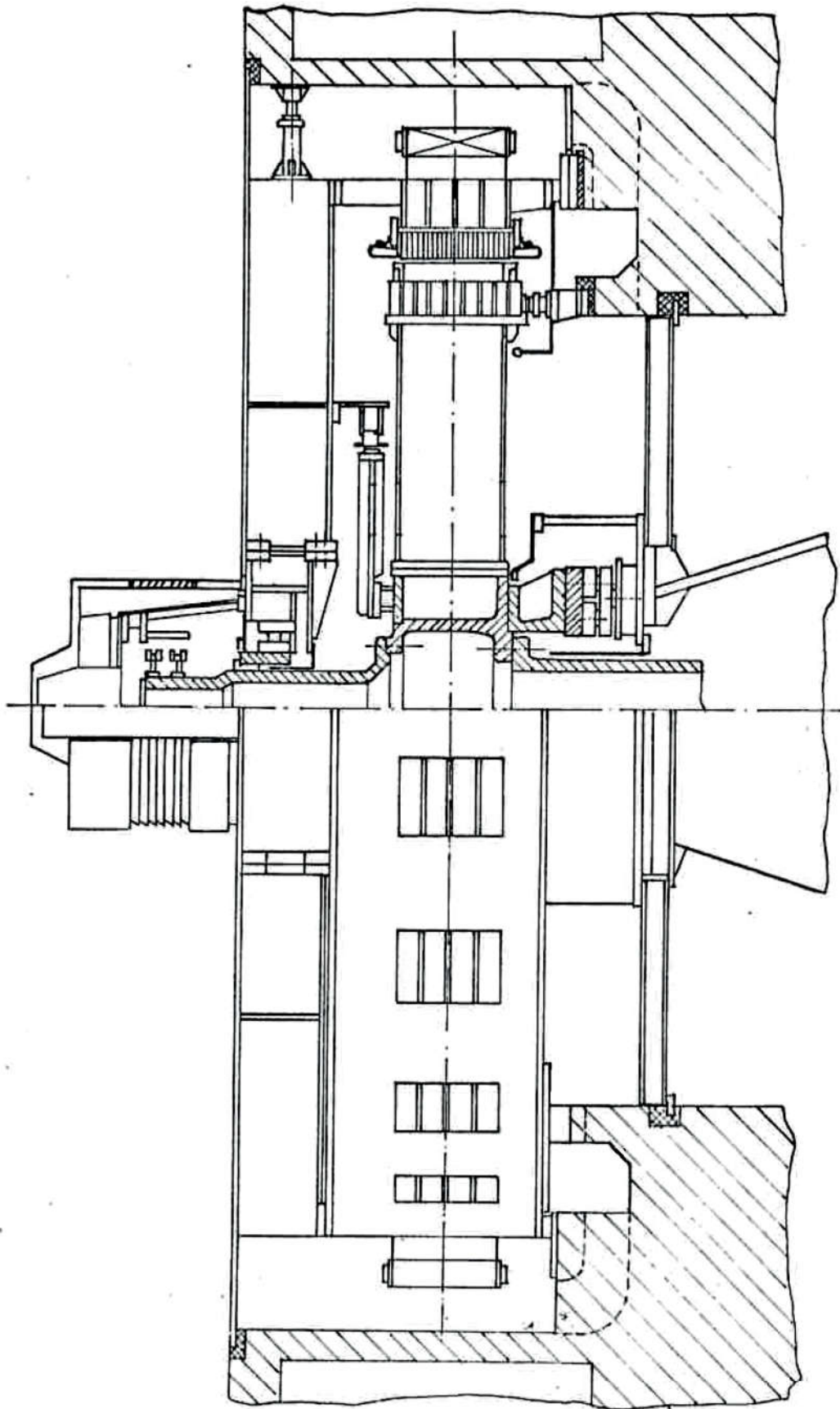


Sl. 1.1-01. Turbogenerator



Sl. 1.1-02. Hidrogenerator sa srednjom brzinom vrtnje

Činjenica da veće jedinice rade ekonomičnije od malih ima za posljedicu da se grade centrale sve većih snaga, pa je zato sinhroni generator tipični predstavnik električnog stroja velike snage i maloserijske proizvodnje.

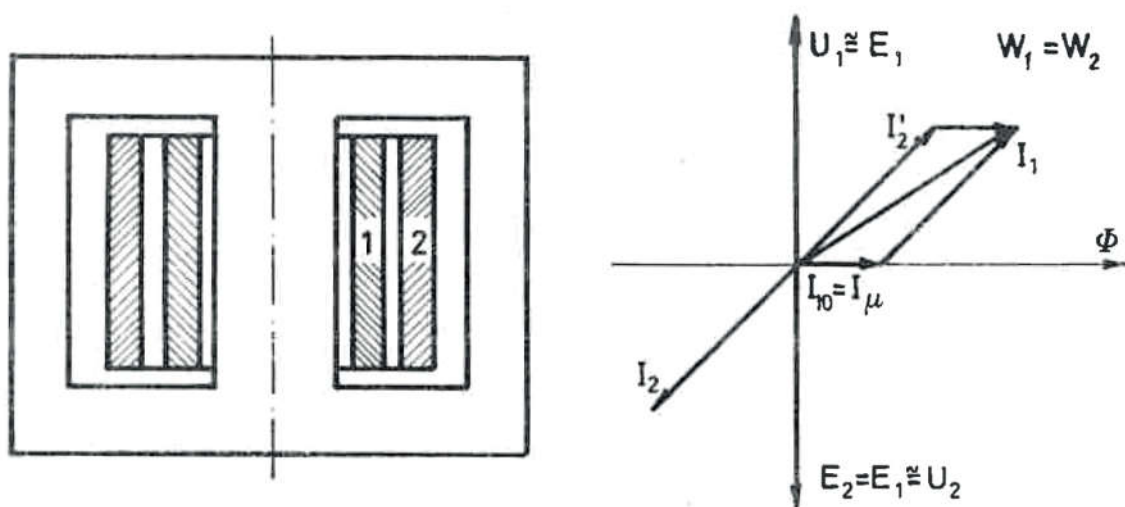


Sl. 1.1-03. Sporhodni hidrogenerator

Sinhroni generator mora dobivati mehaničku energiju od pogonskog stroja, uglavnom od parne ili vodne turbine, ili eksplozionog motora. Turbine po svojoj prirodi rade s velikom brzinom vrtnje, pa su za njih potrebni i generatori s velikom brzinom vrtnje; ove nazivamo turbogeneratori s 3000 a iznimno 1500 o/min (vidi sl. 1.1-01). Ostali pogonski strojevi rade s manjom brzinom vrtnje, pa generatore koji su građeni za njih dijelimo na one sa srednjom brzinom vrtnje od cca 300-1000 o/min (vidi sl. 1.1-02) i na sporohodne s brzinom vrtnje ispod 300 o/min a praktično ne ispod 50 o/min (vidi sl.1.1-03).

1.2. Usporedba: transformator - sinhroni generator

U sl. 1.2-01 prikazan je jednofazni transformator ogrnutog tipa a pored njega njegov vektorski dijagram. Podsjetimo se fizikalne slike koja kaže da primarno narinuti izmjenični napon potjera kroz primarni namot onu uzбудnu struju (I_{10}), koja je potrebna da se stvori tok (Φ), koji u primarnom namotu inducira onaj protunapon (E_1), koji drži ravnotežu s narinutim naponom (U_1). Napon (E_1) inducira se i u sekundarnom namotu kao napon $\overline{E_2} = \overline{E_1}'$.* Ako je isti broj zavoja primara i sekundara tada je $\overline{E_1} = \overline{E_2}$. Ako sekundarno transformator opteretimo sa strujom (I_2) onda ovi sekundarni amperzavoji djeluju

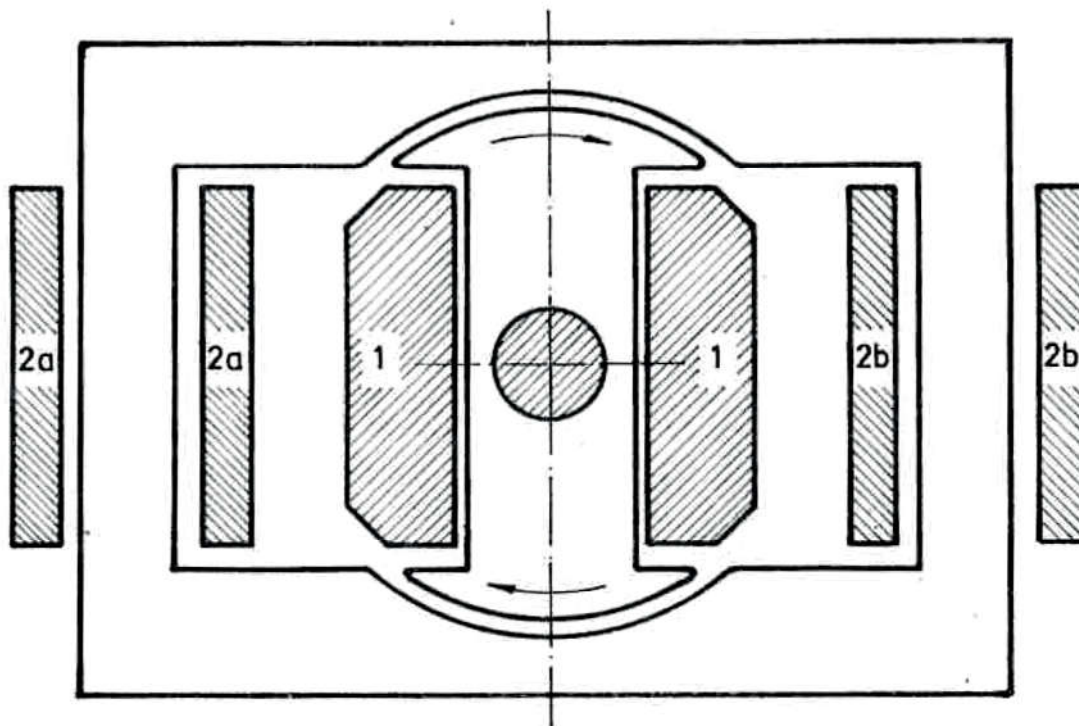


Sl. 1.2-01. Skica jednofaznog ogrnutog transformatora sa pojednostavnjenim vektorskim dijagramom

* E_1' je na sekundarnu stranu preračunani primarni napon E_1 u omjeru broja zavoja: $E_1' = \frac{w_2}{w_1} E_1$

protiv primarnih amperzavoja, pa mora nužno primarna strana povući iz svoje mreže struju I_1^* koja kompenzira sekundarne amperzavoje i tako posreduje elektromagnetski prijenos energije s primarne na sekundarnu stranu. U toj slici zanemarili smo radni otpor i rasipanje namota, jer oni ne igraju bitnu ulogu.

U sl. 1.2-02 prikazan je isti transformator kao u slici 1.2-01. Razlika je u tome da je sekundarni namot smješ-



Sl. 1.2-02. Pretvorba transformatora u sinhroni stroj

ten na dva vanjska stupa i da je srednji stup odvojen od ostale jezgre jednim zračnim rasporom i nataknut na jednu osovinu, oko koje se može taj srednji stup s primarnim namotom vrtjeti.

U principu je prije opisana fizikalna slika rada transformatora ostala nepromijenjena i za tu izvedbu transformatora prema sl. 1.2-02, osim što je sada, radi relativno većeg zračnog raspora oko izrezanog srednjeg stupa, potrebna veća primarna uzbudna struja I_{10} . Međjutim, u toj izvedbi možemo narinuti na primarni namot jedan relativno mali istosmjerni napon ($E_{1=}$) koji će preko radnog otpora primarnog namota potjerati istosmjernu uzbudnu struju:

* I_1' je na primarnu stranu preračunata sekund. struja I_2 u omjeru broja zavoja: $I_1' = I_2 \frac{w_2}{w_1}$

$$I_{10=} = \frac{E_{1=}}{R_1} \quad \text{i ne kao kod transformatora:} \quad I_{10\sim} = \frac{E_{1\sim}}{\sqrt{R_1^2 + X_{1r}^2}}$$

koja može biti jednaka maksimalnoj vrijednosti uzbudne struje transformatora ($I_{1\sqrt{2}}$) i koja mora prema tome potjerati kroz jezgru po veličini isti tok $\Phi_{=}$ no istosmjernan.

Taj tok $\Phi_{=}$, naravno, ne može uzбудiti u sekundarnom namotu napon jer se ne mijenja. No, ako srednji stup mehaničkom silom vrtimo, onda nužno tok $\Phi_{=}$ mijenja u sekundarnom namotu svoj pravac i mora u sekundarnom namotu inducirati napon. Dobili smo time sinhroni generator. Što brže vrtimo srednji stup, kojeg nazivamo rotor, to brža će biti promjena toka u vanjskim stupovima, to veća će biti frekvencija induciranog napona u sekundarnom namotu. Za razliku od rotora, koji se vrti, mirujući dio nazivamo - stator.

Na rotoru je u velikoj većini slučajeva smješten primarni namot, a na statoru sekundarni namot, no može biti i obrnuto bez da se principijelna fizikalna slika djelovanja sinhronog generatora promijeni. Ako sada polako opterećujemo sekundarni namot generatora, onda će kroz taj namot poteći struja I_2 , koja će sa svojim amperzavojima djelovati protivno primarnim amperzavojima, dakle snizavat će tok Φ . No, primarna strana na tu promjenu u ovom slučaju ničim ne reagira. Primarna struja ostaje nepromijenjena, jer je ona određena samo primarno narinutim istosmjernim naponom i radnim otporom primarnog namota. Induktivni otpor možemo kod polagane promjene toka Φ praktički zanemariti. Treba naglasiti "kod polagane promjene toka Φ ", jer kod brze promjene tereta, a time i toka " Φ ", mora se u primarnom namotu inducirati napon, pa dobivamo transformatorsku povezanost oba namota, primarnog i sekundarnog. No, zasada ne ćemo razmatrati rad sinhronog generatora kod brzih promjena, jer to spada u područje tzv. prolaznih pojava, koje ćemo razmatrati kasnije, već ćemo pokušati objasniti tzv. stacionarna stanja sinhronih generatora.

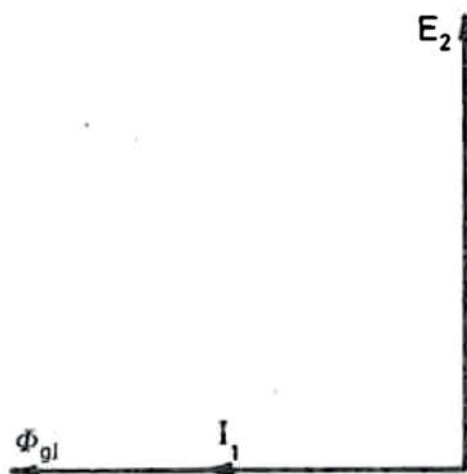
Došli smo do zaključka, da se kod promjene tereta mijenja tok Φ , a da primarna struja ostane nepromijenjena ako

je vanjskim utjecajem tj. promjenom narinutog primarnog napona ne mijenjamo. .

Promjena toka Φ prouzrokovana je, prema tome, protuamperzavojima sekundarnog namota. Dio generatora, u kojem se inducira napon zovemo i "armatura", a djelovanje njegovih protuampernih zavoja "reakcijom armature".

Reakcija armature ima za posljedicu promjenu toka Φ i time promjenu napona U , koji napaja mrežu. Mreža, međjutim, traži konstantan napon. Već kod transformatora upoznali smo se s promjenom napona na sekundarnoj strani transformatora. Govorili smo o padu napona u transformatoru, prouzrokovanom omskim i rasipnim induktivnim padom napona. Kod sinhronog generatora pridružuje se ovim padovima napona još i pad napona uslijed reakcije armature, svakako nov pojam, kojeg kod transformatora nije bilo. Kod transformatora primarna strana traži

ravnotežu napona i zato traži nepromijenjen tok Φ i automatski kompenzira struju tereta sekundarne strane. Kod generatora primarna strana ne reagira na struju tereta, tok Φ pada i njime i sekundarni napon generatora.



Sl. 1.2-03. Vektorski dijagram sinhronog generatora u praznom hodu

Ako crtamo vektorski dijagram sinhronog generatora, onda primarni napon više nije zanimljiv. On je ionako proporcionalan primarnoj struji, odn. struji uzbude. Zato okrenemo vektorski dijagram transformatora za 180° i dobijemo sli-

ku 1.2-03. Primarna uzbudna struja inducira tok i time napon, koji zaostaje za 90° . Istosmjerna struja zapravo nema vektorskog pravca, no njezini amperzavoji imaju simetralu koja se s rotorom sinhrono vrti i koja se može vektorom prikazati, pa ćemo to kasnije i dokazati.

Kako primarna strana ničim ne reagira na polaganu promjenu tereta na sekundarnoj strani, nema ni elektromagnetskog (transformatorskog) prijenosa energije. Energija koja izlazi u električnom obliku iz sekundarnog namota mora biti pokrivena s mehaničkom energijom, koju generator dobiva na osovini od pogonskog stroja.

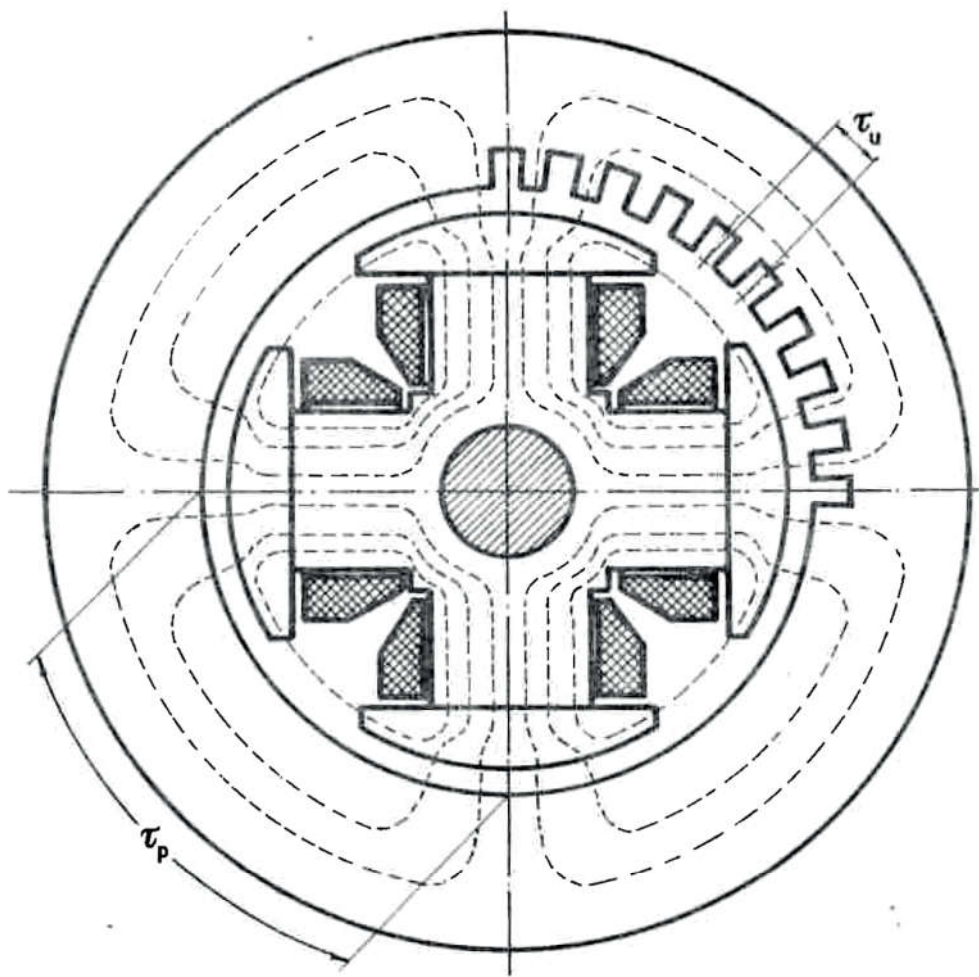
1.3. Izvedba sinhronog stroja

Sinhroni stroj se iz ekonomskih i drugih razloga ne gradi u obliku kakav je bio prikazan u sl. 1.2-02. Rotor, koji se vrti, mora biti okrugao, a stator, koji ga obuhvaća, mora se tom okruglom obliku prilagoditi, te tako dobijemo stator u obliku cilindra. U sl. 1.2-02 ima rotor dva pola. Jedan sjeverni i jedan južni. Govorimo o jednom paru polova. Sinhroni stroj možemo graditi s većim brojem pari polova. Tako npr. dobijemo prema sl. 1.3-01 sliku sinhronog stroja s dva para polova. Svaki pol ima jezgru, na kojoj se nalazi primarni namot i polno stopalo, koje zatvara namot prema vani i posreduje prijelaz silnica toka iz rotora preko zračnog rasporeda " δ " u stator.

Polovi su učvršćeni na jaram rotora, koji može istovremeno igrati ulogu glavine. Osovina leži u ležajevima.

Simetrale polova su međusobno jednako razmaknute za polni korak " τ_p ", kojeg mjerimo na provrtu statora. Prema tome, svakom polu na obodu statora odgovara duljina polnog koraka. Pošto imamo u rotoru istosmjerni tok, mogu biti svi dijelovi rotora iz masivnog materijala. Međutim, polna stopala vrlo često, a više puta i jezgru pola, iz razloga koji ćemo kasnije razmotriti, konstruiramo u lameliranoj izvedbi.

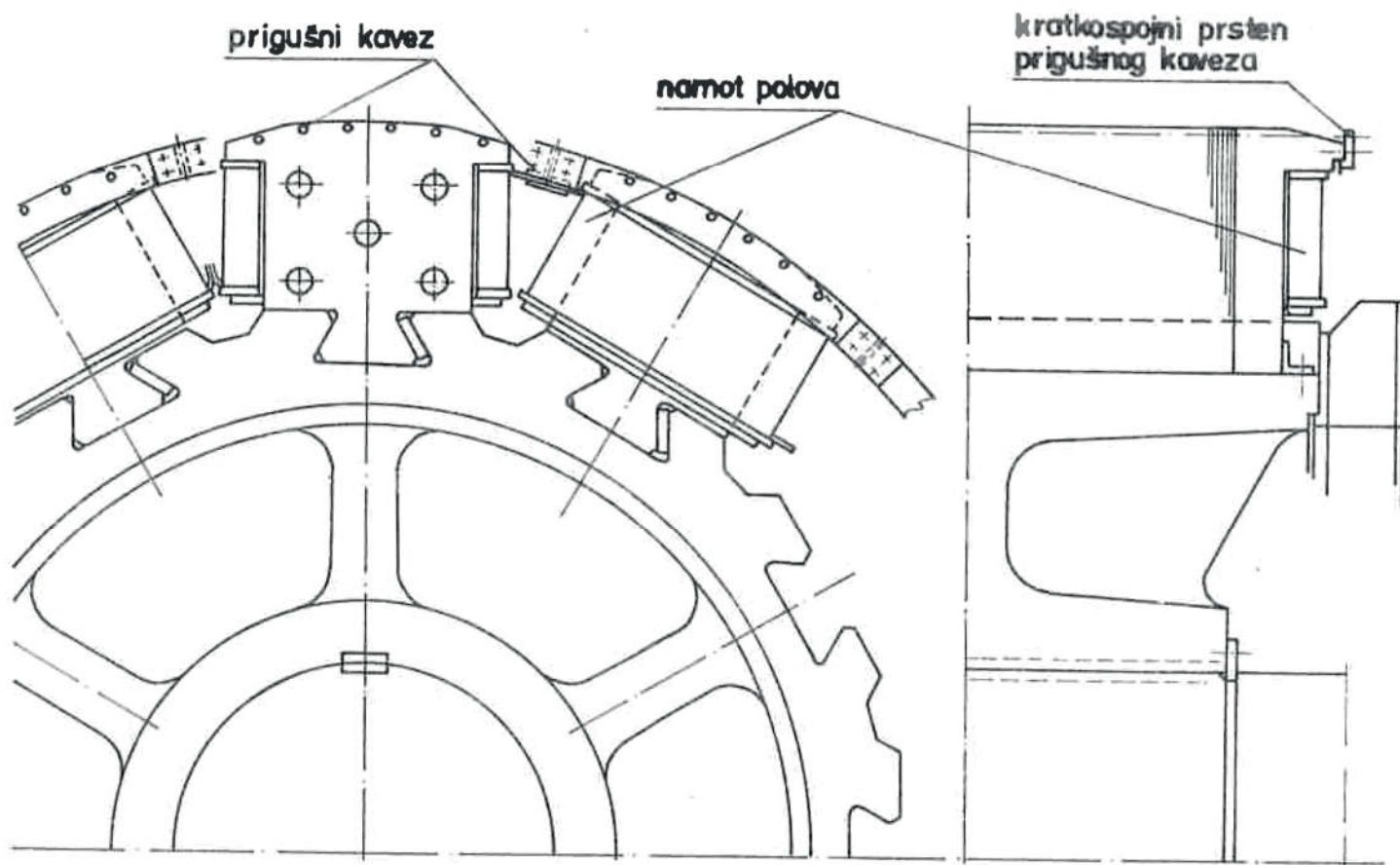
Statorski paket ima oblik cilindra, te je nužno sastavljen iz limova, koji su međusobno izolirani. Na provrtu su nanizani u jednakim razmacima utori (τ_u = korak utora) u koje se ulaže statorski namot. Statorski paket se, prema tome, sastoji od zubiju i jarma; zubi se nalaze između utora dok jaram obuhvaća cijeli stator. Namot statora se sastoji od



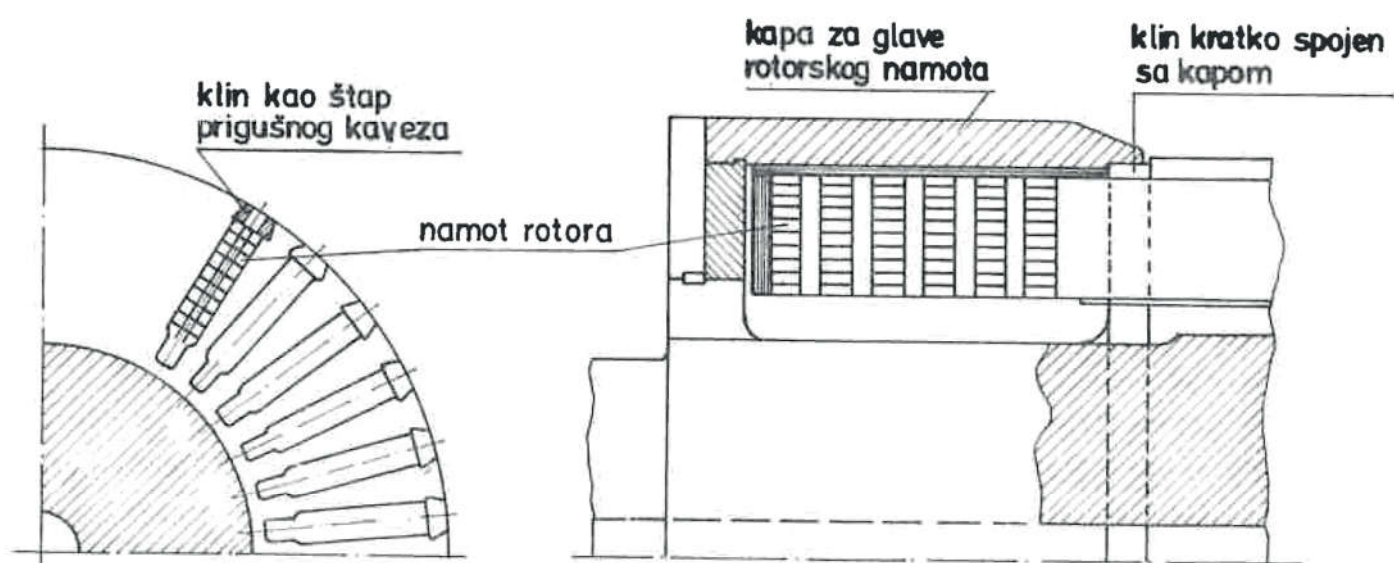
Sl. 1.3-01. Skica sinhronog stroja sa $p=2$

svitaka. Aktivni dio svakog svitka je onaj, koji leži u utoru, jer se u njemu inducira napon. Govorimo o stranicama svitka. Dijelove svitka, koji na čelu statora s obje strane povezuju aktivne dijelove svitka smještene u utoru, zovemo glavama namota; one predstavljaju neaktivni dio namota.

Kod velikog broja polova dobiva rotor oblik polnog kotača. Jaram se preko ruku povezuje s glavinom, kako se to vidi u slici 1.3-02. Kod dvopolnih strojeva se praktički ne može izvesti rotor s tzv. "izraženim polovima" pa se rotor gradi u obliku masivnog cilindra; na 2/3 oboda cilindra su smješteni utori u kojima leži primarni namot, kako je to prikazano u sl. 1.3-03. Govorimo o rotoru s neizraženim polovima, jer je simetrala polova određena samo namotom, a ne i oblikom jezgre rotora, kako je to slučaj kod višepolnih strojeva.



Sl. 1.3-02. Višepolni rotor



Sl. 1.3-03. Dvopolni rotor

2. NAMOTI

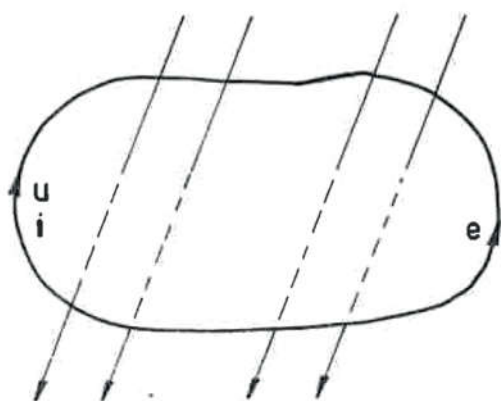
2.1. Induciranje napona

Kod transformatora smo upoznali Faraday-ev zakon, koji kaže, da je linijski integral električnog polja uzduž ruba jedne proizvoljne plohe jednak promjeni toka kojeg rub ove plohe obuhvaća (vidi sl. 2.1-01)

$$\underline{E} \, \underline{dl} = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int \underline{B} \, \underline{ds} = - \frac{d}{dt} B_n \, ds$$

Napon jednog zavoja (e) određen je prema tome sa:

$$e = \underline{E} \, \underline{dl} = - \frac{d\Phi}{dt}$$



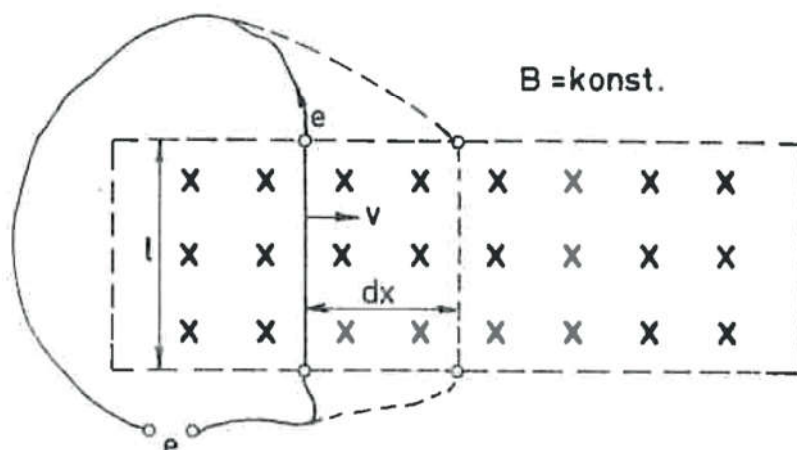
Sl. 2.1-01.

Pri pozitivno narinutom naponu, tj. naponu koji tjera struju i time stvara amperzavoje, doći će do pozitivnog naraštanja magnetskog toka tj. do pozitivne promjene magnetskog toka kroz cijelo vrijeme trajanja pozi-

tivnog napona. Budući da inducirani napon mora biti suprotan narinutom naponu, ispred izraza za promjenu toka dolazi negativan predznak. Promjenu toka unutar jednog zavoja može pro-uzrokovati ne samo vremenska promjena toka već i prostorna promjena toka, koji može inače sam za sebe biti konstantan. Zato treba proširiti jednadžbu na općeniti slučaj:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \right)$$

gdje u jednadžbi $\frac{dx}{dt}$ predstavlja bilo koju prostornu promjenu, koja ima za posljedicu promjenu toka unutar razmatranog zavoja. Tako npr. dobijemo prostornu promjenu toka unutar jednog zavoja prema sl. 2.1-02 ako jednu stranicu zavoja - jedan štap - pomicemo konstantnom brzinom " v " kroz polje s konstantnom indukcijom " B " tako, da taj štap u duljini " l " siječe silnice



Sl. 2.1-02.

toka. Pošto je tok konstantan, nema napona transformacije pa je:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$$

Međutim, prostornim pomicanjem štapa dobijemo:

$$\frac{d\Phi}{dx} = B \cdot l \quad ; \quad \frac{dx}{dt} = v$$

$$e = B \cdot l \cdot v$$

što nazivamo napon rotacije. Pomicanjem štapa na desno raste tok unutar zavoja. Neka silnice imaju smjer prema dolje u papir, što označujemo sa križićem "x". Naraštanje toka u tom pravcu postigli bi povećanjem amperzavoja (protjecanjem) u pravcu na desno (u smjeru kazaljke na uri) pa se prema tome mora u zavoju inducirati napon protivnog pravca, tj. na lijevo kako to vidimo u slici 2.1-02. Do toga možemo doći i pravilom desne ruke: "Ako silnice idu u dlan desne ruke, a palac postavimo u pravcu pomicanja štapa, onda prsti pokazuju pravac induciranog napona".

2.2. Oblik polja

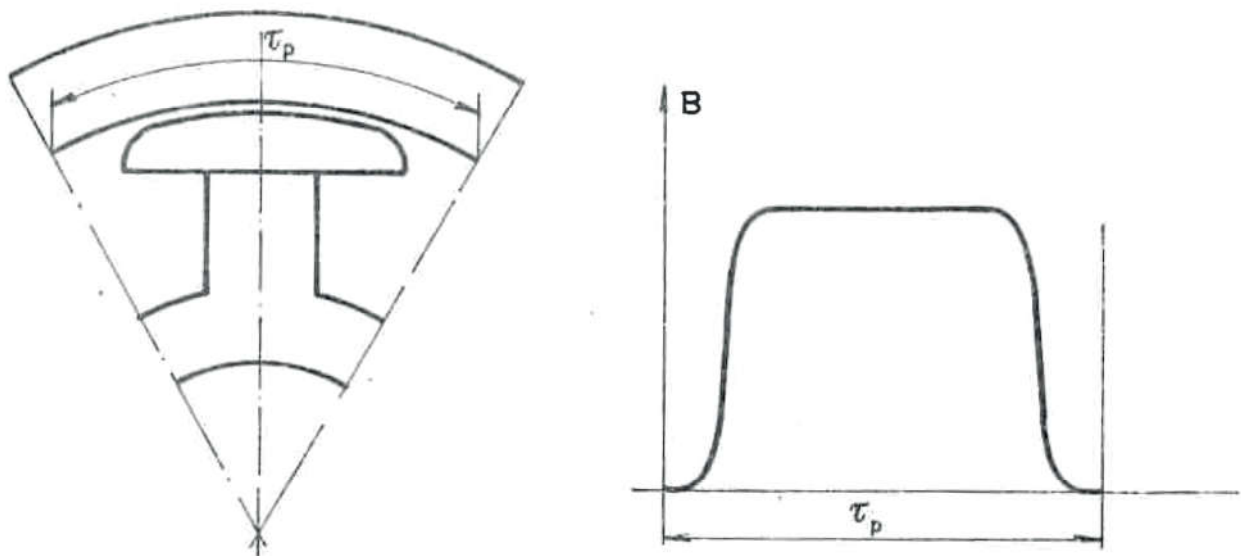
U sl. 1.3-01 prikazan je četveropolni generator u presjeku. Stator ima pod svakim polom devet utora, ukupno 36 utora. Utori 1-9 leže pod jednim polom u istom položaju kao utori 10-18 pod drugim polom itd. Ako rotor uzбудimo dobijemo glavno magnetsko polje, koje će se zatvarati kroz rotor i stator, kako je to u sl. 1.3-01 prikazano.

Označimo odstojanje proizvoljne točke na provrtu statora od simetrale polova sa "x". Kako je magnetski napon uzduž polnog stopala konstantan, gustoća magnetskog toka (indukcija B) na određenom mjestu "x" u zračnom rasporu ovisi skoro isključivo o veličini zračnog raspora na dotičnom mjestu. Kod toga, naime, pretpostavljamo da je magnetski otpor željeza praktički zanemariv u odnosu na magnetski otpor u zračnom rasporu. Prema tome je indukcija B_x na mjestu "x" kod određene uzbude obrnuto proporcionalna veličini zračnog raspora na tom mjestu (δ_x)

$$B_x = k \frac{1}{\delta_x}$$

Možemo razlikovati tri slučaja oblikovanja polnog stopala:

a) Polna stopala s konstantnim zračnim rasporom prema sl. 2.2-01 u kojoj je prikazan i dijagram pripadne raspodjele magnetske indukcije



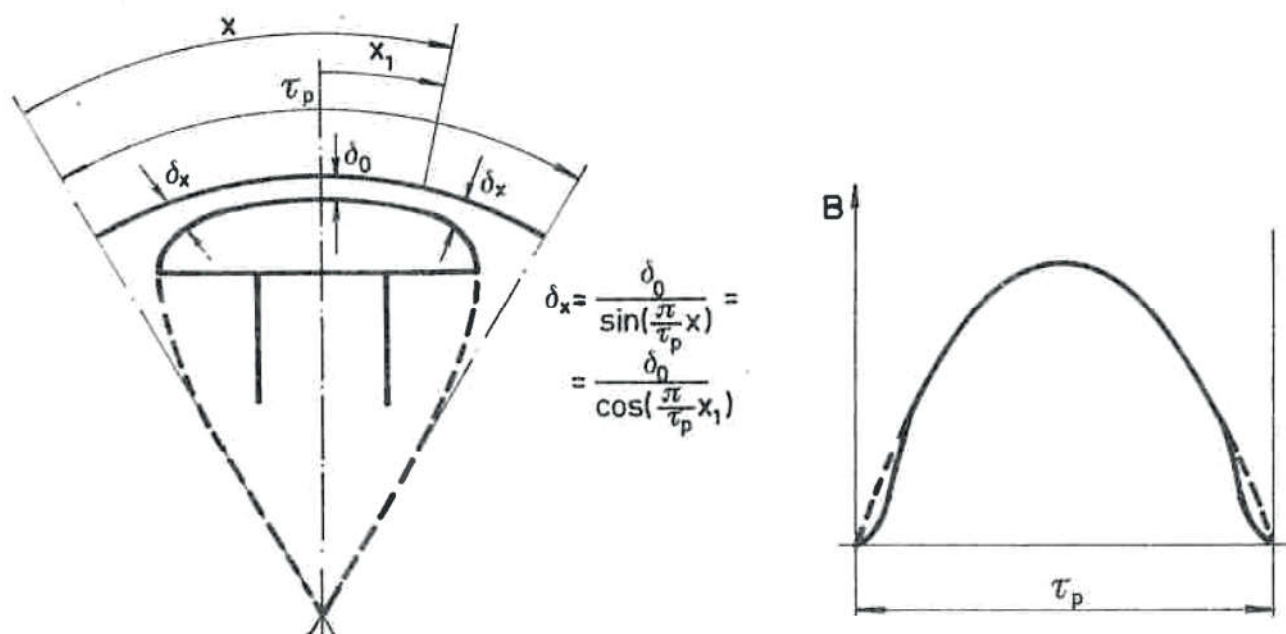
Sl. 2.2-01. Polno stopalo sa konstantnim zračnim rasporom i pripadna raspodjela magnetske indukcije

djele indukcije uzduž polnog koraka pod jednim pobm. Ta krivulja svakako obiluje višim harmonicima.

b) Polno stopalo sa zračnim rasporedom koji se mijenja od sredine pola na obje strane prema cosinus funkciji za X_1 od 0 do $\pm\tau_p/2$, odn. od simetrale izmedju polova (za $0 < X < \tau_p$) prema sinus funkciji.

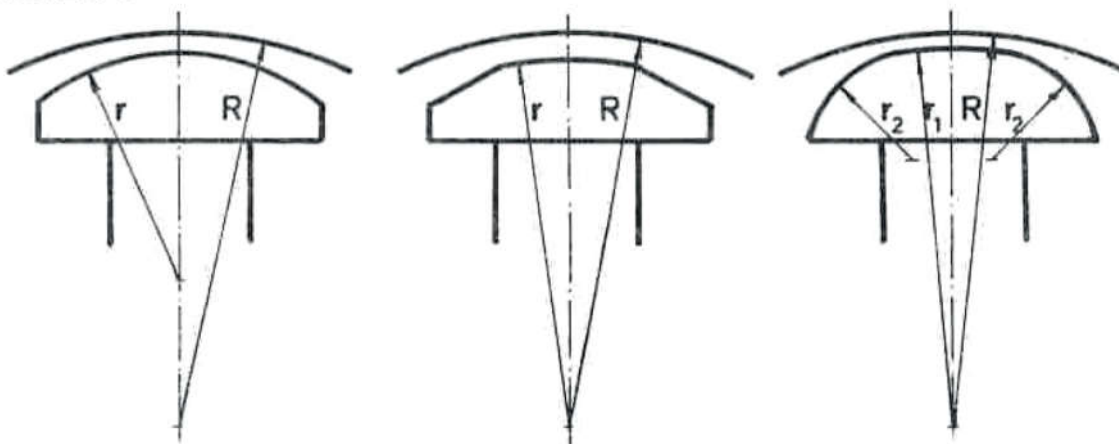
$$\delta_x = \frac{\delta_0}{\cos(\frac{\pi}{\tau_p} X_1)} \quad \text{odn.} \quad \delta_x = \frac{\delta_0}{\sin(\frac{\pi}{\tau_p} X)}$$

tako da dobijemo sinusno raspodijeljenu indukciju, osim u području izmedju polnih stopala, jer polno stopalo ne može do simetrale izmedju polova slijediti tok sinus funkcije, već se mora prije zatvoriti, kako bi ostalo mjesta za smještaj uzbuđenog namota, kako se to vidi u sl. 2.2-02. Ovakova izvedba je skupa jer je tehnološki komplicirana a osim toga nema naročitih prednosti pred ostalim izvedbama (vidi pogl. 2.41), pa se nikad ne primjenjuje.



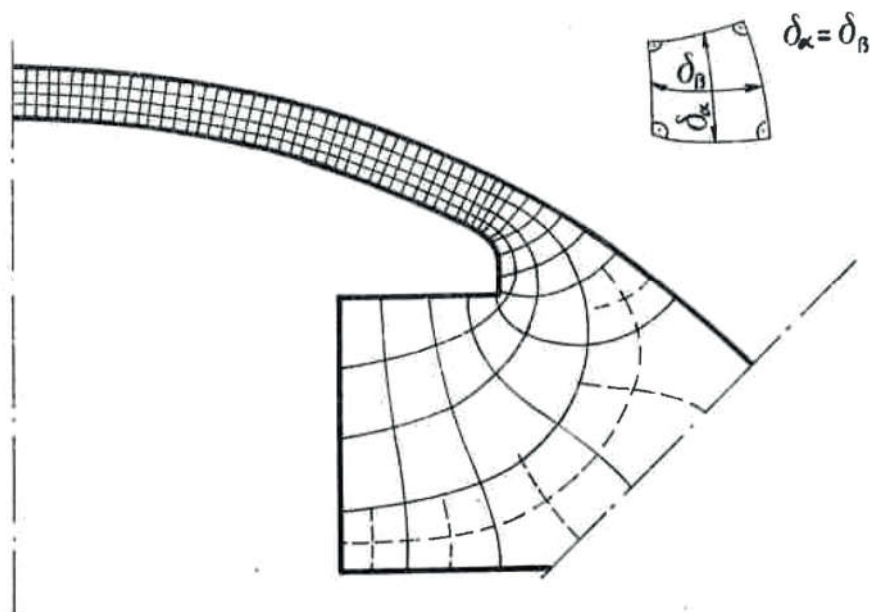
Sl. 2.2-02 Oblik polnog stopala potreban za sinusnu raspodjelu indukcije u zračnom rasporu

c) Polna stopala koja predstavljaju kompromis između navedenih dviju izvedbi pod a) i b), bilo da imaju manji radius "r" od radiusa "R" provrta statora, bilo da imaju samo krajeve polnih stopala odrezane ili više zaokružene kako je to prikazano u slici 2.2-03.



Sl. 2.2-03 Različiti oblici polnih stopala

Oblik polja ispod polnih stopala možemo ustanoviti bilo računski pomoću metode komformnog preslikavanja, bilo grafički pomoću crtanja tzv. silo-cijevi, kako je to prikazano u slici 2.2-04. U zračni raspored se ucrtava više npr. tri ni-



Sl. 2.2-04 Grafičko određivanje oblika polja pomoću silo-cijevi

vo-linije jednakog magnetskog potencijala i time zračni raspored razdijeli na četiri ($n=4$) jednaka magnetska napona. Ako se

počev od sredine pola okomito na te nivo-linije crtaju silnice tako, da sa nivo-linijama čine kvadrate, dobijemo silo-cijeve. Što više se raspon prema kraju polnog stopala povećava, to više se stranice kvadrata savijaju, ali između nivo-linija i silnica mora ostati svagdje pravi kut, a srednja duljina kvadrata (δ_α) mora biti uvijek jednaka srednjoj širini kvadrata (δ_β). Svaki kvadrat ima onda jednaki magnetski napon i jednaku količinu toka (Φ), jer je:

$$\Phi = k \frac{\theta}{\delta_\alpha} \delta_\beta = k\theta$$

pa je tok silo-cijeve širine δ_β , a ukupne dužine δ_x

$$\Phi_{sc} = k\theta_{sc} \frac{\delta_\beta}{\delta_x} = k\theta_{sc}$$

Ako smo zračni raspor razdijelili na "n" nivo-linija onda dobijemo da je indukcija na mjestu "x" jednaka:

$$B_x = B_0 \frac{\delta_0}{\delta_x}$$

B_0 - indukcija na sredini pola

δ_0 - zračni raspor na sredini pola

U novije vrijeme se to rješava pomoću računskog stroja iterativnim postupcima.

Po Fourier-u možemo dobiveni oblik polja $B_x=f(x)$ razdijeliti na osnovne i više harmonike, a pošto iz razloga simetrije otpadaju parni harmonici to dobijemo:

$$B_x = B_1 \sin\left(\frac{x\pi}{\tau_p}\right) + B_3 \sin\left(3 \frac{x\pi}{\tau_p}\right) + B_5 \sin\left(5 \frac{x\pi}{\tau_p}\right) + \dots$$

$$\dots B_v \sin\left(v \frac{x\pi}{\tau_p}\right) \quad (2.2-01)$$

Odstojanje "x" računali smo sa električnim kutem u radijanima time, da smo "x" umnožili sa π/τ_p .

Ako je $x=2\tau_p$, onda je to kut od $\frac{x\pi}{\tau_p} = \frac{2\tau_p\pi}{\tau_p} = 2\pi$ odn. od 360° (električki kut).

2.3. Faktori namota

2.31. Zvezdište vektora napona

Ako se rotor četveropolnog generatora prema slici 1.3-01 okreće sa brzinom vrtnje "n" (o/min), onda nužno silnice sijeku štapove namota u utorima pa se u njima inducira napon rotacije. Ako promatramo samo jedan štap u utoru 1, onda će svakako tokom jednog okretaja rotora prolaziti ispod tog štapa sva četiri pola. Ako okrećemo konstantnom brzinom, bit će u svakom trenutku prema jednadžbi:

$$e = B_x \cdot l \cdot v \quad (l = \text{konst.}, \quad v = \text{konst.})$$

$$e = k \cdot B_x = f(x)$$

napon uvijek proporcionalan indukciji, koja u tom trenutku vlada ispod utora br. 1. Ako je generator potpuno simetrično gradjen, a to je praktički uvijek slučaj, onda imamo pod svakim polom isti oblik polja, naizmjenice polje sjevernog i južnog pola, pa se u štapu utora br. 1 inducira napon koji se s vremenom isto tako mijenja, kako se prostorno mijenja polje.

$$e = f(t) = k \cdot B_t = f(x)$$

Tokom jednog okreta inducira se toliko perioda, koliko ima pari polova. Broj perioda na sekundu, odn. frekvencija (f), je prema tome:

$$f = \frac{n}{60} p \quad (s^{-1})$$

Pošto naša standardna frekvenca iznosi 50 Hz, to je

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{3000}{p}$$

Prema tome je kod date frekvencije s brojem pari polova (p) već određena i brzina vrtnje sinhronog stroja, koju nazivamo sinhronom brzinom vrtnje. Ona iznosi kod frekvencije od 50 Hz za razne brojeve polova:

2 p	2	4	6	8	10	12	. . .	120
n(o/min) =	3000	1500	1000	750	600	500	. . .	50

Pretpostavljamo da su polja u zračnom rasporu sinusnog oblika, pa se prema tome u štapu smještenom u utor br.1 mora inducirati izmjenični napon sinusnog oblika:

$$e_1 = e_{\max} \sin \omega t$$

U utoru br.2 se inducira isti napon, no svakako s vremenskim zakašnjenjem za kut α

$$e_2 = e_{\max} \sin(\omega t - \alpha)$$

Ako računamo da jednom okretu odgovara geometrijski kut $\alpha_g = 2\pi$ odn. 360° , i ako se tokom tog okreta induciraju kod četveropolnog stroja dvije periode izmjeničnog napona, onda jednom okretaju odgovaraju dvije periode odn. električki kut

$$\alpha = 2 \cdot 2\pi = 4\pi$$

Prema tome je:

$$\alpha = p\alpha_g$$

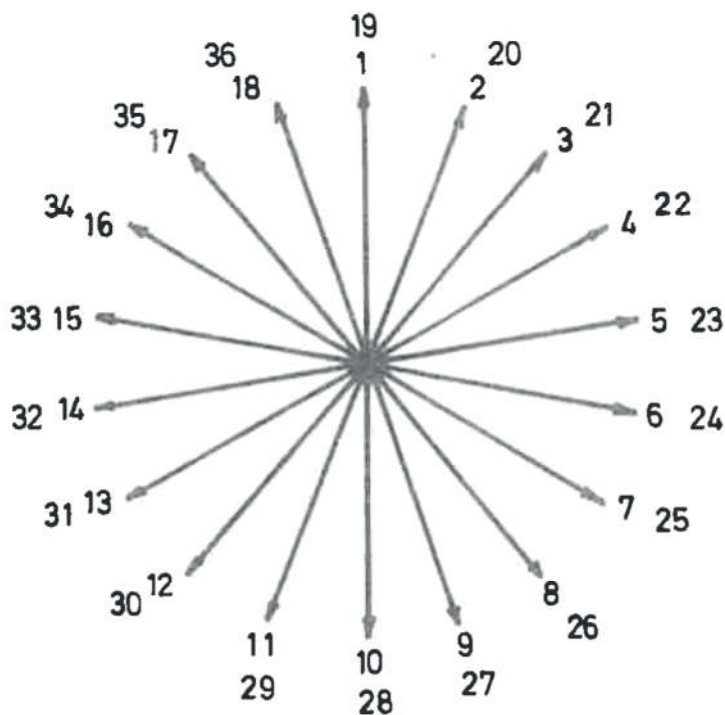
Prema slici 1.3-01 imamo 36 utora ($N=36$) pa geometrijski kut između utora iznosi:

$$\alpha_g = \frac{360^\circ}{N} = \frac{360^\circ}{36} = 10^\circ$$

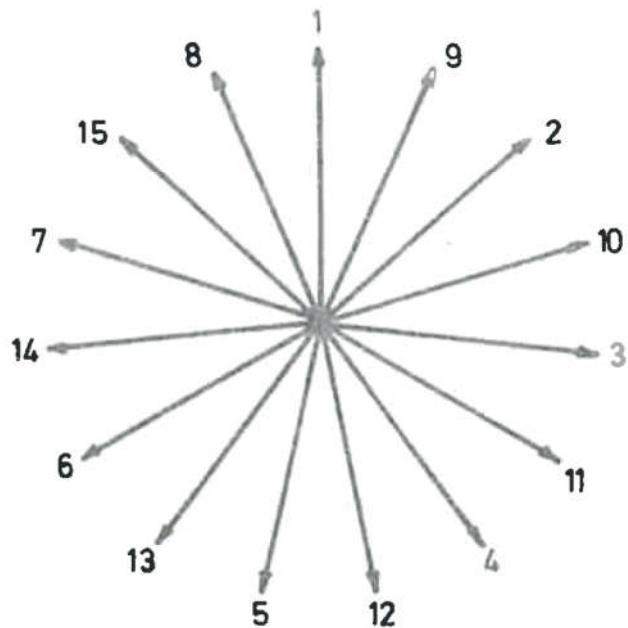
dok električki kut između utora iznosi:

$$\alpha = p\alpha_g = 2\alpha_g = 20^\circ$$

Prema tome možemo nacrtati vektore napona koji se induciraju u pojedinim utorima, a koji su međusobno pomaknuti za 20° kako je to prikazano u sl.2.3-01. Iz te slike vidimo da se poslije vektora 18-tog utora opet svi vektori poklapaju s vektorima utora 1-18. Broj utora je djeljiv s brojem pari polova, pa se zato slika vektora ispod svakog para polova ponavlja. Na taj način smo dobili sve vektore napona, koji se induciraju u svim utorima. Ovi vektori prema sl. 2.3-01 predstavljaju simetričnu zvijezdu. Ako broj utora nije djeljiv s brojem pari polova, a niti nema zajedničke mjere s brojem pari polova,



Sl.2.3-01 Zvijezda vektora induciranog napona za generator $N=36$, $p=2$



Sl.2.3-02 Zvijezda vektora induciranog napona u generatoru sa $N=15$, $p=2$

nužno svaki utor ima svoj vektor napona, kako je to prikazano u sl. 2.3-02 za slučaj četveropolnog generatora sa 15 utora:

$$\frac{N}{p} = \frac{15}{2} \neq \text{cijeli broj}$$

$$\alpha = p \frac{360^\circ}{N} = 48^\circ$$

Zvijezda je, međjutim, uvijek simetrična. Kut između vektora susjednih utora je $\alpha=48^\circ$, dok je kut između susjednih vektora u zvijezdi samo 24° .

Ako zbrojimo sve

Sl.2.3-03 Geometrijska suma vektora napona iz zvijezde na sl. 2.3-02

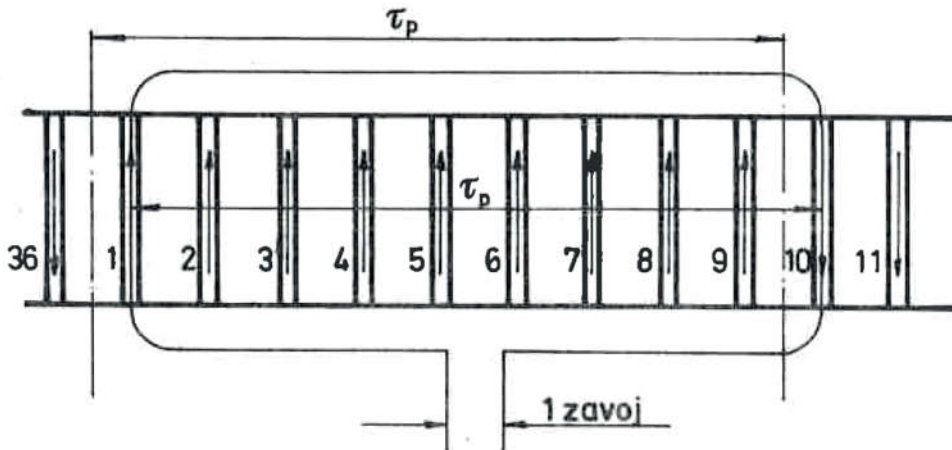
vektore napona iz sl. 2.3-02 dobijemo poligon vektora prema slici 2.3-03. Kod beskonačnog broja utora dobili bi umjesto



poligona krug. Njihova geometrijska suma mora kod simetrične izvedbe generatora biti uvijek jednaka nuli. Međutim, namot generatora treba izvesti tako, da nakon zbrajanja vektora napona dobijemo što je moguće veći napon, tj. izvedba mora biti takova da se vektori zbrajaju a ne odbijaju.

2.32. Namot

Namot se sastoji iz svitaka, koje ulažemo u po dva utora. Ako je korak između ta dva utora jednak polnom koraku, tada se u jednom zavoju dva vektora suprotnog pravca tako zbroje, da se dobije njihova algebarska suma, kako je to vidljivo za slučaj generatora prema sl. 1.3-01 i 2.3-01. Ako razvijemo sliku provrta statora gledano iz sredine rotora dobijemo sl. 2.3-04. Koliko je puta veći broj zavoja u tom svit-

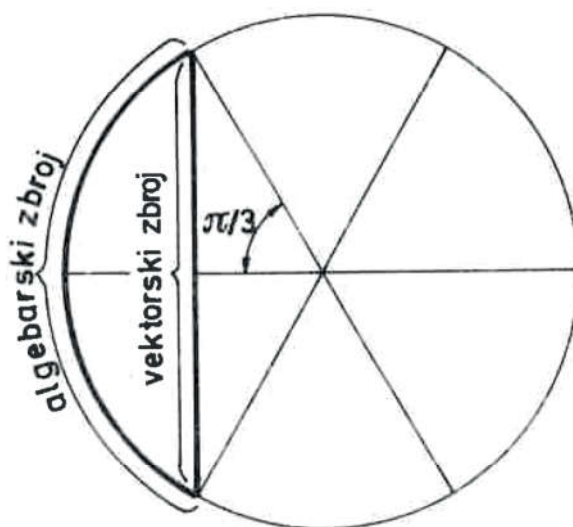


Sl. 2.3-04 Razvijeni provrt statora u ravninu

ku, toliko puta je veći napon koji se u svitku inducira. Pomoću svitka smo, prema tome, vektor utora br.10 okrenuli za 180° . U slučaju beskonačnog broja utora dobijemo, prema tome, dva polukruga, od kojih je jedan okrenut za 180° , kako to vidimo u sl. 2.3-05. Vektorska suma svih induciranih napona je jednaka dvostrukom promjeru poligona vektora. Algebarska suma svih induciranih napona je svakako veća. Kod beskonačnog broja utora je algebarska suma induciranih napona jednaka opsegu kruga, koji predstavlja poligon beskonačnog broja vektora. Do-



Sl.2.3-05 Vektorska suma napona svih svitaka u slučaju beskonačnog broja utora



Sl.2.3-06 Određjivanje zonskog faktora jednofaznog generatora

bili smo jednofazni namot u kojem se kao konačan rezultat inducira izmjenični napon, ali smo pri tome ipak izgubili jedan znatan dio induciranih napona.

2.33. Zonski faktor namota

Veličinu induciranog napona u svakom svitku možemo izračunati. Dobivene napone možemo i algebarski zbrojiti, i to napone svih svitaka koje vežemo u seriju. Za ukupni napon je, međjutim, mjerodavan vektorski zbroj napona, pa zato moramo algebarski zbroj vektora pomnožiti još s jednim korekcionim faktorom, kojeg zovemo zonski faktor namota (f_z), a koji predstavlja omjer između vektorske i algebarske sume napona. Za jednofazni namot u svim utorima generatora i kod beskonačnog broja utora dobijemo zonski faktor na osnovu slike 2.3-05 sa omjerom:

$$f_z = \frac{2r}{r\pi} = \frac{2}{\pi} = 0,64$$

Radi vektorskog zbrajanja napona izgubimo u ovom slučaju 36%

napona. Ako kritički gledamo na sl. 2.3-05 onda vidimo da jedan veliki dio utora odn. njihovih vektora napona vrlo slabo sudjeluje u sumarnom naponu. Radi toga se jednofazni namot ulaže samo u dvije trećine utora i dobiju se tako kod beskonačnog broja utora samo dva kružna segmenta, koja su prikazana u sl. 2.3-06. Zonski faktor u ovom slučaju iznosi:

$$f_z = \frac{\sin \pi/3}{\pi/3} = 0,83$$

Naravno, taj se faktor odnosi na dvije trećine namota, pa zato i algebarski zbroj napona iznosi samo dvije trećine od slučaja jednofaznog namota u svim utorima. Prema tome je u odnosu na slučaj namatanja u svim utorima ukupni napon iznosa $\frac{2}{3} \cdot 0,83 = 0,55$ puta algebarska suma napona kod namotanih svih utora.

Na taj način uštedimo jednu trećinu bakra, a napon se smanji samo za:

$$\frac{0,64 - 0,55}{0,64} = 0,14 \quad \text{tj. } 14\%$$

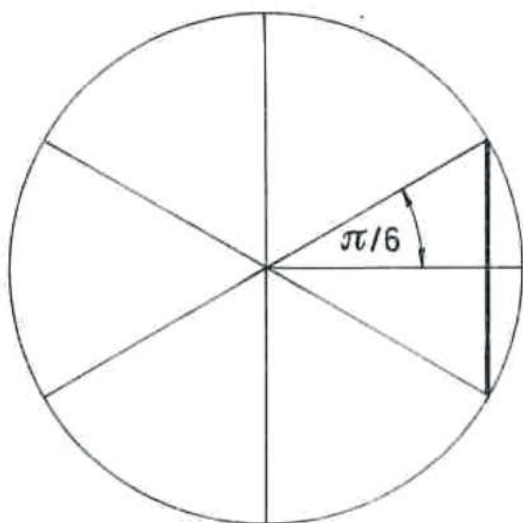
To se ekonomski isplati, jer je bakar skup.

Jednofazne generatore gradimo vrlo rijetko. Izmjenične struje normalno koristimo u trofaznom sistemu. Kod trofaznog generatora moramo razdijeliti sve utore na tri faze, a sve utore jedne faze na jednu polovinu utora za jednu stranu svitka i drugu polovinu utora za drugu stranu ovih svitaka. Na osnovu tog razmatranja dobijemo za beskonačni broj utora sl. 2.3-07. Cijeli obod razdijeljen je na šest segmenata, po dva suprotno smještene za svaku fazu. Zonski faktor namota dat je u ovom slučaju omjerom:

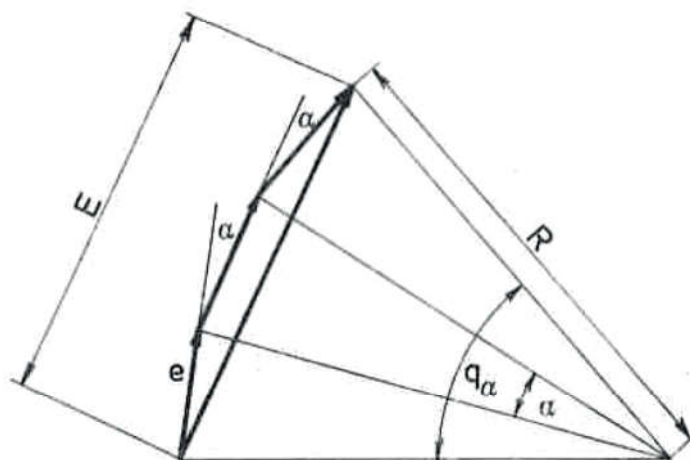
$$f_z = \frac{\sin \pi/6}{\pi/6} = 0,955$$

Gubimo samo još 4,5% napona. To je velika prednost koju pokazuje trofazni sistem ne samo u prijenosu energije nego i kod gradnje strojeva.

Pitamo se, za koliki postotak je, zapravo, kod istog statora i kod istog broja vodiča po utoru i kod beskonačnog



Sl.2.3-07 Razdioba oboda statora za trofazni namot



Sl.2.3-08 Vektorska suma napona jedne faze kod $q=3$

broja utora, jednofazni stroj s dvije trećine namotanih utora naponski slabije iskorišten od trofaznog stroja. To je zapravo dato s dobivenim zonskim faktorima i iznosi:

$$(1 - \frac{2/3 \cdot 0,83}{0,955}) \cdot 100 \approx 42$$

Proporcionalno naponu pada snaga. Prema tome smo dokazali da je snaga normalnog jednofaznog stroja za 42 % manja od snage koju bi isti stroj mogao trofazno davati. Praktički se računa da je snaga jednofaznog stroja kod istog tipnog modela za 50% manja od njegove trofazne snage, čime se gornja računica potvrđuje.

Generatore gradimo s konačnim brojem utora. Kod simetričnih namota, kod kojih se pod svakim polom ponavlja ista vektorska slika induciranih napona u utorima, možemo računati zonski faktor namota samo za vektore utora jedne faze pod jednim polom. Broj utora na pol i fazu označujemo sa "q"

$$q = \frac{N}{2pm}$$

ako sa "m" označimo broj faza. U slučaju generatora prema sl. 1.3-01 imamo:

$$q = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3$$

i dobijemo sl. 2.3-08 za vektore induciranih napona jedne faze. Za konkretni slučaj sa

$$q = 3 \quad \text{ i } \quad \alpha = \frac{p \cdot 360}{N} = \frac{2 \cdot 360}{36} = 20^\circ$$

$$f_z = \frac{\sin 3 \cdot 20/2}{3 \cdot \sin 20/2} = \frac{\sin 30^\circ}{3 \sin 10} = 0,96$$

Za opći slučaj dobijemo:

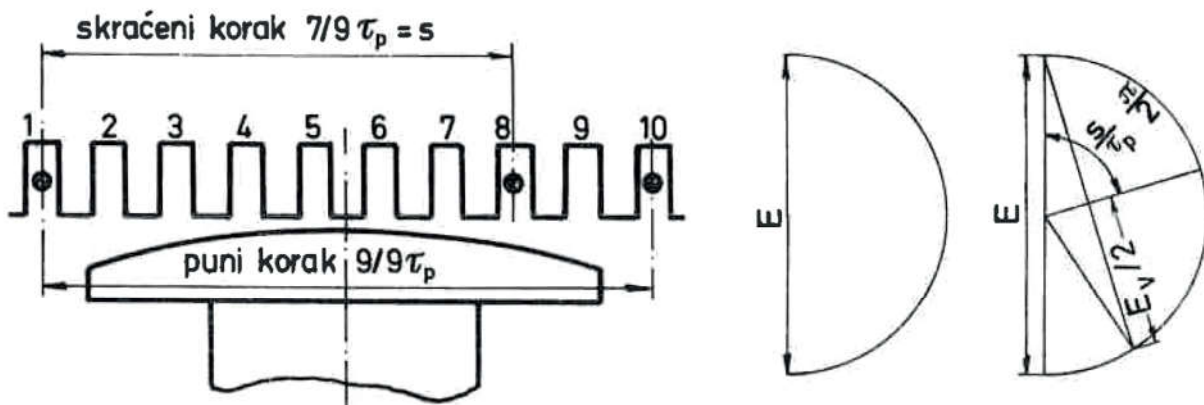
$$f_z = \frac{\sin q \alpha/2}{q \sin \alpha/2} \quad (2.3-01)$$

2.34 Faktor skraćenog koraka

Do sada smo obrađivali slučaj namota s dijametralnim svicima, koji imaju puni korak jednak polnom koraku (τ_p). Međutim, svici se mogu ulagati i sa skraćenim korakom. Kod četveropolnog generatora prema sl. 1.3-01 i 2.3-01 leže kod punog koraka stranice jednog svitka u utoru 1 i 10, jer je puni korak jednak:

$$\frac{N}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

Govorimo o koraku 9/9. Ako, međutim, stranice svitka leže u utorima 1-8 imamo skraćeni korak 7/9. U sl. 2.3-09 prikazana



Sl. 2.3-09 Ulaganje svitka s punim i skraćenim korakom

su oba slučaja. Faktor skraćenog koraka (f_s) dobijemo opet kao omjer vektorske sume prema algebarskoj sumi, tj.:

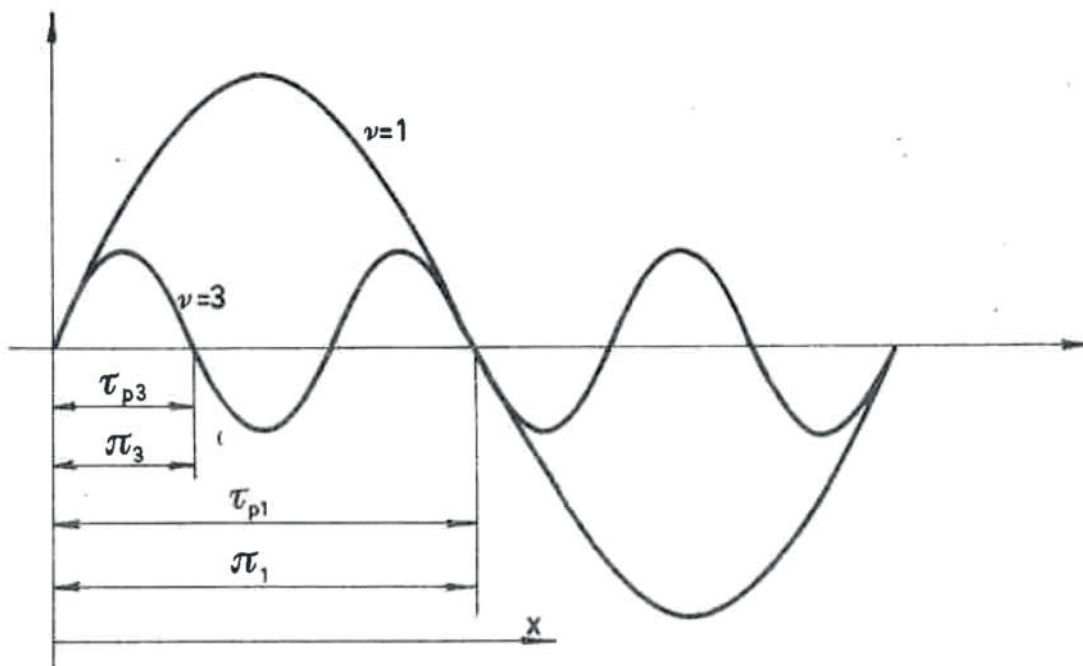
$$f_s = \frac{E_v}{E_p} = \sin \left(\frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.3-02)$$

Konačni faktor namota iznosi:

$$f_n = f_z \cdot f_s \quad (2.3-03)$$

2.35. Faktori namota za više harmonike

Do sada smo računali faktore namota samo za osnovni harmonik. Pod utjecajem viših harmonika mijenja se slika polja utoliko, da je polni korak za v -ti harmonik polja v -puta kraći. Npr. u sl. 2.3-10 ucrtana je prostorna raspodjela in-



Sl. 2.3-10 Prostorna raspodjela indukcije za osnovni i treći harmonik

dukcije za osnovni i treći harmonik uzduž zračnog rasporeda za dva polna koraka. Vidimo da je polni korak za treći harmonik τ_{p3} tri puta manji od polnog koraka osnovnog harmonika (τ_{p1})

$$\tau_{p3} = \frac{1}{3} \tau_{p1}$$

Ustanovili smo već, da se u štapovima u utorima statora inducira napon, koji se vremenski mijenja proporcionalno indukciji u zračnom rasporu, pa prema tome sl. 2.3-10 predstavlja u nekom drugom mjerilu i vremenski dijagram induciranog napona. Jedna poluperioda (π_3) trećeg harmonika traje jednu trećinu vremena od jedne poluperiode osnovnog harmonika. Iz toga možemo zaključiti da svaki vremenski pomak induciranog napona trećeg harmonika mjereno s električnim kutem " α_3 " predstavlja za treći harmonik tri puta veći kut nego za osnovni harmonik. Kut osnovnog harmonika je za "p" puta veći od geometrijskog kuta, kako smo to već prije ustanovili:

$$\alpha_3 = 3\alpha_1 = 3 p\alpha_g$$

odnosno općenito za v-ti harmonik:

$$\alpha_v = v\alpha_1 = vp\alpha_g$$

Možemo to tumačiti i na drugi način. U sl. 2.3-10 vidimo da treći harmonik može inducirati i rotor, koji ima tri puta veći broj polova, pa se time potvrđuje, da je:

$$\alpha_v = vp\alpha_g$$

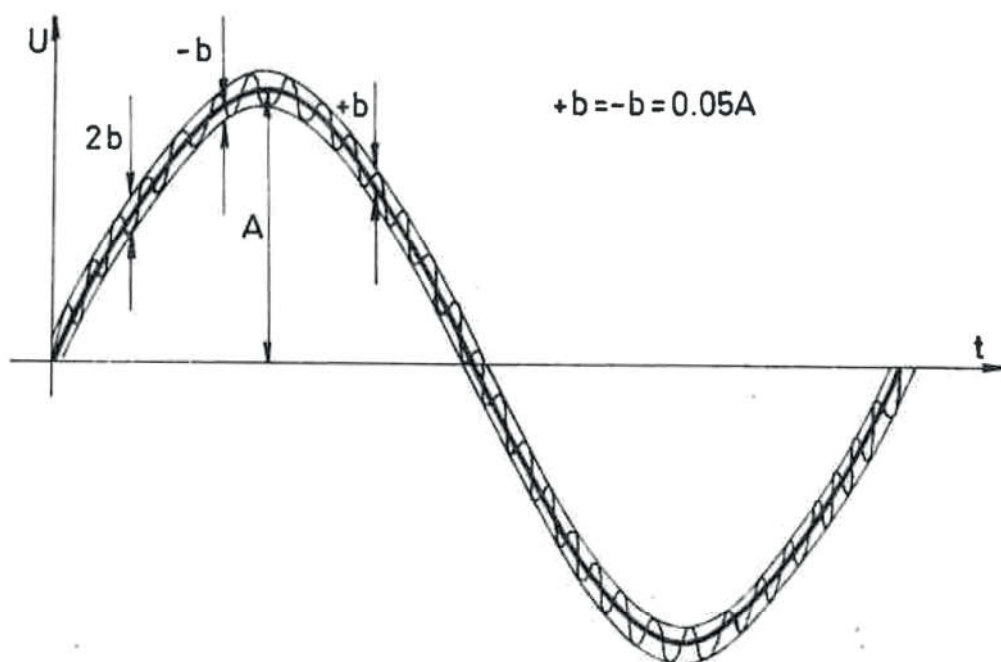
U jednadžbama za faktore namota se, prema tome, za više harmonike napona treba računati samo sa v-puta većim kutevima, dok sve ostalo ostaje nepromijenjeno; time dobijemo za v-ti harmonik slijedeće jednadžbe:

$$f_{zv} = \frac{\sin q \frac{v\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}} \quad (2.3-04)$$

$$f_{sv} = \sin \left(\frac{vs}{\tau} \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.3-05)$$

Moramo uvijek paziti na to, da li se radi o prostornom v-tom harmoniku ili o vremenskom. U našem slučaju smo imali v-ti

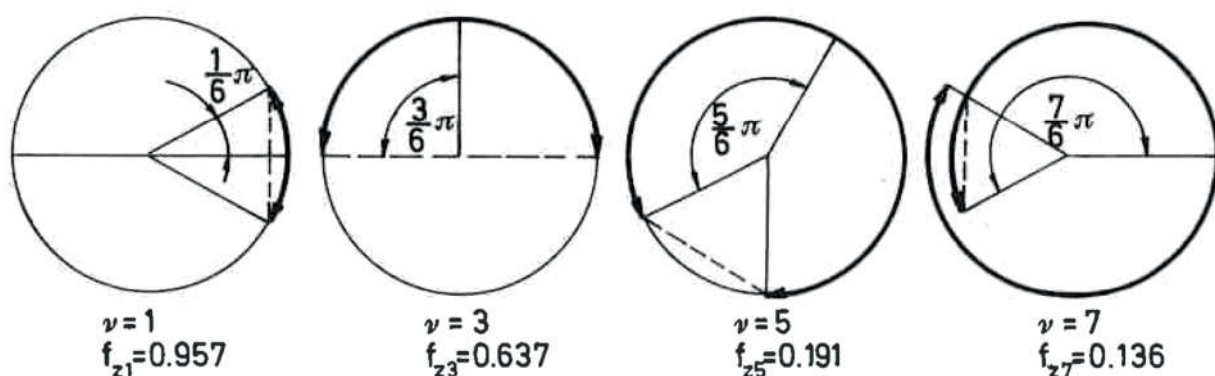
prostorni harmonik u polju, koji u štapovima namota inducira v -ti vremenski harmonik napona. Inducirani naponi viših harmonika su nepoželjni. Propisi traže da generator na stezaljkama ne smije ni na jednom mjestu u krivulji napona prema sl. 2.3-11 imati odstupanja od sinusoide osnovnog harmonika veće



Sl. 2.3-11 Dozvoljena odstupanja krivulje napona od sinusoide od $\pm 5\%$ amplitudne vrijednosti osnovnog harmonika. Tu nam pomažu faktori namota za više harmonike. S izvedbom namota moramo tako kombinirati da budu faktori namota za osnovni harmonik što veći, a naprotiv za više harmonike što manji. Time ćemo postići da kraj relativno jakih viših harmoničkih članova u obliku polja dobijemo u sumarnom naponu na stezaljkama generatora relativno slabe više harmoničke članove.

