

SINHRONE MAŠINE

Osnovi elektroenergetike

Dr Ivana Vlajić-Naumovska

Sadržaj

- Uopšteno o sinhronim mašinama
- Sinhroni generatori
- Podela sinhronih generatora
- Osnovni delovi
- Princip rada
- Pobuda sinhronih mašina
- Karakteristike sinhronih mašina
- Karakteristika praznog hoda
- Karakteristika ustaljenog kratkog spoja
- Fazorski dijagram sinhronne mašine sa cilindričnim (turbo) rotorom
- Rad sinhronih generatora na sopstvenu i opštu mrežu
- Veliki hidro i turbo sinhroni generatori
- Sinhroni motor

Sinhrona mašine

- Rotor sinhrona mašine se u ustaljenom pogonu obrće jednakom (sinhronom) brzinom kao i obrtno magnetsko polje u međugvožđu, pa odatle potiče naziv ove vrste mašina.
- Prema svojim karakteristikama, sinhrona mašine se mogu svrstati na više načina.
- Prema smeru (načinu) elektromehaničkog pretvaranja energije, delimo ih na *generatore* i *motore*, pri čemu se mnogo češće upotrebljavaju kao generatori.

Sinhroni generatori

- Sinhroni generator je tipični predstavnik električne mašine velike snage i maloserijske proizvodnje.
- Činjenica da je stepen iskorišćenja većih jedinica bolji (veća je ekonomičnost), ima za posledicu izgradnju elektrana i agregata većih snaga.
- Jedinične snage generatora prelaze i 1000MVA.

Podela sinhronih generatora

- Prema pogonskoj mašini, generatore delimo na *turbogeneratore*, gde je pogonske mašina parna ili gasna turbina, *hidrogeneratore*, gde je pogonska mašina vodna (hidro) turbina i *dizelgeneratore* gde je pogonska mašina dizel motor.
- Prema obliku rotora, delimo ih na mašine sa *cilindričnim rotorom* i *rotorom sa istaknutim polovima*, dok je stator cilindričnog oblika, trofazni.
- Prema brzini obrtanja (pri učestanosti od 50Hz), delimo ih na *brzohodne* (750 do 3000 ob/min, sa brojem pari polova $p=4$ do 1), *srednjih brzina* (300 do 600 ob/min, $p=10$ do 5) i *sporohodne* (manje od 300 ob/min, više od 10 pari polova).

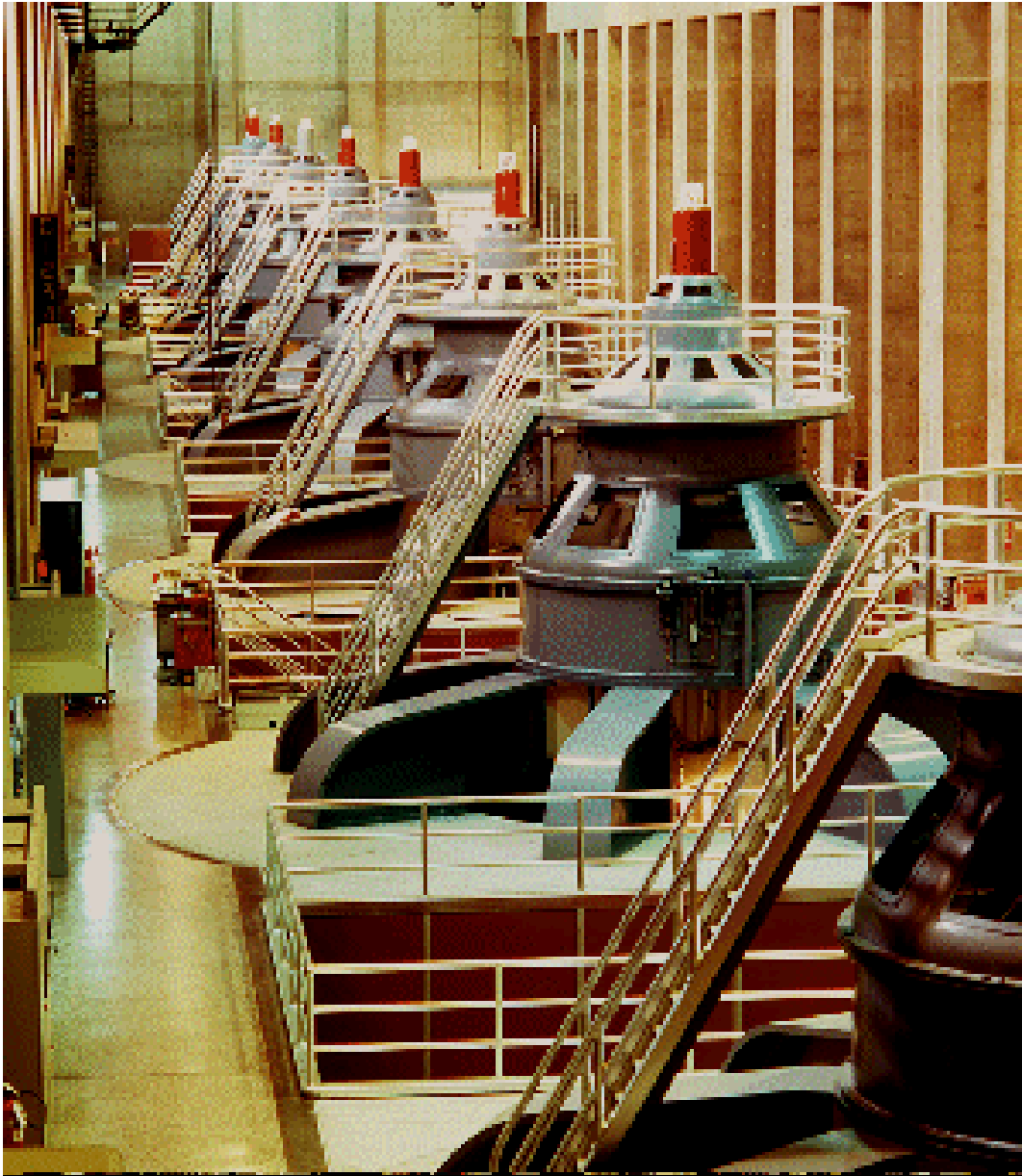
Turbogeneratori

- *Turbogeneratori* se grade sa cilindričnim rotorom, za velike brzine obrtanja (obično $p = 1$, ređe $p=2$ (samo za manje snage), odnosno 3000 ili 1500 ob/min pri 50 Hz).
- Kod ove vrste generatora izraženi su mehanički problemi u pogledu konstrukcije rotora zbog velike periferne brzine, velike obrtne mase i zbog dužine između ležišta.
- To zahteva da se ide na relativno male prečnike rotora i da se namotaj rotora raspodeljuje što ravnomernije po obimu.
- Oni se uvek postavljaju horizontalno.

