

SINHRONE MAŠINE

SADRŽAJ

1	SINHRONE MAŠINE.....	4
1.1	Sinhroni generatori.....	4
1.2	Oznake veličina.....	5
1.3	Osnovni delovi.....	5
1.4	Princip rada.....	7
1.5	Pobuda sinhronih mašina.....	8
1.6	Oblik polja (mps) rotora.....	8
1.7	Sprezanje namotaja trofaznih generatora.....	9
1.8	Karakteristike sinhronih mašina.....	9
1.8.1	Karakteristika praznog hoda.....	10
1.8.2	Karakteristika ustaljenog kratkog spoja.....	10
1.9	Magnetna reakcija indukta.....	11
1.9.1	Aktivno (radno) opterećenje.....	11
1.9.2	Induktivno opterećenje.....	13
1.9.3	Kapacitivno opterećenje.....	14
1.9.4	Zaključak o delovanju reakcije indukta.....	15
1.10	Reaktansa rasipanja.....	16
1.11	Sinhrona reaktansa.....	16
1.12	Pobudna struja.....	16
1.13	Fazorski dijagram SG sa istaknutim polovima opterećenog radno-induktivno... 17	17
1.14	Pojednostavljeni fazorski dijagram sa radno-induktivnim opterećenjem.....	19
1.15	Aktivna snaga u sinhronizmu i sinhroni obrtni moment generatora.....	21
1.16	Motorni režim rada sinhronog generatora.....	22
1.16.1	Reluktantni režim sinhronog motora.....	23
1.16.2	Dijagram obrtnog momenta sinhrona mašine sa isturenim polovima.....	25
1.16.3	Fazorski dijagram sinhrona mašine sa cilindričnim rotorom.....	26
1.17	Rad sinhronih generatora na sopstvenu i opštu i mrežu.....	27
1.18	Upravljanje proizvodnjom reaktivne snage Q.....	29
1.18.1	Mordejeva kriva.....	29
1.18.2	Upravljanje normalnom režimu rada nadpobuđenog generatora (opterećenog radno-induktivno).....	30

1.19	Upravljanje proizvodnjom aktivne snage P	31
1.20	Karakteristike regulacije	32
1.21	Elektromehaničke oscilacije sinhronne mašine.....	33
1.21.1	Ekvivalentna mehanička slika sinhronne mašine	35
1.21.2	Prigušni namotaj	37
1.22	Fizičko objašnjenje struje kratkog spoja.....	38
1.23	Veliki hidro i turbo sinhroni generatori.....	48
1.24	Sinhroni motor	48
1.25	Literatura	49

1 SINHRONE MAŠINE

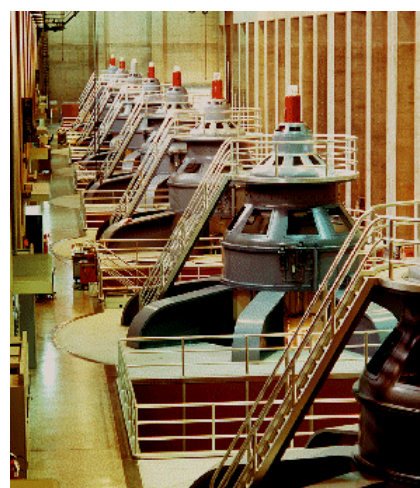
Rotor sinhronne mašine se u ustaljenom pogonu obrće jednakom (sinhronom) brzinom kao i obrtno magnetsko polje u međugvožđu, pa odatle potiče naziv ove vrste mašina.

Prema svojim karakteristikama, sinhronne 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.

1.1 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 1000 MVA.

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 50 Hz), 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).



Slika 1-1 Generatori: a) turbo, b) hidro

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 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.

U konstrukcionom, odnosno u pogledu mehaničkih dimenzija, turbo i hidro generatori se značajno razlikuju, tako da za snage od oko 100 MVA odnos osne dužine, l , i prečnika, D , za turbogeneratore iznosi oko 5, dok za hidrogeneratore iznosi oko 0,15.

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.

Da bi se povećao naznačeni napon generatora i, s tim u vezi, generator direktno priključio na mrežu, bez upotrebe blok-transformatora, neki proizvođači umesto klasično izolovanih namotaja upotrebljavaju odgovarajuće kablove.