Ako imamo samo jedan utor na pol i fazu: $q=1$, onda je zonski faktor namota prema jednadžbi (2.3-04) za sve harmoničke članove jednak jedinici, pa se oblik polja vjerno prenosi u oblik krivulje napona na stezaljkama generatora.

Ako idemo u drugu krajnost i računamo s beskonačnim brojem utora, onda dobijemo sl. 2.3-12 u kojoj je faktor namota za 1., 3., 5. i 7. harmonik grafički i prikazan s omjerom geometrijske sume (crtkano) prema algebarskoj sumi (puna crta).



Sl. 2.3-12 Zonski faktori za 1., 3., 5. i 7. harmonik u slučaju beskonačnog broja utora

Iz sl. 2.3-12 lijepo vidimo kako kod beskonačnog broja utora zonski faktori namota jako prigušuju više harmonike. Što su višeg reda to je prigušenje veće. Naravno, ne možemo napraviti beskonačan broj utora. Praktički dolazimo do zaključka da sa $q=4$ još možemo u tolikoj mjeri prigušiti više harmonike s faktorom namota, da uspjevamo zadovoljiti propisima u pogledu prije spomenutog maksimalno 5-postotnog odstupanja od čiste sinusoide. Ako na statoru nema mjesta za toliko broj utora, koji bi odgovarao $q=4$, onda moramo pribjeći drugim sredstvima, tzv. namotu s razlomljenim brojem utora, o čemu će biti govora u pogl. 2.41. I s faktorom skraćanja koraka možemo u tom pogledu mnogo pomoći. Iz jednadžbe

$$f_s = \sin \left(\nu \frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2} \right)$$

vidimo da, ako toliko skratimo korak, da je izraz $\nu s / \tau_p = 2 \cdot n$ $n=1,2,3,\dots$ ili višekratnik od 2, onda je za dotični ν -ti harmonik faktor skraćenog koraka jednak nuli:

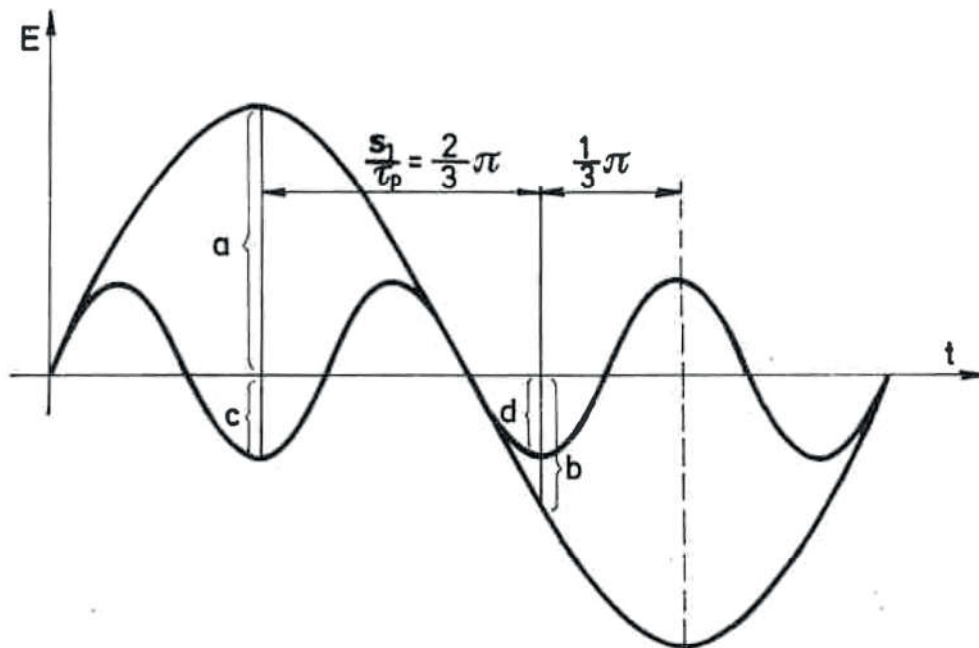
$$f_{s\nu} = \sin \cdot 2 \cdot n \frac{\pi}{2} = 0$$

pa prema tome možemo jedan određeni viši harmonik potpuno eliminirati. Ako npr. kod 4-polnog generatora sa 60 utora skratimo korak od punog koraka 15/15 na skraćeni korak

$$\frac{s_1}{\tau_p} = \frac{12}{15} = \frac{4}{5}$$

onda je za 5. harmonik: $f_{s5} = \sin 5 \frac{4}{5} \frac{\pi}{2} = 0$ pa 5.harmonik u naponu na stezaljkama generatora potpuno nestaje.

Općenito možemo reći: "Ako skratimo korak za $1/v$, onda dotični v -ti harmonik potpuno nestaje". To možemo prikazati u vremenskom dijagramu napona prema sl. 2.3-13 u kojem



Sl. 2.3-13 Vremenski dijagram napona za osnovni i treći harmonik

je nacrtan osnovni i treći harmonik. Korak je skraćen na dvije trećine. Nacrtan je trenutak kada se jedna od stranica svitka nalazi u maksimumu osnovnog harmonika. U zavoju se dobije razlika momentanih vrijednosti kao suma.

Za osnovni harmonik dobijemo:

$$a - (-b) = a + b$$

a za treći harmonik:

$$(-c) - (-d) = -c + d = 0$$

Za treći harmonik postoji još jedna mogućnost njegovog eliminiranja, i to sa spojem zvijezda bez nul-voda ili sa spojem trokut. Ni u jednom kao ni u drugom slučaju se ne može

treći harmonik pojaviti u mreži, kako to već znamo iz teorije transformatora. U prvom slučaju pleše izolirana nul-točka oko nul-točke mreže s naponom trećeg harmonika, što ne smeta, a u drugom slučaju se istofazni treći harmonik poništava u kratkom spoju unutar trokuta namota. Ako smo treći harmonik eliminirali spojem, a peti sa skraćanjem koraka, onda nam ostaju samo još sedmi i viši od njega.

Tabelarni pregled zonskih faktora namota za osnovni i za više harmoničke članove je dat u tabeli I.

T a b e l a I

q	v=1	3	5	7	9	11
1	1	1	1	1	1	1
2	0,966	0,707	0,259	-0,259	-0,707	-0,966
3	0,960	0,667	0,218	-0,177	-0,333	-0,177
4	0,958	0,653	0,205	-0,158	-0,271	-0,126
6	0,956	0,644	0,197	-0,145	-0,236	-0,102
10	0,955	0,639	0,193	-0,140	-0,220	-0,092
∞	0,955	0,637	0,191	-0,136	-0,212	-0,087

2.4. Poništavanje viših harmonika kod malog broja utora

2.41. Namot s razlomljenim brojem utora na pol i fazu

Oblikovanjem polnog stopala možemo postići da primarno uzbudjeno polje bude sinusno a time i inducirani napon u praznom hodu dobiva sinusni oblik. Generatore, međjutim, gradimo za opterećenje kod kojeg dobijemo reakciju armature, koja pogotovo kod izraženih polova prouzrokuje jaku deformaciju polja. Prema tome je oblik polnog stopala sa sinusnom raspodjelom polja u praznom hodu beskoristan za slučaj tereta. Ne preostaje nam drugo, nego faktorima namota u što većoj mjeri izbrisati sve više harmonike, kako je to opisano u pogl. 2.35. To je bilo uvjetovano time, da broj utora na pol i fazu mora biti:

$$q \geq 4$$

a to znači kod trofaznog generatora 12 utora po polu. Kod brzohodnih generatora s malim brojem polova to nije teško postići, jer je polni korak relativno velik. Kod sporohodnih generatora je to praktički nemoguće. Morali bi uzeti jako uske utore s velikim rasipanjem i velikim udjelom utorske izolacije, odnosno s jako lošim faktorom punjenja utora. Rješenje tog problema predstavlja namot s razlomljenim brojem utora na pol i fazu:

$$q \neq \text{cijeli broj}$$

Ako, naime, imamo razlomljeni broj utora, onda možemo postići, da utori iste faze pod raznim polovima ne leže u istom položaju u odnosu na os pola. Radi toga možemo dobiti toliki broj vektora, koliki je ukupni broj utora, a ne samo toliki broj vektora, koliko ima utora po jednom paru polova, kako je to slučaj kod namota sa cijelim brojem utora na pol i fazu. Nužno je da moramo kod namota s razlomljenim brojem utora ispuniti izvjesne uvjete simetrije. No, u te se detalje ne ćemo upuštati, već ćemo samo prikazati mogućnosti izvedbe takvog namota na tri karakteristična primjera.

Primjer 1

Broj utora: $N = 36$, Broj pari polova: $p = 5$

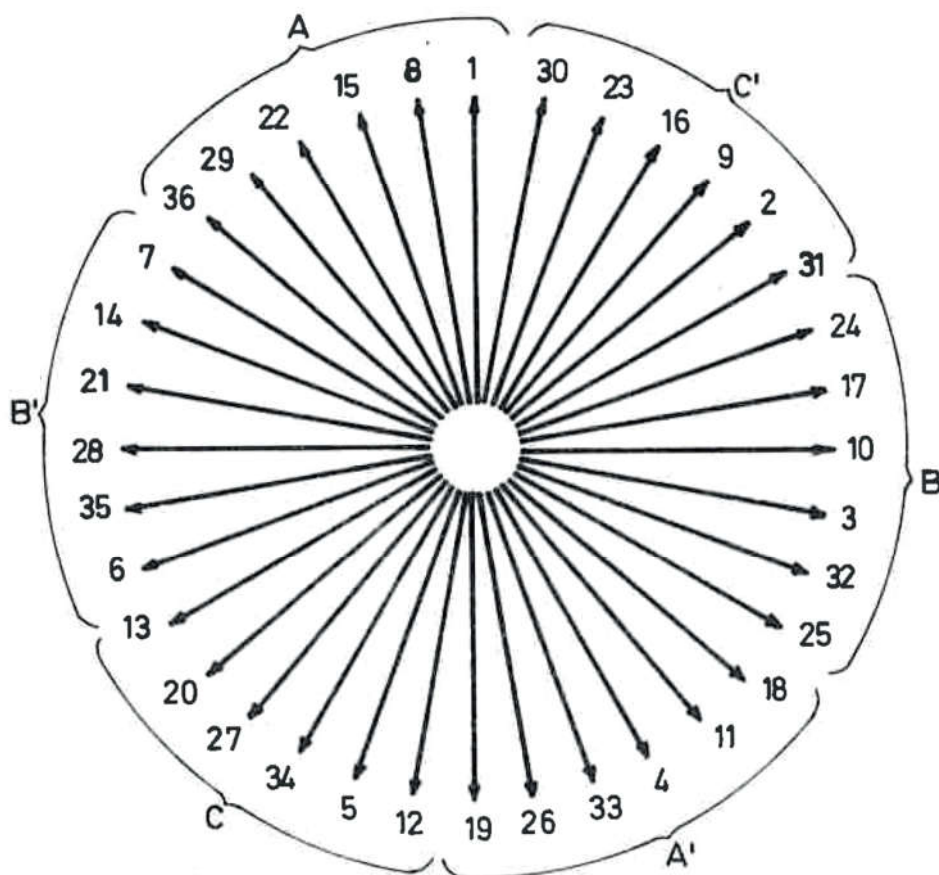
Broj utora na pol i fazu: $q = \frac{N}{2pm} = \frac{36}{2 \cdot 5 \cdot 3} = 1\frac{1}{5}$

Električki kut između utora: $\alpha = p \frac{360}{N} = 5 \frac{360}{36} = 50^\circ$

Na osnovu tih podataka dobijemo zvijezdu vektora, induciranih u pojedinim utorima, prema sl. 2.4-01.

Dobije se ukupno 36 vektora, upravo toliko, koliko ima utora. Na svaku fazu otpadaju dvije grupe po 6 vektora, međusobno pomaknutih za 180° , tj. A-A', B-B' i C-C'. Ako ćemo izračunati zonski faktor namota, tada moramo računati prema sl. 2.4-01 kao da je:

$$q = 6, \quad \alpha = 10^\circ$$

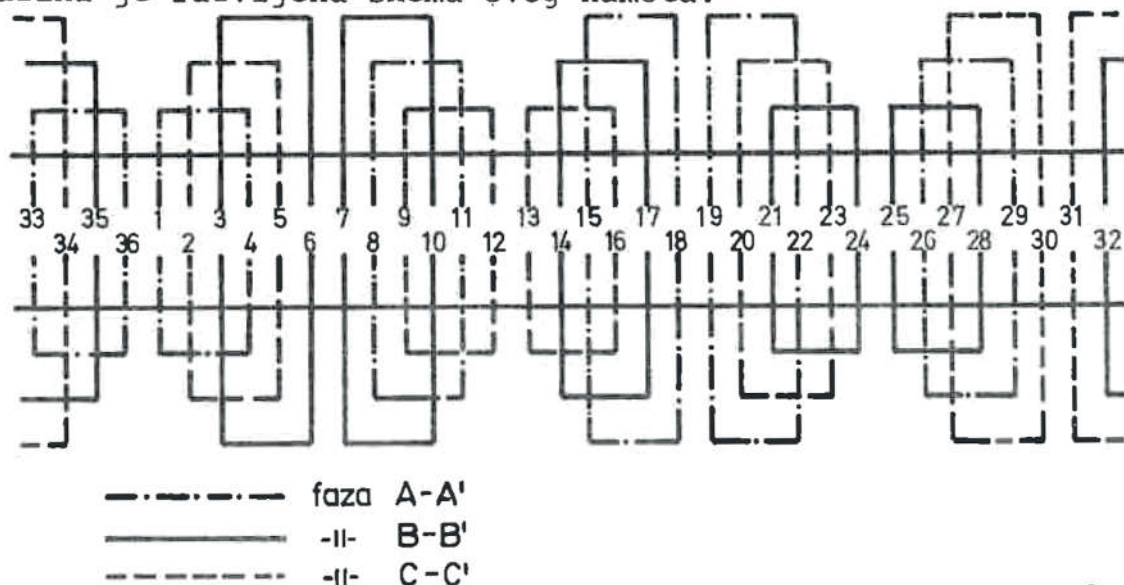


Sl. 2.4-01 Zvijezda vektora induciranih napona generatora sa $p=5$, $N=36$, $q=1\frac{1}{5}$

a ne sa računski dobivenim

$$q = 1\frac{1}{5} \quad \alpha = 50^\circ$$

jer imamo stvarno 6 vektora po svakoj fazi. U sl. 2.4-02 prikazana je razvijena shema ovog namota.



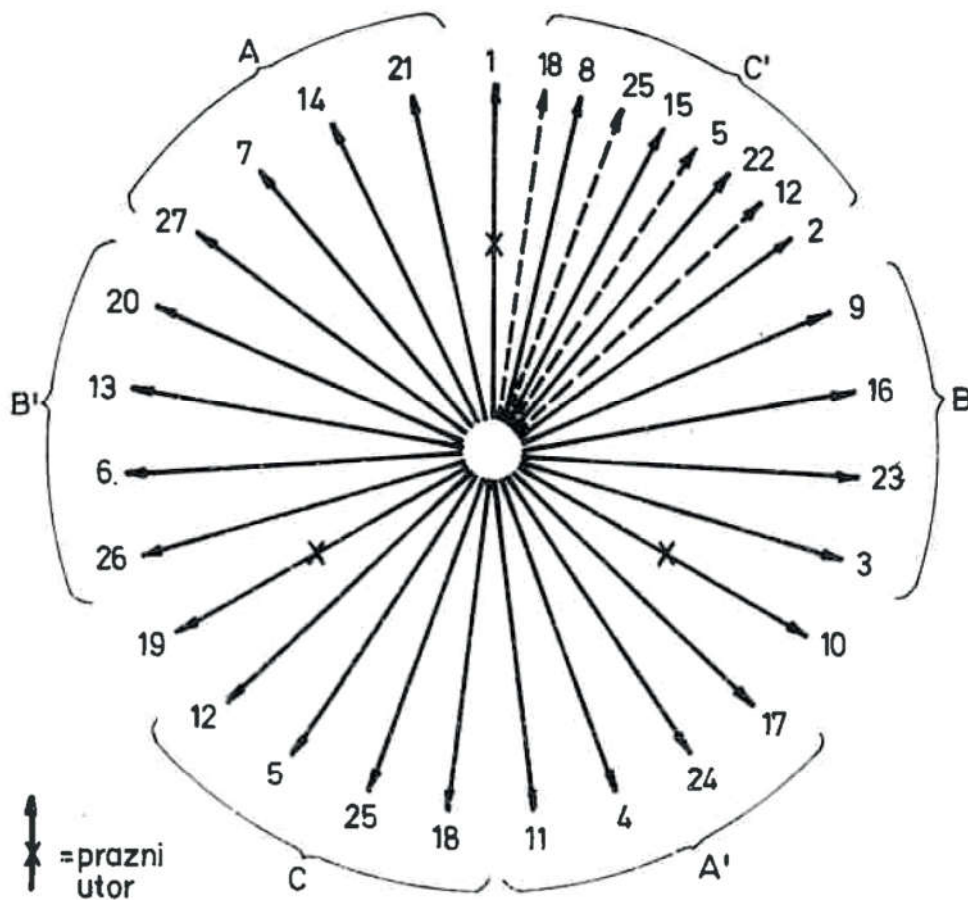
Sl. 2.4-02 Razvijena shema 3-faznog namota $p=5$, $N=36$, $q=1\frac{1}{5}$

Primjer II

$N = 27 = 24$ namotana utora + 3 prazna utora

$p = 4, \quad q = 1, \quad \alpha = 4 \frac{360}{27} = 53^{\circ}20'$

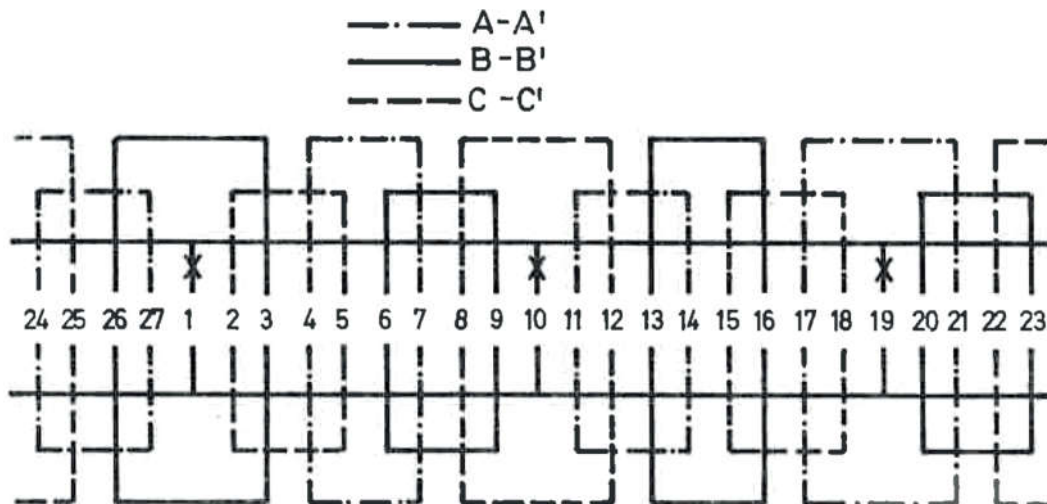
Pošto je $q=1$ morali bi svi zonski faktori biti jednaki 1. Međutim, zato što imamo još tri prazna utora, dobijemo čak 8 vektora na jednu fazu, kako to vidimo u sl.2.4-03, pa moramo zonski faktor računati sa $q=8$ i sa $\alpha=6^{\circ}40'$. U slici



Sl. 2.4-03 Zvijezda vektora za $N=27$ (24 namotana + 3 prazna), $p=4$

2.4-04 je prikazana razvijena shema ovog namota. Svaka faza ima 4 svitka, jedan s korakom 1-5, i 3 svitka s korakom 1-4.

Budući da svaka faza ima 8 različitih vektora, to dobijemo iste zonske faktore kao u slučaju da je $q=8$.

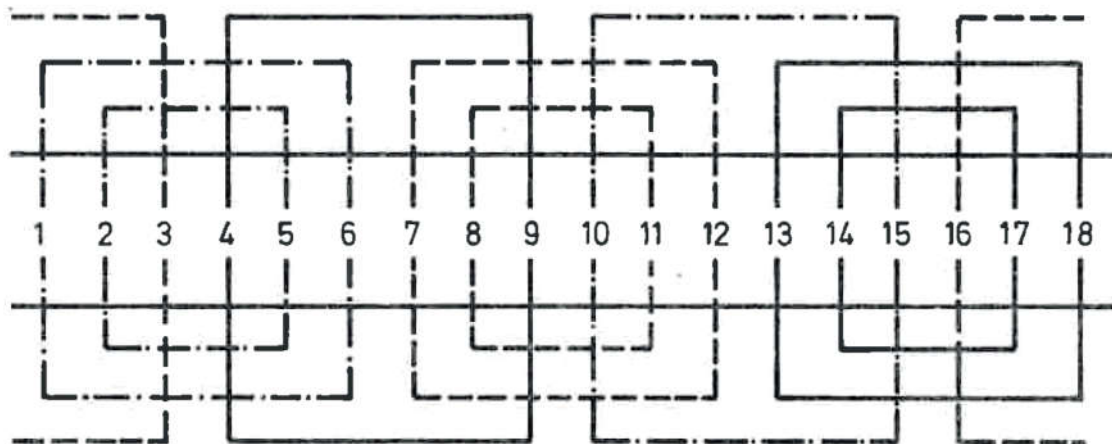


Sl. 2.4-04 Razvijena shema trofaznog namota $N=24+3$ (24 namotana + 3 prazna) $p=4$, $q=1$

Primjer III

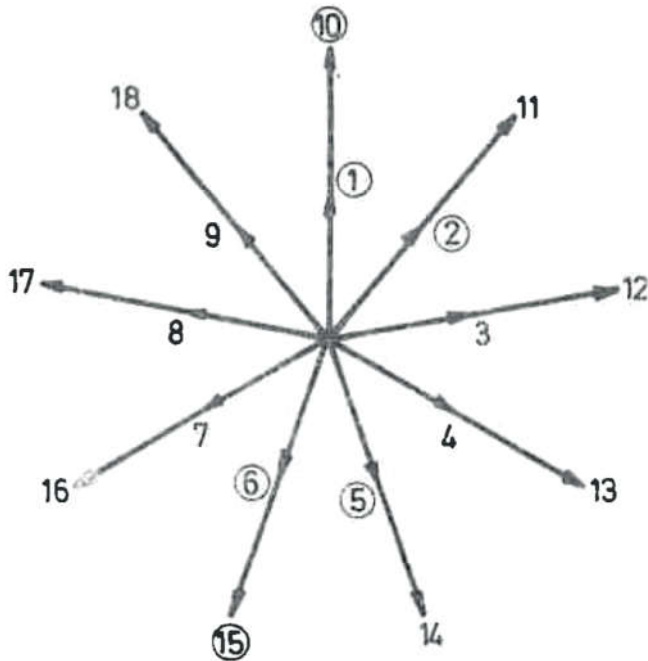
$$N = 18, \quad p = 2, \quad q = 1\frac{1}{2}, \quad \alpha = 2 \frac{360}{18} = 40^\circ$$

Razvijenu shemu pokazuje sl. 2.4-05, a vektorsku zvijezdu sl. 2.4-06.

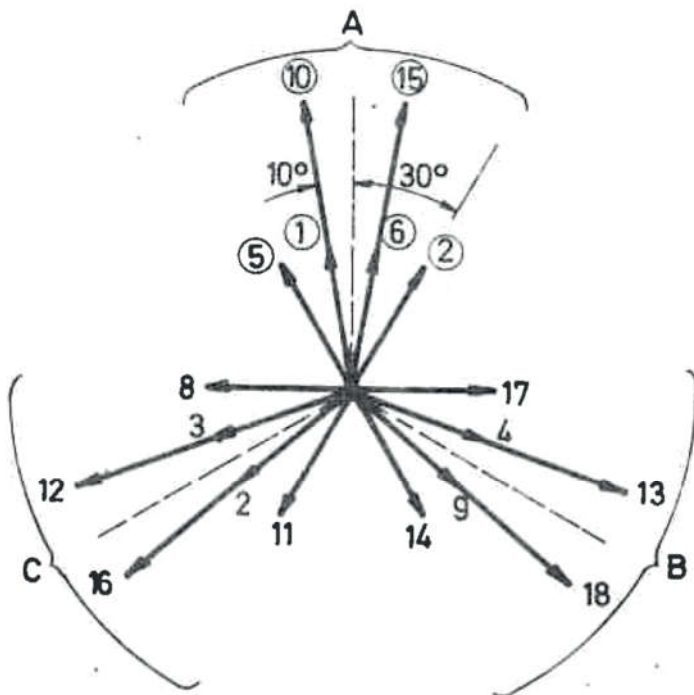


Sl. 2.4-05 Razvijena shema trofaznog namota $N=18$, $p=2$, $q=1\frac{1}{2}$

Imamo 9 različitih vektora, pomaknutih međusobno za 20° , a po dva utora imaju isti vektor. Za fazu A uzmemo 6 vektora i to: 1, 2, 5, 6, 10, 15. Faza B ima vektore 4, 9, 13, 14, 17 i 18 a faza C: 3, 7, 8, 11, 12, 16. Od svake faze mo-



Sl.2.4-06 Zvijezda za trofazni namot iz sl.2.4-05



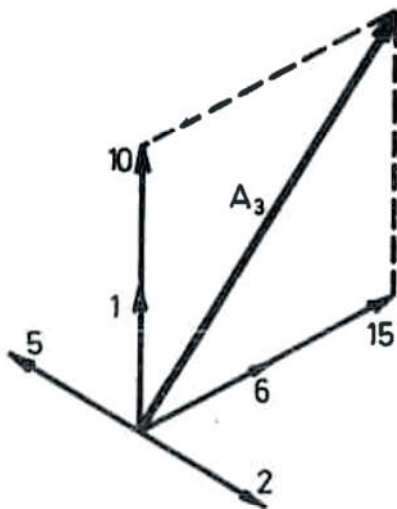
Sl.2.4-07 Vektori napona pojedinih faza iz zvijezde sl.2.4-06

harmonici	1	3	5	7	9	11
f_z	0,945	0,577	0,140	0,061	0	0,06

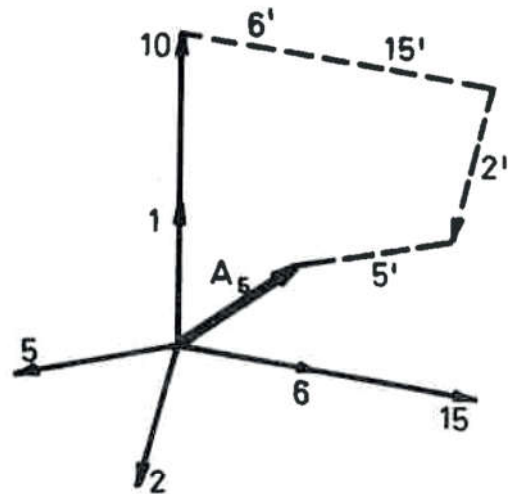
ramo polovinu vektora okrenuti u smjeru vektora koji se nalaze u drugoj stranici svitka i zajedno ih zbrojiti. Dobijemo vektorsku sliku iz koje se vidi, da su vektori pojedinih faza jednaki po veličini i jednako međusobno pomaknuti za 120° . Medjutim, ne možemo računati zonski faktor s jednažbom (2.3-01), jer imamo u pojedinim pravcima djelomično po jedan,

djelomično po dva vektora, već moramo faktor namota posebno izračunati ili grafički ustanoviti. Za treći i peti harmonik treba vektore tri puta odnosno pet puta razmaknuti pa dobijemo vektorske zvijezde prema slici 2.4-08 i 2.4-09, koja su radi preglednosti prikazana samo za jednu fazu.

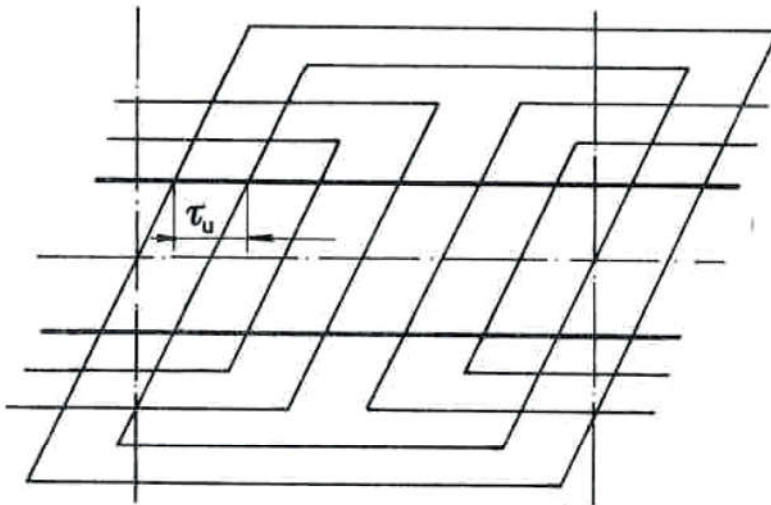
Zonski faktori iznose:



Sl.2.4-08 Zvijezda vektora napona 3.harmonika za namot iz slike 2.4-05



Sl.2.4-09 Zvijezda vektora napona 5.harmonika za namot iz slike 2.4-05

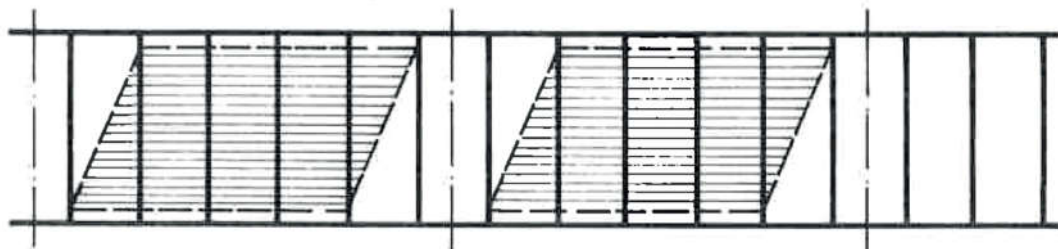


Sl. 2.4-10 Skošenje utora za utorski korak

2.42. Skošenje utora i polova

U pravilu može se reći, što viši je harmonik, to manju amplitudu ima. Iznimku čini utorski harmonik, pogotovo kod otvorenih utora, jer je magnetski otpor zračnog raspورا ispod utora mnogo veći nego ispod zuba, pa se u obliku polja pokazuje jaki harmonik utorske frekvencije.

Skošenjem utora za jedan utorski korak, kako je to prikazano u sl. 2.4-10 za $q=2$ u jednom dijelu razvijene sheme pod jednim polom, poništavamo osobito više harmonike utorske frekvencije. Umjesto skošenja utora možemo izvesti skošenje polova, kako je to u razvijenoj shemi na sl. 2.4-11 sa crtkano ucrtanim polnim stopalima prikazano.



Sl. 2.4-11 Skošenje polnih stopala

2.5. Polja

2.51. Stojeca polja

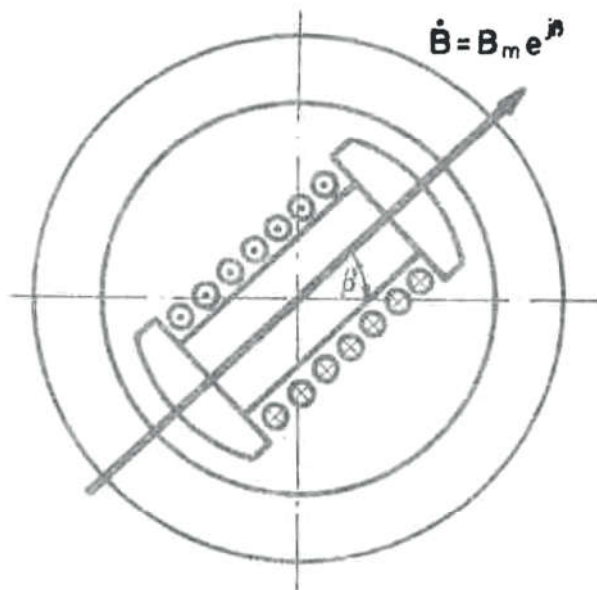
Ako uzbudimo rotor sinhronog generatora, dobijemo prema sl. 1.3-01 polje, koje je vezano uz rotor i koje prema rotoru stoji. Oblik polja zavisi o obliku polnog stopala odn. o veličini zračnog raspora. Raspored indukcije polja smo definirali jednadžbom (2.2-01). Ako se u slijedećem ograničimo samo na osnovni harmonik možemo izraziti indukciju u točki x jednadžbom:

$$B_x = B_m \sin \frac{\pi}{\tau_p} x \quad (2.5-01)$$

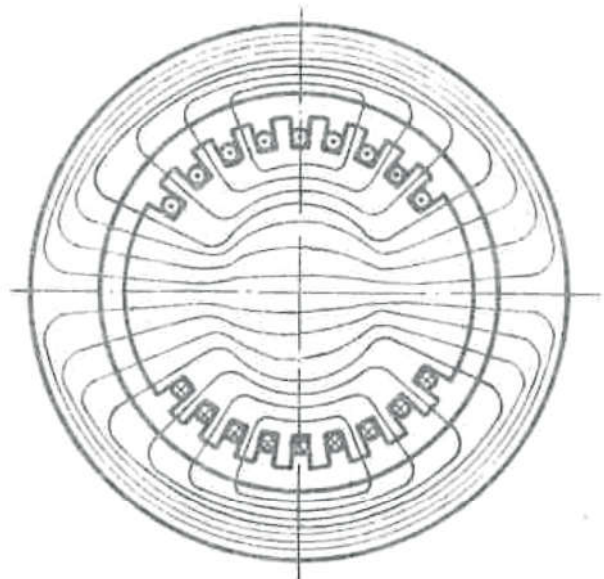
Ovo polje možemo prikazati i kao prostorno rotirajući vektor $\dot{B}$ u pravcu simetrale pola zakrenut za kut β prema apscisi koordinatnog sistema (vidi sl. 2.5-01):

$$\dot{B} = B_m \cdot e^{j\beta} \quad (2.5-02)$$

Već u pogl. 1. smo spomenuli, da se rotor za dvopolne generatore grade u obliku cilindra s neizraženim polovima. Zračni raspor (δ) je u tom slučaju konstantan, pa je indukcija na svakom mjestu u zračnom rasporu proporcionalna protjecanju, koje



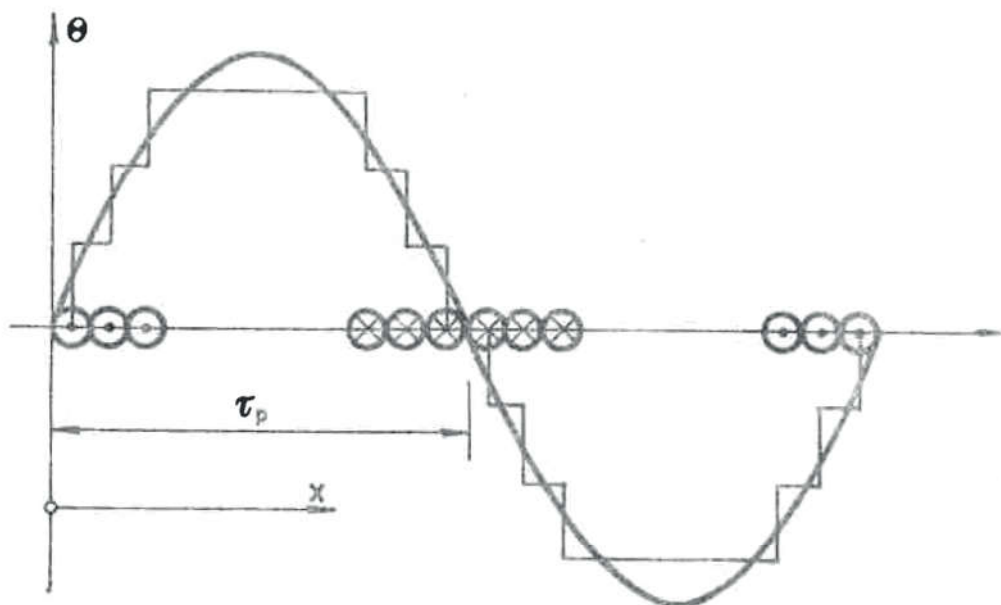
Sl. 2.5-01 Smjer vektora magnetske indukcije kod generatora sa $p=1$



Sl. 2.5-02 Presjek generatora sa neizraženim polovima

vlada na dotičnom mjestu. U sl. 2.5-02 prikazan je takav generator u presjeku.

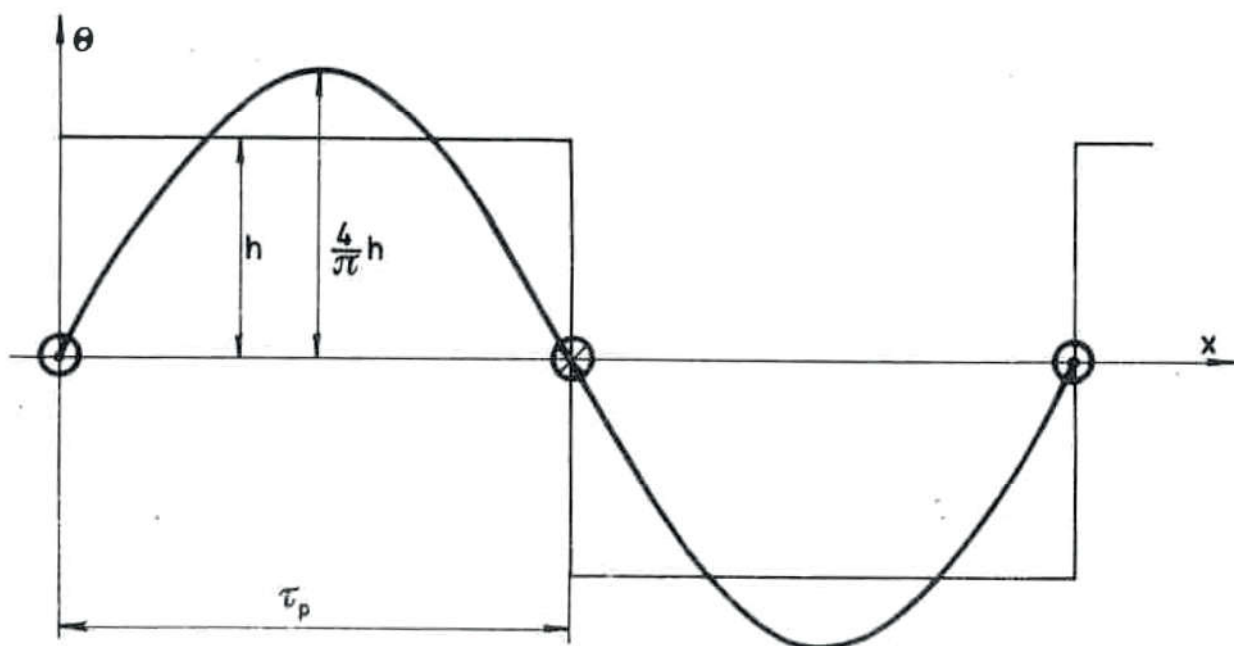
U rotoru je dvije trećine utora ispunjeno uzbuđnim namotom. Ako pretpostavljamo da su amperzavoji svakog utora koncentrirani na sredinu utora, dobijemo raspored protjecanja uzduž oboda rotora u zračnom rasporu prema sl. 2.5-03. U tom



Sl. 2.5-03 Raspored protjecanja uzduž oboda rotora sa neizraženim polovima

dijagramu ucrtan je i osnovni harmonik tog protjecanja, pa vidimo da nema baš velikih odstupanja izmedju stvarnog oblika polja i osnovnog harmonika. Isti dijagram u nekom drugom mjerilu vrijedi i za oblik polja, jer je indukcija radi konstantnog zračnog rasporeda proporcionalna protjecanju. Amplitudu osnovnog harmonika možemo računski ustanoviti na slijedeći način.

Zamislamo da imamo samo jedan svitak položen u dva utora prema sl. 2.5-04. Dobijemo pravokutni oblik protjecanja.

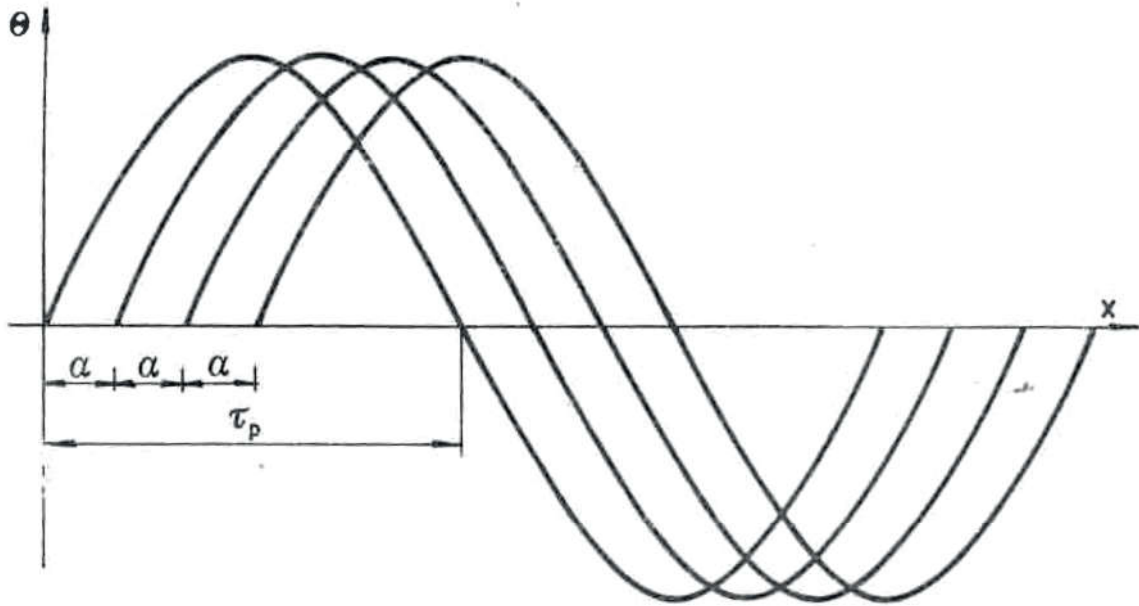


Sl. 2.5-04 Oblik protjecanja jednog svitka

Po Furier-u znamo da je amplituda osnovnog harmonika za $4/\pi$ veća od visine pravokutnika (h). Prema tome iznosi amplituda osnovnog harmonika:

$$\theta = \frac{4}{\pi} I_1 \frac{w_1}{2} \quad (2.5-03)$$

Ako imamo više svitaka uloženi u veći broj utora, koji su međusobno pomaknuti za geometrijski kut α_g , onda dobijemo prema sl. 2.5-05 više međusobno za kut α_g odn. za električki kut α pomaknutih sinusoida, koje možemo prikazati s vektorima fazno pomaknutim za kut α . Na isti način možemo izvršiti geometrijsko zbrajanje tih vektora, kako smo to učinili u pogl. 2.3. vektorima napona pomoću zonskog faktora namota



Sl. 2.5-05 Osnovni harmonici protjecanja od svitaka položenih u više utora

(f_z). Kod dvopolnog generatora je geometrijski kut jednak električnome:

$$\alpha_g = \alpha$$

Prema tome iznosi amplituda osnovnog harmonika ukupnog protjecanja ispod jednog pola:

$$\theta_1 = \frac{4}{\pi} \frac{w_1 f_{z1}}{2p} I_1 = 0,637 \cdot \frac{w_1 f_{z1}}{p} I_1 \quad (2.5-04)$$

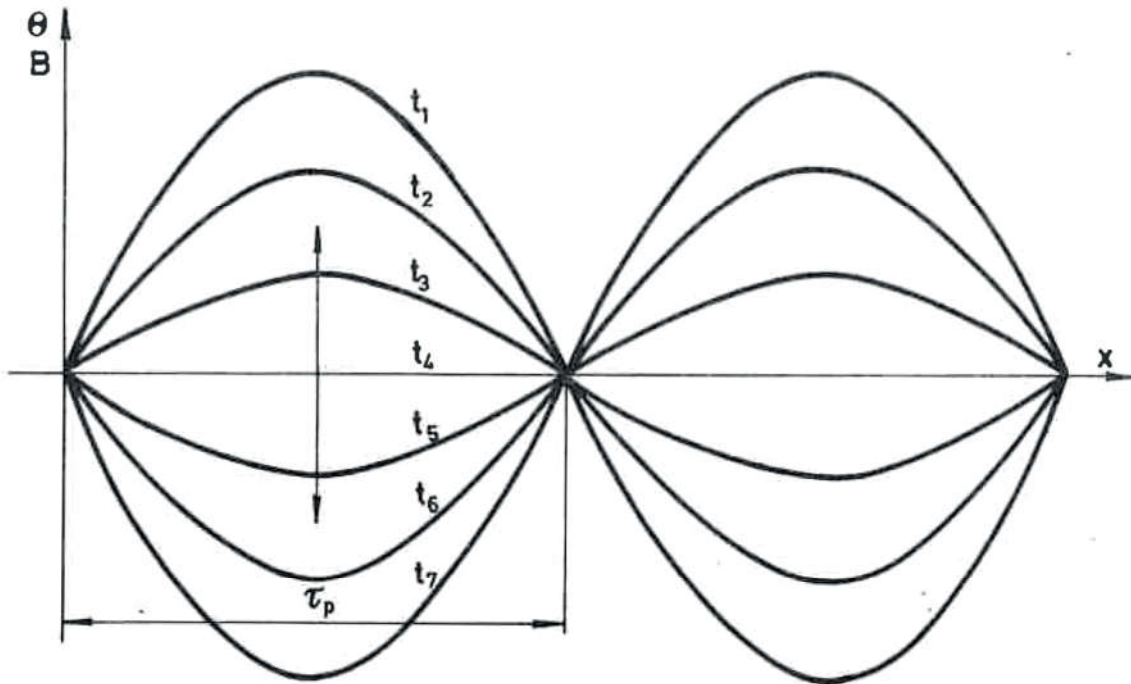
Ako je " w_1 " broj zavoja na rotoru a $q = N_1/2p$ (gdje je N_1 broj namotanih utora rotora) onda je:

$$f_{z1} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

2.52. Izmjenična polja

U statoru se induciraju izmjenični naponi, pa su prema tome i struje izmjenične. Ako uzmemo namot jedne faze sa " q " utora na pol i fazu, onda dobijemo isto takvo protje-

canje kao kod turborotora, s tom razlikom da je protjecanje izmjenično, a mijenja se od svog maksimuma u jednom pravcu do svog maksimuma u drugom pravcu. Prema tome dobijemo kod konstantnog zračnog raspora (δ) obzirom na stator stojeće njihajuće polje prema sl. 2.5-06, koje je proporcionalno pripadnom protjecanju.



Sl. 2.5-06 Prostorna raspodjela osnovnog harmonika protjecanja i magnetske indukcije od izmjenične struje jedne faze statora

Amplitudna vrijednost maksimalnog protjecanja kod maksimalne vrijednosti izmjenične struje $I_{2ef}\sqrt{2}$ iznosi:

$$\theta_2 = \frac{4}{\pi} I_2 \sqrt{2} \frac{w_2^f n_2}{2p} = 0,9 \frac{w_2^f n_2}{p} I_2 \quad (2.5-05)$$

Ako dijelimo protjecanje (θ_2) sa magnetskim otporom magnetskog kruga, dobijemo amplitudnu vrijednost njihajućeg polja, uzbuđenog od namota jedne faze statora. To njihajuće polje se mijenja u ovisnosti od položaja "x" i od vremena "t" pa ga možemo izraziti jednadžbom:

$$B_{(x,t)} = B_m \sin \left(\frac{\pi x}{\tau_p} \right) \cdot \cos \omega t \quad (2.5-06)$$

gdje je ω kružna frekvencija izmjenične struje

$$\omega = 2\pi f$$

To polje možemo prikazati prostorno rotirajućim vektorom:

$$\dot{B} = B_m e^{j\beta} e^{j\omega t} \quad (2.5-07)$$

2.53. Okretno polje

Ako istosmjernom strujom uzbuđjeni rotor vrtimo, onda polje obzirom na rotor stoji, no obzirom na okolinu se vrti pa dobijemo time okretno polje. Pretpostavljamo sinusni oblik polja. To polje možemo izraziti jednadžbom:

$$B(x, t) = B_m \sin \left(\frac{\pi}{\tau_p} x \pm \omega t \right)$$

Dokažimo to:

Za određeno mjesto "x" vrijedi izraz $\frac{\pi}{\tau_p} x = \text{konstanta}$ pa se na tom mjestu mijenja indukcija vremenski po sinusoidi. Za određeni trenutak je: $\omega t = \text{konstanta}$, pa se indukcija po provrtu statora mijenja sinusoidalno.

Ako se rotor vrti sa "n" okretaja u minuti, onda je brzina vala polja, tj. brzina (v) s kojom se maksimum polja kreće po provrtu statora:

$$v = \frac{n}{60} 2\pi \tau_p \text{ (m/sek)}$$

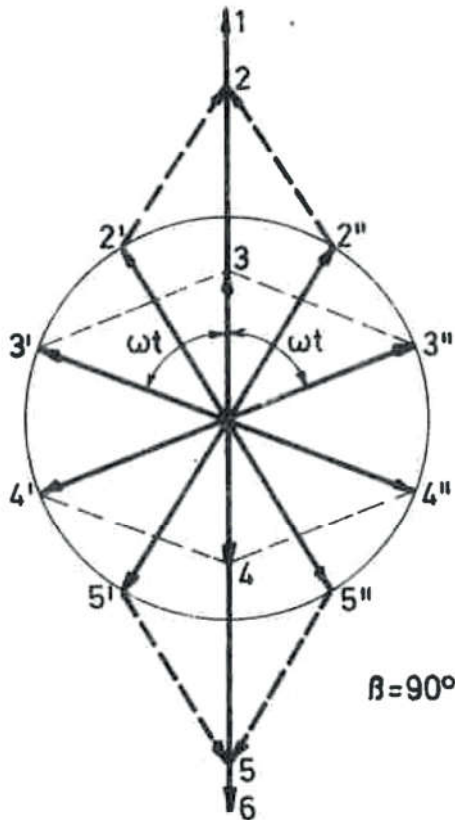
Pošto je $f = \frac{pn}{60}$ to je $v = 2\tau_p f$

Ako je $f = 50 \text{ Hz}$ onda je $v = 2 \cdot 50 \cdot \tau_p = 100 \tau_p$

odnosno, koliko iznosi polni korak u cm toliko iznosi brzina vala polja a time i obodna brzina rotora m/sek.

Okretno polje možemo izraziti prostorno rotirajućim vektorom:

$$\dot{B} = B_m e^{-j\omega t} e^{j\beta} \quad (2.5-08)$$



Sl.2.5-07 Rastavljanje vektora 1-faznog izmjeničnog pola u dva rotirajuća vektora okretnog polja

Predznak (-) znači okretanje na desno, predznak (+) okretanje na lijevo. Svako jednofazno njihajuće polje $B_m \cos \omega t$ možemo ekvivalentno zamijeniti s dva okretna polja s pola amplitude jednofaznog polja, koja se okreću u suprotnim pravcima prema jednađbi:

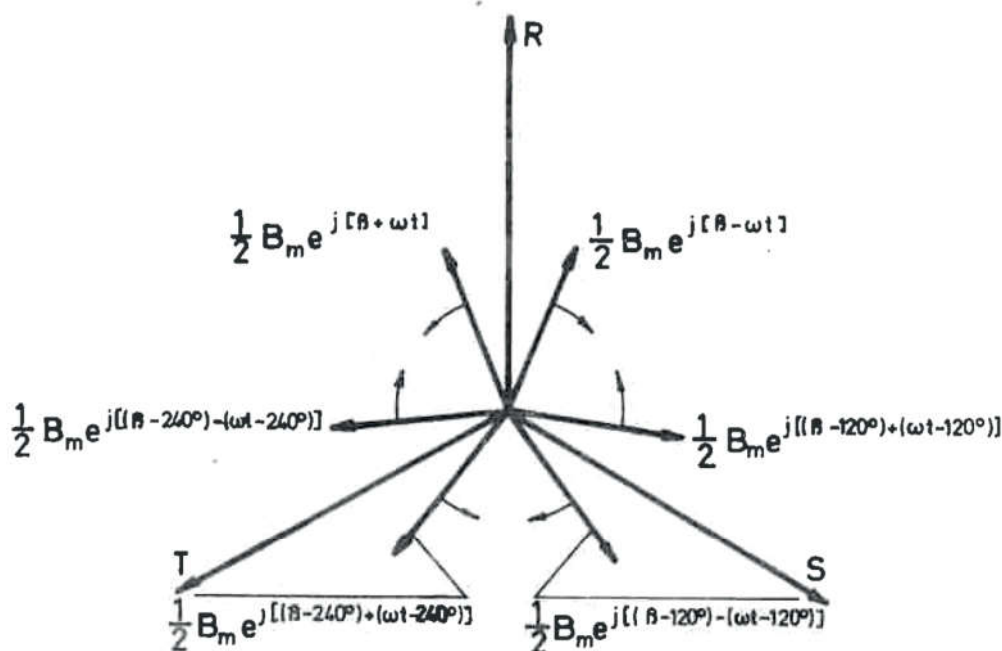
$$B_m \cos \omega t \cdot e^{j\beta} = \left(\frac{1}{2} B_m e^{j\omega t} + \frac{1}{2} B_m e^{-j\omega t} \right) \cdot e^{j\beta} = \dot{B}_d + \dot{B}_i \quad (2.5-09)$$

kako je to prikazano u slici 2.5-07 za $\beta = 90^\circ$.

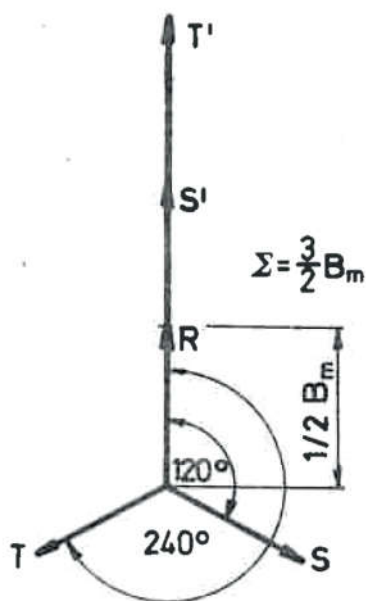
Kod trofaznog namota u statoru možemo stojeće njihajuće polje svake faze zamijeniti s dva okretna polja koja se okreću u suprotnim pravcima, samo moramo uzeti u obzir prostorni pomak i vremenski pomak

između faza. To je učinjeno u vektorskom dijagramu u sl.2.5-07. Ako u sl. 2.5-08 zbrojimo sve vektore, koji se vrte na desno u pravcu redoslijeda faza RST, moramo uzeti u obzir još i vremensko zakašnjenje druge i treće faze za 120° odn. 240° . Označimo još polje, koje se okreće u pravcu redoslijeda faza, u našem slučaju u pravcu na desno, kao direktno okretno polje sa indeksom "d", a polje koje se okreće u protivnom pravcu kao inverzno okretno polje sa indeksom "i". Tada dobijemo za direktno okretno polje:

$$\begin{aligned} \dot{\Sigma B}_d &= \frac{1}{2} B_m [e^{j\beta} e^{-j\omega t} + e^{j(\beta-120^\circ)} e^{-j(\omega t-120^\circ)} + e^{j(\beta-240^\circ)} e^{-j(\omega t-240^\circ)}] = \\ &= \frac{1}{2} B_m [e^{j(\beta-\omega t)} + e^{j[(\beta-120^\circ)-(\omega t-120^\circ)]} + e^{j[(\beta-240^\circ)-(\omega t-240^\circ)]}] = \\ &= \frac{3}{2} B_m e^{j(\beta-\omega t)} = \frac{3}{2} B_m [\cos(\beta-\omega t) + j \sin(\beta-\omega t)] \end{aligned}$$



Sl. 2.5-08 Rastavljanje vektora jednofaznog izmjeničnog polja pojedinih faza kod trofaznog sistema u pripadne vektore okretnog polja



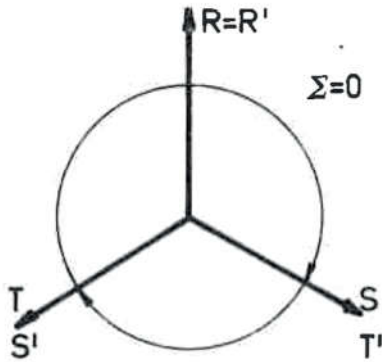
Sl.2.5-09 Vektori direktnog okretnog polja iz sl.2.5-08 koji se vrte na desno

gdje je $\beta = \frac{\pi}{\tau_p} x$ i karakterizira mjesto promatranja na obodu stroja.

To vektorsko zbrajanje direktnih komponenta polja je prikazano u sl. 2.5-09. Pošto faza "S" vremenski zaostaje za 120° , treba je zaokrenuti u protivnom pravcu njezinog okretanja za 120° , pa se dobije vektor "S'". Jednako fazu "T" za 240° pa se dobije "T'". Suma svih triju vektora koji se okreću u desno, daje tri polovine odnosno 150% amplitudne vrijednosti stojećeg polja jedne faze. To se rezultirajuće polje vrte u pravcu na desno.

Geometrijska suma vektora inverznih okretnih polja, koja se okreću na lijevo, iznosi:

$$\begin{aligned} \dot{\Sigma B}_i = & \frac{1}{2} B_m \{ e^{j(\beta + \omega t)} + e^{j[(\beta - 120^\circ) + (\omega t - 120^\circ)]} + \\ & + e^{j[(\beta - 240^\circ) + (\omega t - 240^\circ)]} \} = 0 \end{aligned} \quad (2.5-11)$$



Sl.2.5-10 Vektori inverznog okretnog polja iz sl.2.4-08 koji se vrte na lijevo

što je vektorski prikazano u sl.2.5-10. Pomakom vektora "S" i "T" za 120° odn. 240° protivno pravcu vrtnje inverznih polja, tj. na desno dobijemo da se vektori "S" i "T" međusobno samo zamijene, pa prema tome dobijemo zvijezdu vektora $R'S'T'$, koji u sumi daju nulu.

Kao rezultat triju jednofaznih polja dobijemo, prema tome, samo jedno okretno polje, koje se vrti u pravcu redoslijeda faza.

Iz provedenog razmatranja možemo općenito zaključiti:

Svaki simetrični m-fazni strujni sistem, koji se mijenja vremenski po sinusoidi a koji je ugrađen u simetričnom generatoru tako da je prostorni kutni pomak faznih namota jednak vremenskom kutnom pomaku faza dijeljenom s brojem pari polova, uzbudi u generatoru jedno okretno polje koje se okreće sa sinhronom brzinom $n=60 \cdot f/p$, čija amplituda je za $m/2$ puta veća od amplitude polja jedne faze. Ako narinuti višefazni sistem nije simetričan, možemo ga metodom simetričnih komponenta razdijeliti na direktni, inverzni i nulti sistem, te dobijemo jedno direktno okretno polje, jedno inverzno polje i jedno polje, koje ne rotira.

Sa jednačbom (2.5-08) $\dot{B} = B_m e^{-j\omega t} e^{j\beta}$ smo izrazili osnovni harmonik okretnog polja uzbudjen primarnim amperzavojima rotora; ovaj harmonik se vrti s rotorom u desnom pravcu. Analizom sekundarnih trofaznih amperzavoja u statoru dokazali smo da prema jednačbi (2.5-09) iz njih rezultira osnovni harmonik okretnog polja, prikazan vektorom

$$\dot{B}_d = \frac{3}{2} B_m e^{-j\omega t} e^{j\beta}$$

Dolazimo time do vrlo važnog zaključka, da se okretno polje primarnog namota i polje sekundarnog namota okreću sinhrono s brzinom vrtnje rotora. Rotorsko polje prema rotoru stoji, prema tome i statorsko okretno polje prema rotoru stoji.

Prema tome možemo u jednom vektorskom dijagramu s vektorima prikazati oba protjecanja, rotorsko i statorsko, jer imaju oba istu kružnu frekvenciju i može ih se zbrojiti u jedno rezultatno protjecanje koje određuje rezultatno polje.

2.6. Reakcija armature

2.61. Rotor s neizraženim polovima

Polje u generatoru zavisi o primarnom i sekundarnom protjecanju. Primarnim amperzavojima uzbudimo generator, a kad ga opteretimo, onda sekundarni amperzavoji djeluju protiv primarne uzbude. Govorimo o reakciji armature.

Zbrajati polja prema zakonima superpozicije možemo samo onda, ako su odnosi između protjecanja i polja linearni. To, međjutim, u željezu radi pojave zasićenja nije moguće. Zato moramo najprije izračunati rezultirajuće protjecanje, tek onda polje. Sva prethodna razmatranja o poljima, tj. o rasporedu indukcije uzduž zračnog raspora vrijede adekvatno i za raspored protjecanja ispod jednog magnetskog pola. Odnosi između struja i protjecanja su linearni, pa zato za protjecanja vrijede zakoni superpozicije i možemo njihove vektore zbrajati i odbijati. U stvari mi u vektorskim dijagramima prikazujemo samo vektore struja, jer su isti ionako proporcionalni protjecanjima, pošto je broj zavoja nepromjenjiv. U pogl. 2.52. ustanovili smo s jednadžbom (2.5-05) koliko iznosi protjecanje osnovnog harmonika za jedan jednofazni namot. Prema tome za trofazni namot dobijemo jedno okretno protjecanje, koje ima amplitudnu vrijednost za $m/2$ puta veću tj.

$$\theta_2 = \frac{m}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{w_2^f n_2}{2p} = 0,45 m \frac{w_2^f n_2}{p} I_2 \quad (2.6-01)$$

To je amplitudna vrijednost osnovnog harmonika statorskog sekundarnog protjecanja ispod jednog pola. U generatoru, kojeg smo uzbudili s primarnom strujom I_1 i koji je opterećen sa sekundarnom strujom I_2 , ovisi polje o obadva protjecanja: primarnom θ_1 i sekundarnom θ_2 . Ako u vektorskim dijagramima u-

mjesto vektora protjecanja crtamo samo vektore struja, moramo ih svesti na isti nazivnik prije, no što ih zbrajamo, isto tako kako smo to učinili kod transformatora, kad smo struju preračunavali sa sekundarne strane na primarnu. Sa jednadžbom (2.5-04) smo ustanovili amplitudu primarnog protjecanja. Ako želimo sekundarnu struju I_2 preračunati na primarnu stranu, onda je to ona struja I_2' koja u primarnom namotu daje isto protjecanje kao sekundarna struja I_2 u sekundarnom namotu. Dakle, kod trofaznog namota:

$$0,45 \cdot 3 \cdot \frac{w_2 f_{n2}}{p} \cdot I_2 = 0,637 \cdot \frac{w_1 f_{n1}}{p} \cdot I_2'$$

a odavle:

$$I_2' = 2,12 \cdot \frac{w_2 f_{n2}}{w_1 f_{n1}} \cdot I_2 = g \cdot I_2$$

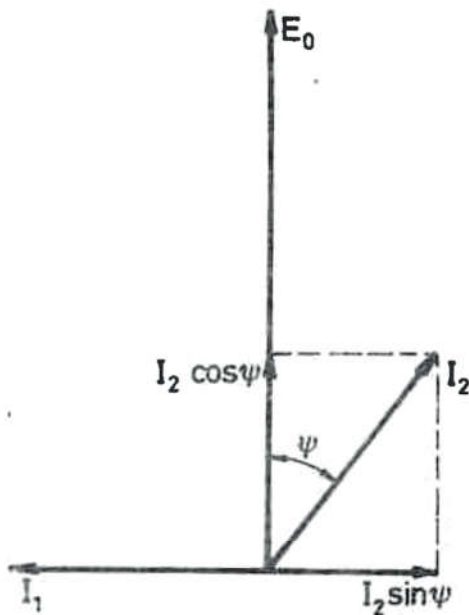
Faktor preračunavanja sekundarne struje na primarnu stranu iznosi prema tome:

$$g = 2,12 \cdot \frac{w_2 f_{n2}}{w_1 f_{n1}} \quad (2.6-02)$$

To vrijedi naravno samo za turbogenerator (generator s neizraženim polovima) sa konstantnim zračnim rasporedom.

2.62. Rotor sa izraženim polovima

Protjecanje rotora djeluje uvijek u simetrali pola. Zavoj, u kojem se prema jednadžbi $e = Blv$ inducira momentana maksimalna vrijednost napona, leži u utorima na sredini pola a ima svoju simetralu pomaknutu za 90° suprotno od pravca okretanja rotora, kako se to vidi iz sl. 2.6-01. Prema tome treba vektor induciranog napona zaostajati 90° za vektorom uzbudne struje, kako je to prikazano u vektorskom dijagramu u sl. 2.6-03. Označimo vektor napona, kojeg inducira primarno protjecanje, kao unutarnji napon generatora, sa E_0 . Vektor sekundarne struje ovisi o teretu a njegov kut može iznositi bilo koju vrijed-



Sl.2.6-03 Vektorski dijagram sinhronog generatora pod opterećenjem

nost kutnog područja $\pm 90^\circ$ oko vektora napona na stezaljkama generatora $\underline{U}_2$, tj. od čisto induktivnog do čisto kapacitivnog tereta. Os djelovanja sekundarnih amperzavoja, tj. reakcije armature, može biti prema tome u proizvoljnom pravcu. Kod generatora s neizraženim polovima nas to ne smeta, jer je magnetski otpor svugdje po obodu rotora isti. Iz vektora protjecanja možemo zato računati vektor indukcije na jednak način kod bilo kojeg položaja vektora protjecanja. Kod izraženih polova, međjutim, moramo

razlikovati protjecanje u osi pola od protjecanja u simetrali između polova. Prema tome, moramo razdijeliti sekundarnu struju na tzv. uzdužnu struju

$$I_{2d} = I_2 \sin \psi$$

i poprečnu struju

$$I_{2q} = I_2 \cos \psi$$

i svaku za sebe preračunati na primarnu stranu. U sl. 2.6-02 prikazan je zračni raspodjeljen u ravnini s ucrtanim polovima i njihovim simetralama. Kod primarnog protjecanja

$$\frac{w_1}{2p} \cdot I_1$$

koje je koncentrirano na jezgru i djeluje uzduž cijelog stopala, dobije se neki određeni oblik polja s maksimalnom vrijednošću $+a'$ u simetrali pola, kako je to označeno u sl.2.6-02. Osnovni harmonik tog polja ima maksimalnu vrijednost $"a"$.

Uzdužna komponenta struje tereta sa svojim amperzavojima neka bude jednaka primarnim amperzavojima

$$0,45 \text{ m} \frac{w_2 f_{n2}}{p} I_2 \cdot \sin \psi = \frac{w_1}{2p} I_1$$

Ako crtkana krivulja polja prema dolje u sl. 2.6-02 predstavlja uzdužno polje, onda je maksimalna vrijednost tog polja u simetrali pola (b') jednaka maksimalnoj vrijednosti primarnog polja (a'). Osnovni harmonik tog polja neka ima amplitudnu vrijednost " b ".

Poprečna komponenta struje i tereta sa svojim amperzavojima neka bude isto tako jednaka primarnim amperzavojima:

$$0,45 \text{ m} \frac{w_2^f n_2}{p} I_2 \cos \psi = \frac{w_1}{2p} I_1$$

Ako bi zračni raspor bio konstantan, dobili bi poprečno polje, koje je u sl. 2.6-02 nacrtano s maksimumom " c' ", u simetrali između polova (linija točka-crta). Radi velikog magnetskog otpora između polnih stopala će krivulja polja imati jako sedlo, kako je to s crtkanom krivuljom " c'' " prikazano u sl. 2.6-02. Osnovni harmonik tog polja neka ima amplitudnu vrijednost " c ". Dakle, kraj jednakih protjecanja na primarnoj strani i sekundarnoj uzdužnoj te poprečnoj strani dobijemo amplitudne vrijednosti osnovnih harmonika indukcije različite

$$a \neq b \neq c$$

što je prouzrokovano promjenljivim zračnim rasporom uzduž obo-
da rotora. Postavimo li pitanje, kolika mora biti primarna uzdužna struja (I'_{2d}) da dobijemo isti osnovni harmonik indukcije kao kod određene sekundarne uzdužne struje, tj. :

$$0,45 \text{ m} \frac{w_2^f n_2}{p} I_{2d} \frac{b}{a} = \frac{w_1}{2p} I'_{2d}$$

onda dobijemo, da je za trofazni namot:

$$I'_{2d} = 0,45 \cdot 3 \frac{2w_2^f n_2}{w_1} \frac{b}{a} I_{2d} = \frac{2,7 \cdot w_2^f n_2}{w_1} \frac{b}{a} I_{2d} = g k_d I_{2d} \quad (2.6-03)$$

gdje je

$$g = \frac{2,7 \cdot w_2^f n_2}{w_1} ; \quad k_d = \frac{b}{a}$$

Faktor preračunavanja sekundarne uzdužne struje na primarnu stranu (g) moramo prema tome još pomnožiti s uzdužnim faktorom

" k_d ". Taj se kreće kod sinhronog generatora između 0,8 do 0,92. Analogno možemo za poprečnu struju izračunati faktor preračunavanja:

$$I'_{2q} = \frac{2,7 \cdot w_{2f_{n2}}}{w_1} \frac{c}{a} I_{2q} = g \cdot k_q \cdot I_{2q} \quad (2.6-04)$$

Poprečni faktor " k_q " kreće se u granicama 0,4 do 0,66. Time smo dobili mogućnost da i kod sinhronih strojeva sa izraženim polovima preračunavamo sekundarnu struju na primarnu stranu.

3. TEORIJA SINHRONOG STROJA

3.1. Karakteristika praznog hoda

Pretpostavljamo da se sinhroni generator vrti s konstantnom sinhronom brzinom

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ (o/min)}$$

Sa primarnim namotom, tj. namotom rotora, kojeg priključimo na izvor istosmjerne struje, uzbudimo glavni tok Φ_{g1} . Okretanjem rotora inducira se u sekundarnom namotu, odnosno u namotu statora, napon, koji možemo izraziti kao napon transformacije na osnovu već kod transformatora poznate jednadžbe

$$E_{ef} = 4 \cdot f_o \cdot f \cdot w_2 \cdot f_{z2} \cdot f_{s2} \cdot \Phi_{g1} \quad (V)$$

odn. kod sinusne raspodjele indukcije uzduž zračnog rasporeda i uz faktor namota $f_{n2} = f_{z2} \cdot f_{s2}$ možemo pisati:

$$E_{ef} = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot f_{n2} \cdot \Phi_{g1}$$

Možemo računati i s naponom rotacije na osnovu jednadžbe za inducirani napon u jednom štapu: $e_r = Blv$; ako pretpostavimo sinusnu raspodjelu indukcije uzduž rasporeda, dobit ćemo u jednom zavoju:

$$e_z = 2e_r$$

a u cijelom namotu sa w_2 zavoja

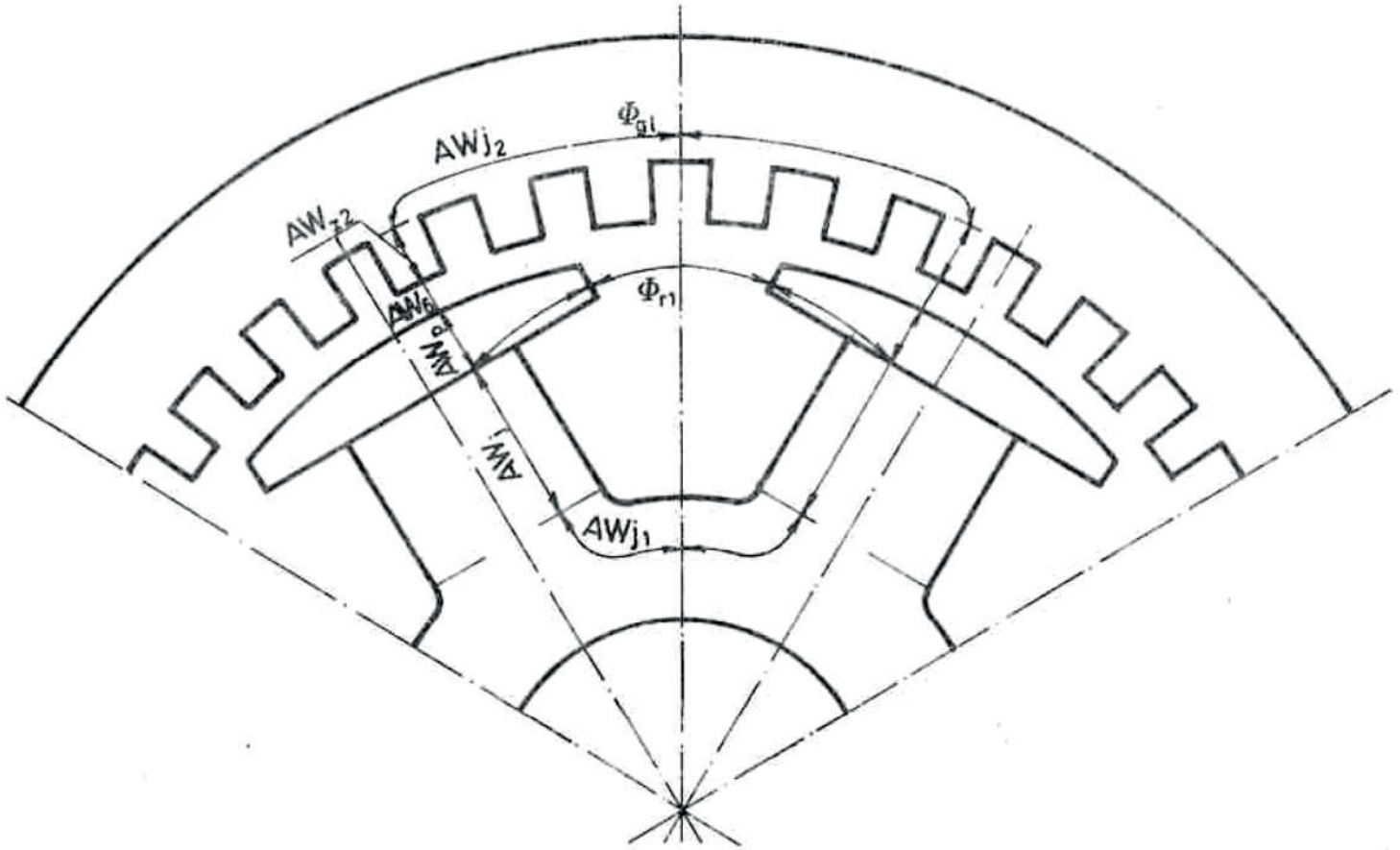
$$E_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} 2 \cdot e_r \cdot w_2 \cdot f_{n2} = \frac{2}{\sqrt{2}} B_{max} l \frac{D\pi n_s}{60} w_2 \cdot f_{n2}$$

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}; \quad \Phi_{g1} = l \int_0^{\tau_p} B_{max} \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p}\right) dx = \frac{2\tau_p}{\pi} l \cdot B_{max}$$

$$E_{ef} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \cdot w_2 \cdot f_{n2} \cdot \Phi_{g1} = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_{g1} \cdot f_{n2} \quad (3.1-01)$$

Došli smo, dakle, do iste jednadžbe, kako smo očekivali.