Hidrogeneratori

- *Hidrogeneratori* se grade sa istaknutim polovima na rotoru, od sasvim sporohodnih do brzohodnih sa $p=2$.
- Što je manja brzina obrtanja dozvoljava se veći prečnik rotora, opet ograničen mehaničkim naprezanjima usled centrifugalnih sila.
- Ali ova mehanička naprezanja su tolika da se ne zahteva ravnomerna raspodela namotaja po obimu rotora, pa se zato onda prelazi na rotor sa istaknutim polovima.
- Kod ove vrste generatora izraženi su mehanički problemi u pogledu konstrukcije rotora zbog velike periferne brzine pri zaletanju, i nosećih ležišta grupe sa vertikalnim vratilom na kojima leži težina celog obrtnog dela i dr.
- Generatori većih snaga, čije su brzine obrtanja relativno manje, postavljaju se vertikalno, a hlađenje je kombinovano voda-vazduh.

Hidrogeneratori



Slika 1 Generatori
u hidroelektrani –
hidrogeneratori

Dizelgeneratori

- *Dizelgeneratori* se pokreću dizel motorima, a grade se za široki raspon brzina obrtanja, od $p=2$ naviše.
- Snaga dizel generatora ograničena je mogućnošću izrade motora, pa dostiže najviše desetak MVA.
- U konstrukcionom, odnosno u pogledu mehaničkih dimenzija, turbo i hidro generatori se značajno razlikuju, tako da za snage od oko 100MVA odnos osne dužine l , i prečnika D , za turbogeneratore iznosi oko 5, dok za hidrogeneratore iznosi oko 0,15.

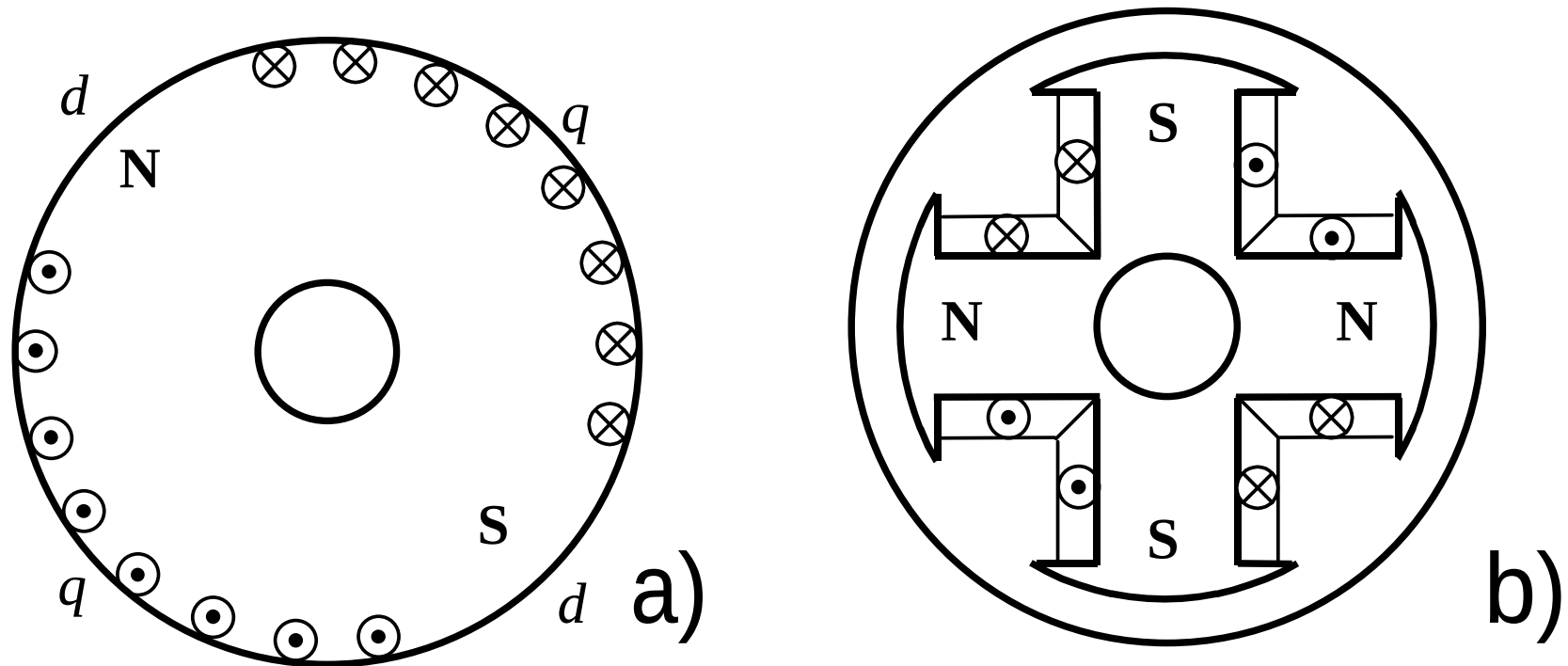
Osnovni delovi

- Magnetsko kolo sinhronog generatora sastoji se, kao i kod svih obrtnih mašina, iz dva osnovna dela: nepokretnog dela ili statora i obrtnog dela ili rotora, koji su međusobno razdvojeni međugvoždem.
- Rotor čini celinu sa vratilom mašine: on nosi na svojoj periferiji $2p$ polova koji mogu biti ili od masivnog gvožđa ili od limova.
- Stator ili indukt je šuplji valjak sastavljen od tankih magnetskih limova ravnomerno ožlebljenih na svojoj unutarnjoj periferiji i složenih u oklopu statora.
- Pobudni namotaj (induktor) kod sinhronih mašina je smešten na rotoru i napajan je jednosmernom strujom.

Osnovni delovi

- Postoje dve izvedbe u pogledu oblika (vrste) rotora:
 - Rotor je cilindričan: cilindar je od ožlebljenog gvožđa, obično masivnog, namotaj induktora je sastavljen iz sekcija smeštenih u žlebovima. Ova konstrukcija se skoro isključivo primenjuje kod velikih dvopolnih ili četvoropolnih turbogeneratorsa, iz mehaničkih razloga (Slika 2, a).
 - Rotor je sa istaknutim polovima i sa međupolnim prostorom kod kojih je namotaj koncentrisan oko jezgra pola. Ova konstrukcija se upotrebljava kod mašina sa većim brojem polova – hidrogeneratorsa (Slika 2, b).

