

Dr Milojko Čišić

OSNOVI ELEKTROENERGETIKE

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET SPLIT

1969.

P R E D G O V O R

Ova skripta nastala su na osnovu bilježaka za predavanja koja držim za studente elektronike III godine na Elektrotehničkom fakultetu u Splitu. Pri pisanju sam koristio razna djela sa područja energetike (vidi popis na kraju knjige). Skripta su tako napisana da se njima mogu, uz manja ispuštanja, služiti studenti i na drugim visokim školama koja imaju sličan program u ovoj oblasti. Predvidja se da se kurs energetike predje u toku jednog semestra sa tri sata predavanja sedmično, uz odgovarajuće laboratorijske vježbe i obavezan posjet nekom energetsom objektu (elektrani, transformatorskoj stanici i sl.).

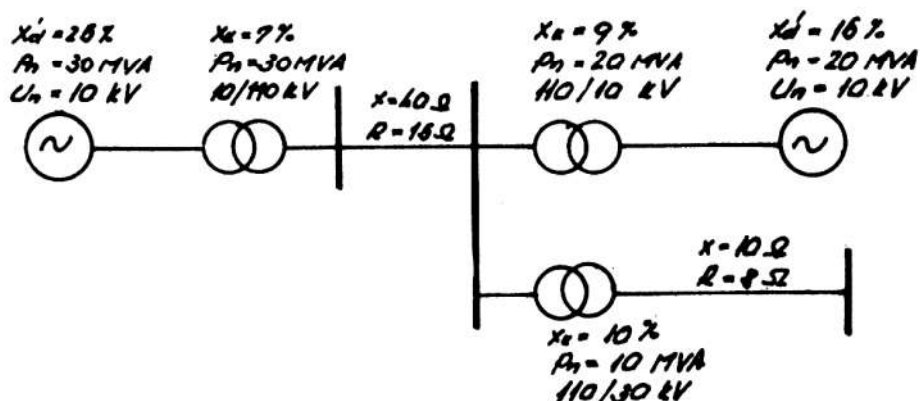
Želim izraziti zahvalnost svima koji su pomogli da ova skripta izađu, prije svega asistentu Stanku Milunu, dipl.ing. koji je sredió i dopunio čitav tekst, demonstratoru Stanku Županoviću, stud. IV godine koji je izradio crteže i pomagao kod redakcije teksta, te demonstratoru Mati Smaji koji je radio crteže, zatim višem laborantu Dušanu Petrošiću za organizaciju tehničkih poslova oko izrade matrica te Hristini Kostiov koja je sa velikom pažnjom obavila daktilografski posao. Posebno želim zahvaliti kolektivu Hidrografskog instituta JRM i načelniku kap. b.b. Radi Stijelji za veliku susretljivost pri tehničkim pripremama i štampanju djela a Vojno pomorskom školskom centru u Divuljama za materijalnu pomoć.

Vjerujem da će ova skripta ispuniti prazninu koja je postojala i da će pomoći studentima elektronike da bolje savladaju ovu materiju koja za njih ne predstavlja samo dio njihove tehničke kulture nego i dio neophodnog znanja koje moderni inženjer elektronike treba da stekne tokom studija.

U Splitu, januara 1969.

Dr Milojko Ćišić

ELEKTROENERGETSKI SISTEMI



Osnovni elementi elektroenergetskog sistema su: elektrane, rasklopna postrojenja, prenosni vodovi i potrošači.

1. Elektrane su bazični izvor električne energije u energetici. Osnovni elementi električne centrale su primarni pokretač (turbina, parno postrojenje, diesel motor, plinska turbina itd.) i sinhroni generator. Uzima se da generator napaja sistem sinusnom strujom konstantne frekvencije (u Evropi 50 Hz, u Americi 60 Hz). Napon generatora je standardiziran: 0,44; 6; 10; 20 kV.

2. Rasklopna postrojenja su čvorišta elektroenergetskog sistema. Ona omogućuju transformaciju i distribuciju električne energije u prenosnim sistemima.

3. Prenosni vodovi uz rasklopna postrojenja omogućuju povezivanje većeg broja elektrana u velike elektroenergetske sisteme, što je od velike važnosti jer se time postiže povećana

sigurnost snabdjevanja potrošača, ekonomičniji pogon i manje potrebe za instaliranje rezervne snage. Uz to oni omogućuju transport električne energije u velikim količinama i na velike daljine.

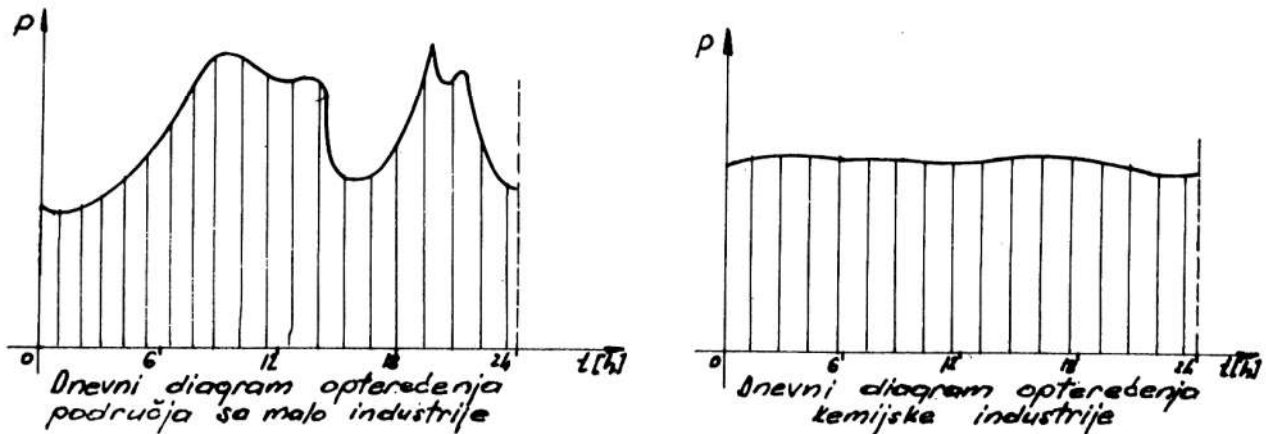
4. Potrošači su onaj krajnji element u elektroenergetskom sistemu zbog kojeg je sistem i napravljen. To mogu biti razni elektromotorni pogoni u industriji, zatim pogon elektrolize, aparati za domaćinstva itd. Bitno je za sve potrošače da se u njima vrši pretvorba električne energije u neki drugi oblik (toplinska energija, mehanička energija itd.).

1. EKONOMIKA ENERGETIKE

Prije početka izgradnje elektrane potrebno je veliko ispitivanje konzumnog područja, da bi se iz toga izvukli određeni zaključci i na temelju tih zaključaka izgradila električna centrala. To ispitivanje se temelji na principima statističke matematike i teorije korelacija pomoću koje se utvrđuje postojanje veza između pojedinih veličina. Takve veze se zovu stohastičke veze (jednom X odgovara više Y). Ako je faktor korelacije 0,5 do 0,9 veze između odnosnih veličina uzimaju se u obzir, a u koliko je manji od 0,5 ne uzimaju se. (Kod običnih funkcija gdje jednom X odgovara jedan Y pa je faktor korelacije jedan).

Rišenje pitanja veličine izgradnje elektrane svodi se na pitanje potrošnje i vremenskog rasporeda prema kojem elektrana treba davati energiju u mrežu. Zato se snimaju diagrami potrošnje odnosno konzumnog područja. Treba također voditi računa i o promjeni opterećenja tokom dužih vremenskih intervala (npr. tokom godine). Cilj izgradnje elektrane je da ona svojom proizvodnjom udovolji zahtjevima potrošača u svakom momentu. Pošto ne postoji mogućnost akumuliranja većih količina električne energije, mora u svakom momentu biti proizvodnja izjednačena s potražnjom, a elektrana mora biti tako dimensionirana da tom zahtjevu udovolji.

Elektrane u principu rade u sklopu većeg elektroenergetskog sistema, te zato pri njihovoj izgradnji treba voditi računa o karakteristikama tog sistema.



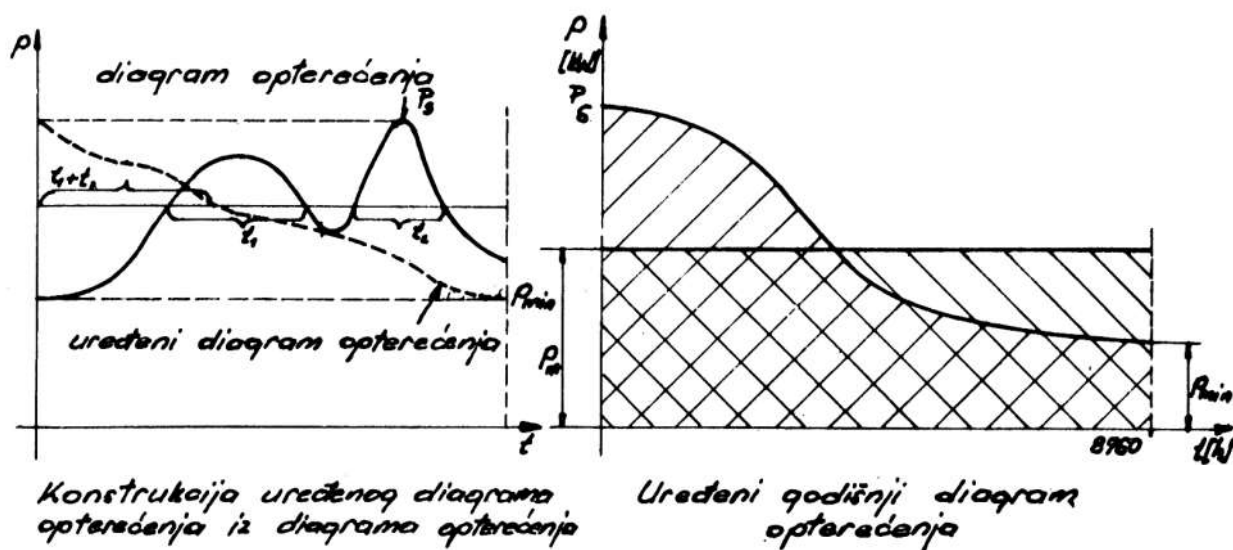
Da bi se postavljeni program izgradnje elektrane i njenog uklapanja u sistem uspješno riješio, razvijen je niz definicionih pojmova i faktora empiriskog karaktera:

1. Faktor opterećenja - m
2. Faktor upotrebnog vremena - h
3. Faktor istovremenosti - g
4. Faktor rezerve - r

1. Faktor opterećenja

Iz diagrama opterećenja (dnevnog, mjesečnog, godišnjeg) može se konstruirati uredjeni diagram opterećenja (krivulja trajanja opterećenja) iz kojega vidimo koliko dugo je elektrana opterećena odredjenom snagom.

Pomoću uredjenog godišnjeg diagrama moguće je pronaći neko srednje opterećenje P_m kojom bi elektrana trebala raditi čitavu godinu da bi proizvela istu energiju koju proizvode kad radi u datim uslovima. To prema diagramu znači da površina ispod pravca $P_m = \text{const.}$ mora biti jednaka površini ispod uredjene krivulje opterećenja. Ako tu površinu označimo sa S mora važiti relacija



$$S = P_m \cdot 8760 \quad \text{kWh}$$

Maksimalno opterećenje koje se pojavi tokom promatranog vremenskog intervala (godine) označeno je sa P_s kako je vidljivo sa diagrama. Odnos

$$m = \frac{P_m}{P_s}$$

zove se faktor opterećenja. Dalje se može pisati, posluživši se prethodnom relacijom

$$m = \frac{S}{8760 P_s}$$

Idealno bi bilo kad bi faktor opterećenja bio $m = 1$, jer bi tada elektrana mogla raditi s konstantnom snagom tokom cijele godine. U područjima sa jakom kemijskom industrijom m se kreće oko 0,8 a u mjestima bez industrijskih postrojenja može pasti i na 0,07. Za područje Dalmacije faktor opterećenja iznosi $m = 0,54$.

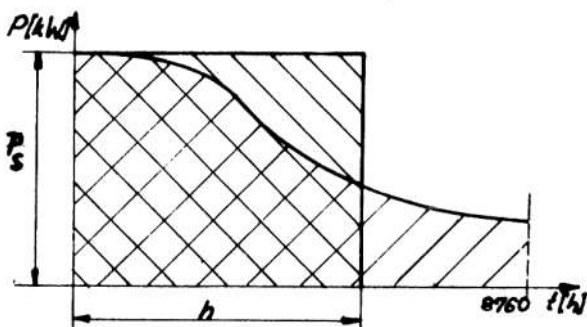
2. Faktor upotrebnog vremena

Faktor upotrebnog vremena kazuje koliko dugo bi elek-

trana morala raditi snagom jednakom maksimalnom opterećenju, da bi proizvela onu količinu energije koju tokom godine zahtjevaju potrošači. Prema tome važi relacija

$$h = \frac{S}{P_s}$$

odnosno $h = 8760$ m. Ovaj faktor za područja sa jakom industrijom iznosi 3500 do 5000 sati.



3. Faktor istovremenosti

Faktor istovremenosti predstavlja odnos između vršnog opterećenja grupe potrošača i ukupne instalirane snage te iste grupe

$$g = \frac{P_s}{P_{inst}}$$

(Instalirana snaga na jednom konzumnom području je suma nominalnih snaga svih potrošača na tom istom području).

Faktor g je uvijek manji od jedan i kreće se od 0,45 do 0,7

4. Faktor rezerve

Faktorom rezerve zovemo odnos

$$r = \frac{P_{inst}}{P_s}$$

Taj faktor treba uvijek biti veći od jedan. U velikim sistemima taj faktor ne mora biti velik, jer u slučaju kvara na jednoj elektrani sistem preuzima snabdjevanje potrošača. Tako na kopnu uzima se $r = 1,15$ do $1,25$, a na brodovima gdje centrala radi samo za svoje vlastite potrošače, faktor rezerve uzima se $r = 2$ do 3 .

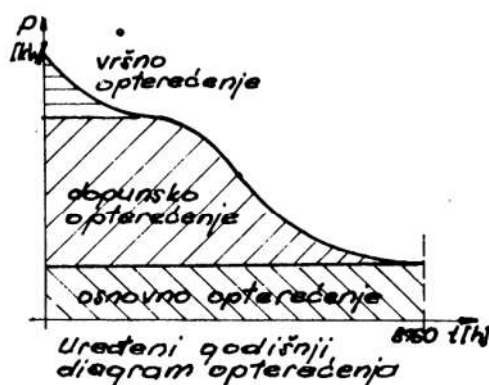
2. E L E K T R A N E

Prema funkciji u elektroenergetskom sistemu elektrane se dijele na osnovne, dopunske i vršne.

Osnovna elektrana je ona koja pokriva osnovno opterećenje sistema i dirigent je frekvencije mreže.

Dopunska elektrana ima tačno odredjen raspored proizvodnje energije i pokriva dopunsko opterećenje.

Vršna elektrana ima zadatak da pokriva vrhove potrošnje. Treba da se nalazi u konzumnom centru i da bude trenutno spremna za proizvodnju.



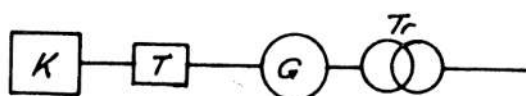
Prema energetsom izvoru za pogon primarnog pokretača, elektrane se dijele na dvije osnovne velike grupe: termoelektrane i hidroelektrane.

2.1. TERMOELEKTRANE

Sva ona postrojenja u kojima se vrši pretvorba toplinske u električnu energiju, zovu se termoelektrane. Izvor topline može biti izgaranje fosilnih goriva, izvori tople vode, nuklearne reakcije itd. Sve elektrane u kojima kao primarni pokretač služi parna turbina zovu se parne elektrane. Treba napomenuti da se grade i elektrane sa plinskim turbinama kao primarnim pokretačem.

Osnovni sastavni djelovi parne elektrane su:

- Parni kotao
- Parna turbina
- Sinhroni generator
- Transformator (sa rasklopnim postrojenjem)



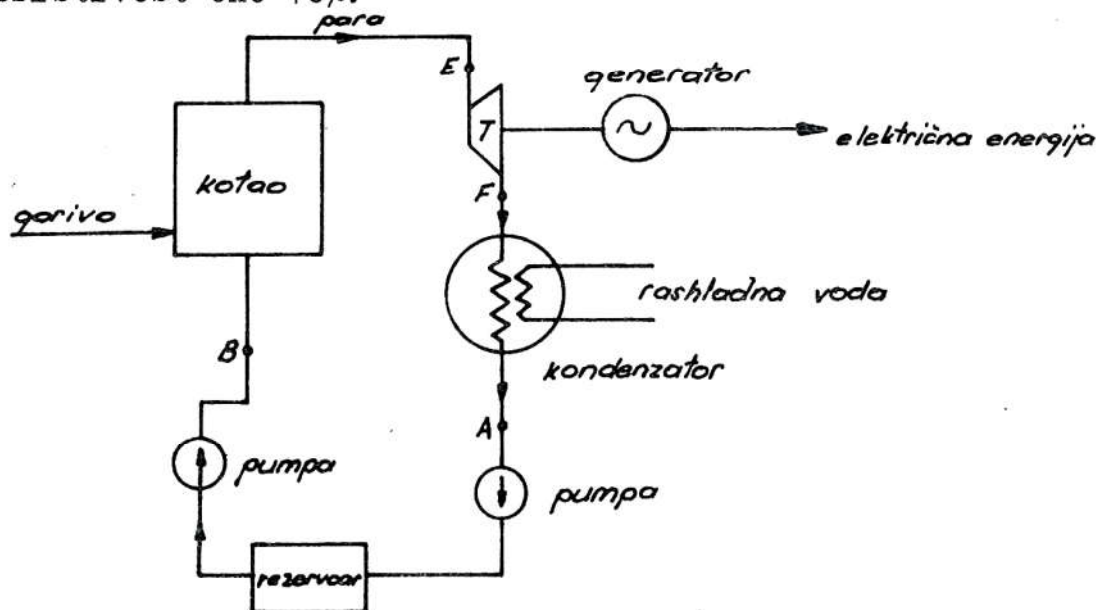
Shema pretvorbe energije

K - parni kotao
T - parna turbina
G - generator
Tr- transformator

Parni kotao je element gdje se toplinska energija pretvara u energiju vodene pare.

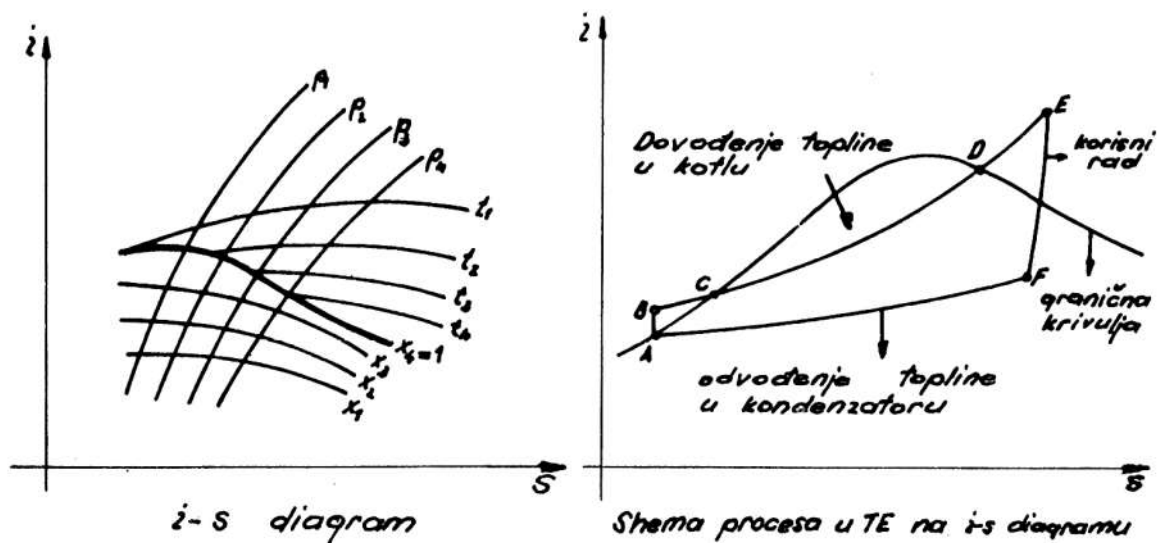
U parnoj turbini se kinetička energija vodene pare pretvara u mehaničku energiju koja se posredstvom generatora transformira u električnu energiju, te se uz pomoć transformatora i rasklopnog postrojenja šalje u mrežu.

Ovakav sklop: kotao - turbina - generator - transformator, zove se blok. Stepenn korisnosti ovakvog bloka kreće se oko 25%. Ako se elektrana kombinira sa toplanom onda se postiže iskoristivost oko 40%.

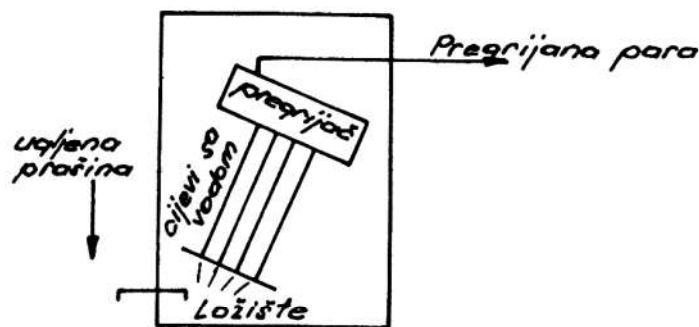


Shema procesa u parnoj TE

Proces u parnoj TE teče prema shemi. Pumpa ubacuje pojnu vodu u kotao gdje se ona ugrijava i pretvara u paru koja se pregrijava na određenu temperaturu i pod određenim tlakom, zatim se vodi do turbine gdje ekspandira do tlaka kondenzatora u kojem se kondenzira, zatim vraća u rezervoar i proces se ponavlja.

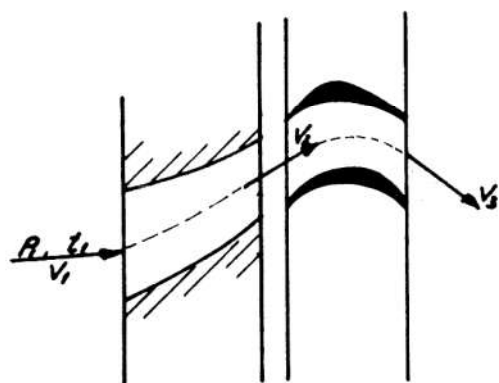
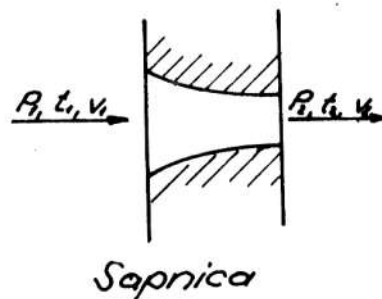


Parni kotao se sastoji iz ložišta, cijevi sa vodom i pregrijača. Parametri pare kod modernih kotlova su $p = 150 \text{ atp}$ i $T = 550^\circ\text{C}$, što daje iskoristljivost kotla do $\eta = 0,85$



Shematski prikaz parnog kotla

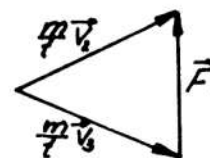
Parna turbina je uređaj u kome se toplinska energija pare, uslijed ekspanzije, pretvara u kinetičku energiju pare, a ova u mehanički rad. Glavni sastavni dijelovi turbine su stator i rotor. Stator se sastoji od jedne ili više sapnica. Kolo s vjencem lopatica na obodu, zove se rotor. Prema djelovanju parne turbine se dijele na akcione i reakcione, a ima i takvih koje su djelomično akcione a djelomično reakcione. Kod akcionih turbina para ulazi u sapnicu sa parametrima p_1, t_1 , u kojoj zbog suženog oblika ekspandira na stanje p_2, t_2 , a pri tom joj se brzina povećava od v_1 na v_2 , što znači da se unutarnja energija pare pretvorila u kinetičku energiju na izlazu iz sapnice. Sada mlaz pare ulazi velikom brzinom u prostor između lopatice rotora, gdje zbog savijenog oblika lopatice skreće i stoga tlači na lopaticu. Uslijed toga se pojavljuje sila na obodu rotora koja ga pokreće.



Princip rada akcione turbine

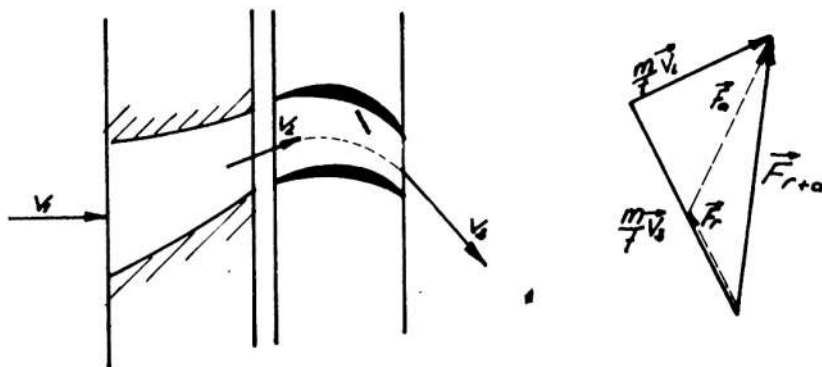
$$F \cdot t = m(v_2 - v_3)$$

$$F = \frac{m}{t} (v_2 - v_3)$$



Bitno je kod akcionih turbina da para ekspandira u sapnici, a ne i između lopatica rotora.

Kod reakcionih turbina ekspanzija pare se vrši i u statoru i rotoru turbine. Naime prostor između lopatica rotora se sužuje prema izlazu, pa se u tom prostoru vrši ekspanzija i para se ubrzava sa brzine v_2 na brzinu v_3 . Sada se sila javlja zbog skretanja pare tj. akcije, a i zbog ubrzanja pare među lopicama, a to je reaktivna sila F_r .



Princip rada reakcijske turbine

Treba napomenuti da para koja ulazi u turbinu ne smije sadržavati čestice vode, tj. mora se u $i - s$ diagramu nalaziti iznad granične krivulje ($x = 1$).

Bilans troškova gradnje TE po pojedinim elementima izgleda od prilike ovako:

Kotlovi i cjevovodi	30 %
Turbine, kondenzatori	25 %
Generatori, transformatori, raskl.postr. .	10 %
Zgrade	24 %
Postrojenje za pripremu vode	6 %
Postrojenje za dobavu goriva	5 %

100 %

Cijela TE

Specifični troškovi izraženi u USA dolarima po jednom kW, zavisni su o instaliranoj snazi TE.

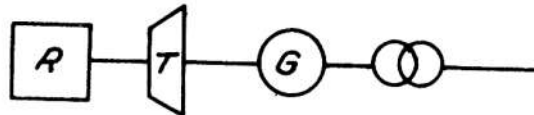
do 1000	kW	125 \$/kW
do 5000	kW	85 "
do 10000	kW	80 "
do 25000	kW	76 "
do 50000	kW	71 "
do 100000	kW	56 "

Da bi se shvatio značaj TE u proizvodnji električne energije, dovoljno je napomenuti da dvije trećine te proizvodnje otpada upravo na termoelektrane.

2.2. NUKLEARNE ELEKTRANE

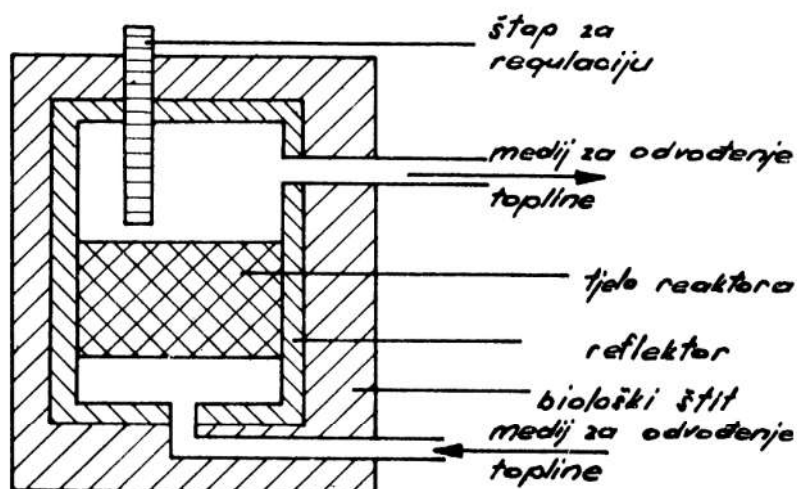
Nuklearne elektrane u principu su slične klasičnim termoelektranama, osim što je ložište zamjenjeno nuklearnim reaktorom. U reaktoru se odvija nuklearni proces i kao posljedica razvija se toplina, koja se, bilo posredstvom izmjenjivača topline, bilo direktno, predaje mediju (para, plin) koji pogoni turbinu.

R - reaktor
T - turbina
G - generator



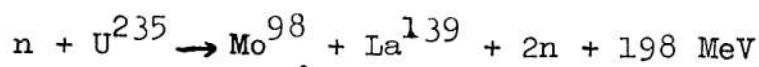
Nuklearni reaktor je uređaj u kojem se vrši raspada-
nje (fisijska) fisijom materijala (nuklearnog goriva) uslijed bombardiranja neutronima, a pri tom se oslobađaju novi neu-
troni sposobni da održe proces raspadanja (lančana reakcija),
i toplinska energija. Snaga reaktora daje se u MW, a ne u kcal
i ako se radi o toplinskom izvoru energije.

Osnovni element reaktora čini tijelo reaktora koje se sastoji
od "nuklearnog goriva" i moderatora. U tijelu reaktora se



odvija lančana reakcija. Fisioni materijali najčešći u primjeni U^{238} i U^{235} su prirodni fisioni materijali jer se nalaze u prirodnom uranu i to u omjeru 99,3% U^{238} i 0,7 % U^{235} . U^{235} je čisto nuklearno gorivo tj. može se sam upotrebiti u reaktoru. Međutim, najčešće se kao fisioni materijal upotrebljava obogaćeni prirodni uran, tj. uran u kojem se difuznom separacijom (ili nekom drugom metodom) poveća postotak U^{235} .

Ukoliko neutron pogodi jezgru U^{235} , ova se raspada, Jedna od linija raspada teče ovako:



Ovo je samo jedan od mnogobrojnih načina na koji se U^{235} raspada. Najveći dio oslobođene energije pojavljuje se u obliku kinetičke energije nastalih čestica, koja se potom uslijed sudara s drugim česticama pretvara u toplinu. Ostali dio energije otpada na razna zračenja.

Izotop urana U^{238} , ako se bombardira sporim neutronima prelazi u Pu^{239} koji je takodjer dobar fisioni materijal. Na taj način se energetske iskoristi sav prirodni, odnosno obogaćeni uran.

Moderatori (usporivači) su materijali čija je funkcija usporavanje neutrona da bi se dobili neutroni potrebni za lančane reakcije. Uslov za lančanu reakciju jeste da broj oslobođenih neutrona pri raspadu bude veći od broja neutrona iz prethodne generacije. Njihov omjer zove se faktor multiplikacije.

Medjutim, svaki oslobođeni neutron ne mora pogoditi jezgro jer izvjestan broj njih pobjegne izvan tijela reaktora, a s druge strane ni svaki pogodak ne dovodi do raspada. U nekim slučajevima doći će do elastičnog ili neelastičnog sudara, u drugim pak jezgra će apsorbirati neutron tvoreći izotop dotičnog materijala. Vjerojatnost sudara neutrona i jezgre i vjerojatnost da će taj sudar izazvati raspad, ovisi o vrsti jezgre i brzini neutrona. Za uran U^{235} te je vjerojatnost veća za spore neutrone. Zato se u reaktorima čiji fisioni materijal ima ovo svojstvo, sa "gorivom" mješa usporivač (moderator).

Materijal koji se može upotrebiti kao moderator mora imati slijedeća svojstva: malu atomsku težinu i malu vjerojatnost apsorpcije slobodnih neutrona. S obzirom na visoku cijenu takvih materijala, danas se kao moderatori upotrebljavaju uglavnom grafit, teška voda i obična voda. Ova posljednja ima relativno veliku sposobnost apsorpcije neutrona pa joj je primjena ograničena.

Da bi se u što većoj mjeri spriječio "bjeg" neutrona iz reaktora, on je obložen slojem materijala koji se zove reflektor. Materijal upotrebljen kao reflektor mora imati slična svojstva kao i materijal koji služi kao moderator, pa se i ovdje najčešće upotrebljavaju grafit i teška voda. Po svojim svojstvima mogli bi doći u obzir berilij i berilijev oksid, ali im je cijena visoka.

Treba napomenuti da ovi materijali moraju biti vanredno čisti da bi posjedovali tražena svojstva. Nečistoće od svega 0,0001% mogu ta svojstva pokvariti.

Teška voda se često upotrebljava kao moderator odnosno reflektor. Nalazi se u prirodnoj vodi u koncentraciji od 0,02% i dobiva se elektrolizom, frakcionom destilacijom ili zamjenom vodika deuterijem: $H_2O + D_2 = D_2O + H_2$. Proces dobivanja je skup. Jedna litra teške vode košta oko 100 dolara.