Glavni tok Φ_{gl} je ovisan o uzbuđi tj. o primarnim amperzavojima, o dimenzijama magnetskog kruga i o magnetskim karakteristikama upotrebljenog materijala. Na sl. 3.1-01 pri-



Sl. 3.1-01 Magnetski krug sinhronog stroja

kazan je magnetski krug sinhronog stroja. Magnetski krug se zatvara kroz dvije susjedne polovine pola. Obzirom na simetralu između polova, magnetski je krug simetričan, pa možemo prema tome računati samo s jednom polovinom magnetskog puta. Taj vodi preko jarma statora, zubiju statora, zračnog raspora, polnog stopala, jezgre pola i preko jarma rotora. Protjecanje na jednom polu mora pokrivati pad magnetskog napona na tom putu. Kod manjih uzbuđa, dok nemamo zasićenja, možemo zanemariti magnetski napon za put kroz željezo i računati samo s magnetskim otporom u zračnom rasporu " δ ", koji po jedinici površine zračnog raspora iznosi:

$$R_m = \frac{10^6}{0,4 \cdot \pi} \delta = 0,8 \cdot 10^6 \delta \left(\frac{A}{Vs/m^2} \right)$$

gdje je po Giorgijevom sistemu " δ " u metrima. Kako je ta mjera za praktičku upotrebu pregruba, računamo radije sa zračnim rasporom " δ " u mm i dobijemo:

$$R_m = 800 \cdot \delta = 0,8 \cdot 10^3 \cdot \delta \quad (\text{A/Vsm}^2)$$

a potrebno protjecanje za maksimalnu indukciju u zraku " B_δ " u (T) i zračni raspor " δ " u mm iznosi:

$$\Theta_\delta = A_1 \cdot w_1 = I_1 w_1 = R_m B_\delta = 800 \cdot \delta \cdot B_\delta \quad (\text{A}) \quad (3.1-02)$$

Prema tome za svaki mm zračnog raspora i jedan T indukcije (10000 G) trebamo 800 amperzavoja. Tok je proporcionalan indukciji ukoliko zasićenje u željezu ne utiče na raspodjelu indukcije uzduž zračnog raspora, a koju inače možemo ustanoviti prema uputama u pogl. 2.2. Tok dobijemo integriranjem indukcije uzduž zračnog raspora na širini polnog koraka uz pretpostavku sinusne raspodjele indukcije

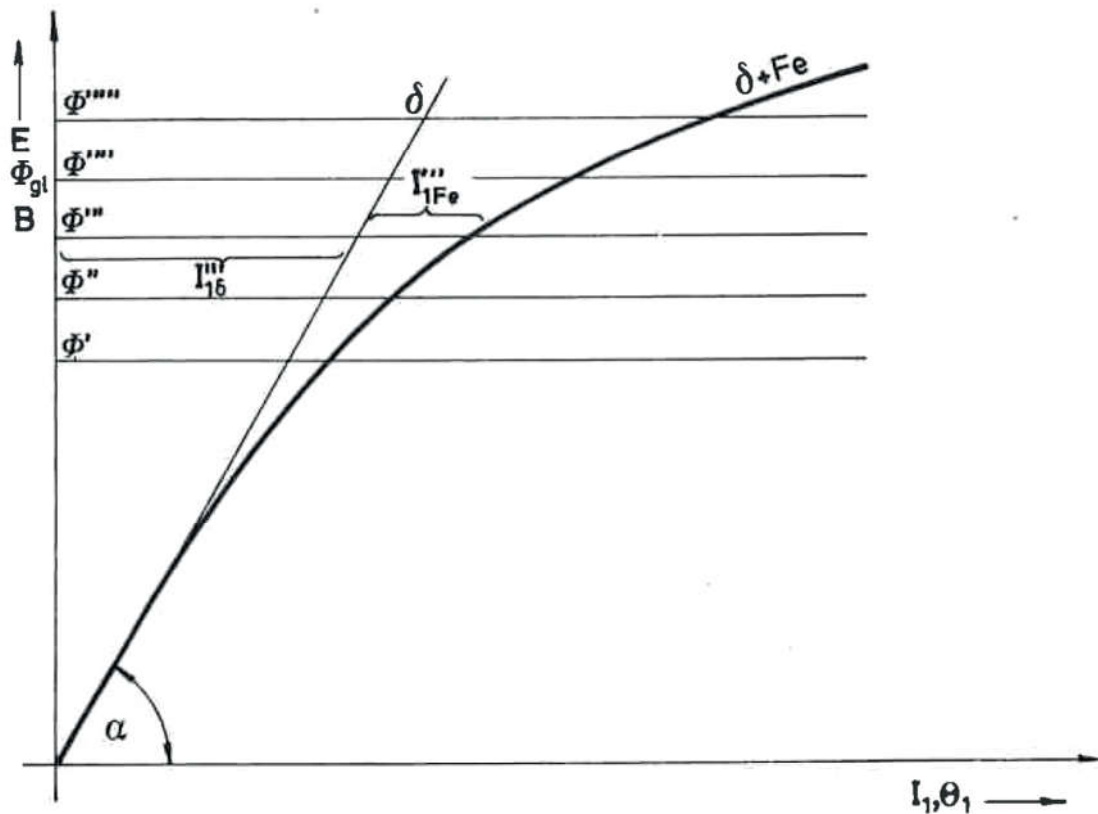
$$\Phi_{g1} = l \int_0^{\tau_p} B_{\delta x} \cdot dx = k \cdot B_{\delta \max} \quad (3.1-03)$$

Iz jednačbi (3.1-02) i (3.1-03) vidimo da je tok proporcionalan maksimalnoj indukciji u zračnom rasporu, a indukcija primarnom protjecanju odn. primarnoj struji. Tok je proporcionalan sinusoidalni napon. Ako, dakle, zanemarimo magnetski otpor željeza možemo nacrtati dijagram ovisnosti $B_{\delta \max}$, Φ_{g1} i E u ovisnosti o primarnoj uzbuđnoj struji, kako je to naznačeno pravcem " δ " u dijagramu sl. 3.1-02 sa primarnom strujom u aps-cisi a indukcijom, tokom i naponom, svaki u svom mjerilu, na ordinati.

Nagib pravca:

$$\text{tg} \alpha = \frac{B_\delta}{I_1} = \frac{w_1}{R_m} = \frac{k}{\delta}$$

je dakle proporcionalan magnetskoj vodljivosti, odnosno obrnuto proporcionalan zračnom rasporu. Što je veći zračni raspor to je pravac više položen. Kad indukcija u željezu prelazi 0,5 T, ne mogu se više zanemariti amperzavoja za željezo. Presjeci željeza u pojedinim dijelovima magnetskog kruga su različiti,



Sl. 3.1-02 Karakteristika praznog hoda

pa račun magnetskog kruga nije tako jednostavan kao kod transformatorskih jezgri. U računu postupamo tako da za različite tokove Φ' , Φ'' , Φ''' , itd. računamo indukcije u raznim dijelovima magnetskog kruga pomoću krivulje magnetiziranja za dotični materijal. Izračunamo potrebne amperzavoje i sumiranjem istih dobijemo ukupne amperzavoje za Φ' , Φ'' , Φ''' itd.

$$Aw'_1 = Aw'_\delta + Aw'_{j2} + Aw'_{z2} + Aw'_{pp} + Aw'_{jezgre} + Aw'_{j1}$$

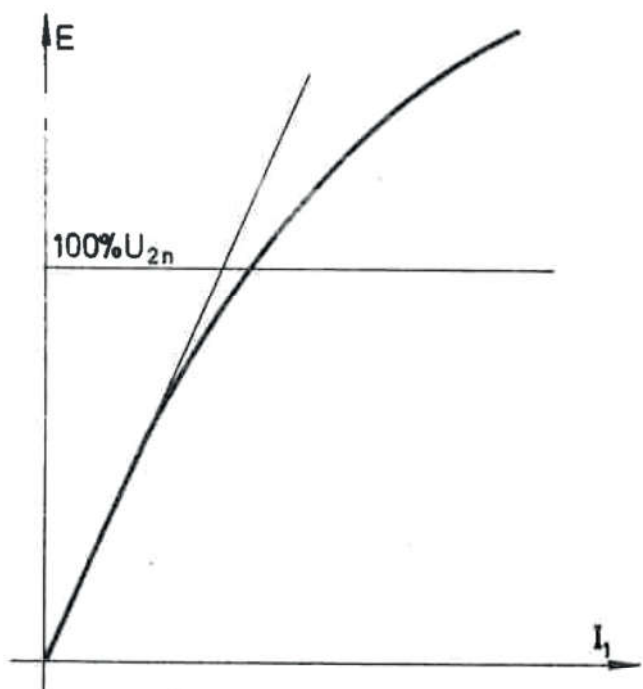
i time pripadnu uzbudnu struju primara

$$I'_{1Fe} = \frac{Aw'_1}{w_1} ; \quad I''_{1Fe} = \frac{Aw''_1}{w_1} ; \quad I'''_{1Fe} = \frac{Aw'''_1}{w_1} \quad \text{itd.}$$

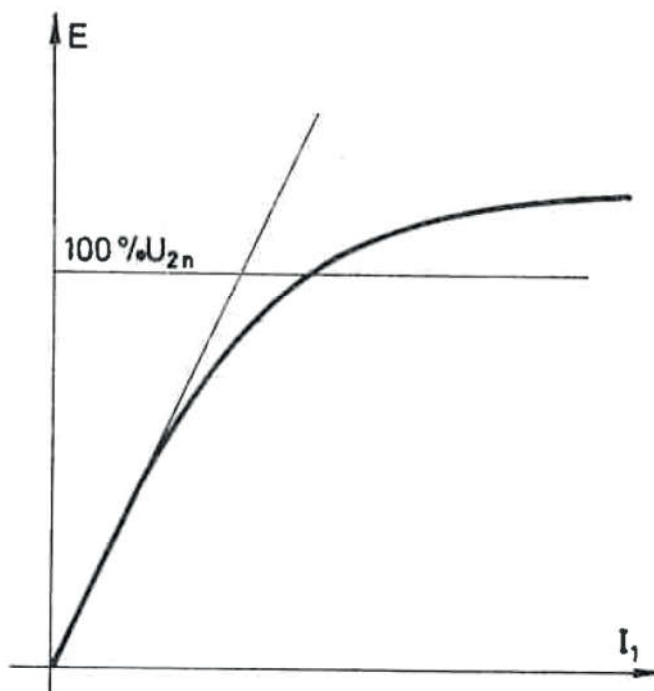
Tako dobijemo krivulju praznog hoda, koja pokazuje ovisnost sekundarno induciranog napona o primarnoj struji I_1 . Taj napon zovemo unutarnji napon generatora i označujemo ga sa E_O :

$$E_O = f(I_1)$$

kod konstantne sinhronne brzine vrtnje (n_s). Ako tako dimenzioniramo magnetski krug da u željezu imamo približno jednake indukcije, dobit ćemo blago zakrivljenu karakteristiku prema sl. 3.1-03. Za takvu karakteristiku kažemo da je "mekana karakteristika".

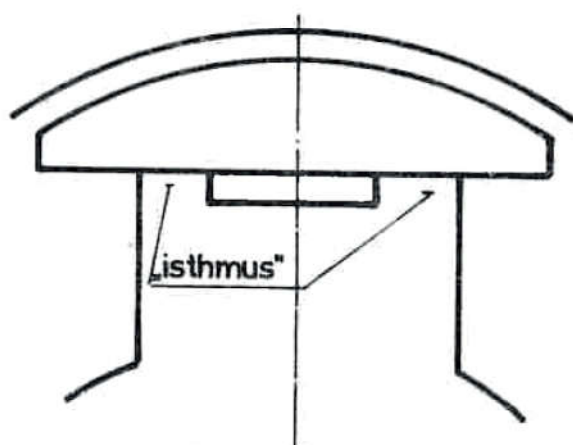


Sl.3.1-03 "Mekana karakteristika" praznog hoda



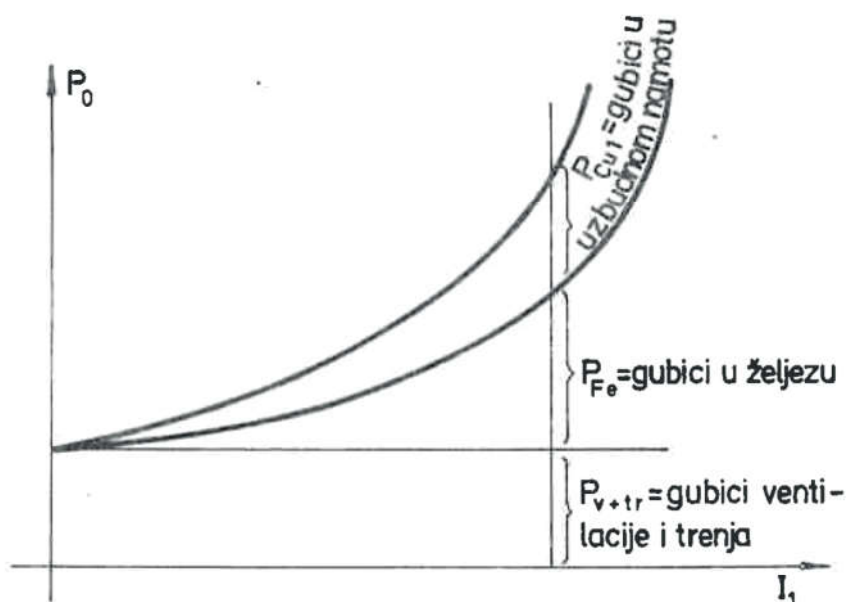
Sl.3.1-04 "Tvrda karakteristika" praznog hoda

Ako u magnetskom krugu na kratkom dijelu u željezu smanjimo presjek željeza, dobit ćemo na tom mjestu vrlo veliko zasićenje, a time će karakteristika praznog hoda biti oštro zakrivljena prema slici 3.1-04. Govorimo o tvrdoj karakteristici. Tako suženje presjeka željeza zovemo "isthmus"

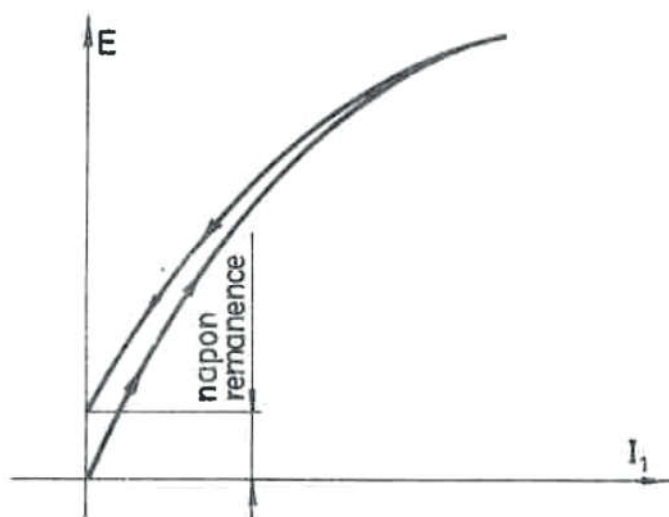


Sl.3.1-05 Isthmus izveden u jezgri pola

(grčka riječ, koja znači suženje) što je u sl. 3.1-05 prikazano ispod polnog stopala jednim utorom (prerezom) u jezgri. Karakteristike praznog hoda obično crtamo tako da napon mje-



Sl. 3.1-06 Gubici sinhronog generatora u praznom hodu



Sl. 3.1-07 Prvo uzbuđjivanje i razbuđjivanje

rino u postocima od nazivnog napona generatora U_{2n} .

Kod pokusa praznog hoda, gubitke u uzbuđnom namotu generatora pokriva izvor istosmjerne struje:

$$P_{Cu1} = I_1^2 \cdot R_1$$

dok gubitke u željezu i mehaničke gubitke podmiruje pogonski stroj (vidi sl. 3.1-06).

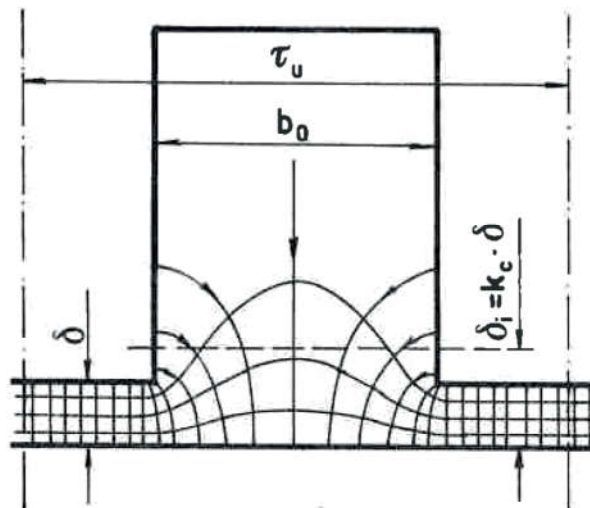
Ako generator samo jednom uzbudimo, onda kod razbuđivanja ostaje remanentni magnetizam (remanenca), koji inducira napon u iznosu od nekoliko postotaka nominalnog napona kako to vidimo u sl. 3.1-07.

Carterov faktor

Relacijom (3.1-02) je određena potrebna veličina protjecanja za postizavanje potrebne indukcije u zračnom rasporu. Iz navedene relacije proizlazi da je veličina protjecanja ovisna, osim o veličini

željene indukcije, još i o veličini zračnog raspora . Kad bi površine polnog stopala i statorskog provrta bile glatke, tada bi i računska veličina zračnog raspora bila jednaka njihovoj međusobnoj udaljenosti. Međutim, u našem slučaju imamo na statoru utore, pa je zbog toga smanjena magnetska vodljivost između statora i rotora, tj. ne možemo u relaciju (3.1-02) na mjesto δ uvrstiti izmjerenu udaljenost između statora i rotora, nego moramo ovu udaljenost korigirati sa odgovarajućim faktorom povećanja zračnog raspora uslijed postojanja utora na statoru.

Da odredimo smanjenje magnetske vodljivosti uslijed utora na statoru, nacrtajmo sliku polja između statora i rotora (vidi sl. 3.1-08).



Sl. 3.1-08 Slika polja u slučaju ozubljenog statora

U slučaju da imamo glatku površinu statora, tj. nema utora, magnetska vodljivost zračnog raspora bi bila:

$$\lambda_{\delta} = \frac{\tau_u l_i}{\delta} \mu_0$$

gdje je:

τ_u - utorski korak

l_i - idealna duljina stroja

δ - zračni raspor

U slučaju kad se na statoru nalaze utori, magnetska vodljivost zračnog raspora iznosi:

$$\lambda_{\delta} = \mu_0 \Sigma \frac{b_x}{\delta_x}$$

Omjer $\frac{\lambda_{\delta}}{\lambda_{\delta}'} = k_c$ nazivamo koeficijent zračnog raspora ili Carterov faktor. F.W.Carter istraživao je magnetsko polje zračnog raspora služeći se metodom konformnog preslikavanja. Rezultat njegovog istraživanja pokazuje da je:

$$k_c = \frac{\lambda_{\delta}}{\lambda_{\delta}'} = \frac{\tau_u}{\tau_u - \beta_{\delta} \delta}$$

gdje je:

$$\beta_{\delta} = \frac{4}{\pi} \left[\frac{b_0}{2\delta} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{b_0}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_0}{2\delta} \right)^2} \right]$$

b_0 = širina otvora utora

U velikom broju slučajeva je veličina otvora utora veća od veličine zračnog raspora, pa pri tom vrijedi nejednakost

$$1 < \frac{b_0}{\delta} < \infty$$

Ako je navedena nejednakost ispunjena, možemo pisati:

$$k_c = \frac{\tau_u}{\tau_u - \frac{b_0^2}{5\delta + b_0}} \quad \beta_{\delta} \sim \frac{\left(\frac{b_0}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}}$$

Nakon određivanja Carterovog faktora računaska veličina ili idealna veličina zračnog raspora iznosi:

$$\delta_i = \delta_{\text{rač.}} = k_c \cdot \delta$$

U slučaju da i stator i rotor imaju utore, ukupni Carterov faktor iznosi približno:

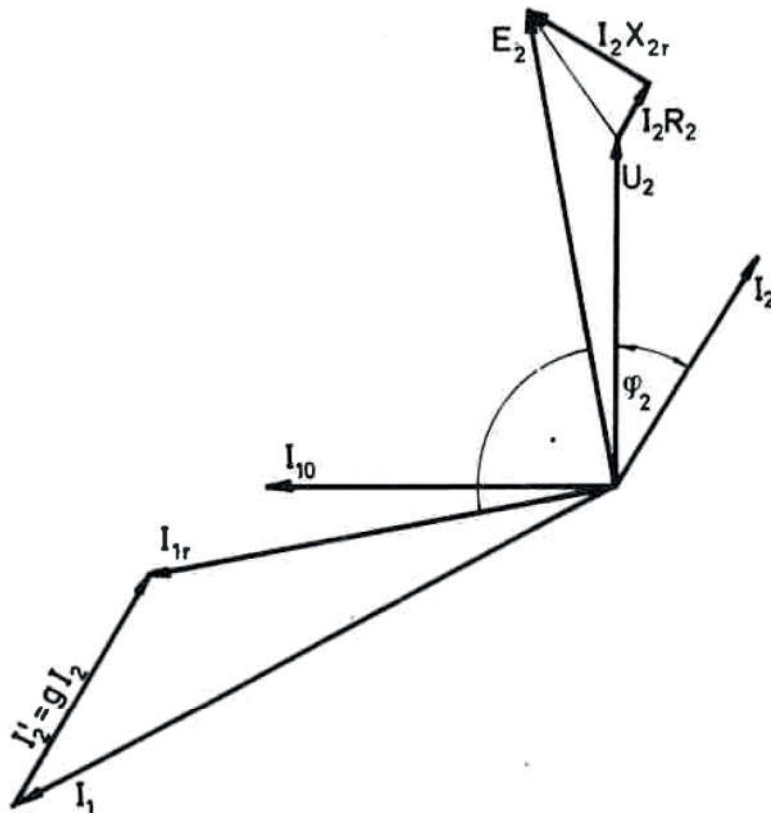
$$k_c = k_{cst} \cdot k_{crot}$$

gdje je:

$$k_{cst} = \frac{\tau_{ust}}{\tau_{ust} - \beta_{st} \cdot \delta} \quad k_{crot} = \frac{\tau_{urot}}{\tau_{urot} - \beta_{rot} \cdot \delta}$$

3.2. Vektorski dijagram i relativne vrijednosti

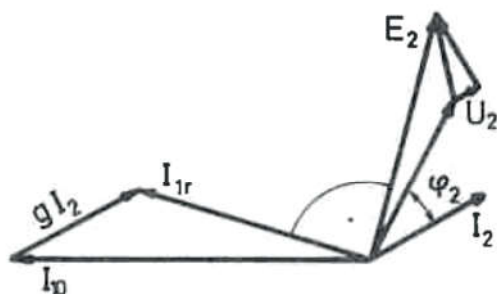
Kod crtanja vektorskog dijagrama obično postupamo tako da vektor napona $\underline{U}_2$ na stezaljkama generatora crtamo vertikalno prema gore. Za određenu struju tereta I_2 , koja fazno zaostaje za kut φ_2 za vektorom napona $\underline{U}_2$ tražimo obično pripadnu primarnu struju kod koje napon na stezaljkama generatora ostaje nepromijenjen. Ako naponu $\underline{U}_2$ vektorski prema sl.3.2-01



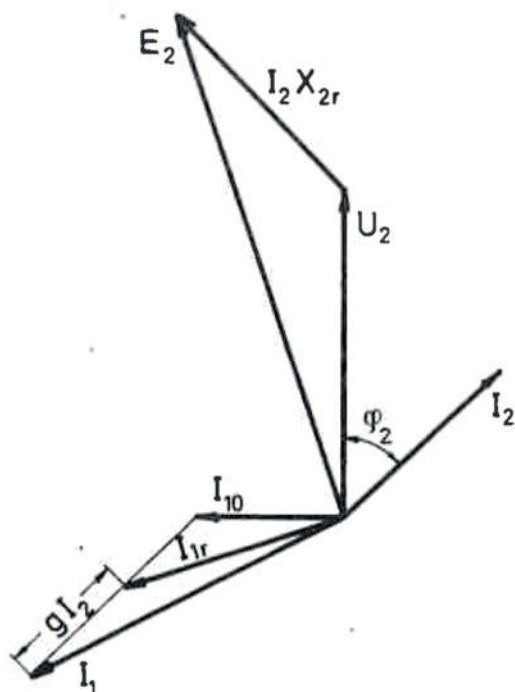
Sl. 3.2-01 Vektorski dijagram opterećenja sinhronog generatora

pribrojimo omski pad napona $\underline{I}_2 R_2$ i rasipni pad napona $\underline{I}_2 X_{2r}$, dobijemo napon E_2 , koji se mora inducirati u sekundarnom namotu, kako bi poslije oduzimanja pada napona $\underline{I}_2 R_2$ i $\underline{I}_2 X_{2r}$ ostao na stezaljkama napon $\underline{U}_2$. Iz karakteristike praznog hoda dobijemo da je za napon E_2 potrebna uzbuđna struja $\underline{I}_{1r}$, tj. rezultirajuća uzbuđna struja, koja rezultira iz primarnog i sekundarnog protjecanja. Ako želimo dobiti potrebnu primarnu struju

I_1 , moramo odbiti na primarnu stranu preračunatu struju $I_2' = gI_2$ tj. moramo uzeti u obzir reakciju armature. U praznom hodu trebamo za napon U_2 uzбудnu struju I_{10} , a pod teretom I_2 sa $\cos\varphi_2$ trebamo struju I_1 . Prema tome moramo uzбудnu struju povećati na I_1 , ako hoćemo kod datog tereta zadržati napon na stezaljkama generatora. Ako uzбудnu struju I_{10} ostavimo nepromijenjenom, onda dobijemo vektorski dijagram prema sl. 3.2-02. Napon

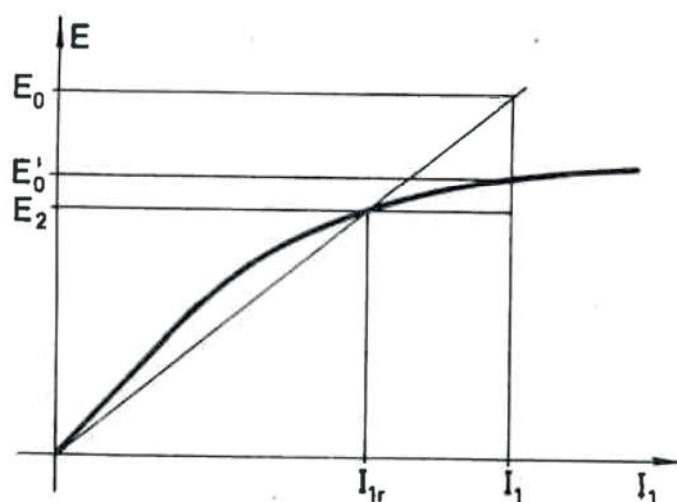


Sl.3.2-02 Vektorski dijagram opterećenja za slučaj konstantne uzbuđne struje



Sl.3.2-03 Vektorski dijagram uz zanemarenje omskog pada napona u statoru

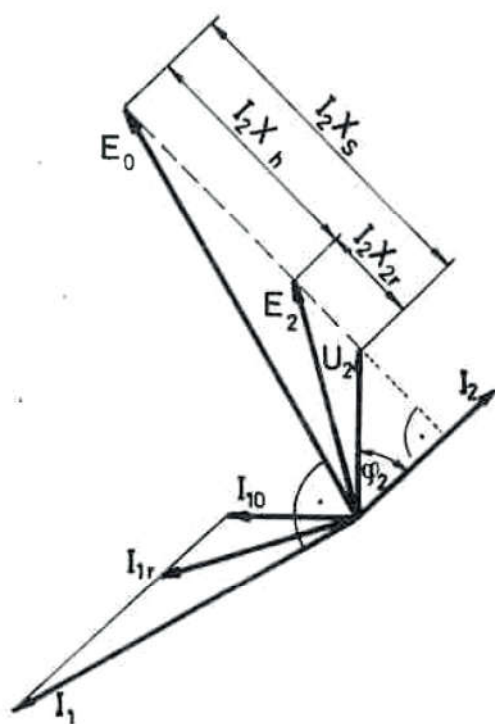
generatora se znatno ruši. U većoj mjeri radi reakcije armature, a u manjoj mjeri radi padova napona u namotu. Kao kod transformatora, tako i ovdje obično zanemarujemo omski pad napona i tako dobijemo vektorski dijagram prema sl.3.2-03. Kao kod transformatora moramo dalje zanemariti sve više harmoničke članove, jer vektorska slika vrijedi samo za osnovni harmonik. Dodatno kod sinhronih strojeva moramo pretpostavljati linearne odnose između uzbuđne struje i induciranih napona. Magnetsko stanje stroja određeno je rezultirajućom uzbuđnom strujom I_{1r} i induciranim naponom E_2 , te zato moramo stvarnu karakteristiku praznog hoda zamijeniti s pravcem, koji ide kroz točku E_2 na karakteristici praznog hoda, kako se to vidi na sl.3.2-04. Time smo dobili proporcionalnost između uzbuđnih



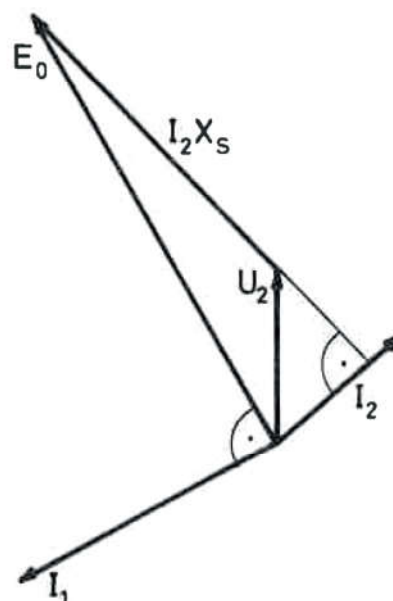
Sl.3.2-04 Prelaz sa karakteristike praznog hoda na pravac kod crtanja vektorskih dijagrama

struja I_{10} , I_{1r} i I_1 te induciranih napona U_2 , E_2 i E_0 , kako je to prikazano u sl. 3.2-05.

" E_0 ", dakle, predstavlja onaj napon, koji bi se inducirao u sekundarnom namotu nakon rasterećenja generatora u slučaju ako bi vrijedila karakteristika praznog hoda "kosi pravac" prema sl. 3.2-04. U stvari će se, radi zasićenja u že-



Sl.3.2-05 Fiktivni i stvarni padovi napona prikazani u vektorskom dijagramu



Sl.3.2-06 Pojednostavnjeni vektorski dijagram iz sl. 3.2-05

ljezu, inducirati napon " E_0 " prema sl. 3.2-04. Između E_0 i E_2 smo prema sl. 3.2-05 dobili jedan fiktivni pad napona uslijed reakcije armature, koji odgovara nekoj fiktivnoj reaktanciji " X_h ". Umjesto prijašnje stvarne fizikalne slike dobijemo sada

neku ekvivalentnu sliku, prema kojoj primarna uzbudna struja inducira napon E_0 , a nakon oduzimanja pada napona uslijed reakcije armature ($I_2 X_h$) i rasipne reaktancije ($I_2 X_{2r}$) od napona E_0 dobijemo napon na stezaljkama generatora. Umjesto da posebno računamo sa X_h i X_{2r} , računamo sa njihovim zbrojem. Ovako dobivenu reaktancu zovemo sinhrona reaktancija (X_s), tj.:

$$X_h + X_{2r} = X_s$$

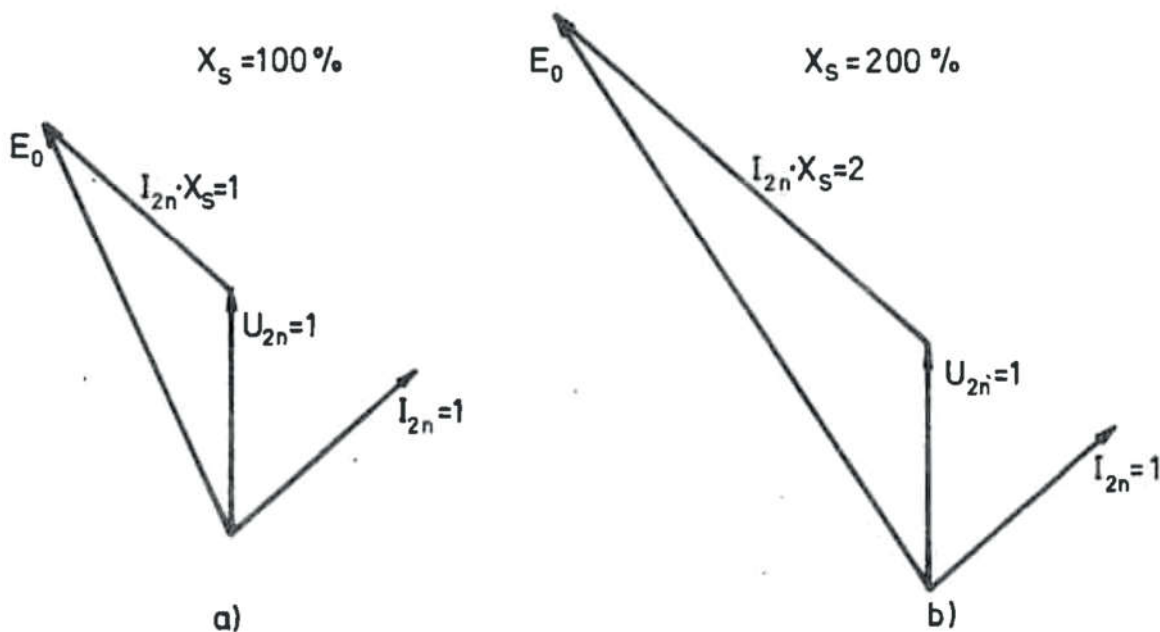
Tako dobijemo jednostavan vektorski dijagram prema sl. 3.2-06.

U tehnici volimo računati s relativnim vrijednostima (per unit sistem), koje odmah pokazuju odnos veličina. Postavimo li da su nazivne vrijednosti kao relativne vrijednosti označene sa indeksom r, dobijemo:

$$U_{2nr} = 1 \quad I_{2nr} = 1$$

tada možemo nazivnu impedancu Z_n izraziti kao:

$$Z_{nr} = \frac{U_{2nr}}{I_{2nr}} = 1$$



Sl. 3.2-07 Vektorski dijagrami dvaju sinhronih generatora sa različitim relativnim sinhronim reaktancijama

Relativnu sinhronu reaktanciju " X_{sr} " dobijemo, ako njezinu vrijednost u omima " X_s " podijelimo s nazivnom impedancijom " Z_n "

$$X_{sr} = \frac{X_s}{Z_n} = \frac{X_s I_{2n}}{U_{2n}}$$

Iz toga slijedi da je relativna sinhrona reaktancija jednaka jedinici u slučaju kad je pad napona kod nazivne struje jednak nazivnom naponu. U sl. 3.2-07 prikazana su dva vektorska dijagrama za dva različita sinhrona generatora.

Na oko možemo procijeniti da relativna sinhrona reaktancija za dijagram pod 3.2-07 a) iznosi jedan ili 100%, dok za 3.2-07 b) iznosi 2 ili 200%. To isto vrijedi i za rasipnu reaktanciju i za ostale reaktancije, koje ćemo još upoznati. Indeks "r" za relativnu reaktanciju ne običajemo pisati, jer se iz same vrijednosti reaktancije može zaključiti da li se radi o omima ili o relativnoj reaktanciji.

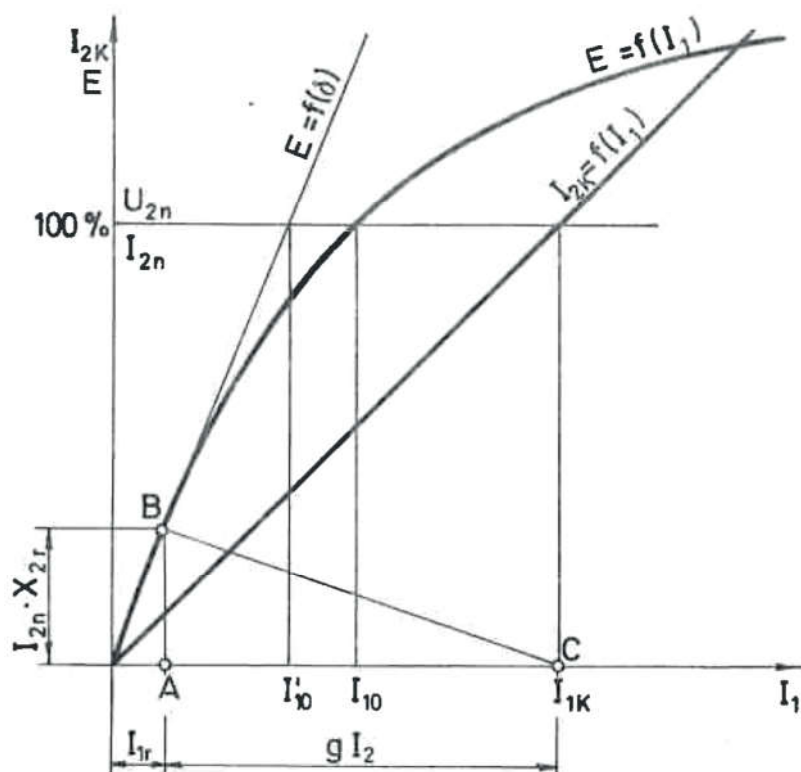
3.3. Karakteristika kratkog spoja i Potierov trokut

Kao kod transformatora, tako i kod sinhronih generatora pravimo pokus kratkog spoja na taj način, da generator na stezaljkama spojimo preko ampermetra na kratko i kod nazivne sinhronne brzine vrtnje tako dugo dižemo uzбудnu struju ili primarno narinuti napon, što je isto, dok ne postignemo nazivnu struju

$$I_{2k} = I_{2n}$$

U kratkom spoju nema zasićenja, pa zato i struja kratkog spoja raste proporcionalno s uzбудnom strujom. Tako dobijemo u sl. 3.3-01 karakteristiku kratkog spoja kao pravac. U istom dijagramu je ucrtana i karakteristika praznog hoda u takovom mjerilu, da u ordinati vrijedi za nazivni napon U_{2n} i nazivnu struju I_{2n} istih 100%, prikazanih vodoravnom crtom. U dijagramu dobijemo vrijednost " I_{1k} " kao onu uzбудnu struju, kod koje u pokusu kratkog spoja dobijemo sekundarnu nazivnu struju:

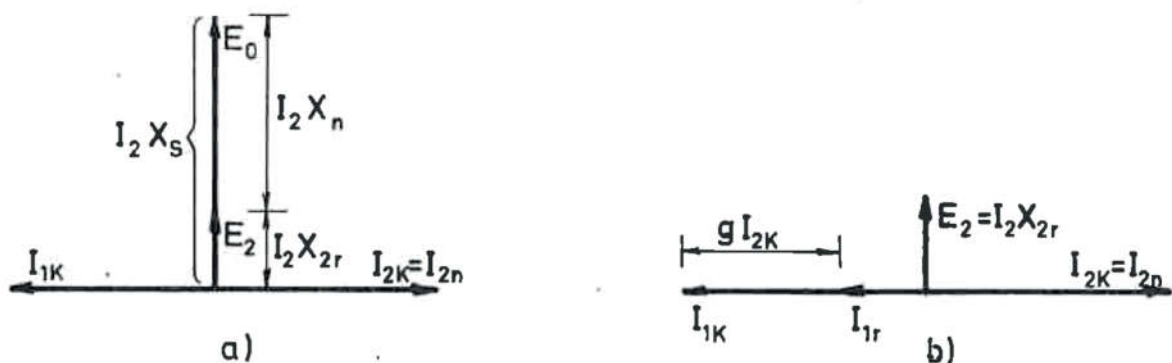
$$I_{2k} = I_{2n}$$



Sl. 3.3-01 Karakteristika praznog hoda i kratkog spoja sinhronog generatora; Potierov trokut

Kod karakteristike praznog hoda dobijemo dvije adekvatne vrijednosti I_{10} i I'_{10} . Ova druga odnosi se samo na uzбудnu struju potrebnu za savladavanje zračnog raspora, to je, dakle, uzbudna struja u slučaju kad ne bi bilo zasićenja u željezu.

Kratki spoj možemo prikazati i vektorskim dijagramom prema sl. 3.3-02.a). Omski otpor smo zanemarili. Struja I_{1K}



Sl. 3.3-02 Vektorski dijagram kratkog spoja

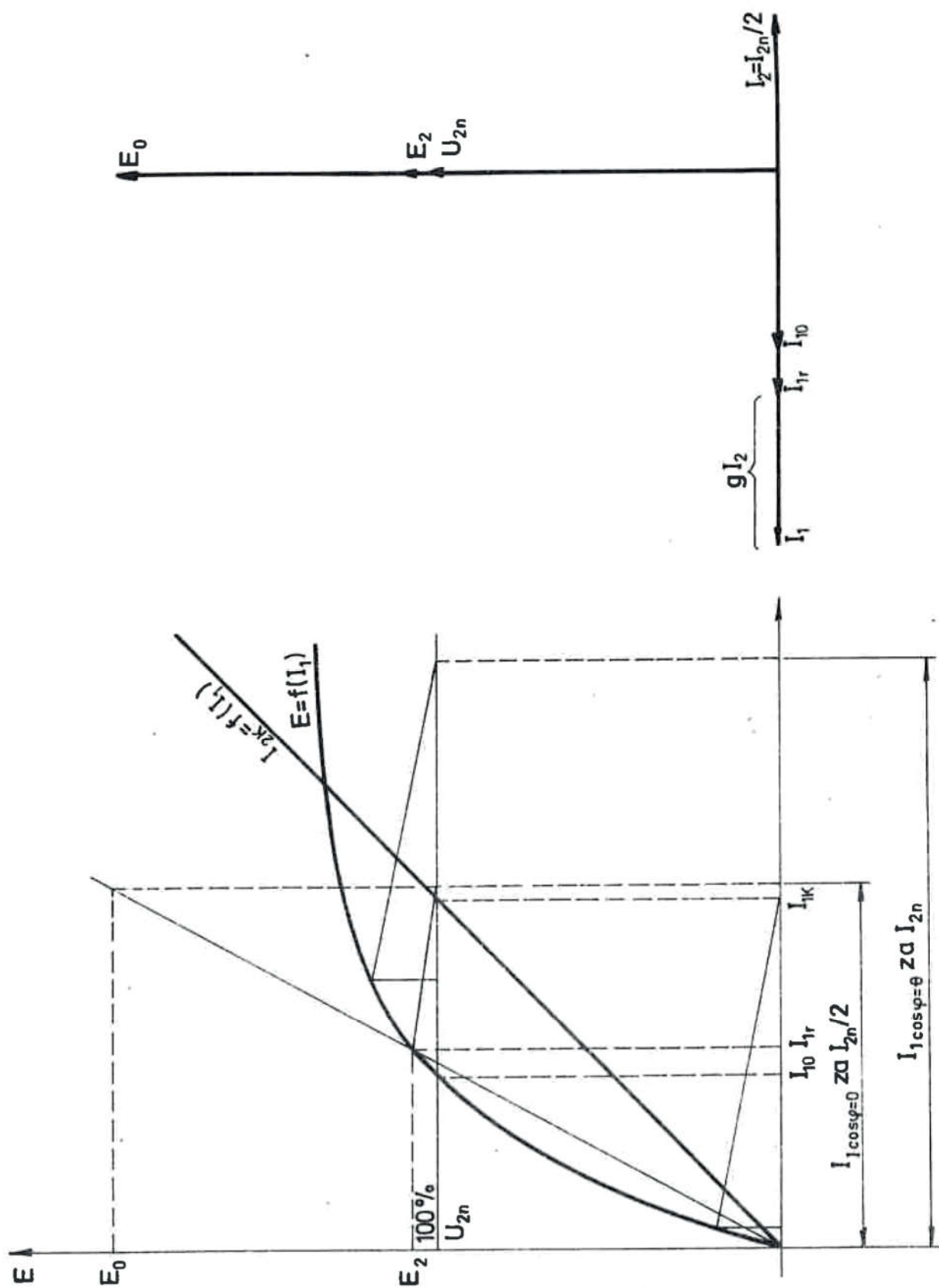
inducira napon E_0 , koji kroz sekundarni namot uz zanemarenje omskog otpora potjera čisto induktivnu struju kratkog spoja $I_{2K} = I_{2n}$. Uslijed reakcije armature dobijemo pad napona $I_2 X_h$ i time napon E_2 , koji pokriva rasipni pad napona generatora

$$E_{2r} = I_2 X_{2r}$$

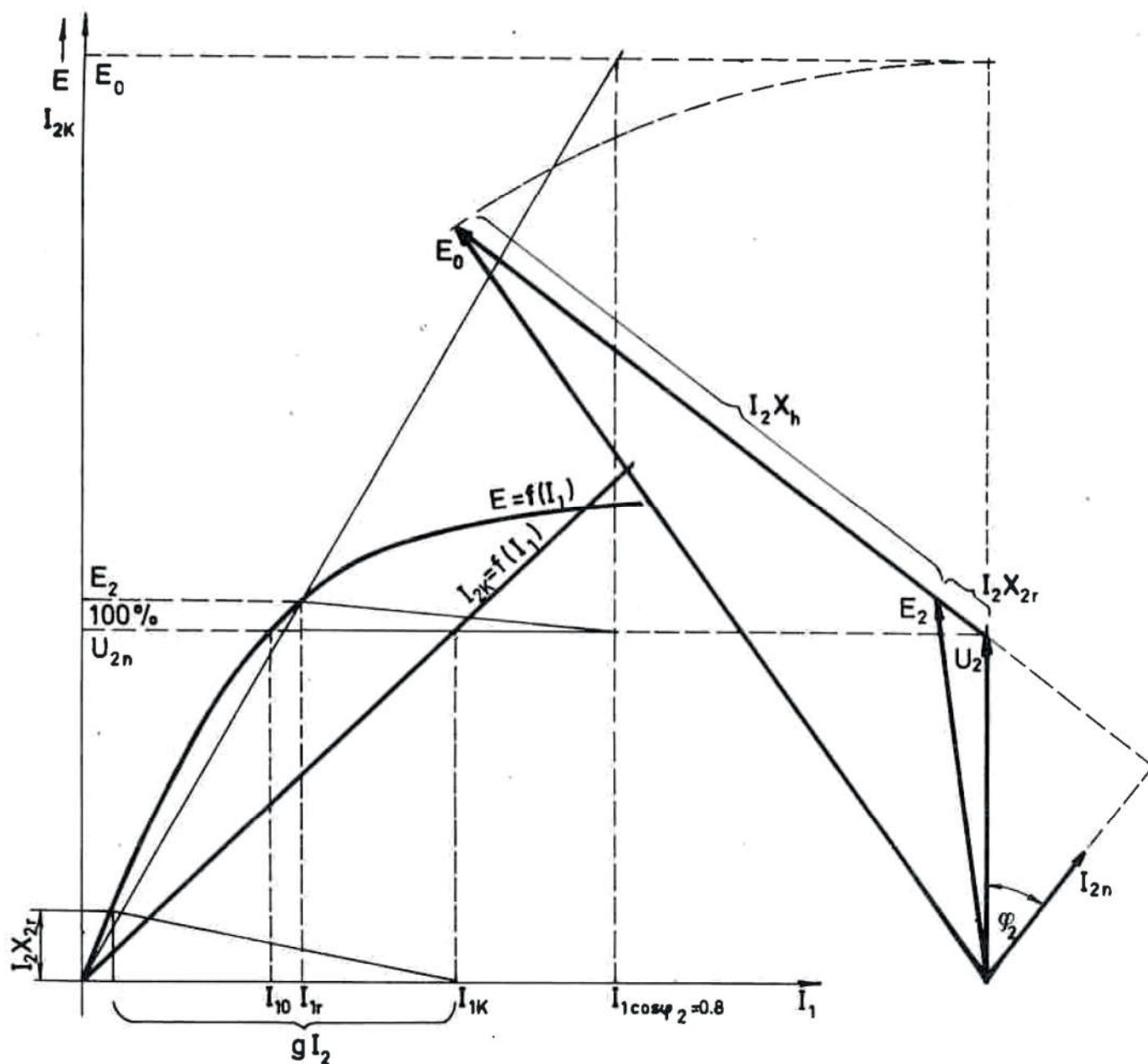
Prava fizikalna slika je drugačija; ona je prikazana s vektorskim dijagramom u sl. 3.3-02 b). Uzbudna struja I_{1k} nakon oduzimanja reakcije armature $g \cdot I_{2k}$ daje rezultirajuću uzбудnu struju I_{1r} , koja inducira napon E_2 koji se potroši na rasipnom padu napona $I_{2k} X_{2r}$ tako, da na stezaljkama generatora nema napona. Tu sliku možemo prikazati u dijagramu praznog hoda i kratkog spoja (vidi sl. 3.3-01). Ako od struje I_{1k} odbijemo reakciju armature $g \cdot I_2$ dobijemo u točki A rezultirajuću uzбудnu struju I_{1r} , čemu odgovara inducirani napon E_2 s točkom B na karakteristici praznog hoda. AB predstavlja prema tome rasipni pad napona kod nazivne struje, a AC reakciju armature kod nazivne struje. Povežemo točku B sa C pa dobijemo trokut, kojeg zovemo Potierov trokut. On karakterizira padove napona uslijed reakcije armature i rasipne reaktancije kod nazivne struje I_{2n} , svakako kod $\cos\varphi_2=0$ induktivno. Ako taj Potierov trokut premjestimo u visinu 100% napona prema sl. 3.3-03 dobijemo potrebnu uzбудnu struju $I_{1\cos\varphi_2=0}$ za nominalni teret. Kod 1/2 nominalne struje je trokut pola manji, a u sl.3.3-03 imamo prikazan taj slučaj. Paralelno s karakteristikom praznog hoda i kratkog spoja ucrtan je u sl. 3.3-03 vektorski dijagram za slučaj opterećenja sa 1/2 nazivne struje i za $\cos\varphi_2=0$. Fiktivnu vrijednost E_0 za taj slučaj dobijemo, ako kroz točku E_2 za pola tereta povučemo pravac jer, kako smo to već prije ustanovili, vektorski dijagram se zasniva na linearnoj karakteristici praznog hoda. Ostalo je razumljivo iz same slike. Ako se promijeni $\cos\varphi_2$, mijenjaju se i katete Potierovog trokuta, kako je to vidljivo iz sl. 3.3-04 za slučaj nazivne struje tereta I_{2n} i $\cos\varphi_2=0,8$.

U sl. 3.3-04 su nacrtani karakteristika praznog hoda i Potierov trokut za isti stroj kao u sl. 3.3-03. Tok konstrukcije Potierovog trokuta za $\cos\varphi_2=0,8$ ide ovim putem:

Zadane tj. poznate veličine su: I_{10} , I_{1k} , gI_2 , $I_2 X_{2r}$. Paralelno sa zadanim karakteristikama crtamo vektorski dijagram: U_2 , I_2 φ_2 čije su veličine i međjusobni odnosi zadani. Na vektor $\underline{U}_2$ dodajemo vektor rasipnog pada napona $\underline{I_2 X_{2r}}$, ali oko-



S1. 3.3-03 Odredjivanje uzbudne struje pomoću Potierovog trokuta



Sl. 3.3-04 Konstrukcija Potierovog trokuta za $\cos \varphi_2 = 0.8$

mito na smjer vektora I_2 . Veličinu rezultirajućeg vektora E_2 prenesemo na karakteristiku praznog hoda i dobijemo pripadnu rezultirajuću uzбудu I_{1r} . U vektorskom dijagramu na vektor $I_2 X_{2r}$ dodajemo u istom smjeru fiktivni pad napona uslijed reakcije armature kao vektor $I_2 X_h$ čija veličina rezultira iz omjera

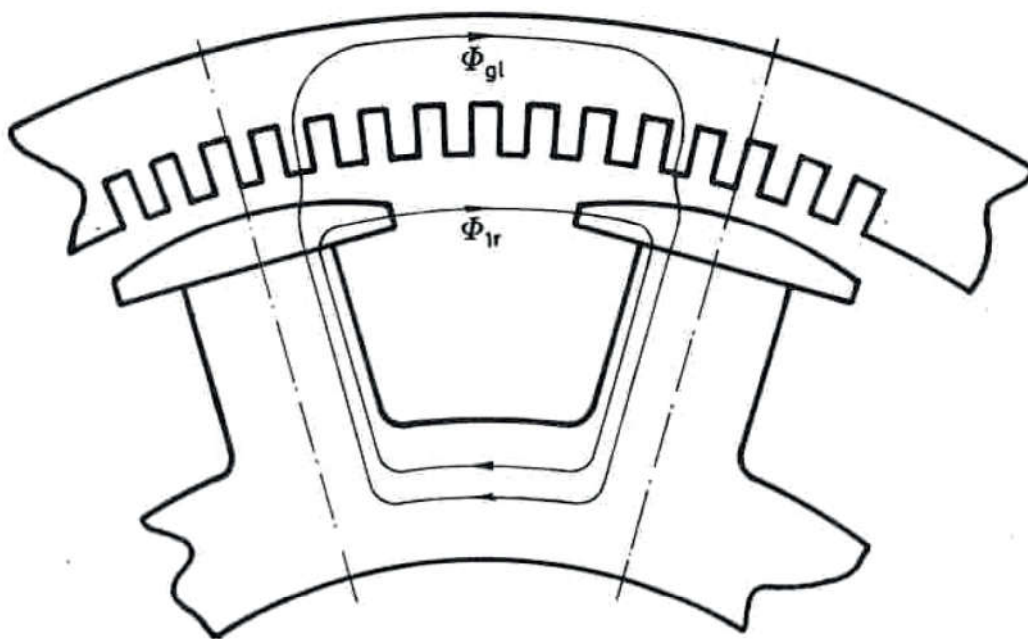
$$\frac{I_2 X_h}{g I_2} = \frac{E_2}{I_{1r}}$$

jer se za induciranje E_2 troši I_{1r} a za fiktivnu veličinu $I_2 X_h$

troši se uzbuda gI_2 . Tako dobijemo rezultirajući vektor $\underline{E}_0$ čiju veličinu prenosimo na karakteristiku praznog hoda i određujemo pripadnu uzbudu $I_{1\cos\varphi_2=0,8}$ odnosno drugu katetu Potierovog trokuta. Očito je da su se katete Potierovog trokuta znatno smanjile u odnosu na slučaj u kojem je $\cos\varphi_2=0$.

3.4. Utjecaj rasipnog polja u rotoru

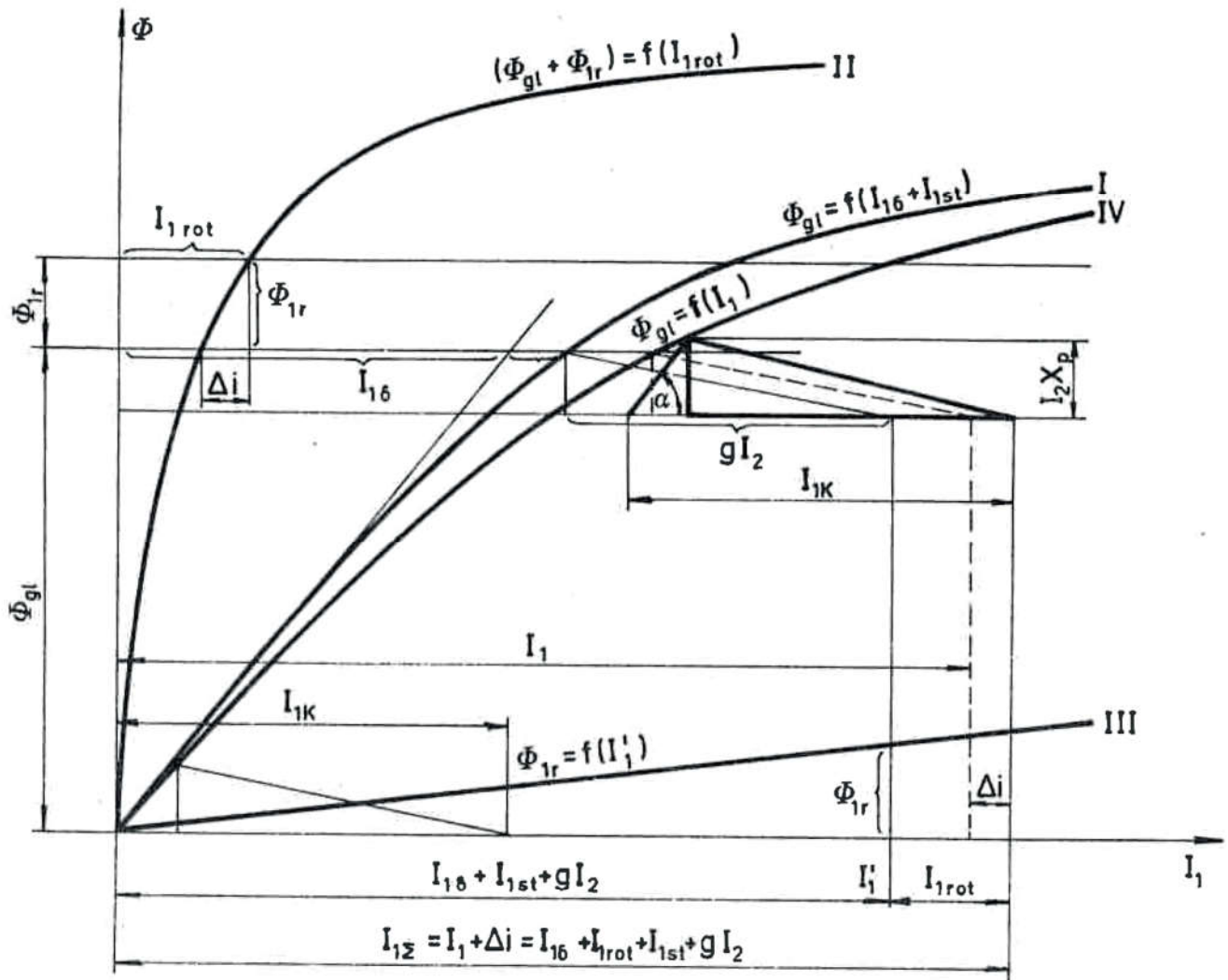
Do sada nismo uzeli u obzir rasipno polje u rotoru. To polje je istosmjerno i zato u rotorskom namotu ne inducira nikakav napon, a sa statorskim uopće nije ulančen. Međutim, rasipni tok povećava gustoću toka u rotorskom dijelu magnetskog kruga, kako to vidimo prikazano u sl. 3.4-01. Veličina rasipnog toka



Sl. 3.4-01 Glavni i rasipni tok rotora kod sinhronog stroja sa izraženim polovima

Φ_{lr} zavisi od magnetskog napona između polnih stopala. Radi velikog magnetskog otpora u zraku, rasipno polje je praktički proporcionalno magnetskom naponu između stopala.

U sl. 3.4-02 prikazan je postupak za određivanje utjecaja rasipanja rotora na ukupno potrebnu uzбудnu struju za neki pogonski slučaj, npr. $I_2=I_{2nom}$, $\cos\varphi_2=0$.



Sl. 3.4-02 Dijagram toka i proticanja $\Phi=f(I_1)$ za pojedine dijelove magnetskog kruga sinhronog stroja

Redoslijed postupka za određivanje povećanja uzbuđne struje radi rasipanja rotora je slijedeći.

Zadane su slijedeće karakteristike:

$$\Phi_{gl} = f(I_{1\delta} + I_{1st}) \quad \text{I}$$

$$\Phi_{gl} + \Phi_{1r} = \Phi_{uk} = f(I_{1rot}) \quad \text{II}$$

$$\Phi_{1r} = f(I_1') \quad \text{III}$$

$$\Phi_{gl} = f(I_1) \quad \text{IV}$$

gdje znači $I_{1\delta}$ dio uzbuđne struje koji se troši na zračni raspor, I_{1st} dio za željezo statora, I_{1rot} dio za željezo rotora,

dok je I_1' dio uzbudne struje koji odgovara magnetskom naponu medju susjednim polnim stopalima, a I_1 ukupna uzbudna struja bez utjecaja rotorskog rasipanja, te I_{1uk} uključivši utjecaj rotorskog rasipanja.

Karakteristika I kaže koliki se dio uzbudne struje troši na magnetski pad napona u zračnom rasporu i statorskom dijelu magnetskog kruga kod Φ_{g1} .

Karakteristika II kaže koliki se dio uzbudne struje troši na pad magnetskog napona u rotorskom dijelu magnetskog kruga pri uspostavljanju ukupnog magnetskog toka u rotoru.

Možemo zaključiti da je za neki Φ_{g1} i pripadni Φ_{1r} ukupno potrebna uzbudna struja:

$$I_{1uk} = I_{1\delta} + I_{1st} + I_{1rot} + gI_2$$

Veličina gI_2 je reakcija armature, za čije poništavanje moramo povisiti uzbudnu struju rotora.

Medjutim, da bi mogli odrediti odnose izmedju Φ_{g1} i pripadnog Φ_{1r} za bilo koje pogonske uvjete, moramo se poslužiti karakteristikom III.

Karakteristika III pokazuje kolika je veličina rasipnog toka Φ_{1r} pri određenoj veličini magnetskog napona izmedju polnih stopala. Naime, magnetski napon izmedju polnih stopala je proporcionalan sumi:

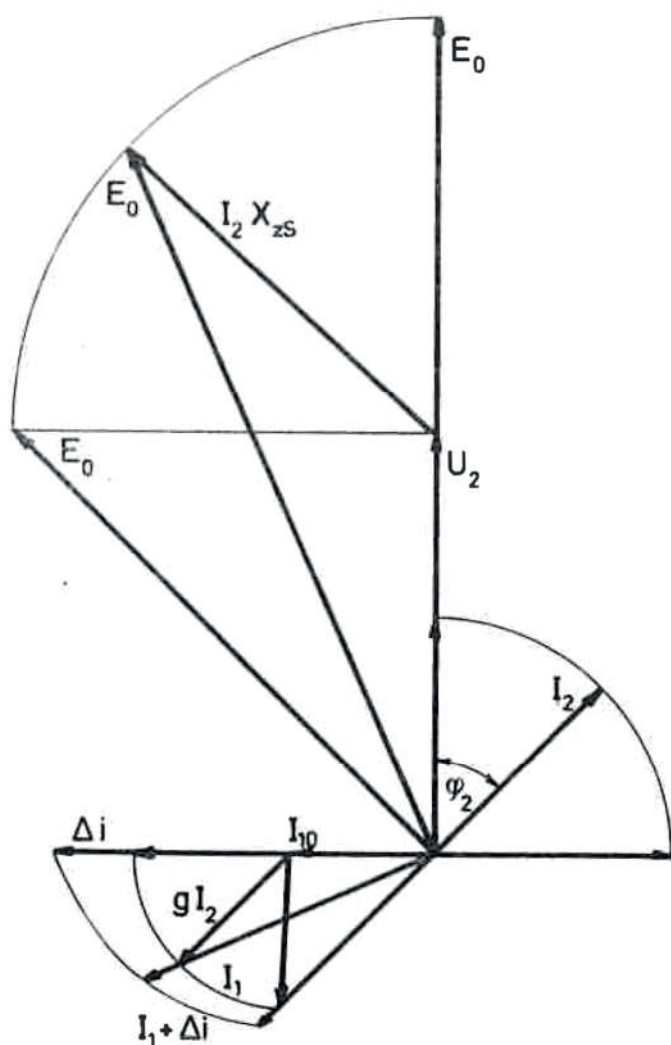
$$I_1' = I_{1\delta} + I_{1st} + gI_2$$

pa je i karakteristika III nacrtana kao $\Phi_{1r} = f(I_1')$.

Daljnji postupak je slijedeći: Za potrebnu veličinu opterećenja, npr. $I_2 = I_{2n}$, $\cos\varphi_2 = 0$ odredimo na karakteristici I pomoću Potierovog trokuta potrebnu veličinu uzbudne struje I_1' . Ova uzbudna struja odgovara magnetskom naponu izmedju polnih stopala pri uspostavljanju potrebnog toka Φ_{g1} u statoru pri opterećenju strujom I_2 i $\cos\varphi_2 = 0$. Prema tome će rasipni tok Φ_{1r} biti proporcionalan I_1' . Veličinu Φ_{1r} odredimo na karakteristici III.

Budući da smo odredili Φ_{lr} a prethodno smo pomoću Potierovog trokuta odredili potrebnu E_2 odn. Φ_{gl} , to nam je sada poznata suma $\Phi_{gl} + \Phi_{lr}$. Iz karakteristike II dobijemo za veličinu $\Phi_{gl} + \Phi_{lr}$ potrebnu uzбудu I_{lrot} za savladavanjem magnetskog pada napona u rotorskom dijelu magnetskog kruga. Dodavanjem ove struje k već odredjenoj I_1' dobijemo ukupno potrebnu uzbudnu struju:

$$I_{luk} = I_1' + I_{lrot} = I_{l\delta} + I_{lst} + I_{lrot} + gI_2$$



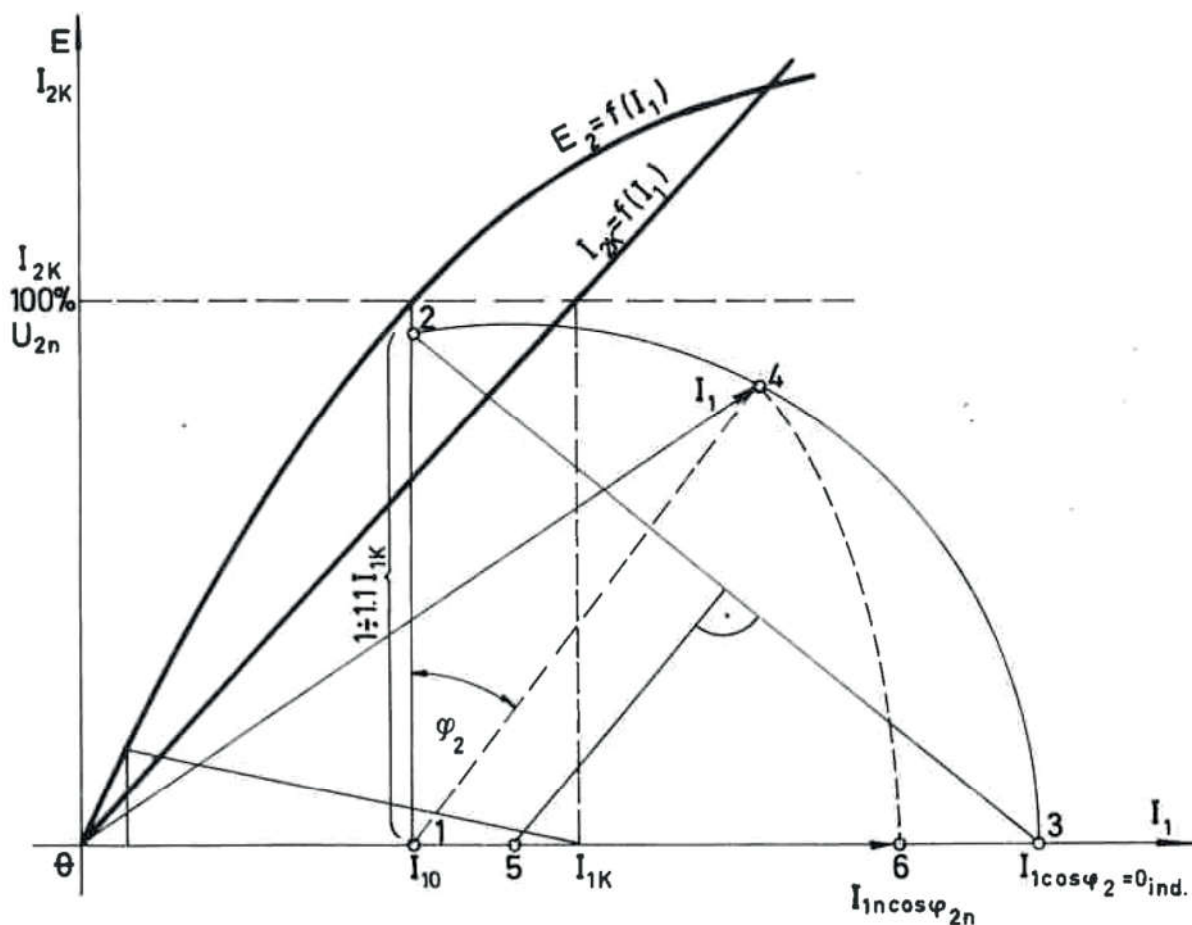
Sl. 3.4-03 Vektorski prikaz promjene uzbudne struje u ovisnosti o $\cos\varphi_2$ uz $I_2 = \text{konst.}$ mnogo veće kod tereta

za $\cos\varphi_{2ind} = 0$ tj. da raste kad $\cos\varphi_2$ pada. Zato se u našem vektorskom dijagramu mijenja slika utoliko, da se prema sl.3.4-03 kružnica, po kojoj se mijenja I_1 od $\cos\varphi_2 = 1$ do $\cos\varphi_2 = 0$, a na kojoj leži vrh vektora $I_1 + \Delta i = I_{luk}$, deformira.

Dobivena struja I_{luk} je veća od one struje koju bi dobili postupkom prema sl. 3.3-03. Naime, ako na sl. 3.4-02 postavimo Potierov trokut na karakteristiku IV, koja predstavlja karakteristiku praznog hoda $\Phi_{gl} = f(I_1)$ kao karakteristika na sl. 3.3-03, dobit ćemo prema postupku iz sl. 3.3-03 uzbudnu struju za naš pogonski slučaj po veličini za Δi manju nego u slučaju u kojem se uzima u obzir rasipanje rotora. Prema tome je Δi ona uzbudna struja, koju traži povećanje gustoće magnetskog toka u rotoru radi primarnog rasipnog toka. Jasno je da je Δi

3.5. Švedski dijagram i regulacione krivulje

Postavljamo pitanje: Kolika je uzbudna struja $I_1 + \Delta i$ potrebna za određeni generator kod određenog tereta? Želimo imati preglednu sliku za tu ovisnost. Kod velikih generatora to ne možemo izmjeriti u ispitnoj stanici, jer je nemoguće, da ispitnu stanicu opremimo sa potrebnim pogonom za tako veliki generator. U tu svrhu nam služi tzv. Švedski dijagram, kojeg dobijemo na taj način, da u karakteristike praznog hoda i kratkog spoja ucrtamo za 180° zaokrenuti vektorski dijagram uzbudne struje prema sl. 3.4-03, te tako dobijemo sl. 3.5-01.

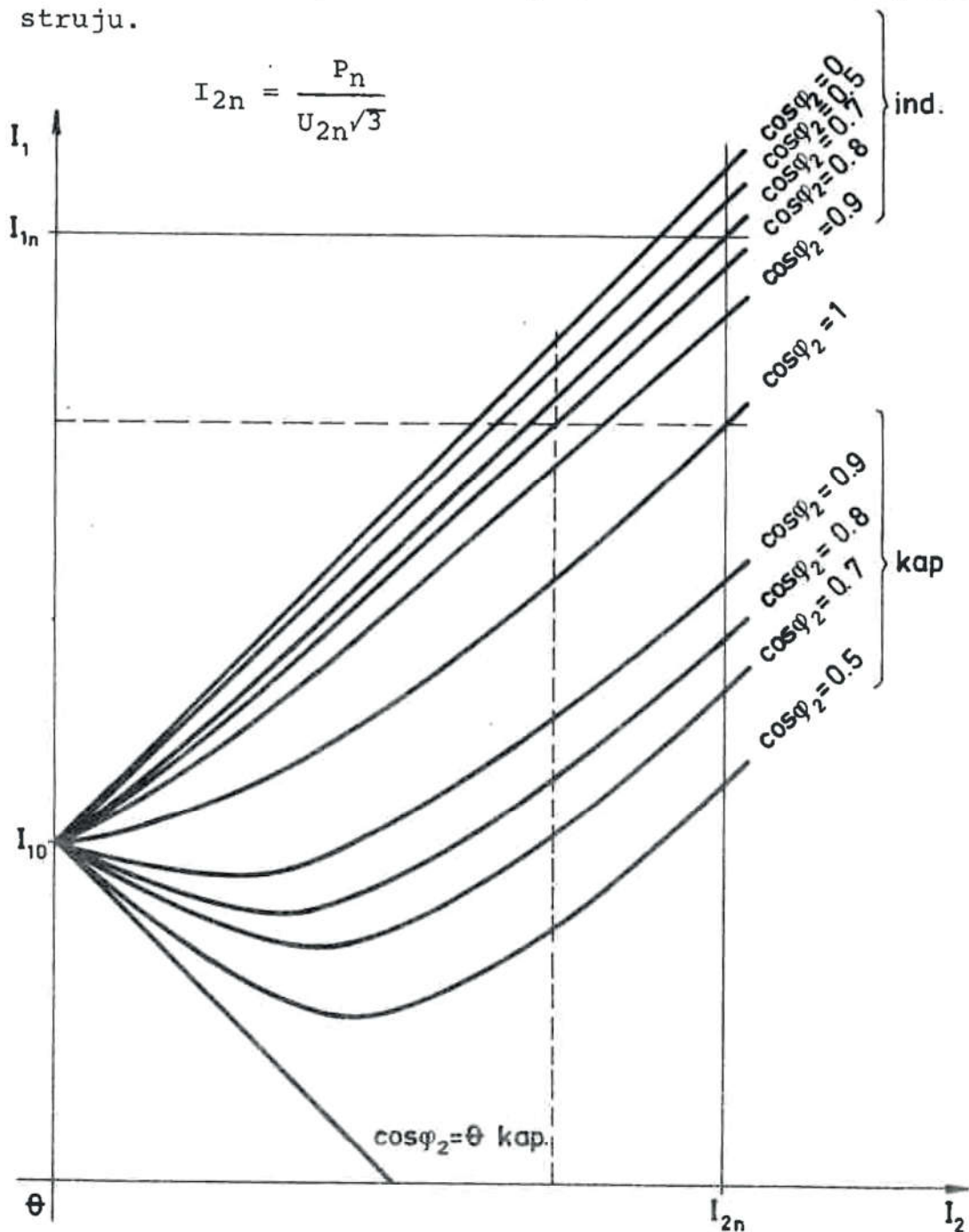


Sl. 3.5-01 Švedski dijagram

Vektorski dijagram uzbudne struje odredimo na slijedeći način. Dužinu (1-2) uzimamo do 10% veću od I_{1K} . Uzbudnu struju kod nazivnog tereta i $\cos \varphi_2 = 0$ ($I_{1 \cos \varphi_2 = 0}$ u točki 3) možemo izmjeriti. Između točaka 2 i 3 povučemo pravac, kojeg raspolovimo simetralom a time dobijemo na apscisi točku 5 (presjecište simetrale i apscise). Sa šestarom iz te točke povučemo kružnicu kroz

točku 2 i 3, na kojoj leže vrhovi vektora uzbuđnih struja za razne $\cos\varphi_2$ kod nazivnog tereta, kako je to za jedan određeni $\cos\varphi_2$ u sl. 3.5-01 ucrtano, i dobivena točka 4. Sa šestom u točki 0 možemo točku 4 spustiti dolje na apscisu i dobijemo u točki 6 maksimalno dozvoljenu uzbuđnu struju $I_{1n\cos\varphi_2n}$.