1.2 Oznake veličina

Ovde će biti upotrebljene sledeće oznake:

- E_0 - ems praznog hoda
- E - ems u opterećenom stanju
- U - napon na priključcima
- J_p - pobudna struja (odgovara ems E_0)
- I - struja indukta
- J_a - pobudna struja koja odgovara struji indukta I , koja izražava reakciju indukta, ili drugim rečima struja statora svedena na rotor
- J - pobudna struja koja odgovara ems E

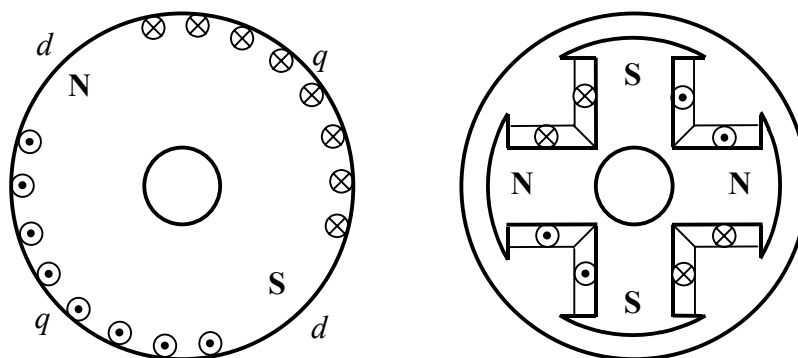
1.3 Osnovni delovi

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 indukat 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.

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 turbogeneratora, iz mehaničkih razloga (slika 1-2, 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-hidrogeneratora (slika 1-2, b).



Slika 1-2 Rotor sinhronne mašine

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

Na slici 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 ožlebljen i čini *zonu velikog zupca* kroz koji prolazi glavni deo magnetskog fluksa.

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 od se od okruglih bakarnih štapova stavljenih u žlebove u polnom stopalu (nastavku, papučici). 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.

1.4 Princip rada

Kroz provodnike pobudnog namotaja prolazi jednosmerna struja usled koje nastaje stalno magnetsko polje. *Magnetnopobudna 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

$e_{pr}(t) = l v b(t)$. 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, i određena je izrazom:

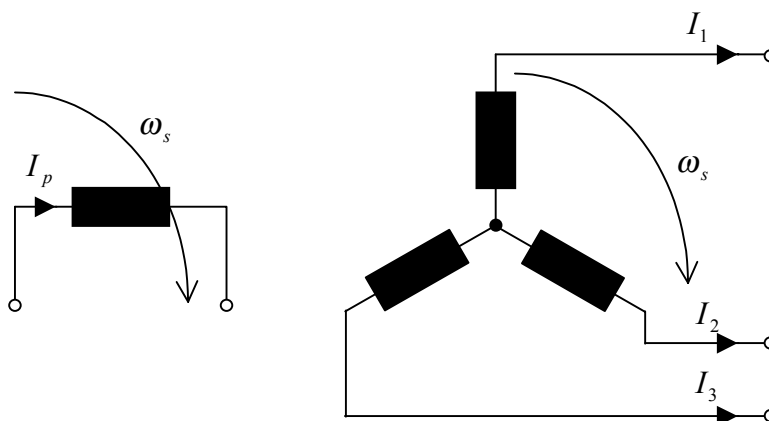
$$n = \frac{60 f}{p} = \text{const.}$$

Dakle, u Evropi, imaćemo sledeće brzine obrtanja:

Tabela 1-1 Brzine obrtanja sinhronih mašina

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

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.



Slika 1-3 Princip rada sinhronih mašina

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".

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.

1.5 Pobuda sinhronih mašina

Pobudni namotaj sinhrona mašine napaja se iz posebnog izvora jednosmerne struje. U osnovi, pobudni sistemi se dele na dve osnovne skupine:

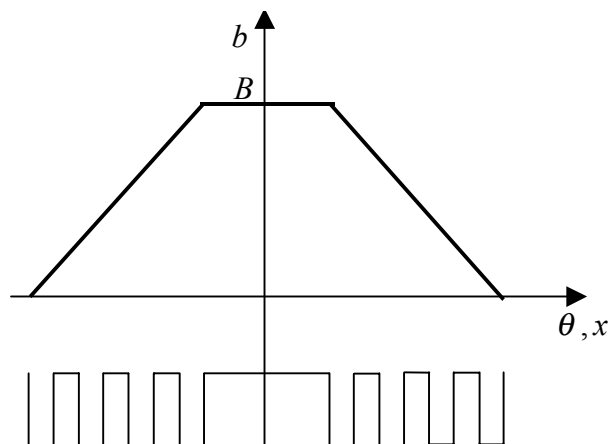
- dinamičke (elektromašinske) sisteme, gde se pobudni namotaj sinhrona mašine napaja pomoću generatora jednosmerne struje,
- statičke sisteme, gde je izvor jednosmerne struje statički pretvarač energetske elektronike.

Danas su dominantni statički pobudni sistemi.