Osnovni delovi



Slika 2 Rotor sinhronne mašine

- a) cilindrični rotor
- b) rotor sa istaknutim (izraženim) polovima

Osnovni delovi

- Na slikama je sa $d - d$ je označena tzv. uzdužna osa, u kojoj se nalaze magnetski polovi, dok je sa $q - q$ označena poprečna osa, koja je upravna na osu polova.
- Kod mašina sa istaknutim polovima namotaj je koncentrisan, dok je kod mašina sa cilindričnim rotorom raspodeljen u žlebovima i zauzima približno $2/3$ obima rotora.
- Preostali prostor obima, odnosno polnog koraka, nije ožljebljen i čini *zonu velikog zupca* kroz koji prolazi glavni deo magnetskog fluksa.

Osnovni delovi

- Osim pobudnog namotaja, na rotoru nekih sinhronih mašina postoji i dodatni, *prigušni (amortizacioni) namotaj*, koji ima osnovnu ulogu da prigušuje oscilovanje brzine obrtanja rotora oko sinhronne brzine u prelaznim procesima, pri čemu se tada ponaša kao kavezni rotor asinhronog motora.
- U ustaljenom stanju ovaj namotaj nema funkciju, jer se u njemu tada ne indukuje napon.
- On se ugrađuje, po pravilu, u polne papučice mašina sa lameliranim istaknutim polovima, a sastoji se od okruglih bakarnih štapova stavljenih u žlebove u polnom stopalu (nastavku, papučici).

Osnovni delovi

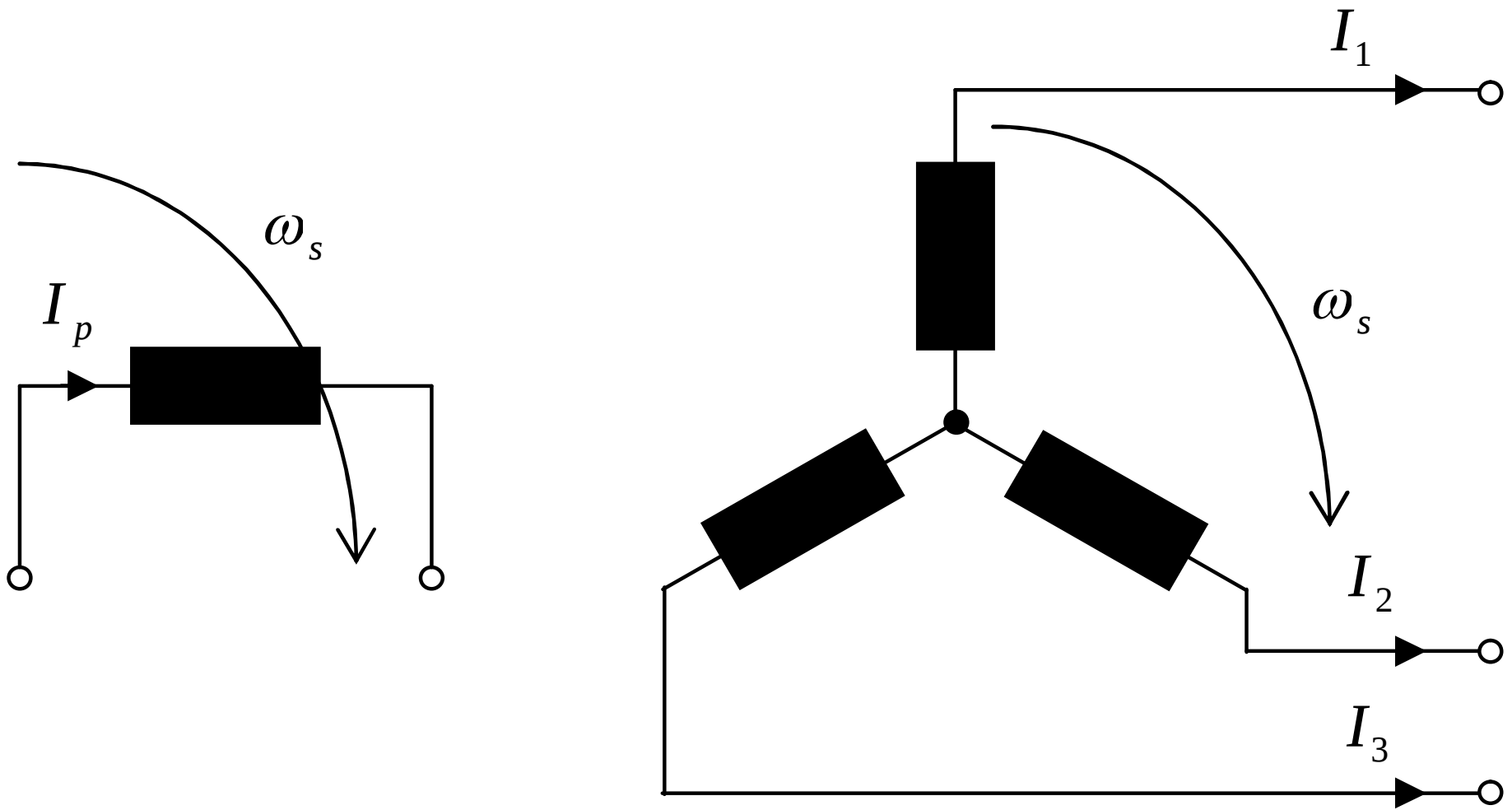
- Ovi štapovi su međusobno povezani (kratko spojeni) pomoću dva provodna prstena sa obe bočne strane pola.
- U mašine sa cilindričnim rotorom ugrađuje se takođe prigušni namotaj kada se očekuju velika nesimetrična opterećenja.
- Namotaj indukta je smešten u žlebovima statora, najčešće je trofazni. Raspodeljen je po celom obimu.

Princip rada

- Kroz provodnike pobudnog namotaja prolazi jednosmerna struja usled koje nastaje stalno magnetsko polje.
- *Magnetnopolobudna sila* (*mps*) pobude miruje u odnosu na rotor, pa se naziva stojećom.
- Smer jednosmerne struje kroz provodnike rotora je takav da je jedan pol severni, sledeći južni itd.
- Obrtanjem rotora stvara se obrtno magnetsko polje.
- Ovo polje preseca provodnike statora i u njima indukuje *ems* čija je trenutna vrednost po provodniku:

$$e_{pr}(t) = l v b(t)$$

Princip rada



Princip rada

- Pri stalnoj brzini obrtanja, *ems* ima isti oblik kao i magnetsko polje.
- Kod trofaznih namotaja statora, indukovane *ems* svake faze su jednake po vrednosti a vremenski su pomerene za jednu trećinu periode ili, ako su predstavljene vektorima, ovi su pomereni za ugao $2\pi/3$.
- Ako rotor ima jedan par polova, onda će se, pri jednom obrtaju, imati jedna potpuna promena *ems*, odnosno za p pari polova imaćemo p promena *ems*.
- Pošto je $p=\text{const}$, a u elektroenergetskim sistemima se zahteva odgovarajuća stabilnost učestanosti (standard za Evropu je 50Hz, dok je za Ameriku 60Hz), onda i brzina obrtanja sinhronih mašina mora biti konstantna.