Iz Švedskog dijagrama vidimo pregledno, kako uzbuđna struja ovisi o $\cos\varphi_2$ tereta. Statorski namot je dimenzioniran za nazivnu prividnu snagu generatora odn. odgovarajuću struju.



Sl. 3.5-02 Regulacione krivulje

dok za dimenzioniranje rotorskog namota treba još dodati podatak nazivnog $\cos\varphi_2$, koji se napiše na pločici generatora i koji znači da se može generator obzirom na zagrijavanje uzbuđenog namota opteretiti s nazivnom snagom do $\cos\varphi_{2n}$. Ako je $\cos\varphi_2$ manji, snaga generatora pada ili se uzbuđni namot termički preopterećuje. Tako se može otprilike ocijeniti da je prividna snaga generatora kod $\cos\varphi_2=0$ prema sl. 3.5-01 u omjeru $\overline{1-6:1-3}$ manja.

Na osnovu švedskog dijagrama možemo nacrtati tzv. regulacione krivulje, koje prema sl. 3.5-02 pokazuju ovisnost uzbuđne struje I_1 o teretu i $\cos\varphi_2$.

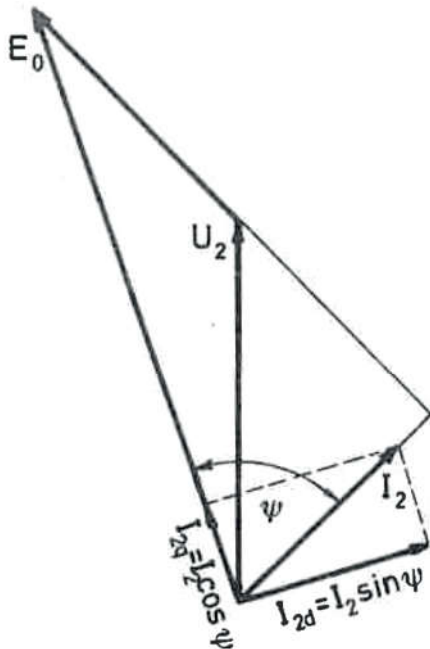
3.6. Vektorski dijagram generatora s izraženim polovima

U pogl. 3. smo u svim dosadašnjim razmatranjima pretpostavljali stroj s neizraženim polovima, iako smo ga više puta radi zornosti u prikazivanju crtali s izraženim polovima. Razlika među tim izvedbama leži u tome, što kod izraženih polova imamo različiti magnetski otpor uzduž zračnog rasporeda. U pogl. 2.62. dijelili smo magnetski otpor na uzdužni u simetrali pola i na poprečni u simetrali između polova. Magnetski otpor između statora i rotora odlučan je za utjecaj reakcije armature, pa smo zato za preračunavanje sekundarne struje na primarnu stranu uveli faktore k_d i k_q , pomoću kojih možemo posebno uzdužnu komponentu sekundarne struje $I_2\sin\psi$ a posebno poprečnu komponentu sekundarne struje $I_2\cos\psi$ preračunati na primarnu stranu:

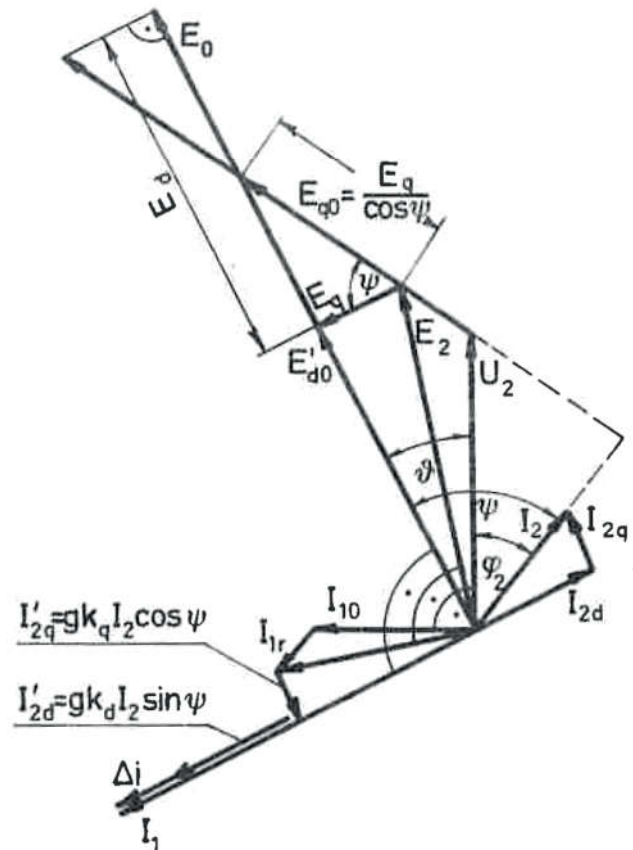
$$I'_{2d} = g \cdot k_d \cdot I_2 \cdot \sin\psi$$

$$I'_{2q} = g \cdot k_q \cdot I_2 \cdot \cos\psi$$

ako " ψ " predstavlja kut između vektora struje " I_2 " i između vektora " E_0 ", kako je to prikazano u sl. 3.6-01. Kod crtanja vektorskog dijagrama dolazimo, međjutim na poteškoće da nam kut nije unaprijed poznat, a za razdiobu sekundarne struje na uzdužnu i poprečnu komponentu nam je ipak potreban. Nacrtajmo najprije vektorski dijagram prema stvarnoj fizikalnoj slici



Sl.3.6-01 Rastavljanje vektora struje I_2 na uzdužnu i poprečnu komponentu



Sl.3.6-02 Potpuni vektorski dijagram sinhronog generatora sa izraženim polovima (pojednostavljeni)

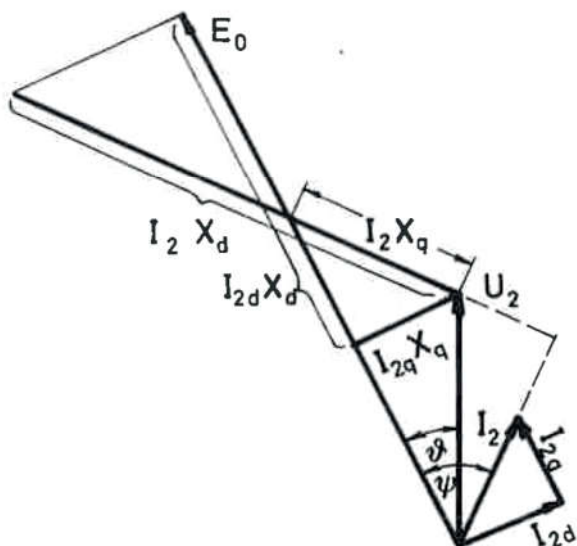
za konkretan pogonski slučaj, određen vektorima U_2 i I_2 . Pretpostavimo da je pravac vektora E_0 odnosno kut ψ poznat, kako to vidimo u sl. 3.6-02. Struja I_2 prouzrokuje pad napona $I_2 X_{2r}$ te dobijemo vektor napona E_2 koji se stvarno inducira u sekundarnom namotu. Tom naponu odgovara prema karakteristici praznog hoda uzbudna struja I_{1r} . Da dobijemo ukupnu primarnu struju, trebamo vektorski pribrojiti najprije poprečnu sekundarnu struju I_{2q} preračunatu na primarnu stranu

$$I'_{2q} = g \cdot k_q \cdot I_2 \cdot \cos \psi$$

a zatim uzdužnu sekundarnu struju I_{2d} preračunati na primarnu stranu:

$$I'_{2d} = g \cdot k_d \cdot I_2 \cdot \sin \psi$$

Ako još dodamo potrebnu struju Δi za primarno rasipanje, dobit ćemo potrebnu ukupnu primarnu uzbudnu struju I_1 . Možemo računa-



Sl.3.6-03 Pojednostavnjeni vektorski dijagram sinhronog generatora

ti i s fiktivnim padom napona uslijed reakcije armature, no moramo razlikovati fiktivnu reaktanciju u uzdužnom pravcu X_{hd} , i u poprečnom pravcu, te dobijemo:

$$E_q = I_2 \cdot X_{hq} \cdot \cos \psi$$

$$E_d = I_2 \cdot X_{hd} \cdot \sin \psi$$

Ako produžimo pravac vektora rasipnog pada napona do vektora $\underline{E}_0$, dobijemo neki vektor $\underline{E}_{q0}$, koji, fizikalno gledano, nema nikakvog značenja. Za $\underline{E}_{q0}$ vrijedi relacija:

$$E_{q0} = \frac{E_q}{\cos \psi} = I_2 \cdot X_{hq}$$

Vrh vektora $\underline{E}_{q0}$ leži na vektoru $\underline{E}_0$, što omogućuje određivanje pravca vektora $\underline{E}_0$ bez prethodnog poznavanja kuta ψ , jer je vektor $\underline{E}_{q0}$ okomit na vektor struje I_2 . Analogno, kako smo to učinili kod strojeva s neizraženim pclovima, ovdje ćemo računati sa sinhronom reaktancijom, naravno uzdužnom X_d , i poprečnom X_q iz čega slijedi pojednostavnjeni vektorski dijagram prema sl. 3.6-03.

3.7. Udarni kratki spoj i reaktancija sinhronih strojeva

Kod svake brze promjene stanja u električnom stroju moramo računati s mehaničkom i magnetskom tromošću. Kod trenutnog kratkog spoja uzbuđenog generatora utjecaj mehaničke tromosti je relativno malen, jer je ta prelazna pojava tako kratkotrajna, da možemo, praktički, radi velike mehaničke tromosti rotora pretpostaviti konstantnu brzinu vrtnje. Drugačije je s magnetskom tromošću. Magnetsko stanje sinhronog generatora određeno je naponom E_2 , koji je u praznom hodu jednak na-

ponu U_2 . Kod uzbude praznog.hoda i kratko spojenog generato-
ra, tj. kod trajnog kratkog spoja, je $E_2 = I_{2k} X_{2r}$, što znači da
je E_2 određen rasipnim padom napona, koji je za cca 10 puta
manji od napona E_2 u praznom hodu. Kako o veličini napona E_2
ovisi magnetsko stanje stroja, mora i glavni tok u generatoru
biti cca 10 puta manji. Glavni tok se ne može trenutno 10 puta
smanjiti, jer je svaka promjena toka vezana za vremensku kon-
stantu T električkih krugova, koji ga obuhvaćaju

$$T = \frac{L}{R} = \frac{w\Phi}{iR} = \frac{w\Phi}{iR'w^2} = \frac{\Phi}{iwR'} = \frac{1}{R_m R'}$$

$$L = \frac{w\Phi}{i}$$

gdje je: $R_m = \frac{iw}{\Phi}$ tj. magnetski otpor magnetskog kruga,

$$R' = \frac{R}{w^2} = \frac{R}{w} \frac{1}{w}$$

tj. omski otpor namota R sveden na otpor namota s istom koli-
činom bakra ali s jednim zavojem.

Ako se linearne dimenzije stroja mijenjaju x puta,
tada se R' i R_m mijenjaju:

$$R'_x = \frac{x\ell}{x^2 q} = R' \frac{x}{x^2} = \frac{R'}{x}$$

i analogno:

$$R_{mx} = R_m \frac{x}{x^2} = \frac{R_m}{x}$$

tj. električni i magnetski otpor se pri promjeni linearnih di-
menzija stroja mijenjaju obrnuto proporcionalno s promjenom o-
vih dimenzija.

Sada će se i T mijenjati:

$$T_x = \frac{1}{R_{mx} R'_x} = \frac{1}{\frac{R_m}{x} \frac{R'}{x}} = \frac{x^2}{R_m R'} = T x^2$$

proporcionalno s kvadratom promjene linearnih dimenzija.

Što je manji magnetski i električki omski otpor, to je veća vremenska konstanta kruga, to će se polaganije odvijati svaka promjena magnetskog stanja. Električki, kao i magnetski otpor, pada po zakonima sličnosti proporcionalno s linearnim dimenzijama stroja, odnosno s $\sqrt{P}$. Prema tome vremenska konstanta raste s kvadratom linearnih dimenzija, odnosno s $\sqrt{P}$. Ako usporedimo vremenske konstante dvaju generatora kojima se snage odnose kao 1:10000 (npr. generator 20 kVA i generator 200000 kVA) dobit ćemo odnos:

$$1 : \left(\frac{200000}{20} \right)^{1/2} = 1 : \sqrt{10000} = 1 : 100$$

ili drugim riječima: ako kod malih generatora mjerimo vremensku konstantu u stotinkama sekunde, kod najvećih generatora je mjerimo u sekundama.

Kada kod uzbudjenog sinhronog generatora napravimo kratak spoj na stezaljkama sekundarnog namota, imamo glavni tok generatora obuhvaćen s kratkospojnim sekundarnim namotom i preko uzбудnika kratko spojenim primarnim namotom. Ako radi lakšeg prikazivanja fizikalne slike pretpostavimo da je omski otpor u oba namota jednak nuli, kako to obično činimo kod strojeva i transformatora onda se glavni tok ne može mijenjati niti u rotorskom a niti u statorskom dijelu svog puta, što dokazujemo slijedećim:

$$\text{Ako je: } R_1 = 0 ; \quad R_2 = 0$$

tada mora biti:

$$w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = 0 ; \quad w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = 0$$

$$\text{odnosno: } \Phi_1 = k ; \quad \Phi_2 = k$$

$$\text{gdje je: } \Phi_1 = \Phi_{g1} + \Phi_{1r} ; \quad \Phi_2 = \Phi_{g1} + \Phi_{2r}$$

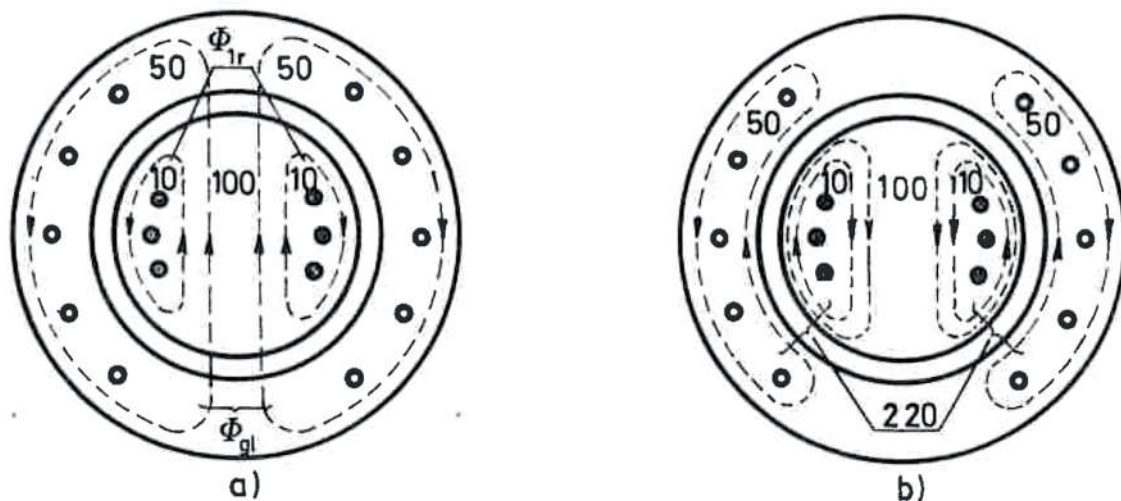
Ako generator prethodno nije bio opterećen, onda je $\Phi_{2r} = 0$.

Zašto se tok ne može mijenjati?

Ako bi se tok i najmanje mijenjao, npr. smanjivao, tada bi ova promjena inducirala napon, koji bi u namotima bez

omskog otpora potjerao beskonačno veliku struju, koja bi djelovala u smislu podržavanja toka, a ne smanjivanja. Prema tome je rezultat slijedeći: Tok se ne može mijenjati, jer bi i najmanja promjena izazvala suprotno djelovanje. Da se tok ne mijenja mora nužno u kratkospojenim namotima teći ona struja koja je potrebna za podržavanje toka na konstantnoj veličini. Ova struja se ne inducira, ona nužno mora postojati; njezina veličina, međjutim, ovisi o magnetskom otporu magnetskog kruga. Taj se može mijenjati, pa se onda i struja u namotima mijenja.

Pokušajmo na osnovu ovih fizikalnih osnova prikazati fizikalnu sliku generatora kod trenutnog kratkog spoja u jednoj fazi statora. U sl. 3.7-01 a) prikazan je turbogenerator



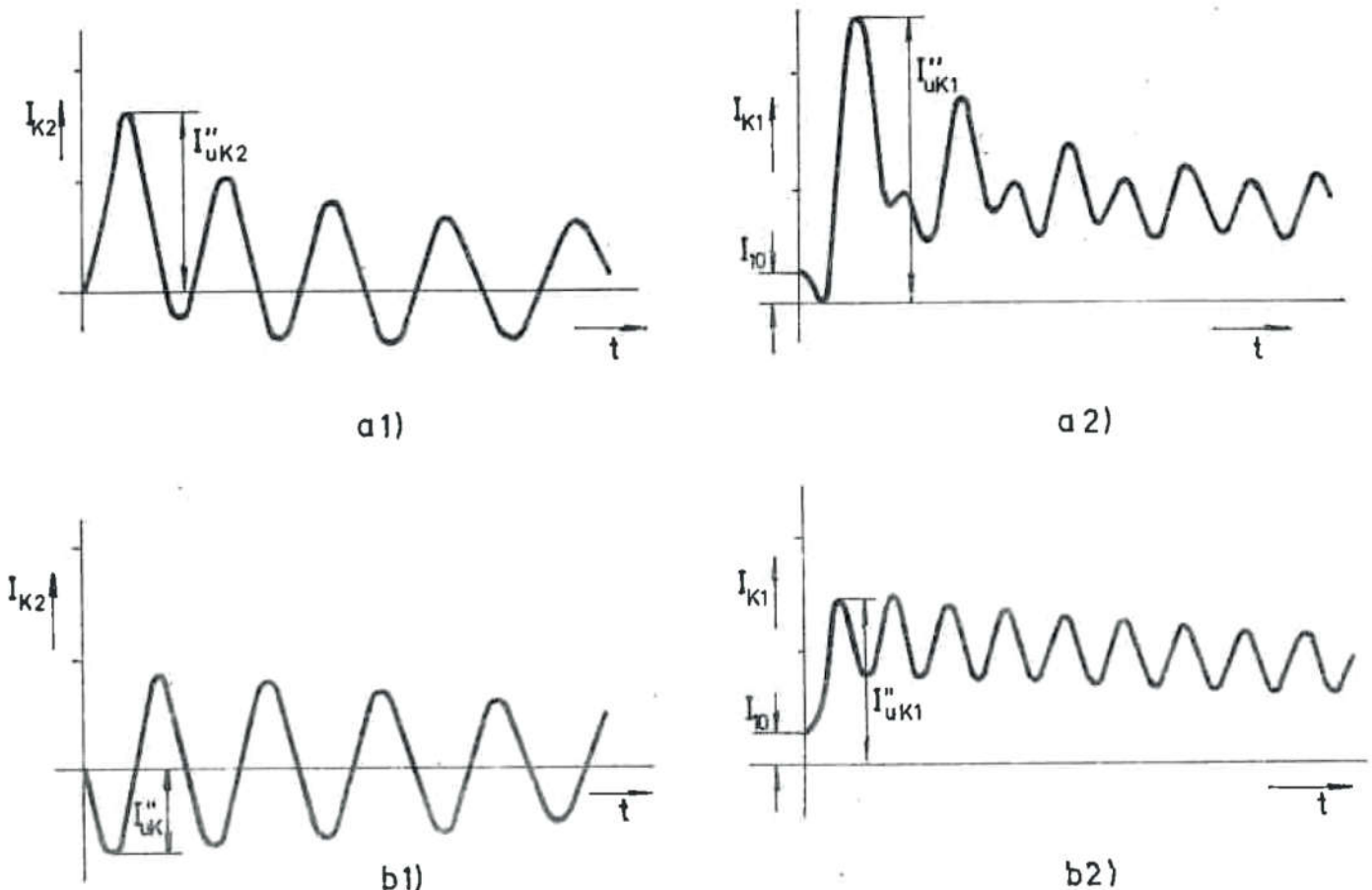
Sl. 3.7-01 Kratki spoj turbogenerators

- a) u trenutku $t=0$ se osi uzbuđnog namota i sekundarne kratko spojene faze poklapaju
- b) stanje tokova i struja nakon $t=\pi$

u presjeku sa ucrtanim primarnim tokom Φ_1 , koji se dijeli na glavni tok Φ_{gl} koji obuhvaća primarni i sekundarni namot, i rasipni primarni tok Φ_{lr} koji obuhvaća samo primarni namot. Da se dobije otprilike odnos veličine tokova, označen je glavni tok sa $2 \times 50 = 100$ jedinica, a rasipni sa $2 \times 10 = 20$ jedinica. Pretpostavimo da smo u trenutku $t=0$, kada se os primarnog namota poklapa sa osi sekundarne faze, ovu kratko spojili. Čim smo to učinili glavni tok se ne smije mijenjati oko sekundarne faze a niti oko primarnog namota, jer je ovaj preko uzbuđnika kratko

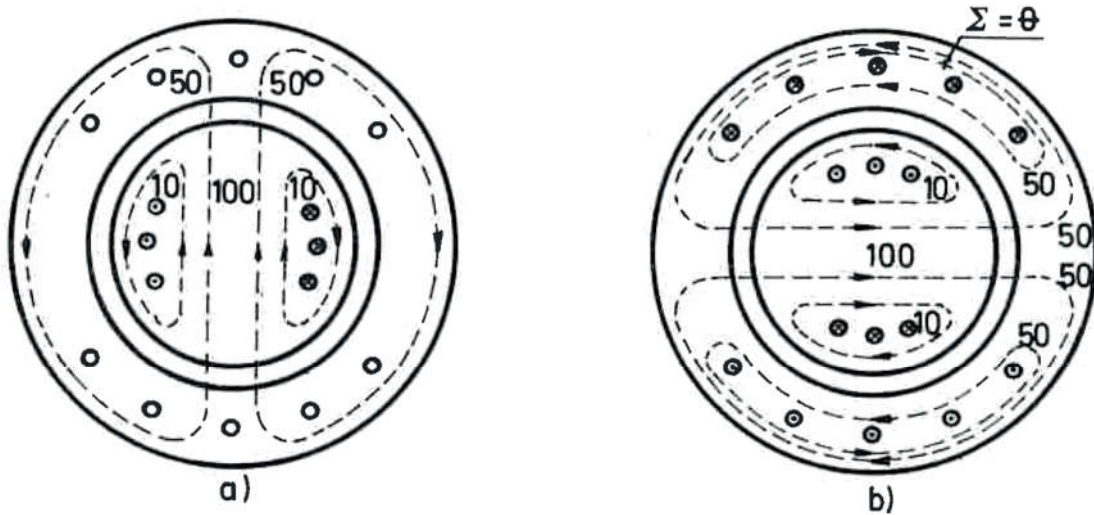
spojen. Međutim, rotor se vrti i nakon pola okreta ($t=\pi$) mora prema sl. 3.7-01 b) tok u rotoru biti protivnog pravca, a u statoru istog kao prije. Glavni tok se mora razdijeliti u dva toka, u tok koji obuhvaća primarni namot, i tok koji obuhvaća sekundarni namot, a oba ova toka s primarnim rasipnim tokom, dakle 220 jedinica, se moraju zatvarati po rasipnim putevima između oba namota. Struje moraju u tom trenutku u primarnom i sekundarnom namotu narasti na onoliku vrijednost, da savladaaju magnetski otpor tih rasipnih puteva. Nakon još pola okreta ($t=2\pi$) dobivamo ponovno sl. 3.7-01 a).

Prema tome, uz uvjet da su omski otpori jednaki nuli, dobijemo u statorskom namotu jedne faze stalnu izmjeničnu struju, koja nije između maksimalne udarne struje kratkog spoja i nule. Dobijemo izmjeničnu struju sa istosmjernom komponentom I_{Σ} . Ako međutim uzmemo u obzir i radne otpore, onda ta struja pada, kako je to u sl. 3.7-02 a₁ prikazano.



Sl. 3.7-02 Kratki spoj turbogeneratorsa
 Oblik struje u kratko spojenoj statorskoj fazi i u uzбудnom namotu za slučaj kratkog spoja prema slici 3.7-01 (vidi a₁ i a₂) i sl. 3.7-03 (vidi b₁ i b₂) ali uz $R_1 \neq 0$ i $R_2 \neq 0$

Ako, međjutim, kratak spoj napravimo u trenutku $t=0$ kada je os primarnog namota okomita na os sekundarnog namota, kako je to prikazano u sl. 3.7-03 a), onda statovski namot



Sl. 3.7-03 Kratki spoj turbogenerators

- a) u trenutku $t=0$ su osi uzbuđnog namota i kratko-spojne sekundarne faze okomite
- b) stanje tokova i struja nakon $t=\pi/2$

kratko spojene faze u tom trenutku nije obuhvaćen od glavnog toka, pa se protivi i svakom obuhvaćanju s bilo kojim tokom. Kada se rotor okrene za $1/4$ okretaja ($t=\pi/2$), tada prema sl. 3.7-03 b) svi amperzavoji rotora nastoje potjerati glavni tok oko sekundarnog namota, na što će stator svojim amperzavojima djelovati da to spriječi. Dakle, iako oko sekundarnog namota nema toka, ipak mora kroz sekundarni namot teći izmjenična struja, koja sa svojim amperzavojima sprečava da bi primarnim amperzavojima uzbuđeni glavni tok obuhvatio i sekundarni namot. Zato se primarnim amperzavojima mora svladati magnetski otpor na rasipnom putu između primarnog i sekundarnog namota. Vremenski dijagram struje nema istosmjerne komponente, pa je zato maksimalna udarna struja kratkog spoja dva puta manja i ako uzmemo u obzir radne otpore, ona pada (v.sl. 3.7-02 b₁). Kod ovih razmatranja ucrtali smo i primarno rasipanje, dok smo sekundarno rasipanje zanemarili.

Rotorska struja će također vremenski biti promjenljiva. Njezin oblik će ovisiti o karakteru sekundarne, tj. statovske struje, budući da rotorska struja mora u svakom trenutku

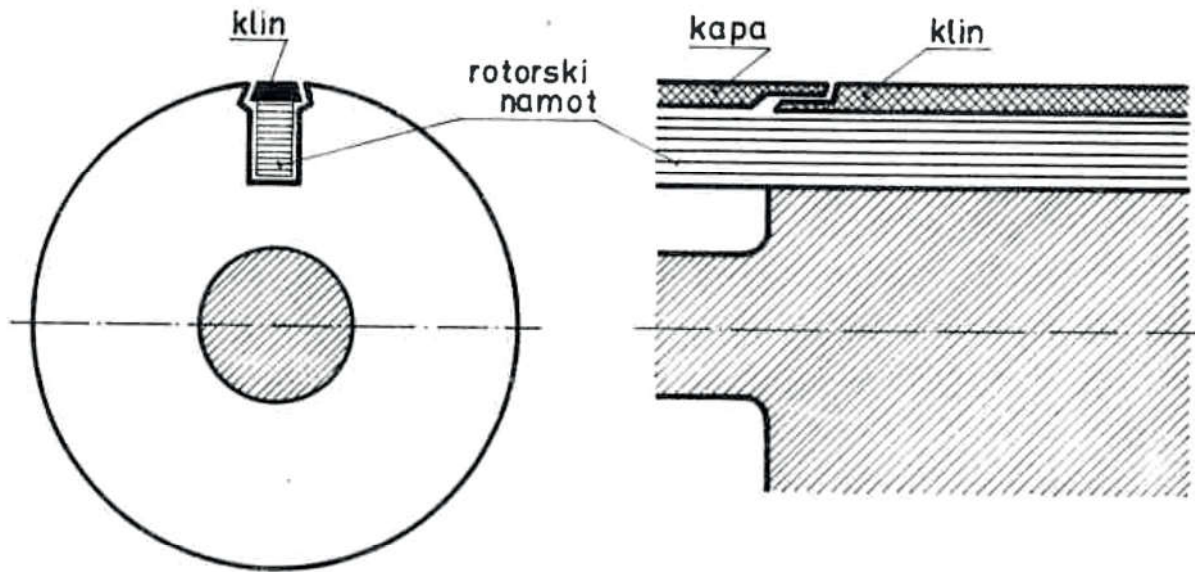
nakon kratkog spoja poništiti djelovanje statorskog protjecanja u rotoru. U našem slučaju je samo jedna statorska faza u kratkom spoju, pa se protjecanje jedne faze statora može ekvivalentno nadomjestiti sa dva okretna protjecanja, koja se vrte u suprotnim pravcima, s tim da je jedno u smjeru a drugo suprotno od smjera vrtnje rotora (vidi toč. 2.53). Okretno protjecanje u smjeru vrtnje rotora će zahtijevati odgovarajuće povećanje istosmjerne komponente rotorske struje, dok će okretno protjecanje nasuprot smjera vrtnje rotora prouzročiti izmjeničnu komponentu rotorske struje s dvostrukom frekvencijom. Rotorska struja će za slučaj kratkog spoja prema sl. 3.7-03 imati oblik prikazan na sl. 3.7-02 b₂) time, da smo uzeli u obzir radne otpore, pa zato struje s vremenom padaju.

Za slučaj kratkog spoja prema sl. 3.7-01, rotorska struja će, osim komponente s dvostrukom frekvencijom, dobiti još i komponentu s jednostrukom frekvencijom, budući da protjecanje statorske faze ima i istosmjernu komponentu, koja stvara u prostoru stojeće istosmjerno protjecanje. Oblik struje u uzbuđnom namotu prikazan je u sl. 3.7-02 a₂).

Ako želimo dobiti stvarnu fizikalnu sliku, moramo uzeti u obzir da omski otpor namota nije jednak nuli i da ima masivni rotor, koji zapravo predstavlja jedan fiktivni treći namot, odnosno možemo ga kao takvog pretpostaviti. Iz razloga da se priguši njihanje rotora, a što ćemo kasnije obraditi, obično se kao još jedan stvarni treći namot pojavljuje tzv. prigušni namot dodatno ugrađen u rotor. Kod turbogeneratorsa ili u vidu metalnih klinova koji zatvaraju utore prema slici 3.7-04 ili kao poseban namot u obliku kaveza iz bakra ispod klinova. Kod rotora s izraženim polovima izrađuje se prigušni namot u vidu štapova ugrađenih u polna stopala prema slici 3.7-05. Jedni i drugi, klinovi odnosno štapovi, su sa bočne strane kratko spojeni tako, da prigušni namoti predstavljaju kratko spojeni kavez, koji obuhvaća rotor.

Masivne polove kao i prigušni namot možemo predstavljati kao treći kratko spojeni namot.

Ako su polovi lamelirani i ako nema prigušnog namota, onda nema ni stvarnog ni fiktivnog prigušnog namota. Razmatrajmo



Sl. 3.7-04 Prigušni kavez kod turborotora

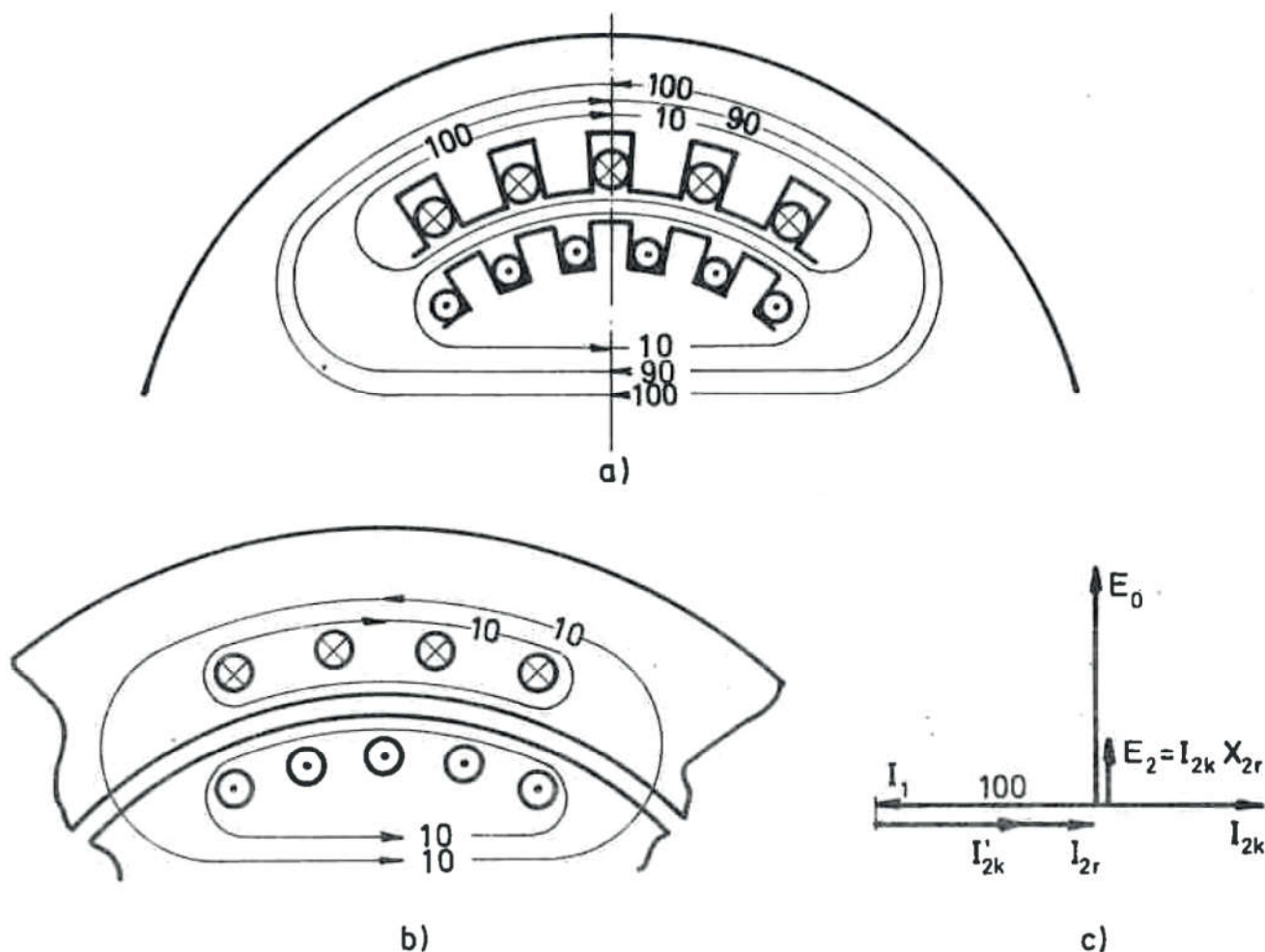


Sl. 3.7-05 Prigušni kavez kod sinhronog stroja s izraženim polovima

najprije taj slučaj, ali tako da uzimamo omski otpor namota u obzir. Omski otpor prouzrokuje da se kratko spojeni namot ne može trajno suprotstavljati promjeni toka. Prema tome, se magnetsko stanje prema sl. 3.7-01 b) mora mijenjati u tom smislu, da silnice rotorskog toka vremenom ipak ulaze u statorski namot i obrnuto, jer moraju inducirati onaj napon, koji pokriva omske padove napona.

Ako od jednofaznog kratkog spoja prelazimo na simetrični trofazni kratki spoj, onda trofazna struja prouzrokuje okretno polje, koje se sinhrono vrti sa rotorom; ovo polje je u odnosu na rotor istosmjerno, pa će se kao istosmjerno polje probijati kroz primarni namot u glavni magnetski krug.

Na kraju dobijemo magnetsko stanje prema sl.3.7-06 a). Na rasipnim putevima ostali su samo rasipni tokovi. Primarni i sekundarni glavni tokovi su protusmjerni. Fizikalno može posto-



Sl. 3.7-06 Stanje tokova nakon završetka prelazne pojave kratkog spoja i pripadni vektorski dijagram

jati samo njihova razlika odnosno fizikalno bolje rečeno: razlika primarnih i sekundarnih amperzavoja uzbuđuje glavni tok, koji je samo toliko velik, da inducira u sekundarnom namotu napon za pokrivanje rasipnih i omskih padova napona u statorskom namotu. Rezultirajuće magnetsko stanje prikazano je u sl. 3.7-06 b) zajedno s pripadnim vektorskim dijagramom. Ako promatramo sl. 3.7-01 b), koja predstavlja trenutak u kojem je struja kratkog spoja maksimalna i sl. 3.7-06, koja predstavlja svršetak prolazne pojave s trajnom strujom kratkog spoja, onda vidimo da tokom te prolazne pojave glavni tok, koji obuhvaća

statorski namot, s rasipnog puta ulazi kroz rotorski namot u glavni magnetski krug.

Već prije smo napomenuli da struja mora biti uvijek tolika, da savlada magnetski otpor na putu svog glavnog toka. U prvom trenutku prema sl. 3.7-01 b) i sl. 3.7-03 b) je to magnetski otpor rasipnog puta, pa maksimalna udarna struja, tj. njezina amplitudna vrijednost iznosi za slučaj sl. 3.7-03 b)

$$I'_{uk2} = \sqrt{2} \frac{E_2}{X_d}$$

jer je $\Phi_{gl} R'_m = I'_{uk2} w_2$ a odavle (vidi jedn. 3.1-01)

$$I'_{uk2} = \frac{\Phi_{gl} R'_m}{w_2} = \frac{E_2 \sqrt{2}}{2\pi f n_2 w_2} \frac{R'_m}{w_2} = \sqrt{2} \frac{E_2}{\omega L} = \sqrt{2} \frac{E_2}{X_d}$$

a za slučaj sl. 3.7-01 b) dolazi k tome još istosmjerna komponenta pa dobijemo uz zanemarenje omskog otpora:

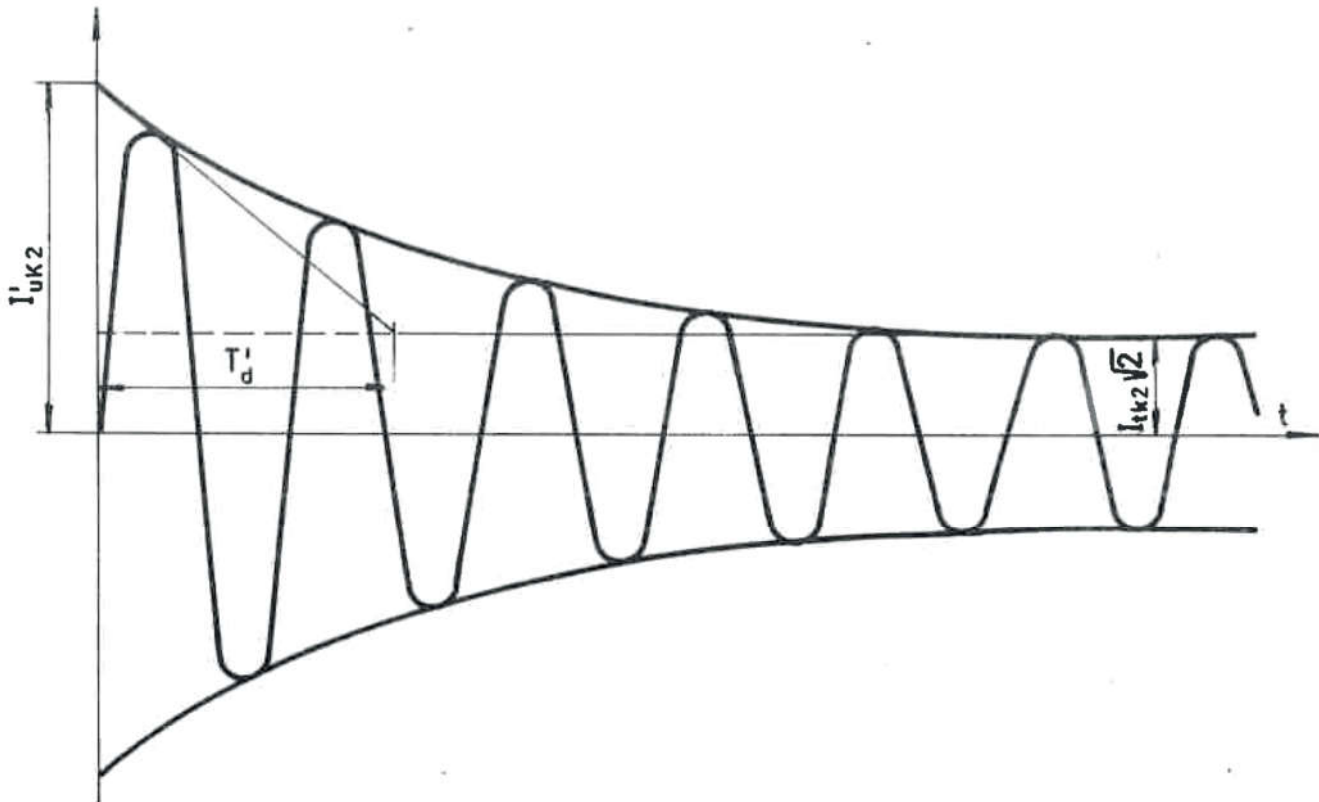
$$I'_{uk2} = 2\sqrt{2} \frac{E_2}{X_d} = \text{udarna struja trofaznog kratkog spoja}$$

ako sa X_d označimo sekundarni rasipni induktivni otpor između primarnog i sekundarnog namota, a L' i R'_m pripadni induktivitet i magnetski otpor.

Na kraju te prelazne pojave je tok ušao u glavni magnetski krug, pa je efektivna trajna struja kratkog spoja određena sinhronom reaktancijom. Kako amperzavoji kratkog spoja uz zanemarenje omskog otpora djeluju u uzdužnoj osi, računamo sa uzdužnom sinhronom reaktancijom i dobijemo:

$$I_{tk2} = \frac{E_0}{X_d} = \text{trajna struja trofaznog kratkog spoja (efekt.)}$$

U sl. 3.7-07 je prikazan vremenski dijagram promjene struje trofaznog kratkog spoja, za slučaj da napravimo kratki spoj u trenutku, kad je u statorskom namotu inducirani napon maksimalan, tj. kada nemamo istosmjerne komponente. Ako povučemo obvojnica preko amplitudnih vrijednosti struje kratkog spoja i istu produžimo do ordinate, dobijemo na ordinati stru-



Sl. 3.7-07 Vremenski dijagram prelazne pojave kod trofaznog kratkog spoja sinhronog generatora bez prigušnog kaveza

ju I'_{uk2} , a nakon isteka te prelazne pojave trajnu struju kratkog spoja I_{tk2} .

Vremenska konstanta primarnog uzbuđnog namota iznosi:

$$T'_{do} = \frac{L_1}{R_1} = \frac{X_1}{\omega R_1}$$

Vremenska konstanta za prikazanu prelaznu pojavu u sl. 3.7-07 je određena induktivitetima rasipnog puta, pa se zato može otprilike procijeniti da je u omjeru X'_d/X_d manja:

$$T'_d = T'_{do} \frac{X'_d}{X_d}$$

što iznosi oko 0,5 do 3 sekunde.

Vremenska konstanta istosmjernog člana je određena statorskim namotom:

$$T_{\Sigma} = \frac{X_d' + X_q}{2\omega R_2}$$

Ako napravimo kratki spoj u trenutku kada napon ne prolazi kroz maksimum, dobijemo dodatnu istosmjernu komponentu I_{Σ} koja će padati s vremenskom konstantom T_{Σ} . Ona je najveća ako napon u času kratkog spajanja prolazi kroz nulu.

Ako sada razmatramo generator, koji ima prigušni namot, onda će se morati glavni tok u prvom trenutku zatvarati samo rasipnim putevima statora, tj. između statorskog i prigušnog namota. Magnetski otpor je još veći, pa je zato i udarna struja kratkog spoja u prvom trenutku još veća. Prigušni namot ima u usporedbi s uzбудnim primarnim namotom relativno mali presjek bakra, relativno velik omski otpor, pa je zato njegova vremenska konstanta relativno malena. Obruč prigušnog namota je za par stotinki sekunde, tj. za par poluperioda, probijen pa poslije toga prolazna pojava dolazi na iste vrijednosti kao kod generatora bez prigušnog namotaja, kako to vidimo u sl. 3.7-08. Ako obvojnici te dodatne prelazne pojave produžimo do ordinate, dobijemo:

$$I_{uk2}'' = \sqrt{2} \frac{E_2}{X_d''}$$

Vremenska konstanta za prikazanu subtranzijentnu pojavu je T_d'' (vidi sl. 3.7-08).

Induktivni otpor X_d'' je određen magnetskim otporom u prostoru između prigušnog i sekundarnog namota.

Do sada smo naveli slijedeće reaktancije:

X_d'' - početna ili subtranzijentna reaktancija

X_d' - prolazna ili tranzijentna reaktancija

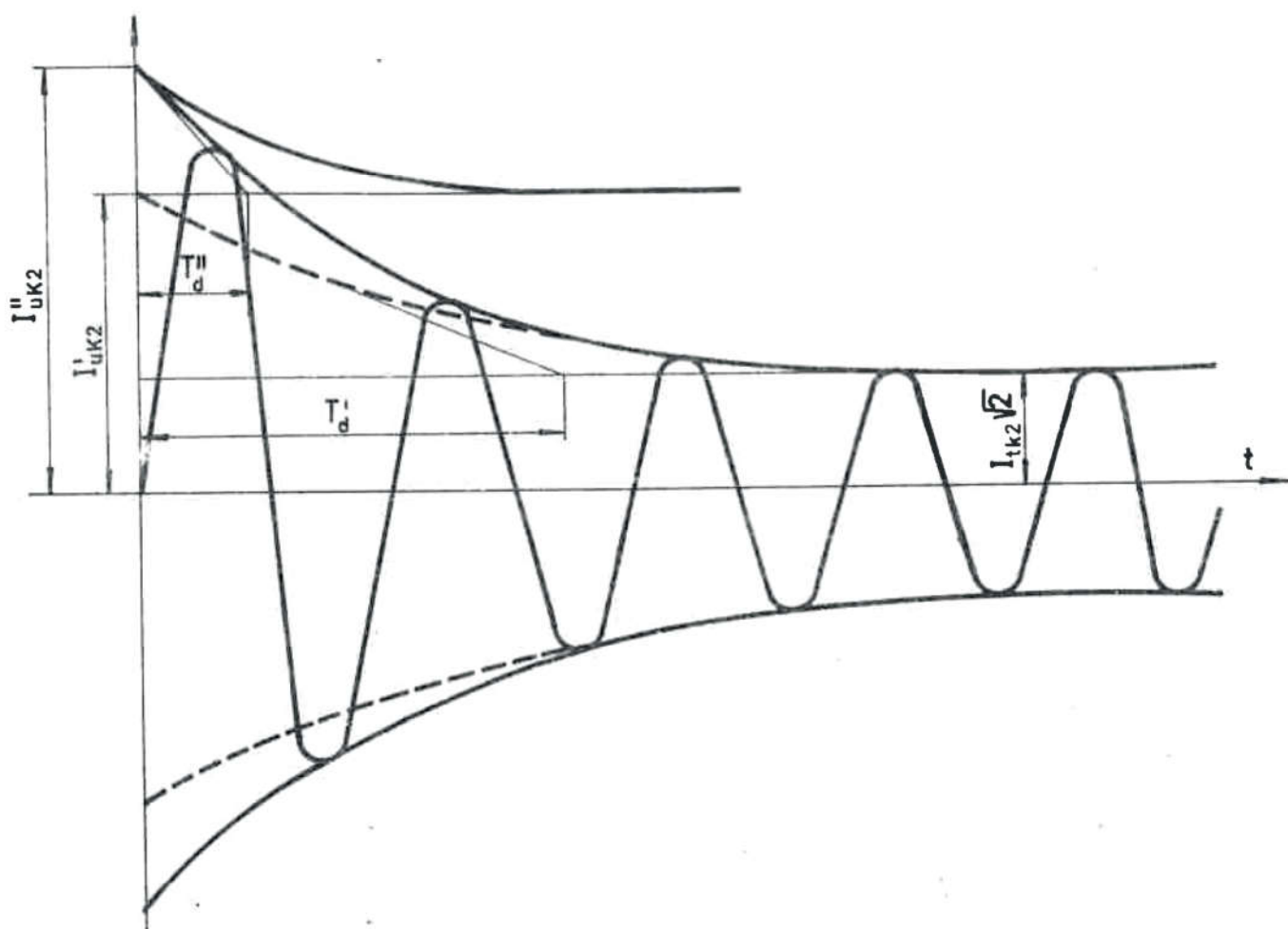
X_d - sinhrona reaktancija

Pored navedenih reaktancija upoznali smo se još s pripadajućim vremenskim konstantama:

T_d'' - početna ili subtranzijentna vremenska konstanta

T_d' - prolazna ili tranzijentna vremenska konstanta

T_{d0}' - vremenska konstanta uzбудnog namota



Sl. 3.7-08 Vremenski dijagram prelazne pojave kod trofaznog kratkog spoja sinhronog generatora s prigušnim kavezom

T_{Σ} - vremenska konstanta istosmjernog člana u statoru

Kod strojeva s izraženim polovima moramo još razlikovati poprečnu reaktanciju X_q od uzdužne X_d .

Osim toga:

$$X_q'' \approx X_d''$$

jer su subtranzientne vrijednosti praktički neovisne o rotoru, pa prema tome izraženost rotora ne utječe.

Dalje je:

$$X_q' = X_q$$

jer u poprečnoj osi nema primarnog namota.

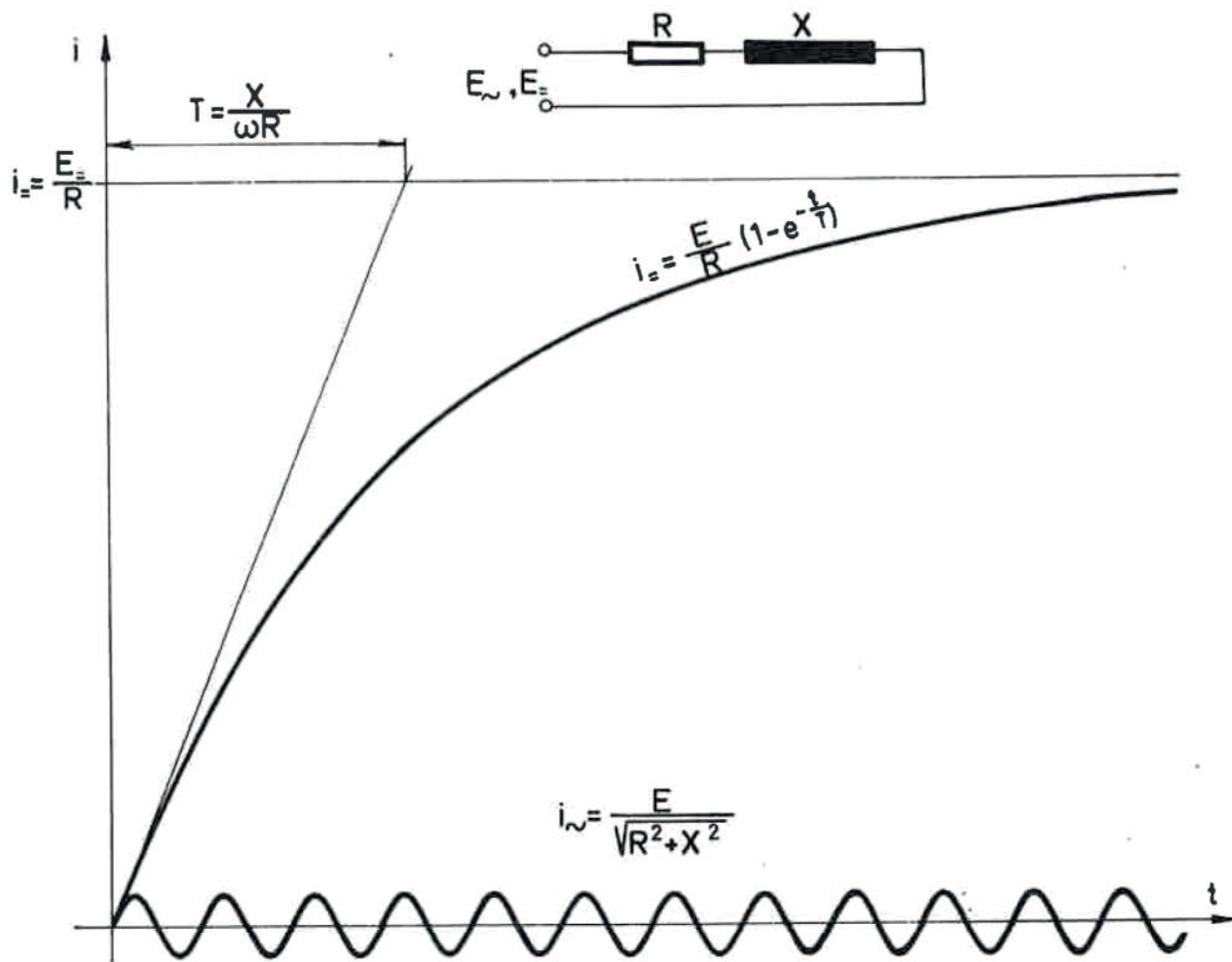
Pokušajmo još na jedan drugi način prikazati prelaznu pojavu kratkog spoja. Umjesto da na generatoru, koji se nalazi u praznom hodu nominalno uzбудjen, napravimo trolezni kratki spoj na njegovim stezaljkama, možemo ekvivalentno na neuzbudjeni generator, kojise točno sinhrono vrti sa mrežom, narinuti puni nazivni napon mreže. Kao kod transformatora, narinuti napon mreže potjera u statorski namot generatora onu struju, koja je potrebna, da se uzbuđi onaj tok " Φ ", koji je potreban, da inducira u statorskom namotu onaj protunapon, koji drži ravnotežu sa narinutim naponom mreže. Prigušni i uzbudni namot su u kratkom spoju. Zato se mora u prvom momentu taj tok Φ zatvarati samo oko statorskog namota do prigušnog namota, dakle, ne može ulaziti u rotor. Magnetski otpor rasipnim putevima statorskog namota, tj. samo u statoru, je razumljivo vrlo velik, pa je zato induktivni rasipni otpor statorskog namota X_d'' vrlo malen odnosno struja I_k'' jako velika. Obruč prigušnog namota je za par stotinki sekunde probijen i silnice tog toka Φ ulaze u rotor. Medjutim, svaka silnica tog statorskog rasipnog polja Φ , koja je u statoru naravno izmjenična, ulazom u rotor postaje istosmjerna, jer se rotor sinhrono vrti. Prekinimo sada malo to razmatranje i pogledajmo u čemu je zapravo razlika, ako silnica postane u rotoru istosmjerna.

Uzmimo strujni krug sa malim omskim i velikim induktivnim otporom, kako je to prikazano u sl. 3.7-09. Ako narinemo na taj namot izmjenični napon mreže u momentu kada je taj maksimalan, dobijemo odmah izmjeničnu struju, koja je određena jednadžbom:

$$i_v = \frac{E_v}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

i nikakvu prelaznu pojavu.

Ako, medjutim, narinemo na taj isti strujni krug istosmjerni napon iste efektivne vrijednosti kao prijašnji izmjenični napon, istosmjerna struja će polako rasti po jednoj eksponencijalnoj krivulji, koja je određena vremenskom konstantom:

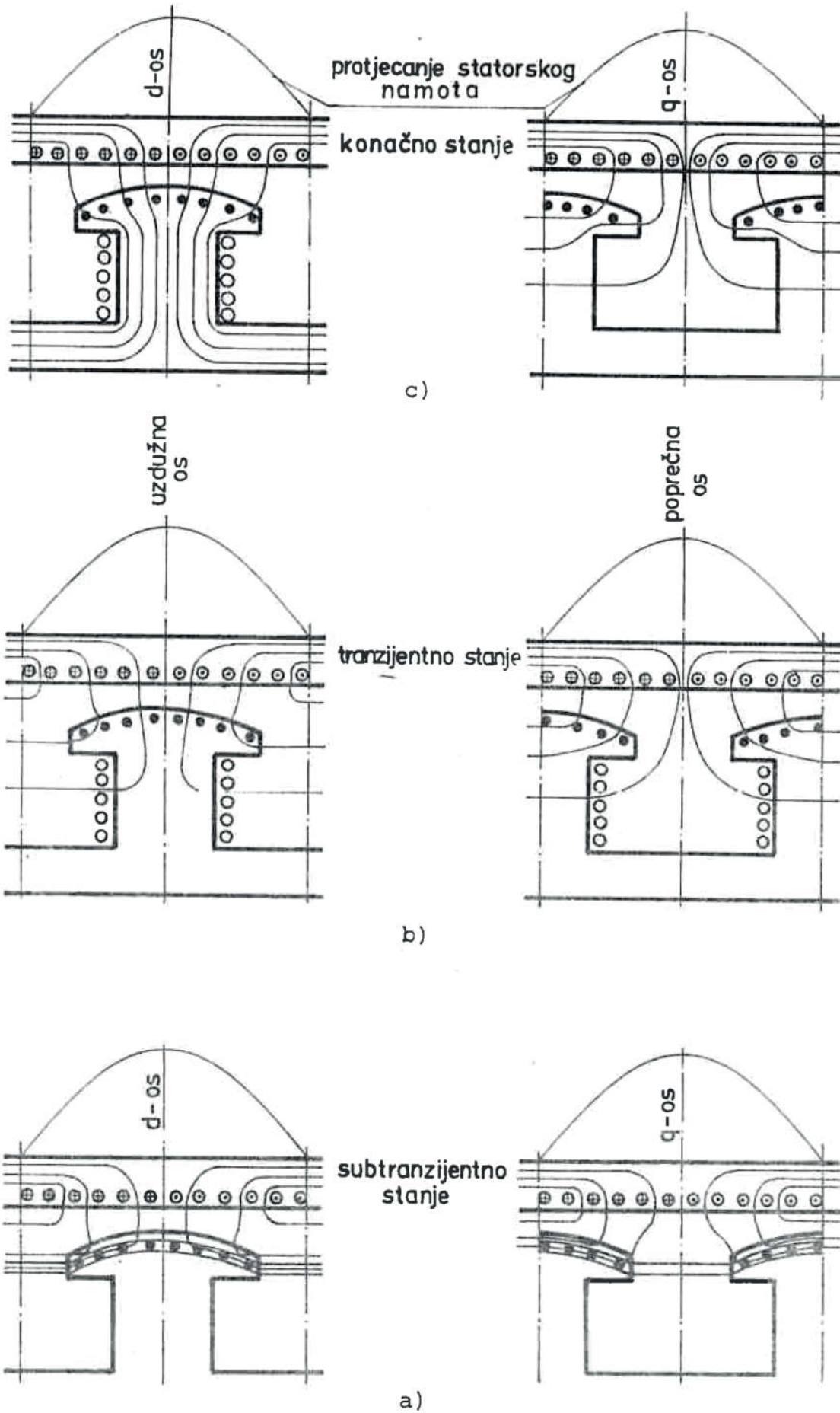


Sl. 3.7-09 Usporedba izmjenične i istosmjerne struje

$$T = \frac{X}{\omega R}$$

i koja je jako velika - traje sekunde - jer je induktivni otpor prema radnome jako velik. Imamo dugotrajnu prelaznu pojavu.

Isto vrijedi za silnice polja. Čim one ulaze u rotor, one su istosmjerne i mogu se polagano razvijati. Kroz prigušni namot idu relativno brzo - u par stotinki sekunde, jer je om-ski otpor prigušnog namota relativno velik. Da prodju kroz uzbudni namot silnice trebaju kod velikih generatora više sekundi, pa i do deset sekundi. Tako možemo shvatiti, da mali rasipni otpor statorskog namota prouzrokuje u prvom momentu veliku udarnu struju kratkog spoja I_{uk}'' , dok velika vremenska konstanta uzbuđenog kruga ima kod velikih generatora za posljedicu da prolazna pojava traje više sekundi pa i do 10 sekundi.



Sl. 3.7-10. Prikaz prodiranja polja u rotor

U sl. 3.7-10 je od a) do c) zorno prikazano ulaženje statorskog toka u rotor u uzdužnom kao i poprečnom pravcu kod stroja s izraženim polovima.

Na osnovu dosadašnjih razmatranja dobijemo ekvivalentnu shemu reaktancija koje dolaze do izražaja za vrijeme naglih promjena prema sl. 3.7-11.

U ekvivalentnoj shemi su označene slijedeće reaktancije:

X_{pr} - rasipna reaktancija prigušnog namota

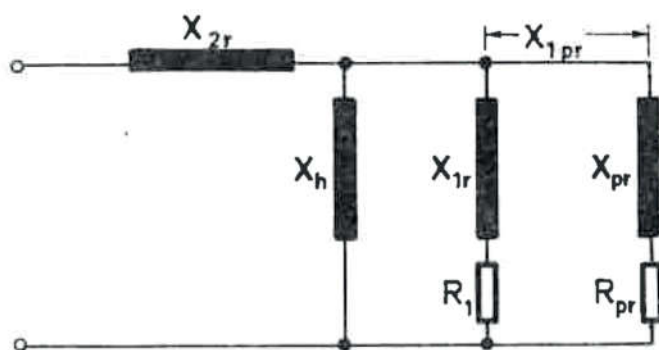
R_{pr} - omski otpor prigušnog namota

X_{1r} - rasipna reaktancija uzbuđenog namota

R_1 - omski otpor uzbuđenog namota

X_{2r} - rasipna reaktancija statorskog namota

X_h - fiktivna reaktancija koja nadomješta protudjelovanje armature



Kod stroja s neizraženim polovima uz zanemarenje omskih otpora dobijemo:

$$X_d'' = X_{2r} + \frac{X_h \cdot X_{1pr}}{X_h + X_{1pr}}$$

$$X_q'' = X_{2r} + \frac{X_h \cdot X_{pr}}{X_h + X_{pr}}$$

Sl. 3.7-11 Ekvivalentna shema reaktancija sinhronog stroja

(jer u poprečnom pravcu nema X_{1r})

$$X_d' = X_{2r} + \frac{X_h \cdot X_{1r}}{X_h + X_{1r}}$$

$$X_{1pr} = \frac{X_{1r} \cdot X_{pr}}{X_{1r} + X_{pr}}$$

$$X_q' = X_q$$

Ako napravimo nesimetričan trofazni kratki spoj ili čak dvofazni ili jednofazni onda moramo nesimetrične statorske struje metodom simetričnih komponenata razdijeliti na simetričnu direktnu, inverznu i nultu komponentu.

Inverzna komponenta struje inducira okretno polje koje se vrti u protivnom pravcu rotora. Njezino polje s dvo-

strukom frekvencijom siječe namote rotora i zato praktički ne može u njih ući. Zato je razumljivo da možemo otprilike postaviti za inverznu reaktanciju X_i kod stroja bez prigušnog namota srednju vrijednost tranzientnih reaktancija, tj.

$$X_i \approx \frac{X'_d + X'_q}{2}$$

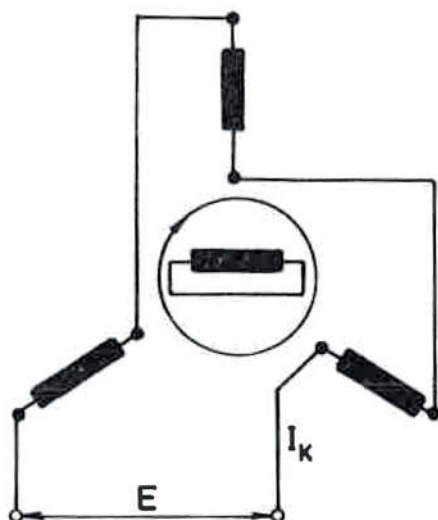
odnosno kod izvedbe s prigušnim namotom srednju vrijednost suptranzientnih reaktancija, tj.

$$X_i \approx \frac{X''_d + X''_q}{2}$$

Simetrala inverznog okretnog polja, naime, velikom brzinom prolazi položaj uzdužne i poprečne simetrane rotora, pa je zato uzimanje srednje vrijednosti između uzdužne i poprečne reaktancije opravdano.

Nulta komponenta struje predstavlja tri istofazne struje, koje prolaze kroz sva tri statorska namota. Njima se protivi tzv. nulta reaktancija X_0 , koju dobijemo na taj način da na sve tri faze spojene u seriju narinemo izmjenični napon E i kod kratko spojenog rotora, koji se sinhrono vrti, mjerimo struju I_k pa dobijemo prema slici 3.7-12:

$$X_0 = \frac{E}{3 I_k}$$

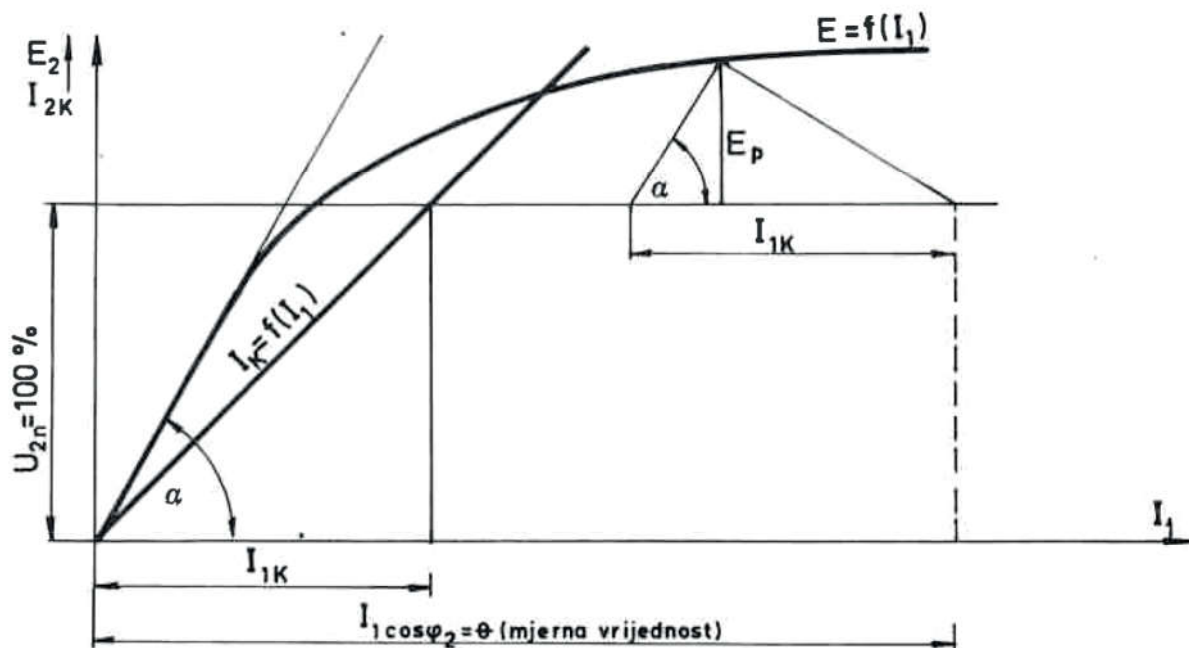


U stručnoj literaturi susrećemo se još sa slijedeće dvije reaktancije:

- računaska sekundarna rasipna reaktancija, koja predstavlja statorsku rasipnu reaktanciju bez provrta statora (bez zračnog rasporeda i bez rotora) i
- Potierova reaktancija, koja je kao relativna vrijednost prema sl. 3.7-13 definirana sa:

Sl. 3.7-12 Odredjivanje nulte reaktancije X_0

$$x_p = \frac{100 E_p}{U_{2n}} (\%)$$



Sl. 3.7-13 Odredjivanje Potierove reaktancije

Veličina E_p se određuje: nanese se izmjerena ili izračunata $I_{1\cos\phi_2=0}$ odbije se I_{1K} , na veličinu $(I_{1\cos\phi_2=0} - I_{1K})$ se paralelno s nagibom karakteristike praznog hoda povuče paralela i odredi presjecište s karakteristikama praznog hoda. Ostalo je jasno iz sl. 3.7-13. Na taj način je određena Potierova reaktancija, kojom je uzeto u obzir povećanje uzbudne struje I_1 za Δi radi zasićenja i radi rasipanja rotora.

Ako posebno ne naglasimo, svaka se reaktancija razumijeva kod nezasićenog stanja stroja.

U tabeli I dat je pregled u kojim granicama se u praksi kreću razne reaktancije.

3.8. Kratkospojni omjer

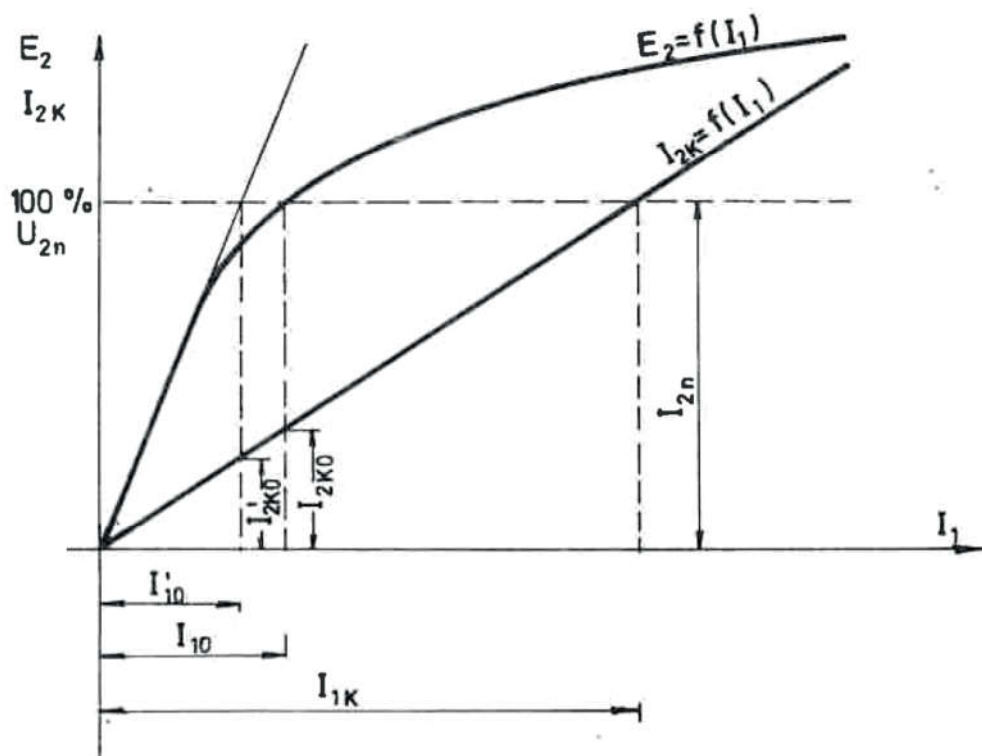
Relativna sinhrona reaktancija je određena s jednačinom:

$$x_{dr} = \frac{I_{2n} X_d (\Omega)}{U_{2n}} \quad (I_{2n}, U_{2n} \text{ su fazne vrijednosti}) \quad (3.8-01)$$

Trajna struja kratkog spoja, koju dobijemo ako stezaljke generatora, koji je uzбудjen u praznom hodu na nazivni fazni napon U_{2n} , kratko spojimo, iznosi:

$$I_{2ko} = \frac{U_{2n}}{X_d (\Omega)} \quad (3.8-02)$$

U dijagramu na sl. 3.8-01 je ova struja na karakteristici kratkog spoja određena kao zasićena sa I_{2ko} i kao nezasićena sa I'_{2ko}



Sl. 3.8-01 Određjivanje kratkospojnog omjera

Pomoću jednačbi (3.8-01) i (3.8-02) možemo izraziti:

$$x_{dr} = \frac{I_{2n}}{I'_{2ko}}$$

kao nezasićenu sinhronu reaktanciju. Iz sl. 3.8-01 vidimo da je:

$$\frac{I_{2n}}{I_{2ko}} = \frac{I_{1k}}{I_{10}} = x_{dr}$$

$\frac{I'_{10}}{I_{1k}}$ zovemo nezasićeni kratkospojni omjer, koji predstavlja:

$$\frac{I'_{10}}{I_{1k}} = \frac{1}{x_{dr}}$$

recipročnu vrijednost nezasićene relativne sinhronne reaktancije.

Aдекватно isto vrijedi za zasićeni kratkospojni omjer. Prema tome možemo iz karakteristike praznog hoda i kratkog spoja odmah zaključiti na sinhronu reaktanciju.

3.9. Zakretni moment

Kod transformatora smo se već upoznali s utjecajem magnetskog polja gustoće B na strujom I protjecan vodič, koji se nalazi u tom polju. Po Amperovom zakonu iznosi sila na vodič duljine " l " u magnetskom polju gustoće B u svakom trenutku:

$$F_t = B_t \cdot i \cdot l$$

gdje je:

B_t - trenutna vrijednost gustoće magnetskog toka u T

i - trenutna vrijednost struje u A

l - duljina vodiča u magnetskom polju - u metrima

F_t - trenutna vrijednost sile u njutnima (N)

Kod sinhronog stroja su vodiči protjecani strujom smješteni u utore statora, dok magnetsko polje, u kojem se ovi vodiči nalaze, stvaraju uzbuđni namoti smješteni na polove rotora zajedno sa strujama statora. Prema tome, sile djeluju između statora i rotora, između magnetskog polja u rasporu i strujnog obloga rasporedjenog po obodu statorskog provrta (na stator), odn. magnetskog polja i strujnog obloga rotora (na rotor).

Oblik magnetskog polja i strujnog obloga uzduž zračnog rasporeda možemo razdijeliti na osnovne harmoničke i više harmoničke članove. Poznato je da je integral produkta dvaju različitih harmoničkih članova uvijek jednak nuli:

$$\int_0^{2\pi} \sin(v_1 \cdot x) \cdot \sin(v_2 \cdot x) \cdot dx = 0$$

pa će, prema tome, svaki pojedini harmonički član strujnog obloga stvarati sile na obodu rotora samo s istim harmoničkim članom magnetskog polja. Te sile djeluju na obodu rotora s krakom $D/2$ te time dobijemo okretni moment "M".

Osnovni harmonički član momenta kod trofaznih simetričnih strojeva dobijemo tako da integriramo produkt osnovnih članova strujnog obloga i magnetskog polja pod jednim polom, a zatim dobivenu vrijednost pomnožimo s brojem polova, jer su magnetske i strujne prilike radi simetrije pod svakim polom potpuno jednake. Možemo, dakle, pisati:

$$M = 2p \frac{D}{2} \ell A_{\max} B_{\max} \int_0^{\tau_p} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \psi\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) \cdot dx$$

$$M = \frac{\pi}{4} p \cdot D \cdot A_{\max} \Phi_{\max} \cos \psi \quad (3.9-01)$$

gdje kut ψ predstavlja pomak između osnovnih članova strujnog obloga i magnetskog polja, indeks "max" označuje amplitudnu vrijednost.

Ako u relaciji (3.9-01) uvrstimo D u (m), A u (A/m) i Φ u (Wb) dobijemo moment u njutnima x metar = Nm.