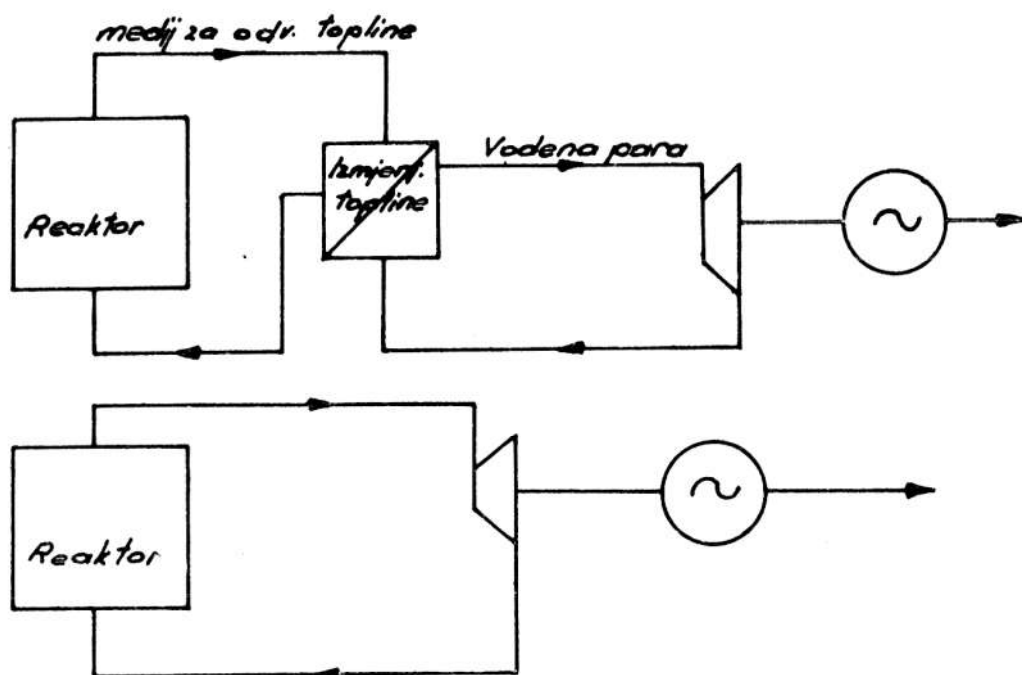
Da bi se proces u nuklearnom reaktoru mogao kontrolirati upotrebljavaju se štapovi za regulaciju. Materijali od kojih su gradjeni ovi štapovi, moraju imati veliku mogućnost apsorpcije slobodnih neutrona. Uranjanjem štapova u tijelo reaktora može se postići brži ili sporiji proces "izgaranja nuklearnog goriva". Materijal od kojeg se uglavnom rade štapovi za regulaciju je kadmij, a dolaze u obzir još bor, hafnij i sl.

Kao medij za odvođenje topline može poslužiti obična voda, ugljični dioksid, rastaljeni natrij, i td.

Nuklearna termoelektrana može biti realizirana u dva kruga ili pak u jednom. U prvom slučaju medij za odvođenje topline cirkulira u jednom krugu i predaje toplinu, posredstvom izmjenjivača topline, u drugi krug. Prvi krug se zove primarni ili reaktorski krug a drugi sekundarni ili turbinski krug.

U drugom slučaju medij za odvođenje topline ujedno je i medij za pogon turbine, a to je u pravilu voda odnosno vodena para.

Medij za odvođenje topline osim tehničkih svojstava (visoki koeficijent prelaza topline, jednostavnost pripreme, pogodno talište i sl.) mora posjedovati i izvjesna nuklearna svojstva: malu mogućnost apsorpcije slobodnih neutrona, stabil-



nost pod udarom neutrona itd. Ukoliko medij za uvođenje topline služi ujedno kao moderator, mora posjedovati i svojstva potrebna za uspješno moderiranje.

Obična voda kao medij za odvođenje topline iz reaktora ima stanovitih prednosti ali i mana. Najveća prednost je jeftinoća i iskustvo u pripremi vode, a mana joj je što posjeduje relativno veliku mogućnost apsorpcije slobodnih neutrona, pa se kao fisioni materijal u tom slučaju ne može upotrijebiti prirodni uran. Korozivno djelovanje vode također stvara neprijatnosti.

Prva sovjetska nuklearna TE izvedena je sa običnom vodom kao medijem za odvođenje topline, koja cirkulira u reaktorskom krugu pod pritiskom od 100 atp. Treba napomenuti da se voda u reaktoru nalazi u tekućem stanju te ujedno služi kao moderator, a kao reflektor služi također vodeni plašt.

Prva nuklearna termoelektrana u Velikoj Britaniji napravljena je sa ugljičnim dioksidom kao medijem za odvođenje

nje topline. Fisioni materijal je prirodni uran, a moderator grafit. Ugljični dioksid ima prilično visok koeficijent prelaza topline, kemijski je stabilan, a prilikom prolaza kroz reaktor ne postaje radioaktivan, a nema ni korozivnog djelovanja kao kod vode. Prvi jugoslavenski reaktor je takodjer ovog tipa.

Kao hladilo i moderator može poslužiti i neki organski materijal. Poljaci su pronašli rješenje sa terfenilom (iz fenilne grupe spojeva). Mana mu je velika nestabilnost. On se naime raspada pri prolazu kroz reaktor te ga je potrebno zamjenjivati što iziskuje nekoliko tona toga sredstva dnevno, a to zaoštrava i onako prilično akutan problem uklanjanja nuklearnih otpadaka.

Rastaljeni metal kao medij za odvođenje topline u reaktorskom krugu ima stanovitih dobrih svojstava, a to su u prvom redu visok koeficijent prelaza topline i mogućnost rada s visokim temperaturama uz niski tlak. To je dovelo do upotrebe rastaljenih lakih metala (natrij, bizmut, legura natrija i kalija i sl.) u ovu svrhu. Nezgoda je što ovi materijali uglavnom postanu jako radioaktivni pod djelovanjem neutrona.

Nezaštićen, nuklearni reaktor bi bio smrtonosan za svako živo biće na udaljenosti manjoj od nekih 500 m. Zbog nuklearnih reakcija u reaktoru pojavljuju se α , β i γ zračenja uz zračenje neutrona (brzih i sporih), a sva su ona štetna za organizam jer razaraju tkivo. Najteže je provesti zaštitu od gama zračenja i neutrona. Zbog električne neutralnosti, imaju ove zrake (čestice) veliku prodornu moć. Najbolja zaštita od gama-zraka su olovo, željezo i beton, a od neutrona bor, voda i grafit. Zato se reaktorski krug, odnosno čitavo postrojenje ukoliko je odvođenje topline i pogon turbine riješen u jednom krugu, zaštićuje biološkim štitom, a on je obično napravljen

od betona s dodacima željeza, bora i sl.

Uklanjanje radioaktivnih otpadaka spada takodje u biološku zaštitu. Ukoliko se radi o plinovitim otpacima koji se puštaju u atmosferu mora se paziti na lokaciju postrojenja u odnosu na naseljena područja i na zračna strujanja. Ako se pak radi o jako radioaktivnom materijalu smješta se on u betonske posude i deponira na mjesta gdje ne može štititi živim organizmima (zakopavaju se u zemlju, bacaju u more ili se voze u postrojenje za ponovnu obradu). Slabije radioaktivne materije spremaju se za izvjesno vrijeme u betonske rezervoare dok im radioaktivnost ne opadne, a zatim se ispuštaju u rijeku ili more.

Upravljanje postrojenjima u kojima postoji opasnost od radijacije vrši se servo-uredjajima.

2.3. HIDROELEKTRANE

Pored termoelektrana, hidroelektrane su najvažniji izvor električne energije. Primarni pokretač je vodna turbina. Kinetičku energiju vodnog toka pretvara ona u mehaničku, preda je generatoru koji je pretvori u električnu energiju i kao takvu daje u mrežu.

Postojanje hidroenergije i njena količina, povezano je sa geografskim položajem i klimatskim prilikama tokom jedne godine. Po bogatstvu hidroenergijom na prvom mjestu je Afrika. Oko 50% ukupne svjetske hidroenergije otpada na taj kontinent.

Na prvi pogled izgleda da su hidroelektrane najekonomičnije sredstvo za dobijanje električne energije, jer HE jedanput napravljena dalje radi praktički bez troškova (izuzev troškove tekućeg održavanja). Ali to nije uvijek tačno. Veliki vođeni tokovi sa velikim visinskim padovima nalaze se obično

izvan naseljenih područja. To znači da su hidroelektrane u pravilu locirane daleko od konzumnih centara, pa su troškovi i gubici prenosa veliki, ponekad čak i veći od troškova za nabavku i pripremu goriva i vode za termoelektrane. Osim toga vođeni potencijal ovisi o klimatskim karakteristikama dotičnog područja, pa hidroelektrane ne mogu u svako doba pokriti potražnju električne energije. Tome se u nekoj mjeri može doskočiti izgradnjom akumulacionih bazena, ali ne sasvim, a to povećava u priličnoj mjeri investicione troškove.

Iz vođenog toka možemo dobiti snagu

$$P = 9,81 \ Q \ H \quad [\text{kW}] = \frac{1000 \ Q \ H}{75} \quad [\text{KS}]$$

Q - protok $[\text{m}^3/\text{sek}]$, količina vode koja proteče na promatranom mjestu za vrijeme od jedne sekunde.

H - visinski pad $[\text{m}]$

Na priključnicama generatora bit će raspoloživa snaga

$$P_{\text{gen}} = 9,81 \ Q_k \ H_k \ \eta_t \ \eta_g \quad [\text{kW}]$$

$Q_k \quad [\text{m}^3/\text{sek}]$ - korisni protok

$H_k \quad [\text{m}]$ - korisni pad (ukupni pad umanjen za gubitke u cjevovodima i sl.)

η_t - stupanj djelovanja turbine

η_g - stupanj djelovanja generatora

Energija koju hidroelektrana može dati tokom jedne godine data je izrazom

$$\begin{aligned}
 A &= 9,81 Q_k H_k \eta_t \eta_g t_o = \\
 &= 9,81 I H_k \eta_t \eta_g \left[\text{kWs} \right] \text{ odnosno} \\
 A &= \frac{9,81}{3600} I H_k \eta_t \eta_g \left[\text{kWh} \right]
 \end{aligned}$$

Ako pretpostavimo $\eta_t = 0,85$; $\eta_g = 0,96$ dobijemo za ukupno raspoloživi rad tokom jedne godine

$$A = 0,0022 I H_k \text{ kWh}$$

gdje je $I = Q_k t_o \left[\text{m}^3 \right]$ iskorišteni volumen vode za promatranu godinu.

Za pretvaranje kinetičke energije vode u električnu energiju, od bitnog značaja su vodne turbine. Danas su u upotrebi uglavnom tri tipa vodnih turbina:

1. Pelton
2. Francis
3. Kaplan

1. Pelton turbina je tangencijalna turbina (vodeni mlaz je tangencijalan s obzirom na rotor) i spada u turbine slobodnog mlaza koje se često zovu i akcione (specifični pritisak mlaza na ulazu u rotor jednak je specifičnom pritisku na izlazu). Ova turbina dolazi u obzir za iskorištenje vodenih tokova karakteriziranih visokim padom i malom količinom vode. Specifični broj okretaja za ove turbine je $n_s \doteq 30$ i upotrebljava se za visinske padove $450 < H < 2000$ m. Specifični broj okretaja dat je općenito relacijom

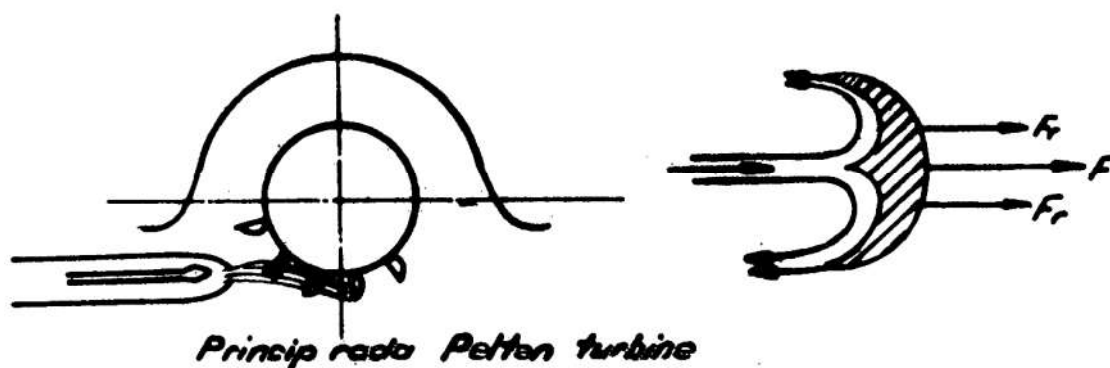
$$n_s = \frac{n \sqrt{P}}{H \sqrt[4]{H}}$$

gdje je

n - broj okretaja turbine

P - snaga turbine

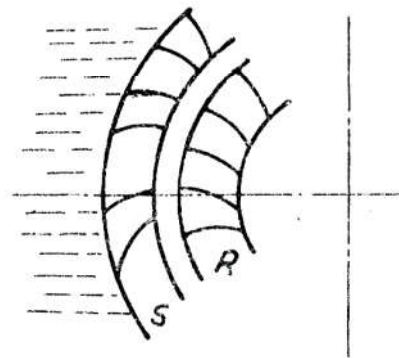
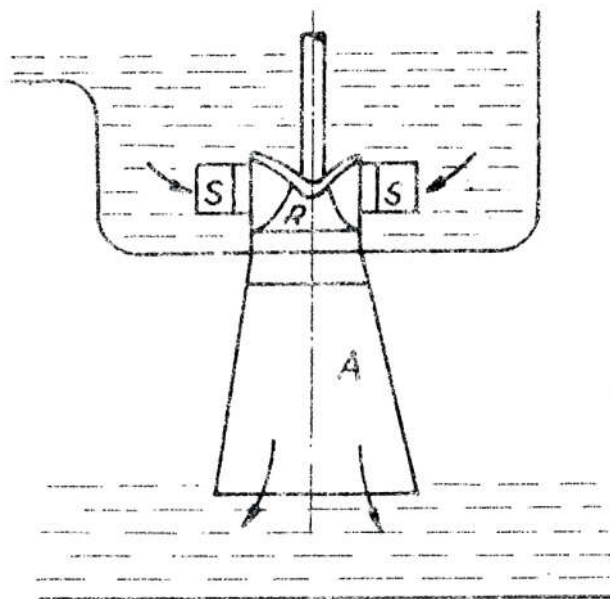
H - korištena visinska razlika }



2. Francis turbina je radijalna, odnosno radijalno-aksijalna turbina (s obzirom na položaj mlaza u odnosu na rotor) s viškom pritiska (specifični pritisak mlaza na ulazu u rotor veći je od specifičnog pritiska na izlazu iz rotora). Upotrebljava se za padove $45 < H < 450$ m i specifični broj okretaja $n_s = 65 - 250$.

Francisova turbina je snabdjevena difuzorskim aspiratorom koji omogućava potpunije iskorištenje pada i povoljniji smještaj turbine. Naime, upotrebom difuzora rotor turbine se može podignuti iznad donjeg nivoa vode što omogućava izvođenje montažnih radova i popravke turbine na suhom, neovisno o razini donje vode, a ipak je iskorišten cjelokupni raspoloživi pad vode.

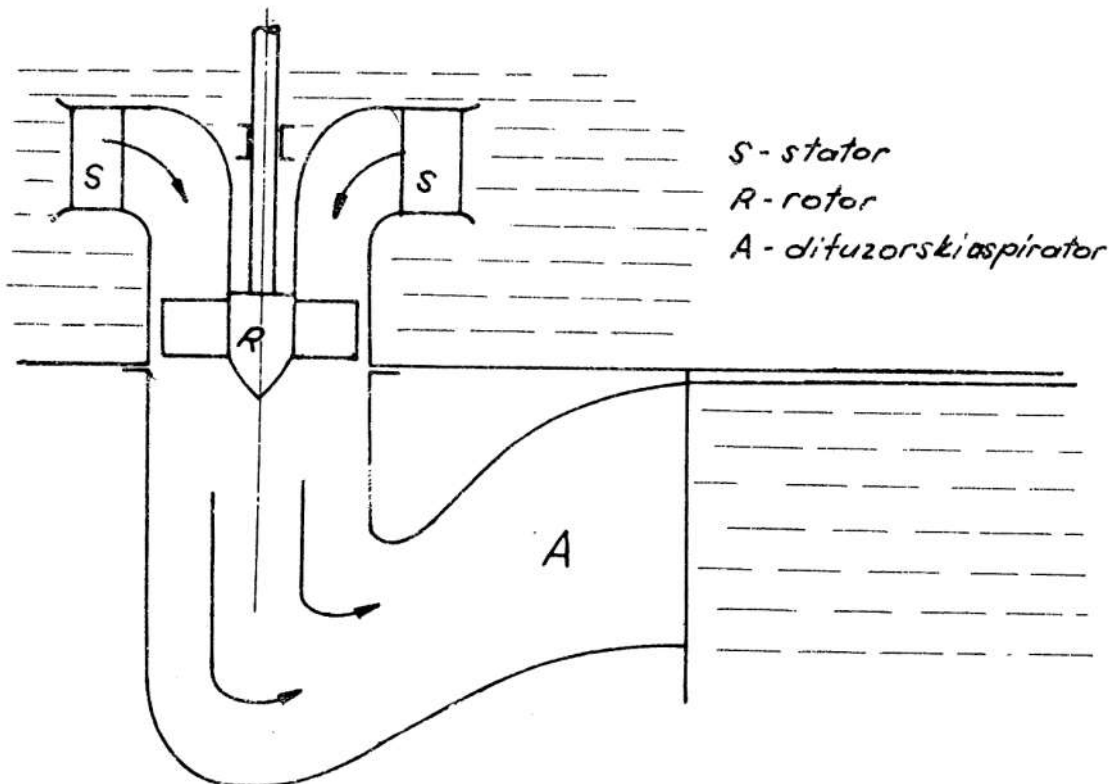
3. Kaplan turbina je propelerna turbina aksijalnog tipa (vodeni mlaz koji prolazi kroz rotor paralelan je sa osovinom rotora), s vrlo malim brojem lopatica rotora koji je gradjen u obliku propelera. Nagib lopatica rotora moguće je mijenjati, te tako varirati stepen djelovanja u širokim granicama i



S - stator
R - rotor
A - aspirator

držati ga na povoljnoj visini. Ova turbina spada u grupu turbina s viškom pritiska, te je snabdjevena aspiratorom.

Kaplan turbine su podesne za nizinska područja, tj. za područja gdje postoje velike količine vode uz mali visinski pad. Grade se za specifični broj okretaja $n_s = 1000$ te za padove $H < 45$ m.



S - stator
R - rotor
A - difuzorski aspirator

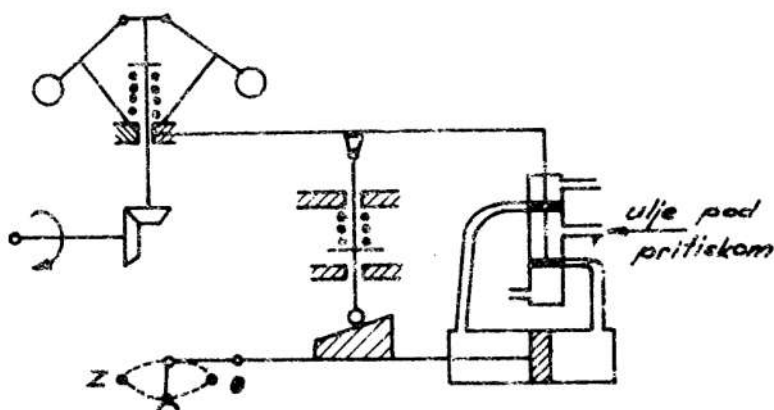
Kako se vidi, ova tri osnovna tipa turbine koja su danas u upotrebi, ne predstavljaju konkurenciju jedna drugoj. Pelton turbina dolazi u obzir za iskorištavanje vodenih tokova karakteriziranih visokim padom i malim količinama vode, tj. uglavnom u visokim gorskim predjelima. Francis turbina upotrijebit će se u nižim brdskim područjima gdje je vodena snaga karakterizirana srednjim padom i odgovarajućom količinom vode. Kaplanova turbina najpodesnija je u nizinskim područjima gdje se pojavljuju velike količine vode uz mali pad.

Cjene koštanja elektrana sa ovim turbinama po instaliranom kW snage kreću se

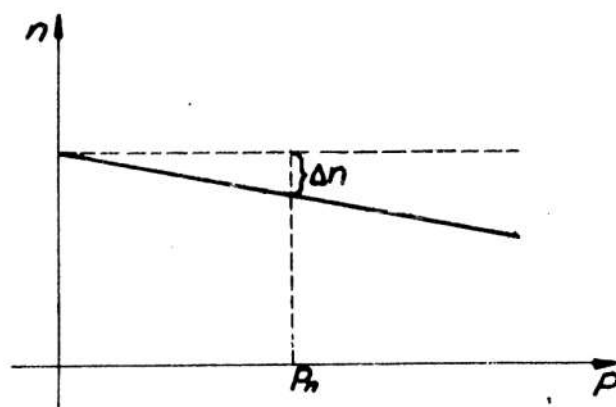
Pelton i Francis	100 - 150 \$/kW
Kaplan	120 - 200 \$/kW

Treba napomenuti da svaka turbina mora biti dimenzionirana za dvostruki broj okretaja od nazivnog tj. pri dvostrukom broju okretaja ne smiju nastupiti štetne posljedice zbog povećanja centrifugalne sile.

Turbina mora okretati generator konstantnom brzinom, da bi frekvencija struje koju generator daje u mrežu bila konstantna pri bilo kojem opterećenju. Zato se za regulaciju broja okretaja turbine upotrebljavaju automatski regulator.



Kad bi regulacija bila idealna onda bi statička krivulja regulacije bila pravac paralelan sa osi apscisa (crtkano), međutim u praksi ona izgleda kao na slici, tj. broj okretaja polako opada sa rastućom snagom. Statička karakteristika je važna kod paralelnog rada dviju turbina.



3. SINHRONI GENERATOR

Sinhroni generator predstavlja danas skoro jedini izvor električne energije (preko 90% od ukupno instalirane snage su upravo sinhroni generatori) za mreže izmjenične struje.

Iz osnova elektrotehnike poznat je Faraday-ev zakon indukcije koji matematički izražen glasi

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

Tok ϕ se odnosi na tok obuhvaćen promatranom petljom (zavojem). Ako pretpostavimo homogeno magnetsko polje, onda je tok obuhvaćen zavojem površine S koji se vrti oko osovine okomite na smjer tog polja kutnom brzinom ω (vidi Osnove elektrotehnike)

$$\phi = B S \cos \omega t$$

a odatle napon na krajevima zavoja

$$e = - \frac{d\phi}{dt} = B \omega S \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

Kako se vidi na krajevima zavoja dobili smo napon sinusnog oblika, a to je upravo poželjno.

Ovakve idealizirane prilike se obično ne ostvaruju u praksi. U tehnici jake struje svitci su obično razmješteni po obodu statora dakle miruju, a magnetsko polje se proizvodi pomoću uzbuđenog namota smještenog na rotoru koji se jednoliko okreće sa n okretaja u minuti. Ispod svakog vodiča (svitka) periodično prolaze N i S polovi elektromagneta, dakle, pros-

torno gledano, u svakoj sekundi se ispod jednog vodiča ponovi ista slika $n/60$ puta. Međutim, ako se na rotoru nalazi više pari polova koji su međusobno razmaknuti za isti kut, onda se magnetska i električna slika pod jednim vodičem ponovi $p \cdot n/60$ puta u sekundi. Dakle je frekvencija

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

Pošto smo kazali da se od generatora zahtjeva da napaja mrežu strujom konstantne frekvencije (koja je standardizirana i u Evropi je $f = 50 \text{ Hz}$) to je kod već izradjenog generatora sa p pari polova određena brzina vrtnje generatora:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{3000}{p} \quad \text{okr/min}$$

Iz toga proizlaze sinhronne brzine (sinhroni brojevi)

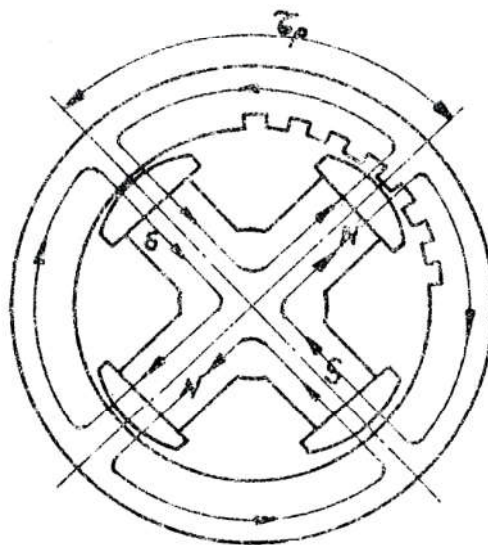
$p = 1$	$n = 3000 \text{ o/min}$
$p = 2$	$n = 1500 \quad "$
$p = 3$	$n = 1000 \quad "$
.....	

Namot na rotoru, dakle namot koji proizvodi potrebni magnet-ski tok zovemo uzбудni namot. Struja koja teče kroz ovaj namot zove se uzbudna struja.

Namot smješten u žljebove po unutrašnjem obodu statora u kojem se inducira napon, zovemo armaturni namot ili kratko **armatura**, a struju koja kroz njega teče armaturna struja.

Uzбудnu struju dovodimo na rotor pomoću kliznih prstena i četkica, a teret priključujemo direktno na izvode statorskog namota. Armaturne struje su obično mnogostruko veće od uzbudnih i to je jedan od razloga zašto se uzbuda stavlja na rotor.

Stator je napravljen od dinamo limova, jer je magnetsko polje u statoru vremenski promjenljivo. Namot armature je smješten u žljebove (autore) tako da se elektromotorne sile vodiča koji slijede električki jedan za drugim potpomažu. Veliki generatori su obično građeni kao trofazne jedinice, tj. na statoru su smještene tri nezavisna namota čije su osi razmaknute za jednaki električni kut od 120° .



Polovi su međusobno jednako razmaknuti za polni korak τ_p kojeg mjerimo na obodu statora. Građeni su od masivnog materijala jer kroz njih prolazi istosmjerni tok te nema opasnosti od vrtložnih struja. Polne papuče se ipak često izvođe lamelirano iz razloga u koje nećemo ovdje ulaziti.

Zakon indukcije možemo općenito pisati

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

U našem je slučaju $\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$ pošto se radi o istosmjernom toku, pa je

$$e = - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{dx}{dt},$$

gdje nam x predstavlja dužinu luka na obodu statora. Okretanjem rotora za ∂x , tok obuhvaćen jednim zavojem se promjeni za $\partial \phi = Bl \cdot \partial x$, a $\partial x = v \partial t$, pa je

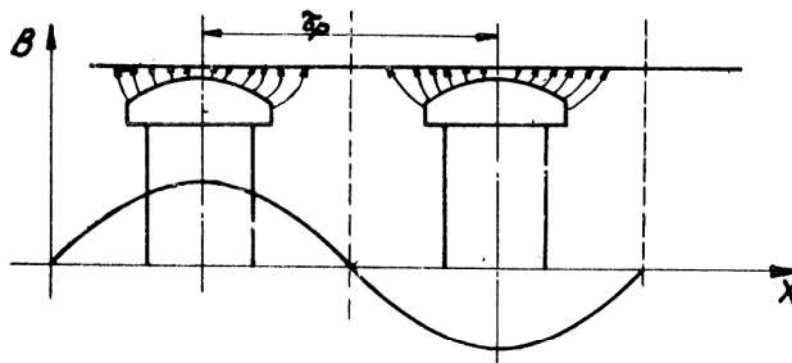
$$e = - Blv$$

gdje je

l - dužina vodiča u polju

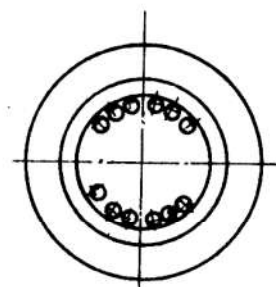
v - obodna brzina rotora

Vidimo dakle da je potrebno imati sinusnu indukciju da bi se inducirao sinusni napon u promatranom štapu, a to se u dobroj mjeri postiže prikladnim oblikovanjem polne papuče. Ukoliko indukcija u zračnom rasporu nije sinusna, može se uz pomoć Fourier-ove analize dati oblik razviti u red sinusa, a onda se viši harmonici daju prigušiti prikladnim razmještajem namota po obodu statora i sličnim mjerama, tako da napon na statoru bude što bliži obliku $e = E_m \sin \omega t$.



Sinhroni generator mora dobivati mehaničku energiju od pogonskog stroja. Kao pogonski stroj najčešće se upotrebljava parna turbina, vodna turbina i eksplozioni motor. Parne turbine rade s velikim brojem okretaja, pa se i generatori koje one pokreću grade za veliki broj okretaja (obično $n = 3000$ okr/min.). Ovi generatori se nazivaju turbogeneratori, građeni su u dvopolnoj izvedbi te im polovi nisu posebno istaknuti, pa se često zovu i generatori s neizraženim polovima. Rotor je gradjen u obliku cilindra sa polnim namotima u utorima na obodu rotora.

Ostali pogonski strojevi rade s manjim brojem okretaja, pa generatori koji su za njih gradjeni moraju imati više pari polova. To su



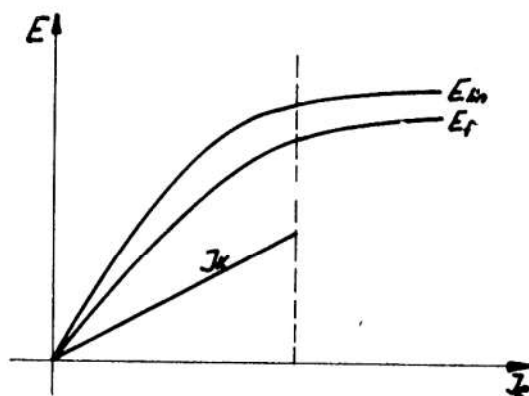
generatori s izraženim polovima i djelimo ih na one sa srednjom brzinom vrtnje ($n = 300$ do 1000 okr/min.) i sporohodne generatore ($n < 300$ o/min.). Rotor je gradjen u obliku zamašnjaka sa posebno istaknutim polovima koji nose uzbudni namot.

Snaga koju može davati generator određenih dimenzija ograničena je toplinskim gubitcima (gubitci u bakru i gubitci u željezu) koji rastu s opterećenjem. S druge strane geometrijske dimenzije generatora ograničene su centrifugalnim silama koje se javljaju na obodu rotora pri vrtnji. Razvojem tehnologije elektromaterijala te granice se s vremenom pomiču na više. Danas se grade generatori za 400 MVA i više, u jednoj jedinici.

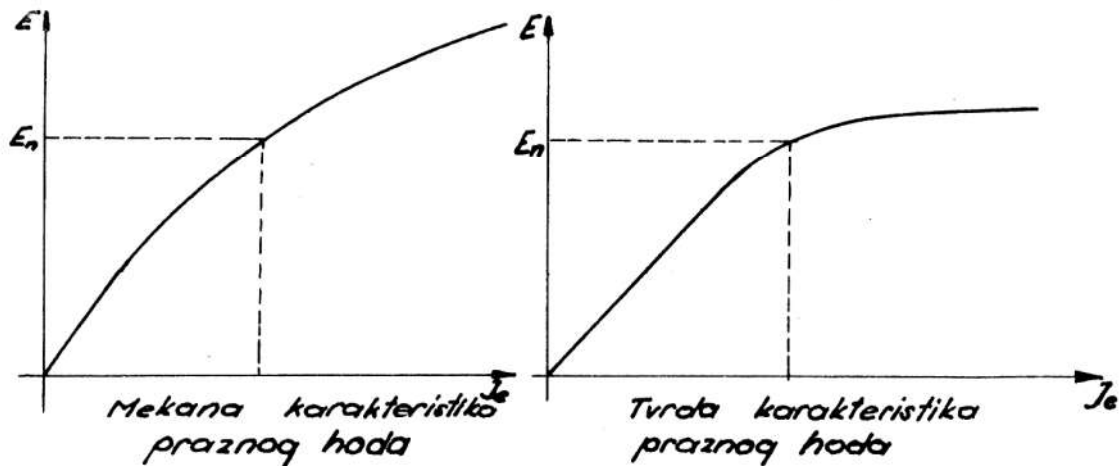
Specifični gubitci u željezu kod modernih generatora iznose $1,2$ do $1,5$ W/kg, što predstavlja veliki uspjeh tehnologije magnetskih materijala. Osim toga, razvojem tehnologije izolacionih materijala pronadjeni su materijali na bazi silikona koji zadržavaju dobra izolaciona svojstva pri temperaturama do 300°C , pa je i toplinska granica pomaknuta na više. Razvojem metoda hladjenja generatora (tekući vodik i sl.) omogućava se gradnja jedinica vrlo velike snage tj. granična snaga se sve više pomiče naprijed.