Princip rada

- Brzina obrtanja sinhronih mašina se računa po sledećoj formuli:

$$n = \frac{60 f}{p} = \text{const.}$$

- U Evropi, imaćemo sledeće brzine obrtanja sinhronih mašina koje su prikazane u tabeli na sledećem slajdu.

Princip rada

p	1	2	3	4	5	6	itd
n [ob/min]	3000	1500	1000	750	600	500	

Tabela 1 Brzine obrtanja sinhronih mašina

- Ako se indukt (stator) optereti nekim trofaznim simetričnim opterećenjem, onda će se kroz namotaje statora uspostaviti struje efektivnih vrednosti I_1 , I_2 , I_3 koje su, u zavisnosti od opterećenja, vremenski pomerene u odnosu na svoje napone za neki ugao, a međusobno vremenski pomerene za jednu trećinu periode.

Princip rada

- Ove vremenski pomerene trofazne struje, koje protiču kroz trofazne namotaje koji su prostorno pomereni tako da njihove ose međusobno zaklapaju ugao od električnih 120° , daju jednu ekvivalentnu obrtnu *mps* (Teslino obrtno polje), čija je amplituda 1,5 puta veća od amplitude pulzirajućih magnetopobudnih sila pojedinih faza.
- Ovo polje se obrće brzinom $n=60f/p$, dakle istom brzinom kao i rotor tj. sinhronom, i otuda potiče i naziv sinhrona mašine.
- Relativna brzina obrtnog polja statora u odnosu na obrtno polje rotora jednaka je nuli tj. ona su međusobno nepokretna, ili kažemo da su se polja "zakačila".

Princip rada

- Magnetsko polje u međugvožđu nastaje zajedničkim delovanjem magnetopobudne sile pobude i statora.
- U ustaljenom stanju te dve magnetopobudne sile su, jedna u odnosu na drugu, nepomične i obrću se sinhronom brzinom obrtanja.
- Povratno delovanje polja statora (indukta) na polje polova rotora (induktora), naziva se magnetna reakcija indukta i zavisi od karaktera opterećenja.
- U zavisnosti od međusobnog položaja magnetskih polja rotora i statora, razvijaju se odgovarajuće sile i obrtni momenti.

Pobuda sinhronih mašina

- Pobudni namotaj sinhronne mašine napaja se iz posebnog izvora jednosmerne struje. U osnovi, pobudni sistemi se dele na dve osnovne skupine:
 - dinamičke (elektromašinske) sisteme, gde se pobudni namotaj sinhronne mašine napaja pomoću generatora jednosmerne struje,
 - statičke sisteme, gde je izvor jednosmerne struje statički pretvarač energetske elektronike.
- Danas su dominantni statički pobudni sistemi.

Karakteristike sinhronih mašina

- Najznačajnije karakteristike sinhronih mašina su:
 - karakteristika praznog hoda
(karakteristika magnećenja)
 - karakteristika kratkog spoja.
- Iz ove dve karakteristike mogu se dobiti značajne informacije o ponašanju sinhronne mašine.

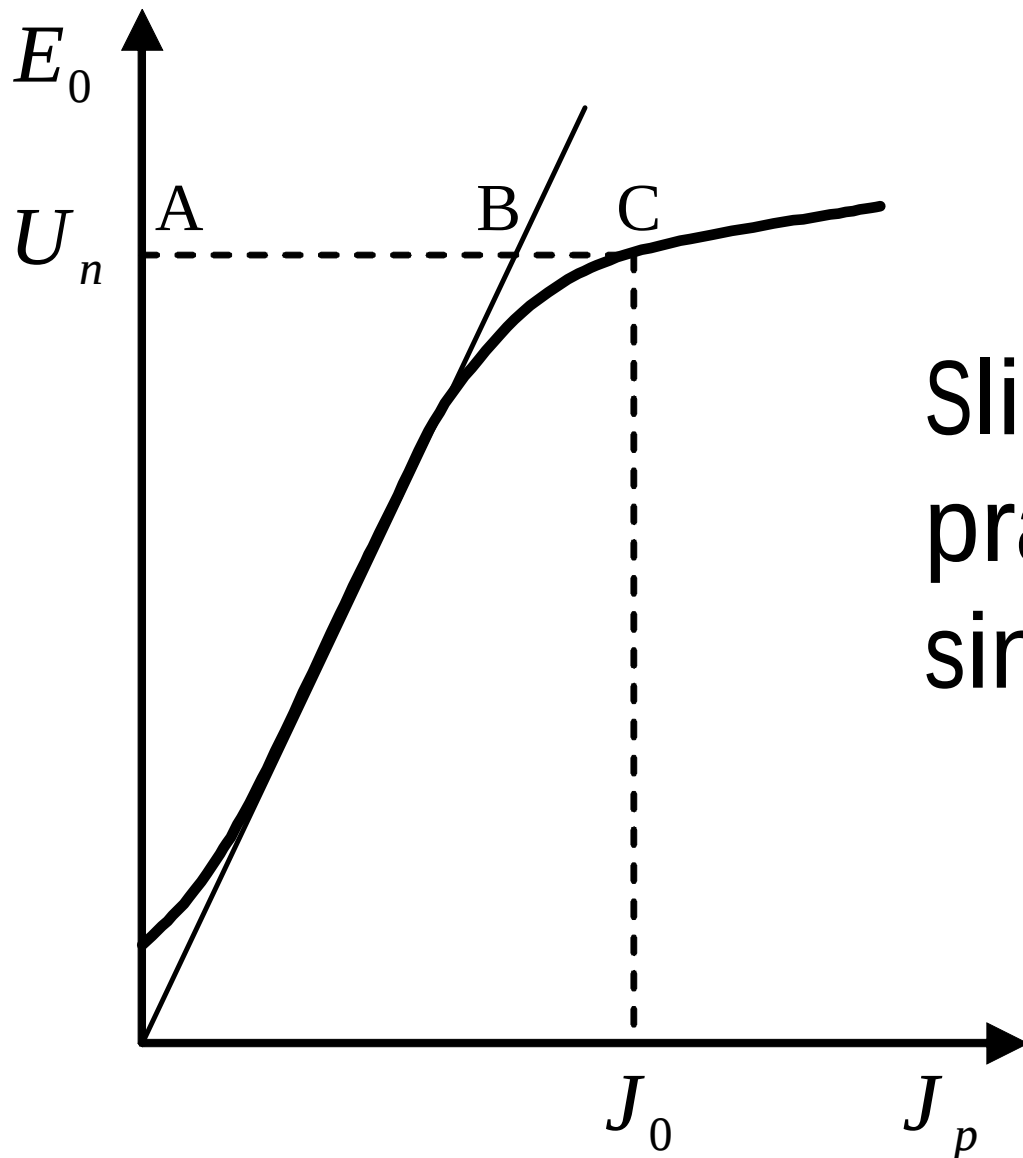
Karakteristika praznog hoda

- Karakteristika praznog hoda je funkcionalna zavisnost naizmeničnog napona indukta na priključcima neopterećenog generatora E_0 , od jednosmerne pobudne struje, J_p , pri konstantnoj brzini i naznačenoj učestanosti tj.