Okretni moment možemo, međutim, izračunati i iz snage okretnog polja, tj. one snage, koja preko zračnog rasporeda s jedne strane prelazi na drugu stranu, bilo s rotora na stator ili obrnuto. Ako zanemarimo gubitke, koji su kod velikih strojeva relativno maleni, možemo računati s korisnom snagom P_2 pa dobijemo:

$$M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P \cdot P_2}{\omega}$$

gdje je $\omega = \frac{\omega}{p} = \text{prostorna kutna brzina} = \frac{2\pi n p}{60} = \frac{2\pi 1}{60}$

Budući da je $\frac{p}{\omega} = \frac{p60}{2\pi n p} = \frac{60p}{2\pi n p} = \frac{60}{2\pi n}$ možemo pisati

$$M = \frac{60}{2\pi} \frac{P_2}{n} = \frac{9,55}{n} P_2 \text{ (njutn metar) odnosno } = 0,974 \frac{P_2}{n} \text{ (kpm) (3.9-02)}$$

ako silu izrazimo u starim jedinicama $1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N}$, gdje je:

$$P_2 \text{ u (W)} \quad \text{a} \quad "n" \text{ u (o/min)}$$

Prema vektorskom dijagramu na sl. 3.9-01 možemo snagu izraziti s naponima E_o , U_2 , sinhronom reaktancijom (X_d , X_q) i kutem θ i dobijemo za stroj s izraženim polovima

$$P_2 = m \cdot I_2 \cdot U_2 \cdot \cos\varphi_2 ; \text{ dalje možemo pisati da je}$$

$$I_2 \cos\varphi_2 = \frac{I_2 \cdot X_d \cdot \cos\varphi_2}{X_d} = \frac{(E_o + A \cdot \cos\theta) \cdot \sin\theta}{X_d} \quad (3.9-03)$$

gdje je:

$$A = U_2 \frac{X_d - X_q}{X_q}$$

$$P_2 = m \cdot \left(\frac{U_2 E_o}{X_d} \sin\theta + \frac{U_2^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \sin 2\theta \right) \quad (3.9-04)$$

odnosno

$$M = \frac{9,55}{n} P_2 = \frac{9,55}{n} m \left(\frac{U_2 E_o}{X_d} \sin\theta + \frac{U_2^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \sin 2\theta \right) \quad (3.9-05)$$

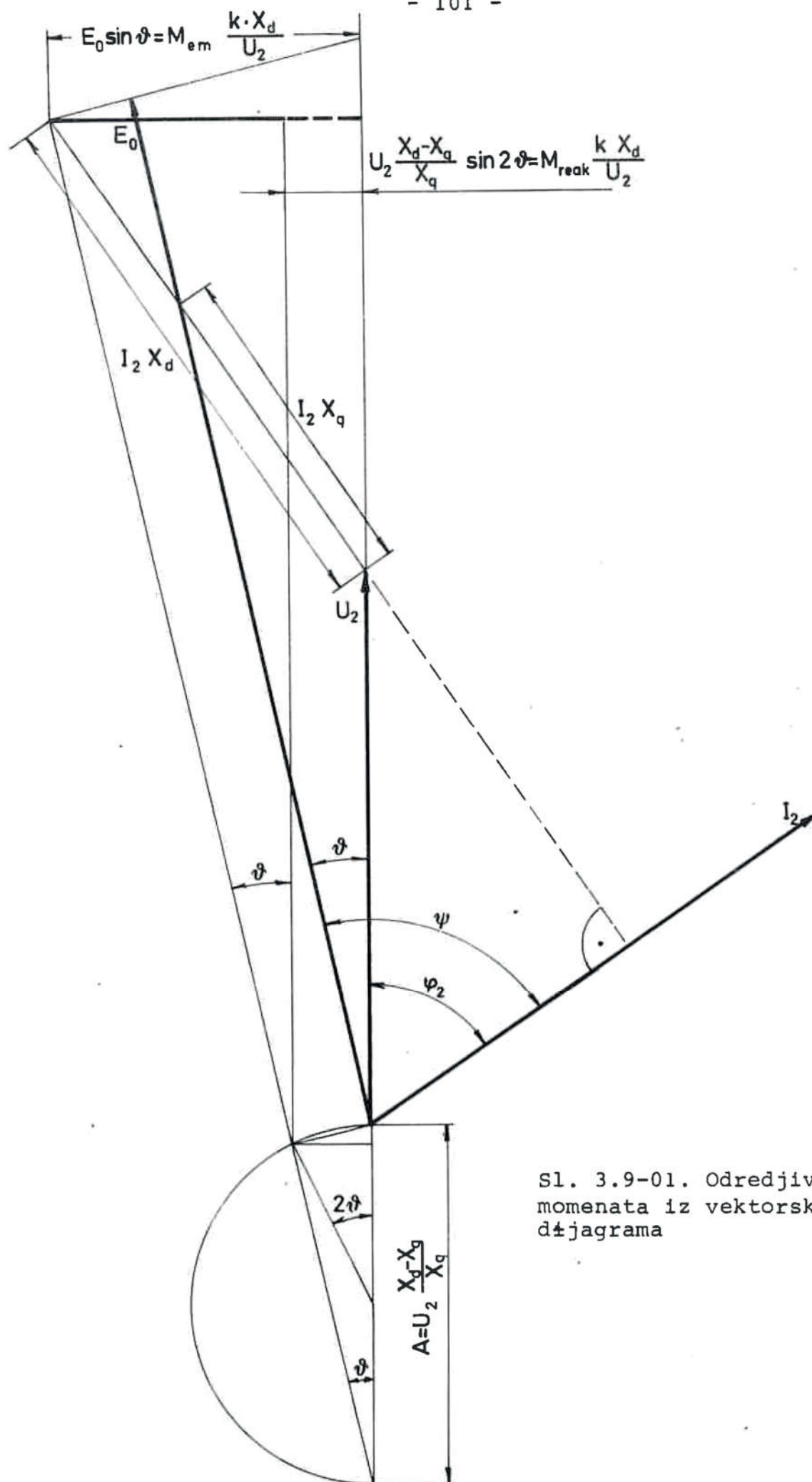
Pošto svakoj uzbuđnoj struji I_1 odgovara određeni napon E_o , a tome opet jedna određena trajna struja kratkog spoja:

$$I_k = \frac{E_o}{X_d}$$

možemo moment izraziti u ovisnosti od struje kratkog spoja I_k :

$$M = \frac{9,55 \cdot m}{n} U_2 \cdot I_k \cdot \left(\sin\theta + \frac{U_2}{E_o} \frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_q} \sin 2\theta \right) \quad (3.9-06)$$

Za rotor s neizraženim polovima, gdje je $X_d = X_q$, ot-



Sl. 3.9-01. Odredjivanje momenata iz vektorskog dijagrama

pada drugi član u jednađžbi snage (3.9-04) kao i u jednađžbi momenta (3.9-06), te dobijemo:

$$P_2 = \frac{m \cdot U_2 \cdot E_0}{X_d} \sin \vartheta \quad (W) \quad (3.9-07)$$

$$M = \frac{9,55 \cdot m}{n} U_2 \cdot I_k \cdot \sin \vartheta \quad (Nm) \quad (3.9-08)$$

Vidimo, da drugi član u zagradi jednađžbe (3.9-06) otpada i dobijemo moment sinhronog stroja sa neizraženim polovima odnosno sa polovima, koji predstavljaju elektromagnet pa zato taj moment nazivamo elektromagnetski moment.

Ako u jednađžbi (3.9-05) izrazimo moment kod neuzbudjenog rotora, tj. kada je $E_0=0$, dobijemo:

$$M = \frac{9,55 \cdot m}{n} \frac{U_2^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \sin 2 \vartheta = M_r \quad (3.9-09)$$

Sinhroni stroj s izraženim polovima ima, prema jednađžbi (3.9-09), i kod neuzbudjenog rotora još uvijek jedan određjeni moment, kojeg nazivamo "reakcioni moment"; ovaj moment je proporcionalan kvadratu napona U_2 i izraženosti polova $(X_d - X_q)/X_d \cdot X_q$. Kod rotora s neizraženim polovima gdje je $X_d - X_q = 0$ reakcioni moment je jednak nuli.

Opisanu pojavu reakcionog momenta bez rotorskog namota fizikalno tumačimo na slijedeći način:

Okretno magnetsko polje statora vuče za sobom magnetskim silama izražene polove rotora.

Ako polovi nisu izraženi, tj. ako je zračni raspor konstantan, onda, naravno, magnetska sila nema što vući za sobom pa nema ni reakcionog momenta.

I po Amperovom zakonu možemo izračunati veličinu reakcionog momenta. Prema ovom zakonu sila na obodu između rotora i statora određjena je u svakoj točki s produktom struje i gustoće polja u toj točki, odn. ukupna sila na obodu je određjena sa:

$$F = p \int_0^{2\tau_p} A_x \cdot B_x \cdot dx$$

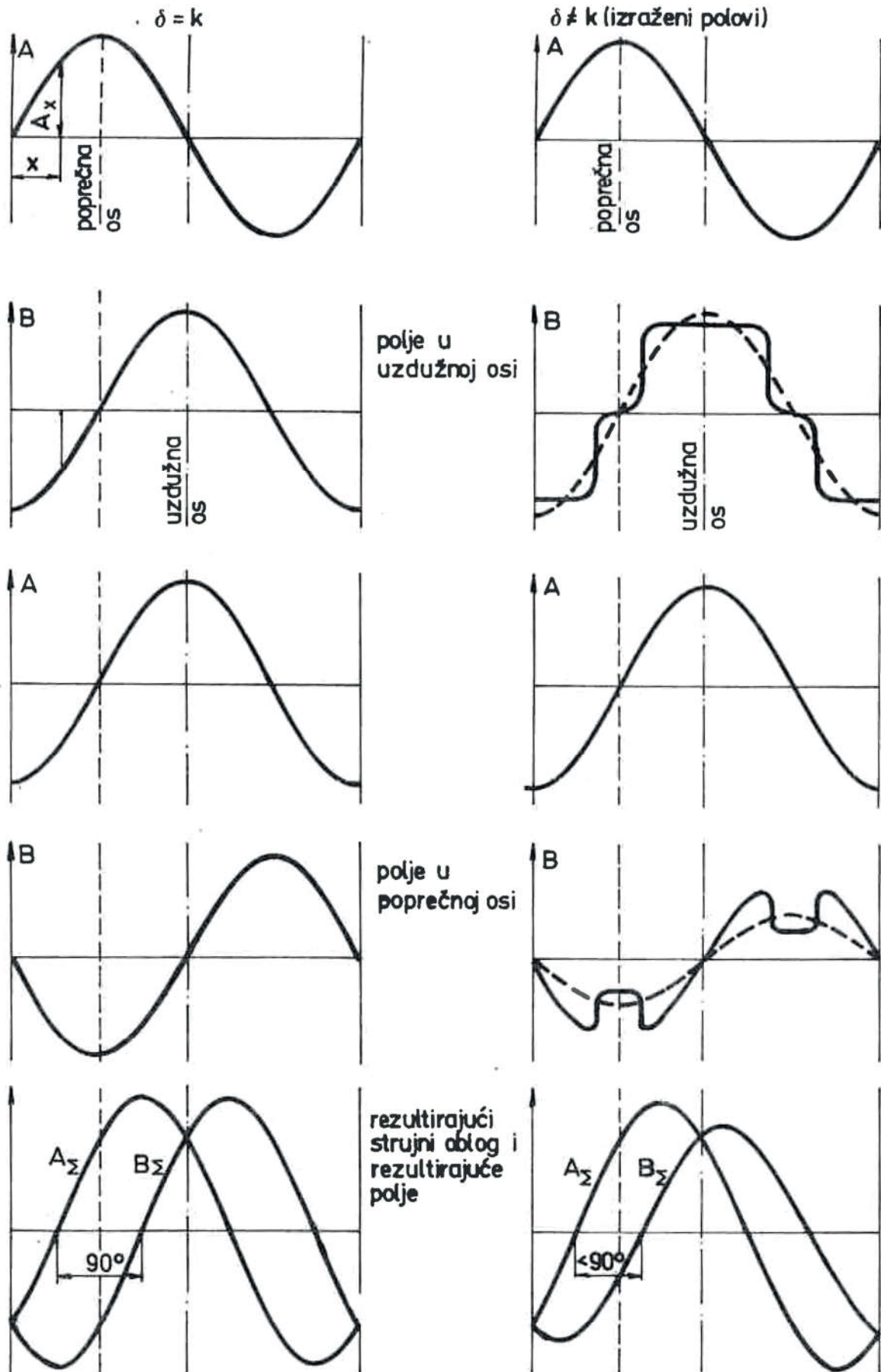
gdje sa x označavamo bilo koju točku ispod jednog para polova, a s A_x i B_x vrijednosti strujnog obloga i gustoće magnetskog toka u toj točki.

U sl. 3.9-02 prikazan je prostorni raspored strujnog obloga i gustoće magnetskog toka uzduž zračnog raspora za rotor s konstantnim zračnim rasporom kao i za rotor s izraženim polovima, s tim da u oba slučaja imamo isto protjecanje. Samo u statorskome namotu, koji je priključen na mrežu, teče uzbudna struja, koja uzbuđuje okretno polje, dok je rotor neuzbuđen. U sl. 3.9-02 ucrtali smo najprije komponentu ove struje u uzdužnom pravcu a onda toj komponenti struje pripadajuću indukciju; ovo isto smo nacrtali i za poprečnu os.

U navedenoj slici se vidi da je u slučaju konstantnog zračnog raspora isti faktor proporcionalnosti između indukcije i strujnog obloga za obje osi, ali, naravno, osnovni harmonik indukcije zaostaje za 90° prema osnovnom harmoniku strujnog obloga. U donjem dijelu u sl. 3.9-02 su ucrtani rezultirajući osnovni harmonični članovi strujnog obloga i indukcija; iz slike je vidljivo da su i rezultatni osnovni članovi strujnog obloga i indukcije pomaknuti međusobno za 90° , pa je:

$$\int_0^{2\tau_p} A_x \cdot B_x \cdot dx = 0$$

Dakle, ako stator priključimo na mrežu a rotor ne uzbudimo, ne možemo kod stroja s konstantnim zračnim rasporom očekivati nikakav reakcioni moment. Drugačije su prilike kod stroja s izraženim polovima. Osnovni harmonički član indukcije u uzdužnoj osi je za faktor " k_d " manji, a osnovni harmonički član indukcije u poprečnoj osi, je za faktor " k_q " manji u odnosu na indukciju kod sinhronog stroja s neizraženim polovima (vidi poglavlje 2.62). Faktor " k_q " je puno manji od faktora " k_d " za cca 2-4 puta, pa je, prema tome, kod istog protjecanja u obje osi u poprečnoj osi pripadajuća indukcija isto tako 2-4 puta manja od indukcije u uzdužnoj osi. Ako zbrojimo za slučaj ro-



Sl. 3.9-02 Uz objašnjenje reakcionog momenta sinhronog stroja

tora s izraženim polovima uzdužne i poprečne osnovne harmoničke članove strujnog obloga i indukcije dobijemo da je pomak između rezultirajućeg strujnog obloga i indukcije manji od 90° (vidi sl. 3.9-02 desno dolje), pa možemo pisati:

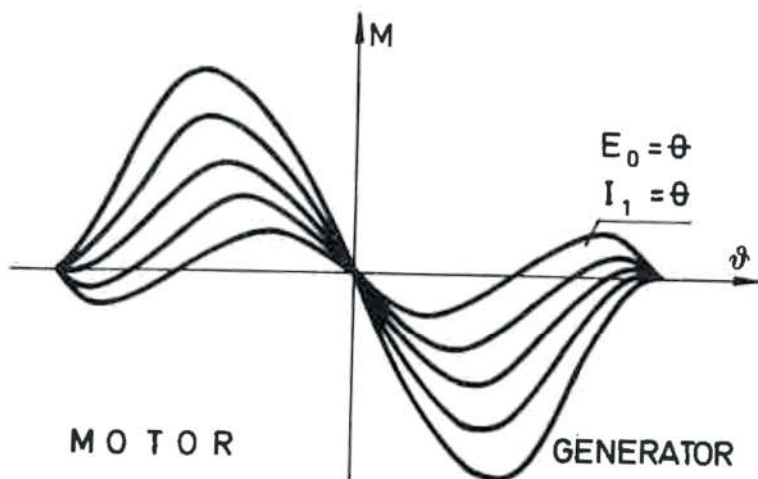
$$\int_0^{2\tau_p} A_x \cdot B_x \cdot dx \neq 0$$

gdje rezultat napisanog integrala daje veličinu reakcionog momenta.

Kod stroja s izraženim polovima imamo, prema tome, dva momenta.

- Elektromagnetski moment, koji se stvara pri međusobnom djelovanju rotorskog polja i strujnog obloga statora; prema relaciji (3.9-05) je ovaj moment određen prvim članom u zagradi, pa je, prema tome, proporcionalan sa $\sin\vartheta$.

- Reakcioni moment određen u relaciji (3.9-05) drugim članom u zagradi; ovaj moment se prema navedenoj relaciji mijenja proporcionalno sa $\sin 2\vartheta$.



U sl.3.9-03 je prikazana karakteristika momenta sinhronog stroja s izraženim polovima u ovisnosti o kutu ϑ kod raznih uzbuda. Kod neuzbudjenog rotora djeluje, naravno, samo reakcioni moment proporcionalan sa $\sin 2\vartheta$. Reakcioni moment postiže maksimalni iznos već kod $\vartheta=45^\circ$, a

Sl.3.9-03 Okretni moment sinhronog stroja s izraženim polovima u ovisnosti o kutu opterećenja i za razne uzbudne struje kod $\vartheta=90^\circ$ jednak je nuli. Prekretni momenti kod sinhronog generatora s izraženim polovima se postižu prema sl. 3.9-03, u ovisnosti o uzbudnoj struji, od kuta $\vartheta=45^\circ$ pa sve do $\vartheta=90^\circ$. Između ova dva granična položaja se nalaze svi ostali prekretni momenti, a time i granice stabilnosti.

4. SINHRONI STROJ U POGONU

4.1. Paralelni pogon

4.1.1. Sinhronizacija

Rijetko kada sinhroni generator napaja sam svoju mrežu, a ako je napaja sam, onda je gotovo uvijek relativno mali generator, koji opskrbljuje energijom malu mrežu, jer ova nema mogućnosti priključka na veliku mrežu. Veći generatori (obično 2 ili 3) rade u centralama paralelno na jednu mrežu, a pošto su danas i mreže međusobno povezane, rade sve centrale u tim mrežama paralelno. S brojem centrala i njihovim snagama raste i snaga takve mreže. Što veća je snaga takve velike mreže u odnosu na snagu jednog generatora, koji radi paralelno na tu mrežu, to više ju smatramo krutom, jer to manje može jedan generator relativno male snage utjecati na stanje mreže s puno većom snagom, tj. snagom svih generatora priključenih na tu mrežu.

Kad generator stavljamo u pogon moramo ga priključiti na mrežu. Kod priključivanja na mrežu moramo paziti da su naponi mreže i generatora po veličini jednaki, da imaju istu frekvenciju i da su istofazni. U protivnom slučaju moramo uslijed razlike napona između mreže i generatora očekivati struju izjednačenja, koja će biti to veća, što je veća razlika napona u trenutku uključivanja. U najnepovoljnijem slučaju možemo generator priključiti na krutu mrežu u trenutku kad su vektori napona generatora baš za 180° pomaknuti prema vektorima istoimenih faza mreže, tj. kad su vektori napona istoimenih faza u opoziciji. Razlika napona u tom slučaju je jednaka dvostrukom naponu na stezaljkama generatora pa će i udarna struja kratkog spoja biti teoretski dva puta veća. Takav udarac struje može imati teških posljedica; može doći do uništenja namota generatora, uništenja učinske sklopke itd. Da ne bi došlo do navedenih posljedica moramo ispuniti sve uvjete sinhronizacije prije uključivanja generatora na mrežu. Stoga postupamo na sljedeći način:

Prije svega, moramo kod prvog stavljanja u pogon kod višefaznih generatora (gotovo uvijek trofaznih) provjeriti redosljed faza. Kod generatora u mirujućem stanju moguće je odrediti redosljed faza pomoću redosljeda početaka namota svih faza u pravcu okretanja rotora generatora; u pogonu se redosljed faza može odrediti vremenskim redosljedom napona pomoću smjera vrtnje asinhronog motora, odn. pomoću posebnog instrumenta koji se priključuje odredjenim redom na sve tri faze, pa taj asinhroni motor odnosno instrument pokazuje smjer vrtnje i time redosljed faza. Dakle, nije važna istoimenost faza kao kod transformatora, nego samo isti redosljed faza.

Svaki sinhroni generator ima svoj pogonski stroj, pa pomoću njega pokrenemo generator približno do one sinhronne brzine vrtnje, koja je određena frekvencijom mreže i brojem pari polova generatora prema relaciji:

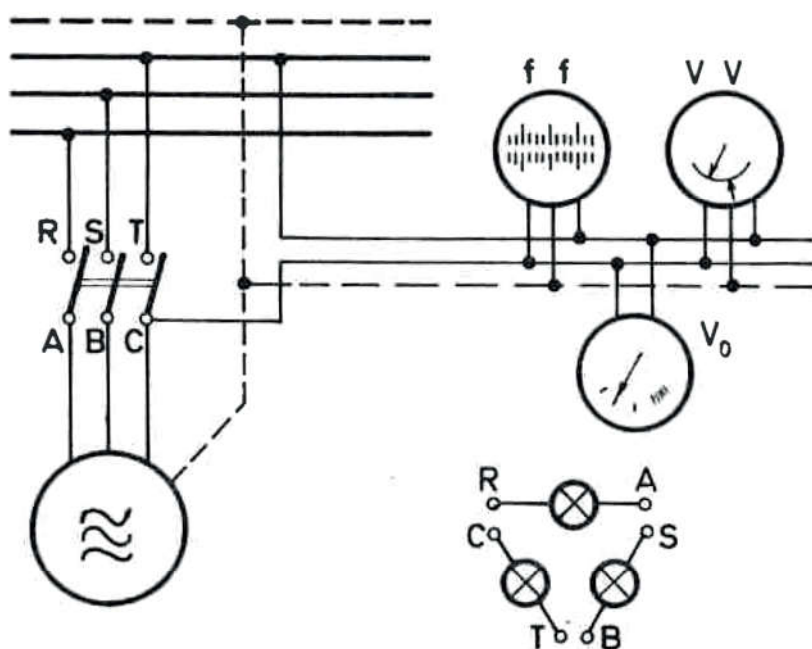
$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Iza toga uzbudimo generator tako da je napon generatora približno jednak naponu mreže. Malih razlika od nekoliko postotaka se ne bojimo, jer su u tom slučaju struje izjednačenja u trenutku uključivanja generatora na mrežu relativno malene i bezopasne.

Nakon uzbudjivanja generatora trebamo još postići istofaznost istoimenih faza ili, bolje rečeno, istofaznost napona na kontaktima sklopke, pomoću koje priključujemo generator na mrežu. Moramo, naime, postići da u trenutku uključivanja sklopke nema vektorske razlike napona između kontakata iste faze. Ako vektor napona generatora vremenski zaostaje za vektorom napona istoimene faze mreže, pogonski stroj moramo ubrzati, i obrnuto. Obično ne možemo postići potpuni sinhronizam generatora i mreže, no kod male razlike frekvencije npr. kod 0,2 Hz, vektor napona generatora se prema istoimenom vektoru napona mreže vrti brže ili polaganije s brzinom od 1/5 o/sek. Prolaz kroz sinhronizam je u tom slučaju relativno spor, pa je brzina naših refleksa dovoljna da možemo ukopčati sklopku u pravom trenutku. Uvježban čovjek s brzim refleksima može sa

sigurnošću obaviti ukapčanje još kod razlike u frekvencijama od cca 0,5 Hz. Automatskim napravama postizavamo dobro sinhroniziranje i kod razlike od 1 Hz.

Za sinhroniziranje su, naravno, potrebni instrumenti. Frekvencija generatora i mreže se približno izjednači pomoću dvostrukog frekventometra, naponi pomoću dvostrukog voltmetra, a za ustanovljavanje istofaznosti vektora napona se obično upotrebljava tzv. nul-voltmetar, tj. voltmetar koji ima na početku za male napone vrlo rastegnutu skalu, dok mu je u području većih napona skala zgusnuta; mjerni opseg ovog instrumenta je nešto veći od dvostrukog nazivnog napona. Ovakav nul-voltmetar priključimo između kontakata sklopke i tako mjerimo razliku napona između istofaznih kontakata mreže i generatora, kako je to prikazano u sl. 4.1-01; kada nul-volt-



Sl. 4.1-01 Shema povezivanja instrumenata za sinhronizaciju

metar pokazuje nulu, tada je postignuta istofaznost te u tom trenutku možemo sklopku ukopčati. Kada se nalazimo u blizini istofaznosti teško je prosuditi da li se generator još prebrzo ili presporo vrti. Zato se obično uređaju za sinhronizaciju doda jedan svjetlosni uređaj (sinhronoskop sa sijalicama) s tri sijalice, koje su smještene u trokut i priključene između kontakata sklopke (vidi sl. 4.1-01). Napon na si-

jalicama njiše (s frekvencijom koja je jednaka razlici frekvencija mreže i generatora) od nule do dvostrukog napona; iz istog razloga njiše i svjetlost sijalice, jer je razlika frekvencija relativno vrlo malena pa oko fiziološki može slijediti promjenu svjetlosti. Njihanje svjetlosti pojedinih sijalica je međusobno fazno pomaknuto za 120° pa se dobije osjećaj kao da se svjetlost okreće u jednom ili drugom smjeru. Iz smjera okretaja svjetla može se zaključiti na prebrzu ili preporu vrtnju generatora.

Kod većih generatora se danas skoro isključivo upotrebljava nešto skuplji sinhronoskop s kazaljkom, koji zamjenjuje nul-voltmetar i sinhronoskop sa sijalicama. To je u stvari mali sinhroni motor, koji je priključen između kontakata sklopke a koji s razlikom frekvencije vrti kazaljku. Ova kazaljka, zapravo, prikazuje vektor napona generatora, dok vektor napona mreže stoji uspravno prema gore. Kad kazaljka dodje u položaj vektora napona mreže (tj. kad kazaljka stane uspravno prema gore) imamo istofaznost. Iz smjera okretanja kazaljke možemo zaključiti da li se generator vrti prebrzo ili preporo.

Pod trenutkom ukapčanja podrazumijeva se onaj trenutak u kojem se kontakti sklopke dotaknu. Kod većih generatora vrši se ukapčanje sklopke indirektno pritiskom na dugme, koje pokrene servo-mehanizam, pomoću kojeg se sklopka ukopča. Od trenutka pritiska na dugme pa do spajanja kontakata sklopke nužno mora proći neko vrijeme. Kod starih postrojenja može ovo iznositi do 0,6 sek., dok kod modernih cca 0,25 sek. Govorimo o vlastitom vremenu sklopke. Zbog ovog vremena pritisak na komandno dugme mora uslijediti za veličinu vlastitog vremena prije nego nastupi trenutak istofaznosti. Kod ručne sinhronizacije ovo vrijeme nekako procijenimo, kod automatske sinhronizacije to prilično komplicira uređaj, pa su zato automatski uređaji relativno skupi. Prednost automatskih uređaja je, međjutim, u sigurnosti i brzini sinhronizacije. Kad prijeti raspad mreže radi preopterećenja potrebno je brzo stavljati u pogon nove agregate i brzo izvršiti sinhroniziranje istih na mrežu. Mreža je u takovim slučajevima nemirna, tj.

frekvenca se mijenja. Pogonsko osoblje je nervozno. Automatski uređaj može spasiti situaciju i time opravdati skupu investiciju. Rusi su uveli način tzv. grubog sinhroniziranja. Agregat se pokrene na približnu sinhronu brzinu vrtnje te se kod kratkospojenog uzbuđenog namota priključi direktno ili preko prigušnice na mrežu. Kod toga se dobije udar struje, koji doseže 2-3-struku vrijednost nominalne struje, što kod jakih mreža ne smeta, a osim toga može se ova struja pomoću u seriju spojenih prigušnica držati u snošljivim granicama. Reakcioni moment, pogotovo elektromagnetski moment ako motor uzbudimo, povuku agregat brzo u sinhronizam. Na taj način se postizava vrlo brzo sinhroniziranje.

4.12. Preuzimanje tereta

Ako u generatoru, koji radi na krutu mrežu, u praznom hodu povećamo uzbuđu, povećat ćemo time i njegov unutarnji napon E_0 , dok je napon U_2 na stezaljkama generatora određen naponom krute mreže, pa se zato ne može mijenjati. Razlika napona

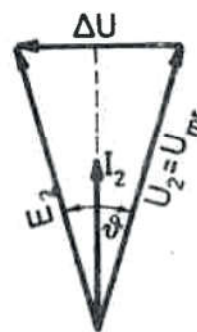
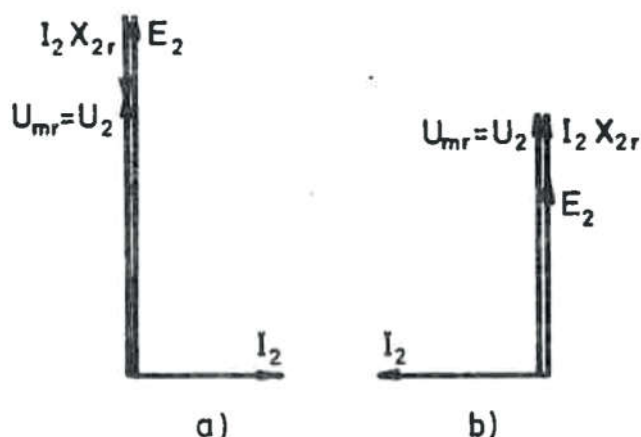
$$\Delta U = E_0 - U_2$$

potjerat će struju izjednačenja, koja ovisi samo o sinhronoj reaktanciji stroja, jer je omski otpor praktički zanemariv, a kruta mreža predstavlja praktički zanemarljivu impedancu.

Struja izjednačenja iznosi:

$$I_2 = \frac{\Delta U}{X_s}$$

Ova struja je praktički jalova struja te za generator predstavlja induktivni, a za mrežu kapacitivni teret, kako je to prikazano na vektorskom dijagramu u sl. 4.1-02 a) ako je unutarnji napon generatora veći od napona mreže $E_0 > U_{mr}$. Ako generatoru smanjimo uzbuđu $E_0 < U_{mr}$, opterećujemo generator kapacitivnim, a mrežu induktivnim teretom, kako je to prikazano u slici 4.1-02 b). Prema tome, mijenjanjem uzbude možemo generator opteretiti samo s jalovom snagom, što je samo po sebi razumljivo.



Sl. 4.1-02

- a) Sinhroni stroj kao kapacitivni potrošač za mrežu
- b) Sinhroni stroj kao induktivni potrošač za mrežu

Sl. 4.1-03 Pojednostavnjeni vektorski dijagram za slučaj opterećenja generatora uz uvjet $E_0 = U_2 = U_{mr}$

vo, jer za radnu snagu treba ovu generatoru dovesti preko pogonskog stroja.

Ako pogonskom stroju povećamo punjenje, npr. parnoj turbini povećamo dovod pare ili vodnoj turbini dovod vode, onda će pogonski stroj htjeti ubrzati generator. Čim se rotor malo ubrza, te pomakne za neki kut prema okretnom polju statora, koje je određeno s naponom i frekvencijom krute mreže, dobijemo kod nepromijenjenog unutarnjeg napona E_0 , jer nismo uzbuđu mijenjali, pomak vektora E_0 unaprijed, dakle u vektorskom dijagramu prema sl. 4.1-03 pomak u lijevo protivno od smjera vrtnje vremenske osi; time dobijemo razliku napona ΔU , koja potjera struju koja zaostaje za razlikom napona ΔU za 90° . Ta struja je za generator praktički radna struja, pa generator počinje davati radnu snagu u mrežu. Veličina kuta ϑ je određena s veličinom snage koju generator daje mreži, tj. veličinom snage koju, uz zanemarenje gubitaka, daje pogonski stroj preko osovine generatoru. Zato taj kut ϑ nazivamo "kut opterećenja". Snaga, koju generator daje u mrežu, određena je relacijom (3.9-04):

$$P = m \frac{U_2 E_0}{X_d} \sin \vartheta + m \frac{U_2^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \sin 2\vartheta$$

Ako, međjutim, osovinu sinhronog stroja opteretimo s mehaničkim teretom, onda će vektor E_0 zaostajati za vektorom U_2 , pa dobijemo sinhroni motor koji radnu snagu uzima iz mreže.

4.2. Statička i dinamička stabilnost

4.21 Statička stabilnost

Ako sinhroni generator, koji radi na krutu mrežu, polagano sve više opterećujemo, a da pri tom ne mijenjamo uzbuđu, rasti će kut ϑ a pogon će biti tako dugo stabilan dok s kutem ϑ raste i snaga generatora. Razmatrajmo, jednostavnosti radi, slučaj generatora s neizraženim polovima, za kojeg od jednadžbe (3.9-04) u pogl. 3.91 vrijedi samo prvi član:

$$P_2 = \frac{m \cdot U_2 \cdot E_0}{X_d} \sin \vartheta \quad (4.2-01)$$

Radi boljeg prosudjivanja odnosa veličina najradije računamo s relativnim vrijednostima, pa ćemo zato radnu snagu P_2 izraziti u odnosu na nazivnu prividnu snagu P_{2n} :

$$\frac{P_2}{P_{2n}} = \frac{m \cdot U_2 \cdot E_0}{m \cdot U_{2n} \cdot I_{2n} \cdot X_d} \sin \vartheta = \frac{U_2}{U_{2n}} \frac{E_0}{U_{2n}} \frac{U_{2n}}{I_{2n} \cdot X_d} \sin \vartheta$$

$$\frac{P_2}{P_{2n}} = U_{2r} \cdot E_{or} \frac{1}{X_{dr}} \sin \vartheta = P_{2r} \quad (4.2-02)$$

(sa indexom "r" smo označili relativnu vrijednost).

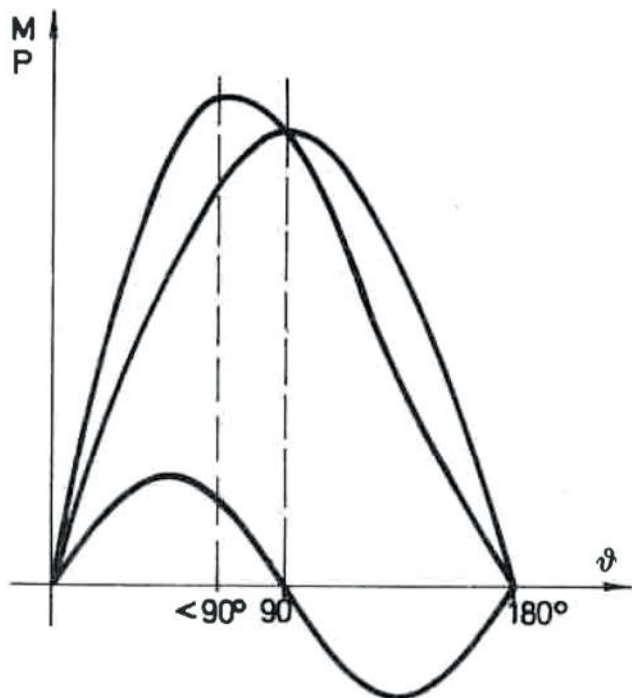
Iz jednadžbe snage (4.2-01) se jasno vidi da je pogon statički stabilan sve dok kut ϑ ne dostigne 90° . Kod tog kuta smo, naime, postigli maksimalnu snagu, te snaga s daljnjim porastom kuta opada. Ovu maksimalnu snagu nazivamo "prekretna snaga" " P_{pr} " a pripadajući moment "prekretni moment" " M_{pr} ". Za slučaj kada je $\vartheta=90^\circ$ možemo pisati:

$$\frac{P_{pr}}{P_{2n}} = U_{2r} \cdot E_{or} \frac{1}{X_{dr}} \quad (4.2-03)$$

O statičkoj stabilnosti govorimo samo u slučaju u kojem se teret generatora tako polagano mijenja, da ne postoji utjecaj tromosti zamašnih masa kao ni utjecaj tromosti magnet-skih polja.

Relativnu vrijednost unutarnjeg napona E_{or} možemo izračunati na osnovu vektorskog dijagrama u sl. 4.2-01.

nusoida već zbroj sinusoide i drugog harmonika, kako je to prikazano u sl. 4.2-02. Kako postoji kod iste brzine vrtnje (kon-



Sl. 4.2-02

stantna sinhrona brzina vrtnje) proporcionalnost između snage i momenta, to se karakteristika snage u sl. 4.2-02 ne razlikuje od karakteristike momenta, koju smo upoznali u pogl. 3.9. prema sl. 3.9-03. Dok smo kod generatora sa neizraženim polovima imali prekretnu snagu kod $\delta=90^\circ$, imamo kod izraženih polova prekretnu snagu već kod manjeg kuta.

Razmatrali smo slučaj u kojem generator radi na krutu mrežu. No, ne smijemo taj slučaj zamijeniti sa slučajem pogona jednog generatora na vlastitu mrežu. Tada je teret generatora određen sa snagom potrošača u mreži. Pogonski stroj ima automatski regulator brzine vrtnje kako bi je održavao konstantnom. Mogućnosti ispada iz koraka nema kad radi samo jedan generator, kada, naime, nema paralelnog rada. Ako, međjutim, povećanjem tereta u mreži sve više opterećujemo generator može doći samo do preopterećenja generatora i do opadanja napona, ako smo uzbuđu do kraja iskoristili. No, u takvom slučaju je obično pogonski stroj onaj, koji ovo preopterećenje ne može izdržati pa dolazi do opadanja brzine vrtnje i time do opadanja frekvencije u mreži.

4.22 Dinamička stabilnost

Kod brzih promjena tereta treba uzeti u obzir da se kut δ radi tromosti masa rotora ne može trenutačno promijeniti i da se glavno magnetsko polje, koje je određeno s uzdužnim

vektorom napona E'_{d0} , koji se uistinu inducira u namotu statora, isto tako ne može trenutačno promijeniti.

Zanemarimo za sada tromost masa pa promatrajmo prelaznu pojavu momentane promjene tereta pod pretpostavkom, da generator radi na krutu mrežu.

Sjetimo se, kako se ponaša generator kod momentanog kratkog spoja (vidi pogl.3.7). Ustanovili smo, da i kod velikih generatora subtranzijentna vremenska konstanta T_d'' iznosi par stotinki sekunde dok tranzijentna vremenska konstanta T_d' iznosi i do par sekundi (vidi tablicu I na str. 96).

Iz iskustva znamo, da u slučaju kratkotrajnih većih preopterećenja kada pitanje stabilnosti promatramo dinamično, pitanje da li će u toku prelazne pojave doći do ispada iz sinhronizma ili ne, praktički se riješi već za cca 0,5 sek. Takva kratkotrajna preopterećenja predstavljaju uglavnom kratki spojevi u mreži. Mi možemo zato kod takvih pojava zanemariti subtranzijentno stanje, jer je suviše kratkotrajno i pretpostavljati kroz tih par desetinki sekunde konstantno tranzijentno stanje, koje je određeno za glavno polje sa naponom E'_{d0} , a za struju sa tranzijentnom reaktancijom generatora X_d' i sa reaktancijom do težišta mreže, koja je određena sa tranzijentnom kratkospojnom snagom mreže na stezaljkama generatora

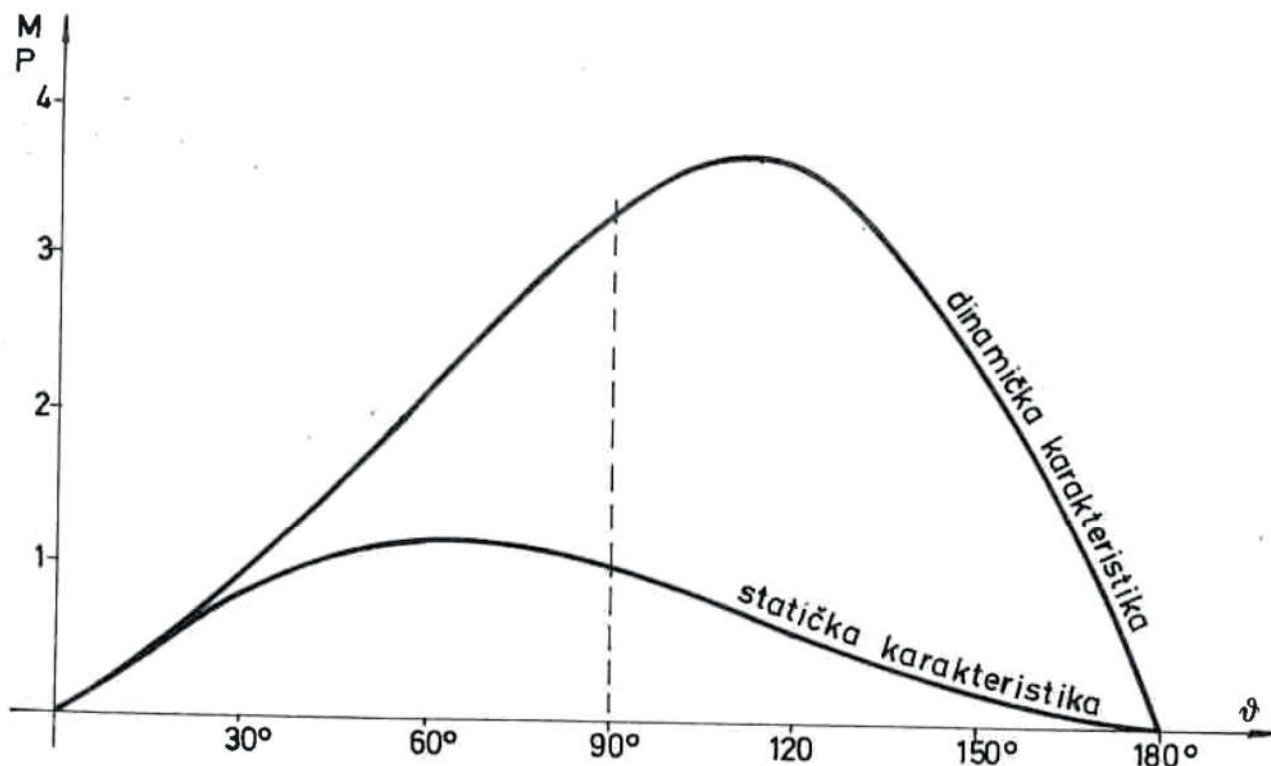
($P_{k_{mr}} = \frac{1,1 U_{k_{mr}}^2}{X_{mr} \cdot 3}$; X_{mr} = tranzijentna reaktancija od stezaljki generatora do težišta mreže).

Zanemarimo za sada reaktanciju mreže i pretpostavimo da je generator priključen direktno na krutu mrežu ($U_{mr}=k$, $f_{mr}=k$, $X_{mr}=\emptyset$).

Analogno kao za statičnu snagu prema jednadžbi (3.9-04), dobijemo za dinamičnu snagu:

$$P_{2d} = m \left(\frac{E'_{d0} U_2}{X_d'} \sin \vartheta + \frac{U_2^2}{2} \frac{X_d' - X_q}{X_d' X_q} \sin 2\vartheta \right) \quad (4.2-05)$$

Jer je $X_d' < X_q$, ima drugi član negativnu vrijednost. Zato ima generator sa izraženim polovima dinamičku prekretnu snagu kod većeg kuta od 90° , kako to vidimo u sl. 4.2-03, dok mu je statična



Sl. 4.2-03 Statička i dinamička karakteristika iz praznog hoda
čka prekretna snaga kod manjeg kuta od 90° .

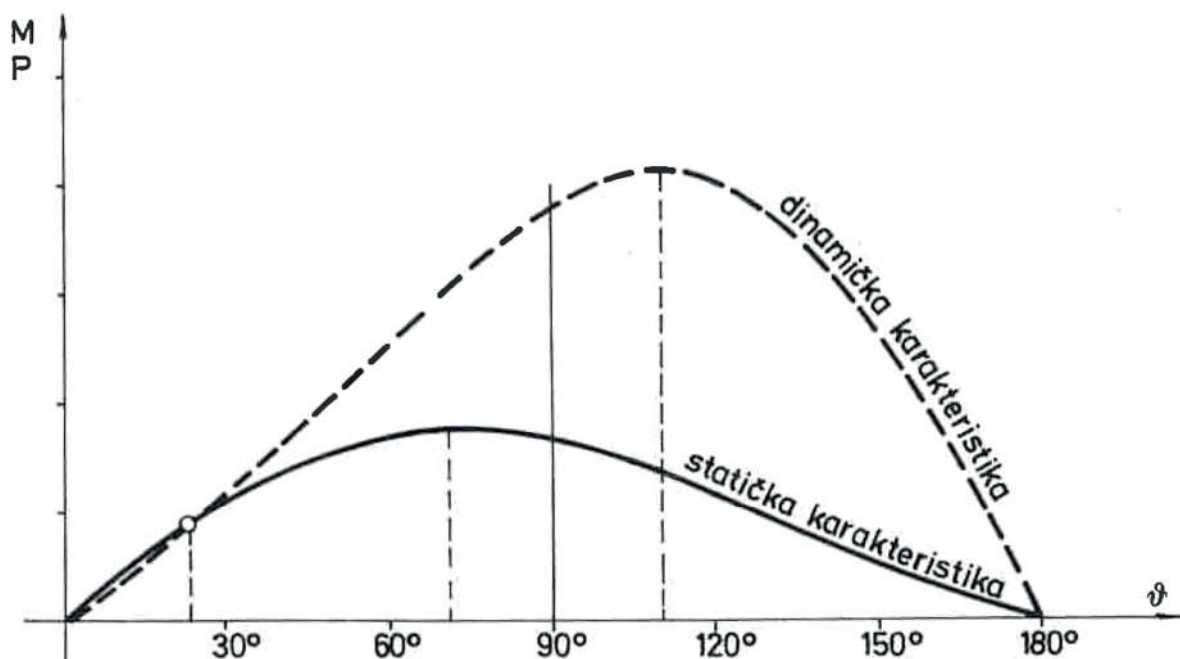
Unatoč tome, što je napon $E'_{d0} < E_0$ ipak je dinamička prekretna snaga veća od statičke prekretnne snage, jer je reaktancija $X'_d \ll X_d$.

To je vidljivo u sl. 4.2-03, u koju smo i statičku karakteristiku stabilnosti radi usporedbe također ucrtali za slučaj generatora sa izraženim polovima sa slijedećim podacima:

$$X_d = 1, \quad X_q = 0,6, \quad X'_d = 0,3$$

Krivulja dinamičke stabilnosti u sl. 4.2-03 vrijedi, naravno, za opterećivanje generatora iz praznog hoda. Kod momentanog opterećivanja već opterećenog generatora treba krivulje dinamičke stabilnosti polaziti iz pogonske točke na krivulju statičke stabilnosti kako je to za slučaj prethodnog nazivnog tereta sa $\cos\varphi_n = 0,9$, prikazano u sl. 4.2-04.

Pogledajmo još kako to izgleda u vektorskom dijagramu za slučaj generatora sa izraženim polovima sa $X_d = 1$, $X_q = 0,6$, $X'_d = 0,3$, koji radi nazivno opterećen sa $\cos\varphi_n = 0,9$. Pretpostavljamo opet, da se kod kratkotrajnog preopterećenja napon E'_{d0}

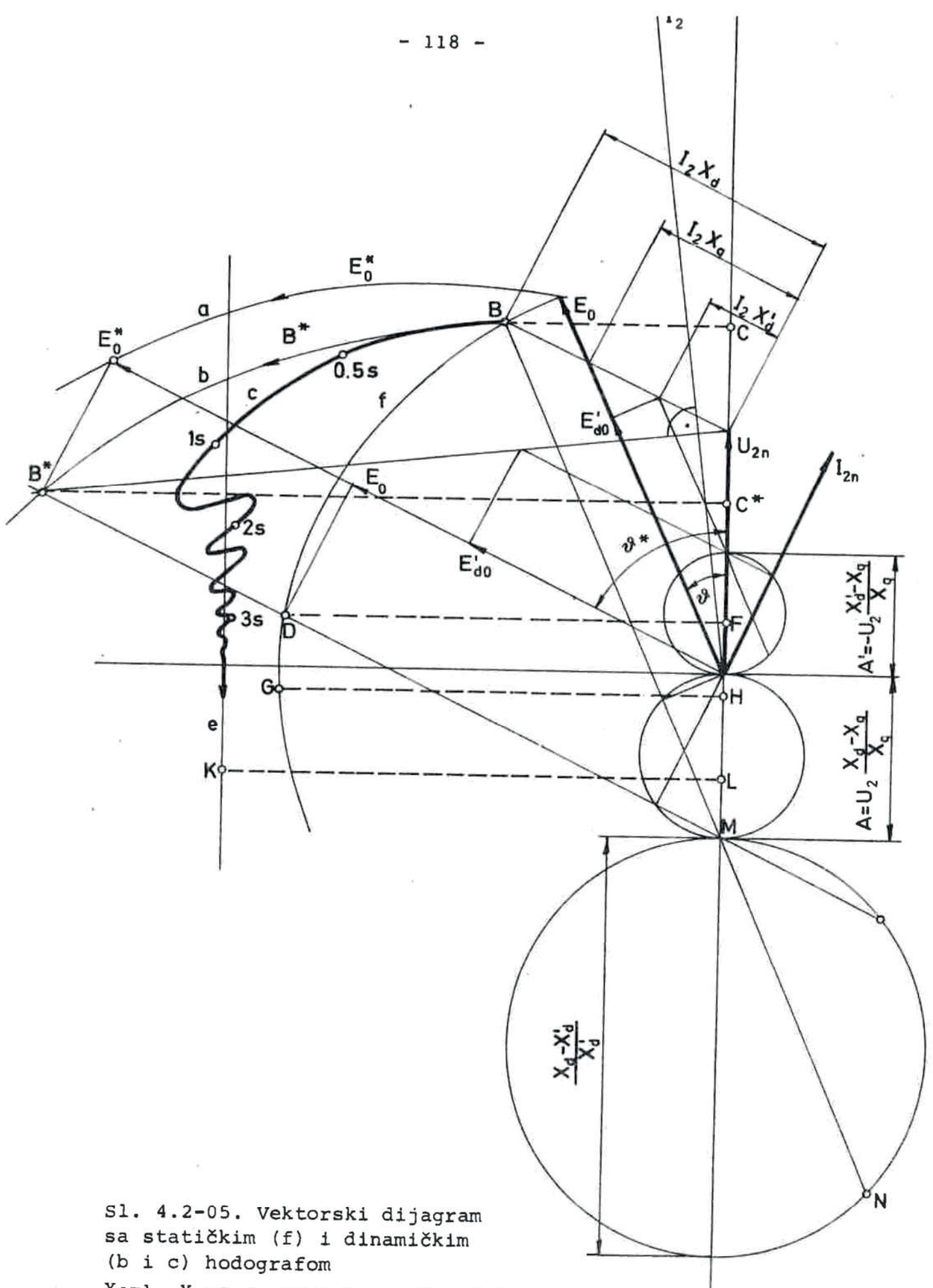


Sl. 4.2-04

iza tranzientne reaktancije X_d' radi magnetske tromosti ne mijenja i da nema tromosti masa. Osim toga, pretpostavljamo da napajanje rotora ostaje nepromijenjeno, tj. da nemamo automatskog regulatora napona.

U sl. 4.2-05 prikazan je puno izvučenim crtama vektorski dijagram kod nazivnog tereta i $\cos\varphi_n = 0,9$. Ako u tom pogonskom stanju trenutačno povećamo radni teret, mora se povećati kut ϑ na primjer na kut ϑ^* prema sl. 4.2-05. Ako E_{d0}' radi magnetske tromosti za tih par desetinki sekunde ostaje konstantan, onda se sa povećanjem kuta ϑ nužno povećava pad napona na $I_2^* X_d'$, time struja na I_2^* i napon na E_o^* . Povećanje unutarnjeg napona na E_o^* znači ujedno povećanje uzbuđne struje na I_1^* . Pošto je uzbuđni napon ostao nepromijenjen kao i otpor uzbuđnog kruga proizlazi iz toga da za vrijeme te prelazne pojave to povećanje struje ide na račun magnetske energije generatora. Veza između vrijednosti E_{d0}' i E_o je dana jednačinom:

$$E_{d0}' = (E_o - U_2 \cos\vartheta) \frac{X_d'}{X_d} + U_2 \cos\vartheta = E_o \frac{X_d'}{X_d} + U_2 \frac{X_d - X_d'}{X_d} \cos\vartheta \quad (4.2-06)$$



Sl. 4.2-05. Vektorski dijagram
sa statičkim (f) i dinamičkim
(b i c) hodografom

$X_d=1$, $X_q=0,6$, $X'_d=0,3$, $\cos\varphi_{2n}=0,9$

odnosno obrnuto:

$$E_O = (E_{dO}' - U_2 \cos \vartheta) \frac{X_d}{X_d'} + U_2 \cos \vartheta = E_{dO}' \frac{X_d}{X_d'} - U_2 \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \cos \vartheta \quad (4.2-07)$$

Prvi član u jednačbi (4.2-07) predstavlja konstantnu vrijednost, a drugi član negativnu vrijednost, koji sa povećanjem kuta ϑ pada i prema tome E_O^* mora rasti.

Grafički možemo to riješiti tako, da na ordinatu ispod točke "M" naneseemo vrijednost $U_2 \frac{X_d - X_d'}{X_d'}$ kao promjer polukruga.

Dužina $\overline{BN}$ mora kod svakog kuta ϑ i nepromijenjene uzbude ostati konstantna. Na taj način možemo za razne kuteve ϑ^* konstruirati pripadajući napon E_O^* i dobiti krivulju "a" kao hodograf vektora E_O^* i krivulju "b" kao hodograf točke B* kod povećanja kuta ϑ^* .

Uspoređivanjem jednačbi (3.9-04) sa jednačbom (4.2-05) vidimo, da se reakcijski krug promjera $A = U_2 \frac{X_d - X_q}{X_q}$ kod dinamičke prelazne pojave analogno mijenja na promjer $A' = -U_2 \frac{X_d' - X_q}{X_q}$. Kako je negativan, dolazi na ordinati iznad nul točke koordinatnog sistema.

Ako sada trenutačno kratkotrajno generator tako preopteretimo, da se u vektorskom dijagramu poveća kut ϑ na ϑ^* i E_O na E_O^* , dobijemo vektorski dijagram, kako je to u sl.4.2-05 tanko crtano prikazano. E_{dO}' se nije promijenio, a E_O^* je znatno veći od E_O .

Ako u jednačbu (4.2-05) unesemo vrijednost E_O^* prema jednačbi (4.2-07) dobijemo jednačbu:

$$P_{2d} = m \left(\frac{E_O^* U_2}{X_d} \sin \vartheta^* + \frac{U_2^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\vartheta^* \right)$$

koju smo već upoznali u pogl. 3.9. sa jednačbom (3.9-04). To potvrđuje pravilnost jednačbe (4.2-05). Osim toga, dužine u

tom dijagramu $\overline{BC}$, $\overline{DF}$, $\overline{B^*C^*}$ prema tumačenju u pogl. 3.9. u nekom mjerilu pokazuju vrijednost snage P_2 i to:

$$\begin{aligned}\overline{BC} &= \text{statička snaga kod kuta } \vartheta \text{ i nazivnog tereta} \\ \overline{DF} &= \text{ " " " " } \vartheta^* \\ \overline{B^*C^*} &= \text{dinamička " " " } \vartheta^*\end{aligned}$$

Vidimo, da je kod kuta ϑ^* prema sl. 4.2-05 dinamička snaga $\overline{B^*C^*}$ cca 60% veća od statičke $\overline{DF}$.

Kod ovog razmatranja nismo uzeli u obzir tromost masa rotora već samo magnetsku tromost. Radi tromosti masa rotora kut ϑ se ne može trenutačno povećati već zavisno od vremena i tereta. Što je veći teret, to brže raste kut ϑ . Ako je opterećenje maleno ($\overline{KL}$), nešto veće od statičke prekretna snage $\overline{GH}$ prema sl. 4.2-05 cca 12%, onda kut ϑ polagano raste, točka B^* više ne slijedi u cijelom području hodograf "b", već uz titranje, prema hodografu "c", prelazi u stacionarno stanje u hodograf "e".

Pošto je teret veći od statičke stabilnosti (hodograf "f" odn. statička prekretna snaga $\overline{GH}$), generator nakon nekoliko sekundi ispadne iz sinhronizma, kako je to u slici 4.2-05 prikazano.

Pretpostavljali smo, da nismo mijenjali uzbuđu. Ako, međjutim, kod trenutačnog preopterećenja brzo povećamo uzbuđu i time statičku stabilnost u tolikoj mjeri, da generator može i statički svladavati to preopterećenje, onda generator neće ispasti iz sinhronizma i moći će vući povećani teret, dok ne dodje u pitanje prekomjerno zagrijavanje namota.

Tromost masa rotora se u klasičnoj elektrotehnici davala podatkom mD^2 (kgm^2), ili I (kgm^2 ili Ws^3) = $mD^2/4$, dok se po Giorgijevom sistemu daje u mr^2 (kgm^2) odn. 4 puta manja vrijednost. Kao relativnu vrijednost (per unit) se daje vrijeme zagona do pune brzine vrtnje momentom, koji odgovara nazivnoj prividnoj snazi kod $\cos\varphi=1$:

$$T_z = I \frac{\omega^2}{P}$$

I = moment inercije u kgm^2

ω = kutna brzina vrtnje u radianima na sekundu

$$\text{uz} \quad I = \frac{mD^2}{4} \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

te uz nazivnu snagu P_{2n} u kVA, vrijedi:

$$T_z = \frac{mD^2 n^2}{365 \cdot P_{2n}} \quad \left(\frac{\text{kgm}^2 (\text{O/min})^2}{\frac{\text{W}}{\text{kVA}} \cdot \left(\frac{\text{O/min}}{\text{s}^{-1}} \right)^2 \cdot \text{kVA}} \right)$$

ili se daje konstanta tromosti:

$$H = I \frac{\omega_n^2}{2 \cdot P_{n2}} = \frac{1}{2} T_z$$

" T_z " i " H " su izraženi u sekundama, što u stvari predstavlja omjer kinetičke energije rotirajućih masa rotora kod sinhrona nazivne brzine vrtnje prema nazivnoj prividnoj snazi generatora (P_{2n}).

U starim dokumentacijama nailazimo često na izraz GD^2 umjesto mD^2 , što je slučajno numerički isto.

4.3. Pogonski dijagram

Za sagledavanje područja mogućeg opterećenja sinhronog generatora kod raznih tereta najbolje služi pogonski dijagram. Dobijemo ga na taj način, da vektorski dijagram sinhronog generatora sa izraženim polovima prema sl. 3.9-01 pomnožimo sa $(-j \frac{U_{2n}}{X_d})$, tj. okrenemo sve vektore za 90° na desno i pomnožimo sa $(\frac{U_{2n}}{X_d})$. Kod crtanja pogonskog dijagrama koristimo relativne vrijednosti (per unit). Vektor pada napona uslijed sinhrona reaktancije se mijenja u:

$$\frac{U_{2n}}{X_d} I_2 X_d = U_{2n} I_2$$

vektor prividne snage na stezaljkama generatora. Ako kroz hvatišta tog vektora povučemo ordinatu i apscisu koordinatnog sistema, imamo na ordinati radnu a na apscisi jalovu snagu generatora.

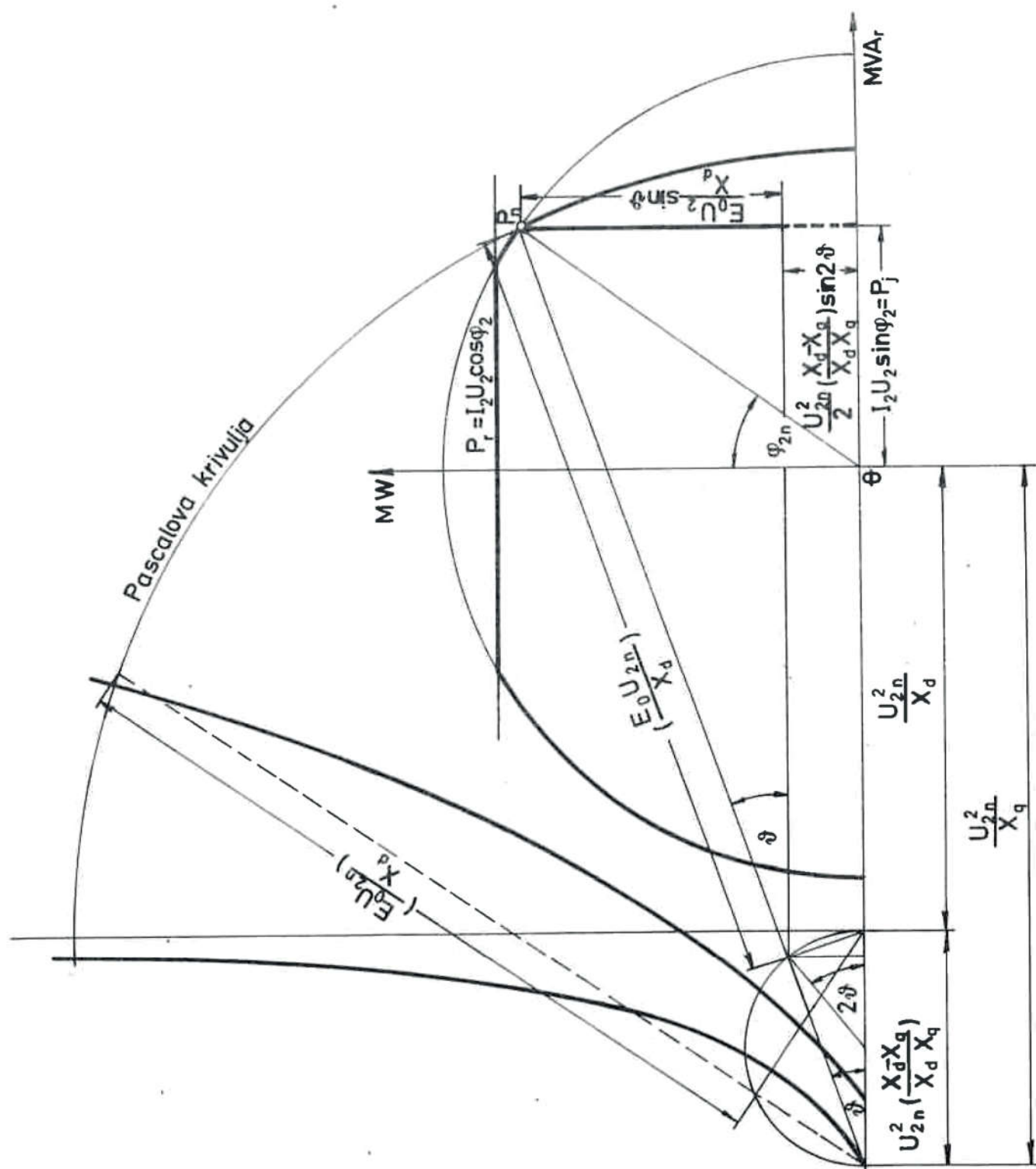
Sa vektorom $U_{2n}I_{2n}$ kao radiusom dobijemo polukružnicu, koja nam ograničava područje trajne nazivne prividne snage statora generatora. Pogonske točke izvan te kružnice, prema tome, predstavljaju u trajnom pogonu termičko preopterećenje statorskog namota.

Vektor $\frac{E_o U_{2n}}{X_d}$ odn. njegova paralela $(\frac{E_o U_{2n}}{X_d})'$ nam u ovom dijagramu u nekom mjerilu predstavlja nazivnu struju rotora, koja sa razmakom između male kružnice sa radiusom

$$K = A \frac{U_{2n}}{X_d} = \frac{U_{2n}^2}{X_d} \left(\frac{X_d - X_q}{X_q} \right) \quad \text{i Paskalove krivulje ograničava mo-}$$

gućnost trajnog pogona radi zagrijavanja rotorskog namota. U sjecištu te Paskalove krivulje sa prije spomenutom kružnicom statorskog namota leži točka P_n za nazivni teret, koja je određena nazivnom strujom statora i nazivnom strujom rotora. Ispod te točke ova Paskalova krivulja ograničava mogući teret za trajni pogon ispod vrijednosti dozvoljene s obzirom na zagrijavanje statorskog namota. Zato je nazivna prividna snaga P_n na natpisnoj pločici generatora dodatno definirana sa $\cos\varphi_{2n}$, što znači, da se ne smije kod lošijeg $\cos\varphi$ generator opteretiti nazivnom prividnom snagom P_n već samo do te rotorskim zagrijavanjem diktirane Paskalove krivulje.

Generator se zato uvijek gradi za određeni minimalni $\cos\varphi_{2n}$, kod određene nazivne prividne snage. Iz toga dobijemo nazivnu radnu snagu generatora $P_{rn} = U_{2n}I_{2n}\cos\varphi_{2n}$. Pogonski stroj treba biti gradjen barem za tu snagu uzimajući u obzir faktor korisnosti. Ako povučemo kroz točku P_n horizontalu, dobijemo ovom crtom ograničenje pogonskog dijagrama u pogledu radnog tereta. Naravno, može biti pogonski stroj iz bilo kojih razloga, dimenzioniran za nešto veću snagu, pa se ta horizontala odgovarajuće digne. Zato smo u sl. 4.3-01 ucrtali to ograničenje pogonske snage nešto iznad točke nazivne snage generatora P_n . U pogl. 4.2. obradili smo statičku stabilnost turbogeneratora i ustanovili, da je data sa kutom opterećenja " ϑ ", koji ne smije prelaziti 90° . Kod generatora sa izraženim polovima moramo pomoću jednadžbi snage tražiti koliko iznosi maksimalna (prekretna) snaga kod raznih kuteva " ϑ " i dobijemo:



Sl. 4.3-01 Pogonski dijagram sinhronog generatora sa izraženim polovima

$$P_{2r} = m \left(\frac{E_o U_{2n}}{X_d} \sin \vartheta + \frac{U_{2n}^2}{2X_d} \left(\frac{X_d - X_q}{X_q} \right) \sin 2\vartheta \right)$$

Deriviranjem po kutu ϑ i izjednačenjem sa nulom dobijemo maksimalnu snagu:

$$\frac{dP_{2r}}{d\vartheta} = \frac{E_o U_{2n}}{X_d} \cos \vartheta + \frac{U_{2n}^2 (X_d - X_q)}{X_d X_q} (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) = 0$$

i množenjem sa $\operatorname{tg} \vartheta$:

$$\underbrace{\frac{E_o U_{2n}}{X_d} \sin \vartheta + \frac{U_{2n}^2}{X_d} \frac{(X_d - X_q)}{X_q} (\sin \vartheta \cdot \cos \vartheta - \sin^2 \vartheta \cdot \operatorname{tg} \vartheta)}_{P_{2r}} = 0$$

$$P_{2r\max} = \underbrace{\frac{U_{2n}^2}{X_d} \frac{(X_d - X_q)}{X_q}}_K \sin^2 \vartheta \cdot \operatorname{tg} \vartheta = K \cdot \sin^2 \vartheta \cdot \operatorname{tg} \vartheta$$

Ta jednadžba definira krivulju granične statičke stabilnosti i možemo je jednostavno riješiti slijedećom nomografijom u širini malog polu-kruga sa promjerom

$$\frac{U_{2n} \cdot A}{X_d} = K = \frac{U_{2n}^2}{X_d} \left(\frac{X_d - X_q}{X_q} \right)$$

kako se to vidi u sl. 4.3-02.

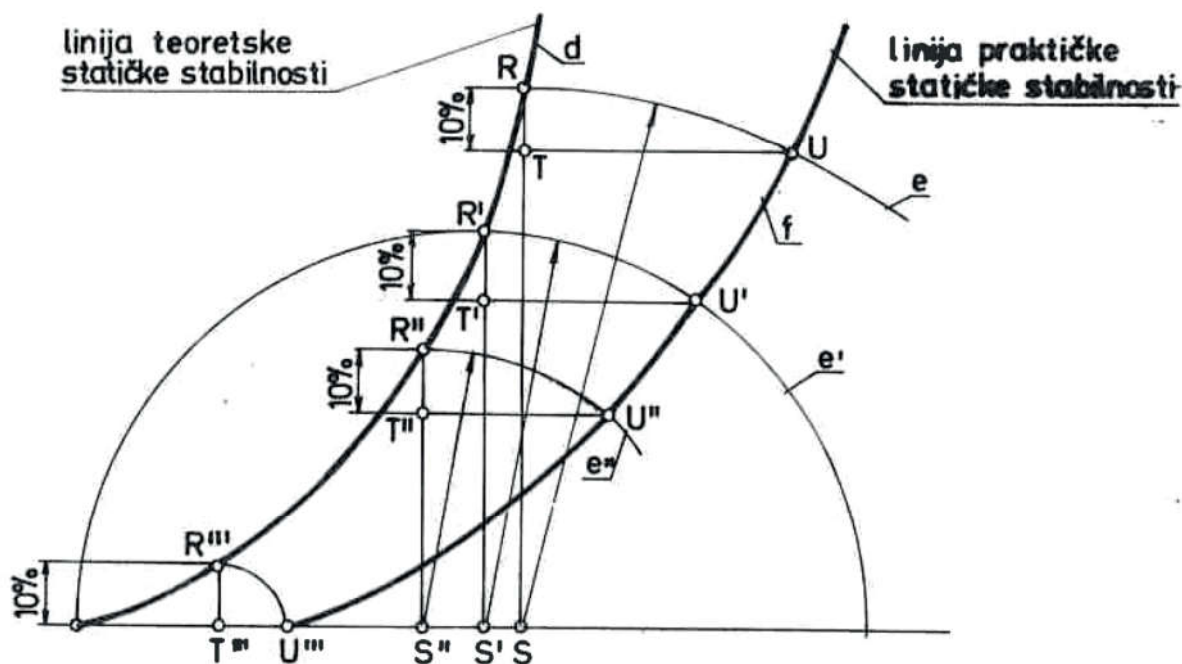
U svakom pravcu pod kutom ϑ iz točke F prema bilo kojoj pogonskoj točki je:

$$\overline{BC} = K \cdot \sin \vartheta$$

$$\overline{CD} = K \cdot \sin^2 \vartheta$$

$$\overline{DE} = K \cdot \sin^2 \vartheta \cdot \operatorname{tg} \vartheta$$

$$\overline{DE} = \overline{GH} = K \cdot \sin^2 \vartheta \cdot \operatorname{tg} \vartheta$$

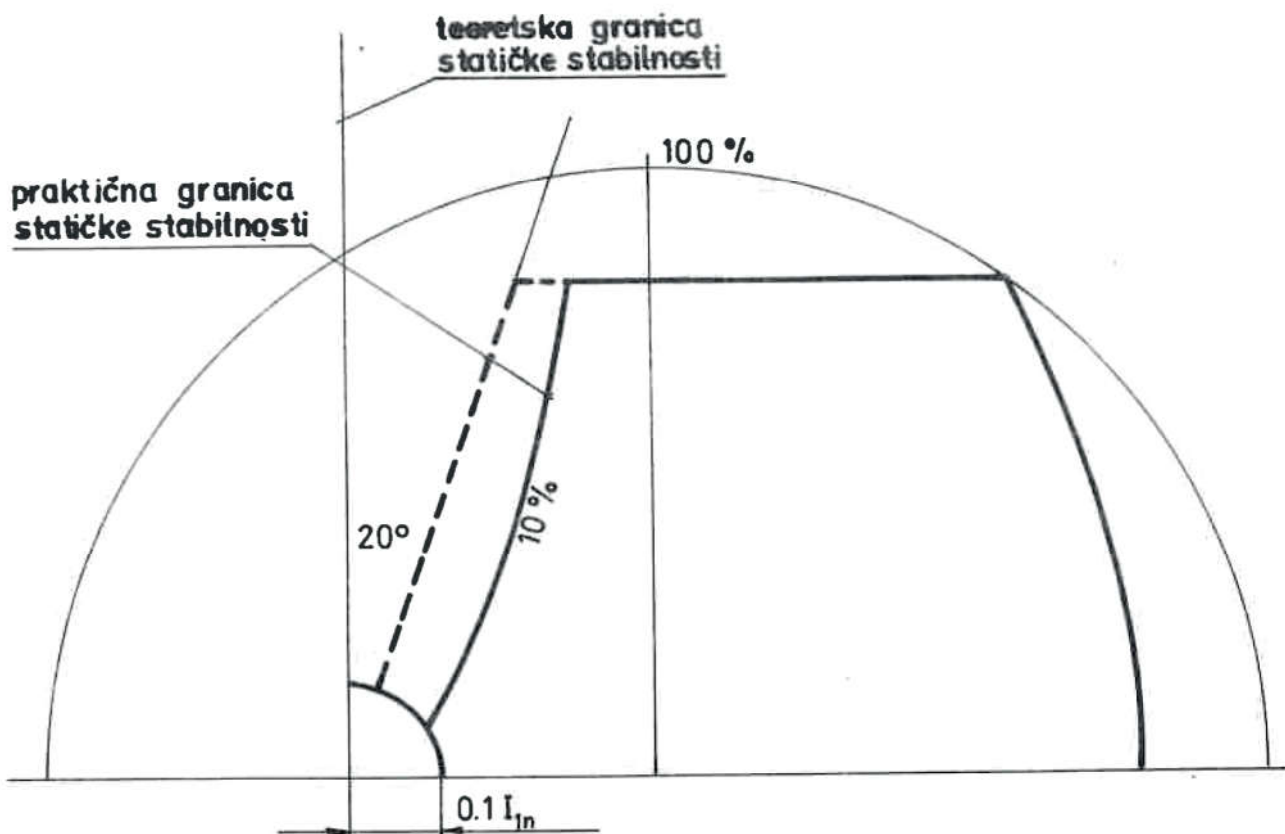


Sl. 4.3-03 Nomografija za liniju praktičke statičke stabilnosti u pogonskom dijagramu

cu e, koja nadomješta Paskalovu krivulju, što nije egzaktno, ali praktički dovoljno točno, i sa sjecištem te kružnice sa horizontalom iz točke T dobijemo točku U, koja leži na traženoj liniji praktičke statičke stabilnosti.

Kod toga pretpostavljamo, da generator radi na krute sabirnice, tj. da je kratkospojna snaga na tim sabirnicama teoretski beskonačno velika, praktički tako velika, da drži napon i frekvenciju na sabirnicama nepromijenjene bez obzira na rad generatora. Ako treba računati s većim promjenama napona na sabirnicama generatora, mijenja se odgovarajući pogonski dijagram.