Karakteristike sinhronog generatora

Osnovna karakteristika sinhronog generatora je krivulja praznog hoda. Ona pokazuje ovisnost elektromotorne sile E o uzbudnoj struji I_e kod konstantnog broja okretaja. Moderni generatori rade u linearnom području karakteristike. Karakteristika može imati blaže ili jako izraženo koljeno, tj. zakrivljenost može

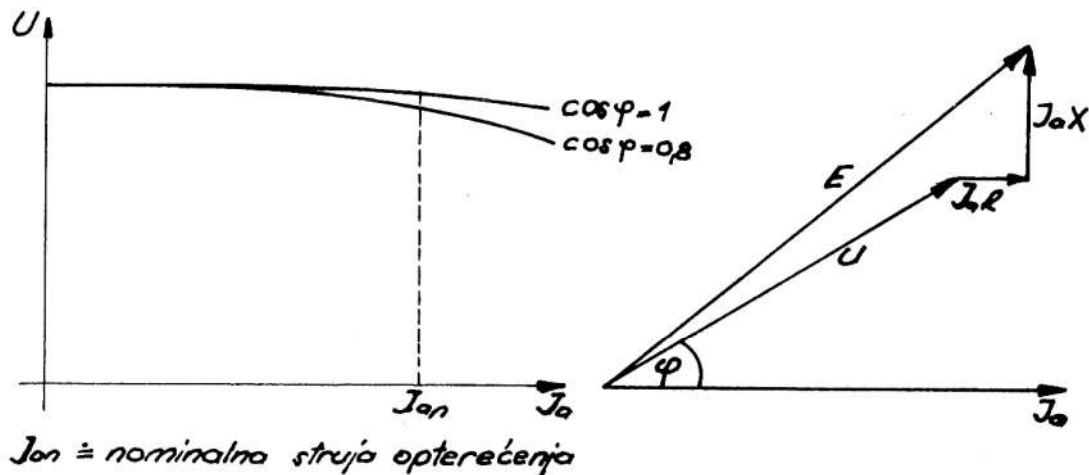


biti manja ili veća. U prvom slučaju kažemo da je karakteristika "mekana", a u drugom "tvrda". Iz mekane karakteristike možemo dobiti tvrdu ako magnetski krug na jednom mjestu oslabimo tj. ako napravimo utor u željezu (istmus = tjesnac). Tada na



tom mjestu zbog oslabljenog presjeka dodje ranije do zasićenja, te se $E - I_e$ karakteristika jače savije.

Daljna važna karakteristika je vanjska karakteristika generatora, a daje nam vezu između napona na stezaljkama generatora i struje opterećenja I_a .



Često se za sinhroni generator crta vektorski diagram na kojem su pregledno prikazani napon, padovi napona i elektromotorna sila kod određene struje.

Paralelni rad sinhronih generatora

Veliki sinhroni generatori skoro nikada sami ne napajaju mrežu. Obično 3-4 generatora u centralama rade paralelno na jednu mrežu, a pošto su i mreže danas povezane u jedan jedinstveni elektroenergetski sistem, rade i sve centrale paralelno na jednu veoma jaku i krutu mrežu. Rjedje se događa da generatori rade na vlastitu mrežu (brodske centrale, mali agregati kao krajnja rezerva u poduzećima i ustanovama koje ne smiju ostati bez izvora električne energije).

Kad generator stavljamo u pogon, moramo ga priključiti na mrežu. Kod toga moramo paziti da su naponi mreže i generatori jednaki po veličini, da su istofazni i da imaju istu frekvenciju. Ako jedan od ova tri uvjeta nije ispunjen, generator ne smijemo priključiti na mrežu, jer bi se uslijed razlike napona (vektorske razlike!) pojavile struje izjednačenja koje mogu postići čak i dvostruku vrijednost struje kratkog spoja, a to bi moglo uništiti generator.

Kod trofaznih generatora (kakve najčešće imamo) moramo najprije utvrditi redosljed faza. To možemo napraviti dok rotor miruje promatranjem početka namota ^{sвих} faza u smjeru okretanja, čiji redosljed nam daje i redosljed faza. U pogonu možemo to napraviti pomoću posebnog instrumenta.

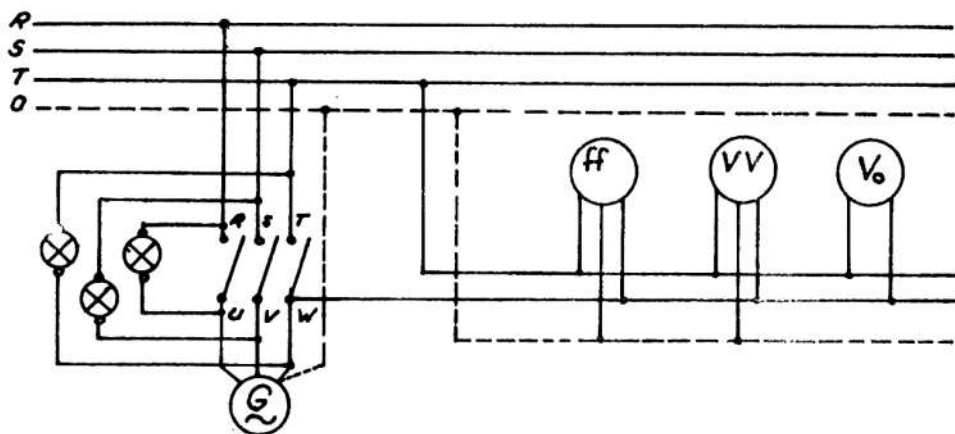
Pomoću pogonskog stroja generator pokrenemo do približno sinhrono brzine vrtnje određene izrazom $n = 60 \text{ f/p}$. Poslije toga uzbudimo generator tako da je napon na statoru generatora približno jednak naponu mreže. Da ne bi došlo do struja izjednačenja moramo postići istofaznost istoimenih faza mreže i

generatora tj. naponi na kontaktima sklopke za uključenje moraju s jedne i s druge strane biti u fazi. Ne smije biti razlike napona između kontakata iste faze. Ako generatorski napon kasni u fazi ~~za~~ naponom mreže generator ćemo ubrzati, a ako prednjači, generator moramo usporiti dok ne postignemo istofaznost.

Dakle, da bi se generator mogao priključiti na mrežu, moraju mreža i generator imati

- isti napon (po veličini i fazi)
- istu frekvenciju
- isti redosljed faza

Da navedeni uvjeti postoje može se verificirati pomoću instrumenata sa dvostrukom skalom koji istovremeno pokazuju iznos potrebnih veličina u mreži i generatoru. Kad je generator u blizini sinhronizma teško je utvrditi da li se vrti presporo ili prebrzo, pa se upotrebljava instrument koji nam to pokazuje, a zove se sinhronoskop. To može biti sinhronoskop s tri sijalice ili sinhronoskop s kazaljkom.



Voltmetar V_0 je nulti voltmetar i pokazuje razliku napona između kontakata sklopke, koji u sinhronizmu mora biti jednak nuli.

Sinhronoskop sa sijalicama nije ništa drugo nego tri sijalice spojene prema slici i prostorno razmještene u trokut redosljedom kako je pokazano. Napon na sijalicama varira s frekvencijom koja je jednaka razlici frekvencija mreže i generatora, od nule do dvostrukog nazivnog napona. U jednakom ritmu

varira i intenzitet svijetlosti sijalica. Pošto je razlika frekvencija u blizini sinhronizma malena, oko može pratiti te promjene. Zbog faznog pomaka od 120° napona pojedinih faza, izgleda nam kao da se svijetlo okreće u jednom ili drugom smjeru, a iz smjera okretanja možemo zaključiti da li se generator vrsti presporo ili prebrzo, pa ga prema tome ubrzati ili usporiti.

Sinhronoskop s kazaljkom je ustvari mali sinhroni motor priključen medju kontakte sklopke, koji dakle s razlikom frekvencija mreže i generatora vrti kazaljku u jednom ili drugom smjeru. Kad se frekvencije izjednače, kazaljka će se zaustaviti u nekom položaju koji nam pokazuje fazni pomak medju naponima oba sistema. Kad konačno taj pomak svedemo na nulu, može se uključiti sklopka. Uključenje se izvodi ručno ili automatski. Uredjaji za automatsku sinhronizaciju su dosta skupi, ali sigurnost i brzina njihovog djelovanja opravdavaju investiciju.

Kad je stroj sinhroniziran i priključen na mrežu, zbog jednakosti napona (po iznosu i fazi), on neće biti opterećen i energija pogonskog stroja se troši samo na trenje i ventilaciju generatora. Naravno, pretpostavlja se kako je to već na početku rečeno, da je mreža na koju sinhroniziramo generator dovoljno jaka i kruta, te je napon na stezaljkama generatora određen naponom mreže U_2 i ne može se mijenjati. Ako unutarnji napon generatora (koji je određen jačinom uzbudne struje) označimo sa E_0 , onda će razlika napona

$$\overrightarrow{\Delta U} = \overrightarrow{E_0} - \overrightarrow{U_2}$$

potjerati kroz generator struju koja će biti jednaka

$$I_2 = \frac{\overrightarrow{\Delta U}}{\overrightarrow{Z}}$$

gdje je Z tzv. sinhrona impedancija. Pošto je induktivni otpor mnogo veći od omskog, ovaj posljednji se zanemaruje pa govorimo o sinhronoj reaktanciji

$$X_d = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Sinhrona reaktancija je konstruktivna karakteristika generatora i daje se u postotcima. Ako sa X_d označimo apsolutnu vrijednost te reaktancije, onda je njena relativna vrijednost data u postotcima

$$x_d = \frac{X_d I_{2n}}{U_{2n}} 100\%$$

gdje je

I_{2n} - nominalna struja generatora

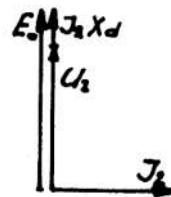
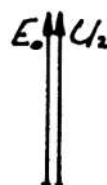
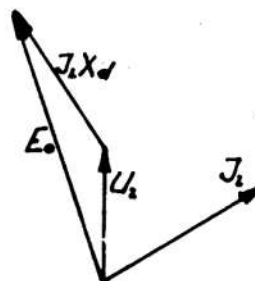
U_{2n} - nominalni napon na stezaljkama generatora.

Ako sada nacrtamo vektorski diagram u svijetlu iznesenih činjenica, on će općenito izgledati kao na slici.

Kad generator koji je sinhroniziran na mrežu radi u praznom hodu, onda je struja $I_2=0$, pa je $E_0=U_2$ po iznosu i fazi.

Povećamo li uzbudu generatora, njegov unutarnji napon E_0 će se povećati (napon U_2 je diktiran mrežom i krut) pa će se pojaviti razlika napona $\Delta U = E_0 - U_2$ koja će potjerati struju izjednačenja

$I_2 = \frac{\Delta U}{X_d}$. Omski otpor generatora



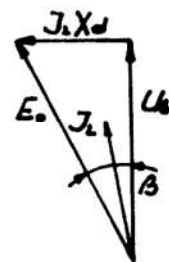
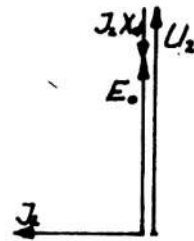
i otpor mreže možemo zanemariti u odnosu na sinhronu reaktanciju generatora.

Ova struja je praktički reaktivna, (okomita na napon) i predstavlja kapacitivni teret za mrežu.

Ako generatoru smanjimo uzbudu, napon E_0 će biti manji od napona mreže te će se opet pojaviti struja izjednačenja, ali suprotnog smjera. I ova struja je reaktivna, te generator predstavlja za mrežu induktivni teret.

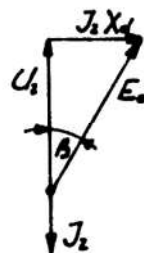
Kako vidimo mijenjanjem uzbuđene opterećujemo generator reaktivnom strujom.

Ako pak primarnom pokretaču, koji je do sada praktički bio neopterećen, povećavamo punjenje (povećamo dovod vode vodnoj turbini, dovod goriva dizl-motoru, dovod pare parne turbine i sl.), on će nastojati da ubrza generator. Međutim, čim se unutarnji napon generatora pomakne prema naponu mreže za neki kut β , pojavit će se razlika napona $\Delta \bar{U} = \bar{E}_0 - \bar{U}_2$ prema slici, i potjerat će struju izjednačenja koja je praktički u fazi s naponom te predstavlja radnu struju. Generator daje snagu u mrežu.



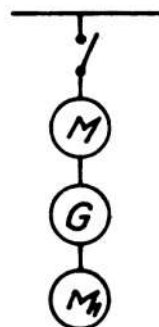
Veličina kuta β određena je aktivnom snagom koju generator daje u mrežu, odnosno snagom pogonskog stroja koju on daje generatoru.

Ukoliko opterećujemo osovinu generatora, umjesto što mu dovodimo snagu, unutarnja EMS generatora zaostaje za naponom za kut β , generator radi kao motor te uzima struju iz mreže.

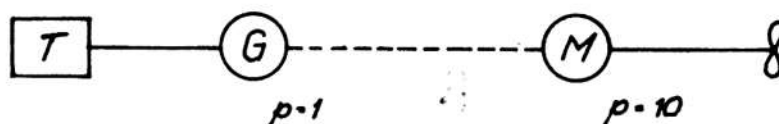


Dakle u biti nema razlike između sinhronog generatora i sinhronog motora. Broj okretaja sinhronog motora je konstantan (sinhroni broj), te će ga se upotrebiti tamo gdje je potrebno da brzina bude konstantna bez obzira na opterećenje.

Sinhroni motor se stavlja u pogon pomoću budilice i dodatnog motora M_1 koji služi da sinhroni motor dovede do sinhronne brzine. Kad se sinhronizacija postigne motor M_1 se isključi. Sinhroni stroj se može upotrebiti kao kompenzator. Vidjeli smo da se promjenom uzbude može postići da sinhroni stroj djeluje kao potrošač kapacitivne struje (ili generator induktivne struje), pa se to primjenjuje da bi se kompenzirala pretežna induktivnost mreže.



Sinhroni motor je našao veliku primjenu kod okretanja propelera broda (propulzija broda).



Promjenom broja okretaja turbine mijenjao bi se i broj okretaja motora M koji se poslušno ravna prema generatoru (električna osovina).

Obrtni moment na osovini trofaznog generatora koji on prima od pogonskog stroja, odnosno koji daje u motorskom režimu rada, dat je relacijom

$$M = \pm \frac{\sqrt{3} p U_{2n} I_k \sin \beta}{2 \pi f 9,81} [\text{kpm}]$$

gdje je

- p - broj pari polova
 U_{2n} - nominalni napon generatora (motora)
 I_k - struja kratkog spoja
 β - kut za koji napon U_{2n} (prethodi) zaostaje za unutarnjim naponom generatora

Snaga koju bi izmjerili vatmetrom na stezaljkama generatora bi bila:

$$P_2 = \sqrt{3} U_{2n} I_2 \cos \varphi$$

Iz slike slijedi

$$I_2 X_d \cos \varphi = E_o \sin \beta$$

pa je

$$P_2 = \frac{\sqrt{3} U_{2n} E_o \sin \beta}{X_d}$$

Kako je

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

slijedi $P_2 = \sqrt{3} U_{2n} I_k \sin \beta$

Obrtni moment je povezan sa snagom relacijom $M = \frac{P_2}{\omega'}$, gdje je ω' prostorna kutna brzina vrtnje generatora:

$$\omega' = 2 \pi \frac{n}{60}$$

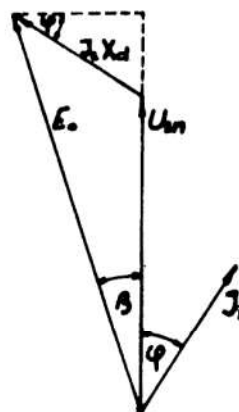
Kružna frekvencija

$$\omega = 2 \pi f = 2 \pi \frac{pn}{60},$$

pa slijedi

$$\omega' = \frac{\omega}{p}$$

te je moment na osovini generatora

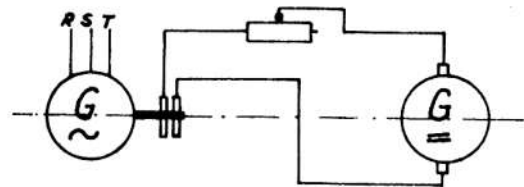


$$M = \frac{p P_2}{\omega} = \frac{\sqrt{3} p U_{2n} I_k \sin \beta}{2 \pi f} [Nm]$$

Uzbuda sinhronog stroja

Magnetsko polje potrebno za induciranje napona u faznim namotajima generatora, dobivamo pomoću tzv. uzbuđenog namota na rotoru. Taj namot je protjecan, kako je već rečeno, istosmjernom strujom tražene jačine. Ovu istosmjernu struju (uzbudu) kod klasičnih generatora dobivamo od malog istosmjernog generatora (budilice) koji je postavljen na istoj osovini sa sinhronim generatorom.

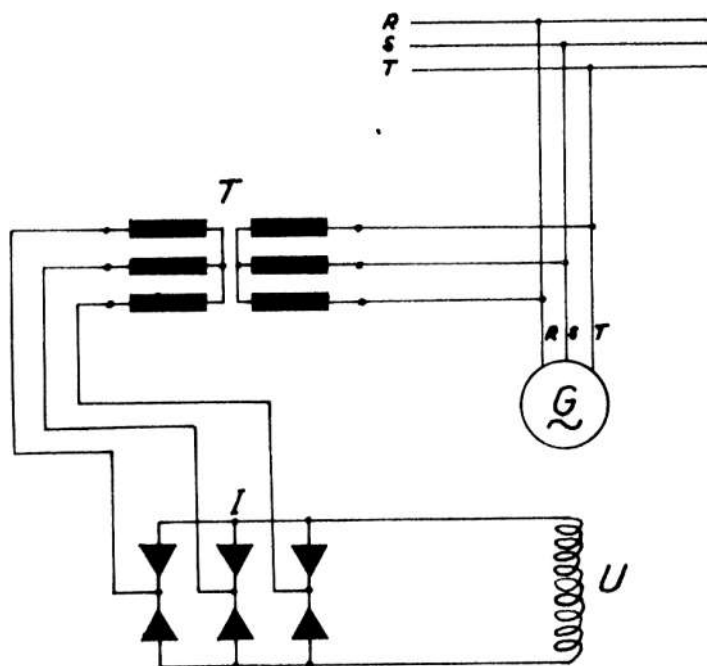
Istosmjerni generator je u biti sinhroni generator kojemu je uzbuđni namot smješten na stator, a glavni namot na rotor. Inducirani izmjenični napon se onda posredstvom kolektora ispravlja, tako da na četkicama dobijemo istosmjerni napon.



U novije vrijeme se mnogo grade tzv. samouzbuđni generatori, ali samo za manje snage.

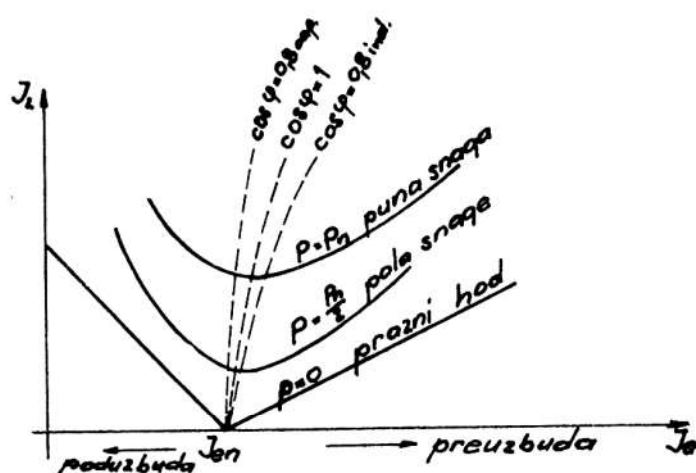
Naime, magnetski polovi i prije uzbude posjeduju mali remanentni magnetizam. Kad se rotor zavrti, induciraće se zbog toga u glavnom namotu neka mala struja koju onda ispravljamo pomoću suhih ispravljača i dovodimo rotorskom namotu, ona pojača polje koje onda inducira viši napon, struja koju dobija rotor se poveća i tako se proces nastavlja dok na stezaljkama ne dobijemo željeni napon.

Interesantan je dijagram u kojem su na apscisu nanesene vrijednosti uzbude, a na ordinatu vrijednosti armaturne struje, uz mehaničku snagu na osovini kao parametar. Ako se to napravi, dobiju se krivulje u obliku slova V koje su karak-



Shema uzbuđe samouzbudnog generatora

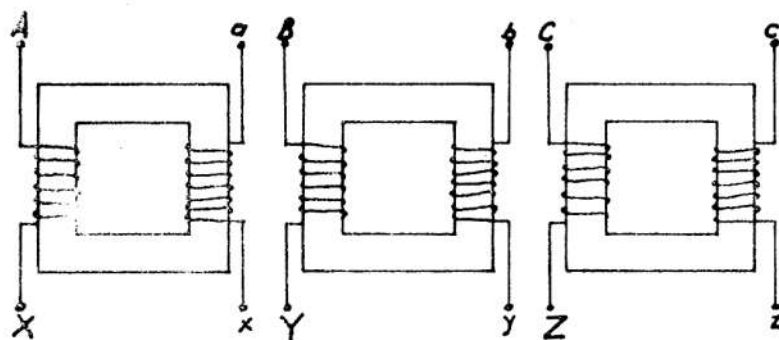
teristične za promatrani sinhroni stroj, a zovu se V-krivulje. Oblik V-krivulja je ovisan o sinhronoj reaktanciji generatora. Oštre V-krivulje znače da stroj ima malu sinhronu reaktanciju. Što je sinhrona reaktancija veća to su V-krivulje tupljeg oblika.



4. TRANSFORMATOR

Predmet ovog kratkog izlaganja bit će energetske trofazni transformatori. Oni se u pravilu izvode kao transformatori sa željezom. Na željeznom jezgru sastavljenom od transformatorskih limova, namotan je trofazni namot (primarni i sekundarni), a sve skupa je smješteno u kotao sa transformatorskim uljem.

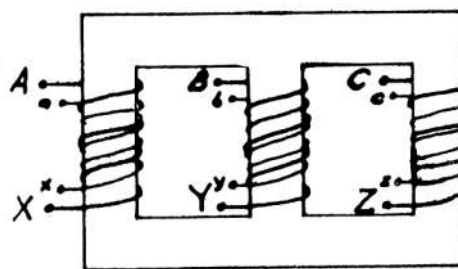
S obzirom na oblik jezgra postoje dva osnovna tipa: američki tip i evropski tip. U prvom slučaju trofazni transformator je sastavljen od tri obična jednofazna transformatora (vidi sliku).



U drugom slučaju (evropski, "jezgrasti" tip) trofazni transformator je gradjen kao jedna jedinstvena jedinica sa tri stupa na kojima su smješteni primarni i sekundarni namot.

Prednosti evropskog tipa transformatora u odnosu na američki su sljedeće:

- Zahtijevaju za svoj smještaj manju površinu
- Lakši su i jeftiniji (za oko 20%)
- Postoji samo jedna jedinica za spajanje i rukovanje.

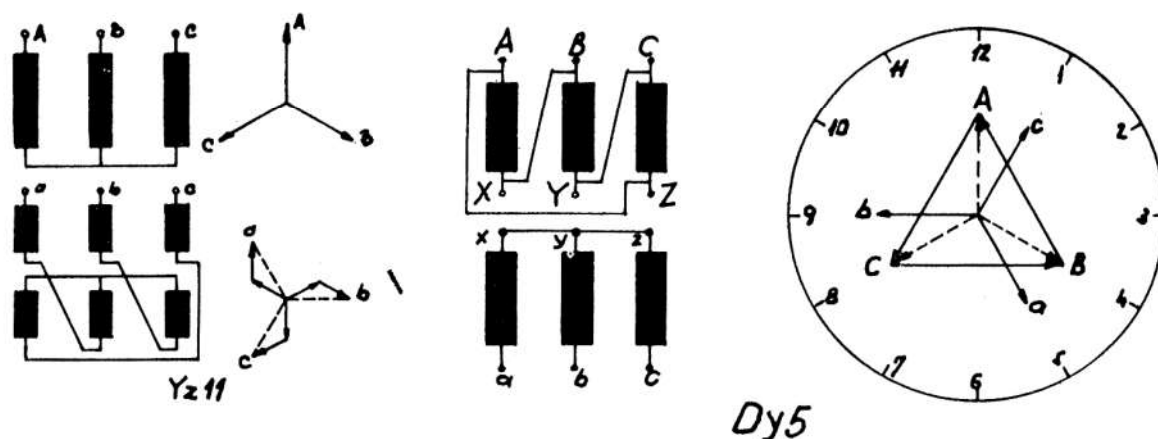


Razlozi zbog kojih se prvi tip ipak zadržao u Americi su:

- Manja težina po jedinici, pa prema tome lakši transport.
- Manje investicije za rezervu (kod evropskog se tipa kao rezerva mora uzeti cijela trofazna jedinica, a kod američkog je dovoljna jedna jednofazna jedinica, jer kvar rijetko nastupa u više faza istovremeno).
- U koliko se pojave nesimetrije tokova, štetne posljedice su neznatne, što nije uvijek slučaj i za evropski tip kod kojeg ne postoji magnetski put za zatvaranje nesimetričnih komponenti toka.

Namote trofaznog transformatora možemo spojiti na tri osnovna načina: zvijezda, trokut, cik-cak. U tekstu, spoj u zvijezdu označuje se slovom Y odnosno y, spoj u trokut slovom D odnosno d, spoj cik-cak slovom Z odnosno z. Velika slova se odnose na namot višeg napona, a mala slova na namot nižeg napona. Uz gornje oznake spoja često susrećemo i broj. Taj broj nam kazuje koliko je napon jedne faze na primaru fazno pomaknut prema naponu istoimene faze na sekundaru. Prema tome oznaka npr. Dy5 nam kaže: visokonaponski namot (gornji namot) je spojen u trokut, donji namot (niskonaponski) je spojen u zvijezdu, vektor napona gornjeg namota je pomaknut prema vektoru napona donjeg namota za $5 \times 30^\circ = 150^\circ$. Općenito možemo kazati: zaostajanje niskonaponskog faznog napona za istoimenim

visokonaponskim naponom označava se brojem koji nam kaže koliko puta je taj kut višekratnik od kuta 30° . Taj broj naziva se satni broj. Ako naime postavimo vektor napona jedne faze na visokonaponskoj strani tako da pokazuje brojku 12 na satu, onda će vektor koji pokazuje smjer napona iste faze na strani nižeg napona pokazivati satni broj.



Da bi se olakšalo spajanje transformatora, propisima je određeno označavanje krajeva namota i stezaljki transformatora. Početak namota se označuje početnim slovima abecede, a kraj namota završnim slovima abecede. Gornja naponska strana se označuje velikim slovima (A B C; X Y Z), a donja naponska malim slovima (a b c; x y z). Izvod nultačke i na strani nižeg napona označuje se velikim slovom N, a na strani nižeg napona malim slovom n.

Osnovni podaci transformatora su: prijenosni omjer, nazivna snaga, spoj transformatora, napon kratkog spoja, mogućnost promjene prenosnog omjera i način hlađenja

Prijenosni omjer je omjer broja zavoja primarnog i sekundarnog napona. On se daje kao omjer nazivnih napona primara i sekundara (npr. 110 kV/35 kV) pa su tako uz prijenosni omjer poznati i nazivni naponi transformatora. Nazivni naponi za trofazne transformatore znače uvijek linijske napone.

Nazivna snaga transformatora jest prividna snaga za koju je transformator dimenzioniran i data je izrazom

$$P_n = \sqrt{3} I_{2n} U_{2n} \text{ [kVA]}$$

gdje je

I_{2n} - nazivna sekundarna struja

U_{2n} - nazivni sekundarni napon

Grupa spoja je važan podatak i bitno je da je znamo za paralelan rad dvaju transformatora. Najčešće se upotrebljavaju spojevi Yy0, Dy5, Yd5. Koji spoj će se upotrebiti ovisi o mjestu transformatora u mreži i vrsti mreže. Ako je mreža uzemljena s obe strane transformatora, upotrebit će se spoj Yy0, ako je mreža uzemljena samo na jednoj strani upotrebit će se spoj Dy5 odnosno Yd5 ovisno o tome na kojoj je strani mreža uzemljena (zvijezda je na onoj strani na kojoj je i uzemljenje). Transformator Yd5 je pogodan za spoj generatora s mrežom (spoj u trokut je na strani generatora, treći harmonik se zatvara unutar trokuta te ne prelazi u mrežu).

Napon kratkog spoja u_k je konstruktivna karakteristika transformatora. On se daje u postotcima nazivnog napona i iznosi za male i srednje transformatore 3-5%, a za velike i do 13%. Apsolutni iznos napona kratkog spoja dat je onda relacijom

$$U_k = \frac{u_{k\%}}{100} U_n,$$

odnosno

$$u_{k\%} = \frac{U_k}{U_n} 100$$

Ovaj napon definira se kao napon narinut na primarnu stranu transformatora pri kojem u kratko spojenom sekundaru teče nazivna struja.

Napon mreže mora biti konstantan i propisima je regulirano da ne smije odstupati više od $\pm 5\%$ od nazivnog napona mreže. Da bi se napon mogao držati u propisanim granicama, grade se transformatori sa mogućnošću promjene prijenosnog omjera. To se izvodi bilo promjenom prijenosnog omjera pomoću otcjepa (na primarnoj ili sekundarnoj strani), bilo pomoću posebnog tzv. regulacionog transformatora. U transformatoru sa otcjepima omjer se može mijenjati samo kad je transformator izvan pogona, a u regulacionom transformatoru se pomoću posebne tzv. regulacione sklopke može prijenosni omjer mijenjati i za vrijeme pogona. Mogućnost promjene prijenosnog omjera se navodi kao osnovni podatak transformatora. Na primjer oznaka $110 \text{ kV} \pm 2 \times 5\% / 30 \text{ kV}$, znači da na strani visokog napona možemo mijenjati broj zavoja tako da prijenosni omjer bude: $99 \text{ kV} / 30 \text{ kV}$; $104,5 \text{ kV} / 30 \text{ kV}$; $110 \text{ kV} / 30 \text{ kV}$; $115,5 \text{ kV} / 30 \text{ kV}$; i $121 \text{ kV} / 30 \text{ kV}$.

Kad je transformator u pogonu, on se zagrijava zbog toplinskih gubitaka koji nastaju u namotima transformatora pri prolazu struje i u željeznoj jezgri transformatora zbog histereze i vrtložnih struja. Gubitke u željezu označujemo sa P_{Fe} , a gubitke u bakru sa P_{Cu} . Te gubitke možemo odrediti iz dva osnovna pokusa: pokusa praznog hoda i pokusa kratkog spoja. U prvom slučaju na primar narinemo nazivni napon U_{1n} , a sekundar je otvoren. Kroz primar će tada teći struja praznog hoda I_0 potrebna za magnetiziranje jezgre i pokrivanje gubitaka u željezu transformatora. Pošto je ta struja vrlo malena možemo zanemariti gubitke koje ona proizvodi u namotu primara, pa mjerenjem snage P_0 koju transformator uzima iz mreže, možemo odrediti

gubitke u željezu

$$P_{Fe} \cong P_o$$

Gubitci u željezu ne ovise o opterećenju transformatora već samo o naponu. Naime, gubitci u željezu dati su približno relacijom

$$P_{Fe} = P_{Fel} \frac{f}{50} B^2 m_{Fe}$$

gdje je

P_{Fel} - specifični gubitci (po jednom kg lima) u željezu kod indukcije 1 T i frekvencije 50 Hz.

f - frekvencija

B - magnetska indukcija

m_{Fe} - masa željezne jezgre

Pošto su P_{Fel} , f i m_{Fe} konstante za određeni transformator, to je za taj transformator

$$P_{Fe} = k_1 B^2$$

a indukcija

$$B = \frac{E_1}{4,44 f S N_1} = \frac{U_1}{4,44 f S N_1} = k_2 U_1$$

Slijedi

$$P_{Fe} = k U_1^2$$

Dakle, gubitci u željezu su neovisni o struji opterećenja, pa gubitci izmjereni u praznom hodu pri nazivnom naponu predstavljaju gubitke u željezu pri nazivnom naponu u bilo kojem režimu rada.

Specifični gubitci u željezu kod indukcije $B = 1 \text{ T}$ su konstanta materijala i razlikuju se za različite tipove limova. Za toplo valjane transformatorske limove kreću se oko 1 W/kg. , a za hladno valjane limove oko $0,5 \text{ W/kg.}$ Ukupni gubitci u željezu P_{Fe} se kod malih transformatora kreću oko $1,5\%$ nominalne snage, a kod većih oko $0,2\%$.

Efektivna vrijednost struje praznog hoda (struje magnetiziranja) I_0 kreće se od $4-8\%$ efektivne vrijednosti nominalne struje.

Kod pokusa kratkog spoja, spojimo sekundarne stezaljke kratko i narinemo na primarni namot toliki napon da kroz namote transformatora potjera nazivnu struju. Narinuti napon U_k je napon kratkog spoja, i on je mnogostruko manji od nominalnog napona, pa je i indukcija u željeznoj jezgri zanemariva. Zbog toga možemo zanemariti struju magnetiziranja i gubitke u željezu, pa je

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 ; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} ; \quad P_k = P_{Cu}$$

Dakle gubitci u bakru u normalnom pogonu pri nominalnoj struji, jednaki su snazi koju transformator uzima iz mreže u pokusu kratkog spoja. Naime, gubitci u bakru su dati relacijom

$$P_{Cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad J^2 K_t$$

dakle su potpuno neovisni o naponu, te nam izmjereni gubitci P_k predstavljaju iste gubitke koji bi nastali u bakru transformatora pri normalnom pogonu, ako bi u tom pogonu tekle iste struje I_1 i I_2 kao u gornjem pokusu.

Korisnost transformatora određena je izrazom

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}}$$

gdje je η faktor korisnosti, a $P_2 = \sqrt{3} I_2 U_2 \cos \varphi_2$ opterećenje transformatora. Poveća li se opterećenje "a" puta, uz konstantan napon, povećava se i struja također "a" puta, te gubitci u bakru " a^2 " puta, dok gubitci u željezu ostaju nepromijenjeni. Sada će biti

$$\eta' = \frac{P'_2}{P'_2 + P'_{Cu} + P_{Fe}} = \frac{a P_2}{a P_2 + a^2 P_{Cu} + P_{Fe}}$$

za $\frac{d\eta'}{da} = 0$, $\eta' = \text{maksimum}$

$$\frac{d\eta'}{da} = \frac{P_2(a P_2 + a^2 P_{Cu} + P_{Fe}) - a P_2(P_2 + 2a P_{Cu})}{(a P_2 + a^2 P_{Cu} + P_{Fe})^2} = 0$$

Izlazi

$$P_{Fe} = a^2 P_{Cu} = P'_{Cu}$$

Dakle, najbolji faktor korisnosti ima transformator kod onog opterećenja kod kojeg su gubitci u željezu jednaki gubitcima u bakru.