$$E_0 = f(J_p)$$

- Glavni deo pobudne struje, AB pripada *mps* međugvožđa, a deo BC *mps* magnetskog kola.
- Značajan podatak karakteristike praznog hoda je vrednost pobudne struje, J_0 , pri kojoj se ima linijska *ems* po vrednosti jednaka naznačenom naponu $E_0 = U_n$.

Karakteristika praznog hoda



Slika 4 Karakteristika
praznog hoda
sinhronog generatora

Karakteristika ustaljenog (trajnog) kratkog spoj

- Karakteristika ustaljenog kratkog spoja prikazuje zavisnost naizmenične struje na kratkospojenim priključcima statora, I_k , od jednosmerne pobudne struje, J_p , pri kratkom spoju i kada je brzina obrtanja naznačena, tj.

$$I_k = f(J_p)$$

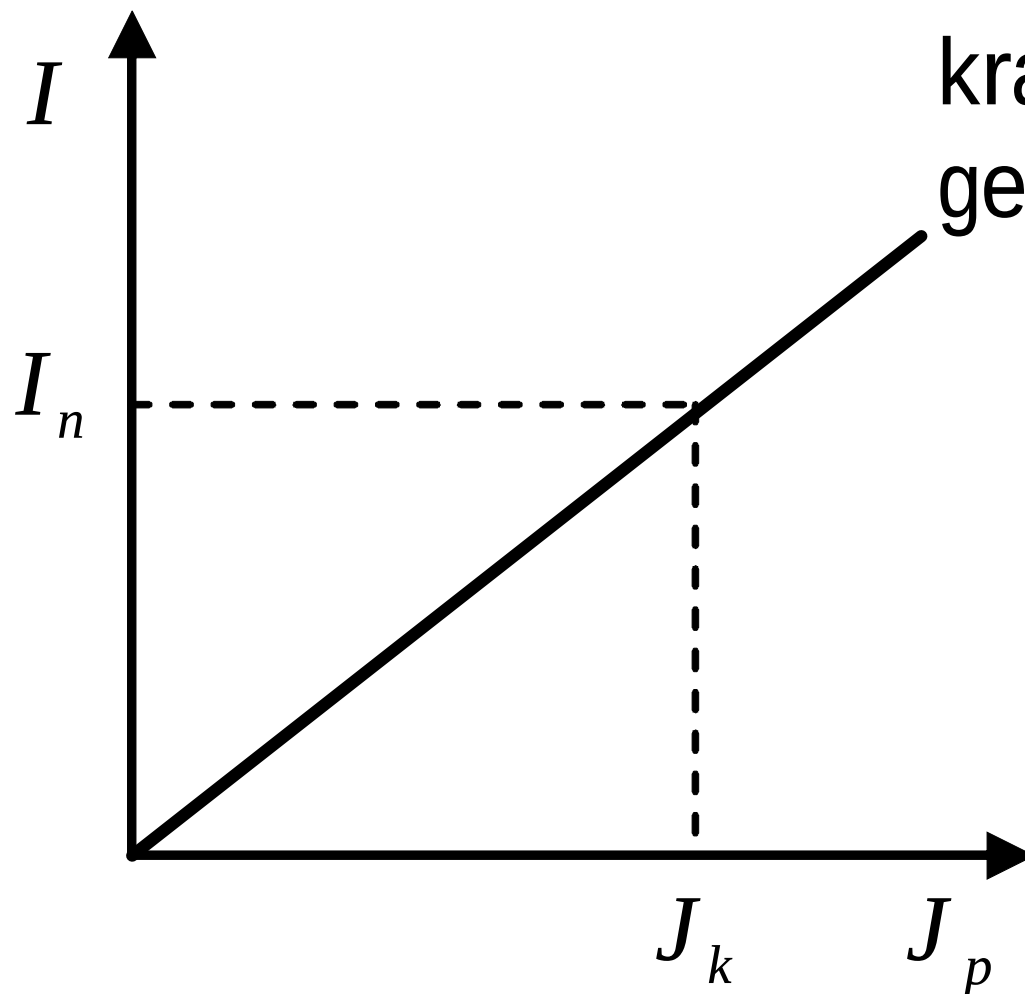
- Obično se ogled vrši pri tropolnom kratkom spoju.

Karakteristika ustaljenog (trajnog) kratkog spoja

- Merenje se vrši do vrednosti struje kratkog spoja koja je nešto veća od naznačene struje generatora. Na osnovu rezultata, nacrtava se karakteristika kratkog spoja, koja je prava linija.
- Značajan podatak karakteristike ustaljenog kratkog spoja je vrednost struje kratkog spoja, J_k , pri kojoj se ima linijska struja kratkog spoja po vrednosti jednaka naznačenoj struji $I_k = I_n$.
- Karakteristika kratkog spoja ne mora polaziti iz početka koordinatnog sistema već može biti pomerena malo naviše usled remanentnog magnetizma

Karakteristika ustaljenog (trajnog) kratkog spoj

Slika 5 Karakteristika
kratkog spoja sinhronog
generatora



Fazorski dijagram sinhrona mašine sa cilindričnim (turbo) rotorom

- Ovakav tip rotora, kao što je već rečeno, iz mehaničkih razloga se primenjuje kod sinhronih generatora gonjenih parnim turbinama na velikim brzinama.
- Kod ovog tipa rotora, reaktanse u $d-d$ osi i u $q-q$ osi su približno jednake.
- Slika 6 prikazuje je ekvivalentno kolo sinhronog turbogeneratora, uz sledeće oznake:
 - E_0 - ems praznog hoda
 - E - ems u opterećenom stanju
 - U - napon na priključcima
 - I - struja indukta
 - X_a - reaktansa indukta
 - X_σ - reaktansa rasipanja
 - X_d - sinhrona reaktansa, $X_d = X_a + X_\sigma$
 - R_s - otpor namotaja statora.