Kod hidrogeneratora leži granica statičke stabilnosti izvan područja nazivne prividne snage. Kod turbogenerators s velikom sinhronom reaktancijom granica statičke stabilnosti leži unutar kapacitivnog područja nazivne prividne snage i osim toga je teoretska granica kod $X_d = X_q$ data s vertikalom iz točke U_n^2/X_d , kako to vidimo u sl. 4.3-04. Praktička granica statičke stabilnosti se kod turbogenerators za razliku od hidrogenerators obično uzima kao pravac iz točke U_n^2/X_d nagnut



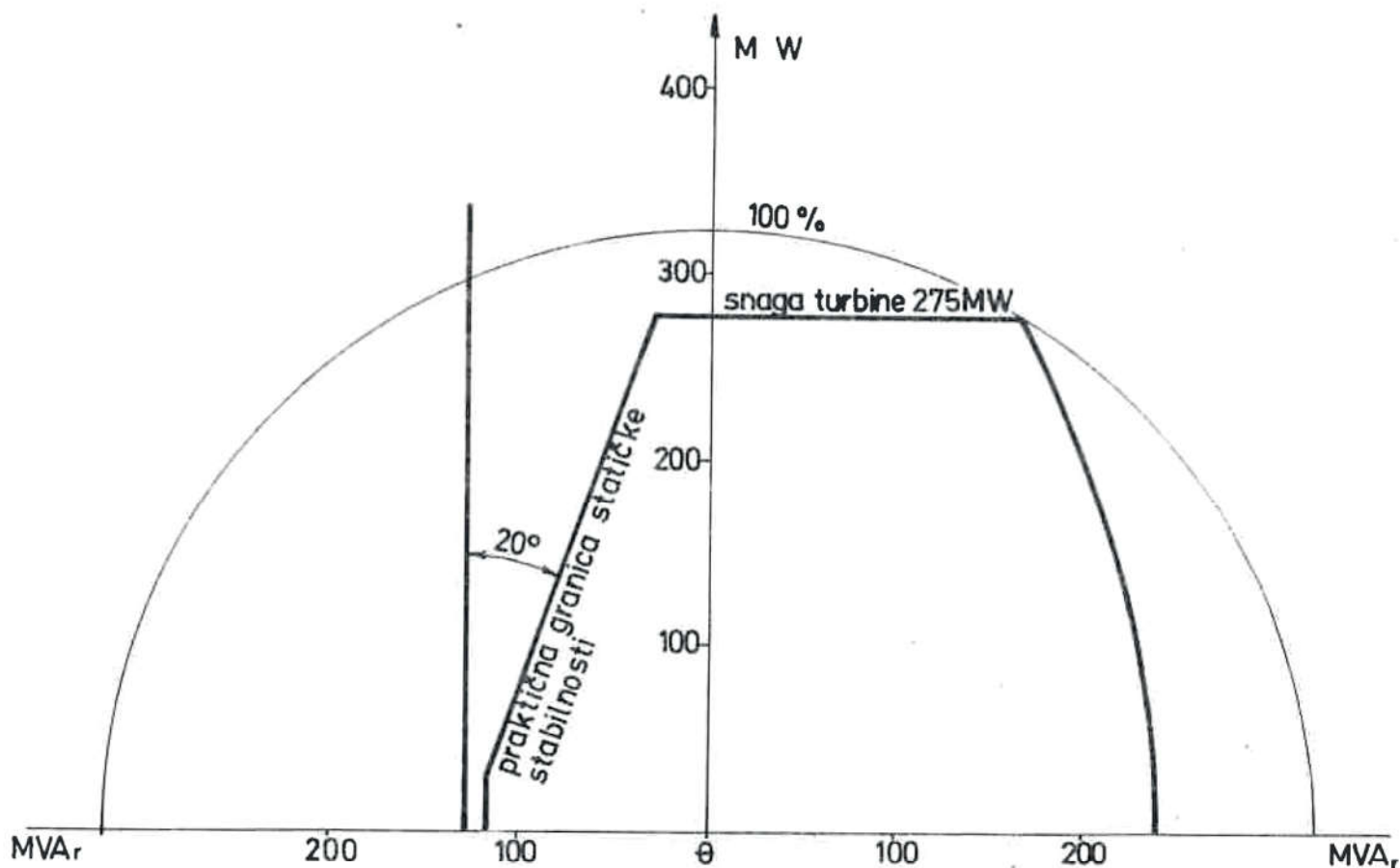
Sl. 4.3-04 Pogonski dijagram turbogeneratorsa sa granicama statičke stabilnosti

od teoretske granice na desno pod kutem od 20° . To znači, da se praktički dozvoljava da kut opterećenja ϑ bude maksimalno 70° . Za usporedbu je u sl. 4.3-04 ucrtana i 10% praktička granica.

Kod turbogeneratorsa se obično ograničava i uzbudna struja na minimalnu vrijednost od 10% nazivne uzbudne struje, kako je to prikazano u sl. 4.3-04.

U sl. 4.3-05 je prikazan pogonski dijagram za ruski turbogenerator od 210 MW, koji je ugrađen u termoelektrani Sisak; u sl. 4.3-06 od Siemens generatora za 275 MW iz Šoštanj i u sl. 4.3-07 za AEG generator iste snage.

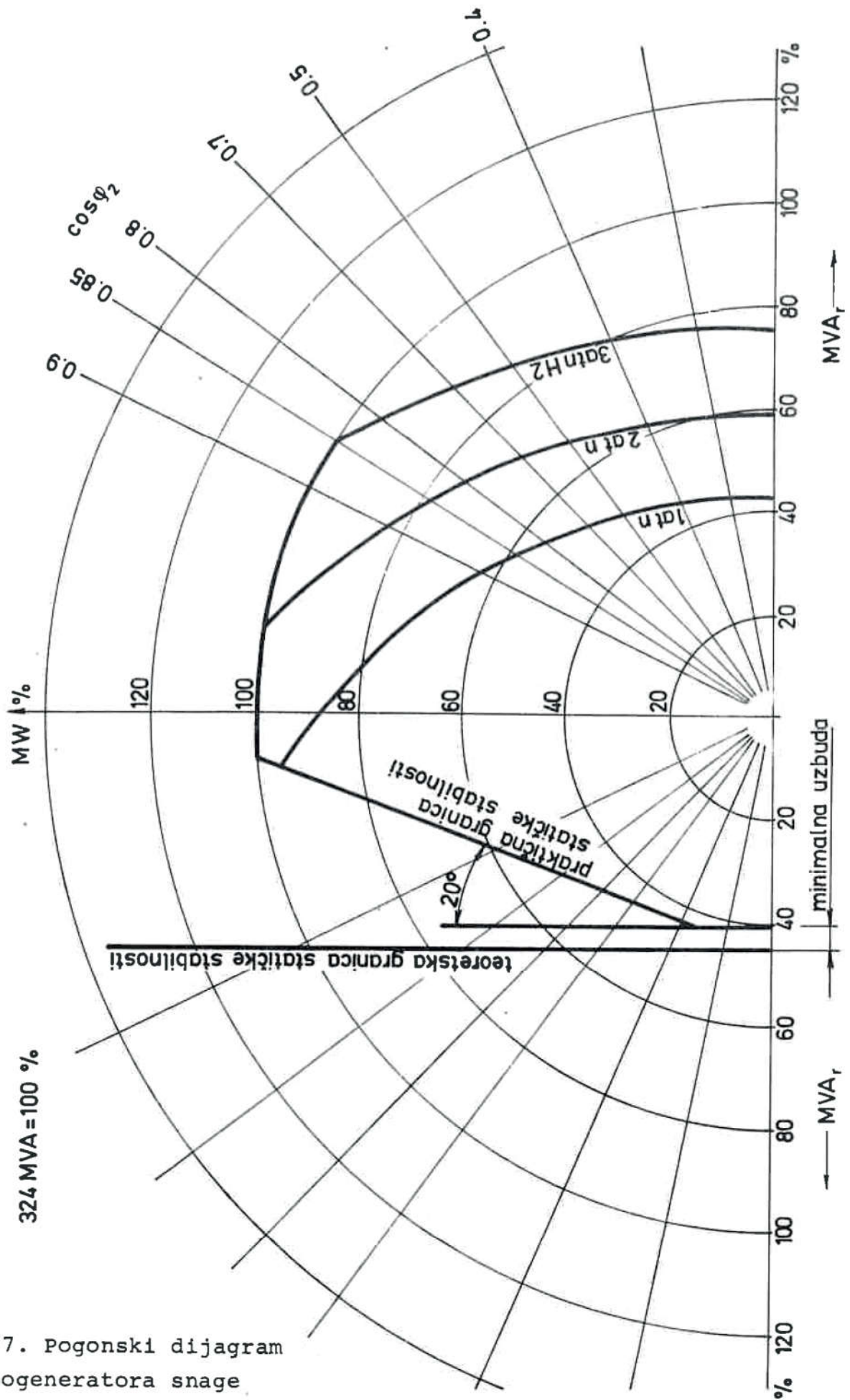
Kod Siemens- i AEG-pogonskog dijagrama vidimo ograničenje minimalne uzbuđe sa vertikalnim odsječkom umjesto kružnice. Treba općenito reći, da su ta praktička ograničenja rezultat iskustva, koje naravno ne mora biti svugdje isto. Ona se, naime, ne mogu teoretski ničim dokazati već predstavljaju slobodnu procjenu iz prakse.



Sl. 4.3-06 Pogonski dijagram sinhronog turbogeneratorsa snage 275 MW, $\cos\varphi=0,85$, fabrikat "Siemens" u termoelektrani Šoštanj

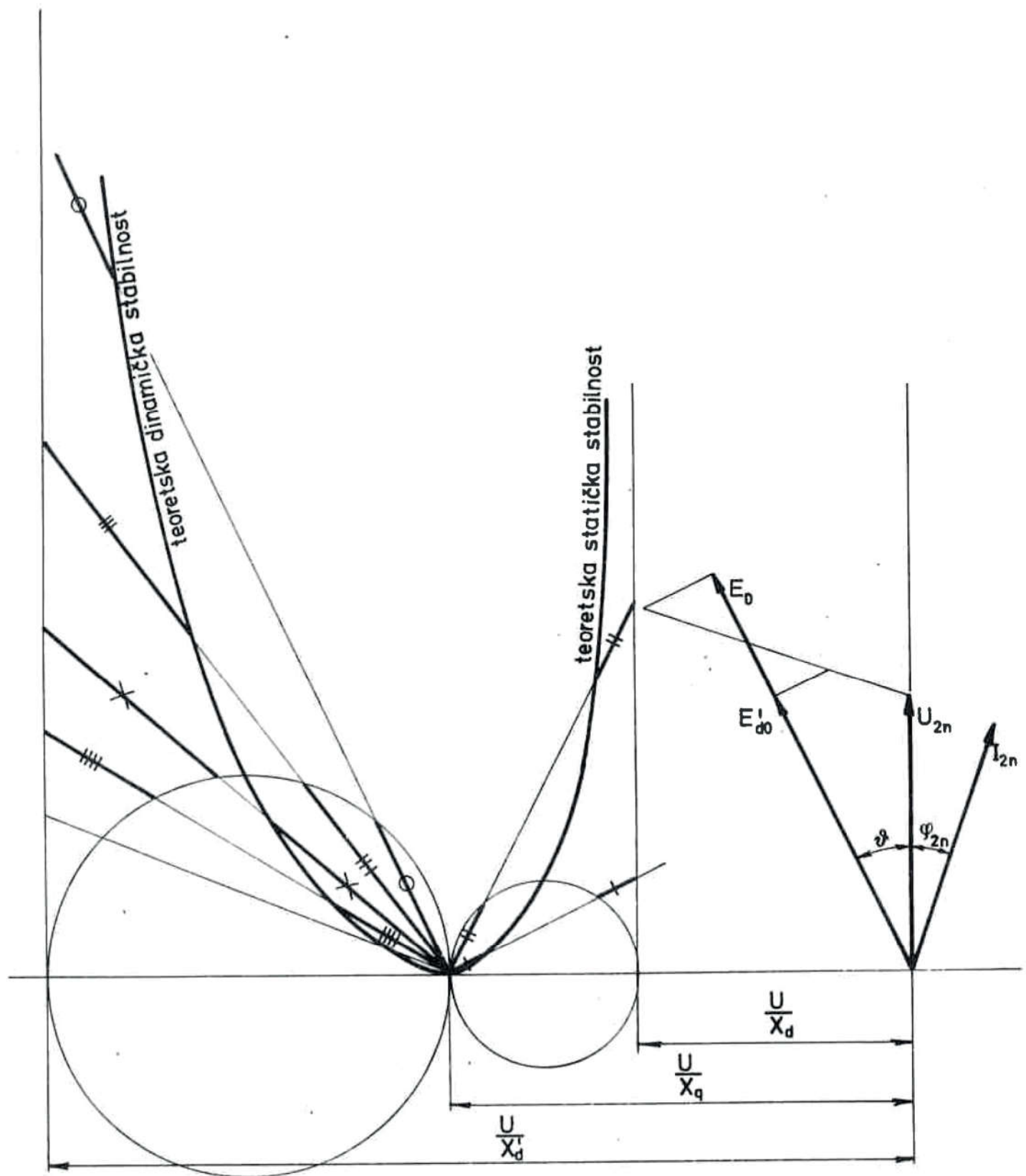
je statorska struja skoro istog faznog položaja kao rotorska. Zato se amperzavoji sumiraju i dolazi do jakih rasipnih polja u glavama obiju namota. Pošto ta rasipna polja idu praktički okomito kroz čeone ploče, dolazi do velikih vrtložnih struja, koje te čeone ploče a i krajnje limove jako zagrijavaju. To ima za posljedicu, da treba opterećenja u kapacitivnom području jako sniziti. Međutim, moderni generatori se već grade posebnim oblikovanjem čeonih paketa i ploča tako, da ta zagrijavanja dolaze u obzir tek kod većih opterećenja, koja su izvan područja statičke stabilnosti pa se zato više te krivulje a, b i c ne ucrtavaju u pogonske dijagrame, kako to vidimo u slikama 4.3-06 i 4.3-07.

U pogonske dijagrame može se ucrtati i teoretska dinamička stabilitetna granica, koju se konstruira na isti način kao statičku na bazi vektorskog dijagrama u sl. 4.2-05, kako je to prikazano u sl. 4.3-08.



324 MVA=100 %

11.4.3-07. Pogonski dijagram
 JEG-turbogeneratorske snage
 24 MVA sa vođenim hlađenjem
 statorskog namota



Sl. 4.3-08 Nomografija za krivulje teoretske statičke i dinamičke stabilnosti

4.4. Njihanje sinhronog stroja

4.41 Sinhronizirajući moment

Pretpostavljamo da sinhroni turbogenerator sa neizraženim polovima radi na krutu mrežu; zanemarujemo omski otpor armature, tj. $R_2=0$.

Prema jedn. (4.2-02) iz pogl. 4.2. kod turbogeneratora je relativna snaga:

$$\frac{P_2}{P_{2n}} = P_{2r} = E_{or} U_{2r} \frac{1}{X_{dr}} \sin \vartheta$$

a pošto je brzina vrtnje konstantna, možemo zaključiti da je:

$$M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_{2r} P_{2n}}{\omega} = \frac{P_{2n}}{\omega} E_{or} U_{2r} \frac{1}{X_{dr}} \sin \vartheta$$

gdje je ω kutna brzina rotora.

Upravo napisana relacija predstavlja moment sinhronog generatora (M_{gen}) kojemu odgovara snaga P_2 koju generator daje u mrežu (pretpostavljamo da nema gubitaka). Tome momentu mora biti jednak moment pogonskog stroja (M_{ps}) s kojim pogonski stroj tjera generator. Samo u tom slučaju možemo govoriti o uravnoteženom stacionarnom stanju pogona, jer je tada

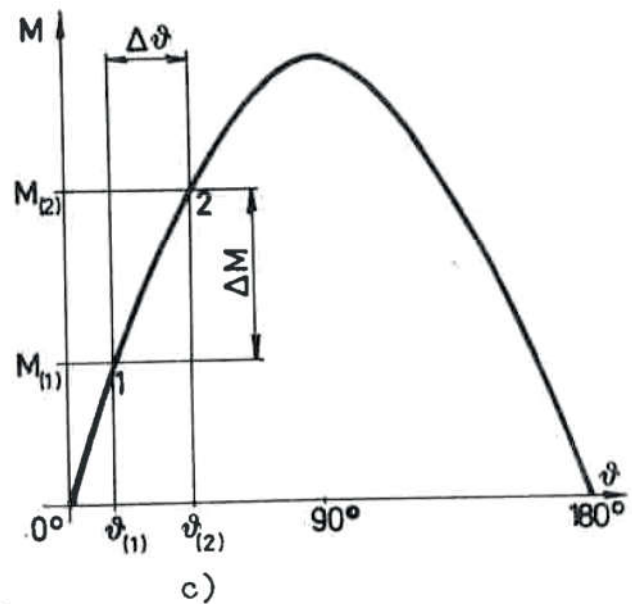
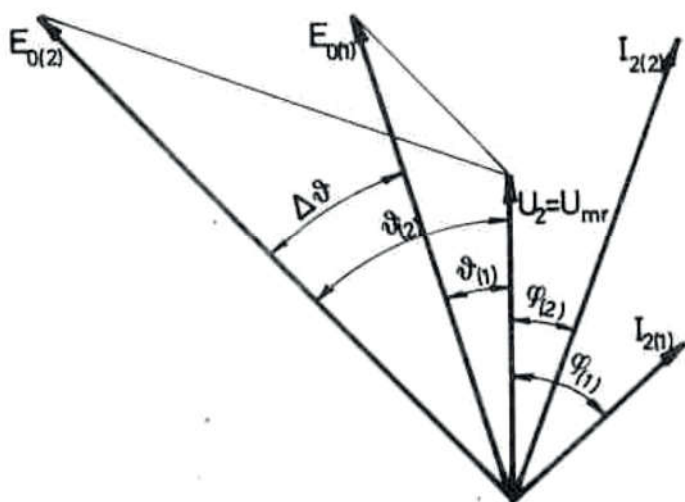
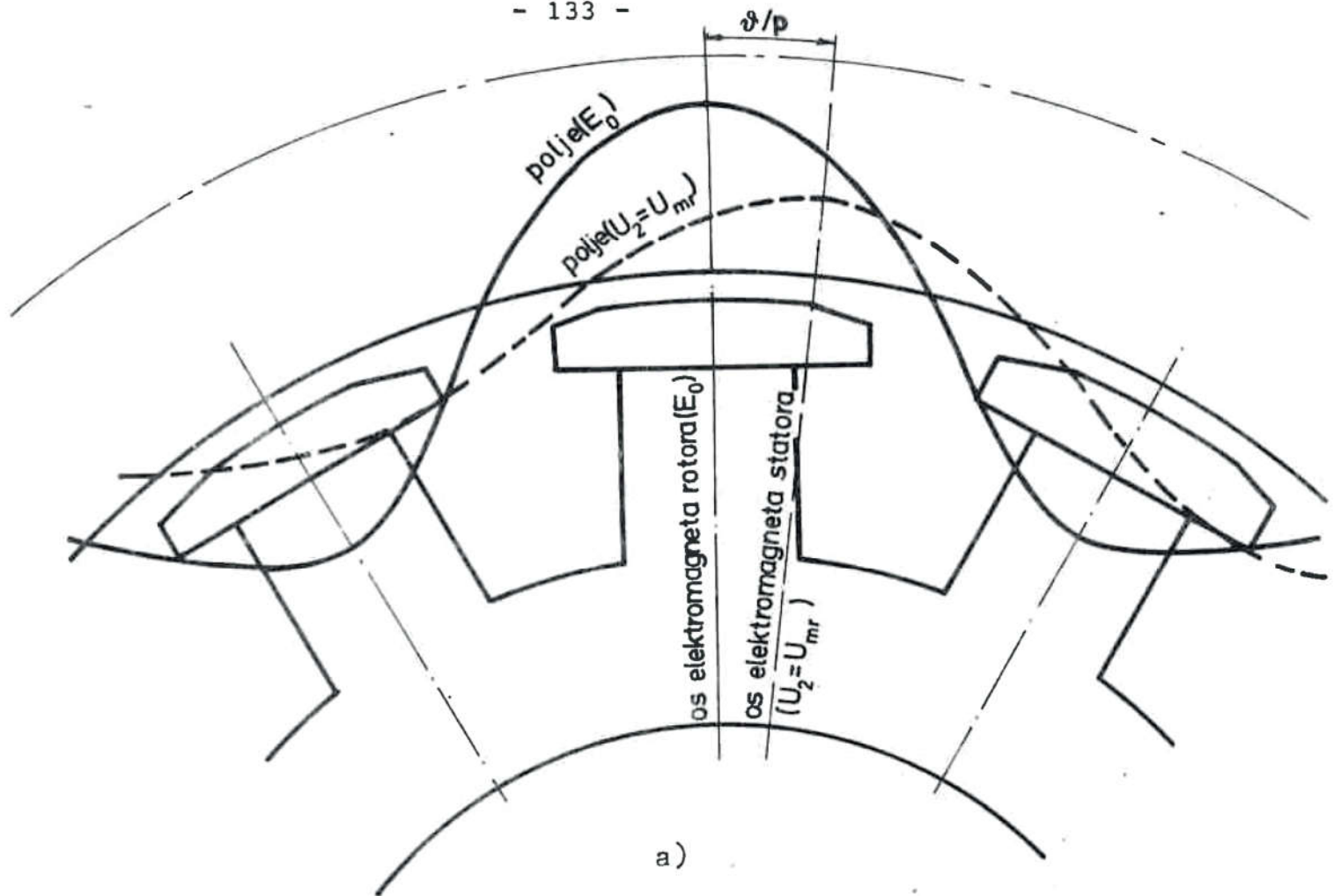
$$M_{ps} = M_{gen}$$

U sl. 4.4-01 je prikazana prostorna slika s geometrijskim kutem ϑ/p , vektorski dijagram s električnim kutem ϑ i dijagram momenta u ovisnosti od ovog kuta ϑ .

U prostornoj slici je kut ϑ/p određen sa kutom između:

- osi pola, tj. osi elektromagneta rotora (E_o) i
- osi elektromagneta neizraženih polova statorskog namota (U_2).

Neka stroj radi kao generator na krutu mrežu s određenom snagom, kojoj odgovara određeni moment M_1 i kut ϑ_1 . Ako povećamo moment pogonskog stroja za ΔM , poveća se s vremenom kut za $\Delta \vartheta$ pa generator daje nešto veću snagu u mrežu. Ako sada



Sl. 4.4-01

- a) Geometrijski kut opterećenja sinhronog stroja φ/p
 b) Električki kut opterećenja sinhronog stroja φ
 c) Dijagram $M=f(\varphi)$

momentano smanjimo moment pogonskog stroja za ΔM na prijašnju vrijednost momenta M_1 , tj.:

$$M_{ps} = M_{gen} - \Delta M = M_1$$

moment generatora se ne može trenutačno promijeniti, jer je ovisan o kutu ϑ koji se, radi tromosti masa rotora, ne može trenutačno smanjiti.

Razlika momenta ΔM djeluje u smislu smanjenja kuta za $\Delta\vartheta$ tj. na ϑ_1 . U tom slučaju govorimo o sinhronizacionom koeficijentu momenta, kojeg izražavamo u odnosu na jedinicu kuta; možemo pisati:

$$K_s = - \frac{\Delta M}{\Delta\vartheta} = - \frac{\delta M}{\delta\vartheta}$$

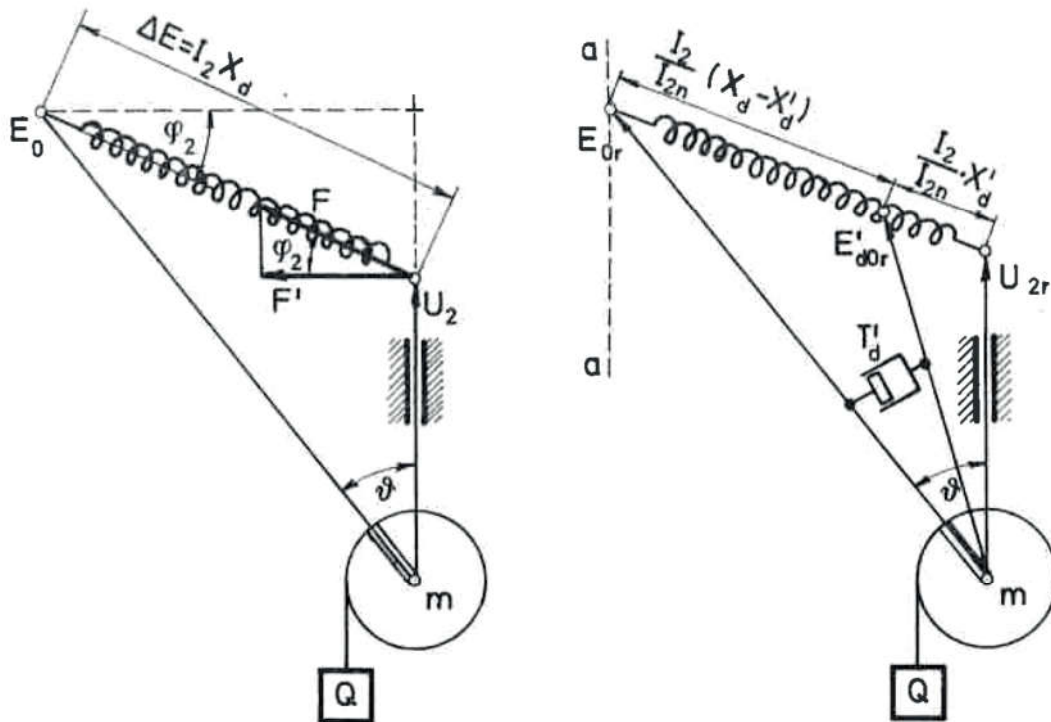
Produkt $K_s \cdot \Delta\vartheta$ je onaj moment koji vraća rotor pri odredjenom opterećenju odn. odredjenom momentu tereta M_1 na odredjenom kutu ϑ_1 u sinhronizam, te se na taj način protivi bilo kakvoj promjeni kuta ϑ . Ovaj sinhronizirajući moment, naravno, nije za svaki kut ϑ isti. On ovisi o odstupanju kuta $\Delta\vartheta$ i o sinhronizacionom koeficijentu K_s . Ovaj dobijemo ako pogonski moment deriviramo po kutu ϑ .

$$K_s = \frac{dM}{d\vartheta} = \frac{P_{2n}}{\omega} E_{or} U_{2r} \frac{1}{X_{dr}} \cos\vartheta$$

Sinhronizacioni koeficijent momenta je najveći, kad je kut $\vartheta=0^\circ$, a najmanji kad je kut $\vartheta=90^\circ$, jer tada nastaje prekretni moment pa i najmanje povećanje momenta prouzrokuje ispad iz sinhronizma. Prema tome zaključujemo da je sinhronizirajući koeficijent najmanji kad kut ϑ postigne iznos od 90° .

4.42 Ekvivalentna mehanička slika

Utjecaj sinhrone reaktancije na moment stroja možemo fizikalno prikazati ekvivalentnom nadomjesnom mehaničkom slikom 4.4-02, u kojoj su naponi E_o i U_2 prikazani ručicama odgovarajuće duljine, a sinhrona reaktancija jednom spiralnom oprugom. Ručica U_2 predstavlja krutu mrežu, pa je zato fiksna, dok ruči-



a) bez magnetske tromosti

b) s magnetskom tromosti

Sl. 4.4-02 Ekvivalentna mehanička slika rada sinhronog stroja

ca E_0 predstavlja rotor na kojeg djeluje okretni moment pogonskog stroja (M_{ps}).

Taj okretni moment možemo u mehaniziranoj slici predstavljati kao moment kojeg proizvodi uteg "Q" prema slici 4.4-02 a) i b).

Pretpostavljamo da je opruga idealna, pa je promjena duljine ΔE proporcionalna sili F , kojom ovu oprugu natežemo. Možemo pisati:

$F = k \cdot \Delta E$ gdje je $\Delta E =$ pad napona uslijed sinhrone reaktancije

$$\Delta E = I_2 X_d$$

odnosno: $F' = F \cdot \cos \varphi_2 = k \cdot \Delta E \cdot \cos \varphi_2$

Budući da je:

$$\Delta E = E_0 \cdot \sin \theta \frac{1}{\cos \varphi_2}$$

to je:

$$F' = k \cdot E_0 \cdot \sin \vartheta$$

Možemo dalje pisati:

$$M_{ps} = F' \cdot U_{2r} = k \cdot E_{\alpha} \cdot U_{2r} \sin \vartheta = \frac{P_n}{\omega} \frac{1}{X_{dr}} E_{\alpha} \cdot U_{2r} \sin \vartheta$$

Proizlazi da je:

$$k = \frac{P_n}{\omega} \frac{1}{X_{dr}}$$

Konstanta "k" predstavlja konstantu opruge. Što je ova konstanta veća, to će se kod iste sile F opruga manje rastegnuti. Iz gornje jednadžbe vidimo da je konstanta opruge "k" obrnuto proporcionalna sinhronoj reaktanciji. P_n i ω su za određeni stroj konstante.

Što je veća relativna sinhrona reaktancija to je konstanta opruge manja, tj. opruga je u našoj mehaničkoj slici mekša, pa će kut ϑ biti veći kod istog tereta. Ako povećamo uzbudnu struju, povećat će se ručica E_0 pa će kod istog momenta pogonskog stroja M_{ps} kut ϑ biti manji, time da kod istog tereta Q ostaje F' konstantan. Iz toga slijedi, da se mora kod konstantnog radnog tereta vrh poluge E_0 pomicati po vertikali a-a.

Za ručicu E_0 povezana je masa rotora označena u slici 4.4-02 a) s "m". Kod svake promjene kuta ϑ pojavljuje se i moment tromosti masa M_{tr} koji iznosi:

$$M_{tr} = \frac{I_{tr}}{p} \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} \quad (I_{tr} = \text{moment tromosti} = \frac{mD^2}{4})$$

U mehaničkoj slici možemo magnetsku tromost prikazati na taj način da vektor E'_{d0} predvidimo posebnom ručicom a između ručice E_0 i E'_{d0} stavimo prigušivač s vremenskom konstantom T'_d kako je to prikazano u sl. 4.4-02 b). Time smo dobili potpunu ekvivalentnu mehaničku sliku rada sinhronog stroja, koja nam pomaže pri shvaćanju ne samo stacionarne već i prelazne pojave u radu sinhronog stroja.

4.43. Vlastito njihanje

U prethodnom poglavlju smo upoznali četiri momenta:

- M_{gen} = moment sinhronog stroja, koji ovisi o sinusima kuta ϑ , o uzbuđi (E_0) i o naponu mreže $U_{\text{mr}}=U_2$
 M_{ps} = moment pogonskog stroja
 M_{tr} = moment tromosti i
 $M_s = K_s \cdot \Delta\vartheta$ = sinhronizirajući moment.

Ove momente smo obradivali pod pretpostavkom da nema gubitaka u sinhronom stroju.

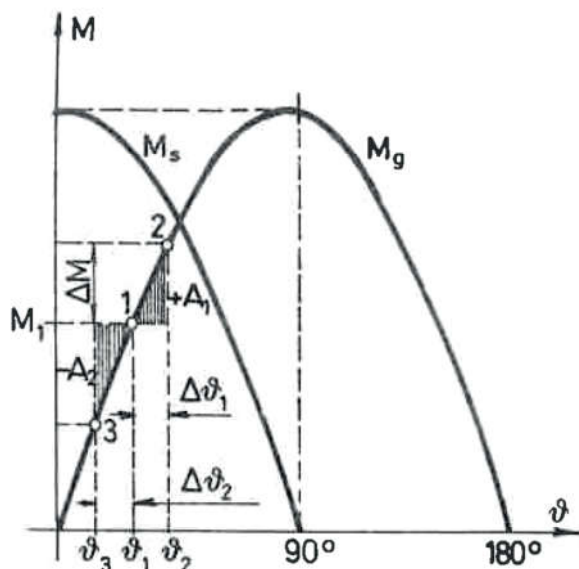
K navedenim momentima dolazi još i asinhroni moment u obzir, jer on nastaje ako se rotor s kratkospojnim prigušnim kavezom relativno pomiče prema okretnom polju. U tom slučaju okretno polje siječe štapove krletke, inducira u njima napone koji potjeraju takove struje koje s okretnim poljem stvaraju moment, koji se protivi tom relativnom gibanju, pa ga, prema tome, prigušuju. Taj moment zovemo asinhroni moment, odnosno kod sinhronih strojeva prigušni moment, jer prigušuje njihanje rotora oko svoje sinhronne brzine vrtnje. Sa asinhronim momentom ćemo se поближе upoznati kod proučavanja rada asinhronih strojeva.

Ima još i drugih prigušnih momenata, kao npr. uslijed trenja, no glavnu ulogu igra ipak asinhroni prigušni moment, a rezultirajući utjecaj svih prigušnih momenata izražavamo faktorom prigušenja " k_p ". Rezultirajući prigušni moment je proporcionalan relativnoj brzini vrtnje rotora prema okretnom polju po jednadžbi:

$$M_{\text{pr}} = k_p \frac{d\vartheta}{dt}$$

Kod njihanja nastaju struje i u armaturi, koje sa strujama u rotoru prouzrokuju sinhronne momente koji su, naravno, isto tako proporcionalni relativnom gibanju $d\vartheta/dt$, no one potpomažu njihanje. U objašnjenje ovih momenata ovdje ne ulazimo.

Razmatrajmo sada ponašanje sinhronog generatora na krutoj mreži koji je stacionarno radio u točki 1 prema slici 4.4-03 s kutem ϑ_1 kod određenog tereta P_1 i određenog momenta



Sl.4.4-03 Uz objašnjenje njihanja sinhronog stroja

M_1 ; rotor generatora pomoću dodatnog momenta povučemo iz položaja 1 u položaj 2, a onda uklonimo djelovanje ovog dodatnog momenta. Sinhronizirajući moment će tjerati rotor natrag u položaj 1 sve većom brzinom, a kad rotor dodje u točku 1, tada će zbog tromosti masa produžiti preko te točke u pravcu točke 3. Od točke 3 će se opet vraćati u pravcu točke 2 itd. Doći će do njihanja rotora oko njegove srednje odnosno sinhronne brzine vrtnje. Kod tog nji-

hanja između točaka 2 i 3 prema slici 4.4-03 predstavljaju šrafirani trokuti u nekom mjerilu kinetičku energiju A , koja se kod ubrzavanja akumulira u rotirajućim masama rotora ($+A_1$), a kod usporenja ($-A_2$) troši. Ako zanemarimo gubitke u sinhronom stroju, onda njihanje ne prestaje i moraju biti površine šrafiranih trokuta jednake prema jednadžbi:

$$A_1 = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \Delta M d\theta = -A_2 = -\int_{\theta_1}^{\theta_3} \Delta M d\theta$$

Tu zakonitost nazivamo zakonitost jednakih površina.

U našoj mehaniziranoj slici 4.4-02 možemo ovo njihanje predstaviti na taj način da povučemo uteg "Q" silom prema dolje, te time povećamo kut θ a nakon toga uklonimo dodatnu silu odnosno pustimo uteg. Ručica E_0 će zajedno s masom "m" njihati oko svog stacionarnog ravnotežnog položaja dok se zbog trenja u tom položaju ne zaustavi.

Da dobijemo jednadžbu njihanja, možemo poći od fizikalnog zakona po kojem mora suma svih momenata u svakom trenutku biti jednaka nuli:

$$M_{tr} + M_{pr} + M_s + M_{ps} + M_{gen} = 0$$

M_{ps} i M_{gen} se odnose na stacionarni položaj u točki 1 s kutem ϑ_1 te su međusobno jednaki, samo imaju protivni predznak

$$M_{ps} + M_{gen} = 0$$

te prema tome iz gore navedene jednačbe ispadaju.

Rotor će, prema tome, njihati oko svoje točke 1 prema sl. 4.4-03, pa ako odstupanja od ravnotežnog kuta ϑ_1 označimo sa $\pm\alpha$, odnosno prostorni kut s $\pm\alpha/p$ dobićemo jednačbu njihanja:

$$\frac{I_{tr}}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + k_p \frac{d\alpha}{dt} + K_s \alpha = 0$$

Sinhronizacioni koeficijent momenta M_s se izražava po jedinici kuta a ovisan je o $\cos\vartheta$. Ako, međjutim, pretpostavljamo relativno malena njihanja, dakle malena odstupanja od ravnotežnog kuta ϑ_1 , možemo računati s konstantnim sinhronizacionim koeficijentom i tako pojednostavniti našu računicu.

Gornja jednačba nas podsjeća na jednačbu električnog titrajnog kruga:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0$$

gdje je vlastita titrajna frekvencija

$$f_{vl} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

Po matematičkoj analogiji će pojedinim vrijednostima iz jednačbe titrajnog kruga odgovarati slijedeće vrijednosti iz jednačbe koju smo napisali za njihanje rotora sinhronog stroja.

$$L = \frac{I_{tr}}{p}$$

$$R = k_p$$

$$\frac{1}{C} = K_s$$

$$i = \alpha$$

Po analogiji dobijemo vlastitu titrajnu frekvenciju sinhronog stroja:

$$f_{vl} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p \cdot K_s}{I_{tr}} - \left(\frac{k_p \cdot p}{2 \cdot I_{tr}}\right)^2}$$

Ako zanemarimo prigušenje dobijemo vlastitu frekvenciju titranja

$$f_{vl} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p \cdot K_s}{I_{tr}}} \quad (\text{Hz})$$

gdje je K_s u Nm/rad a moment tromosti I_{tr} u kgm^2 .

U praznom hodu je sinhronizacioni koeficijent numerički jednak prekretnom momentu:

$$K_s = M_n \frac{E_{or} U_{2r}}{X_{dr}}$$

Vlastita frekvencija njihanja u praznom hodu leži kod svih sinhronih strojeva u granicama 0,65 Hz do 2 Hz, dakle oko 1 Hz.

4.44. Prisilno njihanje kod paralelnog rada na krutu mrežu

U prethodnom poglavlju smo ustanovili da će se rotor sinhronog stroja, koji radi paralelno na krutu mrežu, a kojemu smo dodatnim momentom povećali kut ϑ a zatim uklonili djelovanje dodatnog momenta, prigušenim njihanjem vlastitom titrajnom frekvencijom vratiti na prvobitno stacionarno pogonsko stanje određeno kutem ϑ_1 .

Kako će se ponašati sinhroni stroj koji je izložen stalnim periodičnim poremećajnim impulsima određene prisilne frekvencije pogonskog stroja f_{ps} ? Takav slučaj imamo npr. kod svakog sinhronog generatora koji je tjeran eksplozionim motorom. Svaki cilindar 4-taktnog motora daje na dva okretaja 1 impuls. Ako generator radi na krutu mrežu, kod svakog će se impulsa povećati kut ϑ . Opet ćemo dobiti njihanje rotora oko neke srednje vrijednosti, tj. oko ravnotežnog položaja određenog kutem ϑ_1 . Kut njihanja oko te srednje vrijednosti ϑ_1 označimo s $\pm \alpha$.

Stalno djelovanje impulsa eksplozionog motora s frekvencijom f_{ps} bit će opasno po pogon sinhronog generatora ako ova frekvencija f_{ps} bude jednaka vlastitoj frekvenciji njihanja generatora f_{v1} , jer u tom slučaju imamo rezonanciju, tj. kut α postaje sve veći dok ne predje s kutom ϑ_1 90° tj. dok veličina $(\vartheta_1 + \alpha)$ ne predje kut od 90° pri čemu će generator ispasti iz koraka.

Kako će biti u svim ostalim slučajevima, u kojima smo samo više ili manje u blizini rezonancije? To ćemo riješiti opet po analogiji s električnim titrajnim krugom.

Ako generator radi sam na vlastitu mrežu, onda nema sinhronizirajućeg momenta, te postoji samo moment tromosti mase. Električki to možemo izraziti jednažbom:

$$i_1 = \frac{E}{\omega L}$$

Napon E predstavlja izmjenični moment pogonskog stroja, tj. njegov osnovni harmonički član; kružna frekvencija je određena frekvencijom impulsa f_{ps} odnosno frekvencijom njegovog osnovnog ili bilo kojeg višeg harmoničkog člana; L predstavlja masu rotora, a " i " je pripadajuća amplituda kuta α . Kraj konstantno jednakih impulsa bit će i njihanje s kutom α određeno i konstantno.

Ako, međjutim, generator radi na krutu mrežu, onda imamo još i sinhronizirajući moment, koji je u električnom krugu prikazan veličinom $1/C$, te dobijemo:

$$i_2 = \frac{E}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}$$

Omjer i_2/i_1 , tj. omjer amplituda njihanja kuta α odnosno njihanja rotora u jednom i drugom slučaju zovemo faktor pojačanja njihanja ili modul rezonancije (ξ_α):

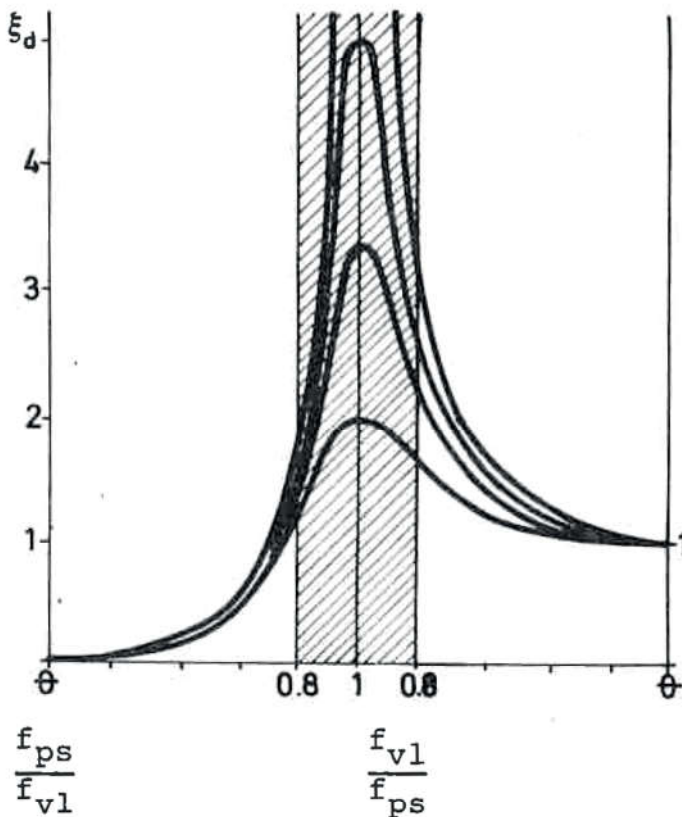
$$\xi_\alpha = \frac{i_2}{i_1} = \frac{\frac{E}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}}{\frac{E}{\omega L}} = \frac{\omega L}{\omega L - \frac{1}{\omega C}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega^2 LC}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{2^2 \cdot \pi^2 \cdot f_{ps}^2 \cdot LC}}$$

Ako u ovu jednadžbu uvrstimo vlastitu frekvenciju njihanja sinhronog generatora bez prigušenja izraženo pomoću ekvivalentne električne sheme

$$f_{v1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}}$$

dobijemo:

$$\xi_{\alpha} = \frac{1}{1 - \left(\frac{f_{v1}}{f_{ps}}\right)^2}$$



Sl.4.4-04 Dijagram $\xi_{\alpha} = f\left(\frac{f_{ps}}{f_{v1}}\right)$

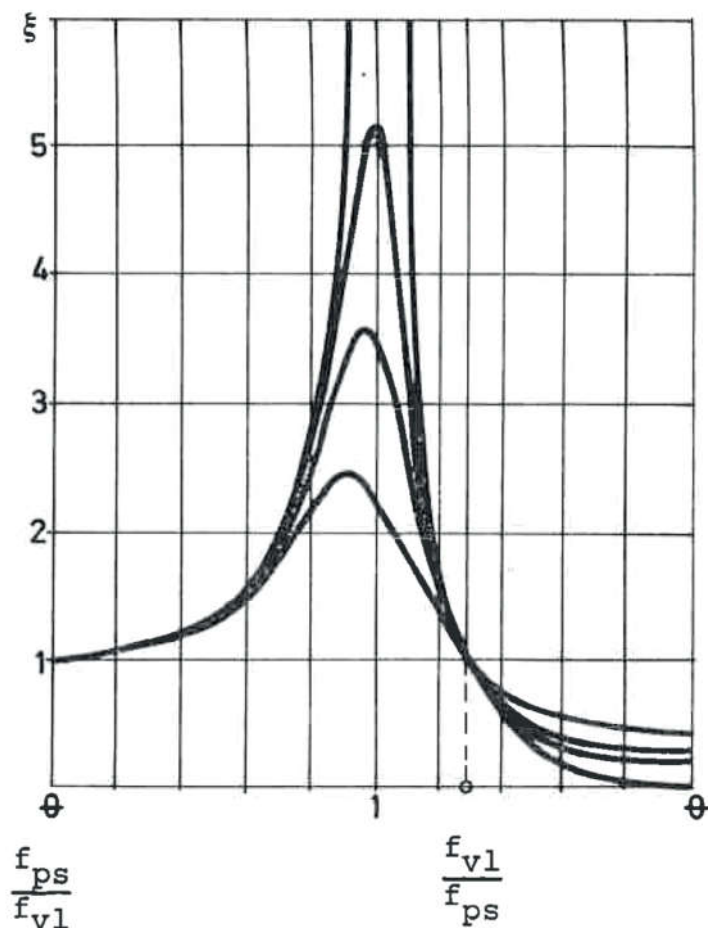
stisu frekvenciju njihanja f_{v1} .

S njihanjem rotora njiše i električna snaga u omjeru prema njihanju okretnog momenta pogonskog stroja s faktorom pojačanja prema jednadžbi:

$$\xi_p = \frac{1}{1 - \left(\frac{f_{ps}}{f_{v1}}\right)^2}$$

U sl. 4.4-04 je prikazana ovisnost faktora pojačanja od omjera $\frac{f_{ps}}{f_{v1}} = 0$ do $f_{ps} = f_{v1}$ tj. do rezonancije i dalje u ovisnosti od omjera $\frac{f_{v1}}{f_{ps}}$ i to za slučaj da nema prigušenja gornjom linijom a za slučaj većeg ili manjeg prigušenja donjim linijama.

Pošto je frekvencija impulsa f_{ps} određena pogonskim strojem, izbjegavamo područje u blizini rezonancije na taj način da mijenjamo moment zamašnih masa i time vlastitu frekvenciju njihanja f_{v1} .



Sl.4.4-05 Dijagram $\xi_p = f\left(\frac{f_{ps}}{f_{vl}}\right)$

pogonskog motora a prigušenje u tom području djeluje u smislu povećanja njihanja električne snage što je, dakako, štetno.

Da njihanja ne bi previše smetala, pazimo da budemo što više udaljeni od rezonancije, ali u najmanju ruku izbjegavamo kod sinhronih strojeva bez prigušenja područje

$$0,8 \leq \frac{f_{vl}}{f_{ps}} \leq 1,25$$

koje je u sl. 4.4-04 šrafirano označeno.

U dokazivanje ove relacije ne ćemo se upuštati.

Na osnovu upravo napisane jednadžbe nacrtan je dijagram na sl. 4.4-05.

Do omjera:

$$\frac{f_{vl}}{f_{ps}} \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$$

prigušenje smanjuje njihanje električne snage, dok su u području:

$$\frac{f_{vl}}{f_{ps}} < \frac{1}{\sqrt{2}}$$

njihanja električne snage manja od njihanja okretnog momenta

4.45. Prisilno njihanje kod rada na vlastitu mrežu

Kad generator radi sam na svoju vlastitu mrežu, onda nema opasnosti od rezonancije niti ispada iz koraka, a njihanje rotora je ovisno samo o promjeni momenta pogonskog stroja i o zamašnim masama. Tada više ne govorimo o promjeni kutu $\vartheta + \alpha$,

već samo o promjeni brzine vrtnje, odnosno o faktoru neravnomjernosti δ koji je određen jednačinom:

$$\delta = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\text{sred}}}$$

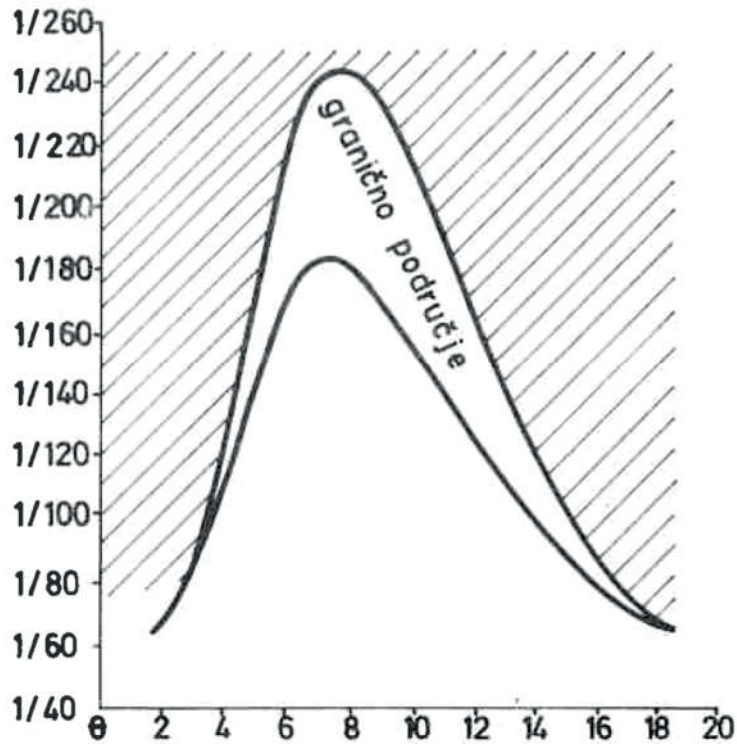
Inducirani napon je proporcionalan brzini vrtnje pa prema tome nije isto tako kao frekvencija odnosno i jače, ako sa brzinom vrtnje nije i uzbudna struja uzbuđnika, koji je na istoj osovini. S naponom, naravno, nije i jačina svjetla sijalice.

Čovječje oko do određene neravnomjernosti bolno osjeća to titranje svjetla; najneugodnije područje u kojem se najjače osjeća titranje svjetla se nalazi kod frekvencije od cca 7 Hz, dok je kod veće ili manje osjetljivo, kako je to na osnovu pokusa ustanovljeno i prikazano u dijagramu na slici 4.4-06. Taj dijagram poznat je pod imenom "Simonova krivulja titranja".

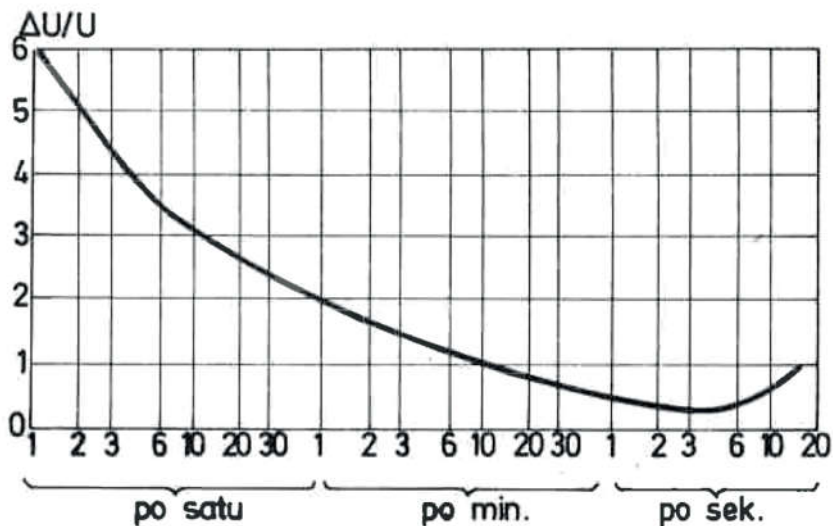
U šrafiranom području se titranje ne osjeća. Praktički se iznad faktora neravnomjernosti $\delta=1/80$ ne ide a u pravilu se ne ide ni ispod $\delta=1/200$.

Danas imamo već propise odnosno preporuke u vezi s kvalitetom električne energije, kojima su određene maksimalne promjene napona ΔU u ovisnosti od frekvencije, kako to vidimo u sl. 4.4-07 i 4.4-08.

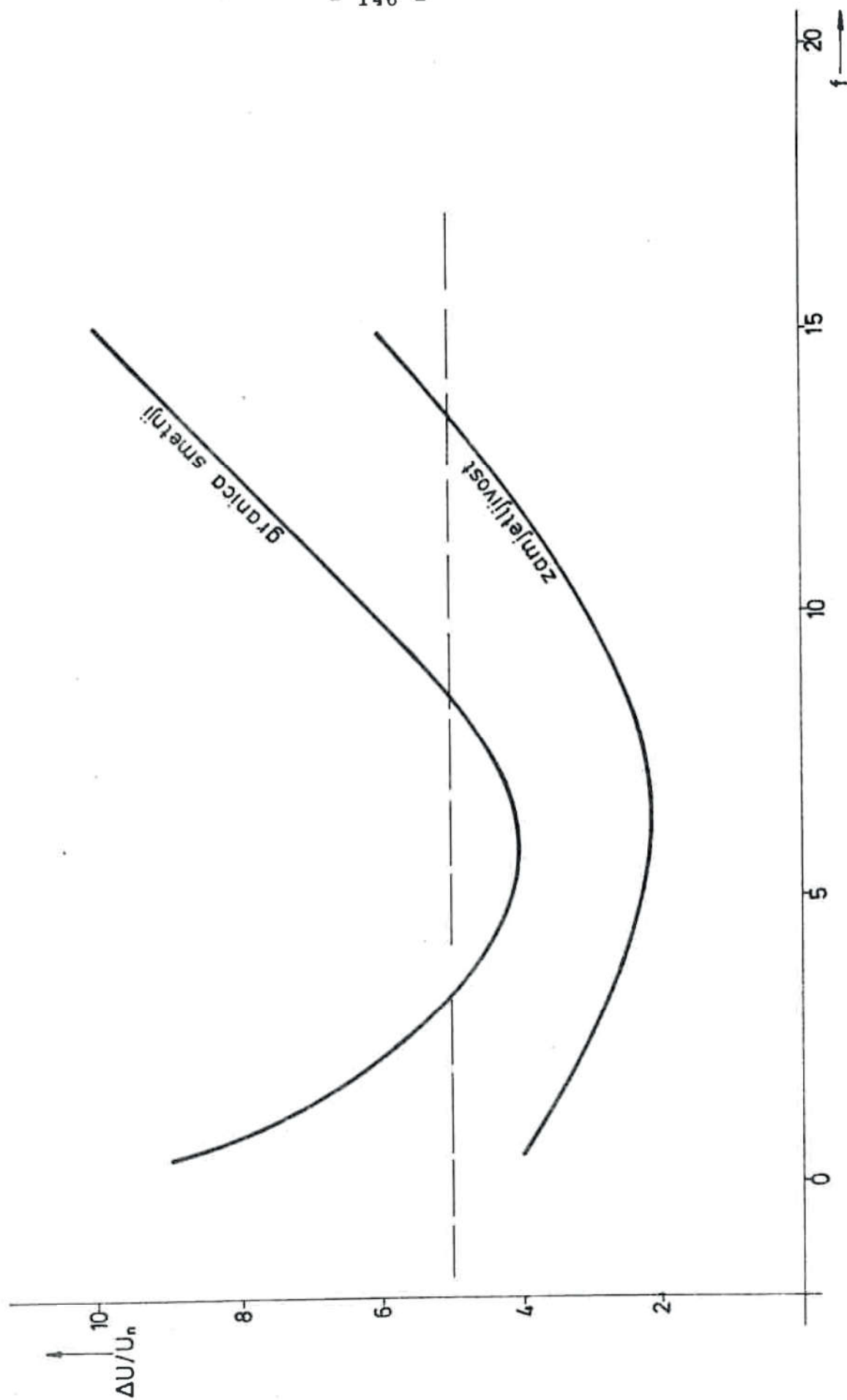
Ovim razmatranjem je određen zamašni moment agregata. Generatori pogonjeni eksplozionim motorom su, prema tome, uvijek opremljeni dodatnim zamašnjakom, ukoliko se potrebne zamašne mase ne mogu ugraditi u sam rotor generatora.



Sl. 4.4-06 Dijagram područja frekvencije u kojem je oko osjetljivo odnosno neosjetljivo na titranje svjetla prema "Simonovoj krivulji titranja"



Sl. 4.4-07 IEC-preporuke po pitanju zametljivosti promjene napona u ovisnosti od frekvencije u logaritamskoj skali



Sl. 4.4-08 Zametljivost i granica smetnji po VDE W 7/57

4.5. Nesimetrični teret

U većim mrežama je teret jednofaznih potrošača relativno malen. Osim toga se njihov teret već po zakonima vjerojatnosti prilično podjednako razdijeli na sve tri faze. Zato su generatori, koji rade na tu mrežu, praktički simetrički opterećeni. Međutim, ima slučaja, kada ipak dolazi do relativno veće nesimetrije radi neke havarije kao npr. prekid jedne faze voda u mreži ili prekid jedne faze električne lučne peći itd. Pitamo se, kako sinhroni generator takvu nesimetriju tereta podnosi.

Svaku stacionarnu nesimetriju, dakle neprelaznu pojavu, možemo rješavati pomoću metode simetričnih komponenta. Pošto je nul-točka generatora priključena na mrežu samo kod malih niskonaponskih generatora, računamo samo sa direktnom i inverznom komponentom. Za direktnu komponentu je generator gradjen. Inverzna komponenta smeta, jer njezino polje rotira u protivnom pravcu i reže rotor sa dvostrukom frekvencom, dok polje direktne komponente ide sinhrono sa rotorom. Prema tome inverzna komponenta inducira u namotima rotora kao i u svim masivnim dijelovima rotora napone, koji potjeraju struje i proizvode dodatne gubitke joulove topline. U masivnim dijelovima rotora dolazi do vrtložnih struja.

Propisi traže da mora turbogenerator trajno podnositi najmanje inverznu komponentu od 10% relativne vrijednosti tj. u odnosu na vrijednost nazivne struje, a hidrogenerator 12,5%. Kod toga se pretpostavlja da generator ni u jednoj fazi ne bude preopterećen preko svoje nazivne struje. Kod kratkotrajnih preopterećenja se traži da je:

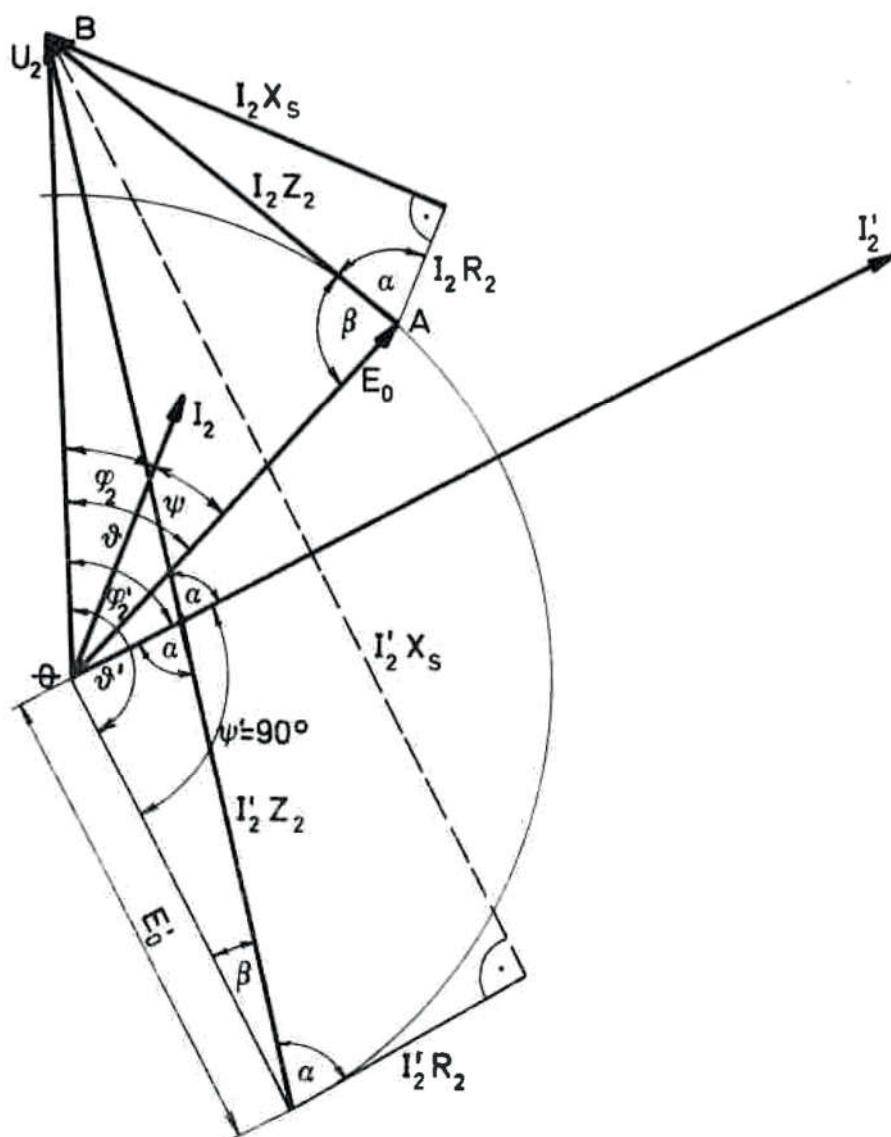
$$i_i^2 \cdot t < 30$$

i_i = relativna vrijednost inverzne komponente struje $\frac{i_i}{I_{2n}}$

t = sekunde.

4.6. Kružni dijagram

Uzmimo da sinhroni stroj radi na krutu mrežu s konstantnom uzbuđom, tj. s konstantnom vrijednosti unutarnjeg napona E_0 . Pretpostavimo sinhroni stroj s neizraženim polovima u motorskom radu, pri čemu je kut ϑ negativan, kako je to prikazano u vektorskom dijagramu u sl. 4.6-01. Budući da smo pretpostavili da se uzbuđa ne mijenja, može se u pogonu promatranog sinhronog motora mijenjati jedino teret, a time i kut ϑ , pa kod toga vrh vektora E_0 opisuje kružnicu.



Sl. 4.6-01 Vektorski dijagram napona i struje sinhronog stroja pri $E_0 = \text{konst.}$ $U_2 = \text{konst.}$

Pitamo se, kako će se kod toga mijenjati vektor struje?

U vektorskom dijagramu smo uvažili i omski otpor R_2 , pa je kut

$$\alpha = \arctg \frac{X_2}{R_2}$$

dok je struja:

$$I_2 = \frac{U_2 \angle E_0}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{U_2 \angle E_0}{Z_2}$$

Za maksimalnu i minimalnu vrijednost struje I_2 dobijemo:

$$I_{2\max} = \frac{U_2 + E_0}{Z_2}$$

$$I_{2\min} = \frac{U_2 - E_0}{Z_2}$$

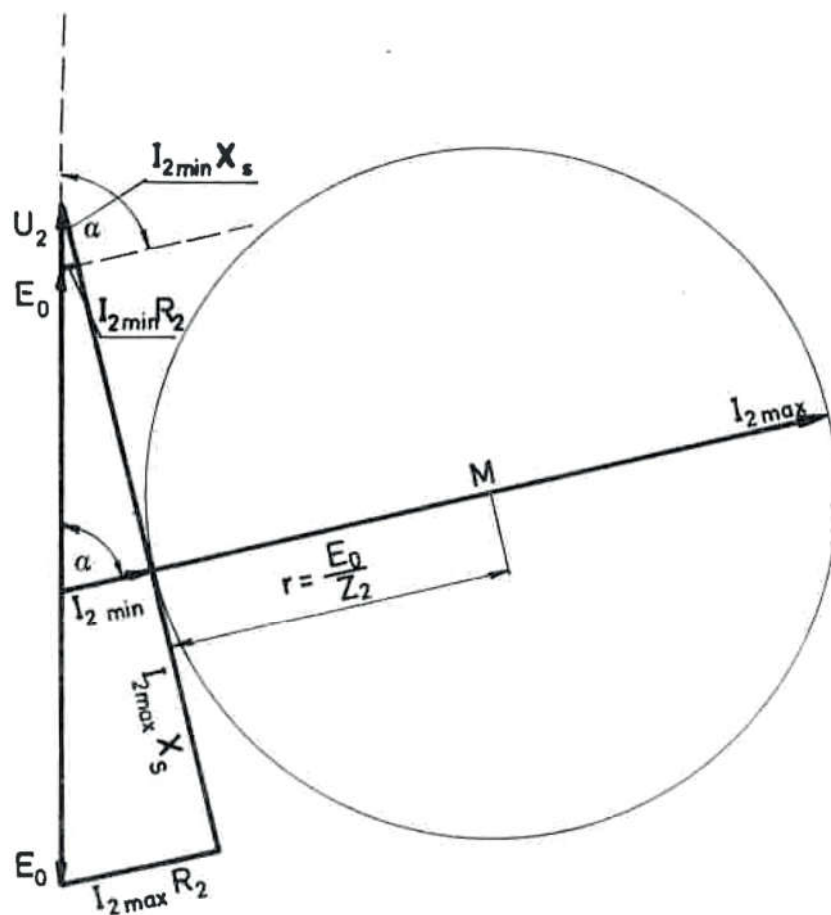
što smo vektorski prikazali u sl. 4.6-02. Iz te vektorske slike, u koju su ucrtani i pripadajući trokuti padova napona, možemo razabrati da se oba vektora struje $I_{2\min}$ i $I_{2\max}$ moraju nalaziti na istom pravcu, koji je prema vektoru U_2 pomaknut za kut α .

Pošto vrh vektora pada napona $I_2 \cdot Z_2$ opisuje kružnicu, kako to vidimo iz sl. 4.6-01, to mora i vrh vektora struje I_2 opisivati kružnicu, budući da je otpor Z_2 konstantan. Središte kružnice mora svakako biti na sredini između vrha vektora $I_{2\min}$ i $I_{2\max}$, te možemo izračunati radius kruga:

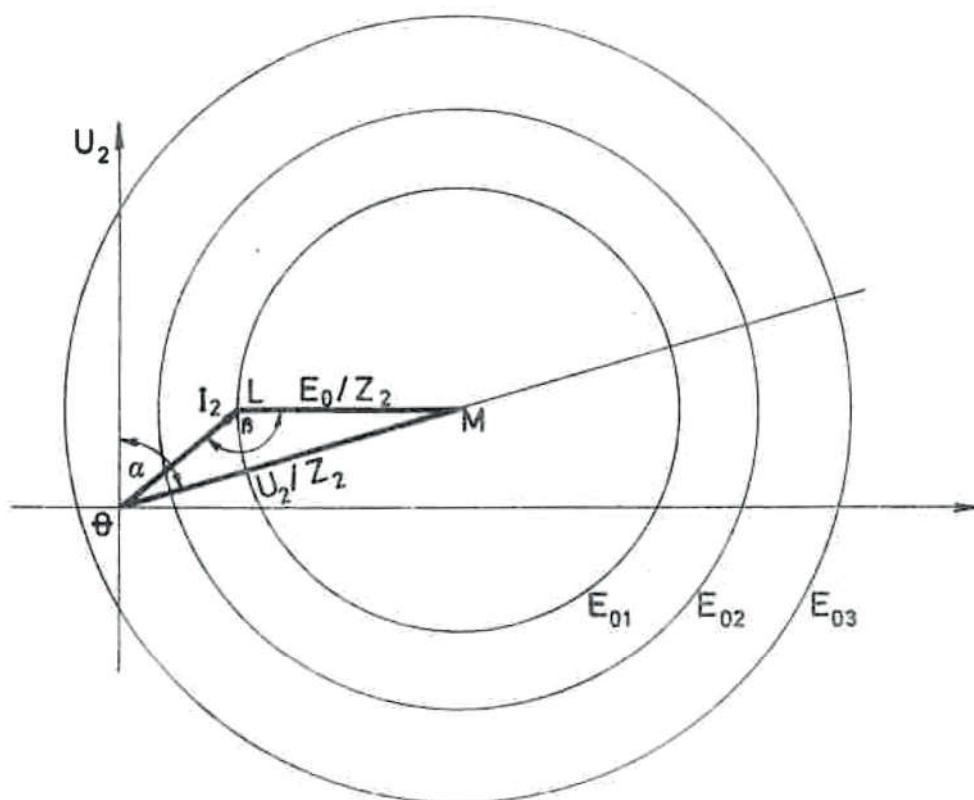
$$r = \frac{I_{2\max} - I_{2\min}}{2} = \frac{U_2 + E_0 - U_2 + E_0}{2 \cdot Z_2} = \frac{E_0}{Z_2}$$

U sl. 4.6-03 ucrtan je ponovno kružni dijagram struje, i to za razne uzbude odn. razne unutarnje napone E_0 . Odstojanje sredine svih kružnica od sredine koordinatnog sistema je dano sa:

$$\overline{OM} = I_{2\min} + r = \frac{U_2 - E_0}{Z_2} + \frac{E_0}{Z_2} = \frac{U_2}{Z_2}$$



Sl. 4.6-02 Nastanak kružnog dijagrama sinhronog stroja



Sl. 4.6-03 Kružni dijagram sinhronog stroja

Vektori I_2 , $\frac{U_2}{Z_2}$, $\frac{E_0}{Z_2}$ određuju trokut ΔLOM , a ovaj mora biti sličan trokutu ΔABO iz sl. 4.6-01, jer su sve stranice tog trokuta za Z_2 puta veće, tj. trokut ΔABO ima stranice $I_2 \cdot Z_2$, U_2 , E_0 .

Potražimo na kružnom dijagramu točke praznog hoda motora, tj. one točke, u kojima je $P_{meh}=0$, odnosno kada je unutarnja snaga stroja jednaka nuli.

Snaga, koju stroj uzima iz mreže iznosi:

$$P_{mr} = m \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

dok je unutarnja mehanička snaga stroja:

$$P_{meh} = m \cdot E_0 \cdot I_2 \cdot \cos \psi$$

Mehanička snaga stroja će, prema tome, biti jednaka nuli, odnosno stroj će raditi kao motor u praznom hodu, kada kut ψ postigne vrijednost $\psi=90^\circ$.

U sl. 4.6-01 je ucrtan vektorski dijagram za slučaj

$$\psi' = 90^\circ$$

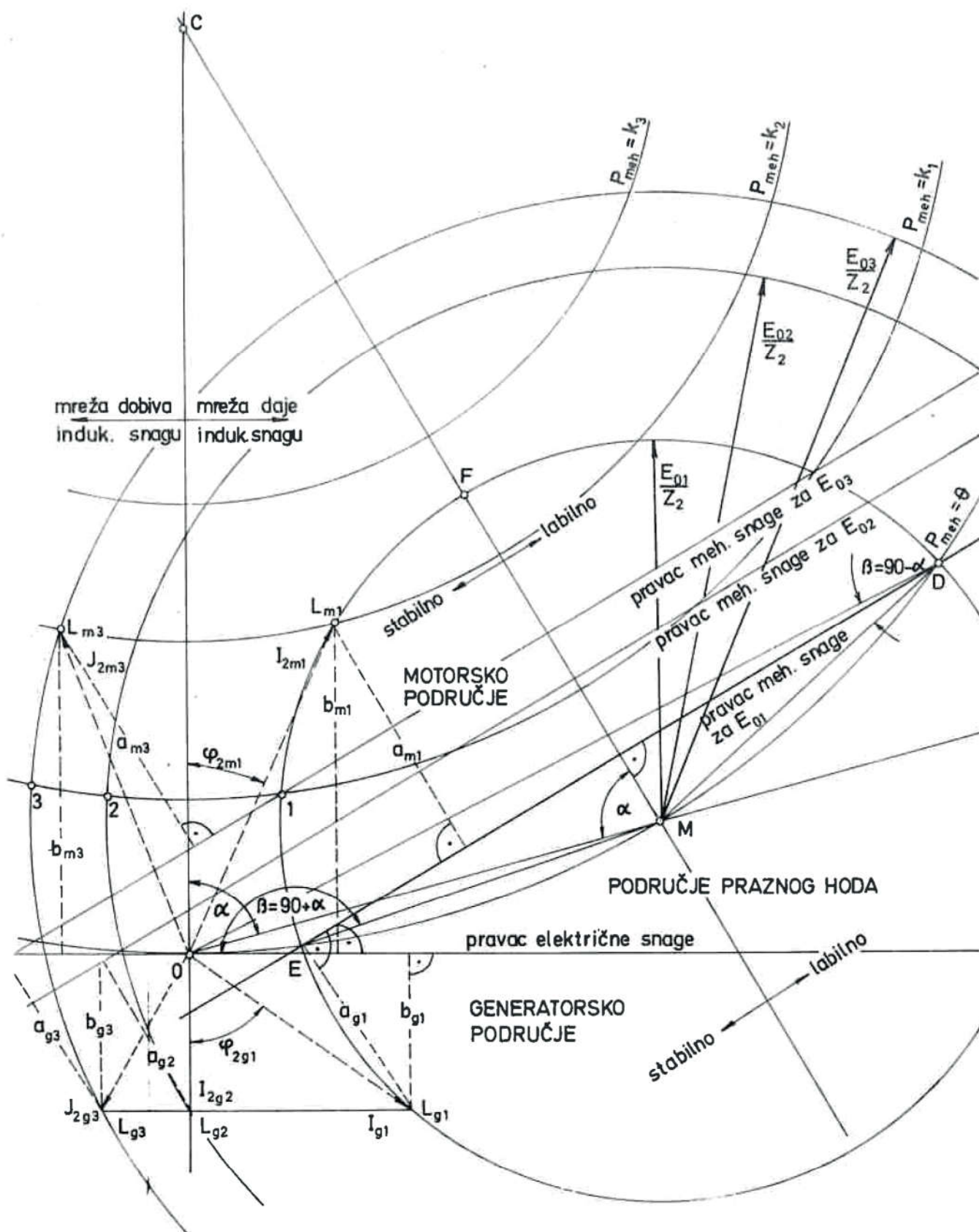
pa možemo iz tog dijagrama zaključiti da u tom slučaju mora biti:

$$\beta = 90 \pm \alpha = \angle (\underline{E_0} - \underline{I_2} \cdot Z_2) = \angle (\frac{E_0}{Z_2} - \underline{I_2}) = \angle OLM$$

(Vidi sl. 4.6-03).

Prema tome je kut između vektora struje OL i spojnice LM kut β , kako je to u sl. 4.6-03 označeno. Taj kut mora kod praznog hoda iznositi $90 \pm \alpha$.

Na sl. 4.6-04 nacrtajmo pravac kroz točku M pod kutem α prema pravcu $\overline{OM}$. Sjecište dobivenog pravca s ordinatom označimo sa C i iz te točke kao središta nacrtajmo kružnicu s radiusom $\overline{CM}$ odnosno $\overline{OC}$. Na taj način ćemo dobiti točke E i D kao sjecišta upravo nacrtane kružnice i kružnog dijagrama. Može se dokazati da je kut β za te dvije točke jednak $90 \pm \alpha$, pa prema tome one predstavljaju pogonske točke praznog hoda. Pravac, koji ide kroz te dvije točke nazivamo pravcem snage, jer je od-



Sl. 4.6-04 Potpuni kružni dijagram sinhronog stroja

stojanje "a" bilo koje druge točke L na kružnom dijagramu proporcionalno mehaničkoj snazi s kojom stroj u točki L radi.

Odstojanje "b" između točke L i apscise (što predstavlja radnu komponentu struje), predstavlja u istom mjerilu snagu, koju motor uzima iz mreže, pa omjer a/b predstavlja korisnost motora, tj.

$$\frac{a}{b} = \eta_{\text{mot}}$$

Za generator je korisna snaga "b", dok "a" predstavlja snagu pogonskog motora, pa je prema tome:

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{b}{a}$$

U ovom razmatranju su uzeti u račun samo gubici u bakru statora, dok gubici u željezu i gubici trenja i ventilacije nisu uzeti u obzir.

Iz sl. 4.6-04 može se vidjeti da je točka F prekritna točka, jer predstavlja točku s maksimalnom mehaničkom snagom. Rad motora ispod te točke je stabilan, jer pri povećanju tereta raste kut θ , a raste i snaga motora, dok preko točke F snaga motora pada, pa motor ne može svladati teret, što dovodi do ispada iz sinhronizma.

Ispod apscise dobijemo negativnu snagu, tj. generatorsko područje rada.