Kapp-ov dijagram

Transformatorske jednačbe, kao što je poznato iz Osnova elektrotehnike pisane u simboličkom obliku glase:

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 + \bar{Z}_1 \bar{I}_1$$

$$\bar{E}_2 = \bar{U}_2 + \bar{Z}_2 \bar{I}_2$$

Pošto je $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ i uz zanemarenje struje magnetiziranja

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \text{ slijedi:}$$

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_2 \frac{N_1}{N_2} + \bar{Z}_1 \bar{I}_1 = \bar{U}_2 \frac{N_1}{N_2} + \bar{Z}_2 \bar{I}_1 \frac{N_1}{N_2} + \bar{Z}_1 \bar{I}_1$$

Ako uvedemo oznake: $U_2 \frac{N_1}{N_2} = U'_2$ i $\bar{Z}_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \bar{Z}'_2$ imamo

$$\bar{U}_1 = \bar{U}'_2 + \bar{I}_1 (\bar{Z}_1 + \bar{Z}'_2)$$

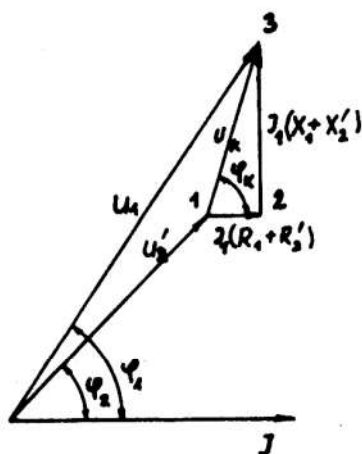
gdje je

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j X_1, \bar{Z}_2 = R_2 + j X_2, \bar{Z}'_2 = R'_2 + j X'_2$$

Tako bi konačno bilo

$$\bar{U}_1 = \bar{U}'_2 + \bar{I}_1 \left[(R_1 + R'_2) + j (X_1 + X'_2) \right]$$

Versorski dijagram ćemo sad lako nacrtati



Trokut 123 zove se Kapp-ov trokut.

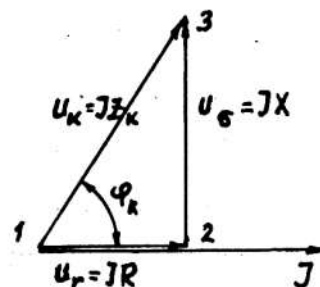
Hipotenuza 1-3 predstavlja napon kratkog spoja U_k , kateta 1-2 pad napona na omskom otporu transformatora

$I R = I(R_1 + R'_2) = U_r$, a kateta 2-3 pad napona na induktivnom dijelu impedancije transformatora U_σ . Očito je

$$U_k = \sqrt{U_r^2 + U_\sigma^2}$$

odnosno, pisano u relativnim vrijednostima

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_\sigma^2}$$



Za pokus kratkog spoja $U'_2 = 0$, $U_1 = U_k$ pa Kapp-ov dijagram izgleda kao na slici dolje. Gubitci u bakru su

$$P_{Cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

Uvaživši $I_2^2 = I_1^2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$ i $R_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = R'_2$ te

$R_1 + R'_2 = R$, možemo pisati

$$P_{Cu} = I^2 R = U_r I; \text{ Za trofazni sistem}$$

$$P_{Cu} = 3U_r I_f = U_r \sqrt{3} I_e$$

Ako gubitke u bakru izrazimo u postotcima od nazivne snage dobijemo

$$P_{Cu} \% = 100 \frac{P_{Cu}}{P_n} = \frac{\sqrt{3} U_r I_n}{\sqrt{3} U_n I_n} 100 = 100 \frac{U_r}{U_n} = u_r \%$$

Dalje je

$$U_k = I Z_k, \quad Z_k = \frac{U_k}{I} = \frac{u_k \% U_n}{100 \sqrt{3} I_n}$$

ili

$$Z_k = \sqrt{R^2 + X^2}$$

i

$$\cos \varphi_k = \frac{U_r}{U_k} = \frac{u_r \%}{u_k \%} = \frac{P_{Cu} \%}{u_k \%}$$

Kako je već rečeno, napon kratkog spoja $u_k \%$ je za jedan određeni trafo njegova konstruktivna konstanta. Poželjno je da pad napona na transformatoru bude što manji, pa se prema tome zahtjeva što manji napon kratkog spoja. S druge strane da bi transformator bio osjetljiv na struje kratkog spoja, traži se što veći napon kratkog spoja. Pošto su ta dva zahtjeva u suprotnosti, rješenje je u kompromisu : napon kratkog spoja se određuje tako da pad napona na transformatoru ne bude prevelik u nominalnom pogonu, a s druge strane eventualne struje kratkog spoja ne unište transformator.

Hladjenje transformatora

Mogućnost opterećenja transformatora ograničena je maksimalnom temperaturom koju materijal od kojeg je transformator gradjen može podnijeti bez oštećenja. Ako su npr. namoti transformatora međusobno izolirani papirom, temperatura smije iznositi najviše $95 - 110^{\circ}\text{C}$. Iznad te temperature papirna izolacija se polako oštećuje i životna dob transformatora se skraćuje.

Maksimalne dopustive temperature su standardizirane za razne vrste izolacije i temperatura u trajnom pogonu ne smije preći te zakonom propisane granice. Na koji način će se to postići, ovisi o ekonomskoj računici proizvođača: efikasnijim hladjenjem, izborom materijala koji bolje podnosi temperaturu, jačim dimenzioniranjem transformatora tako da gubitci budu što manji i sl.

Zbog toplinskih gubitaka u transformatoru

$$P_g = P_{Fe} + P_{Cu}$$

razvija se toplina

$$dQ = P_g dt$$

Ta toplina se troši dijelom na povišenje temperature transformatora za $d\vartheta$ ($mc d\vartheta$), a dijelom se predaje okolini ($Sk \vartheta dt$). Ako transformator shvatimo kao jedno homogeno tijelo mase m i specifične topline c , tada je

$$P_g dt = mc d\vartheta + Sk \vartheta dt$$

gdje je

P_g - gubitci u transformatoru

t - vrijeme

ϑ - temperatura

m - masa transformatora

c - ekvivalentna specifična toplota

S - vanjska površina transformatora

k - koeficijent odvodjenja topline

Rješenje ove jednadžbe, uz početni uvjet $t = 0$, $\vartheta = 0$, glasi:

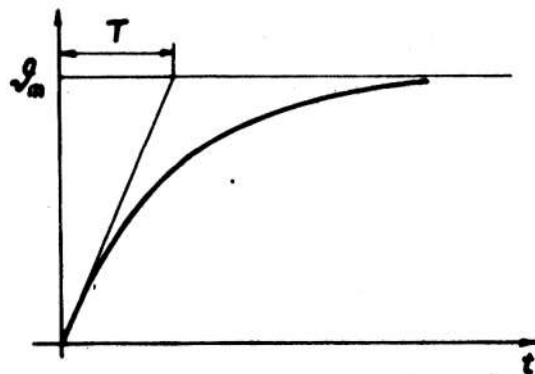
$$\vartheta = \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}),$$

gdje je

$$\vartheta_m = \frac{P}{S k} \quad - \text{maksimalna temperatura}$$

$$T = \frac{m c}{S k} \quad - \text{vremenska konstanta}$$

Vidimo dakle, da maksimalna temperatura ovisi o gubitcima, površini hladjenja i koeficijentu odvodjenja topline. Dakle, na nju možemo utjecati, kod gotovog transformatora, promjenom rashladne površine, promjenom koeficijenta odvodjenja

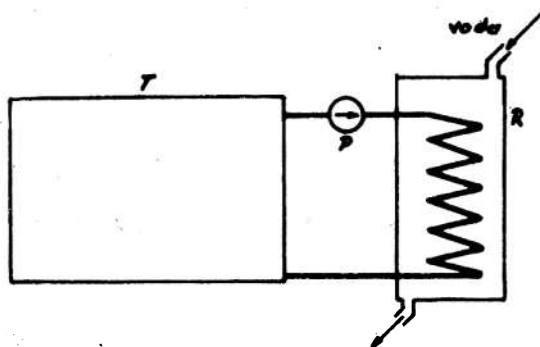


topline ili pak takvim dimenzioniranje transformatora, da gubitke održimo u granicama koje neće izazvati stvaranje temperature veće od dopustive. Obično se kombiniraju sva tri ova načina da bi se postigao što bolji ekonomski efekt (što jeftiniji transformator uz što ekonomičniji pogon) uz dozvoljenu temperaturu transformatora.

Mali transformatori nemaju nikakvih dodatnih uređaja za hlađenje. Ulje u kotlu transformatora (u koji je smještena jezgra sa namotima) najjače se grije uz samu površinu aktivnog dijela transformatora (namota i jezgre), a slabije uz stijenke kotla. Zbog toga nastaje prirodna cirkulacija ulja, te toplije ulje dospjeva uz stijenke kotla i hladi se a hladnije preuzima toplinu koja se razvija u aktivnom dijelu transformatora, grije se i kao toplije dospjeva ponovo uz stijenke kotla i proces se nastavlja. Ovu vrstu hlađenja zovemo prirodno hlađenje, a cirkulaciju ulja prirodna cirkulacija ulja.

Kod većih transformatora odnosi su nepovoljniji, jer kod transformatora x puta povećanih linearnih dimenzija (uz specifične gubitke W/kg konstantne) povećava se volumen (a time i gubitci) sa x^3 , a rashladna površina sa x^2 , tj. omjer P_g/S izlazi nepovoljniji. Zbog toga se kod ovakvih transformatora umjetno povećava rashladna površina postavljanjem radijatora na kotao sa uljem. Pribjegava se i drugim načinima kao što je prisilna cirkulacija ulja (pumpe tjeraju ulje da cirkulira što brže pa je odvođenje topline bolje), hlađenje ulja vodom, hlađenje ulja prisilnom cirkulacijom zraka (ventilatori) i sl.

T - transformator
P - pumpa za ulje
R - uređaj s rashladnom vodom

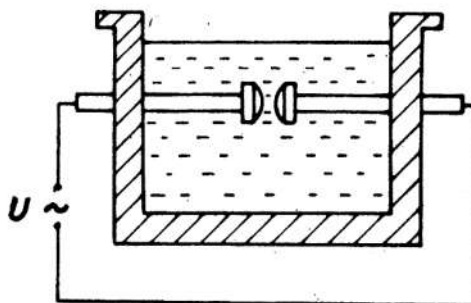


Ulje

Osim za odvodjenje topline, ulje u transformatoru služi i kao izolacija medju djelovima pod naponom, pa je potrebna kontrola ulja prije puštanja transformatora u pogon, a ispitivanje probojne čvrstoće ulja spada u jednu od važnih pogonskih kontrola. Električna probojna čvrstoća se ispituje u posebnom uređaju sa tačno definiranim oblikom elektroda na međusobnom razmaku od 2,5 mm. Prema JUS-u, ulje mora imati najmanju probojnu čvrstoću

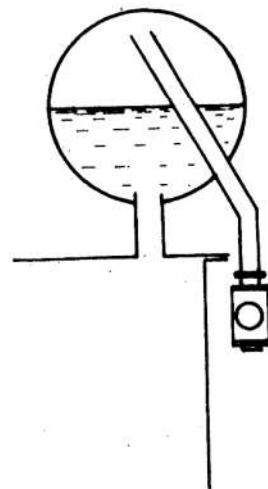
Za transformator do	35 kV	80 kV/cm
"	"	od 35 do 110 kV 120 kV/cm
"	"	od 110 do 220 kV 140 kV/cm

Sadržaj vlage u transformatorskom ulju jako utječe na njegovu probojnu čvrstoću. Tako npr. sadržaj vlage od svega 0,01% smanjuje probojnu čvrstoću ulja sa 130 kV/cm na 50 kV/cm. Mjehurići zraka i druge nečistoće takodjer utječu na probojnu čvrstoću ulja (smanjuje se). Zato se prije upotrebe ulje filtrira i centrifugira, a provodi se i sušenje ulja da bi se uklonila vlaga (ulje je higroskopno). Sušenje se provodi na temperaturi ne većoj od 110°C, jer se pri višim temperaturama ulje kvvari. Namoti i jezgra transformatora se takodjer suše prije uranjanja u ulje, a da bi sušenje bilo što efikasnije, provodi se u vakuumu od najmanje 4 torra. Poslije uranjanja u ulje, nastavlja se sušenje cijelog transformatora dok se ne postigne zahtjevana probojna čvrstoća.



Na probojnu čvrstoću ulja mogu u znatnoj mjeri utjecati nečistoće kao što su niti pamuka, papira i sl., koje se, zbog elektrostatskih sila postave tako da tvore jedan "most" koji ima znatno manju probojnu čvrstoću od probojne čvrstoće ulja. Zato se vrši impregnacija lakom svih izoliranih djelova, da se komadići izolacije ne bi otkidali i plivali po ulju.

Ulje se kod zagrijavanja jako rasteže; pri zagrijavanju za 1°C , volumen ulja se poveća oko 0,8%. Kako se temperatura ulja u pogonu mijenja u granicama od oko 100°C , mora postojati mogućnost promjene volumena ulja za oko 10%. Zato se iznad kotla sa uljem postavlja konzervator, posuda povezana tankom cijevi sa kotlom, tako da ulje pri povećanom volumenu prelazi iz kotla u konzervator. Pošto ulje u konzervatoru dolazi u dodir sa zrakom u kojem normalno ima vlage postavlja se, kod većih transformatora, u konzervator tzv. dehidrator. Dehidrator je posuda sa jako higroskopnom tvari, koja onda apsorbira vlagu iz zraka unutar konzervatora. Cijev koja povezuje konzervator sa kotlom, ne završava odmah na dnu konzervatora već je malo produžena, tako da eventualno nataložene čestice vlage i nečistoća ne prolaze u kotao.



Zašto se baš ulje upotrebljava kao rashladno i izolaciono sredstvo u transformatoru? Dva su osnovna razloga za to:

- Ulje posjeduje veliku specifičnu toplinu ($c=0,45 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$) te visok koeficijent odvodjenja topline konvekcijom. Zbog velike specifične topline ulja, uljni transformatori dozvoljavaju kratkotrajno i veća preopterećenja jer ulje može apsorbirati veće količine topline, a da mu se temperatura ne poveća

bitno. Potrebna je npr. toplina od 1883 Ws da bi jednom kilogramu ulja povećala temperatura za 1°C.

- Čisto ulje ima veliku probojnu čvrstoću (veću od 200 kV/cm), pa je veoma pogodno i kao medij za izolaciju transformatora.

Osim ovoga, ulje nije agresivno (ima mali kiselinski broj) te ne razara materijale transformatora s kojima dolazi u dodir. Dalje, potpuno je neškodljivo za zdravlje poslužnog osoblja.

Slaba strana transformatorskog ulja je njegova zapaljivost. Ulje gori i podržava gorenje te bi, bez efikasne zaštite, lako dolazilo do njegovog zapaljenja i eksplozije, što može izazvati velike havarije u postrojenju.

Kotao transformatora mora također biti pomno izrađen i ispitan. Lim kotla ne smije imati na sebi nikakvih nečistoća ni oksidnih presvlaka koje bi uslijed strujanja ulja mogle biti otkinute i dospjeti u unutrašnjost namota te izazvati teške kvarove. Osim toga, kotao mora biti dovoljno čvrst da izdrži veliki pretlak koji se može pojaviti zbog razvijanja plinova u ulju za slučaj kvara, i mora biti nepropusan jer je toplo ulje veoma prodorno (prodornije od vode).

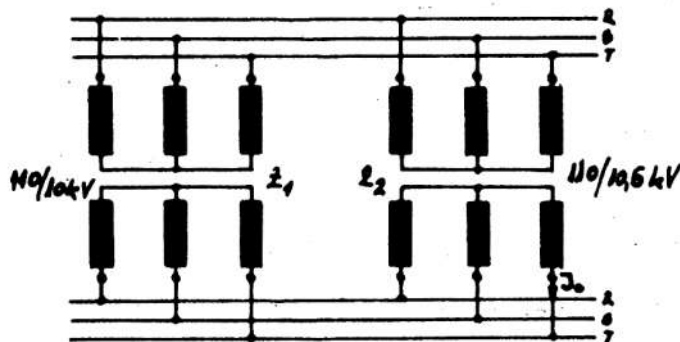
Poklopac kotla mora biti odgovarajuće dimenzioniran i brtvljen da bi se spriječio ulaz zraka u kotao sa uljem. Na poklopac se postavljaju i provodni izolatori sa izvodima pojedinih faza primara i sekundara.

PARALELNI RAD TRANSFORMATORA

Vrlo čest je slučaj da zbog proširenja mreže ili nekog drugog razloga, dva ili više transformatora u transformatorskim stanicama rade paralelno. Da bi paralelan rad transformatora bio moguć uz puno iskorištenje njihove nazivne snage, potrebno je da svi paralelno spojeni transformatori ispunjavaju slijedeće uvjete:

1. da imaju jednake prijenosne omjere
2. da su građeni za približno iste nazivne napone
3. da imaju isti satni broj (spojnu grupu)
4. da naponi kratkog spoja budu približno isti za sve transformatore (Naponi kratkog spoja ne smiju se međusobno razlikovati za više od $\pm 10\%$ aritmetičke sredine napona kratkog spoja svih paralelno spojenih transformatora)
5. da omjer nazivnih snaga ne bude veći od 3:1

Ako prijenosni omjeri nisu jednaki (npr. 110/10 i 110/10,5 kV), transformator s većim nazivnim naponom, potjerat će struju iz jednačenja kroz namote oba transformatora



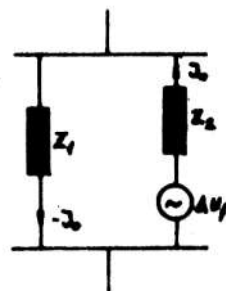
Zbog simetrije, možemo nacrtati nadomjesnu jednofaznu shemu:

$$\Delta U_f = U_{f1} - U_{f2}$$

$$Z_1 = \frac{u_{k1} U_{fn}}{100 I_n} \quad (\text{impedancija jedne faze prvog transformatora})$$

$$Z_2 = \frac{u_{k2} U_{fn}}{100 I_n} \quad (\text{imped. jedne faze drugog transformatora})$$

$$I_o = \frac{\Delta U_f}{Z_1 + Z_2} = \frac{\Delta U_f}{\frac{U_{fn}}{100 I_n} (u_{k1} + u_{k2})}$$



$$\frac{I_o}{I_n} = \frac{\Delta U_f}{U_{fn}} \frac{1}{u_{k1} + u_{k2}} 100$$

Kad bi htjeli npr. spojiti paralelno dva transformatora sljedećih podataka:

$$110 \text{ kV}/10 \text{ kV}, u'_{k1} = 5\% \text{ i } 110 \text{ kV}/10,5 \text{ kV}, u_{k2} = 5\%$$

Struja izjednačenja bi iznosila:

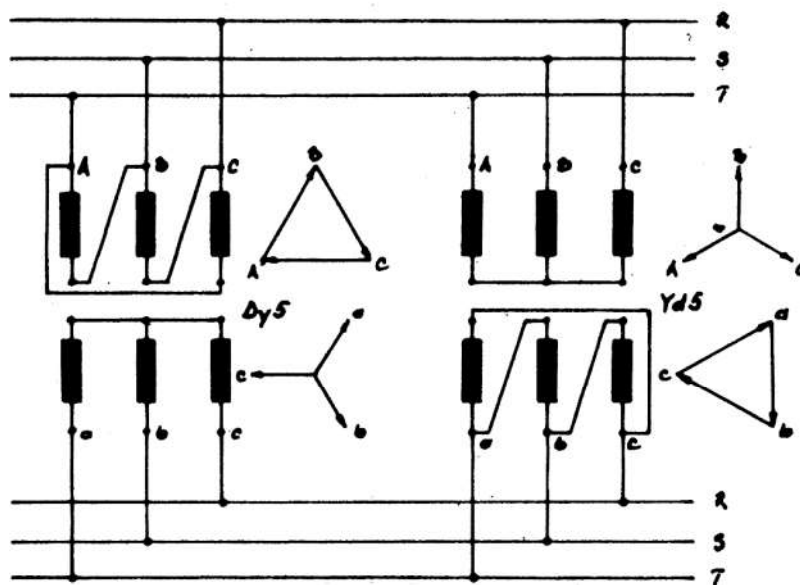
$$\frac{I_o}{I_n} = \frac{\frac{10,5}{\sqrt{3}} - \frac{10}{\sqrt{3}}}{\frac{10}{\sqrt{3}}} \frac{1}{5+5} 100 = \frac{0,5}{10} \frac{1}{10} 100 = 0,5$$

$$I_o = 0,5 I_n = 50\% I_n$$

Dakle, struja izjednačenja iznosi pola nazivne struje. To znači da je još neopterećen transformator već upola opterećen.

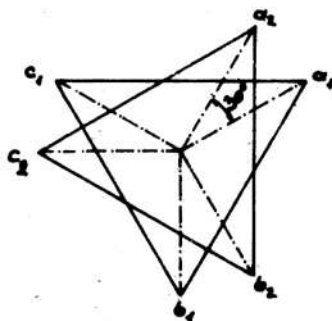
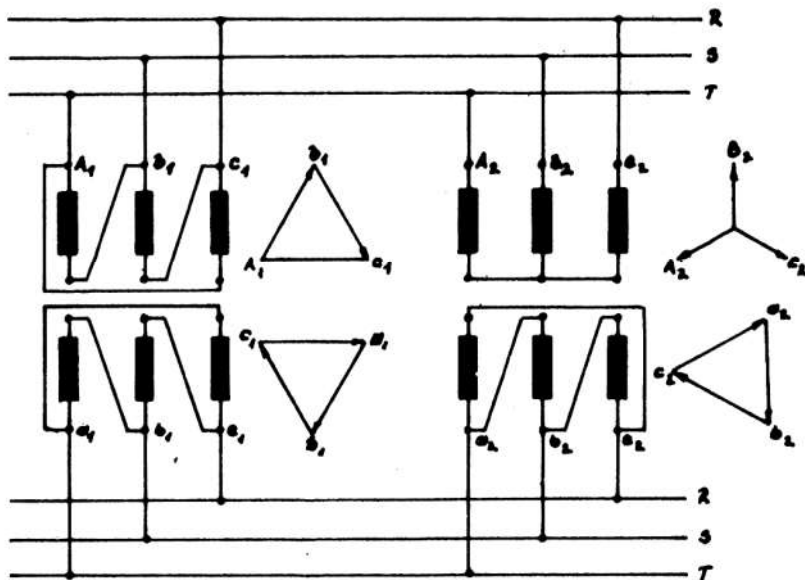
Nazivni naponi paralelno spojenih transformatora ne moraju biti medjusobno potpuno jednaki. Mogu se npr. paralelno spojiti transformatori 110/10 kV i 115,5/10,5 kV, jer imaju iste prijenosne omjere, ako su svi ostali uvjeti ispunjeni. Jasno, nazivni naponi transformatora ne smiju se bitno razlikovati od nazivnog napona mreže (ne smiju biti bitno manji), jer je izolacija transformatora dimenzionirana za njegov nazivni napon i nebi izdržala bitno veći napon mreže. No, transformator može izdržati trajni pogon sa naponom 5% višim od nazivnog.

Ako transformatori imaju isti satni broj, mogu se, uz ispunjene ostale uvjete, bez daljnjeg spojiti paralelno. Istomene stezaljke moraju biti spojene na istu sabirnicu na primaru i sekundaru.



Ako transformatori nebi imali isti satni broj, paralelnim spajanjem bi izazvali vrlo veliku struju izjednačenja. Ako bi npr. spojili paralelno transformator grupe spoja Dd6 i Yd5, istog prijenosnog omjera i istih nominalnih napona, na

sekundarnoj strani bi se pojavila razlika napona od preko 50% nazivnog napona i protjerala struju izjednačenja višestruko veću od nazivne struje.



$$U_{a1, a2} = \Delta \bar{U} = \bar{U}_{f1} - \bar{U}_{f2}$$

$$\Delta U = \sqrt{U_{f1}^2 + U_{f2}^2 - 2 U_{f1} U_{f2} \cos 30^\circ} =$$

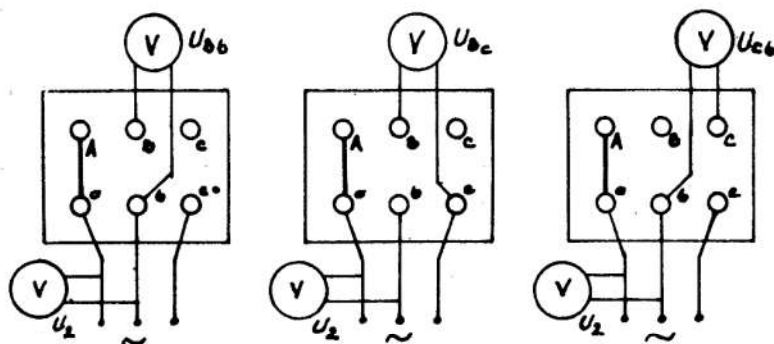
$$= \sqrt{U_f^2 \left(2 - 2 \frac{\sqrt{3}}{2} \right)} = U_f \sqrt{2 - \sqrt{3}} =$$

$$= U_f \sqrt{0,27} = 0,52 U_f$$

$$\frac{I_o}{I_n} = \frac{\Delta U}{U_f} \frac{100}{u_{k1} + u_{k2}}, \text{ uz } u_{k1} = u_{k2} = 5\%$$

$$\frac{I_o}{I_n} = 0,52 \frac{100}{10} = 5,2$$

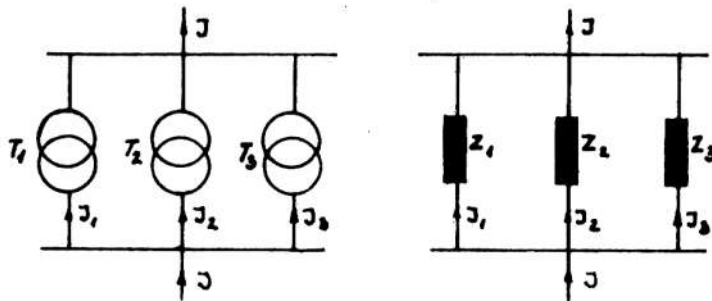
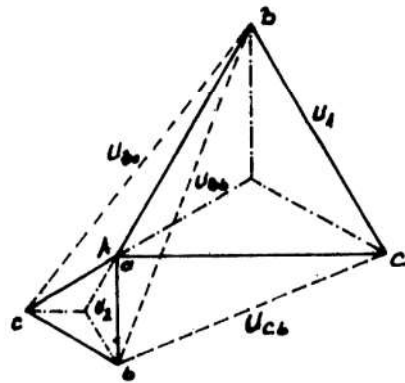
Dakle, paralelni spoj dvaju transformatora čiji se satni broj razlikuje svega za 1 (naponi su pomaknuti međusobno za 30°) izazvao bi struju izjednačenja oko pet puta veću od nominalne. Transformatori bi izgorili prije nego bismo ih uopće opteretili. Zato treba obavezno provjeriti grupu spoja transformatora koje priključujemo paralelno. Ako nismo sigurni da transformatori imaju isti satni broj, možemo to ustanoviti brzo i sigurno metodom dvaju voltmetara. U tu svrhu spojimo kratko stezaljke a i A, na stezaljke a, b, c



narinemo simetrični trofazni napon i mjerimo napone između stezaljki B i b, stezaljki B i c i stezaljki C i b. Na taj način geometrijski su određeni vrhovi trokuta primarnog i sekundarnog napona, ako te trokute crtamo tako da im vrhovi a i A (pošto su kratko spojeni) padnu zajedno, pa su određeni i međusobni položaji primarnih i sekundarnih napona, te **time i satni broj**. Na gornjoj slici su prikazani trokuti napona za satni broj 5.

Ako je više transformatora T_1, T_2, T_3 spojeno paralelno prema slici, te ako su njihove nadomjesne impedancije Z_1, Z_2, Z_3 , tada važi:

$$I_1 Z_1 = I_2 Z_2 = I_3 Z_3$$



kako je $Z = \frac{u_k U_{fn}}{100 I_n}$ to je

$$I_1 \frac{u_{k1} U_{fn}}{I_{n1}} = I_2 \frac{u_{k2} U_{fn}}{I_{n2}} = I_3 \frac{u_{k3} U_{fn}}{I_{n3}} \left| \frac{\sqrt{3} U}{\sqrt{3} U} \right.$$

$$\frac{\sqrt{3} U I_1}{\sqrt{3} U I_{n1}} u_{k1} = \frac{\sqrt{3} U I_2}{\sqrt{3} U I_{n2}} u_{k2} = \frac{\sqrt{3} U I_3}{\sqrt{3} U I_{n3}} u_{k3}$$

ili

$$\frac{P_1}{P_{n1}} u_{k1} = \frac{P_2}{P_{n2}} u_{k2} = \frac{P_3}{P_{n3}} u_{k3}$$

Ako su naponi kratkog spoja jednaki $u_{k1} = u_{k2} = u_{k3}$ tada je

$$\frac{P_1}{P_{n1}} = \frac{P_2}{P_{n2}} = \frac{P_3}{P_{n3}}$$

tj. opterećenja se raspoređuju prema nominalnim snagama.

Ako naponi kratkog spoja nisu međusobno jednaki, doći će do neravnomjerne raspodjele opterećenja, te se može dogoditi da jedan transformator bude preopterećen, a drugi nedovoljno opterećen. Najbolje se to vidi na primjeru. Spojimo paralelno dva transformatora, prvi snage $P_{n1} = 500 \text{ kVA}$ i $u_{k1} = 5\%$ i drugi snage $P_{n2} = 1000 \text{ kVA}$ i $u_{k2} = 10\%$ i opteretimo ih snagom $P = 1200 \text{ kVA}$. Tada je

$$P = P_1 + P_2 = P_1 \left(1 + \frac{P_{n2}}{P_{n1}} \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \right)$$

$$P_1 = \frac{1200}{1 + \frac{1000}{500} \frac{5}{10}} = 600 \text{ kVA} = 1,2 P_{n1}$$

$$P_2 = 600 \text{ kVA} = 0,6 P_{n2}$$

Dakle, prvi transformator će biti preopterećen za 20%, dok će drugi biti opterećen sa svega 60% svoje nominalne snage.

Jednakost padova napona $\bar{I} \bar{Z}$ (gdje je $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$) po iznosu i faznom kutu, bit će postignuta samo onda ako je omjer R/X konstantan za sve paralelno spojene transformatore. Taj uvjet je ispunjen za transformatore približno jednakih nazivnih snaga. Ako je odnos nazivnih snaga veći od 3:1, omjer R/X će se dosta razlikovati za pojedine transformatore, te padovi napona na pojedinim transformatorima neće biti fazno jednaki i pored toga što su naponi kratkog spoja (pa prema tome i padovi napona po iznosu) jednaki. Zbog te fazne nejednakosti pojaviti će se struje izjednačenja koje smanjuju stvarnu opterećivost transformatora. Radi toga, nikada se paralelno ne spajaju transformatori kojih je odnos nominalnih snaga veći od 3:1.

5. ASINHRCNI MOTOR

Iz Osnova elektrotehnike je poznato da možemo proizvesti magnetsko polje koje se konstantnom brzinom vrti oko neke osi i ima konstantnu amplitudu. Takvo polje onda nazivamo okretno polje. Rotaciono polje možemo proizvesti bilo mehanički (rotiranjem stalnog magneta), bilo električki puštanjem m - faznog sustava struja kroz m -fazni mirujući namotaj. Rezultat bi bio isti u oba slučaja: jedno okretno magnetsko polje stalne amplitude B koje se kreće sinhronom brzinom:

$$n_o = \frac{60 f}{p}$$

Ako svaka struja proizvodi u svom namotaju polje amplitude B_m , rezultirajuće okretno polje će imati amplitudu

$$B = \frac{m}{2} B_m \cos \omega t$$

gdje je m - broj faza.

Ako sada realiziramo takvu napravu kojoj ćemo na stator staviti jedan trofazni namot i priključiti ga na trofazni izvor napona, a na rotor drugi trofazni namot, kroz namote statora poteći će struja koja će proizvesti rotirajuće polje B (a to znači i rotirajući tok ϕ). Ukoliko rotoru ne dovodimo niti uzimamo mehanički moment, on će mirovati, pa će rotirajući tok ϕ sjeći štapove rotorskog namota brzinom n_o , te će se u rotoru inducirati elektromotorna sila E_2 frekvencije $f = \frac{n_o p}{60}$.

Ako je rotorski namot otvoren, neće kroz njega teći nikakva struja te prema tome neće biti nikakvog momenta i rotor će mirovati. Ako pak na izvode rotorskog namota priključimo zvjezdu otpora kroz namote će proteći struja

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

gdje je R_2 ukupni aktivni, a X_2 ukupni reaktivni otpor u rotorskom krugu.