Fazorski dijagram sinhronne mašine sa cilindričnim (turbo) rotorom

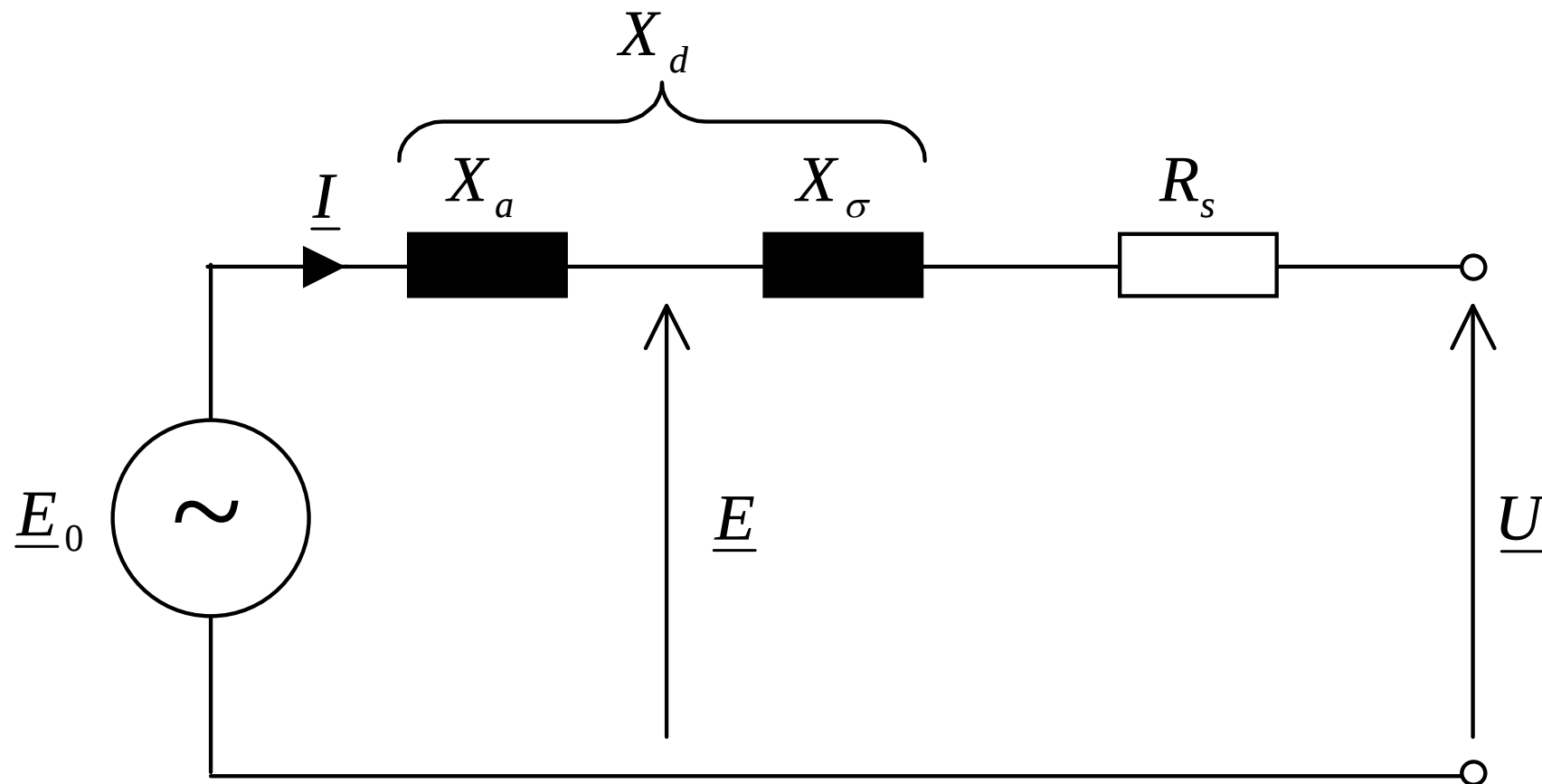
- Jednačina naponske ravnoteže za sinhroni generator sa cilindričnim rotorom je:

$$\underline{E}_0 = \underline{E} + j X_a \underline{I} = \underline{U} + R_s \underline{I} + j X_\sigma \underline{I} + j X_a \underline{I} = \underline{U} + R_s \underline{I} + j X_d \underline{I}$$

- gde je:

$$\underline{E} = \underline{U} + R_s \underline{I} + j X_\sigma \underline{I}$$

Fazorski dijagram sinhronne mašine sa cilindričnim (turbo) rotorom



Slika 6 Ekvivalentno kolo sinhronog turbogeneratorsa

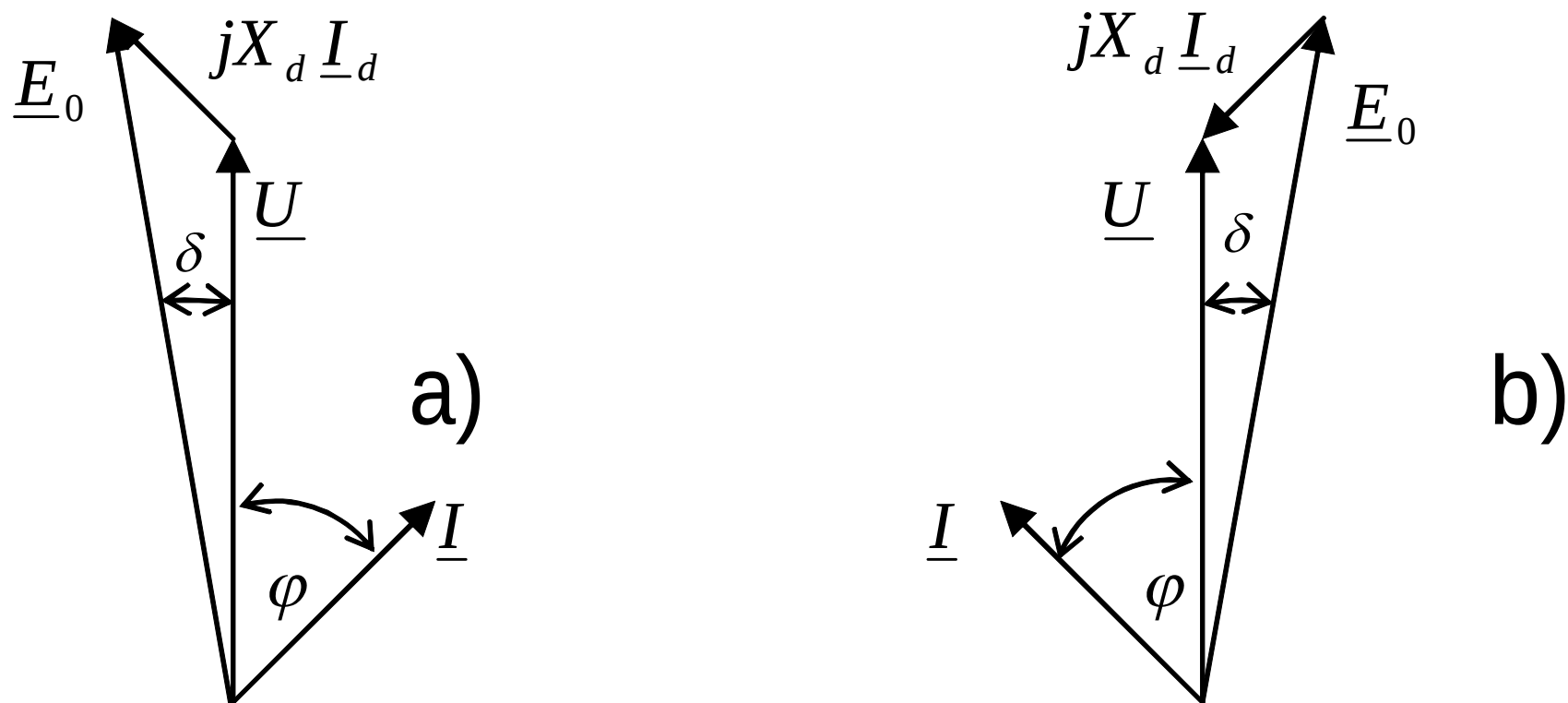
Fazorski dijagram sinhrona mašine sa cilindričnim (turbo) rotorom