Između apscise i pravca snage je područje praznog hoda, u kojem gubitke praznog hoda djelomično pokriva mreža, djelomično pogonski stroj, opet u omjeru "b" prema "a"

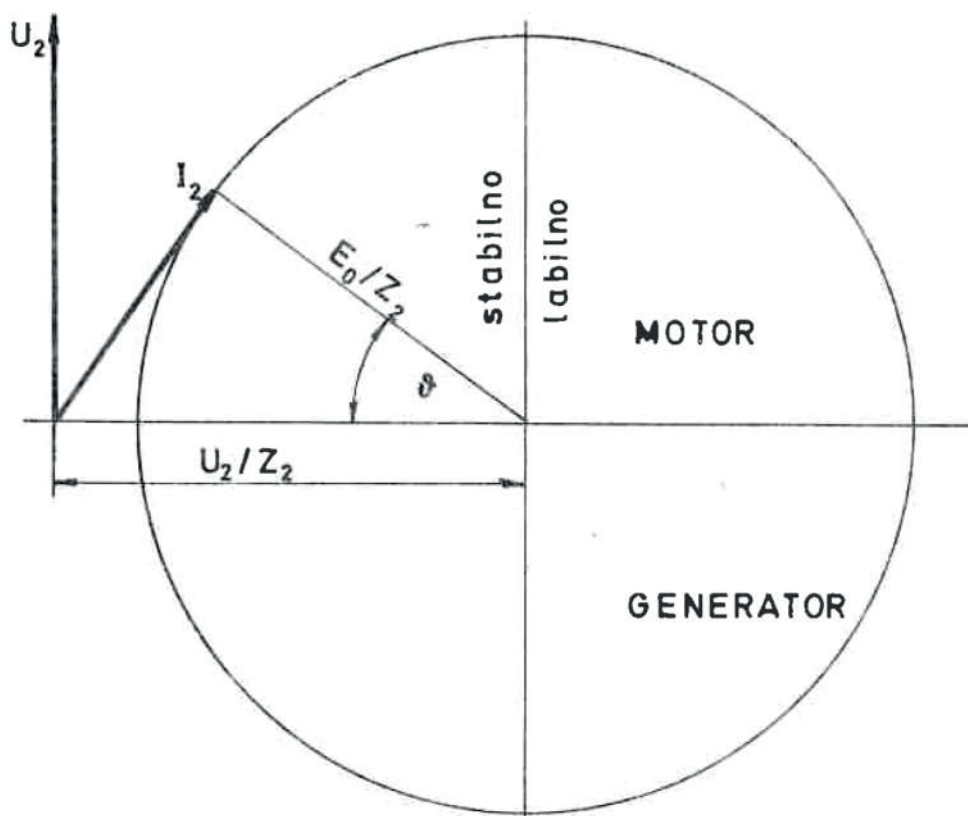
$$\frac{P_{\text{mreže}}}{P_{\text{pog.stroja}}} = \frac{b}{a}$$

U sl. 4.6-04 ucrtana su crtkano dva motorna pogonska slučaja označena točkama L_{m1} i L_{m3} kod uzbude E_{o1} i E_{o3} i tri generatorska pogonska slučaja označena točkama L_{g1} , L_{g2} i L_{g3} , sa pripadajućim pokazateljima mehaničke snage "a" i električke snage "b". Indeksi 1, 2 i 3 odnose se na različite vektore $\underline{E}_{o1}/Z_2$, $\underline{E}_{o2}/Z_2$ i $\underline{E}_{o3}/Z_2$, što znači, na različite primarne uzbuđne struje.

U točkama L_{m1} i L_{g1} sinhroni stroj uzima jalovu snagu iz mreže, u točkama L_{m3} i L_{g3} sinhroni stroj daje jalovu snagu u mrežu. U točki L_{g2} je $\cos\varphi_2=1$ i generator radi bez jalove snage. Prema tome ordinata dijeli dijagram na desno područje, u kojem mreža daje jalovu snagu, i na lijevo područje, u kojem mreža dobiva jalovu snagu. Ta vektorska slika je upravo obrnuta od ranijih vektorskih prikaza u "generatorskom" sistemu, jer je ovdje upotrebljen "motorski" sistem prikazivanja.

Ne smije nas zavaravati veličina kuta α , koji je radi preglednosti namjerno pretjerano malen ucrtan u dijagram. Njegova veličina je u stvari gotovo 90° , jer je omski otpor relativno malen, a pogotovo kod velikih strojeva.

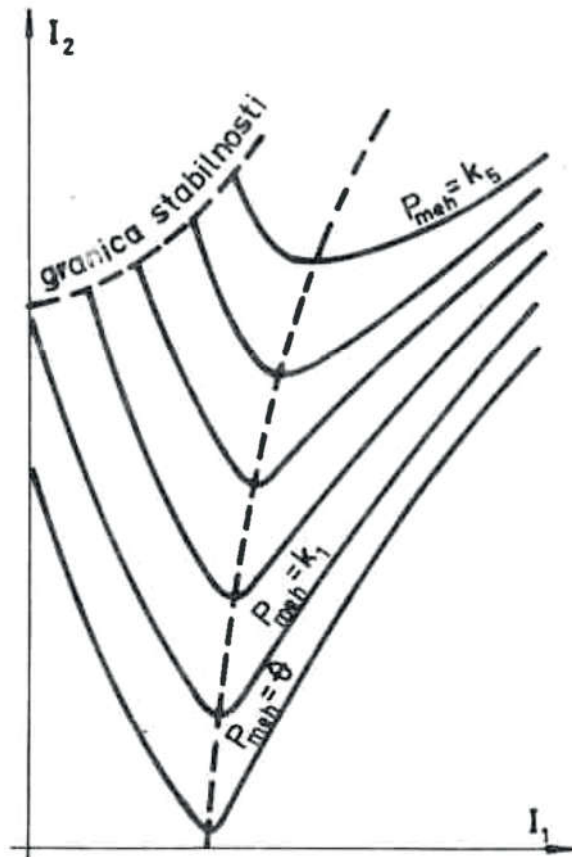
Ako omski otpor zanemarimo, tada je kut $\alpha=90^\circ$ i središte kružnog dijagrama pada u apscisu, kako to vidmo u slici 4.6-05. Ako pišemo samo "jalova" snaga podrazumijeva se induktivna snaga.



Sl. 4.6-05 Pojednostavnjeni kružni dijagram sinhronog stroja ($R_2 \approx 0$)

4.7. V-krivulje

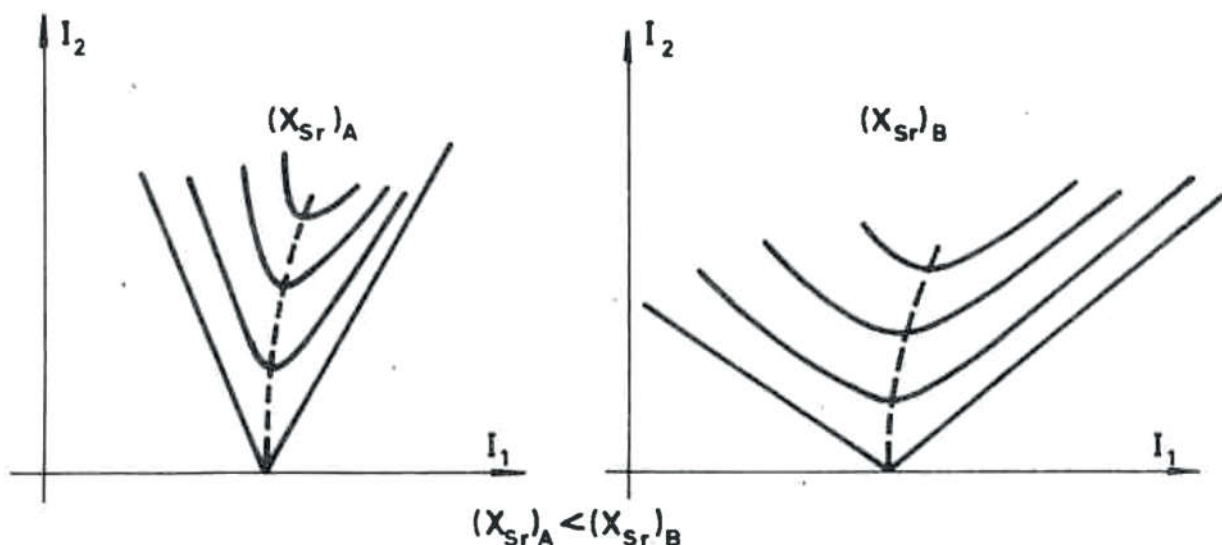
U sl. 4.6-04 ucrtano je više kružnica sa središtem u točki C, pri čemu svakoj kružnici pripada određena mehanička snaga. Ako za razne uzbude, odnosno unutarnje napone E_0 , traži-



Sl. 4.7-01 V-krivulje

mo sjecište kružnog dijagrama s jednom kružnicom određene konstantne mehaničke snage $P_{meh}=k_1$ dobijemo npr. točke 1-2-3 i prema tome za tu određenu snagu ovisnost $I_2=f(E_0)=f(I_1)$. Ako tako dobivene funkcije unesemo u poseban dijagram, dobijemo sliku 4.7-01.

Budući da ovako dobivene krivulje iste snage imaju oblik slova "V", zovemo ih V-krivulje. Iz tih V-krivulja se jasno vidi da za svaki određeni teret postoji određena struja, kod koje je struja tereta I_2 najmanja. Ako povećamo uz-



Sl. 4.7-02 V-krivulje za dva sinhrona stroja s različitim sinhronim reaktancijama

budnu struju, struja I_2 raste i stroj daje u mrežu jalovu (induktivnu) struju, tj. djeluje kao kondenzator; ako, međutim, uzбудu smanjimo, struja I_2 opet raste ali stroj uzima induktivnu struju iz mreže, tj. radi kao prigušnica.

V-krivulje mogu biti vrlo različitih oblika, od jako oštarih do vrlo tupih, kako je to prikazano u sl. 4.7-02.

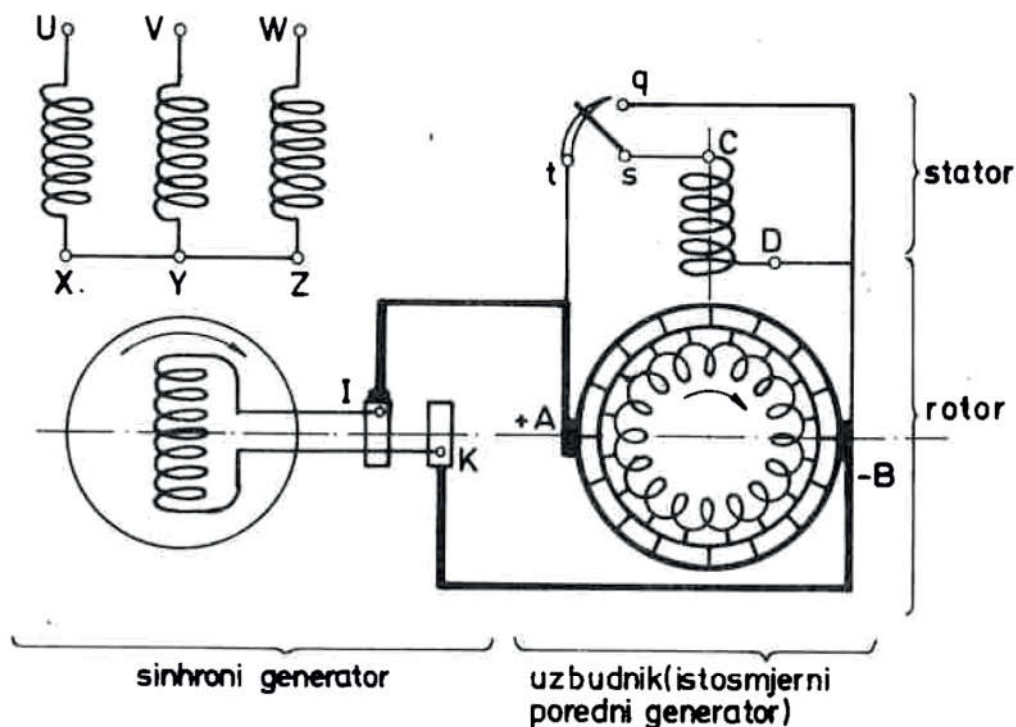
Oštre V-krivulje ukazuju na mali unutarnji otpor stroja, tj. na malu sinhronu reaktanciju X_s . Što je veća sinhrona reaktancija, to su V-krivulje tupljeg oblika.

5. SISTEMI UZBUDE

5.1. Klasična uzbuda

Do sada smo jednostavno pretpostavljali da sinhroni stroj dobiva primarnu uzbuđnu struju iz posebnog izvora istosmjerne struje, no nismo pitali kakav je to izvor i kako se uzbuđna struja podešava.

Klasično rješenje dobivanja istosmjerne struje za uzbuđjivanje predstavlja posebni uzbuđnik na osovini sinhronog stroja; to je istosmjerni poredni generator, koji spajamo u uzbuđni krug prema sl. 5.1-01. Iz ovog uzbuđnika se vodi glavna uzbuđna struja preko kliznih koluta u uzbuđne namote smještene na polovima sinhronog generatora.

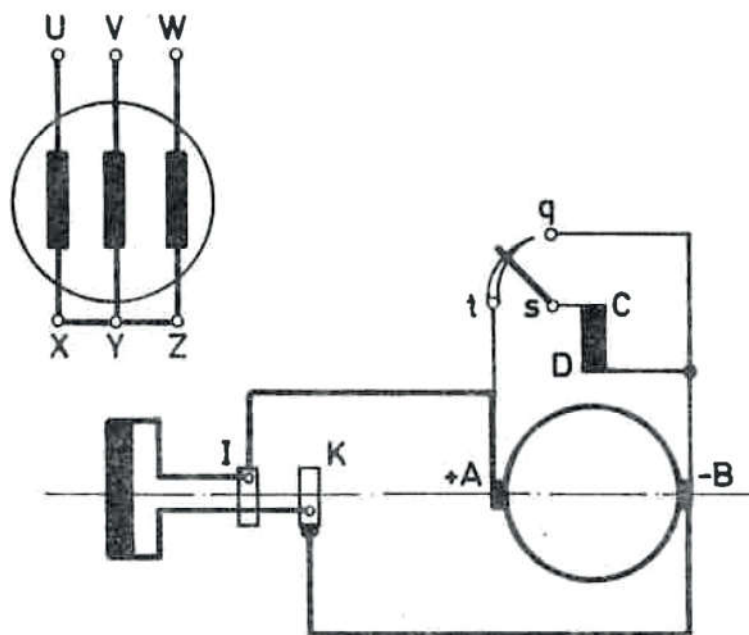


Sl. 5.1-01 Uzbudjivanje sinhronog generatora pomoću uzbuđnika na istoj osovini

Ako sinhroni generator konstruktivno izvedemo tako da mu polove postavimo na stator a statorski namot namotamo na rotor, te izvođe namota izvedemo na klizne kolute, ništa se bitno ne će u njegovoj funkciji izmijeniti, tj. na kliznim kolutima ćemo dobiti isti izmjenični napon kao na izvodima statorskog namota kod uobičajene izvedbe sinhronog generatora. Međutim,

ako na rotor ovakovog generatora postavimo kolektor pa pojedine svitke namota armature, tj. namota rotora, spojimo s odgovarajućim lamelama kolektora, dobit ćemo na nepomičnim četkicama, koje postavimo na kolektor, istosmjerni napon umjesto izmjeničnog. Kolektor posređuje ispravljanje izmjeničnog napona odnosno struje namota rotora u istosmjerni napon odnosno struju na četkicama. Tako smo dobili istosmjerni generator. Prema tome, istosmjerni generator je u biti sinhroni generator, koji ima polove i uzbuđne namote na statoru, a armaturni sekundarni namot na rotoru s tim da k tome dodamo još kolektor i četkice, koji posređuju ispravljanje izmjeničnog napona u istosmjerni.

Pošto je izlazni napon poslije kolektora, tj. napon na četkicama kolektora, istosmjernan, to on istovremeno predstavlja i izvor za uzbuđu vlastitih polova, pa govorimo o istosmjernom generatoru s porednom uzbuđom, kako je on prikazan u slici 5.1-02.



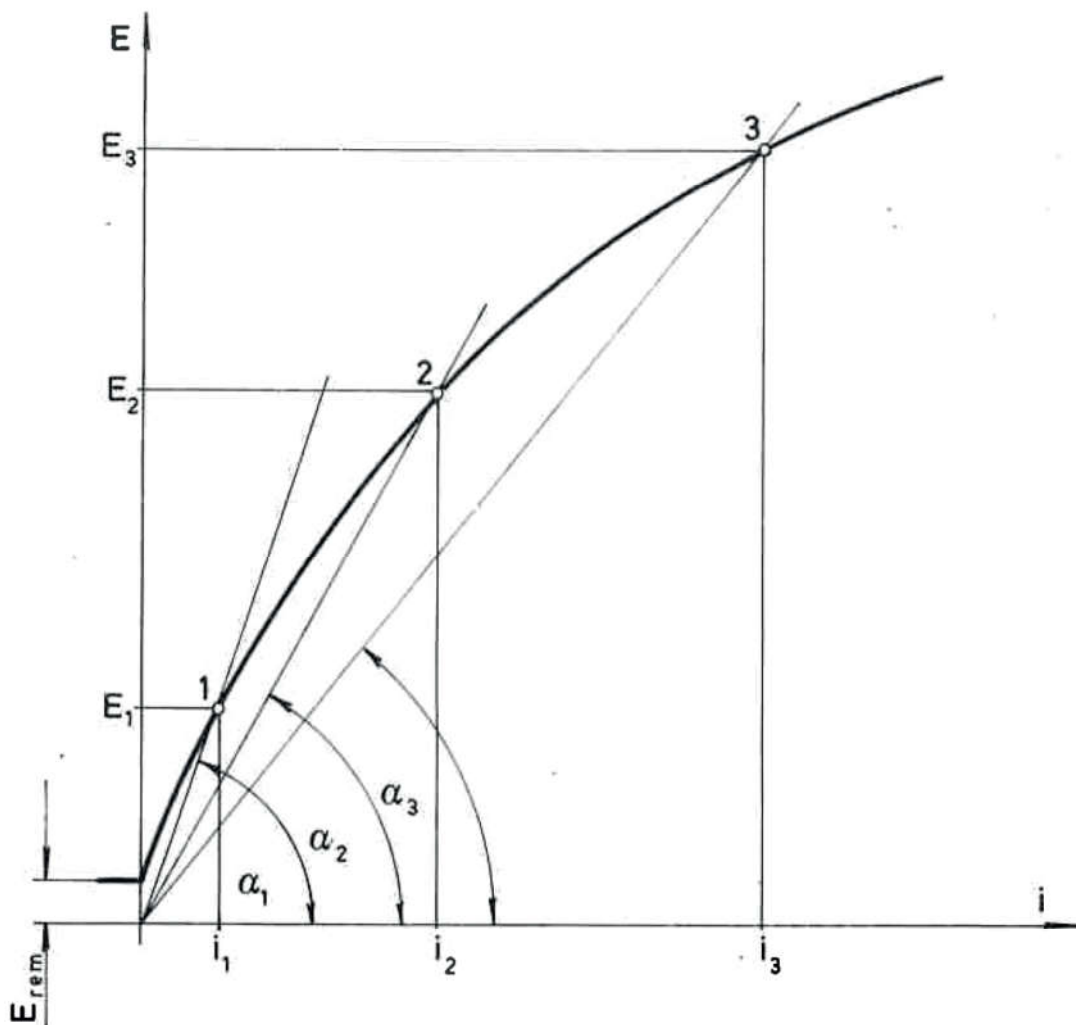
Sl. 5.1-02 Shema u slici 5.1-01 prikazana simbolično

Istosmjerni generator simbolički predstavljamo kružnicom s dvije četkice na obođu i simbolom za namot. Kružnica istovremeno predstavlja armaturni namot i kolektor a simbol za namot predstavlja uzbuđni namot, koji u svojem električnom krugu mora imati još i dodatni otpor za regulaciju struje (vidi sliku 5.1-02). Na kružnicu simbolički ucrtane četkice predstavljaju

sve četkice postavljene na kolektor.

Na kraju otpora regulatora, gdje treba da se prekine struja uzbuđe, moramo dodati kontakt q , preko kojega se uzbuđni namot u momentu prekida uzbuđne struje veže na kratko i time omogućiti velike prenapone i iskrenje, koje bi prouzrokovalo prekidanje velikog induktiviteta uzbuđnog namota.

Ako je generator već bio u pogonu pod naponom, onda je u polovima i statorskome jarmu ostao magnetski tok remanencije. Kad takav poredni generator ponovno stavimo u pogon, uslijed vrtnje rotora će se inducirati napon remanencije u namotu armature; ovako dobiveni napon će potjerati neku malu uzbuđnu struju kroz namot vlastitih polova, ova će povećati polje, time napon u rotoru a time i uzbuđnu struju. Poredni generator



Sl. 5.1-03 Karakteristika praznog hoda istosmjernog porednog generatora

se, prema tome, kod stavljanja u pogon sam uzbuđuje, pa govorimo o samouzbudi porednog generatora.

Istosmjerni poredni generator za uzbuđu ima, kao i sinhroni generator, karakteristiku praznog hoda $E=f(i)$, koja je prikazana u sl. 5.1-03. Međutim, između uzbuđne struje i napona generatora postoji još jedna ovisnost u porednom krugu generatora:

$$i = f(E, R)$$

jer je uzbuđna struja "i" ovisna o naponu E i otporu cijelog porednog kruga

$$i = \frac{E}{R}$$

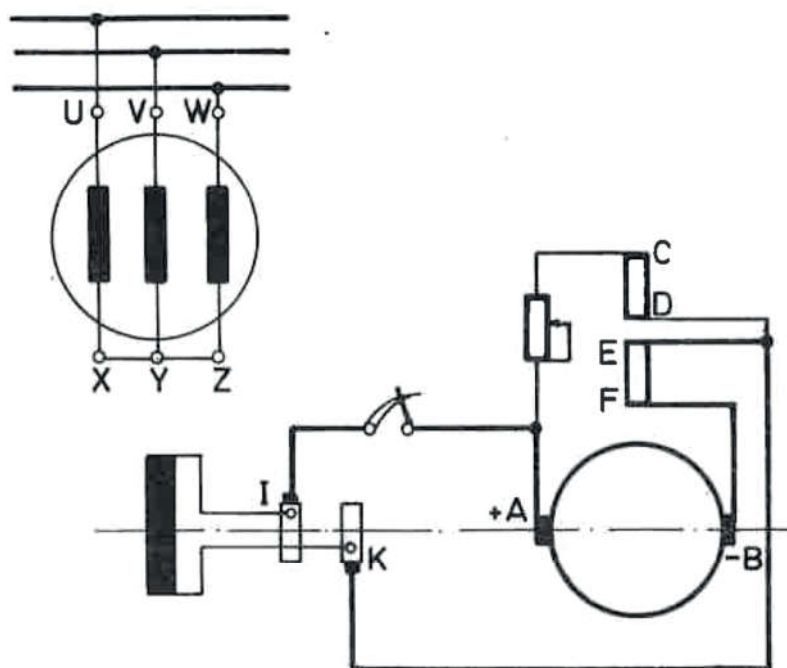
To je linearna funkcija, koja se može u karakteristici praznog hoda za svaki odredjeni otpor prikazati kao pravac, kako je za nekoliko veličina otpora prikazano u sl. 5.1-03. Kut α ovisan je o otporu R:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E}{i} = R \quad \text{tj.} \quad \alpha = f(R)$$

Što je manji otpor u porednom krugu, to manji je kut α .

Napon porednog kruga i napon glavnog kruga moraju u v i j e k biti jednaki. Prema tome se generator s tom porednom uzbuđom sam uzbuđu do napona koji je odredjen sjecištem karakteristike praznog hoda i pravca uzbuđe, tj. karakteristike porednog spoja. Prema tome možemo regulirati napon s regulacionim otporom u porednom krugu.

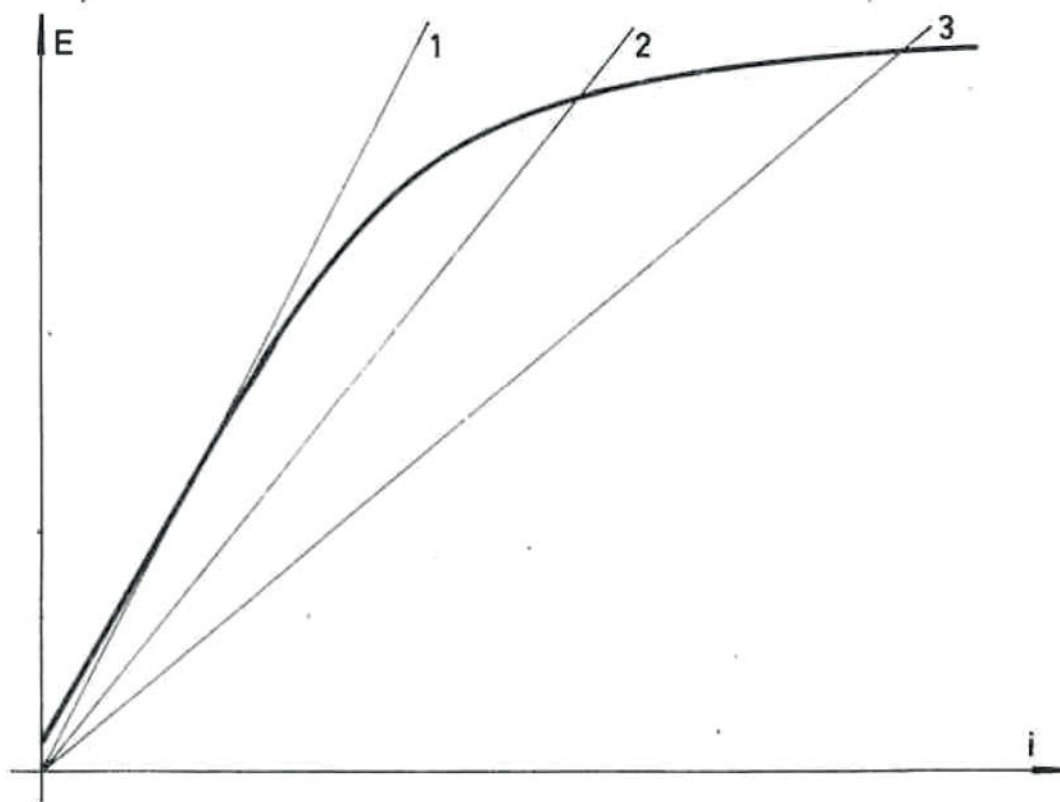
Kod uzbuđnika je potreban veliki opseg regulacije napona, jer je potreban veliki opseg regulacije glavne uzbuđne struje za sinhroni stroj. Doduše, moguće je držati konstantan napon uzbuđnika s tim, da se polove uzbuđnika sa nekoliko serijskih zavoja kompaundira, a regulaciju napona sinhronog generatora provodi u glavnom krugu prema sl. 5.1-04; međutim, to je neekonomično, jer su gubici reguliranja u porednom krugu znatno manji. Ako želimo imati velik opseg regulacije napona kod regulacije u porednom krugu, onda moramo nastojati da sjecišta pravca uzbuđe i karakteristike praznog hoda budu izrazita, tj. potpuno odredjena, da bi napon bio stabilan, kako je



Sl. 5.1-04 Regulacija uzbudne struje u glavnom krugu uzbuđe

to slučaj za sve tri točke 1, 2 i 3 u sl. 5.1-03, jer je krivulja praznog hoda već od početka zakrivljena. Kod jedne normalne karakteristike praznog hoda kako se to radi kod svih normalnih generatora, dobili bi u njezinom radnom dijelu ispod koljena neodređena sjecišta i prema tome

nestabilan napon, kako se to vidi u slici 5.1-05 za pravac 1.



Sl. 5.1-05 Nepovoljna karakteristika praznog hoda za uzbuđnik

Zakrivljenost krivulje praznog hoda se već od početka postizava odgovarajućim dimenzioniranjem magnetskog kruga.

Svaki regulator napona mora biti tako dimenzioniran da se regulacija napona sinhronog generatora u grubim stepenima može provoditi do 80% nazivnog napona, a da se fina regulacija može provesti do najmanje 125% nazivnog napona kod puno opterećenog sinhronog generatora.

S pogonskog stanovišta gledano, klasična izvedba s uzбудnikom na istoj osovinu je najpovoljnija, jer se stavljanjem u pogon pogonskog stroja uzбудnik, a time i sinhroni generator, sami uzbuđuju,

Snagu svakog električnog stroja možemo izraziti s relacijom:

$$P = C D^2 \cdot \omega \cdot n$$

C = Essonova konstanta, o kojoj je riječ u pogl. 6.

Iz navedene relacije proizlazi da je volumen stroja obrnuto proporcionalan brzini vrtnje kod iste snage. Zbog ove činjenice kod vrlo sporohodnih generatora postavljanje uzбудnika na zajedničku osovinu s generatorom ima tu slabu stranu, da je uzбудnik uslijed male brzine vrtnje vrlo glomazan i skup. Radi glomaznosti su i vremenske konstante veće, pa je uzбудnik trom. K tome dolazi još problem visine sinhronog generatora, jer se radi obično o pogonu s vodenom turbinom sa vertikalnom osovinom. Mnogo jeftinije je uzeti brzohodni uzбудnik s asinhronim motorom kao pogonskim strojem, kojeg možemo priključiti na istu trofaznu električnu mrežu na koju radi sinhroni generator. Problem je, međutim, u stavljanju u pogon tog uzbudnog agregata. Ako postoji sigurna tuđa mreža, nema problema, no to je rijetko slučaj; osim toga, teško je ustvrditi da je tuđa mreža sigurna. Bez sumnje je najsigurnije klasično rješenje: uzбудnik na osovinu sinhronog generatora. Međutim, postoje rješenja u spoju, kod kojih se pomoću akumulatora (Bauerov spoj) omogućava uzbuđjivanje kod stavljanja u pogon bez tuđe mreže. I u tom slučaju postoji opasnost, da kod kratkog spoja u mreži u blizini generatora napon mreže toliko padne,

da brzina asinhronog motora padne ispod prekretne vrijednosti i uzбудnik gubi pogonsku snagu baš onda, kad sinhroni generator treba najveću uzbuđu. I tom problemu se doskače na taj način, da se asinhroni motor napaja s dvije strane, kako je to samo principijelno prikazano u sl. 5.1-06 c) i e), i to naponski preko naponskog transformatora (N.T.) iz mreže i strujno preko strujnog transformatora (S.T.) iz nultočke generatora. U slučaju kratkog spoja nemamo napona no imamo veliku struju, koja preko strujnog transformatora "ST" napaja asinhroni motor.

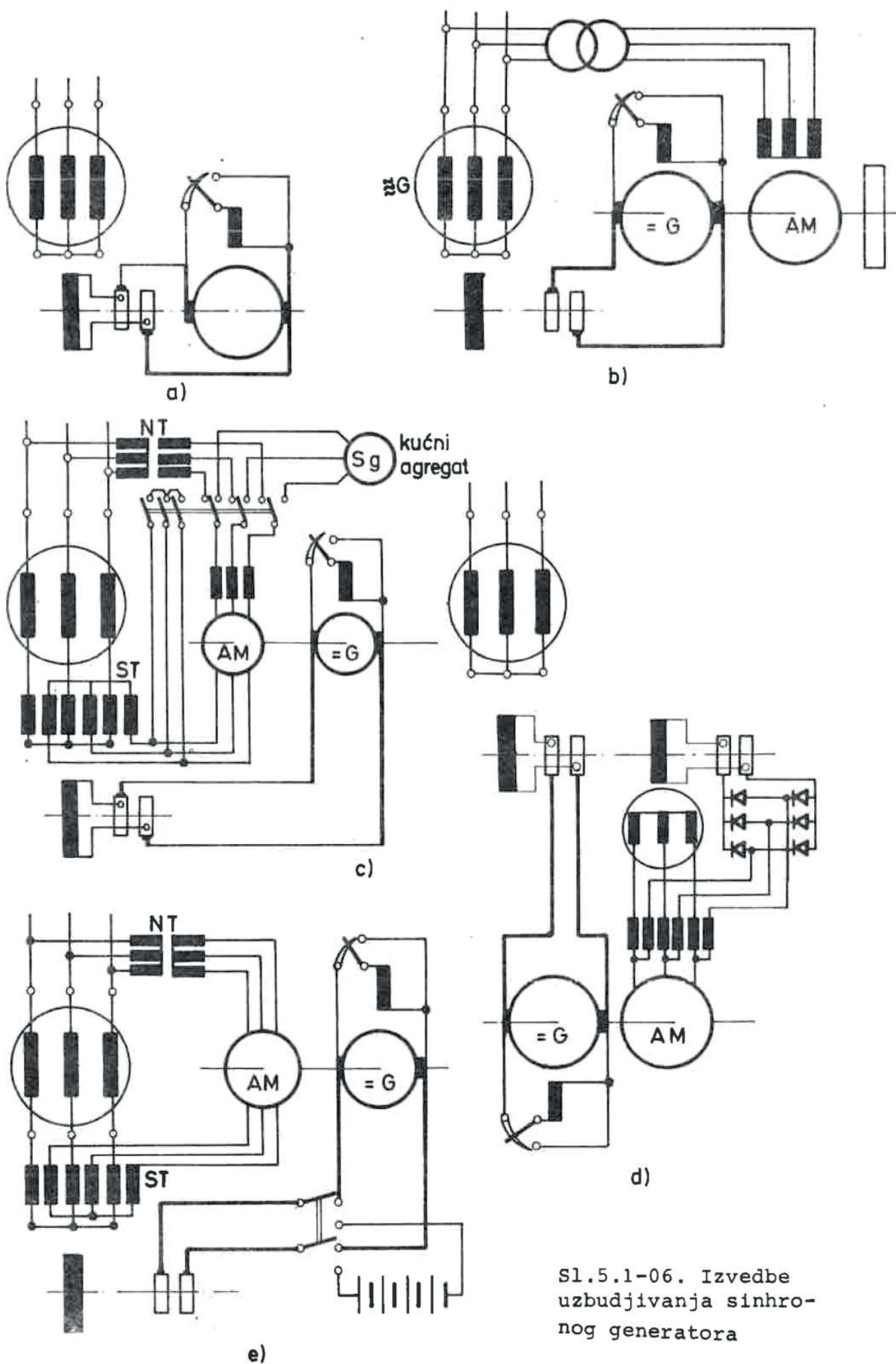
Za "Bauerov" spoj je uređaj kompliciran, a akumulator predstavlja nesiguran element, kojeg treba, osim toga, stalno uzdržavati. Zato se danas praktički to rješenje pomoću akumulatora više ne koristi.

Umjesto akumulatora prema "Bauerovom" spoju uzimamo radije pomoćni kućni agregat, kojeg tjeramo ili posebnom malom vodenom turbinom ili dizel motorom. Nakon zaleta prebacimo asinhroni motor opet na sinhroni generator sa naponskim (NT) i strujnim transformatorom, kako to vidimo u sl. 5.1-06 c).

Umjesto strujnog transformatora (ST) možemo upotrijebiti zamašnjak na osovini asinhronog motora i uzbudnika koji svojom kinetičkom energijom za ono kratko vrijeme, dok traje kratki spoj, drži osovinu u vrtnji, kako to vidimo u sl. 5.1-06 b).

Kod velikih sporohodnih sinhronih hidrogeneratora s Kaplan-turbinom je konstruktivno vrlo teško smjestiti uzbudnik s kolektorom na osovinu kroz koju se upravlja krilima turbinskog rotora. U takovim slučajevima se danas rado upotrebljava tzv. osovinski generator. To je još jedan mali sinhroni generator na osovinu velikog generatora, koji se sam kao kompaundni generator (vidi pogl. 5.3) uzbuđi; pomoću njega napajamo asinhroni motor uzbuđenog agregata, kako to vidimo u sl. 5.1-06 d).

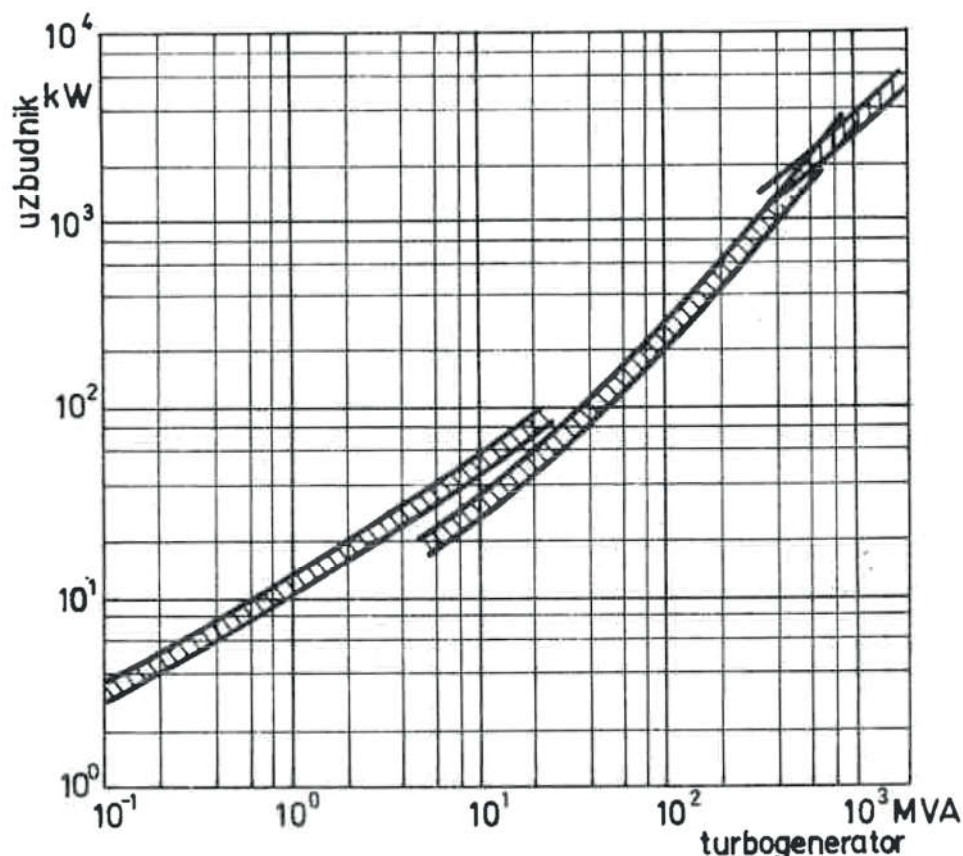
U novije vrijeme suhi ispravljači, osobito oni s upravljanjem (tiristori), prijete da potisnu klasično rješenje.



Sl.5.1-06. Izvedbe
uzbudjivanja sinhro-
nog generatora

5.11. Suvremena uzbuda

Od kolektora bježimo, gdje god možemo. Kolektor je nesiguran element, koji osim toga traži trajno posluživanje. Kod velikih snaga turbogeneratora od preko 200 MVA uopće ne možemo upotrebljavati uzbuđnik na istoj osovini u izvedbi istosmjernog generatora, jer potrebna snaga uzbude (vidi sliku 5.1-07) od preko 500 kW kod 3000 o/min prelazi njegovu



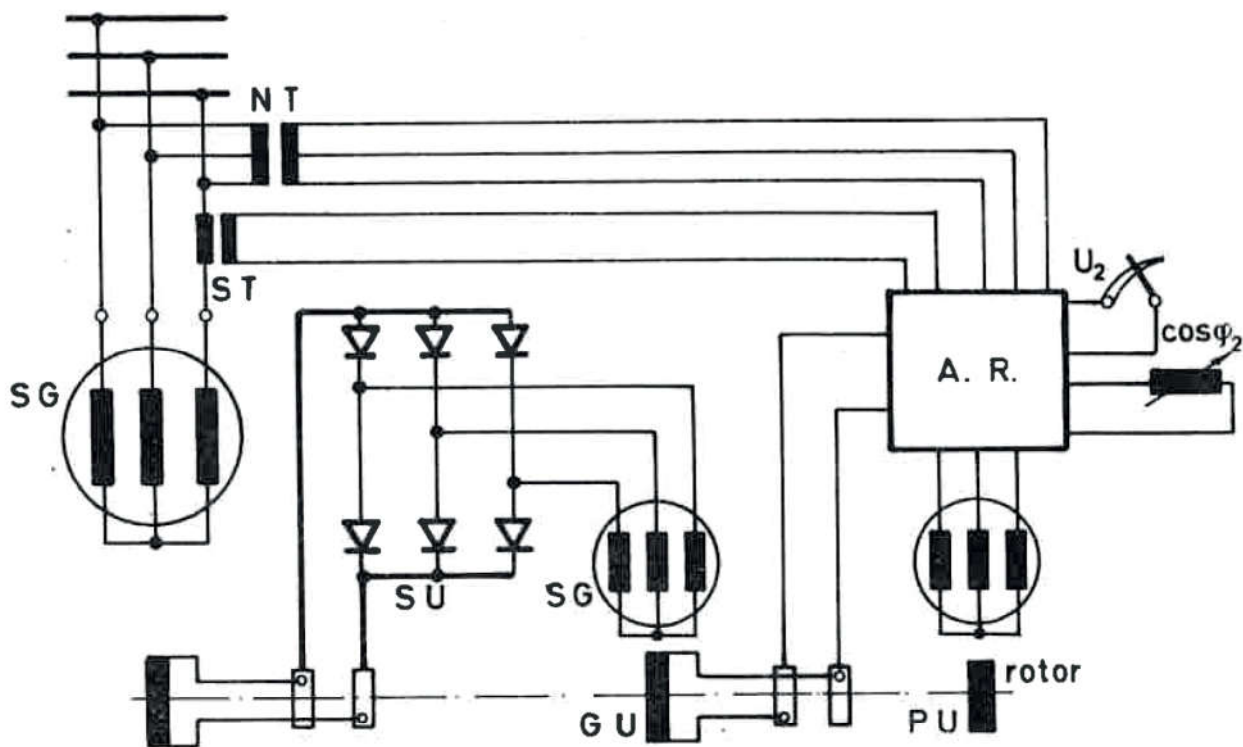
Sl. 5.1-07 Nazivne snage uzbuđnika u ovisnosti o snazi turbogeneratorsa

graničnu snagu, pa je potrebno smanjenje brzine vrtnje preko mehaničkog zupčastog reduktora, obično na 1800, pa i na manje brzine vrtnje. To, naravno, uveliko poskupljuje troškove uzbude. Osim toga, u kemijskoj industriji i općenito tamo gdje ima agresivnih plinova, postaje primjena kolektora pa i kliznih koluta skoro nemoguća, jer ih atmosfera nagriza.

Novo rješenje bez kolektora predstavljaju poluvodički usmjerivači sa silicijskim diodama. Oni omogućuju izmjenične uzbuđnike u obliku malih sinhronih generatora na osovini

glavnog sinhronog generatora i predstavljaju pogonski i dinamički (u pogledu brzine reguliranja uzbude) ekvivalent klasičnoj uzbuđi s tom razlikom, da je takav sistem uzbude još uvijek skuplji, i ako cijene poluvodičkih usmjerivača još stalno padaju. Zapravo leži jedino u cijeni razlog, da se još danas dosta upotrebljavaju klasični uzbuđni sistemi sa istosmjernim uzbuđnikom. Ipak možemo danas tvrditi, da se već prelazi od kolektora na poluvodičku tehniku i da uskoro više uopće ne ćemo graditi klasične uzbuđnike u obliku istosmjernih generatora.

U sl. 5.1-08 prikazana je shema uzbude sinhronog generatora "SG" sa silicijskim diodama kao usmjerivačem "SU", s

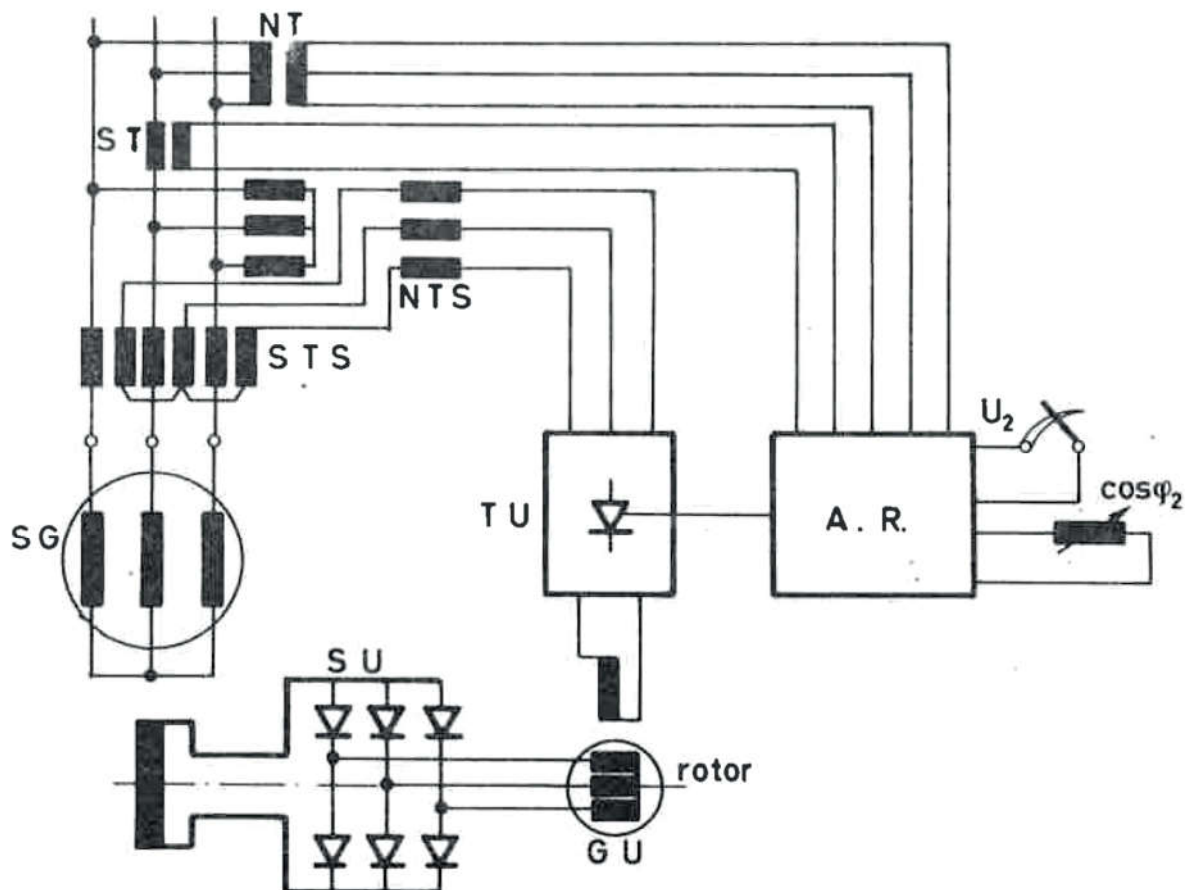


Sl. 5.1-08 Uzbuda sa silicijskim usmjerivačem

glavnim uzbuđnikom "GU" u izvedbi sinhronog generatora i s pomoćnim uzbuđnikom "PU" u izvedbi malog sinhronog generatora sa permanentnim magnetima na rotoru. Kolektor je potpuno otpao, ostali su još klizni prsteni. Automatski regulator napona "AR" naznačen je samo pravokutnikom. Napaja se snagom iz pomoćnog uzbuđnika "PU", prima informacije mjerene vrijednosti iz naponskih i strujnih transformatora "NT" i "ST" te ih

uspoređuje sa zadanim vrijednostima preko dva postavnika zadane vrijednosti "P.Z.V." za napon U_2 i $\cos\varphi_2$ i odgovarajuće napaja uzbudu glavnog uzbuđnika "GU".

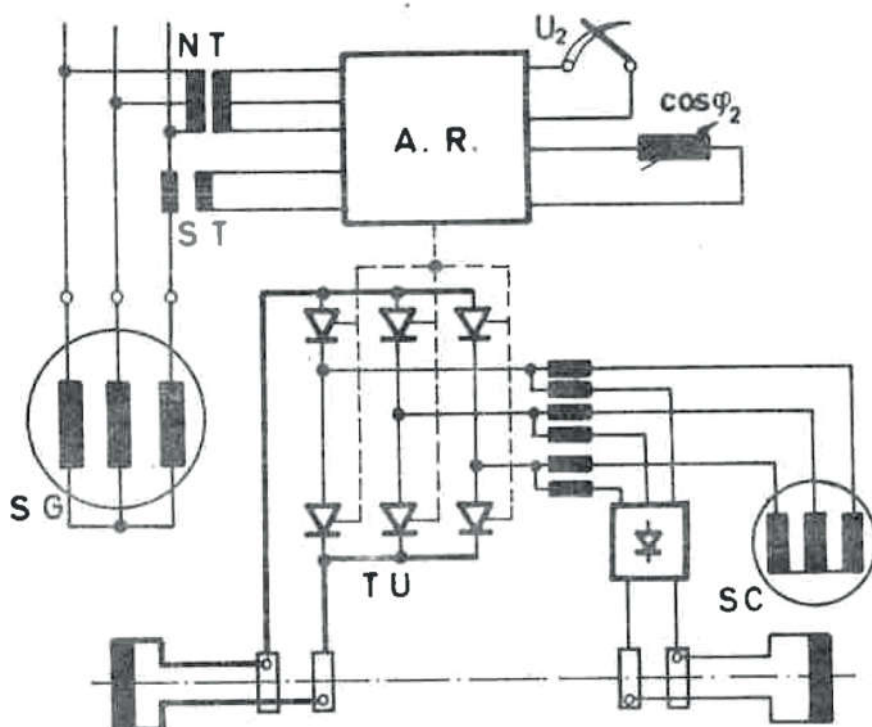
U sl. 5.1-09 prikazana je uzbuda sa rotirajućim silicijskim diodama bez ikakvog kliznog kontakta. Nema ni kliznih prstenova. Snagu za uzbude uzimamo iz glavnog sinhronog generatora preko naponskog i strujnog transformatora snage



Sl. 5.1-09 Uzbuda bez kliznih kontakata

(NTS+STS) u seriji, kako smo to već upoznali u sl. 5.1-06 c i e. Slaba strana te izvedbe je, da zaštita ne može upotrijebiti brzo razbudjivanje u slučaju defekta u namotu statora, jer se ne može ukopčati otpor u rotirajući glavni uzbuđni krug.

U sl. 5.1-10 prikazana je uzbuda pomoću tiristora "T.U." sa napajanjem iz takozvanog osoviškog generatora u obliku kompaundiranog sinhronog generatora "SC" na istoj osovini, koji daje konstantan napon. Automatski regulator daje impulse



Sl. 5.1-10 Tiristorska uzbuda

na tiristore i time momentano regulira uzbuđnu struju. Ostaje samo još vremenska konstanta T_d' glavnog generatora i vrlo mala vremenska konstanta "SC" generatora.

Očekuje se daljnje najsavršenije tehničko rješenje u izvedbi rotirajućih tiristora, no nedostaje još mogućnost sigurnog prijenosa impulsa sa statora na rotor za upravljanje rotirajućih tiristora.

5.2. Automatska regulacija napona

5.2.1. Uloga automatskog regulatora napona

Od sinhronog generatora se traži da radi na mrežu s konstantnim naponom. Moderni generatori imaju relativno veliku sinhronu reaktanciju i mekanu karakteristiku praznog hoda, pa su zato u pogledu napona vrlo osjetljivi na promjenu tereta. Zato danas praktički svaki generator opremamo s automatskim regulatorom napona, koji regulacijom uzbude drži napon konstantnim. Ako generator radi na krutu mrežu, onda je, doduše, napon mreže praktički neovisan o tom generatoru, među-

tim, bez automatskog regulatora bi se s teretom jako mijenjao $\cos\varphi$ generatora, pa automatski regulator napona preuzima ulogu regulatora jalove snage odnosno regulatora $\cos\varphi_2$.

Uzmimo u promatranje turbogenerator s 200% sinhronu reaktancije. Ako turbogenerator radi s 40% radnog tereta i $\cos\varphi_2=0,8$, onda je ukupna struja tereta: $I_2 = \frac{I_{2r}}{\cos\varphi_2} = \frac{0,4}{0,8} = 0,5$. Ako sada bez promjene napona dodje u pogonu do promjene radnog tereta na $P_{2r}=0,1, 0,8$ i $0,9$, onda će se pod pretpostavkom konstantnog napona mreže i prema tome konstantne uzbuđe (jer regulator napona nema razloga da uzbuđu mijenja), mijenjati $\cos\varphi_2$ generatora. Ako ostane uzbuđa konstantna onda je i unutarnji napon konstantan. Pitamo se, kolika će biti promjena kuta " φ_2 " i kuta " ϑ ", kao posljedica promjene radnog tereta. Mi možemo to grafički riješiti pomoću vektorskog dijagrama, koji je prikazan u sl. 5.2-01.

Možemo to i računski riješiti:

Unutarnji napon " E_0 " možemo izračunati pomoću jednadžbe (4.2-04), koja u relativnim vrijednostima glasi:

$$E_0 = \sqrt{(U_2 + I_2 X_d \sin\varphi_2)^2 + (I_2 X_d \cos\varphi_2)^2}$$

Struju možemo izraziti radnom i jalovom komponentom, tj.: $I_{2r}=I_2 \cos\varphi_2$ i $I_{2j}=I_2 \sin\varphi_2$, relativnu vrijednost nazivnog napona sa "1" a uzdužnu sinhronu reaktanciju smo pretpostavili sa 200%, tj. sa "2" te dobijemo:

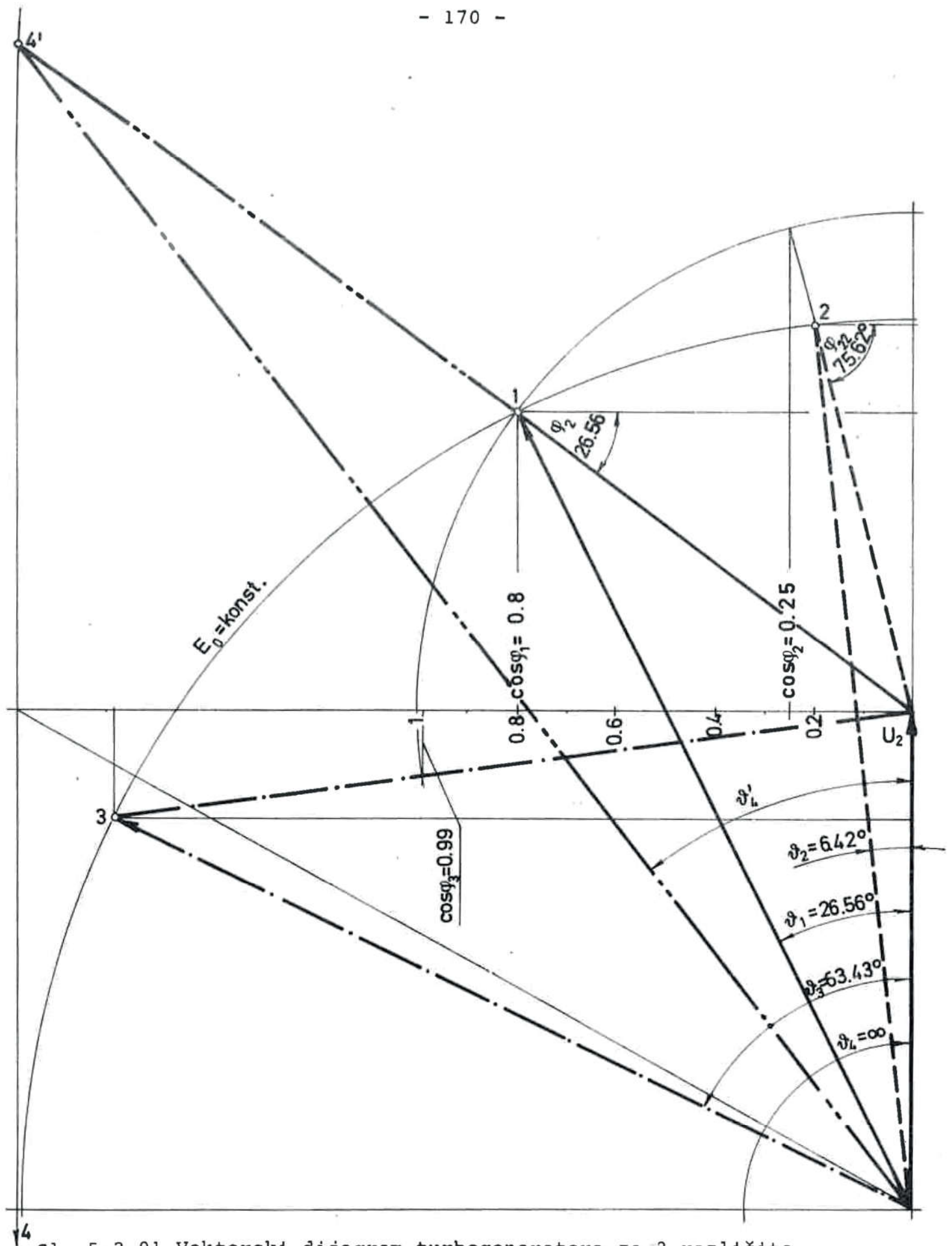
$$E_0 = \sqrt{(1 + 2 \cdot I_{2j})^2 + (2 \cdot I_{2r})^2}$$

Kod pretpostavljenog tereta dobijemo za slučaj 1.

$$E_0^2 = 1 + 2 \cdot 2 \cdot I_{2j} + (2 \cdot I_{2j})^2 + (2 \cdot I_{2r})^2$$

$$I_{2j}^2 + I_{2r}^2 + \frac{4 \cdot I_{2r}^2 + 1 - E_0^2}{4} = 0$$

$$I_{2j} = -\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{4 \cdot I_{2r}^2 + 1 - E_0^2}{4}} = \frac{(\sqrt{E_0^2 - 4 \cdot I_{2r}^2}) - 1}{2}$$



Sl. 5.2-01 Vektorski dijagram turbogeneratorsa za 3 različita radna tereta (1, 2 i 3) kod konstantne uzbude.
 $U_{2N} = \text{konst.}$, $E_0 = \text{konst.}$, $X_d = 200\%$

$$1. \quad P_{2r1} = 0,4; \quad \cos\varphi_{21} = 0,8; \quad P_{2j1} = 0,3, \quad U_{2r} = 1$$

$$E_{or} = \sqrt{(1+2 \cdot 0,3)^2 + (2 \cdot 0,4)^2} = 1,789$$

$$\vartheta_1 = \arcsin \frac{x_d \cdot P_{2r1}}{E_{or} \cdot U_{2r}} = \arcsin \frac{2 \cdot 0,4}{1,789} = 26,56^\circ$$

$$2. \quad E_{or} = 1,789 = \text{konst.}, \quad P_{2r2} = 0,1$$

$$I_{2j2} = \frac{(\sqrt{1,789^2 - 4 \cdot 0,1^2}) - 1}{2} = 0,39$$

$$\cos\varphi_{22} = \cos \arcsin \frac{P_{2j}}{P_{2r}} = 0,248$$

$$\varphi_{22} = 75,62^\circ$$

$$\vartheta_2 = \arcsin \frac{2 \cdot 0,1}{1,789} = 6,42^\circ$$

$$3. \quad E_{or} = 1,789 = \text{konst.}, \quad P_{2r3} = 0,8$$

$$I_{2j3} = \frac{(\sqrt{1,789^2 - 4 \cdot 0,8^2}) - 1}{2} = -0,1$$

$$\cos\varphi_{23} = \cos \arcsin \frac{0,1}{0,8} = 0,99$$

$$\varphi_{23} = -7,125^\circ$$

$$\vartheta_3 = \arcsin \frac{2 \cdot 0,8}{1,789} = 63,43^\circ$$

$$4. \quad E_{or} = 1,789 = \text{konst.}, \quad P_{2r4} = 0,9$$

$$I_{2j4} = \frac{\sqrt{1,789^2 - 4 \cdot 0,9^2} - 1}{2} = \text{imaginarno}$$

To znači da sinhroni generator kod radnog tereta od $P_{2r}=0,9$ padne iz sinhronizma, jer je prešao svoju prekretnu snagu:

$$P_{pr} = P_n \cdot E_0 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X_d} = 1 \cdot 1,789 \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} = 0,895$$

Vidimo, da u tom slučaju automatski regulator napona ništa ne pomaže. Međutim, možemo odgovarajućim statičkim spojem postići, da automatski regulator kod paralelnog rada generatora sa mrežom drži konstantan $\cos\varphi_2$, kojeg možemo proizvoljno podešavati. Ako bi npr. kod pogona prema točki "1" u vektorskom dijagramu sl. 5.2-01 bio naponski regulator podešen za $\cos\varphi_2=0,8$, onda bi kod povećanja radnog tereta na $P_{2r}=0,9$ on povećao uzbudu tako, da bi $\cos\varphi_2$ ostao nepromijenjen i dobili bi:

$$I_2 = \frac{I_{2r}}{\cos\varphi_2} = \frac{0,9}{0,8} = 1,125$$

$$I_{2j} = I_2 \cdot \sin\varphi_2 = 1,125 \cdot 0,6 = 0,675$$

$$E_0 = \sqrt{(1+2 \cdot 0,675)^2 + (2 \cdot 0,9)^2} = 2,96$$

$$\vartheta_4' = \arcsin \frac{2,09}{2,96} = 37,45^\circ$$

tj. generator bi ostao u sinhronizmu. Dapače kut ϑ bi se samo malo povećao od $26,56^\circ$ na $37,45^\circ$.

Zato od automatskog regulatora napona tražimo da drži konstantan $\cos\varphi_2$ bez obzira na teret.

Još teži je slučaj ako promatrani turbogenerator radi na mrežu bez tereta, tj. u praznom hodu. Unutarnji napon E_0 je u tom slučaju jednak naponu mreže U_2 . Prekretna snaga u tom slučaju iznosi:

$$P_{pr} = P_n \cdot E_0 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X_{dr}} = P_n \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2} P_n$$

pa će turbogenerator kod nepromijenjene uzbude od praznog hoda već kod pola nazivnog tereta pasti iz sinhronizma.

Problem regulacije uzbude smo razmotrili samo sa gledišta statičke stabilnosti, te smo došli do zaključka da generatore u svakom slučaju treba snabdjeti s automatskim regulatorom napona, koji kod paralelnog rada sa velikom mrežom drži i konstantan $\cos\varphi_2$. Pitamo se, kako će se u slučaju promjene

tereta odigravati prelazna pojava od nekog početnog pogonskog slučaja do nekog konačnog pogonskog slučaja, tj. kakav je dinamički tok prelazne pojave? Uzmimo generator koji sam radi na vlastitu mrežu. Najprije ga iz praznog hoda trenutačno opteretimo punim induktivnim teretom bez mijenjanja uzbude. Taj slučaj je sličan slučaju kratkog spoja na stezaljkama generatora, kojeg smo obradili u pogl. 3.7, s time da ne činimo direktan kratak spoj, već stezaljke generatora spajamo preko induktiviteta potrošača X_p . Razlika je u tome, da je struja u tom slučaju u prvom trenutku određena s jednadžbom:

$$I_2'' = \frac{E_2}{X_d'' + X_p}$$

da je nakon par stotinki sekunde određena sa:

$$I_2' = \frac{E_2}{X_d' + X_p}$$

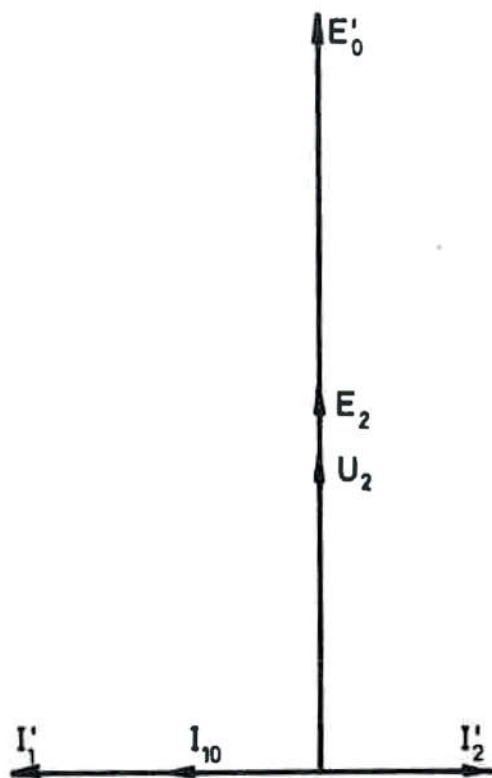
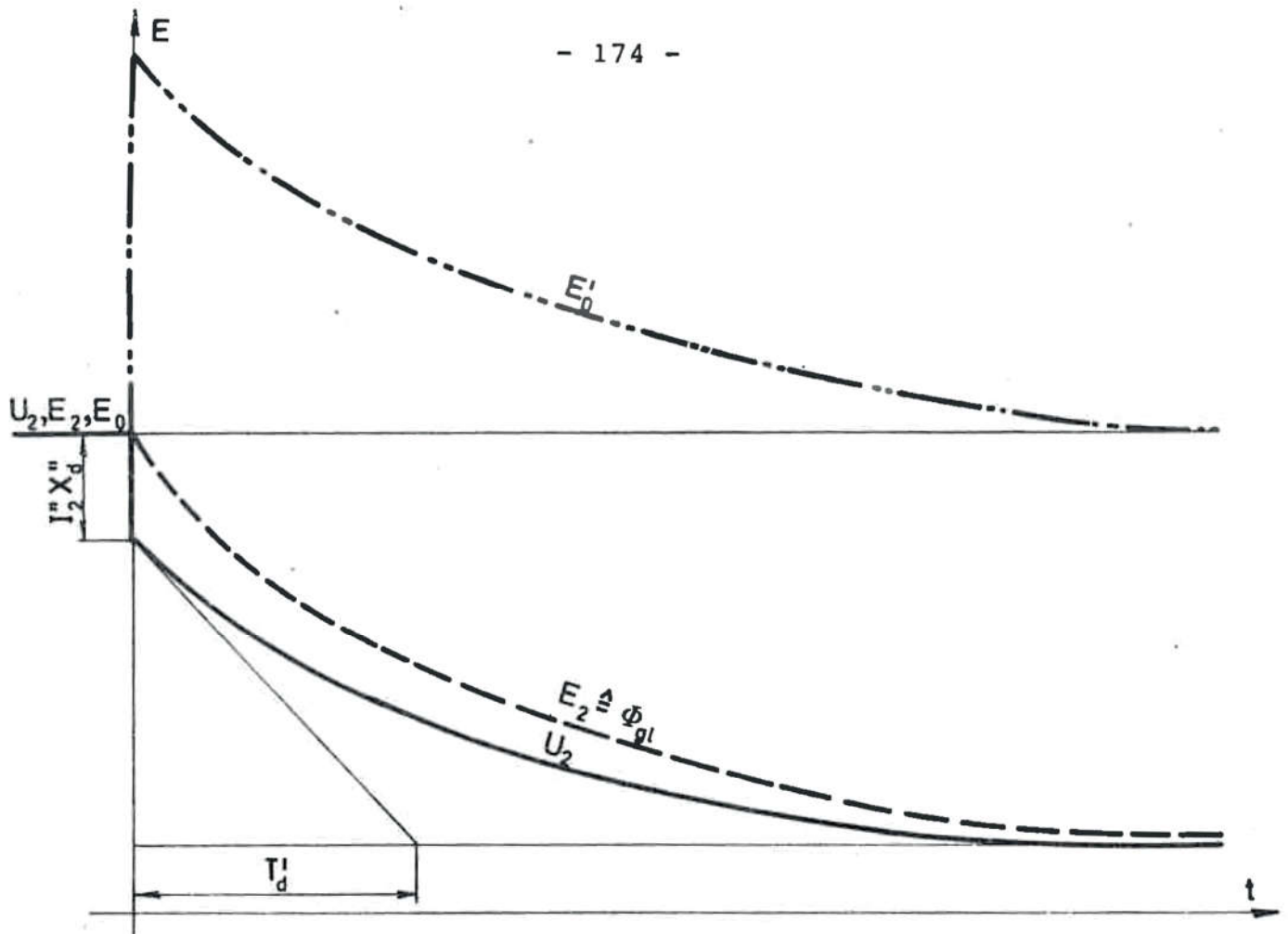
dok je konačna struja određena jednadžbom:

$$I_2 = \frac{E_0}{X_d + X_p}$$

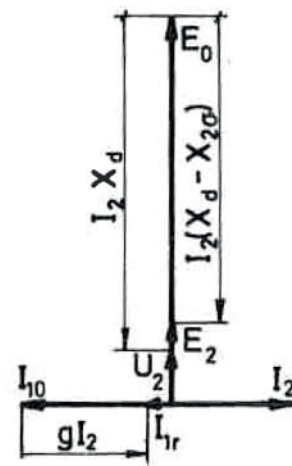
Pad napona uslijed suptranzientne reaktancije možemo smatrati momentanim, jer su stotinke sekunde relativno vrlo kratko vrijeme. Ako nema automatskog regulatora napona, pada dalje napon uslijed tranzientne reaktancije, koja se vremenskom konstantom T_d' povećava do vrijednosti sinhronne reaktancije, kako je to u sl. 5.2-02 crtkano prikazano. Sinhrona reaktancija dolazi do punog izražaja tek nakon isteka cca trostruke vremenske konstante T_d' , kada su statovski amperzavoji tereta utjerali istosmjerno polje (reakcija armature!) kroz rotor.

Vremenski dijagram unutarnjeg napona E_0 , induciranog napona E_2 i napona mreže U_2 kod trenutačnog induktivnog opterećenja iz praznog hoda prikazan je u sl. 5.2-02. Za početno stanje "a" i za konačno stanje "b" su prikazani pripadajući vektorski dijagrami.

S automatskim regulatorom napona želimo regulirati uzbuđu tako, da napon bude na željenoj vrijednosti konstantan.



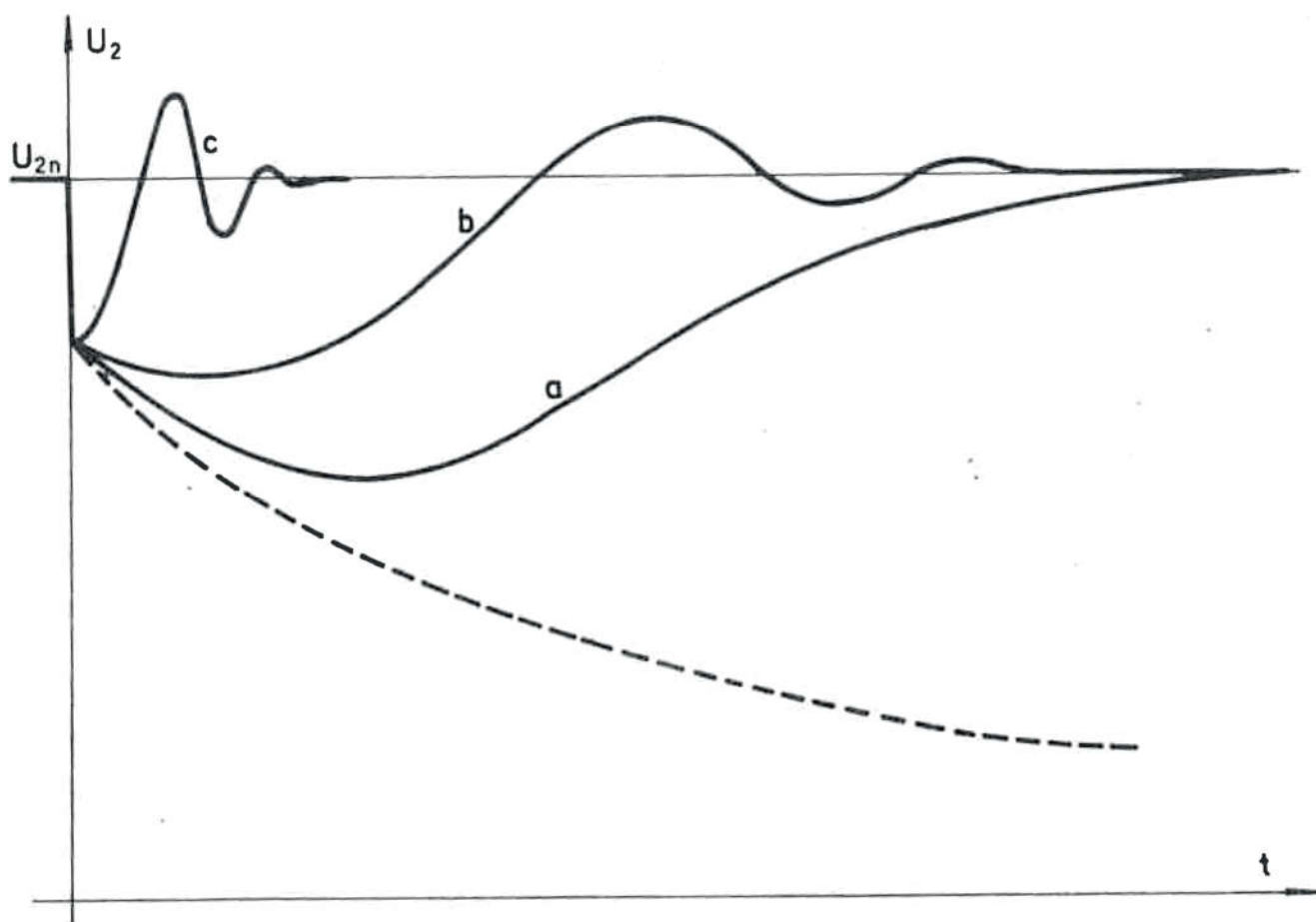
a)



b)

Sl. 5.2-02 Vremenski i vektorski dijagram za slučaj momentanog induktivnog opterećenja turbogeneratorsa

Prvi momentani pad napona uslijed suptranzientne rasipne reaktancije X_d'' ne možemo spriječiti automatskim regulatorom, jer bi morali trenutačno povećati glavno polje, da bi kompenzirali nastali pad napona, a to je nemoguće, jer je promjena vezana s vremenskom konstantom T_d' . Automatski regulator napona možemo tako podesiti da diže uzbudu na takav način, da se napon sinhronog generatora asimptotski približava željenoj vrijednosti napona kako je to prikazano u sl. 5.2-03 pod a). To, naravno, traje jako dugo.



Sl. 5.2-03 Tri različita slučaja regulacije napona pomoću automatskog regulatora

Ako dozvolimo da regulator djeluje na takav način da tokom reguliranja napona čak može i prelaziti željenu vrijednost, onda ćemo, prema sl. 5.2-03 b), brže postići željeni napon. Kod dobro podešenog regulatora praktički se postizava već u tri poluvala njihanja konstantna vrijednost željenog napona.

Budući da se može postići još brže reguliranje napona, kako je to prikazano u sl. 5.2-03 c), pitamo se: o čemu ovisi brzina reguliranja napona? Nema sumnje da, prije svega, brzina reguliranja ovisi o brzini djelovanja samog automatskog regulatora. Kao kriterij brzine uzimamo vrijeme, koje je potrebno mehaničkom regulatoru da od jednog krajnjeg položaja dođe u drugi krajnji položaj. To vrijeme kod brzih mehaničkih automatskih regulatora iznosi cca 0,3 sek. Kod elektronskih regulatora je brzina samog regulatora data s vremenskim konstantama pojedinih pojačala i elemenata za stabilizaciju regulacije; ove vremenske konstante su vrlo malene, praktički zanemarljive obzirom na druge vremenske konstante, pa je vrijeme reguliranja zbog toga znatno kraće.