Zbog toga će se, po **Biot-Savart**-ovom zakonu pojaviti okretni moment koji je proporcionalan struji I_2 , toku ϕ i kosinusu kuta među njima:

$$M = k I_2 \phi \cos \varphi_2$$

Taj moment će potjerati rotor u smjeru okretanja toka. Naime, po Lenz-ovom pravilu, imaju EMS i struje indukcije takav smjer da nastoje ukloniti uzrok svog nastanka. Kako je u ovom slučaju taj uzrok relativno kretanje magnetskog polja prema rotoru, javit će se u rotoru upravo takve struje koje će nastojati sa tokom ϕ proizvesti takav moment koji će rotor potjerati u smjeru rotiranja magnetskog toka nastojeći da mu da istu brzinu n_0 koju ima i rotirajuće polje. U tom slučaju ne bi bilo relativnog pomicanja polja prema rotoru te silnice magnetskog polja ne bi sjekle vodiče rotorskog namota, tj. nestao bi uzrok postojanja struje u rotoru. No rotor bez nekog vanjskog uzroka neće nikada tu brzinu postići. Ako naime pretpostavimo da je ipak postigne, ne bi više bilo elektromotorne sile E_2 ni struje I_2 pa bi moment bio jednak nuli te bi rotor opet zaostao i njegova brzina n bila bi opet manja od sinhronne brzine n_0 . Dakle, rotor mora imati uvijek manju brzinu vrtnje od brzine rotacije okretnog polja tj. $n < n_0$, pa važi:

$$\Delta n = n_0 - n$$

Očito je da će silnice magnetskog polja sjeći vodiče rotora upravo brzinom Δn . Inducirana EMS E_2 , pa prema tome i struja I_2 i moment M bit će tim veći što je Δn veći. Drukčije rečeno ovaj motor neće nikad postići punu sinhronu brzinu vrtnje već će mu brzina uvijek biti manja od sinhrona i to tim više što je motor jače opterećen. Zato se ovakav motor zove asinhroni motor.

Ako zaostajanje brzine rotora za brzinom okretnog polja statora izrazimo relativno u odnosu na sinhronu brzinu, onda nam dobiveni odnos predstavlja klizanje ili skliz

$$s = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

Iz toga slijedi i

$$n = n_0 (1 - s)$$

Ako rotor ukočimo tako da on miruje ($n = 0$), klizanje je $s=1$. Ako se rotor okreće sinhronom brzinom tj. $n = n_0$ klizanje je tada $s = 0$.

Ako bi npr. dvopolni asinhroni motor priključili na mrežu frekvencije 50 Hz, njegova sinhrona brzina bi bila $n_0 = 3000$ °/min. Vrti li se rotor brzinom od 2910 °/min, klizanje je

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{3000 - 2910}{3000} = \frac{90}{3000} = 0,03$$

$$s = 3 \%$$

Pošto se magnetski tok vrti u odnosu na rotor brzin.

$$\Delta n = n_0 - n$$

frekvencija rotorskih struja bi bila

$$f_2 = \frac{p \Delta n}{60}$$

dok je frekvencija struje na statoru određena frekvencijom mreže i sa sinhronom=brzinom je povezana relacijom

$$f_1 = \frac{p n_0}{60}$$

a odatle slijedi

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{\Delta n}{n_0} = s$$

ili

$$f_2 = s f_1$$

U našem primjeru bi frekvencija rotorskih struja bila

$$f_2 = 50 \cdot 0,03 = 1,5 \text{ Hz}$$

Ove rotorske struje proizvode takodjer okretno polje koje se u odnosu na rotor okreće brzinom

$$\Delta n = \frac{60 f_2}{p}$$

a pošto se i sam rotor vrti brzinom n , to ovo polje u odnosu na stator rotira brzinom

$$\Delta n + n = n_0 - n + n = n_0$$

Dakle, u odnosu na stator istom (sinhronom) brzinom okreće se i polje proizvedeno na statoru i polje proizvedeno u rotoru, samo što je prvo dobilo tu brzinu čisto električkim putem,

a drugo i električkim i mehaničkim.

Energetski odnosi

Promatrajmo asinhroni stroj sa fiksiranim rotorom i na stator priključenim simetričnim trofaznim naponom. Okretno polje statora sječe tada vodiče rotora ^{brzinom} sinhronom n_0 i inducira napon u faznim namotima rotora

$$E_{20} = 4,44 N_2 f_1 \phi_m$$

Ukoliko je rotorski namot zatvoren preko impedancije $Z_{20} = \sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}$ kroz svaku od faza će poteći struja

$$I_{20} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}}$$

gdje je R_2 radni otpor, a $X_{20} = 2\pi f_1 L_2$ induktivni otpor u rotorskom krugu kod zakočenog rotora. Zbog struje I_{20} na rotoru će se oslobadjati snaga (pretpostavljamo trofazni namot)

$$P_{20} = 3 I_{20}^2 R_2$$

ili

$$P_{20} = \frac{3 E_{20}^2 R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}}$$

Dakle, okretno polje statora prenosi na rotor snagu (ako je rotor zakočen) P_{20} i sva ta snaga odlazi na Joulove gubitke.

Ako je rotor slobodno vrtiv, on će se zbog spomenutih razloga okretati brzinom n u smjeru vrtnje polja te će okretno polje statora sjeći vodiče rotora brzinom $\Delta n = n_0 - n$ i inducirati u njima EMS

$$E_2 = 4,44 N_2 f_2 \phi_m$$

Dalje je

$$\frac{E_2}{E_{20}} = \frac{f_2}{f_1} = s$$

ili

$$E_2 = s E_{20}$$

Ova EMS će protjerati kroz rotorske vodiče struju

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2'^2}} = \frac{s E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_2'^2}}$$

Induktivni otpor vodiča rotorskog namota kroz koji teče struja I_2 frekvencije f_2 bit će sada

$$X_2' = 2 \pi f_2 L_2 = 2 \pi s f_1 L_2 = s X_2$$

pa je

$$I_2 = \frac{s E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}} = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

Kako je E_{20} inducirana elektromotorna sila u mirnom rotoru, možemo reći da bi se u mirnom rotoru inducirala ista struja I_2 kao i u rotoru koji rotira s klizanjem $s = f_2/f_1$ uz uvjet da stvarni otpor rotora R_2 zamislamo kod mirujućeg rotora povećan na iznos R_2/s . Konkretno, u našem primjeru asinhronog dvopolnog motora čiji rotor se okreće brzinom $n = 2910$ °/min, klizanje bi iznosilo $s = 0,03$, a prema tome, da bi struja koja teče u ovom pogonskom stanju, tekla i kod mirujućeg rotora, trebali bi zamisliti otpor R_2 povećan na

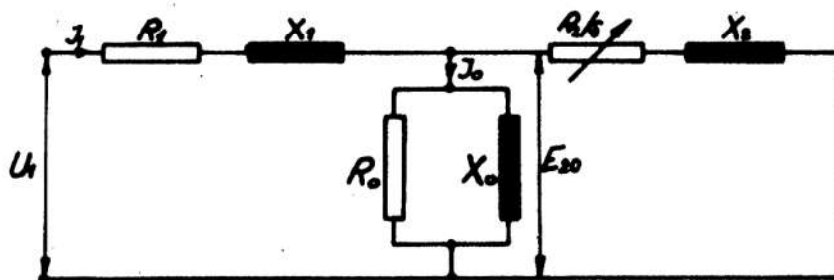
$$\frac{R_2}{s} = \frac{R_2}{0,03} = 33,3 R_2 ,$$

tj. otpor R_2 povećati 33,3 puta.

S obzirom na relaciju

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

te uzimajući u obzir otpor primarnog namota kao i struju magnetiziranja, možemo nacrtati nadomjesnu shemu asinhronog motora. Otpore R_2 i X_2 uzimamo reducirane na primar.



Snaga koju bi okretno polje prenijelo na rotor u ovoj ekvivalentnoj slici bila bi u sve tri faze.

$$P_2 = 3 I_{2f}^2 \frac{R_2}{s}$$

Međutim, na rotoru postoji stvarno otpor R_2 , pa se na Joulove gubitke potroši svega

$$P'_2 = 3 I_{2f}^2 R_2$$

a ostatak

$$P''_2 = P_2 - P'_2 = 3 I_{2f}^2 \frac{R_2}{s} - 3 I_{2f}^2 R_2 = 3 I_{2f}^2 R_2 \frac{1-s}{s}$$

troši se na mehaničku snagu, na okretanje rotora. Uobičajeno je da se snaga P'_2 zove električna snaga i označava P_{el} , a snaga P''_2 mehanička snaga i označava P_{meh} . U ovim oznakama slijedi iz gornjih relacija

$$P_2 = P_{el} + P_{meh}$$

i

$$\frac{P_{el}}{P_{meh}} = \frac{s}{1-s},$$

Dalje je:

$$P_{el} = s P_2$$

$$P_{meh} = (1 - s) P_2$$

Električna snaga P_{el} nam u stvari predstavlja gubitke i štetna je uz ostalo i zato što pridonosi ugrižavanju motora. P_{meh} je korisna mehanička snaga koju možemo uzimati na osovini asinhronog motora. Iz gornjih relacija je vidljivo da udio električne snage raste, a mehanička opada porastom klizanja s . Zato se nastoji da motor radi uz malo klizanje da bi Joule-ovi gubici biti što manji, a korisna mehanička snaga što veća.

Moment asinhronog stroja

Mehanička snaga P_{meh} vezana je sa proizvedenim okretnim momentom relacijom

$$M = \frac{P_{meh}}{\omega_2} \quad [Nm]$$

gdje $\omega_2 = \pi \frac{n}{30}$ kutna brzina rotora. Dalje je zbog $n = (1-s)n_0$

$$\omega_2 = \frac{\pi n_0}{30} (1-s)$$

i moment

$$M = \frac{30 P_{meh}}{n_0 (1-s)} = \frac{30 P_2}{n_0} \quad [Nm]$$

odnosno

$$M = \frac{P_2}{\frac{9,81}{30} n_0} = \frac{P_2}{1,028 n_0} = \frac{P_{el}}{1,028 n_0 s} = \frac{3 I_2^2 R_2}{1,028 n_0 s} [\text{kpm}]$$

supstitucijom

$$I_2 = \frac{s E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

dobijemo za moment

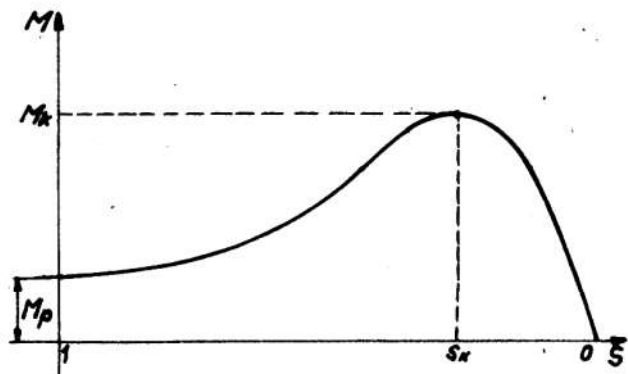
$$M = \frac{3 E_{20}^2 R_2}{1,028 n_0 \left(\frac{R_2^2}{s} + X_2^2 s\right)} [\text{kpm}]$$

Dakle, dobili smo vrijednost okretnog momenta u ovisnosti o klizanju s . Maksimalni moment M_k zove se prekretni moment (kipp moment). Dobijemo ga iz gornjeg izraza izjednačavanjem prve derivacije s nulom. Dobijemo tada

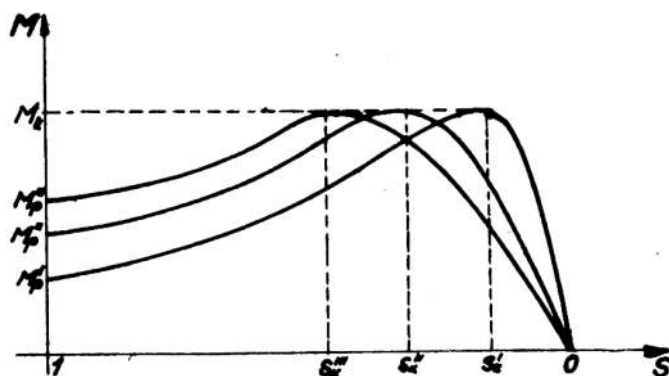
$$s_k = \frac{R_2}{X_2^2}$$

i

$$M_k = \frac{3 E_{20}^2}{1,028 n_0 2 X_2^2}$$



Vidimo da prekretni moment M_k ne ovisi o radnom otporu R_2 , dok je proporcionalan sa kvadratom E_{20} i obrnuto proporcionalan induktivnom otporu $X_2 = 2 \pi f_1 L_2$. Za razne otpore R_2 , momentne karakteristike bi izgledale kao na slijedećoj slici



EMS E_{20} data je izrazom

$$E_{20} = 4,44 N_2 f_1 \phi_m$$

N_2 - broj zavoja po fazi (na rotoru)

f_1 - frekvencije mrežnog napona

ϕ_m - maksimalni iznos rotirajućeg toka

N_2 i f_1 su konstantne veličine, dok je ϕ_m proporcionalno sa narinutim naponom na statoru. To znači da je i proizvedena EMS na rotoru proporcionalna narinutom naponu U , pa je prema tome i moment proporcionalan kvadratu tog napona.

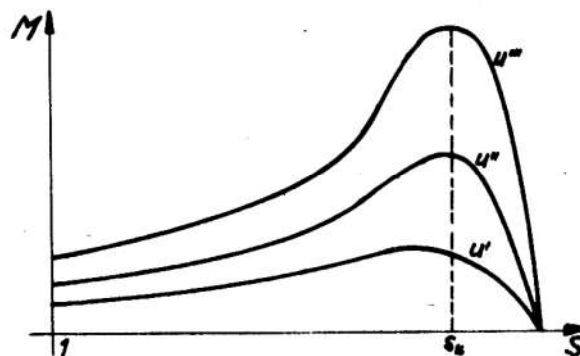
Zbog toga su asinhroni motori jako osjetljivi na promjenu napona. Dalje je interesantan tzv. pokretni moment.

To je onaj moment koji rotor pokreće iz stanja mirovanja tj.

uz klizanje $s=1$. Uz taj uvjet izlazi iz prethodnih izraza

$$M_p = \frac{3 E_{20}^2 R_2}{1,028 n_0 (R_2^2 + X_2^2)} \text{ kpm}$$

ili



$$M_p = M_k \frac{2 R_2 X_2}{R_2^2 + X_2^2}$$

Uz $S_k = \frac{R_2}{X_2}$ izlazi za pokretni moment

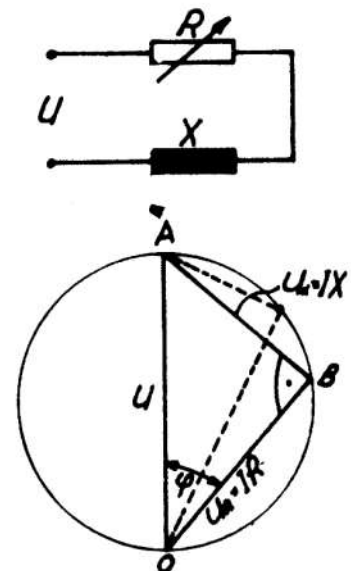
$$M_p = M_k \frac{2}{s_k + \frac{1}{s_k}}$$

Ako se pogleda slika sa prethodne strane, vidi se (a to je očito i iz gornjih izraza) da pokretni moment M_p raste (kod istog napona) sa porastom otpora R_2 , odnosno sa porastom pokretnog klizanja s_k ($s_k = R_2/X_2$)

Kružni dijagram

Promotrimo najprije jednostavni strujni krug koji sadrži jedan radni otpor R i induktivni X_L s tim da se otpor R može regulirati: narinuti napon U je fiksiran, određen mrežom. Vektorski dijagram bi onda izgledao kao na slici. Ako otpor R mijenjamo, pravi kut između U_R i U_X mora ostati sačuvan, a to znači da će se promjenom otpora R tačka B gibati po kružnici kojoj je U promjer.

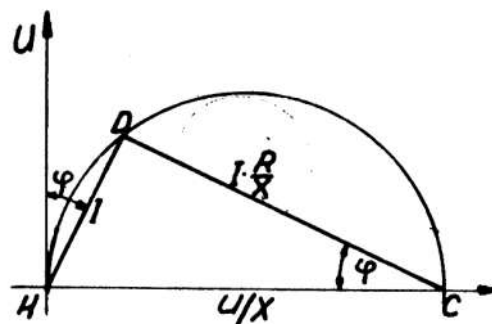
Podjelimo svaku stranicu trokuta sa X (pravi kut i ostala geometrijska svojstva trokuta ostala su sačuvana) i zarotirajmo čitav sustav za $+90^\circ$.



Dobili smo novi kružni dijagram čije su promjenjive katete

I i $I \frac{R}{X}$ a hipotenuza U/X .

Vrh vektora struje I leži na kružnici HCD, koju zato zovemo kružnica struje

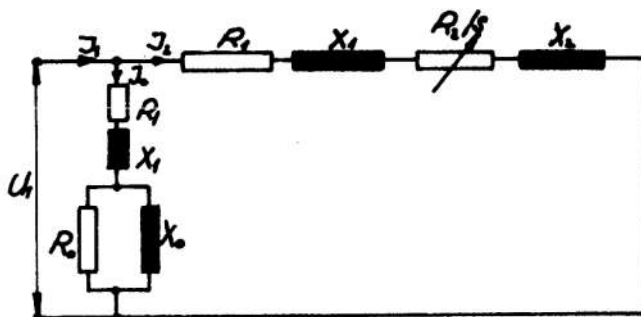
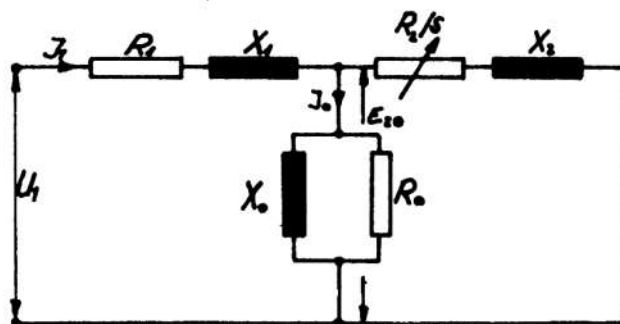


Nacrtajmo još jednom nadomjesnu shemu asinhronog motora. Ovu

shemu možemo nadomjestiti

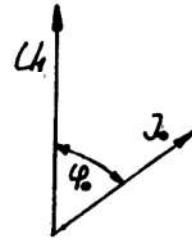
shemom na slijedećoj slici,

a da se parametri ne promjene bitno. Ova druga shema daje nešto manje tačne rezultate, ali je pogreška praktički zanemariva.

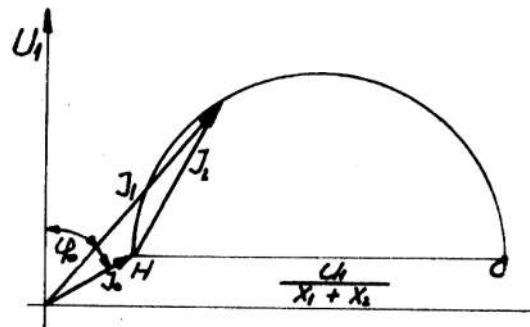


Ovom novom nadomjesnom shemom dobili smo dva strujna kruga priključena na čvrsti napon U_1 : Magnetizirajući krug sa stalnim otporima R_1 , X_1 , R_0 , X_0 i radni krug sa stalnim otporima R_1 , X_1 , X_2 i promjenjivim (zbog promjenjivog klizanja s) $\frac{R_2}{s}$.

Vektorski dijagram za magnetizirajući krug koji ima sve fiksne otpore, izgleda kao na ovoj slici, a vektorski dijagram radnog kruga je zbog promjenjivog otpora R_2/s istovjetan sa prethodno nacrtanim kružnim dijagramom za jednostavni krug. Kad se ta dva dijagrama spoje, dobije se kružni dijagram asinhronog stroja.



Da bi konstruirali krug struje, dovoljno je napraviti pokus praznog hoda i pokus kratkog spoja.

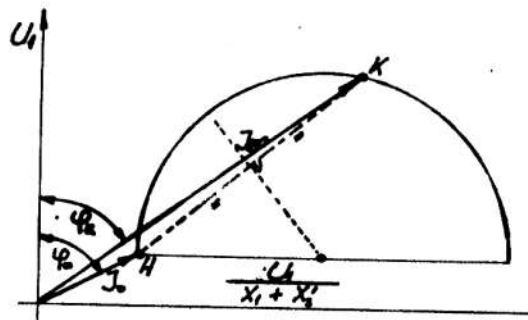


Pokus praznog hoda izvodi se pri nominalnom naponu U_1 , uz otvoreni rotorski namot. Tada motor uzima iz mreže samo struju I_0 . Mjerimo li snagu P_0 i struju I_0 , možemo odrediti tačku H praznog hoda tj. struju I_0 po iznosu i faznom kutu

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3U_{1f} I_{0f}}$$

Iz pokusa kratkog spoja odredit ćemo još jednu tačku na kružnom dijagramu, tačku K.

Pokus kratkog spoja izvodi se pri mirujućem rotoru uz sniženi napon U_k doveden na stator i pri nominalnoj frekvenciji f . Tada stroj uzima iz mreže struju I_k i snagu



$$P_k = 3U_{kf} I_{kf} \cos \varphi_k.$$

Mjerenjem snage i struje, može se izračunati

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{3U_{kf} I_{kf}}$$

Struja I_k je struja pri sniženom naponu U_k . Asinhroni stroj u kratkom spoju možemo smatrati linearnim potrošačem, tada struju kratkog spoja pri nominalnom naponu I_{kn} dobijemo računski iz struje I_k prema relaciji

$$I_{kn} = I_k \frac{U_n}{U_k}$$

i snagu

$$P_{kn} = P_k \left(\frac{U_n}{U_k} \right)^2$$

Zbog linearnosti ostaje

$$\cos \varphi_k = \cos \varphi_{kn};$$

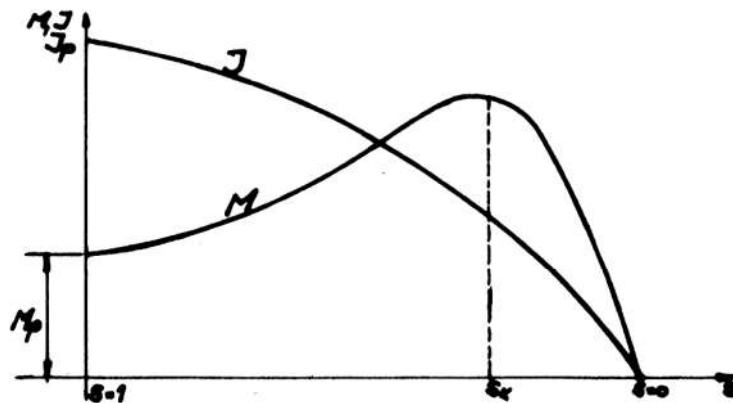
Imamo li nacrtan kružni dijagram nekog asinhronog stroja, iz njega možemo očitati:

- a) $\cos \varphi$ pri nekom pogonskom stanju
- b) dovedenu snagu P_1
- c) korisnu snagu P_{meh}
- d) ukupnu sekundarno prenesenu snagu P_2
- e) gubitke P_{Cu1} u namotu statora, gubitke P_{Cu2} u namotu rotora i gubitke u željezu P_{Fe}
- f) klizanje s
- g) prekretni moment M_k

Da bi nam kružni dijagram zbilja mogao poslužiti za odredjivanje ovih veličina, moramo mu ucrtati još i tzv. liniju korisne snage, liniju momenta, te skalu klizanja. Na slijedećoj slici su

Pokretanje asinhronog motora

Pogledajmo još jedanput karakteristiku momenta i struje asinhronog motora u ovisnosti o klizanju. Vidimo da



se trenutak pokretanja ($s=1$) ističe malim momentom M_p (pokretni moment) i vrlo velikom strujom. To su dvije vrlo neugodne činjenice, pa pokretanje asinhronog motora predstavlja svojevrstan problem. Struja pokretanja I_p obično je 4 do 7 puta veća od nominalne, dok je moment pokretanja M_p manji od nazivnog momenta M_n .

Glavni načini pokretanja asinhronog motora su:

- a) direktno uključenje na mrežu
- b) uključenje pri sniženom naponu
- c) pokretanje pomoću regulacionog otpornika u rotorskom krugu.

Direktnim priključenjem motora na nazivni napon U_n nismo izbjegli ni veliku struju pokretanja ni mali pokretni moment. Zato je ovaj način pokretanja ograničen na manje motore napajane iz jake mreže koja može podnijeti velike struje pokretanja, a pokretni moment je dovoljan da bi savladao opterećenje na osovini.

Pokretanje pri sniženom naponu primjenjuje se dosta često u vidu preklapanja zvijezda-trokut. Rotorski namot je

kratko spojen, a statorski može biti, preko preklopke, spojen u zvjezdu ili trokut. Kod pokretanja preklopka je u položaju Y (zvijezda). Zbog toga je napon pojedine faze

$$U_Y = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

i struja pokretanja svake faze

$$I_{pY} = \frac{U_Y}{Z_p} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_p}$$

gdje je Z_p ukupna impedancija (statora i rotora) asinhronog motora u trenutku pokretanja.

Mreža je, zbog zvjezdanog spoja u tom trenutku opterećena strujom

$$I_{plY} = I_{pY} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_p}$$

Kad bi namotaj bio spojen u trokut, bio bi napon svake faze motora

$$U_{\Delta} = U$$

i struja pokretanja pojedine faze

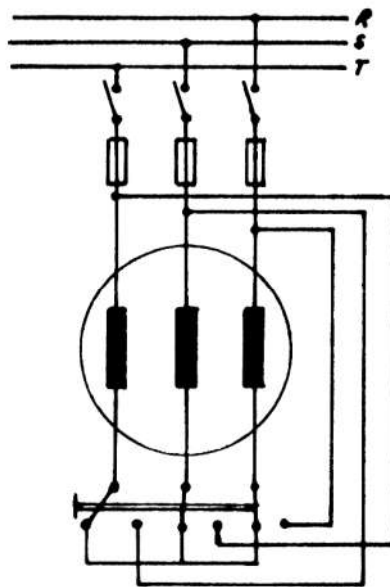
$$I_{p\Delta} = \frac{U}{Z_p}$$

Mreža je opterećena strujom

$$I_{pl\Delta} = \sqrt{3} I_p = \frac{\sqrt{3} U}{Z_p}$$

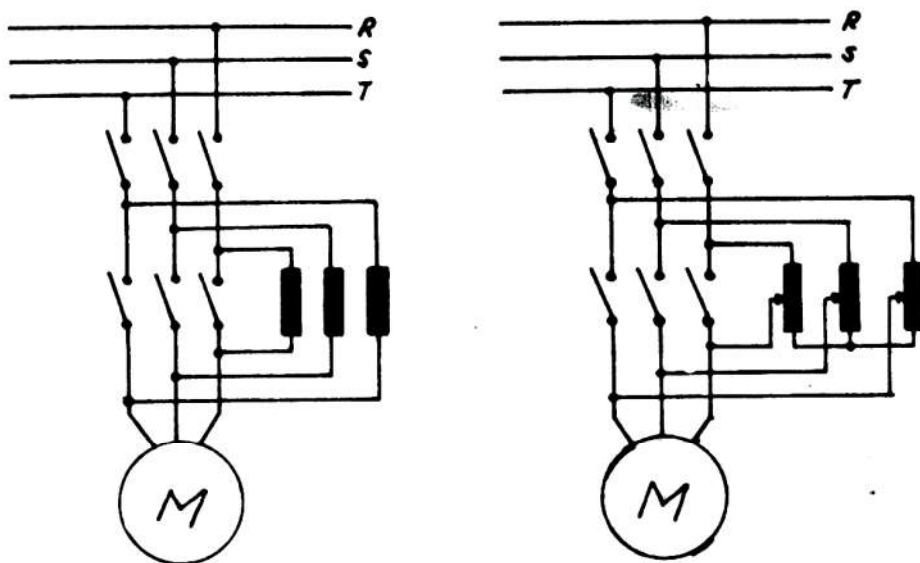
Vidi se da je

$$I_{plY} = \frac{1}{3} I_{pl\Delta}$$



Dakle, linijska struja pokretanja pri spoju u zvjezdu tri puta je manja od struje pokretanja pri spoju statora u trokut. Doduše i pokretni moment je tri puta manji, pa se ovaj način pokretanja primjenjuje samo ondje gdje je moment tereta pri pokretanju znatno manji od nazivnog.

Ponekad se primjenjuje i pokretanje pomoću prigušnica spojenih u seriju s motorom u trenutku pokretanja, a poslije se te prigušnice premoste. U trenutku pokretanja na prigušnicama nastaje veliki pad napona, te motor opet kreće sa sniženim naponom, pa mu je i struja pokretanja manja. Također se može primjeniti napajanje motora preko autotransformatora koji omogućava kontinuiranu promjenu napona napajanja.



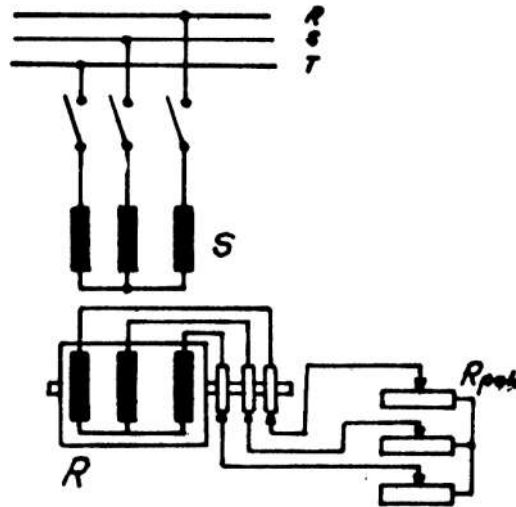
Ukoliko krajevi rotorskog namota nisu spojeni unutar rotora već su izvedeni, preko kliznih prstena i četkica vani, prakticira se pokretanje pomoću otpornika u rotorskom krugu.

Napišimo još jednom izraze za rotorsku struju i moment asinhronog stroja, te nacrtajmo krivulje $M = f(s)$ i $I = f(s)$ uz otpor R_2 kao parametar.

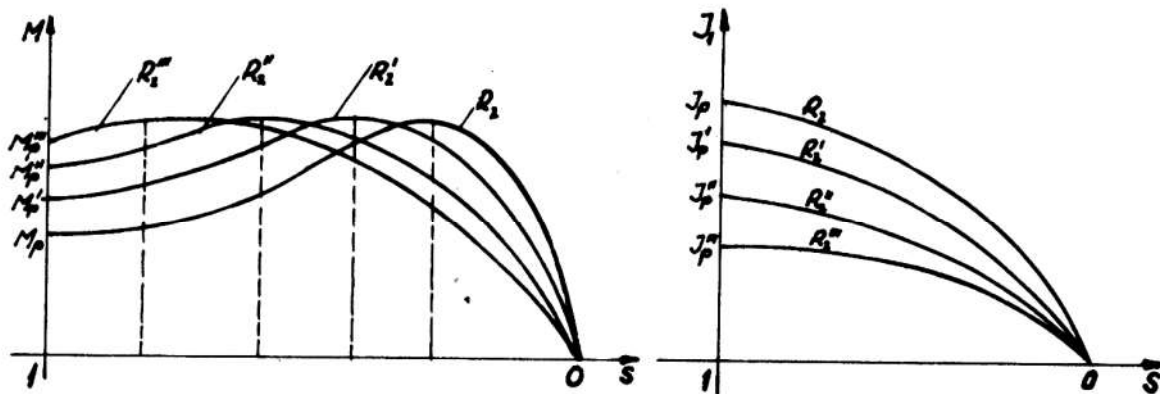
$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2$$

$$M = \frac{3 E_{20}^2 R_2}{1,028 n_0 \left(\frac{R_2^2}{s} + X_2^2 s \right)}$$



Sa dijagrama je vidljivo da se porastom otpora u rotorskom krugu pokretni moment M_p povećava i to tim više što više raste otpor R_2 . Istovremeno, kao što je vidljivo, struja pokretanja I_p pada sa porastom otpora R_2 .



U krug rotora se obično uključuju trofazni otpornici hladjeni zrakom ili uljem. Kod motora većih snaga upotrebljavaju se vodeni otpornici.

Kad motor krene i postigne određenu brzinu, otpori u rotorskom krugu se smanjuju i na kraju potpuno premoste, te stroj dalje radi pri kratkospojnom rotoru, a četkice se podi-

nu sa kliznih koluta da se ne habaju. Postoje posebni uređaji za podizanje četkica i kratko spajanje rotora.

Treba napomenuti da postoje asinhroni motori sa specijalno konstruiranim rotorom tako da je omski otpor, zbog potiskivanja struje (skin-efekta) u trenutku pokretanja višestruko veći od otpora u nominalnom pogonu, te je struja pokretanja podnošljiva za mrežu i motor. Takvim motorima nisu potrebni posebni pokretači.

Regulacija asinhronog motora

Brzina asinhronog motora može se regulirati na jedan od ovih načina:

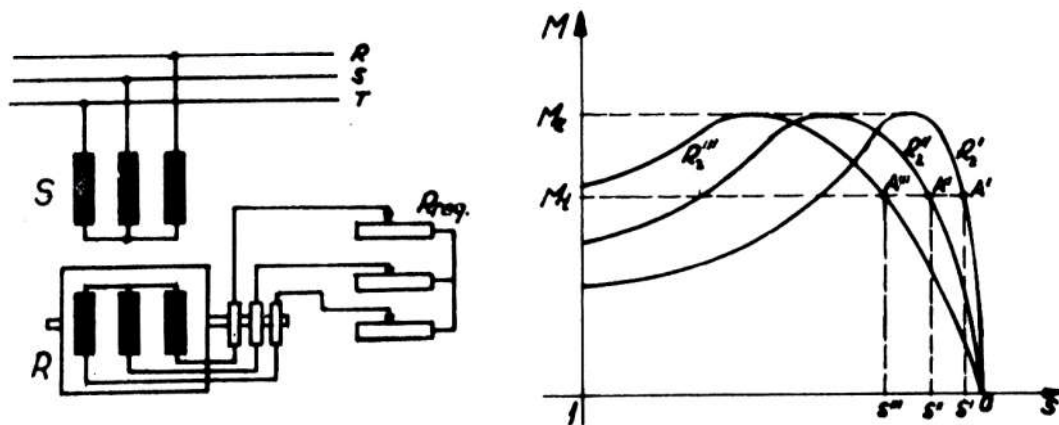
1. Otpornikom u rotorskom krugu
2. Promjenom broja pari polova
3. Uvodjenje dopunskog napona u krug rotora
4. Promjenom frekvencije mreže

1. Reguliranje brzine vrtnje pomoću otpornika u rotorskom krugu primjenjuje se samo kod manjih kliznokolutnih motora. Regulacioni otpornici moraju biti proračunati na duži prolaz struje kroz njih, pa otpornici za pokretanje koji su dimenzionirani samo za kratkotrajni proces pokretanja ne mogu poslužiti kao regulacioni

Sam proces reguliranja vidljiv je sa dijagrama. Ako je moment tereta M_t konstantan i neovisan o klizanju, radne tačke bit će respektivno A' , A'' , A''' kojima odgovaraju klizanja s' , s'' , s''' . Vidljivo je da ukoliko je $R_2' < R_2'' < R_2'''$ i $s' < s'' < s'''$. Pošto je općenito

$$n = n_0 (1-s)$$

to će biti



$$n' = n_0(1-s'), \quad n'' = n_0(1-s''), \quad n''' = n_0(1-s'''),$$

a odatle slijedi

$$n' > n'' > n'''$$

Dakle, povećavanjem otpora u rotorskom krugu smanjuje se brzina i obratno.