- Jednačina naponske ravnoteže za sinhroni motor sa cilindričnim rotorom je:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + R_s \underline{I} + j X_d \underline{I}$$

- U nekim elektranama postoji mogućnost da se jedan turbogenerator, pomoću posebne spojnice, rastavi od turbine i radi kao natpobuđeni motor (tzv. fazni kompenzator).
- Ako zanemarimo radni pad napona, pojednostavljeni fazorski dijagrami za sinhroni generator i sinhroni kompenzator su prikazani na sledećem slajdu.

Fazorski dijagram sinhronne mašine sa cilindričnim (turbo) rotorom



Slika 7 a) fazorski dijagram za turbo SG
b) fazorski dijagram za turbo SM

Rad sinhronih generatora na sopstvenu i opštu mrežu

- Sinhroni generator može da radi u različitim pogonskim prilikama, pri čemu su krajnja stanja: rad na *sopstvenu* i *opštu mrežu*.
 - Pri radu na *sopstvenu mrežu* obično je reč o relativno malom sinhronom generatoru koji napaja malu mrežu koja nema mogućnost priključka na veću mrežu.
 - Budući da sinhroni generator predstavlja jedini izvor, napon mreže zavisi od pobude tog generatora, a učestanost od brzine obrtanja njegove pogonske mašine.
 - U mašini deluje samo jedna nezavisna magnetopobudna sila koja pripada pobudnom namotaju.
 - Pobuda, magnetski fluks u međugvožđu i napon na priključcima mašine su međusobno zavisne veličine.

Rad sinhronih generatora na sopstvenu i opštu mrežu

- Mnogo češći slučaj pogonskog stanja je rad sinhronog generatora na *opštu (čvrstu) mrežu*. Paralelnim radom generatora u pojedinim elektranama i paralelnim povezivanjem pojedinih elektrana i elektroenergetskih sistema, dobijaju se mreže većih snaga, na koje manje mogu da utiču pojedini generatori ili elektrane. Što je snaga mreže veća, njen napon možemo smatrati stalnijim (čvršćim) u pogledu veličine, faznog pomeraja i učestanosti. Kod priključivanja generatora na opštu mrežu, mora se provesti poseban postupak, kojeg nazivamo *sinhronizacijom*.

Rad sinhronih generatora na sopstvenu i opštu mrežu

- U osnovi ovog postupka radi se o svodjenju struje izjednačenja, koja se javlja prilikom priključenja generatora na mrežu, na najmanju moguću meru, što se postiže sledećim aktivnostima:
 - kod prvog puštanja u pogon višefaznih generatora (gotovo uvek trofaznih) proverava se *redosled faza*;
 - pogonskom mašinom generator treba približno dovesti do sinhronne brzine obrtanja koja je određena frekvencijom mreže i brojem pari polova generatora, dakle potrebno je *izjednačiti učestanost generatora i mreže*;
 - generator treba pobuditi tako da *napon generatora bude približno jednak naponu mreže*;
 - potrebno je postići *istofaznost istoimenih faza*, ili bolje rečeno, istofaznost napona na kontaktima sklopke;
 - generator treba uključiti na mrežu u trenutku kada je *fazni pomeraj* između istoimenih napona mašine i mreže *sveden na najmanju moguću meru*.

Rad sinhronih generatora na sopstvenu i opštu mrežu

- Za generatore manjih snaga sinhronizacija se može vršiti ručno, pomoću npr. sinhronizacionih sijalica.
- Kod skupih generatora većih snaga sinhronizacija se vrši poluautomatski ili automatski pomoću odgovarajućih uređaja.

Veliki hidro i turbo sinhroni generatori

- Hidro i turbo sinhroni generatori velikih snaga predstavljaju, uz transformatore velikih snaga, najveće električne uređaje.
- Jedno od bitnih ograničenja vezano za granične snage ovih uređaja jeste i mogućnost transporta (npr. "železnički profil").
- Prema potrebi stator generatora se transportuje u segmentima.
- Hidrogeneratori velikih snaga se obično postavljaju vertikalno, a hlađenje je kombinovano voda-vazduh.

Veliki hidro i turbo sinhroni generatori

- Zbog velike brzine obrtanja i sledstveno velikih mehaničkih naprezanja, ograničen je prečnik rotora turbogeneratora.
- Maksimalna dužina mašine određena je elastičnim svojstvima rotora – kritičnim brzinama obrtanja i problemima u vezi sa mirnim hodom rotora.
- Kod jedinica najvećih snaga, provodnici se direktno hlade bilo gasom (vodonikom) ili tečnošću (vodom).
- U svrhu proveru izdržljivosti rotora na povišene brzine, koje se mogu pojaviti u radu, sprovodi se ogled s povišenom brzinom obrtanja, tzv. ogled "vitlanja".
- Pre ogleda vitlanja potrebno je statički i dinamički izbalansirati rotor.