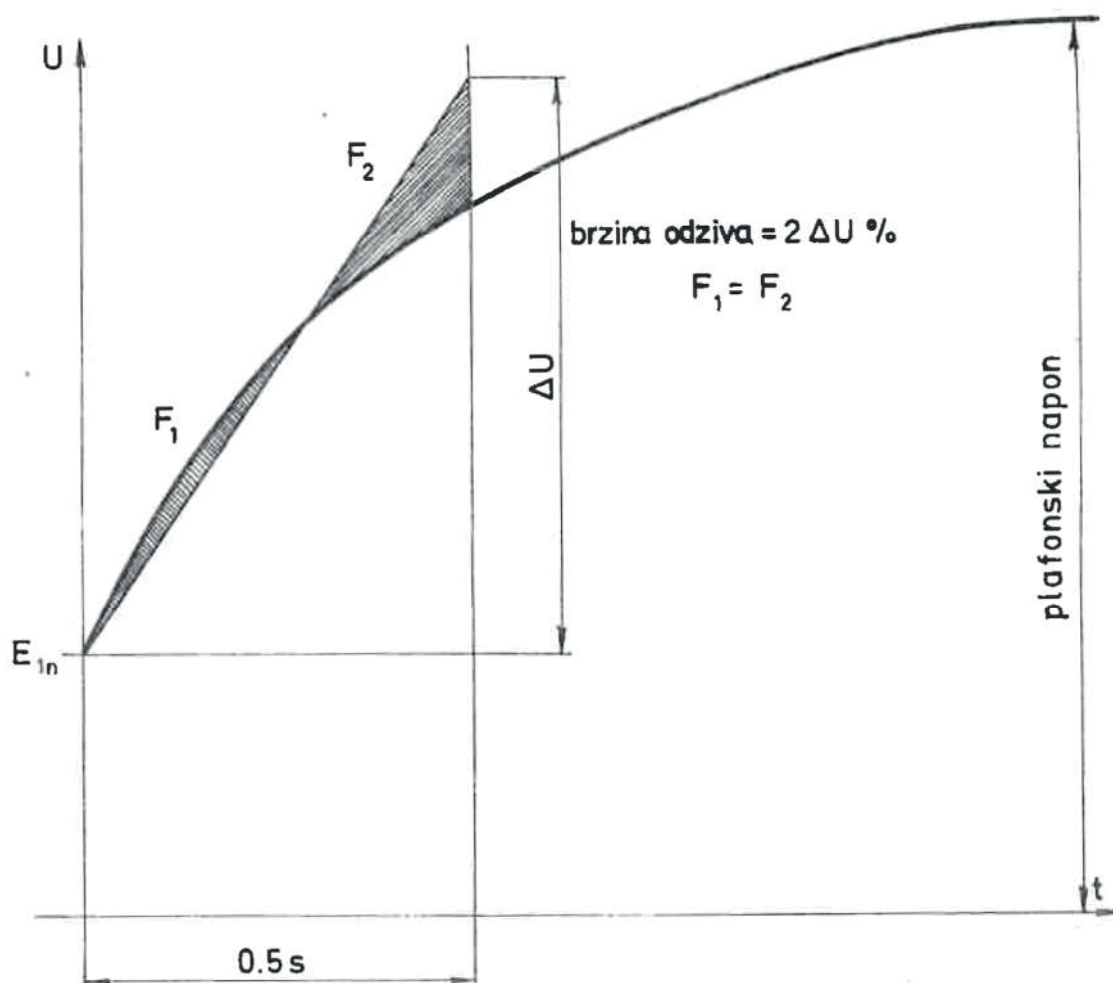
5.22. Brzina odziva uzбудnika i sistema uzbuđivanja

Brzina reguliranja ovisi i o samom uzbuđniku, odn. o plafonskom naponu uzbuđnika. Kriterij je dat po američkim standardima s tzv. "brzinom odziva uzbuđnika", koja je definirana na sljedeći način (vidi sl. 5.2-04):

Nazivni napon uzbuđnika " E_{1n} " je onaj napon, kod kojeg uzbuđnik s nominalnom strujom uzbuđuje rotor sinhronog stroja. Ako u praznom hodu uzbuđnika, tj. sa iskopčanom uzbuđom sinhronog generatora, ali kod nazivnog napona " E_{1n} " momentano kratko spojimo poredni regulator uzbuđnika, onda će napon uzbuđnika, u ovisnosti od vremena $U_1=f(t)$, rasti po krivulji odziva prema sl. 5.2-04 do maksimalno mogućeg napona, tj. do plafonskog napona. Ako zamijenimo krivulju koja prikazuje naraštanje napona u vremenu od 0,5 sek pravcem tako da, prema sl. 5.2-04, površina F_1 bude jednaka površini F_2 , tada je brzina odziva uzbuđnika određena omjerom

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{\Delta U}{0,5} = 2\Delta U$$

izraženo u postocima nazivnog napona U_{1n} . Ako je nazivni napon uzbuđnika 220 V i ako smo izmjerili vrijednost ΔU u iznosu od 110 V, tada odziv iznosi $2 \times 110 = 220 \text{ V/s} = 100\%$.



Sl. 5.2-04 Uz odredjivanje brzine odziva uzbudnika

Za normalne slučajeve plafonski napon iznosi cca 135%, tako da se uzbudna struja kod preopterećenja sinhronog stroja može povisiti na 125% nazivne vrijednosti. Ako se traži brzo uzbuđjivanje, tj. velika brzina odziva, onda plafonski napon treba iznositi 150-400% nazivnog napona. Do 400% se je išlo prije drugog svjetskog rata, kada su u svim većim mrežama počele poteškoće sa problemom stabilnosti, pa se kao obično u početku rješavanja tog problema pretjerivalo s plafonskim naponom. Kasnije se je uvidjelo, da je to preskupo, neekonomično rješenje i danas se ne ide preko 180% osim u iznimnim slučajevima.

Brzina odziva je, prema tome, neko mjerilo za krajnju brzinu dizanja napona uzbudnika, pa naravno, od toga u velikoj mjeri ovisi brzina reguliranja napona sinhronog generatora. Što je veći plafonski napon, to je veća brzina odziva, ali je veći i uzбудnik a time i njegova cijena. Povećanje brzine odziva predstavlja, prema tome, jako skupo rješenje za povećanje brzine reguliranja napona.

Brzina odziva, naravno, nije ovisna samo o visini plafonskog napona, nego i o vremenskim konstantama uzbuđnog kruga uzbuđnika kao i o sistemu uzbuđe. Zato visina plafonskog napona ne može služiti kao jedini kriterij za brzinu uzbuđjivanja uzbuđnika, pa radi toga jedino veličina brzine odziva predstavlja pravi kriterij.

Vremenska konstanta uzbuđnog kruga uzbuđnika je više-manje ovisna o veličini uzbuđnika i raste s drugim korijenom iz snage, kako smo to već ustanovili u pogl. 3.7.

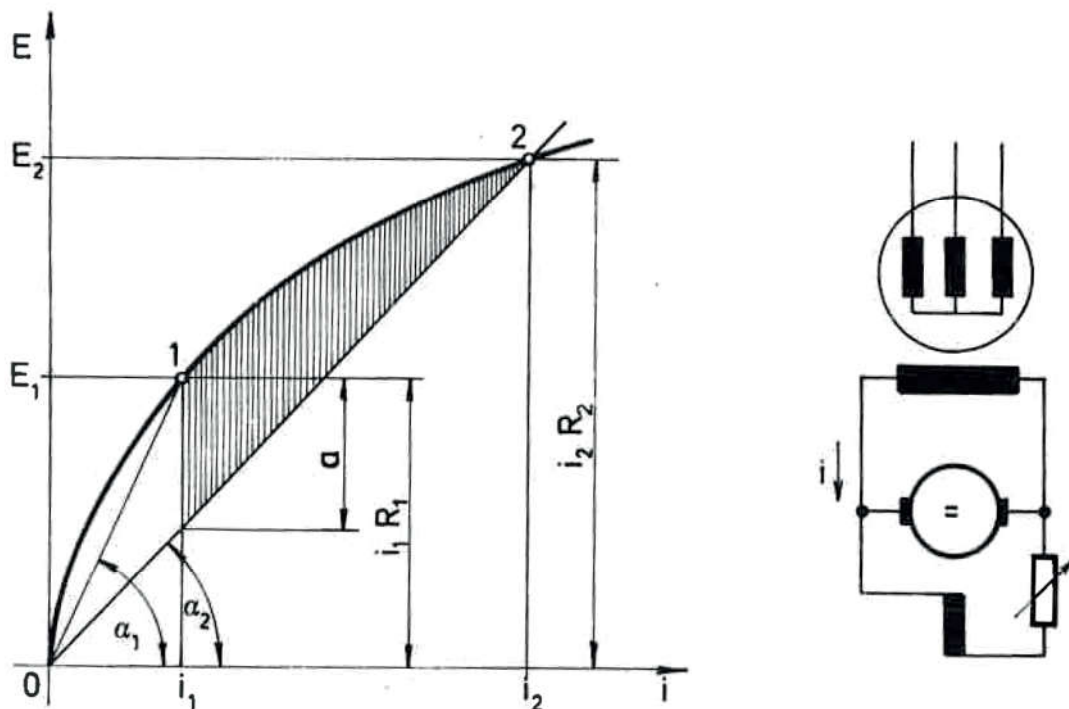
U pogledu sistema uzbuđe razlikujemo kod klasične izvedbe uzbuđjivanja tri sistema:

- uzbuđnik s porednom uzbuđom,
- uzbuđnik s pomoćnim uzbuđnikom i
- uzbuđnik s pilotskim spojem.

Uzbuđnik s porednom uzbuđom ima karakteristiku praznog hoda prema sl. 5.2-05.

Ako hoćemo povisiti napon od E_1 na E_2 , onda moramo otpor porednog uzbuđnog kruga smanjiti od vrijednosti

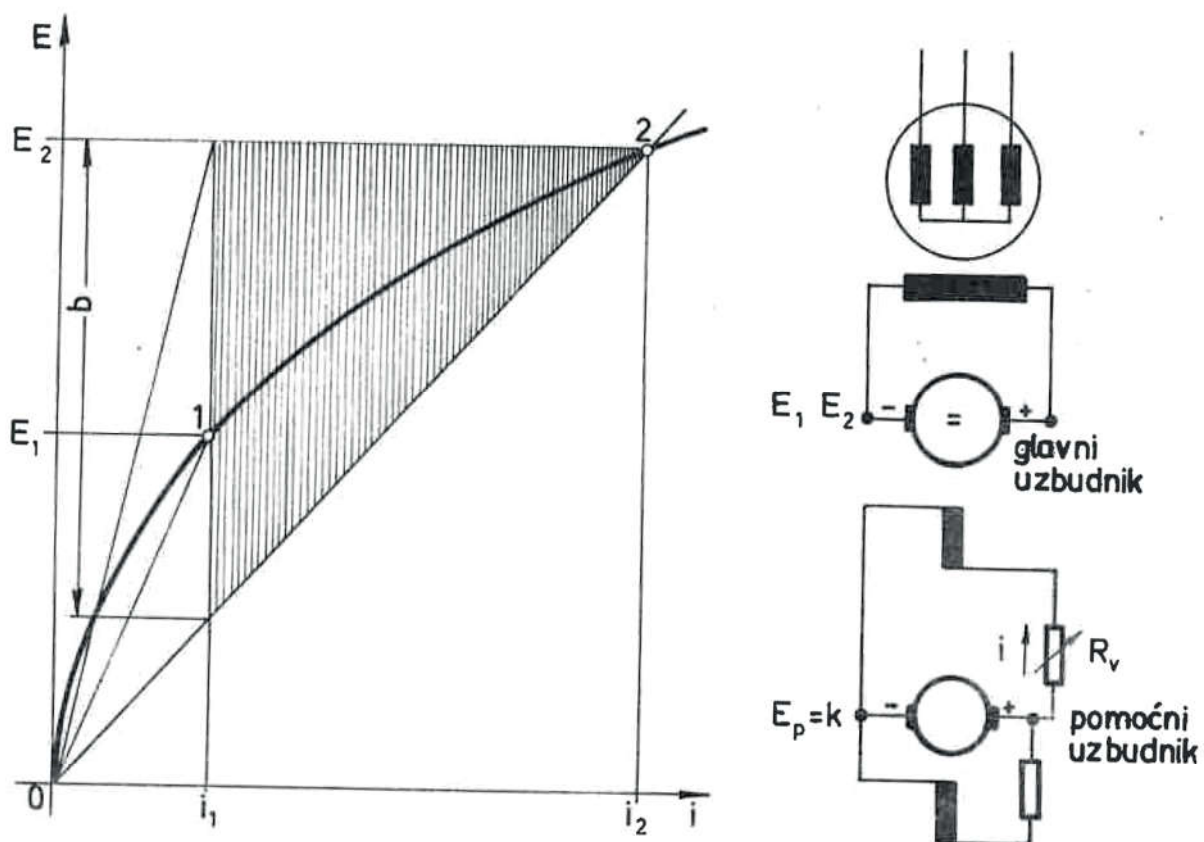
$$R_1 = \frac{E_1}{i_1} = \operatorname{tg} \alpha_1 \quad \text{na} \quad R_2 = \frac{E_2}{i_2} = \operatorname{tg} \alpha_2$$



Sl. 5.2-05 Uzbuđnik s porednom uzbuđom

na taj način da smanjimo otpor regulacionog otpornika za odgovarajuću vrijednost. U trenutku smanjenja otpora regulacionog otpornika, čime se snizuje karakteristika porednog kruga od pravca 0-1 na pravac 0-2, ostaje u sl. 5.2-05 šrafirani dio kao višak napona, koji povećava uzбудnu struju od vrijednosti i_1 na vrijednost i_2 , jer je tek u tom slučaju pad napona u porednom krugu $i_2 R_2$ jednak induciranom naponu E_2 .

Uzбудnik s pomoćnim uzбудnikom ima spoj prema shemi u sl. 5.2-06. Glavni uzбудnik neka bude isti kao u sl. 5.2-05, tj. neka ima istu karakteristiku praznog hoda.

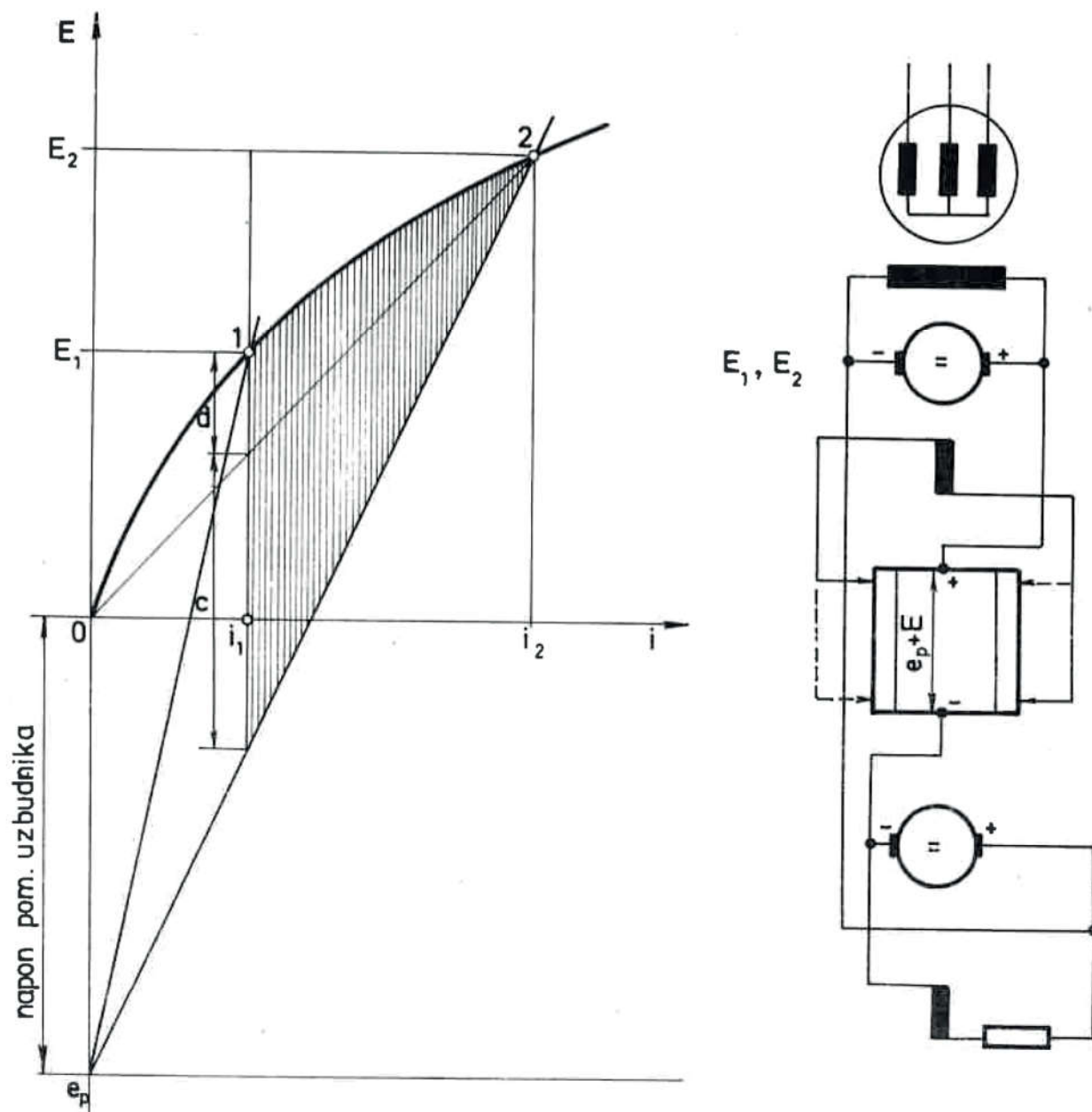


Sl. 5.2-06 Glavni uzбудnik uzbudjivan pomoću pomoćnog uzbudnika

Ako želimo povišiti napon od vrijednosti E_1 na vrijednost E_2 , tada moramo pomoću regulacionog otpornika povišiti napon na uzbudnom namotu u omjeru i_2/i_1 . Opet ostaje šrafirani dio kao višak napona, no u ovom slučaju je višak napona nekoliko

puta veći nego što je bio kod poredne uzbude, pa je zato i brzina odziva nekoliko puta uvećana.

Uzbudnik s pilotskim spojem je prikazan shemom u slici 5.2-07. U tom spoju se na jednom potencijometru zbrajaju napon



Sl. 5.2-07 Uzbudnik u pilotskom spoju

glavnog uzbuđnika E i napon pomoćnog uzbuđnika e_p . Neka su glavni i pomoćni uzbuđnik građeni za isti napon i neka glavni uzbuđnik ima sve karakteristike kao uzbuđnik iz sl. 5.2-05 odnosno sl. 5.2-06. Napon na potencijometru će biti jednak zbroju napona glavnog i pomoćnog uzbuđnika, kako nam to prikazuje slika 5.2-07.

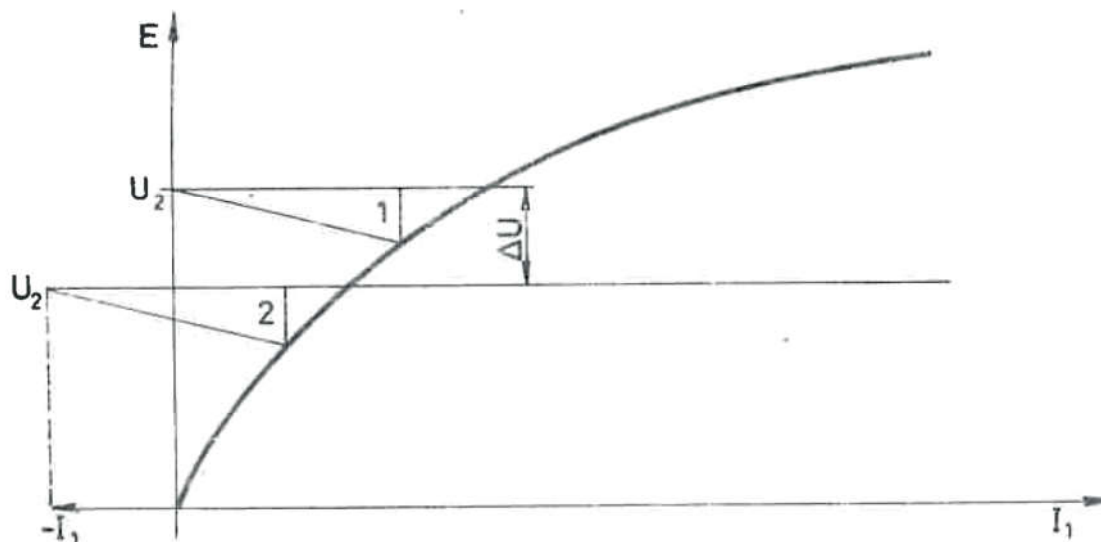
Ako opet hoćemo povišiti napon od vrijednosti E_1 na vrijednost E_2 , onda u ovom slučaju reguliramo napon na uzbuđnom namotu glavnog uzbuđnika pomoću potenciometarskog spoja regulacionog otpornika od $e_p + E_1$ na $e_p + E_2$. Ova suma napona vlada na uzbuđnom namotu i s njim u seriju spojenom onom dijelu potenciometra, kroz koji prolazi i struja uzbude. Šrafirani dio je, kao višak napona, u ovom spoju još veći nego u spoju prema prethodnoj slici.

Kod poredne uzbude je višak napona u prvom trenutku označen s "a" (vidi sl. 5.2-05), kod uzbude s pomoćnim uzbuđnikom (vidi sl. 5.2-06) s "b", a za pilotski spoj (vidi sl. 5.2-07) s c+d. Ako je $e_p = E_2$, onda je $c = b$, dok je $d = a$. Prema tome je višak napona kod pilotskog spoja jednak zbroju viškova napona kod uzbuđnika u porednom spoju i uzbuđnika s pomoćnim uzbuđnikom.

Potenciometarski spoj regulatora se može upotrijebiti i u spoju s pomoćnim uzbuđnikom. Prednost potenciometarskog spoja je u tome, što se glavni uzbuđnik a time i sinhroni generator, može negativno uzbuđiti. U sl. 5.2-07 je na potenciometru crtkano prikazan položaj kontakta koji daje negativnu uzbudu. Zašto trebamo negativnu uzbudu?

Za brzo uzbuđjivanje generatora na veći napon trebamo što viši plafonski napon, no isto tako za brzo razbuđjivanje generatora trebamo što niži napon, a to postizavamo s mogućnošću negativnog uzbuđjivanja. Osim toga, ima slučajeva da generator mora raditi na dugačke vodove najviših napona, koji predstavljaju za generator jako veliki kapacitivni teret. U slučaju opterećivanja generatora samo s kapacitivnim teretom npr. priključenim s dalekovoda, dolazi do samouzbudjivanja sinhronog generatora preko nazivnog napona, kako je to Potierovim trokutom prikazano u sl. 5.2-08. Ako potpuno razbuđimo generator, tj. ako je uzbuđna struja jednaka nuli, tada Potierovim trokutom 1 dobijemo nedozvoljeno povišenje napona ΔU . S negativnom uzbudom $-I_1$ možemo s regulatorom u potenciometarskom spoju držati napon generatora na nazivnoj visini, kako je prikazano s Potierovim trokutom 2.

Iz svega do sada navedenog možemo zaključiti da je visina odziva uzbuđnika ovisna o:



Sl. 5.2-08 Povišenje napona u slučaju samouzbuđivanja kapacitivnim teretom; potrebna negativna uzbuda za dobivanje nominalnog napona

- visini plafonskog napona,
- sistemu uzbuđivanja uzbuđnika i o
- vremenskim konstantama uzbuđnih krugova uzbuđnika.

Ustanovili smo ulogu uzbuđnika, odnosno utjecaj njegovog odziva na brzinu reguliranja. Preostaje nam još glavni uzbuđni krug. Njegov utjecaj je određen s vremenskom konstantom T_d' .

5.23. Ovisnost potrebne brzine reguliranja napona o veličini sinhronog generatora

Iz našeg dosadašnjeg razmatranja zaključujemo da je brzina reguliranja napona generatora ovisna o:

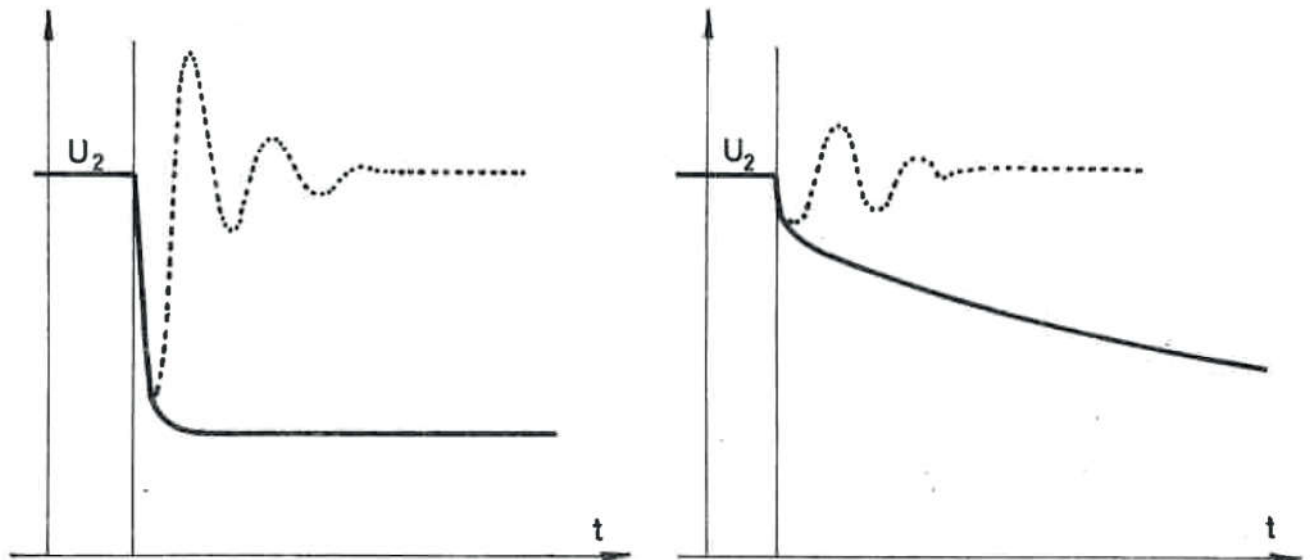
- brzini djelovanja regulatora,
- brzini odziva uzbuđnika i o
- vremenskoj konstanti T_d'

Ako pretpostavimo isti relativni plafonski napon i isti sistem uzbude, onda možemo ovisnost brzine reguliranja svesti na:

- brzinu djelovanja regulatora i
- vremenske konstante uzbuđnih krugova sinhronog generatora i armature uzbuđnika

Kako bi općenito sagledali problematiku reguliranja, pitamo se: Koja je brzina reguliranja napona potrebna kod vrlo malog generatora od cca 20 kVA, a koja kod velikog generatora od cca 200000 kVA?

U pogl. 3.7. smo već ustanovili da vremenska konstanta rotorskog kruga za mali generator iznosi par stotinki sekunde, dok za veliki generator nekoliko sekundi. Vremenski dijagram napona kod trenutnog opterećenja i bez reguliranja napona prikazan je za oba slučaja u sl. 5.2-09.



Sl. 5.2-09 Vremenski dijagram napona pri trenutnom opterećenju kod malog i velikog generatora.

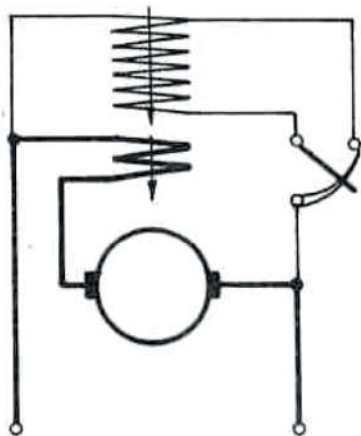
Vidimo da kod malog generatora napon praktički trenutačno padne za iznos pada napona uslijed sinhronne reaktancije, dok kod velikog generatora ovaj pad iznosi samo za veličinu suptranzientnog rasipnog pada napona. To je velika razlika, jer je sinhrona reaktancija 3-6 puta veća od suptranzientne rasipne reaktancije. Iz te slike vidimo da trebamo za male generatore vrlo brze regulatore napona, kako bi spriječili prevelike padove napona, dok visina odziva ne igra veliku ulogu, te da unatoč brzog regulatora moramo računati da će pad napona u prvom trenutku biti vanredno velik. Kod velikih generatora, međutim, trebamo brzi regulator i visoku vrijednost odziva, da bi tromo glavno polje brzo dizali, kada imamo kratak spoj u mreži i kada trebamo zadržati napon generatora na što većoj vrijednosti, da ne ispadne iz pogona.

Brzi regulatori su skupi, svakako skuplji od jednog malog generatora, pa dolazimo do problema regulacije napona baš kod malih generatora. Zato je tehnika tražila rješenje upravo ovog problema, pa ga je našla u tzv. kompaundiranim sinhronim generatorima.

5.3. Kompaundirani sinhroni generatori

5.31. Princip rada

Kod istosmjernih strojeva je problem konstantnosti napona bio davno, još u prošlom stoljeću riješen dodatnom serijskom uzbuđom, pomoću koje se sa strujom tereta kompenzira pad napona u generatoru, koji nastaje uslijed tereta, kako je to prikazano u principijelnoj shemi, sl. 5.3-01. Mi zovemo ta-



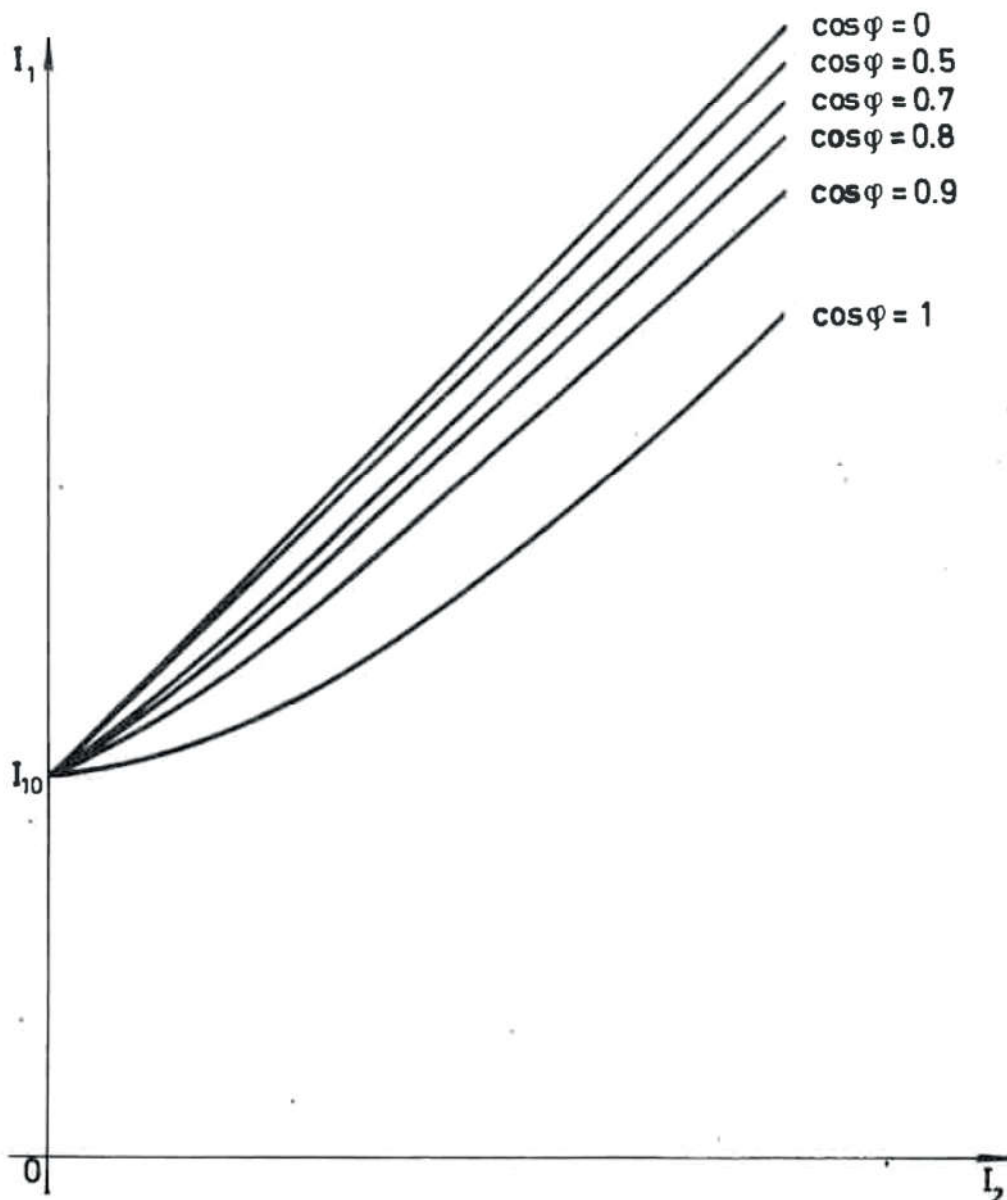
Sl.5.3-01 Shema kompaundiranog istosmjernog generatora

kav generator "kompaundirani istosmjerni generator". Samo rješenje je vrlo jednostavno. Kod sinhronih generatora taj je problem mnogo složeniji. On se postavljao pred sinhronne generatore također početkom ovog stoljeća i bio je u principu već onda po Arnoldu riješen. Nedostajao je samo upotrebljiv ispravljač, jer se izmjenična struja tereta mora prije nego udje u uzbuđni namot ispraviti. Danas se kompaundirani sinhroni generatori grade, barem za sada, samo za relativno malo snage do najviše od kojih tisuću kVA.

Do otprilike 1935.godine mali sinhroni generatori uopće nisu bili interesantni. Male mreže napajale su se istosmjernim generatorima. Kod većih sinhronih generatora automatski regulatori napona su potpuno zadovoljavali. Za male generatore bili su skupi i prespori. Veliki generator je trom. Vremenska konstanta uzbuđnog namota iznosi nekoliko sekundi, dok kod malih samo desetinke sekunde. Kad se kod malih mreža prešlo na napajanje sinhronim generatorima, postala je potreba kompaundacije nužna. Poslije 1935.god. pojavili su se na tržištu bakrenooksi-

dulni ispravljači (suhi ispravljači), čijom je primjenom bilo omogućeno korištenje principa kompaundacije. Iza toga su došli selenski. Danas se, naravno, upotrebljavaju silicijske diode. Dugačak je bio put od zamisli do ostvarenja.

Kod kompaundacije sinhronih generatora treba riješiti ne samo pitanje ispravljanja struje, već i pitanje kompaundacije kod raznih $\cos\varphi_2$ tereta. U pogl. 3.5. upoznali smo već tzv. regulacione krivulje sinhronog generatora, koje prema slici 5.3-02 pokazuju da su za jednu te istu struju tereta I_2 , a



Sl. 5.3-02 Regulacione krivulje sinhronog generatora

za razne $\cos\varphi_2$ tereta potrebne različite uzbude rotora strujama I_1' , I_1'' i I_1''' . Za rješenje tog problema pogledajmo najprije

Obje komponente treba, naponski ili strujno, vektorski zbrojiti kako bi se uzeo u obzir $\cos\varphi$ tereta. To se može učiniti samo na izmjeničnoj strani uzbuđnog kruga, jer kod istosmjernih veličina nema vektora pa ni vektorskog zbrajanja. U slici 5.3-04 prikazan je spoj ovakvog kompaundiranog sinhronog generatora na principu naponskog zbrajanja. Strujni krugovi prikazani su jednofazno u sl. 5.3-04. U pomoćnom naponskom transformatoru (NT) inducira se sekundarno pomoćni napon E_p , koji ima isti vektorski pravac kao i napon generatora U_2 , samo je u omjeru broja zavoja manji.

$$E_p = \frac{w_p}{w_N} U_2$$

Sekundarni namot naponskog transformatora (NT) je vezan u seriju sa sekundarnim namotom strujnog transformatora (ST) preko ispravljača (IS) na uzbuđni namot (UN) sinhronog generatora (SG). Ako generator radi u praznom hođu, imamo u cijelom uzbuđnom krugu induciran samo napon " E_p ". Sekundarni namot strujnog transformatora predstavlja za uzbuđni namot u praznom hođu samo jednu prigušnicu s induktivitetom L_T , jer je primarna strana otvorena. Uzbuđni namot "UN" djeluje samo sa svojim omskim otporom R_1 , jer imamo u njemu istosmjernu struju. Prema tome cijeli uzbuđni krug ima uz zanemarenje manjih otpora impedanciju Z_p .

$$Z_p = \sqrt{R_1^2 + (\omega \cdot L_T)^2}$$

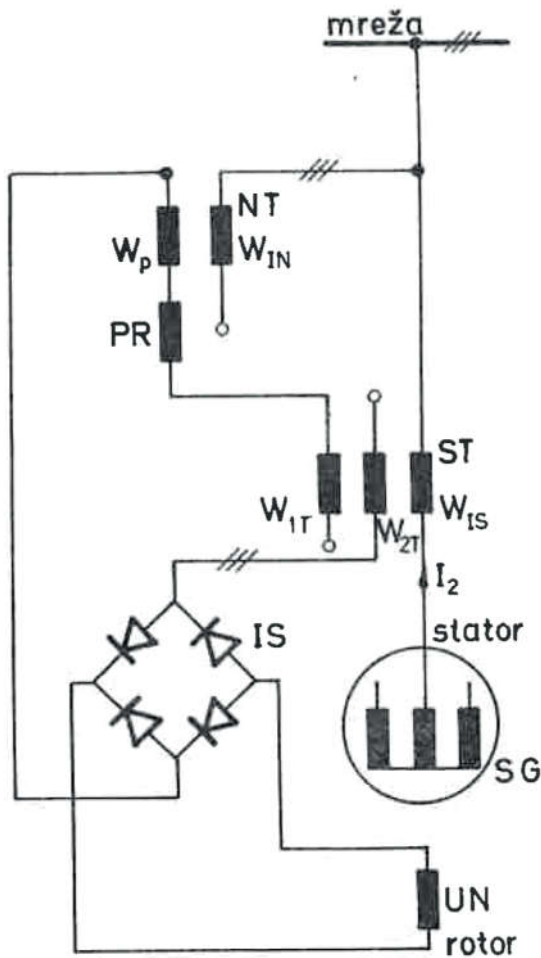
U praznom hođu dobijemo na izmjeničnoj strani struju $i_{o\sim}$

$$i_{o\sim} = \frac{E_p}{Z_p}$$

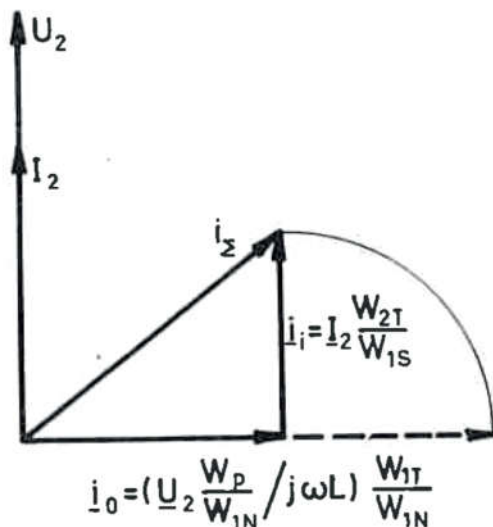
koja zaostaje za naponom " E_p " prema teoriji za ispravljače za kut α (vidi sl. 5.3-05)

$$\operatorname{tg}\alpha = 0,84 \frac{\omega \cdot L_T}{R_1}$$

Kad se generator optereti poteče kroz primarni namot strujnog transformatora struja tereta I_2 , koja uzbuđi tok u jezgri struj-



Sl.5.3-06



Sl.5.3-07

$$E_1 = 2,03 \cdot E_v \cdot \cos \alpha$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot E_v}{\omega \cdot L_T} \cdot \sin \alpha$$

Kod toga pretpostavljamo da je induktivitet uzbuđnog namota beskonačno velik, pa da dobijemo praktično konstantnu uzbuđnu struju I_1 bez pulzacija. Prema tome, kod takvog spoja možemo postići da generator drži konstantan napon kod svih tereta.

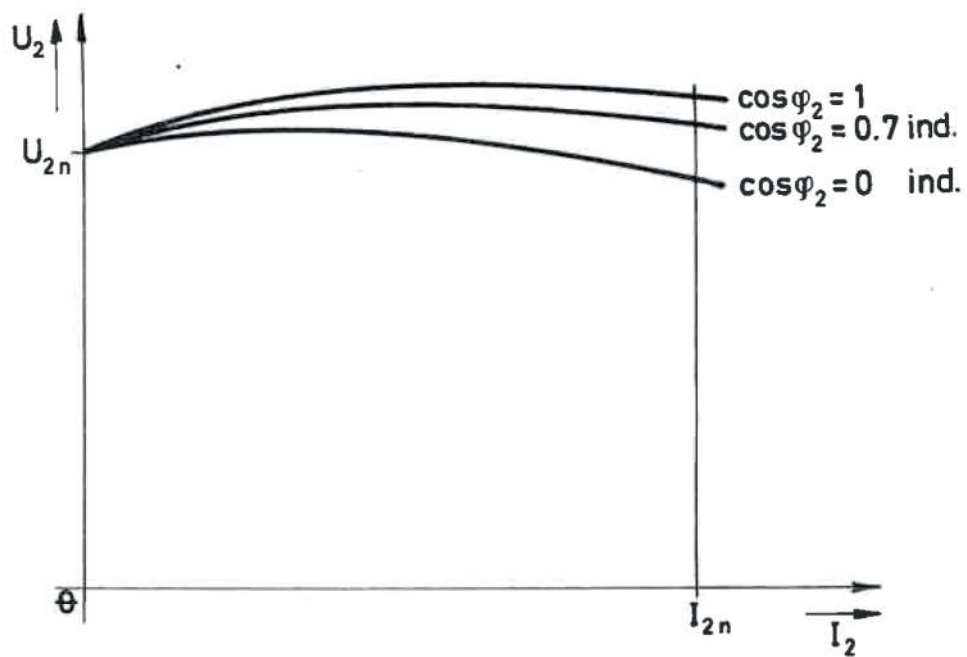
Uspjeli smo ovakvim spojem generator kompaundirati. Nije to, međutim, jedini spoj. Imamo različite spojeve. Za razliku upravo opisanog spoja na principu naponskog zbrajanja postoji spoj sa strujnim zbrajanjem, koji je prikazan u slici 5.3-06. Strujni transformator "ST" je tronamotni i zbraja struju, koja predstavlja naponsku komponentu, a određena je naponom generatora, prenosnim omjerom naponskog transformatora $\frac{W_p}{W_{1N}}$ i induktivnim otporom "PR" prigušnice, te strujnu komponentu koja je određena strujom tereta I_2 . Obje struje transformiraju se u strujnom transformatoru "ST" prenosnim omjerom $\frac{W_{2T}}{W_{1S}}$ odnosno $\frac{W_{2T}}{W_{1S}}$ na sekundarnu stranu i vektorski zbrajaju, kako je to prikazano u vektorskom dijagramu 5.3-07.

Odgovarajućim dimenzioniranjem uzbuđnog kruga bilo u jednoj ili drugoj varijanti možemo postići da napon generatora odgovara i za uzbuđni krug i tako otpada naponski transformator NT.

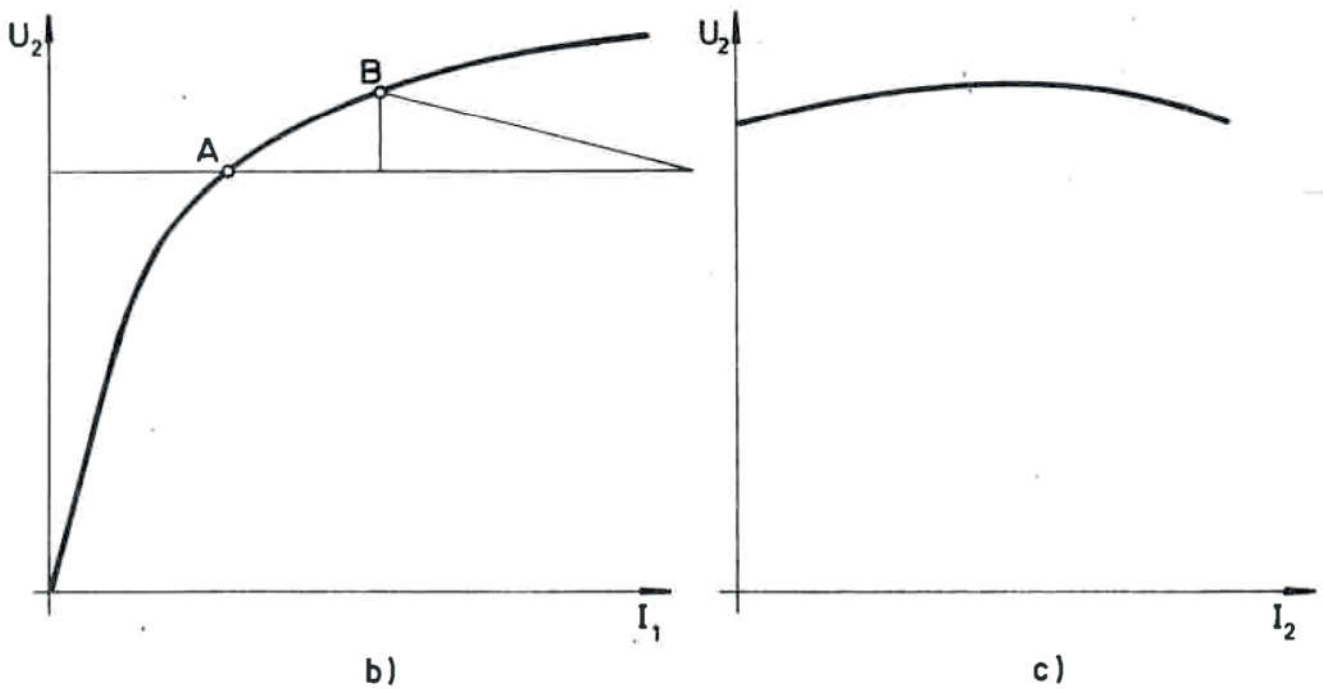
5.32. Odstupanje od idealizirane slike - i načini otklanjanja

Kvalitet kompaundacije je određen sa odstupanjem napona od nazivne vrijednosti kod raznih tereta, što prikazujemo sa tzv. vanjskom karakteristikom generatora. Ona pokazuje ovisnost napona U_2 na stezaljkama generatora o teretu I_2 i $\cos\varphi_2$ (vidi sl. 5.3-08 a). Odstupanja nastaju, jer je slika prema prethodnom poglavlju pokvarena raznim dodatnim utjecajima, koje nismo uzeli u obzir. Uzročnici, koji smanjuju u tom pogledu kvalitet kompaundacije su slijedeći:

- a) Do sada smo uvijek računali s vektorskim dijagramom, koji predstavlja linearnu karakteristiku praznog hoda. Ona je, međjutim, u području rada generatora savinuta, pa je zato i vanjska karakteristika savinuta, kako je to u sl. 5.3-08 b) prikazano.
- b) Nismo uzeli u obzir potrebno povećanje uzbuđne struje za " Δi ", do kojeg dolazi radi rasipanja u rotoru (vidi pogl. 3.4), radi čega u vektorskom dijagramu na sl. 5.3-03 vrh vektora struje I_1 ne ide po kružnici nego po elipsi, kako je to prikazano u sl. 5.3-09 a). Zato je kod malih $\cos\varphi_2$ vanjska karakteristika niža, kako se to vidi iz sl. 5.3-09 b).
- c) U strujnom transformatoru imamo pad napona, kojeg nismo uzeli u obzir.
- d) Pogonski motori su obično eksplozioni motori. Njihova vanjska karakteristika ($n=f(P)$) je statična, padajuća. Sa smanjenjem brzine vrtnje pada napon, što nismo uzeli u obzir. Napon pada brže nego brzina vrtnje. Ako je generator opterećen induktivno, nema tereta za motor, pa se brzina vrtnje ne mijenja. Zato dobijemo, obzirom na taj utjecaj statike regulatora brzine vrtnje, generatorsku vanjsku karakteristiku prema sl. 5.3-10. Kod malih $\cos\varphi_2$ je vanjska karakteristika viša.



a)

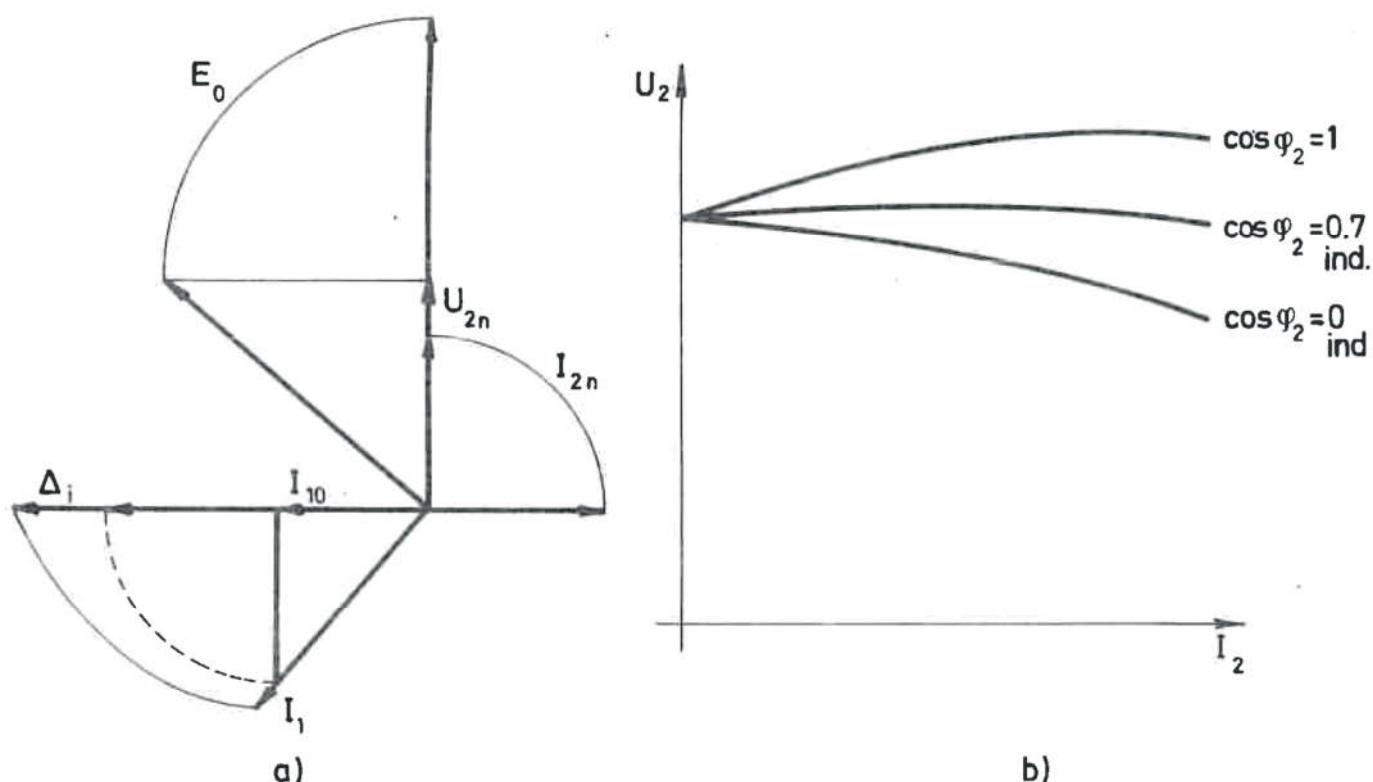


b)

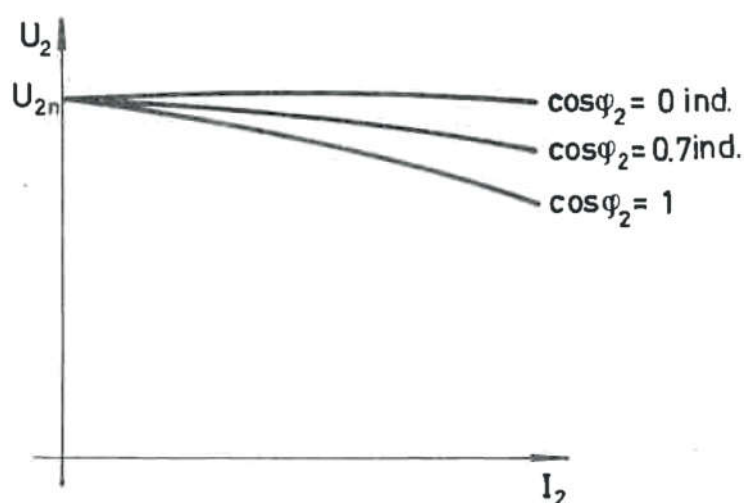
c)

Sl. 5.3-08 a) Vanjska karakteristika sinhronog generatora
b i c) Utjecaj karakteristike magnetiziranja na oblik vanjske karakteristike

e) Radni otpor uzbuđnog namota mijenja se zagrijavanjem stroja.
To može iznositi i 30% a time se mijenja napon.



Sl. 5.3-09 Utjecaj rasipanja u rotoru na vanjsku karakteristiku sinhronog generatora



Sl. 5.3-10 Utjecaj statike regulatora brzine eksplozionog motora na vanjsku karakteristiku sinhronog generatora

Ovi dodatni utjecaji bi tako pokvarili kompaundaciju, da bi takav generator bio praktički neupotrebljiv. Međutim, te negativne utjecaje možemo posebnim zahvatima skoro potpuno eliminirati.

Načini otklanjanja navedenih utjecaja:

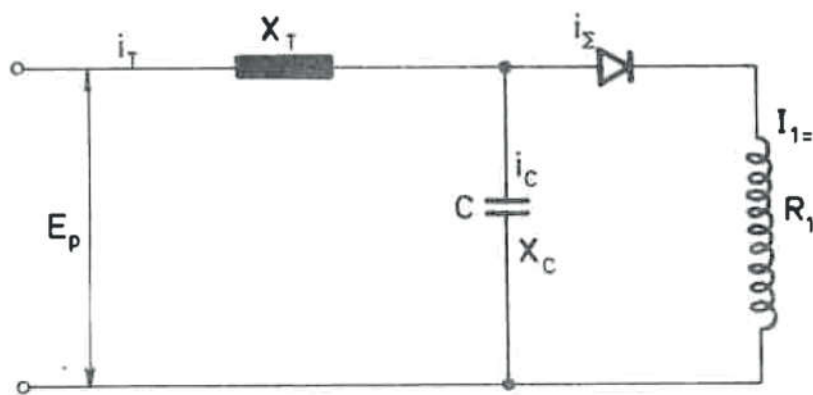
a) Utjecaj zakrivljenja može se znatno sma-

njiti odgovarajućim dimenzioniranjem magnetskog kruga na taj način, da bude karakteristika praznog hoda u dijelu A do B prema sl. 5.3-08 b) što više ravna.

b) i d) Ako gledamo sliku 5.3-09 b) i 5.3-10 vidimo, da su ta dva utjecaja protivna, jedan prouzrokuje padajuću karakteri-

stiku kod manjeg $\cos\varphi_2$, a drugi kod većeg. Prema tome treba tako uskladiti oba utjecaja, da nema više ovisnosti o veličini $\cos\varphi_2$.

- c) Odgovarajućim dimenzioniranjem može se taj utjecaj, koji je relativno malen, znatno smanjiti tako, da praktički ne smeta.
- d) Utjecaj promjene radnog otpora uzbuđnog namota se može potpuno eliminirati dodavanjem jednog kondenzatora prije ispravljača, kako je to prikazano u principijelnoj shemi na slici 5.3-11 sa tzv. Boucherot-ovim spojem.



Sl. 5.3-11 Boucherot-ov spoj

$X_T = \omega \cdot L_T$ - reaktanca strujnog transformatora

$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ - reaktanca kondenzatora

$$\underline{E}_p = j \cdot X_T \cdot \underline{i}_T + \underline{i}_\Sigma \cdot R_1$$

$$\underline{i}_T = \underline{i}_\Sigma + \underline{i}_C$$

$$\underline{i}_\Sigma \cdot R_1 = \underline{i}_C \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \underline{i}_C \frac{X_C}{j}$$

$$\underline{E}_p = j \cdot X_T \cdot (\underline{i}_\Sigma + \underline{i}_C) + \underline{i}_\Sigma \cdot R_1 = j \cdot X_T \cdot (\underline{i}_\Sigma + j \cdot \underline{i}_\Sigma \cdot \frac{R_1}{X_C}) + \underline{i}_\Sigma \cdot R_1$$

$$\underline{E}_p = \underline{i}_\Sigma \cdot [j \cdot X_T + R_1 \cdot (1 - \frac{X_T}{X_C})]$$

Ako je: $X_C = X_T$

onda je: $\underline{i}_\Sigma = \frac{\underline{E}_p}{j \cdot X_T}$

prema tome je uzbuđna struja neovisna od radnog otpora uzbuđnog namota.

6. DIMENZIJE

6.1. Glavne dimenzije i zakoni sličnosti

Područje primjene sinhronih strojeva vrlo je veliko: od najmanjeg sinhronog sata pa do najvećih hidrogeneratora za 1500000 kVA prividne snage, od malih promjera, nešto preko 10 mm, pa sve do promjera 20 m. Gotovo cijela strojarska tehnika ne raspolaže sa sličnim predstavnikom, kakvog ima elektrotehnika u sinhronom stroju.

Krajem prošlog i početkom ovog stoljeća konstruktori su razvijali oblik sinhronog generatora te je za vrijeme od nekoliko godina pobijedio najjednostavniji oblik, kakav imamo još i danas: stator u obliku šupljeg valjka sa namotom u aksijalnim utorima, rotor u obliku bubnja sa polnim namotima u utorima za turbogeneratore, odnosno u obliku zamašnjaka sa nataknutim polovima za višepolne izvedbe. Dalji će se razvoj ograničavati samo na detalje, koje diktira s jedne strane nastojanje da se postigne što veća ekonomičnost stroja, a s druge strane zahtjev za što većim snagama u jednoj strojnoj jedinici.

U konstrukciji sinhronih generatora razlikujemo tri izvedbe:

- a) turbogeneratore sa preko 1000 o/min za pogon sa parnom ili plinskom turbinom za kalorične centrale,
- b) za generatore sa srednjim brojem okretaja u minuti, tj. 200 do 1000 o/min, dakle za pogon pomoću eksplozivnih motora i za hidrocentrale sa relativno visokim i srednjim padom vode,
- c) sporohodne generatore, sa brojem okretaja manjim od 200 o/min, tj. za hidrocentrale sa malenim padom vode.

Glavne dimenzije električnog stroja određuje uglavnom poznata jednadžba:

$$P = c \cdot D^2 \cdot \ell \cdot n \quad (6.1-01)$$

gdje je:

P - snaga

c - konstanta, (Essonova)

D - unutrašnji promjer statora

l - dužina statora

n - broj okretaja rotora u minuti

Iz ove se jednadžbe vidi, da snaga raste razmjerno s volumenom, tj. sa težinom stroja, pod uvjetom, naravno, da ostanemo kod iste brzine vrtnje. Prema tome bi za težinu stroja kod iste snage bilo svejedno, da li gradimo stroj s većim promjerom, ili pak s većom dužinom. Zar ne vrijedi za strojeve poznati zakon prof. Vidmara, da snaga transformatora raste sa 4. potencijom povećanja linearnih dimenzija, kao što bi trebalo očekivati? Razumije se da taj zakon vrijedi, samo što je 4. potencija sakrivena u gornjoj jednadžbi u faktoru iskorištenja c . Taj faktor, naime, nije konstantan. Dalje je:

$$P = U \cdot I = k \cdot B \cdot v \cdot l \cdot I$$

Kod istog broja zavoja i kod iste gustoće struje raste struja sa promjerom stroja i s dubinom utora.

Kod istog broja utora na pol i fazu dubina utora bit će proporcionalna polnom koraku odnosno izrazu D/p . Struja I , dakle, bit će proporcionalna izrazu D^2/p . Ako obodnu brzinu v izrazimo sa promjerom i brzinom vrtnje, i ako pretpostavimo da se gustoća polja u zračnom rasporu ne mijenja, dobijemo:

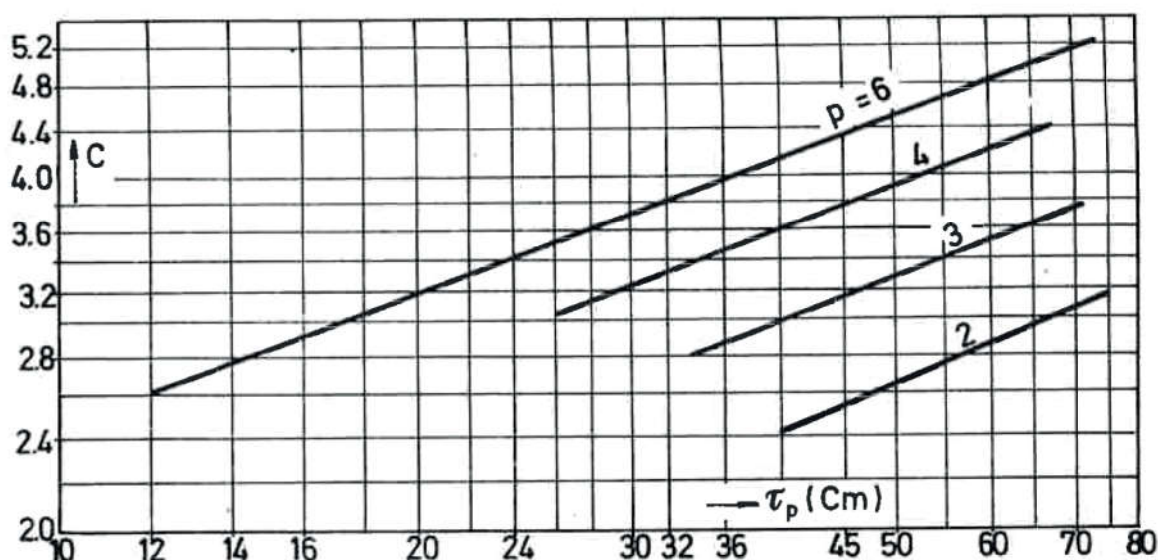
$$P = \frac{k \cdot D^3 \cdot l \cdot n}{p} \quad (6.1-02)$$

Prema Liwschitzu faktor iskorištenja c raste za dvopolne turbogeneratore gotovo proporcionalno s polnim korakom, i to (sl. 6.1-01 b):

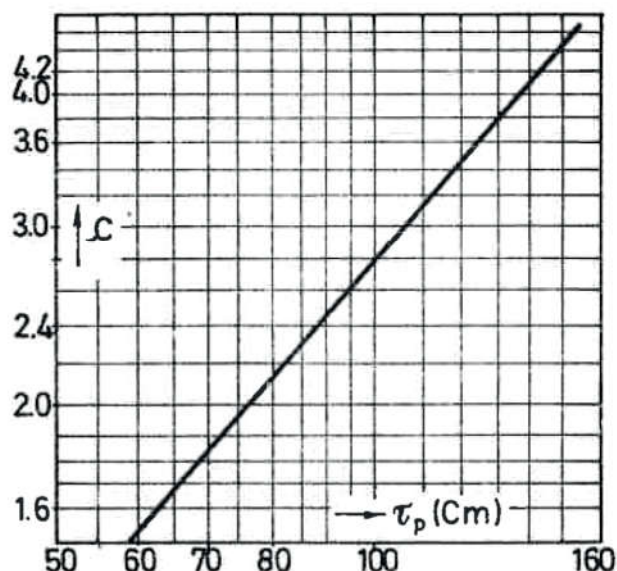
$$c = \frac{4,5 \cdot D}{p} = 2,86 \tau_p \quad (6.1-03)$$

Za turbogeneratore možemo, dakle, uvrstivši (6.1-03) u (6.1-01) pisati:

$$P = \frac{4,5 \cdot D^3 \cdot l \cdot n}{p}$$



Sl. 6.1-01 a) Faktor iskorištenja trofaznih sinhronih generatora s izraženim polovima



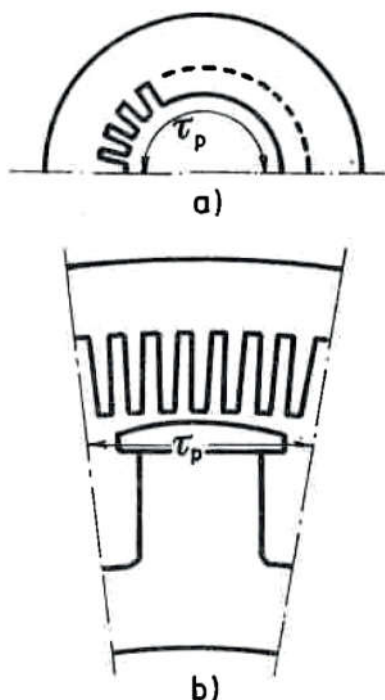
Sl. 6.1-01 b) Faktor iskorištenja turbogeneratora za 50 Hz i $\cos \varphi = 0,7$ u ovisnosti o polnom koraku

Umjesto $D^2 \cdot l$ dobijemo izraz $D^3 \cdot l$. Velika je razlika između druge i treće potencije. Rezultat je, doduše, u oba slučaja isti, samo slika "Esson-ove" jednadžbe (6.1-01) je nepravilna, jer ne daje jasan odnos između dimenzija stroja i njegove snage.

Kod višepolnih strojeva (preko 12-polova) poraste prema Liwschitzu faktor iskorištenja na (sl. 6.1-01 a)

$$c = 10 \frac{D}{p} \quad \text{do} \quad c = 30 \frac{D}{p}.$$

Da je faktor iskorištenja toliko veći kod višepolnih strojeva razumjet ćemo čim pogledamo sl. 6.1-02 i u presjeku kritički usporedimo jedan pol turbogeneratora s polom višepolnog modela kod iste dužine polnog koraka. U prvom redu je polje u rotoru turbogeneratora jako stisnuto, zbog čega moramo upotrebljavati samo malene gustoće u zračnom rasporu stroja. Mo-



Sl.6.1-02) Presjek dvopolnog (a) i višepolnog (b) generatora kod istog polnog koraka

gućnosti dobrog hladjenja svakako su veće kod višepolne izvedbe, koja je takoreći sa sviju strana otvorena, te zrak može strujati kroz zračni raspored između polova. Kod manjih višepolnih strojeva posebno još pomaže namot sa razlomljenim brojem utora na pol i fazu.

Umjesto sa promjerom možemo računati i sa obodnom brzinom. Ako uzmemo da je frekvencija konstantna, a ona je standardizirana sa 50 per/sek., onda je:

$$P = \frac{k \cdot D^3 \cdot \ell \cdot n}{p} = \frac{k_1 \cdot D^3 \cdot \ell}{p^2}$$

Ako računamo snagu za jedan par polova, dobijemo:

$$\frac{P}{p} = \frac{k_1 \cdot \ell \cdot D^3}{p^3}$$

Izraz D/p je proporcionalan obodnoj brzini v , a isto tako i polnom koraku τ_p . Možemo, dakle, pisati:

$$\frac{P}{p\ell} = k_2 \cdot v^3 = k_3 \cdot \tau_p^3$$

Snaga para polova na jedan metar dužine nezavisna je od brzine vrtnje, već ovisi jedino o obodnoj brzini, te raste s trećom potencijom obodne brzine ako se pretpostavlja nepromijenjena konstanta k_1 .

Kod iste obodne brzine i iste frekvencije imamo isti polni korak, istu snagu i, pošto je težina na jedinicu dužine razmjerna kvadratu polnog koraka, takodjer istu težinu po paru polova.

6.2. Granične snage

Kod određene brzine vrtnje s promjerom raste obodna brzina. Centrifugalna sila F_c raste s kvadratom obodne brzine, a obrnuto je razmjerna s polumjerom r :

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Naprezanja σ_s u obruču rotora rastu samo s kvadratom obodne brzine:

$$\sigma_s = \beta \frac{v^2}{g}$$

odnosno kod iste brzine vrtnje s kvadratom promjera:

$$\sigma_s = k \cdot D^2$$

S povećanjem promjera postigne konstruktor vrlo brzo najveće dozvoljeno naprezanje. Dalje može povećavati samo još dužinu stroja, a približno razmjerno i snagu stroja. Međutim, i s dužinom stroja rastu naprezanja i teškoće, pa tako dođemo kod svake brzine vrtnje do granične snage. Kod turbogeneratorsa 3000 o/min dođemo s promjerom rotora jedva nešto nad jedan metar, a njegova granična snaga iznosi kod hlađenja zrakom nešto iznad 150000 kVA prividne snage.

A kako je s graničnom snagom kod sporohodnih hidrogeneratorsa? Ako je najveća obodna brzina v_m određena konstrukcijom i materijalom, pa je kao takova određena nepromjenljiva veličina, dakle za graničnu snagu P_m stroja konstantna, onda možemo napisati:

$$\frac{P_m}{p\ell} = k_2 \cdot v_m^3 = k_4$$

Granična snaga na par polova je, dakle, određena veličina, pa granična snaga hidrogeneratorsa raste razmjerno s brojem pari polova odnosno obrnuto razmjerno s brzinom vrtnje.

Granične su obodne brzine za različite konstrukcije različite. Turbogenerator s homogenim masivnim rotorom s neizraženim polovima podnese najveću obodnu brzinu do cca 210 m/sek kod materijala najbolje kvalitete, dok kod sporohodnih strojeva sa izraženim polovima teško predjemo preko 120 m/sek.

Granična obodna brzina svakako vrijedi za najveću brzinu vrtnje s kojom treba da računamo kod pogona stroja. Dok kod parnih turbina propisi zahtijevaju, da kroz 2 minute

rotor izdrži za 25% povećanu brzinu vrtnje, a kod turbogeneratora velike snage za 20% povećanu brzinu, zahtijevaju propisi kod vodenih turbina 80 do 300%-no povećanje.

Računajmo iz granične snage turbogeneratora za 150000 kVA prividne snage graničnu snagu hidrogeneratora sa 24 para polova za pogon Kaplanovom turbinom. Kod računanja moramo uzeti u obzir, da treba računati sa 2,65-strukim povećanjem brzine vrtnje vodne turbine kod pobjega, prema 1,25-strukom kod parne turbine, i da je najveća dozvoljena obodna brzina cca 120 m/sek prema 210 m/sek kod turbogeneratora. Sve ove relacije utječu sa trećom potencijom na graničnu snagu stroja. Treba, međjutim, takodjer, uzeti u obzir, da turbogeneratore gradimo i do 6 m dužine, dok hidrogeneratore samo do 3 m dužine, i da je faktor iskorištenja, kao što je gore navedeno, 15/4,5 puta bolji za hidrogeneratore, tako da u našem slučaju dobijemo:

pobjeg	maksimal. obod.brz.	C	ℓ	p
--------	------------------------	---	---	---

$$P_m = 150000 \cdot (1,25/2,65)^3 \cdot (120/210)^3 \cdot (15/4,5) \cdot (3/6) \cdot 24 =$$

$$= 118500 \text{ kVA prividne snage.}$$

Unatoč 24 para polova granična je snaga 21% manja od granične snage generatora s jednim parom polova, treća potencija obodne brzine ima veliko značenje.

Teški zahtjev, da generator izdrži pobjeg turbine, utječe nepovoljno i na cijenu generatora. Snaga raste s trećom potencijom polnog koraka, a težina svakako samo s drugom potencijom, ako pretpostavimo, da su visine jarma, zubi i polova razmjerne s polnim korakom. Prema tome je specifična masa generatora, tj. masa za kVA prividne snage:

$$\frac{m}{P} = \frac{k_5 \cdot \tau_p^2}{\tau_p^3} = \frac{k_5}{\tau_p}$$

Masa, dakle, opada razmjerno s veličinom polnog koraka, pa naravno, s masom stroja i njegova cijena. Ako opet uspoređujemo s velikim turbogeneratorima, koji imaju masu od cca 2 kg/kVA prividne snage, moramo uzeti u obzir i razliku u fakto-

ru iskorištenja, kao i razliku u presjeku kod istog polnog koraka, koji iznosi cca 2:1 (sl.6.1-02). Ako tako računamo, morao bi u gornjem slučaju hidrogenerator sa 24 para polova težiti k

$$\frac{m}{p} = 2,2 \cdot (210/120) \cdot (2,65/1,25) \cdot (4,5/15) \cdot (2/1) \approx 5 \text{ kg/kVA}$$

Stvarno, međjutim, ne ćemo doći ni ispod 7 kg/kVA prividne snage. U čemu je uzrok? Opet u turbinskoj konstrukciji. Pogledamo li samo nacrt velikog hidrogeneratora pada nam u oči neprirodni razmjer jarma statora prema jarmu rotora. Jaram rotora ima višestruko veći presjek od jarma statora, višestruko veći nego što ga zahtijeva konstrukcija generatora. Uzrok je tome u zahtjevu konstruktora turbine, da mu konstruktor generatora ugradi u rotor za regulaciju turbine potrebni mD^2 . Turbina sama po svojoj konstrukciji ima relativno malen mD^2 , a on se ne može ni dodatno ugraditi. Voda, koja pokreće turbinu, ima ogromnu ustrajnost. Kod trenutnih rasterećenja regulator turbine ne smije odmah zatvoriti i tako zaustaviti ogromne vodene mase, jer mu inače prijeti tvrdi vodeni udar sa svojim posljedicama. Stoga mora regulator polako zatvarati turbinu. Pošto je pak generator rasterećen turbina nije opterećena, pa vodene mase potjeraju turbinu na sve veću brzinu vrtnje i tako se energija padajućih vodenih masa pretvara u rotacionu energiju sve brže rotirajućih masa agregata. Što veće su te mase, tj. što veći je mD^2 agregata, to manje će biti povećanje brzine vrtnje. Dozvoljeno povećanje brzine vrtnje u pogonu i vrijeme zatvaranja turbinskog regulatora određuje mD^2 hidroagregata. I opet je žrtva konstruktor generatora, koji mora zahtijevani mD^2 ugraditi u svoj generator; u rotor mora ugraditi željezne mase, koje su za funkciju generatora neaktivne, i koje osjetljivo poskupljuju njegovu konstrukciju, dok je mD^2 koji je uvjetovan samo proračunom generatora, (a naziva se prirodni mD^2 sinhronog generatora), daleko niži.

S A D R Ž A J

Strana

1. U V O D	1
1.1. Općenito	1
1.2. Usporedba: transformator - sinhroni generator . .	4
1.3. Izvedba sinhronog stroja	8
2. NAMOTI	11
2.1. Induciranje napona	11
2.2. Oblik polja	13
2.3. Faktori namota	17
2.31. Zvezdište vektora napona	17
2.32. Namot	20
2.33. Zonski faktor namota	21
2.34. Faktor skraćenog koraka	24
2.35. Faktori namota za više harmonike	25
2.4. Poništavanje viših harmonika kod malog broja utora	30
2.41. Namot s razlomljenim brojem utora na pol i fazu	30
2.42. Skošanje utora i polova	36
2.5. Polja	37
2.51. Stojeća polja	37
2.52. Izmjenična polja	40
2.6. Reakcija armature	46
2.61. Rotor s neizraženim polovima	46
2.62. Rotor sa izraženim polovima	47
3. TEORIJA SINHRONOG STROJA	52
3.1. Karakteristika praznog hoda	52
3.2. Vektorski dijagram i relativne vrijednosti	60
3.3. Karakteristika kratkog spoja i Potierov trokut . .	64
3.4. Utjecaj rasipnog polja u rotoru	69
3.5. Švedski dijagram i regulacione krivulje	73
3.6. Vektorski dijagram generatora s izraženim polovima	75
3.7. Udarni kratki spoj i reaktancija sinhronih strojeva	77
3.8. Kratkospojni omjer	97
3.9. Zakretni moment	98
4. SINHRONI STROJ U POGONU	106
4.1. Paralelni pogon	106
4.11. Sinhronizacija	106
4.12. Preuzimanje tereta	110

4.2. Statička i' dinamička stabilnost	112
4.21. Statička stabilnost	112
4.22. Dinamička stabilnost	114
4.3. Pogonski dijagram	121
4.4. Njihanje sinhronog stroja	132
4.41. Sinhronizirajući moment	132
4.42. Ekvivalentna mehanička slika	134
4.43. Vlastito njihanje	137
4.44. Prisilno njihanje kod paralelnog rada na krutu mrežu	140
4.45. Prisilno njihanje kod rada na vlastitu mrežu	143
4.5. Nesimetrični teret	147
4.6. Kružni dijagram	148
4.7. V-krivulje	155
5. SISTEMI UZBUDE	157
5.1. Klasična uzbuda	157
5.11. Suvremena uzbuda	165
5.2. Automatska regulacija napona	168
5.21. Uloga automatskog regulatora napona	168
5.22. Brzina odziva uzbuđnika i sistema uzbuđjivanja	176
5.23. Ovisnost potrebne brzine reguliranja napona o veličini sinhronog generatora	182
5.3. Kompaundirani sinhroni generator	184
5.31. Princip rada	184
5.32. Odstupanje od idealizirane slike - i načini otklanjanja	190
6. DIMENZIJE	195
6.1. Glavne dimenzije i zakoni sličnosti	195
6.2. Granične snage	198