Nedostatak ovog načina regulacije je povećanje gubitaka P_{el} i zbog toga smanjenje korisnosti motora sa porastom klizanja.

2. Sinhrona brzina okretnog polja data je relacijom

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}$$

Vidljivo je da se promjenom broja pari polova p može mjenjati sinhrona brzina, a time uz isto klizanje i brzina vrtnje motora. Pošto p može biti samo cijeli broj, očito je da ovaj način omogućava promjenu brzine samo za cijeli broj puta.

3. Ako ^{na} rotorski krug narinemo neki strani napon frekvencije f_2 , a stator je normalno priključen na mrežu čvrste frekvenci-

je f_1 , asinhroni motor će postići neku čvrstu brzinu koja odgovara klizanju $s = f_2/f_1$. Dakle, uvođenjem stranog napona frekvencije f_2 u krug rotora, može se postići promjena brzine vrtnje motora.

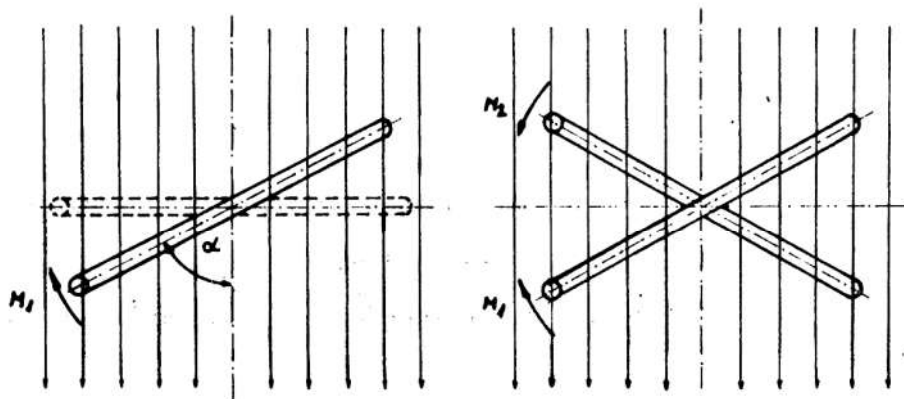
Reguliranje brzine vrtnje navedenim načinom vrši se najčešće u kaskadnim spojevima, pod kojima podrazumjevamo dva ili više elektromotora vezanih električki i mehanički.

4. Reguliranje brzine vrtnje promjenom frekvencije mreže vrši se najčešće u autonomnim postrojenjima gdje su motori napajani iz vlastitog generatora (npr. pogon brodskih vijaka).

Promjenom frekvencije napojnog napona mijenjaju se sve veličine asinhronog motora: brzina vrtnje, magnetski tok, struja praznog hoda, moment, snaga itd. Na ovom mjestu nećemo ulaziti u dosta složene analize ovog načina regulacije brzine.

Jednofazni asinhroni motor

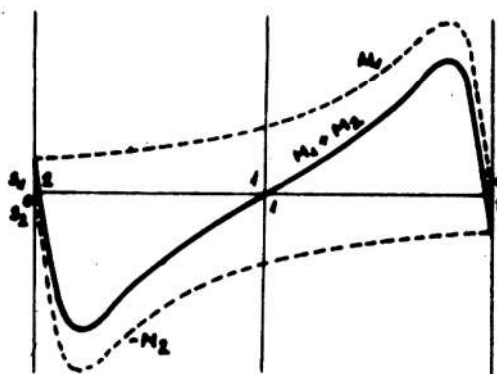
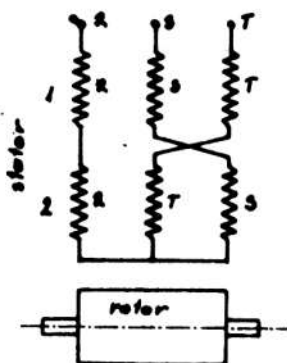
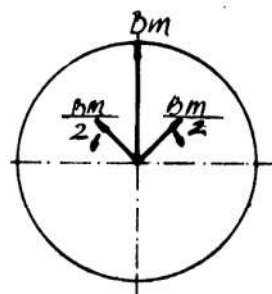
Ako na statoru asinhronog motora postavimo običan jednofazni namot, umjesto trofaznog, i na njega narinemo jednofazni napon, nastat će, ne okretno već pulzirajuće polje tjemene vrijednosti B_m sa fiksnom osi. Razmotrimo djelovanje tog polja na jedan zavoj rotora. Zatvara li taj zavoj s osi polja (koja je fiksna!) kut α , kroz njega će poteći struja koja će s poljem stvoriti takav moment da zavoj postavi u položaj u kojem



će obuhvaćati maksimum toka.

U stvarnom rotoru postoji više zavoja, pa se prvom zavoju može naći korespodentan drugi zavoj simetrično postavljen u odnosu na os magnetskog toka. Na njega djeluje sada moment M_2 suprotan momentu M_1 , ali jednakog iznosa. Rezultirajući moment je prema tome jednak nuli, te asinhroni motor ne može sam od sebe krenuti.

Da bolje shvatimo ovakvo ponašanje motora, rastavimo pulzirajuće polje amplitude B_m u dva polja amplitude $B_m/2$ čije osi se okreću sinhronom brzinom u suprotnim smjerovima. Takva polja možemo dobiti zamislimo li jednofazni namot statora zamjenjen s dva trofazna namota 1 i 2 od kojih svaki ima po fazi polovinu broja zavoja jednofaznog namota. Takva shema potpuno je ekvivalentna jednofaznom namotu, ali ima tu prednost da se ne radi s pulzirajućim poljem već s dva okretna polja. Ova dva polja nastojat će povući rotor, svaku na svoju stranu momentom M_1 odnosno M_2 . Rezultira-



jući moment je $M = M_1 + M_2$. Kad rotor miruje $s_1 = s_2 = 1$ i $M_{1p} = -M_{2p}$, pa je ukupni pokretni moment $M_p = 0$. Ako rotor motora pokrenemo, prevladat će moment M_1 (ili M_2), rezultira-

jući moment je različit od nule i motor će se okretati. Rezultirajući moment $M = M_1 + M_2$ usmjeren je u stranu okretanja rotora.

Običan jednofazni motor ne može sam od sebe krenuti već ga treba mehanički izvesti iz položaja ravnoteže.

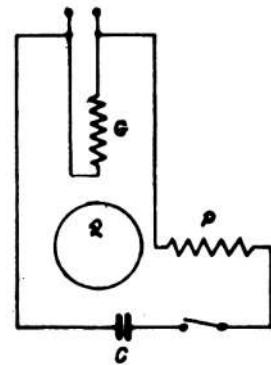
Jednofazni motor radi s manjim stupnjem korisnosti od trofaznog asinhronog motora, a reguliranje brzine teže je i u znatno užim granicama nego kod trofaznog.

Veći jednofazni asinhroni motori grade se s pomoćnim namotom za pokretanje koji je prostorno pomaknut za 90° prema glavnom namotu. Ako takvim namotima dovedemo struje takodjer pomaknute za 90° vremenski, pojavit će se okretno polje (umjesto dosadašnjeg pulzirajućeg polja) koje se vrti samo u jednom smjeru. Tako ćemo imati sličnu situaciju kao kod običnog trofaznog motora. Pokretni moment će biti različit od nule i motor će moći sam krenuti.

Vremenski fazni pomak struja postiže se najčešće uvođenjem kondenzatora u krug namota za pokretanje. Kad motor krene, kondenzator (i pomoćna faza) se može iskopčati. Pomoćni namot i kondenzator mogu se i tako dimenzionirati da ostanu ukopčani za cijelo vrijeme rada asinhronog motora.

G - glavni namot

P - pomoćni namot



Tipovi i osnovni elementi konstrukcije asinhronog motora

Općenito pod asinhronim motorom podrazumjevamo stroj izmjenične struje kojem se brzina, pri čvrstoj frekvenciji mreže, mijenja sa opterećenjem. Osnovni tip takvog stroja je asinhroni trofazni motor u dvije glavne izvedbe:

a) klizno-kolutni motor, b) kavezni motor. Kod prvog tipa krajevi rotorskog namota su izvedeni preko kliznih koluta izvan rotora, a kod drugog namot je spojen unutar rotora tako da štapovi tog namota tvore "krletku" pa se zato ovaj tip motora zove kavezni.

Pored svojih dobrih strana (relativno jeftina izrada, jednostavnost i robustnost te postizanje velikih snaga uz relativno male dimenzije), asinhroni motor ima dosta nedostataka:

- pogoršava $\cos \varphi$ mreže jer uzima induktivnu struju magnetiziranja.
- ima slabe regulacione osobine. Kontinuirano reguliranje brzine u širim granicama skoro je nemoguće.
- karakteristike pokretanja (osobito kavezni motora) su loše.

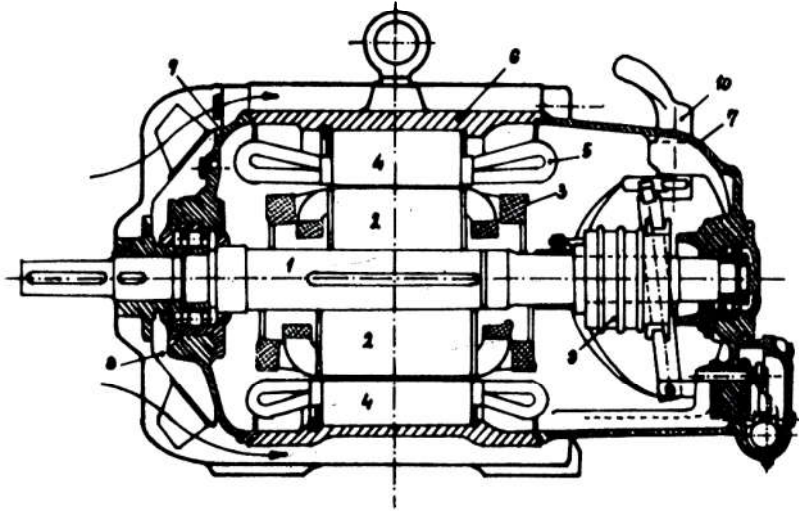
Uprkos svemu, asinhroni motor (posebno kavezni tip) je zadržao primat u oblasti nereguliranih pogona male snage.

U konstrukciji asinhronog motora razlikuju se dva osnovna djela: nepomični stator i rotirajući rotor koji su jedan od drugog odjeljeni zračnim rasporom.

Stator asinhronog stroja sličan je statoru sinhronog stroja.

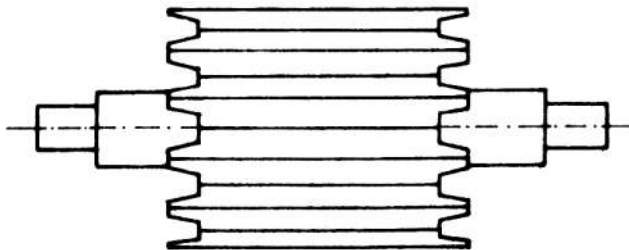
Rotor se sastoji od jezgre napravljene od dinamo-limova i nasadjene na osovinu, i od namota uloženog u žljebove jezgre. Žljebovi (utori) ravnomjerno su raspoređeni po obodu rotora.

Na idućim slikama dat je presjek asinhronog kliznog kolutnog motora i izgled rotora sa kaveznim namotom.



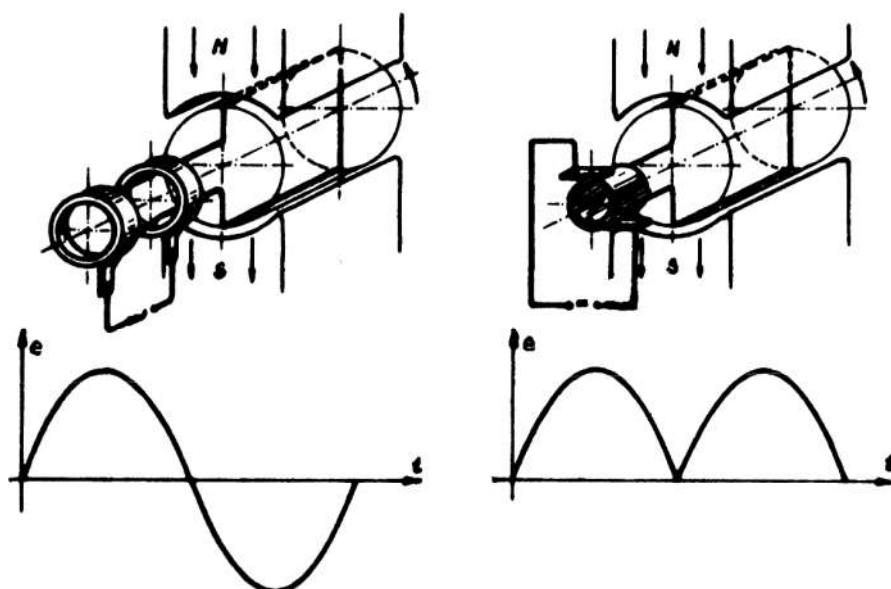
Uzdužni presjek asinhronog motora s kolutnim rotorom

1 - osovina; 2 - željezo rotora; 3 - namot rotora; 4 - željezo statora; 5 - namot statora; 6 - kućište statora; 7 - kućište ležajeva; 8 - ventilator; 9 - kontaktni kolut; 10 - ručica za podizanje četkica



6. ISTOSMJERNI KOLEKTORSKI STROJEVI

Istosmjerni kolektorski stroj u suštini je izmjenični električni stroj snabdjeven specijalnim dijelom, kolektorom i četkicama, pomoću kojeg se ispravlja izmjenična struja.



Princip rada sinhronog
stroja

Princip rada istosmjernog
stroja

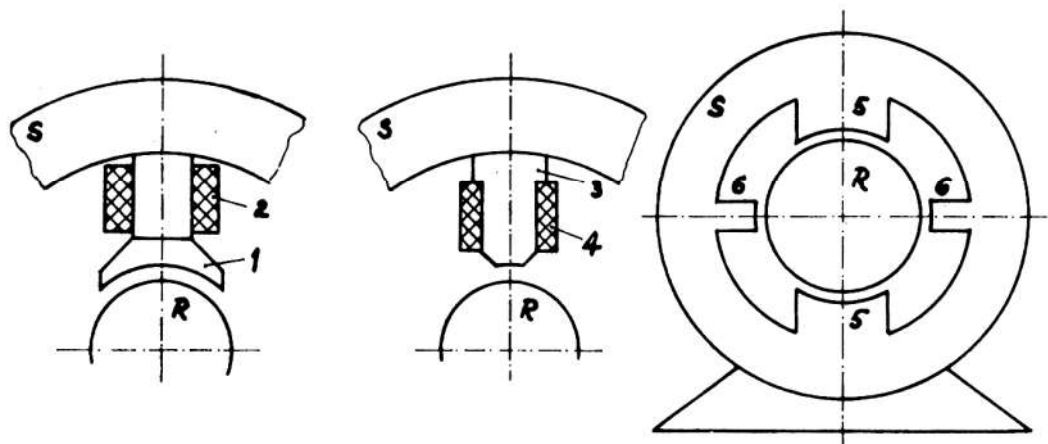
Tako će se u zavoju rotora (vidi sliku!) inducirati izmjenična struja, ali će u vanjskom krugu teći ispravljena struja prema slici desno.

Istosmjerni stroj, kao i svaki električni stroj, sastoji se od statora i rotora. Mirujući dio, **stator**, služi za stvaranje magnetskog toka, a u rotoru se vrši pretvaranje mehaničke energije u električnu odnosno električnu u mehaničku.

Na stator su učvršćeni glavni i pomoćni polovi. Glavni polovi su elektromagneti koji proizvode istosmjerni tok, a pomoćni polovi se stavljaju između glavni i služe za poboljšanje uvjeta komutacije.

Glavni pol se sastoji od jezgre sastavljene iz željeznih limova i polnog namota navučenog na jezgru. Kroz polni navoj teče struja uzbuđuje.

Pomoćni pol također ima jezgru i namot pomoćnog pola. Postavlja se tačno u sredinu između glavnih polova u liniji geometrijske neutralne osi. Na donjim slikama prikazani su glavni i pomoćni pol, te njihov razmještaj kod dvopolnog isto-



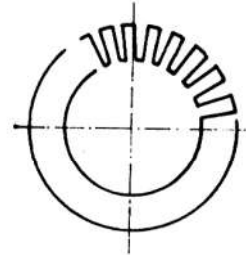
R - rotor, S - stator, 1-jezgra glavnog pola, 2-namot glavnog pola, 3-jezgra pomoćnog pola, 4-namot pomoćnog pola, 5-glavni polovi, 6-pomoćni polovi.

smjernog stroja.

Rotor istosmjernog stroja sastoji se od tijela rotora, namota rotora i kolektora. Tijelo rotora izradjeno je od lameliranog elektrotehničkog željeza. Željezne lamele imaju nazubljen oblik prema slici i slažu se okomito na osovinu rotora. Cilj ovakve konstrukcije rotora je da se umanje vrtložne struje

koje se razvijaju u tijelu rotora pri njegovom okretanju u magnetskom polju, a usmjerene su paralelno s osi rotora.

U nastale utore duž rotora ulaže se rotorski namot koji mora biti pažljivo izoliran od jezgre rotora. Napominje se da postoje različite vrste rotorskih namota. O načinu namatanja istosmjernog stroja i svojstvima pojedinih vrsta namota neće biti govora na ovom mjestu, jer to izlazi izvan okvira ovog kratkog izlaganja.



Krajevi rotorskog namota izvedeni su na kolektor, koji je u stvari pravilno cilindrično tijelo sastavljeno od posebno oblikovanih bakrenih lamela pažljivo izoliranih međusobno, a isto tako i od tijela rotora. Na kolektor su prislonjene četkice preko kojih se rotorskom namotu dovodi odnosno uzima struja.

Istosmjerni stroj može, bez ikakvih konstruktivnih preinaka, raditi kao generator ili kao motor.

Istosmjerni generator

S obzirom na izvor uzbudne struje djelimo istosmjerne generatore na:

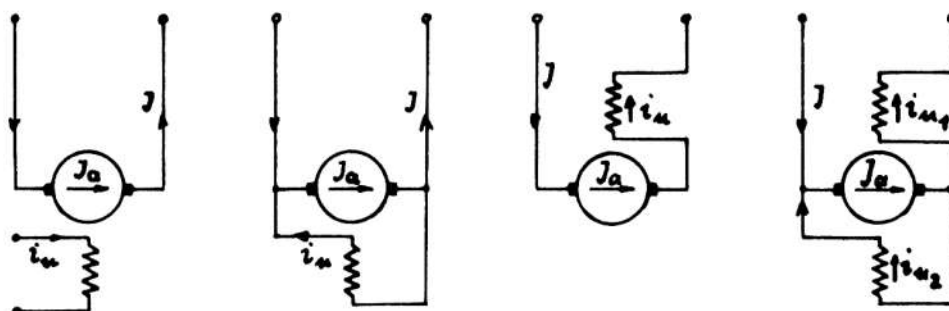
- a) **generatore s nezavisnom uzбудom**
- b) **samouzbudne generatore**

U prvom slučaju uzbudni namot (namot glavnih polova) priključen je na neki vanjski izvor istosmjernog napona. Struja uzbuđe i_u ovisi samo o naponu na stezaljkama uzbuđnog namota i otporu tog namota. Generatori s nezavisnom uzбудom često se grade zbog dobrih karakteristika regulacije napona.

Samouzbudni generatori se dijele na generatore s paralelnom uzbudom, sa serijskom uzbudom i s mješovitom uzbudom.

Generator s paralelnom uzbudom veoma je rasprostranjen jer mu ne treba poseban izvor za uzbudu, a u području nominalnog opterećenja daje dovoljno stabilan napon. Struja uzbuđe je

$$i_u = \frac{U}{R_u} = I_a - I$$



generator s
nezavisnom
uzbudom

generator s
paralelnom
uzbudom

generator sa
serijskom
uzbudom

generator sa
mješovitom
uzbudom

Kod generatora sa serijskom uzbudom struja uzbuđe jednaka je struji opterećenja

$$i_u = I = I_a$$

Pošto je opterećenje u pravilu promjenljivo, mijenja se i struja uzbuđe, a s tim i napon generatora, tj. napon generatora mijenja se u ovisnosti od struje opterećenja onda kad bi trebao biti manje ili više konstantan. Zbog toga se danas generatori sa serijskom uzbudom ne primjenjuju.

Generator s paralelno - serijskom uzbudom zove se često kompaundni generator. U pravilu, paralelni namot igra ulogu

glavnog uzbudnog namota, a serijski je pomoćni. Mješovita uzbuda je povoljna jer se pravilnim njenim dimenzioniranjem može postići i automatski održavati potreban napon na stezaljkama potrošača bez obzira na opterećenje.

Elektromagnetski moment generatora

Okreće li se rotor istosmjernog generatora pod utjecajem iz vana dovedenog momenta M_t u smjeru kazaljke na satu, u vodiču na obodu rotora ispod pola N inducirat će se struja i_v naznačenog smjera. Ako je duljina vodiča l_v i magnetska indukcija B , pojavit će se sila na vodič

$$F_v = B l_v i_v$$

usmjerena kao na slici. Ta sila prouzročit će moment

$$M_v = F_v \frac{D}{2} = B l_v \frac{D}{2} i_v$$

ili

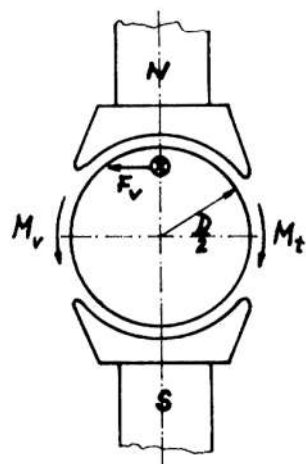
$$M_v = B \frac{l_v D \pi}{2 \pi} i_v = \frac{1}{2 \pi} \Phi i_v$$

Ima li generator p -pari polova i z vodiča na obodu rotora, njegov elektromagnetski moment je

$$M_{\text{gen}} = \frac{1}{2 \pi} p \Phi z i_v$$

Elektromagnetski moment generatora usmjeren je suprotno od momenta pogonskog stroja M_t , te se manifestira kao kočni moment.

Cd spojimo li generator od pogonskog stroja, ali ostavimo isti polaritet polova te izvana dovedemo u vodiče struju i_v istog iznosa i smjera kao prije, sila F_v i moment M_v zadrža-



vaju isti smjer ali se sad javljaju kao pokretajuća sila odnosno moment . Prema tome, pri ovim uvjetima imamo električni motor koji električnu energiju dovedenu u vodiče pretvara u mehaničku.

Dakle, istosmjerni stroj može raditi bilo kao generator bilo kao motor, već prema tome dovodimo li mu mehaničku ili električnu energiju.

Istosmjerni motori

Istosmjerni motori se skoro uvijek izvode kao samouzbudni i to kao:

- a) paralelni (poredni) motori
- b) serijski motori
- c) motori s mješovitom uzбудom (kompaudni motori)

Principijelne sheme ovih motora istovjetne su sa shemama odgovarajućih generatora.

Sva tri ova tipa široko se primjenjuju u praksi zbog dobrih regulacionih karakteristika.

Kad se vodič kroz koji teče struja, zbog djelovanja sile F_v započne gibati u magnetskom polju nekom brzinom n , u njemu se inducira napon E usmjeren suprotno od smjera struje u vodiču. Inducirani napon E je protunapon, djeluje suprotno od narinutog napona, tj. može se pisati

$$U = E + I_a R$$

gdje je I_a struja kroz rotor, a R otpor rotorskog kruga. Pošto je

$$E = c n \phi$$

slijedi

$$n = \frac{U - I_a R}{c \Phi}$$

Odavde slijedi da brzinu okretanja istosmjernog motora možemo regulirati na tri načina :

1. promjenom napona mreže
2. promjenom otpora u rotorskom krugu
3. promjenom magnetskog toka

Prvi način se rijedje upotrebljava, dok se drugi i treći susreću u praksi vrlo često. S njima možemo ostvariti kontinuiranu regulaciju brzine istosmjernog motora u **vrlo** širokim granicama, uz skoro nepromjenjenu korisnost. Regulacioni uređaji s kojima to postižemo, uglavnom su jednostavni i jeftini. Ova mogućnost čini istosmjerne motore u nizu slučajeva nezamjenjivim (npr. elektrovuča).

7. ELEKTROMOTORNI POGONI

Neposredna upotreba čovječijih fizičkih sposobnosti u industrijskoj praksi, bila bi uz vrlo teške uslove rada više nego neekonomična. Mehanički rad jednog čovjeka tokom jednog radnog dana odgovara od prilike radu od jednog kWh. Očito je da je čovječiji rad mnogostruko skuplji od rada dobivenog iz elektrane. Zato se uloga čovjeka u visokoproduktivnim industrijskim postrojenjima sve više svodi na planiranje i upravljanje radnim mehanizmima koje pokreću motori bilo koje vrste. Zahvaljujući relativno dobrim regulacionim karakteristikama, zatim prikladnim dimenzijama, velikom stepenu iskorišćenja i relativno niskoj proizvodnoj cijeni, kao pogonski strojevi sve češće se upotrebljavaju elektromotori.

Prednosti elektromotora kao pogonskog stroja

Elektromotor je historijski najmladjimedju strojevima za proizvodnju mehaničkog rada, a ipak danas udio elektromotora u ukupnoj instaliranoj snazi svih motora premašuje 90%. Uz visoku ekonomičnost (stupanj korisnosti elektromotora prelazi 95%) i momentalnu spremnost za pogon, elektromotor posjeduje izvanrednu prilagodljivost radnom mehanizmu i tehnološkom procesu. Gradi se za široko područje brzina vrtnje, za različite kinematske osobine radnog mehanizma (moment opterećenja stalan, ovisan o brzini vrtnje, ovisan o vremenu, ovisan o putu i općenito promjenjiv). Može kratkotrajno izdržati visoka preopterećenja bez većih štetnih posljedica (što nije slučaj za

druge vrste motora). Pojedini elektromotori su sposobni za široko područje regulacije brzine vrtnje uz upotrebu vrlo jednostavnih i za rukovanje udobnih naprava. Za rad u agresivnim, otrovnim, zagadjenim i zapaljivim sredinama (rudnici, cementare i slično) skoro je nezamjenljiv. Automatsko i daljinsko upravljanje je uvođenjem elektromotora široko primjenjivo, udobno i sigurno. Transport i raspodjela električne energije mnogo su jednostavniji, jeftiniji i tehnički prikladniji od transporta i raspodjele goriva za klasične motore. Takodjer je vrlo jednostavno mjerenje potrošnje energije, a pogon je jednostavan za rukovanje, ne stvara veliku buku i ne predstavlja izvor zagadjivanja atmosfere kao što je to slučaj kod eksplozionih motora.

Mehaničke karakteristike elektromotora

Svaki elektromotorni pogon karakteriziran je u stacionarnom stanju nekom odredjenom brzinom vrtnje n , momentom opterećenja M_t i obrtnim momentom motora M_m . Prije nego dodje u stacionarno stanje (karakterizirano konstantnom brzinom), elektromotorni pogon prolazi kroz prelazno stanje promjenljive brzine. U svakom momentu važi uslov ravnoteže

$$M_m = M_t + M_u$$

gdje je M_u moment ubrzanja odredjen relacijom

$$M_u = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{\pi}{30} \frac{dn}{dt}$$

U stacionarnom stanju je

$$n = \text{konst.}, M_u = 0, M_m = M_t$$

Moment motora M_m kod većine elektromotora zavisan je od brzine vrtnje. Karakteristiku koja daje tu ovisnost $n = f(M_m)$ zovemo mehanička karakteristika motora.

Razni radni mehanizmi imaju takodjer svoje razne mehaničke karakteristike $n = f(M_t)$ i postavljaju različite zahtjeve elektromotorima koji im sa svoje strane moraju udovoljiti.

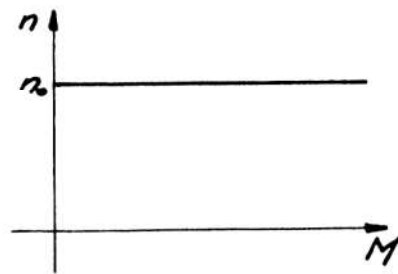
Mehaničke karakteristike motora se dijele prema gradijentu brzine vrtnje $\frac{dn}{dM_m}$ na:

1. kruta, apsolutno tvrda karakteristika; $\frac{dn}{dM_m} = 0$
2. tvrda karakteristika, brzina se relativno malo smanjuje s porastom momenta.
3. meka karakteristika, brzina se naglo smanjuje s povećanjem momenta.
4. polumeka karakteristika, brzina se smanjuje s povećanjem momenta.
5. uzlazna karakteristika, brzina raste s porastom momenta.
6. asinhrona karakteristika. Ona se u stvari sastoji iz dva dijela: prvi dio od tačke gdje je klizanje nula do tačke prekretanja predstavlja tvrdu karakteristiku, i drugi u kojem moment počinje opadati sa smanjenjem brzine.

a) Mehanička karakteristika sinhronog stroja je apsolutno tvrda karakteristika u potpunosti neovisna o promjeni momenta. Ona ovisi samo o frekvenciji narinutog napona i broju polova.

$$n_o = \frac{60 f}{p}$$

Brzina sinhronog motora može se mijenjati u skokovima promjenom broja pari polova. Kontinuiranom promjenom frekvencije mreže mogla bi se kontinuirano mijenjati i brzina sinhronog stroja. Najviše današnjih tehničkih istraživanja



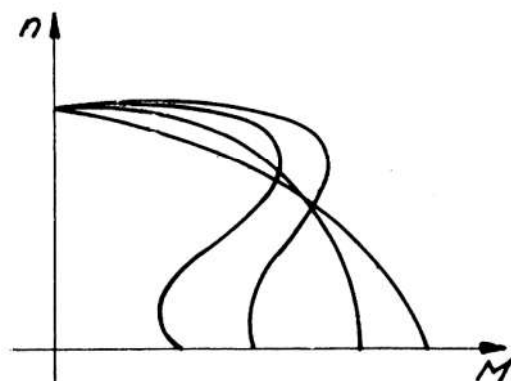
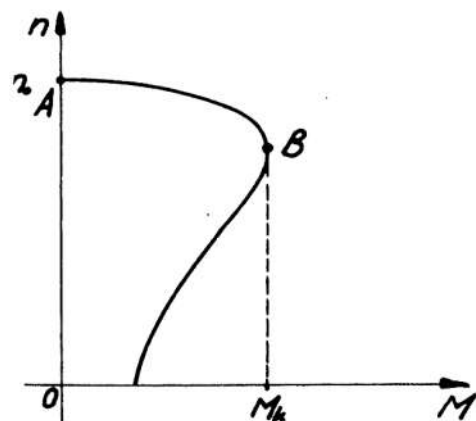
ide u pravcu transformiranja mreže čvrste frekvencije u izmjeničnu mrežu proizvoljne frekvencije, pomoću poluvodičkih elemenata - tiristora. Tim bi se postigla udobna regulacija sa širokim regulacionim opsegom jeftinih trofaznih izmjeničnih motora - sinhronih i asinhronih.

b) Mehanička karakteristika asinhronog motora je tzv. asinhrona karakteristika. Teži se da motor radi na dijelu karakteristike A-B. Zavisnost $n = f(M)$ teško je analitički izraziti, pa se mehaničke karakteristike daju u katalogima grafički. Na slici desno - dole predstavljene su neke od tipičnih karakteristika asinhronih motora s kratko spojenim rotorom.

O regulaciji brzine kod asinhronog motora bilo je već govora u poglavlju o asinhronim motorima.

Što se tiče kočenja, spomenimo samo da postoje tri osnovna načina :

- 1) kočenje u protuspoju
kad se energija uništava u vidu Joule-ove



topline. Ovaj način odlikuje se znatnom strminom kočenja.

2) rekuperativno kočenje pri kojem asinhroni motor prelazi u asinhroni generator te predaje energiju u mrežu. Ono se može primjeniti samo djelomično i to najčešće kod motora s prespojivim brojem pari polova.

3) dinamičko kočenje kad asinhroni motor radi kao sinhroni generator. U tu svrhu mu se dovodi istosmjerni napon iz posebnog izvora za uzbuđu. Uzbuda se najčešće provodi sa statora.

c) Mehaničke karakteristike paralelnog (porednog) istosmjernog motora spadaju u grupu više ili manje tvrdih mehaničkih karakteristika.