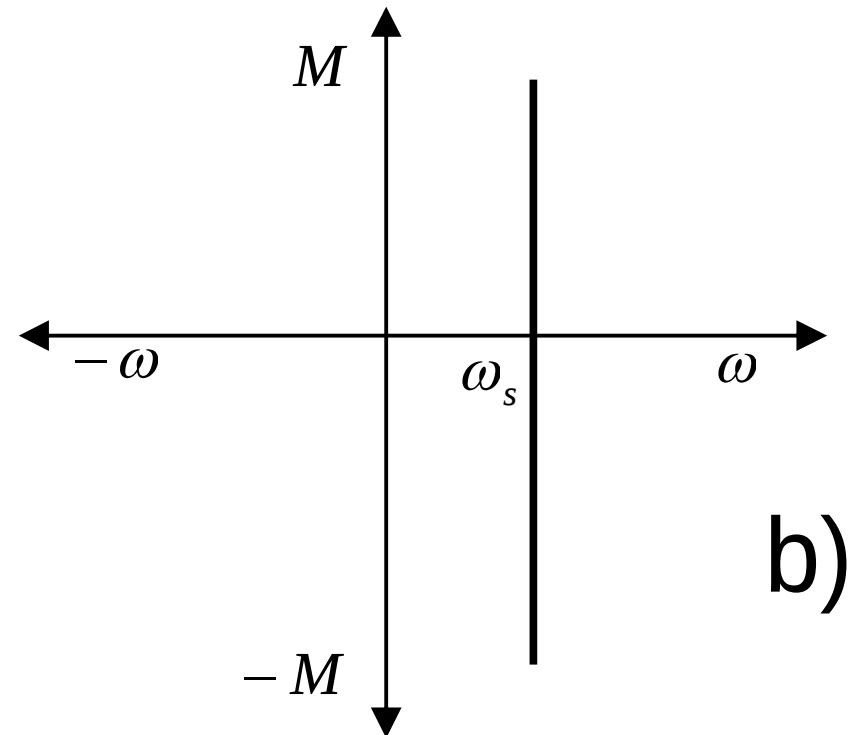
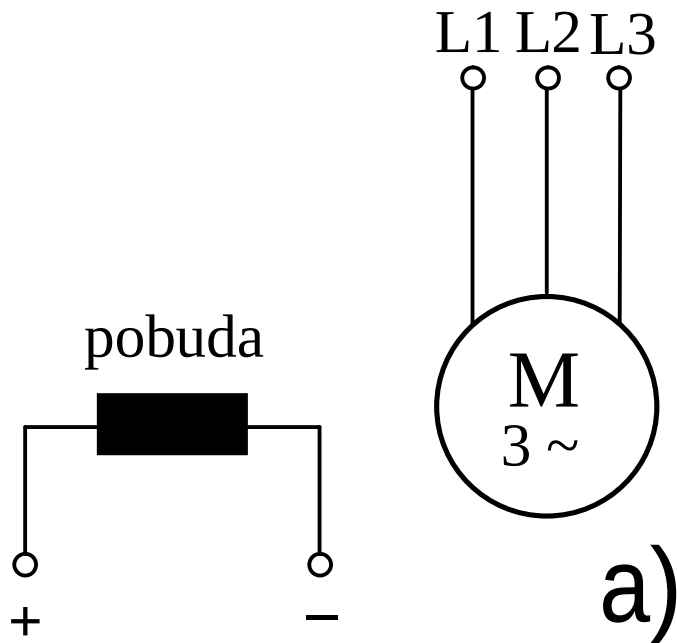
Veliki hidro i turbo sinhroni generatori

- Da bi se povećao naznačeni napon generatora i, s tim u vezi, generator direktno priključio na mrežu, bez upotrebe blok-transformatora, umesto klasično izolovanih namotaja neki proizvođači upotrebljavaju odgovarajuće kablove.
- U svetu već duže vreme postoji tendencija gradnje električnih mašina sa relativno niskim električnim i mehaničkim gubicima, što u osnovi ima za posledicu povećanje gabarita i sledstveno tome, cene.

Sinhroni motor

- Kod motora za naizmeničnu struju najviše je zastupljen, po značaju i masovnosti primene, asinhroni motor, a posle njega sledi *sinhroni motor* (Slika 8).
- U odnosu na asinhronu mašinu velikih snaga, bitne prednosti sinhronih motora su bolji stepen iskorišćenja, i to što ne troše reaktivnu energiju (postoji mogućnost i proizvodnje reaktivne energije), dok su nedostaci vezani za postojanje pobude i relativno teško puštanje u rad.
- U savremenoj praksi, najviše su zastupljeni standardni sinhroni motori sa pobudom, zatim sinhroni motori sa permanentnim magnetima i reluktantni sinhroni motori (bez pobude).

Sinhroni motor



Slika 8 Sinhroni motor:

- a) principijelna šema
- b) karakteristika momenta

Sinhroni motor

- Sinhroni motor ima konstantnu brzinu obrtanja koja ne zavisi od mehaničkog momenta, već isključivo od učestanosti napajanja i broja pari polova.
- Zbog ove osobine, područje primene sinhronog motora je ograničeno samo na one pogone u kojima nije potrebna promena brzine obrtanja.
- Sinhroni motori se koriste za pogone sa konstantnom brzinom obrtanja, od najmanjih snaga reda jednog vata (časovnici, releji, hronografi), preko snaga od stotinjak vata (fonograf – pogon filmske trake), do desetak MW (pogon kompresora i ventilatora).
- Posebno je interesantan slučaj kada motor radi u praznom hodu, bez elektromehaničke konverzije, kada se proizvodi reaktivna energija (kompenzator).
- U takvim pogonima rado se upotrebljava zbog njegove značajne prednosti u odnosu na ostale motore, sadržane u činjenici da može da proizvodi reaktivnu energiju i time da popravlja faktor snage ($\cos \varphi$) celog postrojenja.

Sinhroni motor

- U novije vreme, u elektromotornim pogonima napajanim iz pretvarača energetske elektronike, primenjuju se sinhronne mašine sa permanentim magnetima, umesto pobudnog namotaja (robotika, alatne mašine, servopogoni).
- Pobuda ovih mašina je konstantna i određena je konstrukcionom izvedbom. Za rad sa promenljivom brzinom potreban je izvor naizmenične struje promenljive frekvencije (pretvarač energetske elektronike).
- Sa povećanjem mehaničkog momenta povećava se električni (pogonski) momenat sinhronog motora sve dok se oba momenta u ustaljenom stanju ne izjednače.
- Pri tome ne dolazi do promene brzine, već se jedino menjaju uglovni odnosi između pojedinih obrtnih magnetopobudnih sila i obrtnih flukseva.
- Međutim, kod suviše velikog opterećenja, ovi uglovi postaju toliki da se više ne može održati održati ravnoteža dvaju momenata i mašina ispada iz stabilnog rada ("ispada iz koraka").

Literatura

- M. Milanković, D. Perić, I. Vlajić-Naumovska, *“Osnovi elektroenergetike”*, Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd, 2016.