Ranije izvedena relacija

$$n = \frac{U - I_a R}{c \phi}$$

vrijedi i za paralelni istosmjerni motor. Moment istosmjernog motora određen je izrazom

$$M_m = c_1 I_a \phi \quad ; \quad I_a = M_m \frac{1}{c_1 \phi}$$

te je

$$n = \frac{U}{c \phi} - M_m \frac{R}{c c_1 \phi^2}$$

Kod paralelnog motora je

$$I_u = \frac{U}{R_u} = \text{konst}$$

pa je i $\phi \approx \text{konst}$

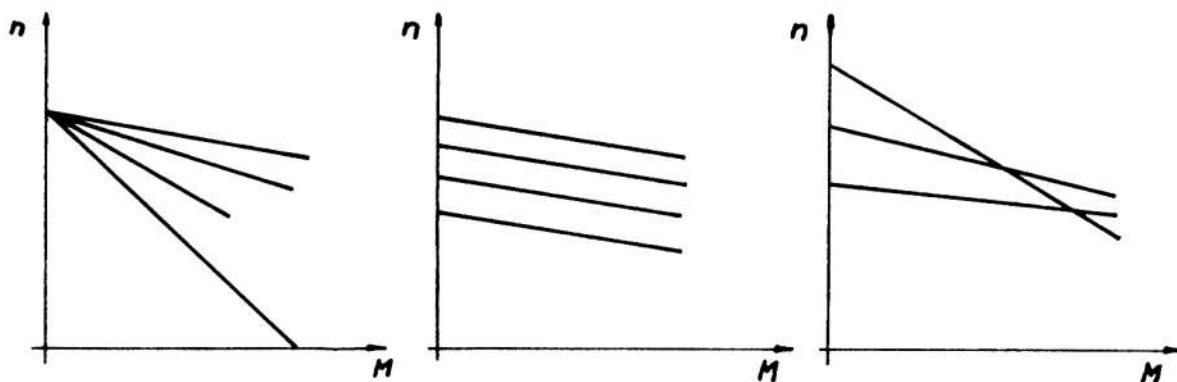
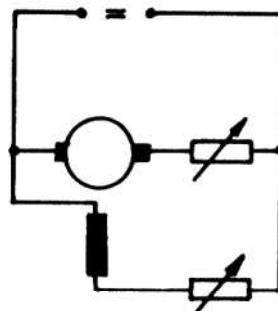
te važi

$$n = \frac{U}{c_3} - M_m \frac{R}{c_4}$$

Ako pri konstantnom naponu i uzbuđi mijenjamo otpor R u rotorskom krugu, dobije se porodica pravaca prema donjoj slici lijevo. Strmiye karakteristike odgovaraju većim otporima u rotorskom krugu.

Mjenja li se napon napajanja uz konstantnu uzbuđu dobije se druga porodica paralelnih pravaca.

Ako držimo konstantnim otpor rotorskog kruga i napon napajanja, a mijenjamo otpor uzbuđnog kruga, mijenja se i struja uzbuđe, a s njom i magnetski tok, te dobijemo karakteristike (pravce) različitog nagiba i različitih osječaka na obim osima. (Slika dole desno).



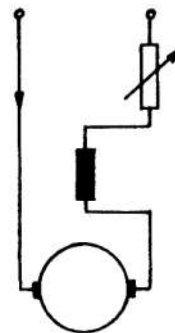
d) Mehaničke karakteristike serijskog istosmjernog motora su mekane karakteristike. Kod nezasićenog serijskog motora je magnetski tok glavnih polova proporcionalan sa strujom uzbuđe tj. sa strujom I :

$$\phi = k' I$$

Pa kako je

$$M_m = k I \phi$$

izlazi



$$I = c_1 \sqrt{M}$$

i

$$n = \frac{U - I R}{c \phi} = \frac{U - I R}{c k' I} = \frac{U}{c k' I} - \frac{R}{c k'}$$

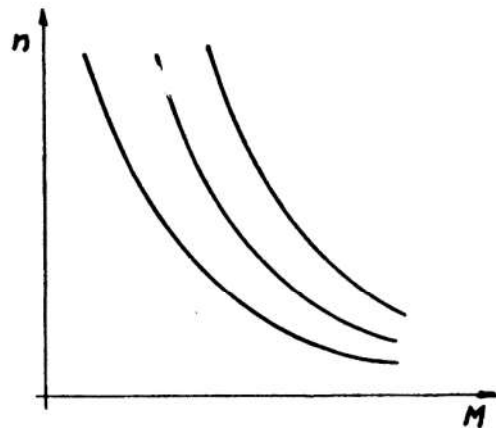
te konačno

$$n = \frac{U}{A \sqrt{M}} - \frac{R}{B}$$

Dakle, mehanička karakteristika nezasićenog motora je hiperbola.

Za motor koji nije nezasićen, nemoguće je zavisnost $n(M)$ izraziti analitički.

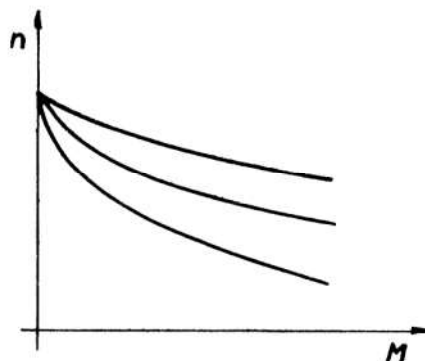
Ako pogledamo karakteristike, vidimo da brzina vrtnje naglo pada s porastom tereta. Zato serijski motori nisu prikladni za pogone koji zahtjevaju male promjene brzine s porastom tereta, ali su pogodni za radne mehanizme koji zahtjevaju male brzine vrtnje pri velikim opterećenjima i obrnuto (npr. elektrovuča). Pri sasvim malim opterećenjima brzina vrtnje se naglo povećava (pobjeg). Zato serijski motor nesmijemo nikad pokretati u praznom hodu, već on mora biti opterećen sa najmanje 15-20% nominalnog tereta.



e) Kompaundirani istosmjerni motori su složeno uzбудjeni motori. Oni imaju najmanje dva uzbudna namota - paralelni i serijski, pa se i njihove mehaničke karakteristike nalaze između odgovarajućih karakteristika paralelnog i serijskog motora kao

graničnih slučajeva. Mehaničke karakteristike složeno uzbudjenih motora sličnije su karakteristikama poredno uzbudjenih motora ili onima serijski uzbudjenih, već prema tome koja uzbuđa u nominalnom stanju prevladava. Po svom obliku, ove karakteristike spadaju u grupu polumekih karakteristika.

Kod kompaundiranih strojeva serijska uzbuđa potpomaže paralelne tj. protjecanje serijskog i paralelnog uzbudnog namota djeluju u istom smjeru.



U nekim specijalnim slu-

čajevima primjenjuju se protu-

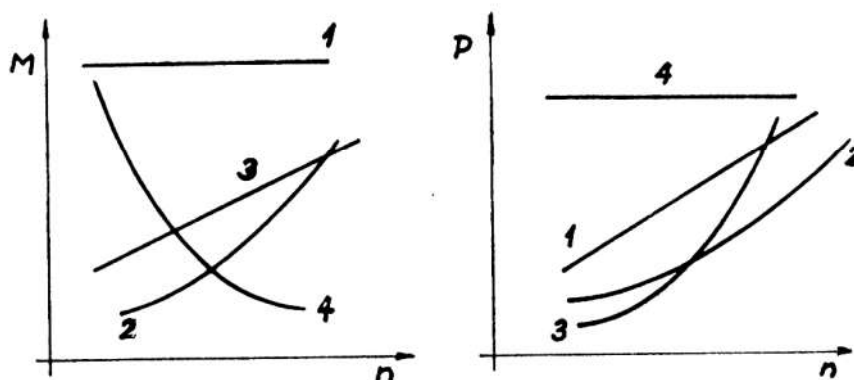
kompaundirani strojevi - strojevi sa složenom uzbuđom kod kojih protjecanje serijskog namota slabi protjecanje paralelnog namota. Takvi strojevi imaju najčešće uzlaznu karakteristiku.

Mehaničke karakteristike radnih mehanizama

Za uspješan rad elektromotornog uređaja potrebno je poznavati, osim mehaničkih karakteristika pogonskog stroja, i karakteristike radnog mehanizma. Od tih karakteristika, najvažniji je statički moment radnog mehanizma. S obzirom na ovisnost statičkog momenta pogonskog mehanizma o brzini okretanja n , možemo radne mehanizme podijeliti u četiri grupe:

1. grupa: mehanizmi koji imaju konstantan moment, a snagu proporcionalnu s brojem okretaja (dizala, mlinovi, valjci, alatni strojevi s konstantnom silom rezanja)
2. grupa: moment raste s kvadratom broja okretaja, a snaga je proporcionalna kubu broja okretaja (ventilatori, centrifugalne pumpe, centrifugalni kompresor itd.)

3. grupa: moment je proporcionalan broju okretaja, a snaga je razmjerna kvadratu broja okretaja mehanizma (kalander u tekstilnoj i vünarskoj industriji)
4. grupa: moment približno opada s brojem okretaja, a snaga ostaje konstantna (npr, alatni strojevi).



Ovisnost statičkog momenta i snage o brzini okretanja

Osim što ovisi o brzini, statički moment radnog mehanizma može biti i funkcija puta ili vremena odnosno puta i vremena. S te strane možemo radne mehanizme podijeliti na

1. mehanizme čiji je statički moment neovisan o brzini, putu i vremenu (dizala, transportne trake, valjalice i sl.)
2. mehanizme čiji je statički moment ovisan o brzini, a neovisan o putu i vremenu (ventilator, brodski propeler itd.)
3. mehanizme kod kojih statički moment zavisi samo o putu (klipna pumpa, klipni kompresor, rudnička dizalica s promjenljivim polumjerom navijanja, krivajni mehanizmi i sl.)
4. mehanizme čiji je statički moment funkcija brzine i

puta (električna željeznica npr.)

5. mehanizme kod kojih je statički moment funkcija vremena (npr. stroj za probijanje rupa, brusilica i sl.)
6. mehanizme čiji statički moment zavisi i o brzini i o putu i o vremenu.

Osnovni uvjet stabilnog rada elektromotornog pogona

Pri projektiranju elektromotornog pogona, treba voditi računa o činjenici da on mora raditi potpuno stabilno. Pod stabilnošću podrazumjevamo osobinu pogona da se vraća u stanje ravnoteže u najkraćem roku poslije izvođenja iz prethodnog ravnotežnog stanja, bez obzira što je prouzročilo narušavanje ravnoteže.

Osnovna jednačba gibanja

$$\sum F = m \frac{dv}{dt}$$

za rotaciono kretanje se pretvara u

$$\sum M = J \frac{d\omega}{dt}$$

odnosno za naš elektromotorni pogon

$$M_m - M_t = J \frac{d\omega}{dt}$$

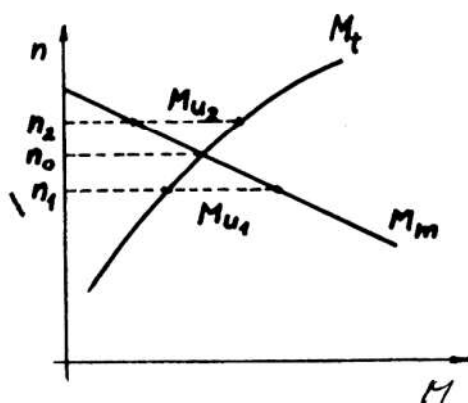
gdje je

- M_m - moment motora
- M_t - moment tereta
- J - moment inercije
- ω - kutna brzina

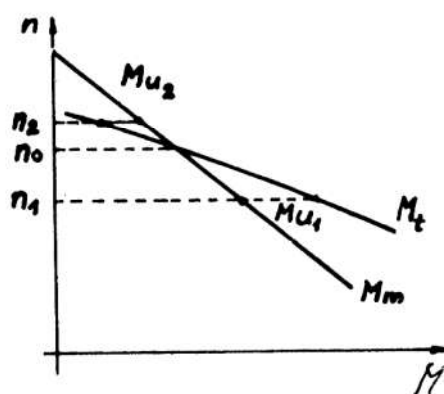
Osnovni uvjet statičke ravnoteže je konstantnost brzine:

$$\omega = \text{konst}; \quad \frac{d\omega}{dt} = 0; \quad (M_u = 0); \quad M_m = M_t$$

Sve gornje jednadžbe su istovjetne tj. sve izražavaju istu stvar: uvjet statičke ravnoteže.



S stabilan rad



nestabilan rad

Promotrimo gornje dijagrame na kojima su prikazane mehaničke karakteristike motora $n = f(M_m)$ i radnog mehanizma $n = f(M_t)$. Statička ravnoteža bit će uspostavljena u tački $M_t = M_m$, dakle pri brzini n_0 .

Pogledajmo najprije lijevu sliku. U koliko, zbog bilo kojeg razloga izvedemo motor iz stanja ravnoteže neće više važiti $M_m - M_t = 0$, već će biti

$$M_m - M_t = M_u; \quad M_u = J \frac{d\omega}{dt}$$

Ako je pri tom brzina od n_0 opala na n_1 , prema slici je $M_{m1} > M_{t1}$, pa je $M_{u1} > 0$; uređaj će se ubrzavati do stabilne brzine n_0 kad će se opet uspostaviti stanje stabilne ravnoteže.

Dovedemo li pak pogon do brzine $n_2 > n_0$, onda je $M_{m2} < M_{t2}$, pa je $M_{u2} < 0$; pogon će se usporavati do stabilne brzine n_0 .

Dakle, imaju li motor i radni mehanizam karakteristike kao na slici lijevo, pogon će raditi stabilno, jer se sam vraća u ravnotežno stanje čim nestane uzroka koji ga je izveo iz tog stanja. Lako je uvidjeti da gornji dijagram (na slici lijevo) za tačku n_0 udovoljava relaciji

$$\frac{dM_m}{dn} < \frac{dM_t}{dn}$$

Pogledamo li sliku desno, vidimo da ona ne zadovoljava ovu relaciju. Pogon sa ovakvim karakteristikama neće moći raditi stabilno. Izvedemo li ga naime iz tačke ravnoteže n_0 u tačku $n_1 < n_0$, prema slici je $M_{m1} < M_{t1}$ te je i $M_{u1} < 0$; motor se sve više usporava, tj. sve više se udaljava od stanja ravnoteže. Ako ga pak dovedemo na brzinu $n_2 > n_0$, tada je $M_{m2} > M_{t2}$ i $M_{u2} > 0$, motor se sve više ubrzava, te tako opet sve više udaljava od stanja ravnoteže.

Osnovni uvjet stabilnog rada

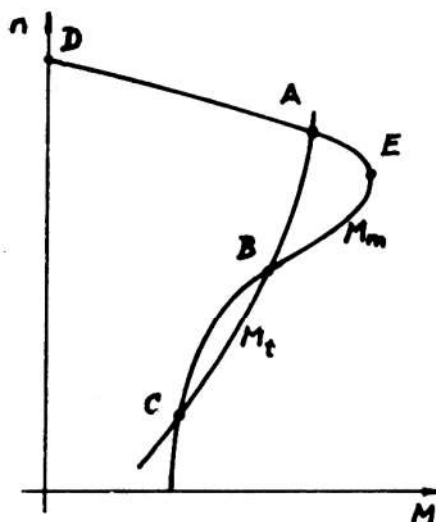
$$\frac{dM_m}{dn} < \frac{dM_t}{dn}$$

nuždan je uvjet stabilnosti svakog elektromotornog pogona.

Na ovoj slici (desno) dat je primjer stabilnog i nestabilnog rada asinhronog motora. Sa slike je očito da će motor raditi stabilno u tački A i tački C, dok je u tački B

$$\frac{dM_m}{dn} > \frac{dM_t}{dn},$$

pa uvjet stabiliteta nije ispu-



njen te pogon u toj tački ne može raditi stabilno.

Inače, pogoni sa asinhronim motorima proračunavaju se u pravilu za rad na linearnom dijelu mehaničke karakteristike asinhronog stroja tj. na dijelu karakteristike DE.

Temperaturna opterećenja električnih strojeva

Ako hoćemo okarakterizirati snagu električnog stroja u pogonu, potrebno je navesti tri karakteristična pojma snage:

a) nominalna trajna snaga koju električni stroj može razviti tokom proizvoljno dugog vremena opterećenja. Ova snaga ograničena je zagrijavanjem stroja koje se javlja kao posljedica toplinskih gubitaka unutar stroja. Naime, u električnom stroju se vrši pretvorba energije (električne u mehaničku ili obratno), a nužan pratilac bilo kakve pretvorbe energije su toplinski gubici.

U pravilu, granicu zagrijavanja stroja određuje vrsta izolacije. Izolacioni materijal - s obzirom na temperaturu koju mogu izdržati, a da im se pri tom ne smanji bitno izolaciona sposobnost i životna dob - dijele se na sedam klasa prema donjoj tabeli gdje su navedeni samo neki materijali iz svake klase.

Kao granična temperatura uzima se temperatura najtoplije tačke stroja, i ona ne smije prijeći temperaturu navedenu u tabeli za pojedine klase izolacije.

Klasa	Vrsta materijala	impregnacioni materijal	granična temperatura °C
Y	PVC plast.mase, poliamidna vlakna, papir, vulkanizirana prirodna guma itd.		90
A	Pamuk, svila, papir, vulkanfiber itd.	lak, izolaciono ulje, fenol-lak i sl.	105
E	Poliamidni lakovi, bakelit, poliesterne smole i sl.	poliesterne smole, epoksidne smole itd.	120
B	Staklena vlakna, azbest, proizvodi od tinjca (mikanit, mikafolije i sl.)	šelak, asfaltna smjesa, fenol-lakovi	130
F	Staklena vlakna, azbest, tinjac, melamini	alkidne smole, epoksidne smole	155
H	Staklena vlakna, azbest, tinjac, silikoni	prikladne silikonske smole	180
C	Tinjac, porculan, staklo, kvarc, preparirana staklena tkanina i sl.	silikonske smole povišene termičke stabilnosti	iznad 180

b) trenutna snaga preopterećenja je ona snaga koju stroj može dati tokom veoma malog vremenskog intervala bez ikakvih štetnih posljedica i razaranja, ako je prethodno bio zagrijan na nominalnu radnu temperaturu. Ovu snagu određuju mehaničke i električne osobine stroja, a ne zagrijavanje.

c) kratkotrajna snaga preopterećenja je snaga koju stroj može davati tokom određenog vremenskog intervala (5, 10, 20, 30 min), a da pri tom ne pretrpi nikakvu štetu, te da poslije prestanka preopterećenja može nastaviti rad s nominalnim

opterećenjem. Ovu snagu određuju zagrijavanje stroja, te njegove električke i mehaničke osobine.

Odnos ovih triju snaga određuju električke karakteristike stroja, njegova mehanička konstrukcija te vrsta upotrebljene izolacije. U praksi se stroj najčešće bira prema nominalnom trajnom opterećenju, a onda se provjerava na kratkotrajno i trenutno preopterećenje. Rijedji su slučajevi kad je potrebno stroj birati prema maksimalnom trenutnom preopterećenju.

Na tabeli stroja navedena je nominalna trajna snaga. Treba napomenuti da se ta snaga odnosi na tačno definiranu temperaturu okoline (npr. + 35°C). Ako se stvarna temperatura okoline razlikuje od ove, nominalna snaga stroja razlikovat će se od one u tablici navedene.

Primjetimo još da se životna dob izolacije jako brzo smanjuje s povišenjem temperature iznad nominalne. Ako npr. temperatura predje za samo 5% graničnu temperaturu, životna dob izolacije smanji se za oko 50%.

Rad električnog stroja bezuvjetno prati pojava toplinskih gubitaka koji su, kao što je rečeno nužan pratilac svake transformacije energije. Ti gubitci se mogu odrediti u koliko je poznata snaga stroja, prema izrazu

$$P_g = \frac{P}{\eta} - P \quad [\text{kW}]$$

gdje je

P - snaga stroja u kW

η - stupanj korisnosti stroja

odnosno

$$P_g = 0,239 \left(\frac{P}{\eta} - P \right) \quad [\text{kcal/sek}]$$

Zbog tih gubitaka, razvija se toplina $P_g dt$ koja se troši djelomično na zagrijavanje stroja, a djelomično se predaje okolini (vidi stranu 49) tako da važi

$$P_g dt = mcd\vartheta + sk\vartheta dt$$

Rješenje ove jednadžbe

$$\vartheta = \vartheta_m(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

dato je na strani 49, kao i njen grafički prikaz.

Treba napomenuti, da se ϑ ne odnosi na apsolutnu temperaturu stroja, već na nadtemperaturu stroja prema okolini.

Vremenska konstanta

$$T = \frac{m c}{s k}$$

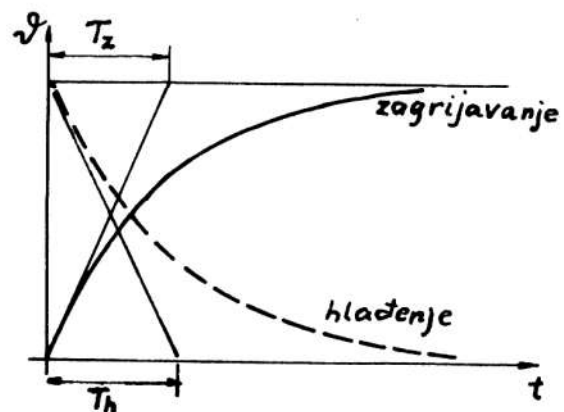
različita je za različite strojeve. Za veće strojeve (kojima je i masa veća) i vremenska konstanta je veća.

Dalje, za isti stroj vremenska konstanta će biti različita pri različitim brzinama okretanja. Naime, pri većim brzinama bolja je ventilacija stroja, pa je veći i koeficijent prelaza topline k , pa je vremenska konstanta T manja. Suprotno, kod manjih brzina vremenska konstanta je veća.

Ako je stroj neopterećen, pa se tada je $P_g = 0$ diferencijalna jednadžba zagrijavanja pretvara u jednadžbu hlađenja

$$m c d\vartheta + sk\vartheta dt = 0$$

čije je rješenje



$$\vartheta = \vartheta_m e^{-\frac{t}{T}}$$

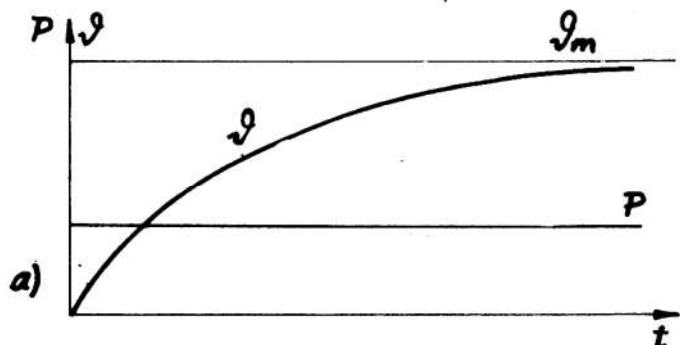
gdje nam ϑ opet predstavlja nadtemperaturu stroja prema okolini. Ukoliko je vremenska konstanta zagrijavanja jednaka vremenskoj konstanti hladjenja (što ne mora biti slučaj) jednog istog stroja, krivulja hladjenja je zrcalna slika krivulje zagrijavanja.

Električni strojevi rade u praksi obično s promjenljivim opterećenjima koje je teško izraziti nekim egzaktnim vremenskim zakonitostima. Međutim, često se susreću i pogoni čija se opterećenja ravnaju prema izvjesnim pravilima. Navedimo slijedeće tipične vrste opterećenja:

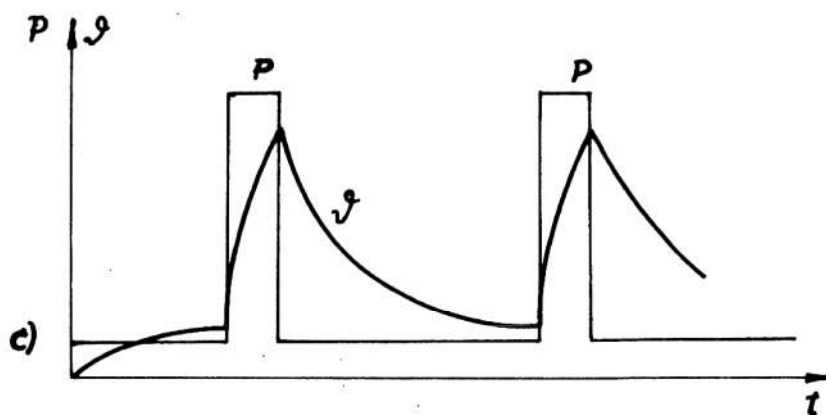
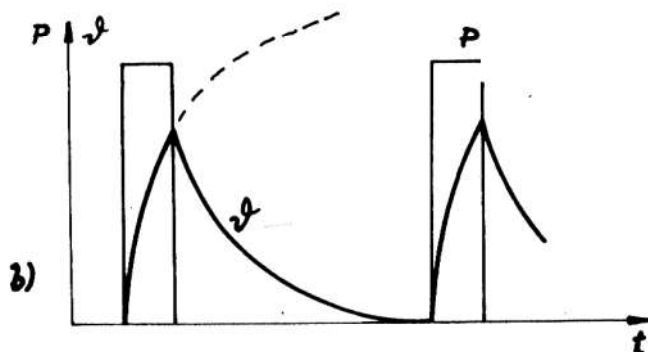
- a) trajni pogon
- b) kratkotrajni pogon
- c) trajni pogon s kratkotrajnim opterećenjem
- d) intermitirani pogon
- e) pogon sa reverziranjem smjera vrtnje

a) Trajni pogon je takav pogon u kojem je stroj opterećen konstantnom snagom dovoljno dugo da se ugrije na konačnu maksimalnu nadtemperaturu ϑ_m . Na donjem dijagramu prikazani su $P(t)$ i $\vartheta(t)$ za trajni pogon

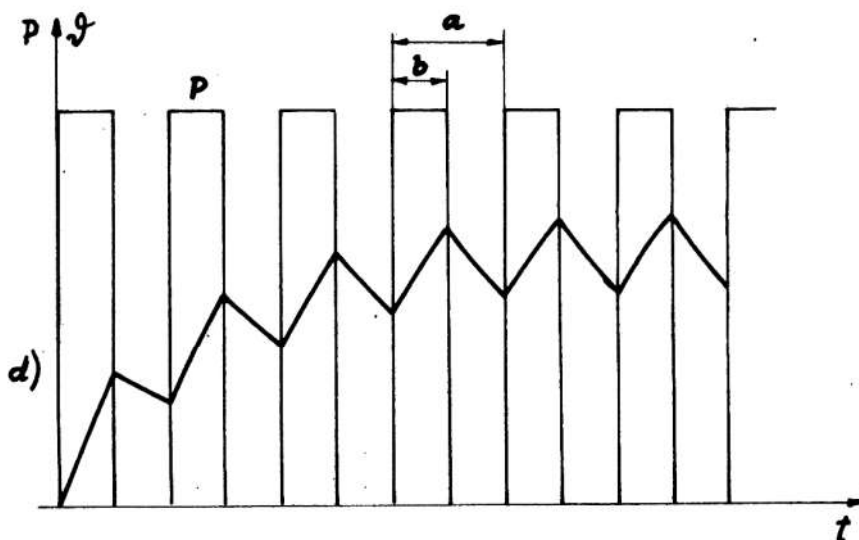
b) Kratkotrajnim pogonom zovemo pogon u kojem je stroj opterećen konstantnom snagom kroz određeno vrijeme u kojem se stroj ne stigne zagrijati na maksimalnu nadtemperaturu ϑ_m , a zatim je iskopčan tako dugo da se ohladi na temperaturu okoline.



c) Trajni pogon s kratkotrajnim opterećenjem je pogon u kojem je stroj kratko vrijeme opterećen (tako da se ne uspije ugrijati na konačnu nadtemperaturu), a zatim duže vrijeme radi u praznom hodu itd.



d) Intermitirani (isprekidani) pogon karakteriziran je kraćim vremenskim intervalima u kojima se smenjuju period



opterećenja i period potpunog rasterećenja. Ti intervali su tako mali da se stroj tokom radnog intervala ne stigne ugrijati na konačnu nadtemperaturu, niti tokom intervala mirovanja ohladiti na početnu nadtemperaturu.

Omjer trajanja opterećenja (b) i trajanje jednog ciklusa zove se intermitencija i označava se ED

$$ED \% = \frac{b}{a}$$

e) Pogon reverziranja je pogon u kojem motor u nekim vremenskim intervalima mjenja smjer vrtnje. Ovaj pogon je veoma neugodan. Naime, da bi stroj prešao npr. s lijevog na desni smjer ^{vrtnje} ~~struje~~, mora se prethodno zaustaviti, a u tom periodu zaustavljanja on radi u kočnom režimu, zatim, iz tog režima prelazi direktno u režim zaleta. Oba ova režima su neugodna za električne strojeve jer ih prate veliki toplinski gubitci.

Tipovi i konstrukcije električnih strojeva

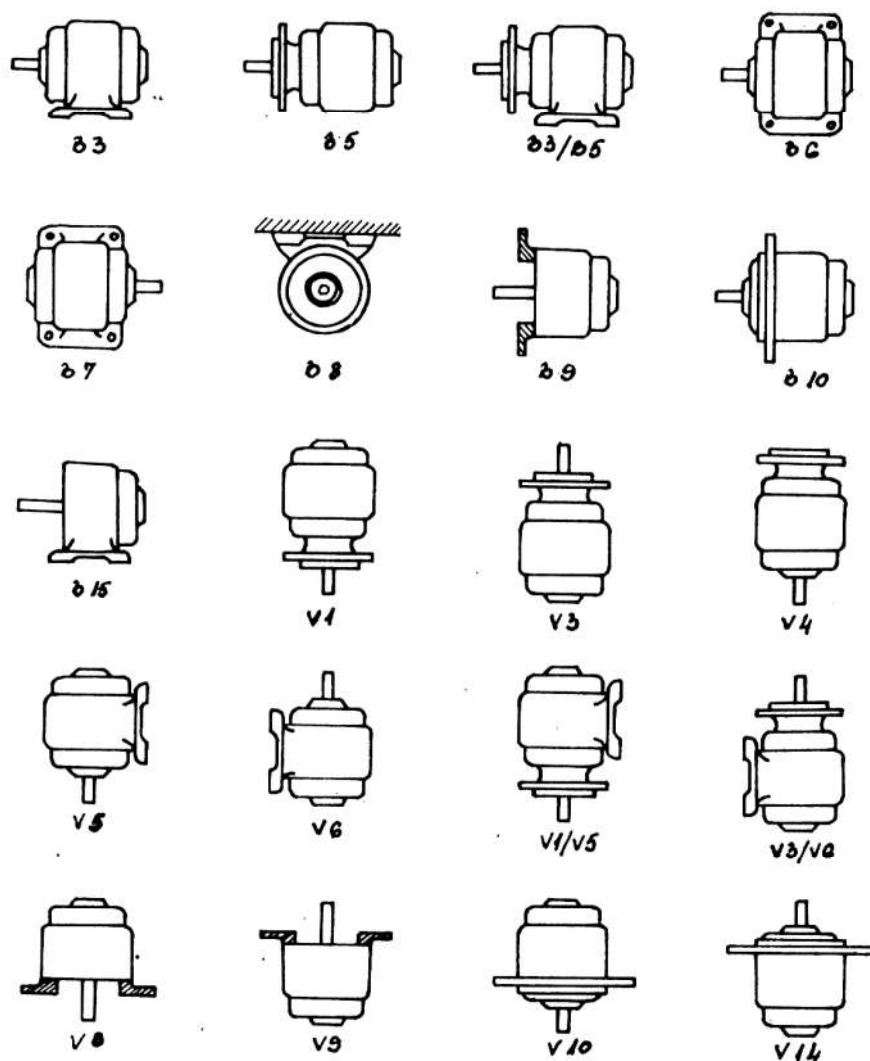
Raznovrsni su tipovi i konstruktivni oblici elektromotora, već prema njihovoj namjeni. Prema položaju osovine dijele se (po DIN-u) na dva osnovna tipa:

B - horizontalna osovina

V - vertikalna osovina

Ovi tipovi su opet podjeljeni u grupe B.1, B.2, itd. te V.1., V.2., prema načinu njihove montaže.

Dalje, prema tome u kakvoj sredini rade napravljeni su u otvorenoj ili zaštićenoj izvedbi.



Klasifikacija mehaničke zaštite prema IEC - preporukama

Po IEC-u vrsta mehaničke zaštite označava se slovima IP i sa dvije znamenke. Prva daje vrstu zaštite od prodora krutih tijela unutar stroja (aparata, postrojenja), a druga od prodora tekućine. Primjer: IP 44 označava zaštitu dijelova pod naponom od dodira rukom ili pomagalicama debljim od 1 mm, kao i zaštitu od prskajuće tekućine iz bilo kojeg pravca.

Prva karakteristična znamenka	S t e p e n z a š t i t e
0	Bez zaštite osoba od dodira dijelova pod naponom ili unutarnjih pomičnih dijelova u kućištu. Bez zaštite aparata od prodora stranih krutih tijela.
1	Zaštita od nenamjernog dodira veće površine ljudskog tijela, npr. ruke, s dijelovima pod naponom ili s pomoćnim dijelovima u kućištu. Zaštita od prodora stranih krutih tijela velikih dimenzija.
2	Zaštita od dodira prstima dijelova pod naponom ili pomičnih dijelova u kućištu. Zaštita od prodora stranih krutih tijela srednjih dimenzija.
3	Zaštita od dodira dijelova pod naponom ili pomičnih dijelova u kućištu alatima, žicom ili sličnim predmetima debljine iznad 2,5 mm. Zaštita od prodora stranih krutih tijela malih dimenzija.
4	Zaštita od dodira dijelova pod naponom ili pomičnih dijelova u kućištu alatima, žicom ili sličnim predmetima debljine iznad 1 mm. Zaštita od prodora stranih krutih tijela malih dimenzija.
5	Potpuna zaštita od dodira dijelova pod naponom ili pomoćnih dijelova u kućištu. Zaštita od štetnih naslaga prašine. Prodor prašine nije posve spriječen, ali prašina ne smije prodrijeti u količini koja je štetna za ispravno funkcioniranje aparata.
6	Potpuna zaštita od dodira dijelova pod naponom ili pomoćnih dijelova u kućištu. Zaštita od prodora prašine.

Druga karakteristična znamenka	S t e p e n z a š t i t e
0	Nema zaštite
1	Zaštita od kapanja kondenzirane vode: kapanje kondenzirane vode na kućište ne smije imati štetnih posljedica.
2	Zaštita od kapanja tekućina: kapanje tekućine ne smije imati štetnih posljedica kad se kućište nagiba u odnosu na vertikalu za kut koji je manji ili jednak 15° .
3	Zaštita od kiše: padanje kiše pod kutom prema vertikali koji je manji ili jednak 60° ne smije imati štetnih posljedica
4	Zaštita od štrcanja tekućina: tekućina koja štrca iz bilo kojeg pravca ne smije uzrokovati štetnih posljedica.
5	Zaštita od mlaza vode: štrcanje vode iz mlaznice u bilo kojem smjeru i pod određenim uvjetima ne smije imati štetnih posljedica.
6	Zaštita od morske oluje aparata smještenih na brodovima: pri uzburkanom moru ne smije prodrijeti voda u kućište pod određenim uvjetima
7	Zaštita od prodora vode uronjenog aparata: voda pod pritiskom ne smije ući u kućište kroz određeno vrijeme.
8	Zaštita od prorodra vode uronjenog aparata kroz neodređeno vrijeme i pod određenim pritiskom: voda ne smije ući u kućište.

8. RASKLOPNA POSTROJENJA

Rasklopna postrojenja su sastavni elementi elektrana i mreža i preko njih se vrši razdioba električne energije proizvedene u generatorima ili transformirane u transformatorima (transformatorske stanice).

Rasklopna postrojenja se izvode u zgradama (unutarnja izvedba) ili na slobodnom prostoru (vanjska izvedba). Kod unutarnje izvedbe svi elementi postrojenja su zaštićeni od vanjskih utjecaja (kiša, vjetar, nečistoća) pa ne moraju biti izvedeni otporno prema vanjskim utjecajima. Investicije uložene u zgradu poskupljuju ovakvu izvedbu postrojenja osobito ako je postrojenje za visoki napon i jake struje jer time pojedini elementi postaju glomazni a sigurnosni razmak između pojedinih dijelova pod naponom postaje velik. Stoga se rasklopna postrojenja za visoki napon (110 kV i više) izvode na slobodnom prostoru. Kod ovakve izvedbe otpadaju troškovi izgradnje zgrade ali svi elementi moraju biti sigurnosno izvedeni prema vanjskim utjecajima a to poskupljuje same elemente.

Visine napona i struja su normirane. U našoj zemlji upotrebljavaju se ovi naponi: 3, 6, 10, 20, 35, 60, 110, 220 i 380 kV. Naponi 3 i 6 kV ne smiju se upotrebljavati za javnu elektrifikaciju a naponi 20 i 60 kV se mogu upotrebiti samo izuzetno. Za prenos električne energije upotrebljavaju se ovi naponi: 380/220 V, za mreže niskog napona, a 10, 35, 110, 220 i 380 kV za mreže visokog napona. Takodjer su normirani i minimalni razmaci između vodiča pod naponom (tako da ne može doći

do preskoka električnog luka).

Glavni elementi rasklopnih postrojenja su:

- 1) izolatori
- 2) sabirnice
- 3) rastavljači
- 4) prekidači snage
- 5) mjerni transformatori i zaštitni uređaji.

Ovdje će ukratko biti date osnovne karakteristike ovih elemenata.

Izolatori. Gradjeni su od porculana. Potporni izolatori nose sabirnice i spojne vodiče. Ako su gradjeni za vanjsku izvedbu onda imaju na obodu rebra koja služe kao osiguranje od premoštenja izolacije kada su izloženi kiši ili prljavštini. Izolatori se dimenzioniraju prema visini pogonskog napona i mehaničkom opterećenju koje nastaje uslijed sila proizvedenih strujama kratkog spoja. Na mjestima gdje vodovi trebaju proći kroz zid ili pod, upotrebljavaju se provodni izolatori. Oni su šuplji i kroz tu šupljinu prolazi vodič. Na krajevima se nalaze metalne kape sa vijcima za priključak.

Sabirnice. To je jedan od najvažnijih elemenata rasklopnog postrojenja. One povezuju vodove koji dovode električnu energiju od generatora ili odvođe energiju u mrežu. Grade se od neizoliranih bakrenih ili aluminijskih vodiča raznih profila: okrugli, plosnati, U-profil, cijev.

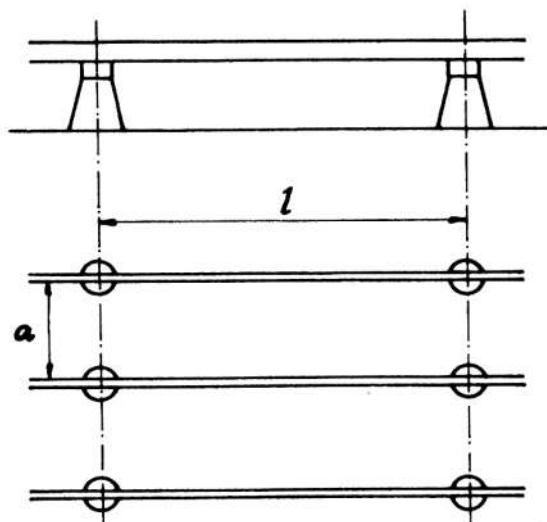
Dimenzioniranje sabirnica vrši se obzirom na ove kriterije:

- 1) maksimalnu pogonsku struju
- 2) mehaničko naprezanje u slučaju kratkog spoja
- 3) povišenje temperature za vrijeme trajanja kratkog spoja.

Između sabirnica kroz koje teče struja nastaje elektrodinamička sila

$$F = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2 \pi a}$$

Ova sila nastoji deformirati sabirnice, u ritmu nominalne frekvencije. Kako sabirnice skupa sa izolatorima predstavljaju sistem koji može oscilirati, mora se konstrukcija tako podesiti da vlastita oscilacija sistema ne dodje u rezonanciju sa frekvencijom mreže jer to može dovesti do veoma velikih deformacija i naprezanja sabirnica i do loma potpornih izolatora.



Sila između pojedinih dijelova sabirnica među izolatorima data je izrazom

$$F = 2,04 J_s^2 \frac{l}{a} \quad [\text{kp}]$$

gdje je I_s maksimalna vrijednost udarne struje kratkog spoja, l je udaljenost od jednog do drugog potpornog izolatora, a je razmak među sabirnicama.

Vlastita frekvencija oscilacija sistema sabirnica data je izrazom

$$f_0 = \frac{4,73}{2 \pi l^2} \sqrt{\frac{E I}{\rho s}} \quad \left[\frac{1}{s} \right]$$

gdje je

E - modul elastičnosti $[\text{kp/cm}^2]$,

$E = 1,2 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2$, (za bakar)

$E = 0,65 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2$ (za aluminiј)

ρ - gustoća materijala $\frac{\gamma}{9,81} [\text{kp cm}^{-4} \text{ s}^2]$

I - ekvatorijalni moment inercije $[\text{cm}^4]$. Za pravokutni okomito postavljeni presjek važi $I = \frac{1}{12} h b^3$

S - površina presjeka $(b \times h) \text{ cm}^2$

Radi izbjegavanja rezonancije ne smije odnos f_0/f biti cijeli broj, tj. ne smije vlastita frekvencija oscilacija sistema sabirnica biti u području između 90 i 110 Hz. Ako je to slučaj, onda treba mijenjati ili presjek sabirnica ili udaljenost između izolatora.

Zanimljivo je da izraz $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ predstavlja brzinu prostiranja longitudinalnog vala u materiji. Za bakar to iznosi $3,5 \cdot 10^5 \text{ cm s}^{-1}$ a za aluminij $4,8 \cdot 10^5 \text{ cm s}^{-1}$.

Rastavljači. To su elementi koji služe za vidljivo odvajanje pojedinih dijelova rasklopnog postrojenja, da bi se sa sigurnošću moglo vršiti potrebne popravke ili druge zahvate. Budući da su prekidači zatvorene gradnje, nije moguće vidjeti da li je prekidač zaista otvoren pa rastavljač predstavlja potpunu sigurnost da je neki dio postrojenja bez napona. Rastavljači se ne smiju iskapčati pod opterećenjem, jer nisu građeni tako da mogu savladati nastali električni luk, pa može doći do ozbiljnih oštećenja postrojenja. Pogon rastavljača može biti ručni ili mehanički (motor, komprimirani zrak), a postoje i mehanička blokiranja koja onemogućuju iskapčanje rastavljača dok je dotični dio postrojenja pod opterećenjem.

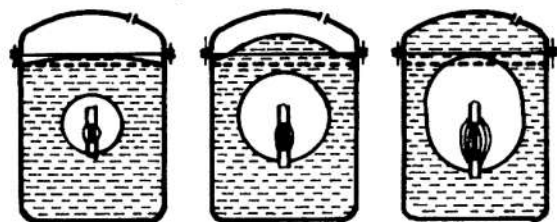
Prekidači snage. Njihov zadatak je da iskopčaju ili ukopčaju strujne krugove pod opterećenjem i da u slučaju abnormalnih prilika u radu sistema (preopterećenje, kratki spoj, prenapon i sl.) automatski iskopčaju ugroženi dio postrojenja. Pri iskapčanju pojavljuje se između kontakta prekidača električni

luk i prekidač mora biti tako gradjen da bez oštećenja i u što kraćem vremenu ugasi električni luk. Zbog visoke temperature luka (oko 3000°C a u samoj jezgri luka i do 15.000°C) nastaje emisija elektrona i disociranih molekula koji nastoje podržati luk produžujući ionizacionu stazu. Stoga prekidač snage mora biti u stanju da brzo ohladi i ugasi luk i toliko udalji kontakte, tako da već nakon prvog prolaza struje kroz nulu ne postoje više uvjeti za ponovno nastajanje luka. Najveća naprezanja prekidača nastupaju pri iskopčavanju induktivnog opterećenja, zato što ovdje napon ima svoju maksimalnu vrijednost kad struja prolazi kroz nulu, a to veoma otežava iskopčavanje.

Da bi se omogućilo uspješno gašenje luka, moguća su dva načina: primjeniti velike raspone prekidanja, jer tim jačina polja među kontaktima postaje mala ili primjeniti veoma intenzivno hladjenje električnog luka, kako bi se pri prolazu kroz nulu postiglo da se elektroni i ioni luka brzo rekombiniraju u neutralne molekule. Na ovom drugom načinu zasniva se rad modernih prekidača snage (prekidači s malo ulja, pneumatski prekidači).

Od starijih tipova prekidača snage, treba spomenuti uljni prekidač, gdje se

kontakti nalaze u ulju, u čvrsto gradjenom kućištu. Zbog nastanka električnog luka dolazi do isparavanja ulja i stvaranja mjehura uljnih para. Ovaj mjehur ekspandira veoma brzo, ulje

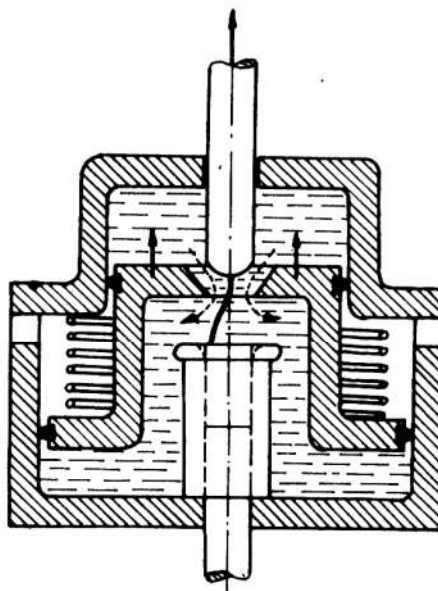


ispuni cijelo kućište prekidača pa tim raste tlak uljnih para i dolazi do deionizacije luka, a za to vrijeme kontakti se

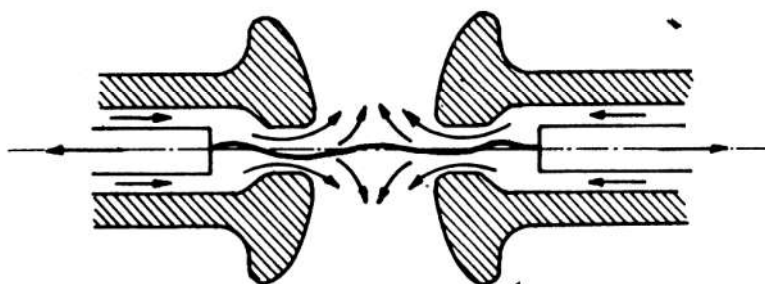
dovoljno odmaknu. Nedostatak ovog tipa je prisustvo veće količine ulja koja je zapaljiva pa postoji opasnost požara u slučaju eksplozije prekidača. Stoga je ovaj tip napušten za područje visokog napona ali se još grade ovakvi prekidači za niski napon.

Novi tip prekidača za napone do 35 kV ima malo ulja (1-2% od one količine koja treba za uljne prekidače). Ovdje ulje služi samo kao sredstvo za gašenje luka u posebnoj komori. Električni luk stvara uljne pare koje podignu klip.

Pri tome ulje bude potisnuto u gornji dio komore i onda se otuda ubrizgava duž luka u donji dio komore. Hladjenje luka je veoma snažno pa već posle jednog ili dva poluperioda proces prekidanja je završen.



Na sasvim sličan način djeluju i prekidači koji umjesto ulja imaju vodu kao sredstvo za gašenje luka (hidromatski prekidači). Električni luk stvara vođenu paru koja struji duž luka i hladi ga. Vodi se dodaju još neke primjese /70% vode i 30% glikola $C_2H_4(OH)_2$ /, da ne bi došlo do smrzavanja kod niskih temperatura, kad su prekidači smješteni na otvorenom prostoru. Najmoderniji tip su pneumatski prekidači (sa komprimiranim zrakom ili sumpor heksafluoridom SF_6). Zrak pod tlakom 10 at struji preko luka i veoma snažno ga hladi i raspršava tako da veoma brzo dolazi do deionizacije i gašenja luka. Prekidač ima vlastiti rezervoar komprimiranog zraka koji omogućuje pet uzastopnih iskapčavanja a posebni kompresor vrši punjenje rezervoara. Ovaj



tip prekidača upotrebljava se sve do najviših napona (380 kV i više) a u 1967.g. razvijeni su prekidači (sa hladjenjem plinom SF_6) sve do 750 kV.

. Prekidači snage stavljaju se u pokret ručno ili mehanički (na daljinu). Ručni pogon pomoću poluge upotrebljava se samo za niske napone i manje snage. Mehanički pogon vrši se: oprugom, elektromotorom, elektromagnetom i pneumatski (komprimiranim zrakom). Za automatsko iskopčavanje služi primarni ili sekundarni rele (relais) koji djeluje na mehanizam prekidača i izvrši iskopčavanje.

Mjerni transformatori i zaštitni uređaji

U rasklopnim postrojenjima i elektranama ne mogu se mjerni instrumenti i releji uključivati neposredno u vodove visokog napona zato što se ti aparati ne mogu izvesti za visoke napone i velike jačine struje i što bi mjerenje i rukovanje takvim aparatima bilo opasno po život osoblja. U tom slučaju se mjerni instrumenti ili releji uključuju na sekundarnu stranu posebnih transformatora - mjernih transformatora čime se postiže odjeljivanje instrumenata i aparata od visokog napona.

Ovisno o tome da li su mjerni transformatori gradjeni za strujna ili naponska mjerenja, oni se dijele na:

- a) strujne mjerne transformatore
- b) naponske mjerne transformatore

Izvedba mjernih transformatora može biti sa raznim izolacionim materijalima: "suhi" (sa zrakom), sa porculanom, papirom, plastikom (araldit) ili sa uljem.

Mjerni transformatori su podjeljeni u standardizovane klase tačnosti: 0,1; 0,2; 0,5; 1 i 3 a obzirom na primarni napon važe već ranije spomenuti standardizovani naponi za mreže. Standardna struja sekundara strujnih transformatora je 5 A a standardni napon sekundara naponskih transformatora je 100 V.

Strujni mjerni transformator

Zbog veoma male impedancije priključenog ampermetra, strujni transformator radi vecma blizu režimu kratkog spoja.

Zbog poznatog odnosa

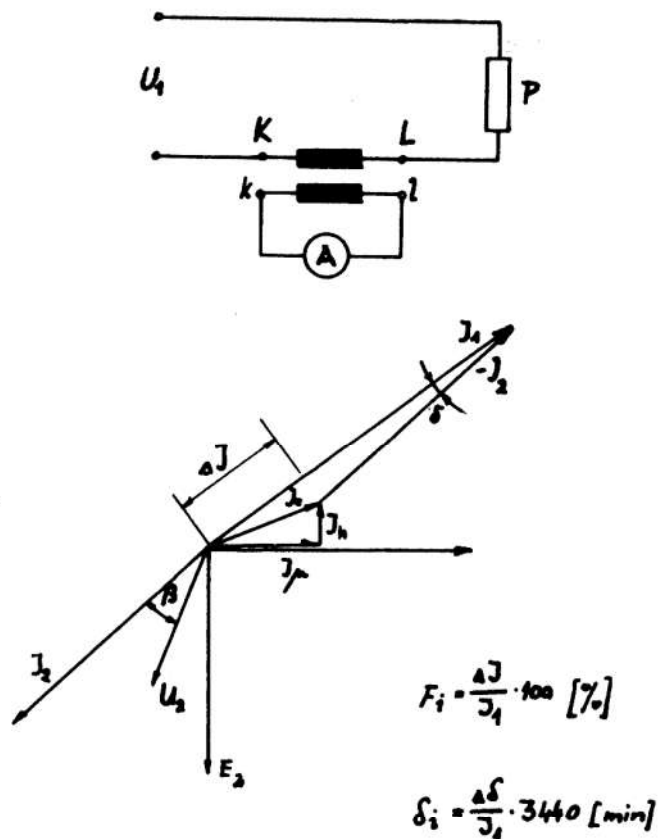
$I_1 : I_2 = N_2 : N_1$, mora struja magnetiziranja

biti što manja u odnosu na sekundarnu struju.

Otuda se željezna jezgra strujnog transformatora izvodi od slabo magnetiziranog željeza s malim gubicima histerize ($B=0,05$ do $0,3$ T).

Primarna struja odredje-

na je pogonskim prilikama u mreži i na njen iznos se ne može praktički utjecati sekundarnim opterećenjem.



Osnovne karakteristike strujnog transformatora su

- a) strujna greška $F_i = \frac{\Delta I}{I} 100\%$ i određena je klasom tačnosti transformatora. Za klasu 0,2 pri nominalnoj struji opterećenja, strujna greška iznosi 0,2%
- b) fazna greška $\delta_i = \frac{\Delta \phi}{I_1} 3440$ lučnih minuta, i takodje je određena klasom tačnosti. Za klasu 0,2 pri nominalnoj struji opterećenja iznosi samo 10'

U slučaju da bi otpor sekundarnog opterećenja bio veći od dozvoljenog ili ako bi postao beskonačan u slučaju prekida ili iskapčavanja sekundara, onda kroz sekundar ne bi tekla nikakva struja pa bi tada čitava primarna struja magnetizirala jezgru uslijed čega bi došlo do velikih gubitaka i jakog zagrijavanja jezgra. Zbog velikog magnetskog toka naponi na stezaljkama primara i naročito sekundara postali bi jako veliki. Uslijed zagrijavanja jezgra i visokog napona došlo bi do ozbiljnog oštećenja strujnog transformatora. Zbog toga strujni transformator ne smije nikad imati otvorene sekundarne stezaljke nego mora biti opterećen neznatnim otporom (ampermetar) ili kratko spojen.

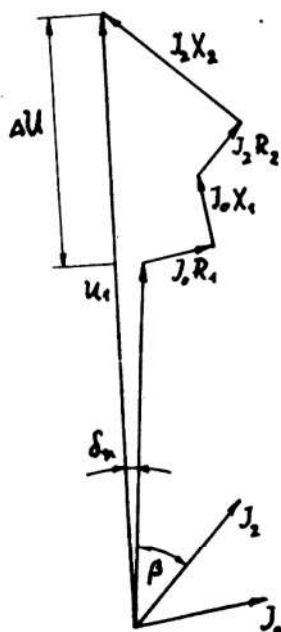
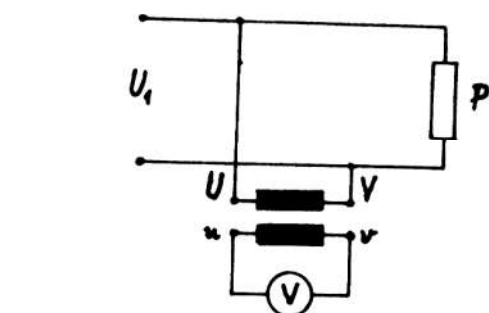
Kroz strujni transformator teku i struje kratkog spoja do kojih dolazi u mreži i zbog toga moraju biti sposobni da izdrže termička i dinamička opterećenja koja pri tome nastaju. Termička granična struja je ona primarna struja koju je primarni namot u stanju izdržati bez štete za vrijeme od 1 sekunde. Strujni transformatori se obično dimenzioniraju za $I_{th} = 120 I_n$. Ako struja kratkog spoja I_k ne teče kroz mjerni transformator 1 sekundu već t sekundi, onda ta struja ne bi smjela da razvije veću toplinu od one koju bi razvila granična termička struja za vrijeme od 1 sekunde. Prema tome, veličina dozvoljene struje I_k koja smije teći t sekundi iznosi (zbog $I_k^2 t = I_{th}^2 1$)

$$I_k = \frac{I_{th}}{\sqrt{t}}$$

Granična dinamička struja I_{dyn} [kA] je maksimalna amplituda struje koju mjerni transformator može mehanički izdržati kad mu je sekundar kratko spojen.

Iz sigurnosnih razloga, obično se mjerni instrumenti napajaju zasebnim mjernim transformatorima, odvojeno od mjernih transformatora koji napajaju zaštitne releje.

Naponski mjerni transformatori služe za sniženje visokih napona za mjerne i upravljačke svrhe. Zbog toga što mjerni instrumenti kao voltmetar (ili naponska grana vatmetra) imaju visoki otpor, naponski transformator radi veoma blizu režimu praznog hoda, pa važi odnos $U_1:U_2 = N_1:N_2$. Da bi greška naponskih mjernih transformatora bila što manja, potrebno je da primarni i sekundarni padovi napona u namotu transformatora budu što manji. To će biti onda ako su iznosi primarnih i sekundarnih struja maleni, tj. ako su omski i induktivni otpori primara i sekundara mali. Naprotiv, struja magnetiziranja naponskog transformatora može imati iznos kao i kod energetskog transformatora (to iznosi oko $B = 1 \text{ T}$).



$$F_u = \frac{\Delta U}{U_1} \cdot 100 [\%]$$

$$\delta_u = \frac{\Delta \delta}{U_1} \cdot 3440 [\text{min}]$$

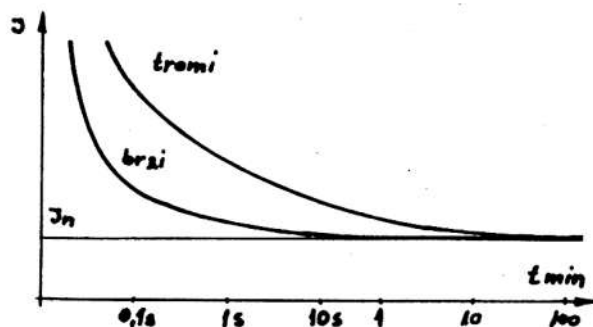
Veličine naponske greške F_u i fazne greške δ_u ovise kao i kod strujnog transformatora, od klase tačnosti i iznose za klasu 0,2 i primarni napon između 0,8.. 1,2 U_n , $F_u = 0,2\%$ a $\delta_u = 10$ lučnih minuta.

Naponski transformatori ne nailaze u radu na onakve teškoće kao strujni transformatori zato što u slučaju kratkog spoja naponski transformator nije izložen velikim naprezanjima. Struja u mreži se neprekidno menja po iznosu dok je napon približno konstantan pa naponski transformator radi u relativno veoma uskom području mjerenja dok strujni transformator mora da radi što tačnije na cijelom opsegu mjerenja.

Zaštitni uređaji služe da štite pojedine elemente rasklopnog postrojenja (generator, transformator) od prekomjerne struje, previsokog napona, povratne snage, zemnog spoja, kratkog spoja i drugih abnormalnih prilika u pogonu.

Tokom posljednjih trideset godina, razvijeno je mnoštvo raznih aparata nazvanih ukupnim imenom "relejna zaštitna tehnika", čija je zadaća da izvrše funkcije zaštite kad za to nastupe specificirane okolnosti. Od tog velikog broja, ovdje će biti spomenut najprije najstariji tip zaštitnog prekostrujnog uređaja poznatog pod imenom topljivi osigurač.

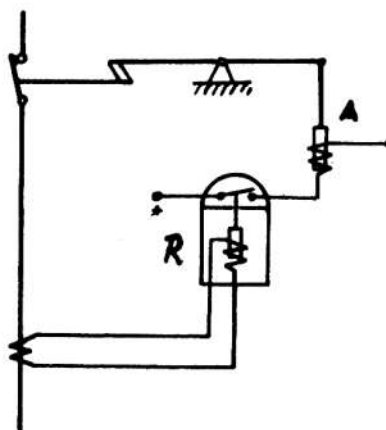
Sastoji se od topljive žice ili trake koja se zagrijava strujom tereta i pri određenoj vrijednosti struje rastopi. Električni luk se gasi u unutrašnjosti porcelanskog tijela osigurača pomoću kvarcnog pijeska. Kao materijal za topljivu žicu upotrebljava se srebro (tačka topljenja 950°C). Radi sniženja tempe-



ljava se srebro (tačka topljenja 950°C). Radi sniženja tempe-

rature u osiguraču, žica se radi od dva dijela koja su međusobno zavarena (zalemljena) a ovo spojno mjesto se topi već na temperaturi od oko 230°C . Osigurači imaju svoje karakteristike topljenja koje pokazuju vrijeme za koje će se osigurač pri datoj struji rastopiti. Prema karakteristici, osigurači se dijele na brze i trome. Radi ilustracije može se uzeti da pri petorostrukoj nominalnoj struji ($5 I_n$) brzi osigurač isključuje otprilike poslije 0,1 sek a tromi posle otprilike 1 sek. Tromi osigurači se upotrebljavaju u slučajevima kada kratkotrajna preopterećenja ne trebaju izazvati prekidanje (npr. upućivanje asinhronog motora za kratko spojenim rotorom).

Od mnogobrojnih tipova zaštitnih releja, spomenut ćemo nadstrujni relej koji štiti generator ili transformator od prevelikih struja. Nadstrujni rele R je vezan na uređaj koga treba štiti preko strujnog transformatora. Kontakt u releju zatvara posebni strujni krug (iz akumulatorske baterije) koji energizira okidač A i preko mehanizma za okidanje iskopčava prekidač snage. Rele je dimenzioniran na male sile, a pomoćni krug za okidanje dobija energiju iz posebnog izvora (akumulatorske baterije). Karakteristike ovakvih releja su u principu sasvim slične kao i kod topljivih osigurača samo što se karakteristika može podešavati posebnom napravom (za iznos struje i vremena okidanja).



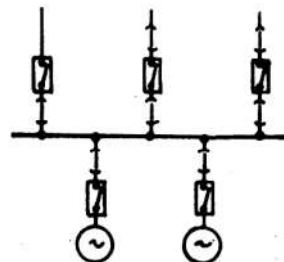
Na sličan način su gradjeni i funkcioniraju i ostali tipovi releja (za diferencijalnu zaštitu, distantnu zaštitu - kod vodova, impedantnu zaštitu i sl.), ali to izlazi izvan

okvira ovih predavanja.

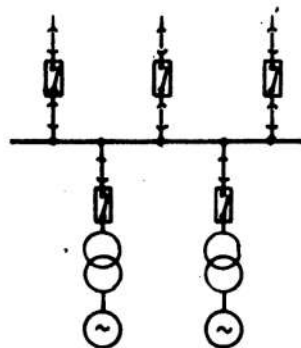
Sheme rasklopnih postrojenja

Svi spomenuti elementi rasklopnih postrojenja mogu biti međjusobno povezani na razne načine u cjeloviti sistem.

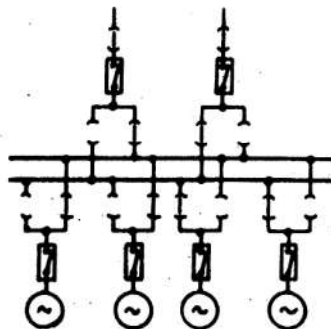
Najprostiji sistem predstavlja slučaj kad se razvod energije vrši na naponu generatora. Iza svakog generatora dolazi prekidač snage, zatim rastavljač a svaki ogranak (odlazni vod) mora imati svoj rastavljač i prekidač snage. Ako je odlazni vod u stvari zračni vod (dalekovod) mora se staviti rastavljač prije i poslije prekidača snage jer ovi vodovi i kad su iskopčani, mogu doći pod djelovanje atmosferskog elektriciteta.



Kad je razvodni napon viši od napona generatora, onda svaki generator ima svoj transformator, takva grupa predstavlja cjelinu (blok-spoj) pa stoga može izostaviti prekidač snage i rastavljač između generatora i transformatora. Prednost ovakvog sistema je u tome da u slučaju kratkog spoja na sabirnicama, struje kratkog spoja budu jako prigušene rasipnim induktivitetima transformatora uključenog ispred generatora,

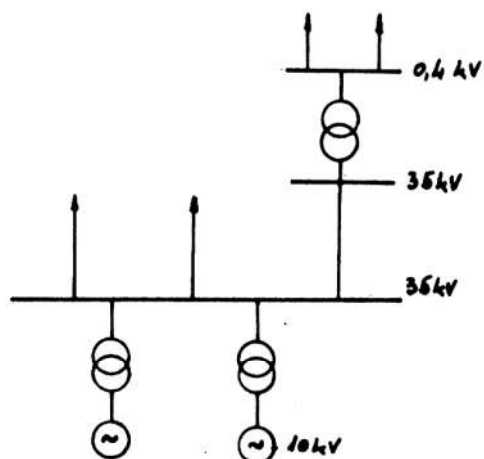


Ako se želi velika sigurnost u pogonu, onda se uzima sistem sa dvostrukim sabirnicama. Tim je osiguran neprekinut rad sistema u slučaju kvara na jednim sabirnicama a može se, po potrebi, i odvojiti sabirnice tako da sistem I dobija energiju od jedne grupe generatora a sis-



II od druge grupe. Ovim odvajanjem smanjuju se struje kratkog spoja i omogućuje da sistemi mogu, po potrebi, raditi sa raznim naponima.

Za vlastitu potrebu energije u elektrani, obično se sa sabirnica energija odvodi preko zasebnog transformatora (kućni transformator) koji preko svojih posebnih sabirnica nižeg napona, napaja sve potrošače u samoj elektrani.



Izbor sistema se vrši na osnovu mnogih kriterija, od kojih su najvažniji: predviđena instalirana snaga elektrane (ili transformatorske stanice), predviđene (računski) struje kratkog spoja, mogućnost i potreba naknadnog proširenja rasklopnog postrojenja te vrsta i način odvodjenja energije (zračni vodovi, dalekovodi, kabeli). Otuda je jasno da postoji mnogo sistema za spoj rasklopnog postrojenja i to se rješava od slučaja do slučaja, vodeći računa o specifičnim uvjetima za dotično rasklopno postrojenje.

Upotrebljena literatura:

- Buchhold: Električne centrale i mreže, Naučna knjiga, Beograd, 1949.
- Černe: Parne turbine, Tehnička knjiga, Zagreb, 1950.
- Dolenc: Transformatori, Sveučilište Zagreb, 1965.
- Glasstone: Sourcebook on atomic energy, Van Nostrand Co., New York, 1958.
- Horvat: Vodne turbine, Tehnička knjiga, Zagreb, 1955.
- Lončar: Osnovi elektrotehnike, Tehnička knjiga, Zagreb, 1958.
- Piotrovskij: Električni strojevi, Tehnička knjiga, Zagreb, 1967.
- Popov: Osnove električkog pokretanja u industriji, Naučna knjiga, Beograd, 1951.
- Požar: Proizvodnja električne energije, Sveučilište Zagreb, 1966.
- Požar: Visokonaponska rasklopna postrojenja, Tehnička knjiga, Zagreb, 1967.
- Russell: Elements of energy conversion, Pergamon Press, Oxford, 1967.
- Stefanini: Prijenos električne energije, Sveučilište Zagreb, 1963.
- Formel - und Tabellenbuch, Siemens-Schuckertwerke A.G. Erlangen, 1965.

S A D R Ž A J

Elektroenergetski sistemi	1
1. Ekonomika energetike	3
2. Elektrane	7
2.1. Termoelektrane	7
2.2. Nuklearne elektrane	12
2.3. Hidroelektrane	18
3. Sinhroni generator	25
4. Transformator	39
5. Asinhroni motor	62
6. Istosmjerni i kolektorski strojevi	88
7. Elektromotorni pogoni	95
8. Rasklopna postrojenja	117