1.6 Oblik polja (*mps*) rotora

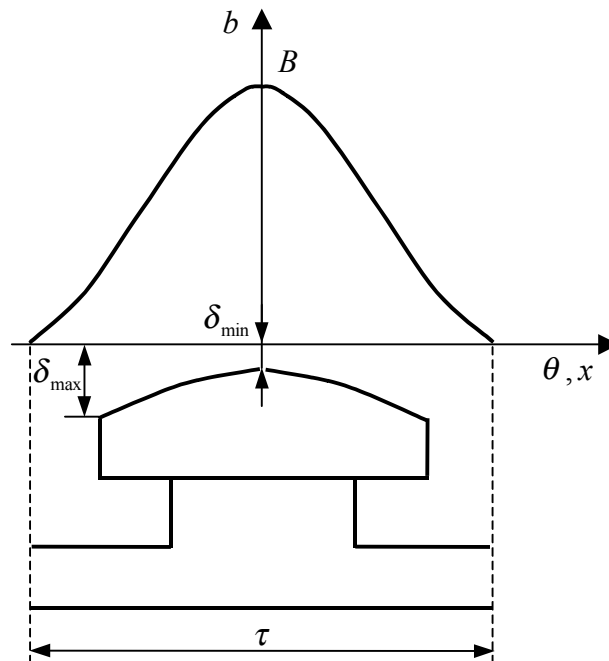
Kada sinhrona mašina treba da radi kao generator posebno je važno da oblik *ems* bude harmoničan. Budući da je *ems* posledica promene fluksa, i polje rotora treba da bude što približnije harmonično. Ako oblik polja nije potpuno harmoničan onda je potrebno učiniti uticaj viših harmoničkih komponenta što manjim.

Kod *valjkastog (cilindričnog) rotora* polje ima približno oblik trapeza. Navojni delovi u žlebovima imaju pravougaoni oblik *mps*. Sabiranjem pojedinih pravougaonih *mps* dobijamo stepenastu liniju, koju zamenjujemo pravom koja čini krakove trapeza. Neožljebljen deo ima izgled jednog velikog zupca, i on formira gornju osnovu trapeza.



Slika 1-4 Polje valjkastog rotora

Kod *rotora sa istaknutim polovima* polje bi imalo oblik pravougaonika kada bi polovi bili takvi da je dužina međugvožđa pod polovima stalna. Međutim, da bi polje, a prema tome i *ems* bila što bliža sinusoidnom obliku, međugvožđe pod polnim nastavcima nije stalno, već izgleda kao na slici 1-6. Odnos dužine polnog nastavka i polnog koraka iznosi oko 0,75.



Slika 1-5 Polje rotora sa istaknutim polovima

1.7 Sprezanje namotaja trofaznih generatora

Trofazni generatori se, u principu, sprežu trougao ili zvezdu. Takođe je moguća i kombinacija ova dva načina. Danas se uglavnom primenjuje sprega u zvezdu, koja ima izvesne prednosti. Kod sprega u zvezdu u linijskom naponu poništavaju se viši harmonici trećeg reda koji bi inače najviše uticali u deformisanju sinusnog oblika *ems*. Takođe se poništavaju i sve harmoničke komponente višeg reda deljive sa tri. Prednosti su sadržane u izbegavanju lokalnih struja koje su prisutne u namotaju generatora u sprezi trougao, postoji neutralna tačka što vodi na jednostavniju zaštitu a pri istoj konstrukciji faznih namotaja omogućen je viši linijski napon.

1.8 Karakteristike sinhronih mašina

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

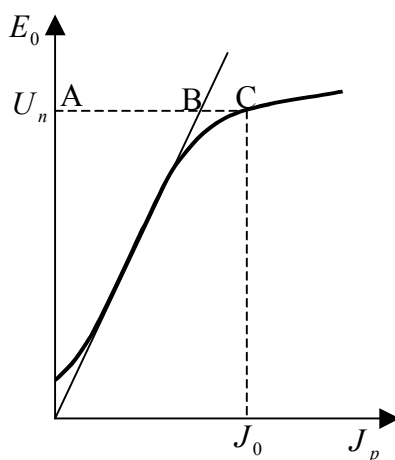
1.8.1 Karakteristika praznog hoda

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.

$$E_0 = f(J_p) \quad \text{pri } I = 0, \quad n = \text{const. i } f_n.$$

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 $E_0 = U_n$.



Slika 1-6 Karakteristika praznog hoda sinhronog generatora

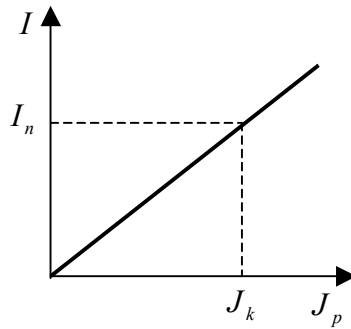
1.8.2 Karakteristika ustaljenog kratkog spoja

Karakteristika ustaljenog (trajnog) 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.

$$I_k = f(J_p) \quad \text{pri } U = 0 \quad \text{i} \quad n = n_n.$$

Obično se ogled vrši pri trolnom kratkom spoju.

Merenje se vrši do vrednosti struje kratkog spoja koja je nešto veća od naznačene struje generatora. Na osnovu rezultata, nacrtava se karakteristika kratkog spoja (slika 1-7), koja je prava linija.



Slika 1-7 Karakteristika kratkog spoja sinhronog generatora

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.

1.9 Magnetna reakcija indukta

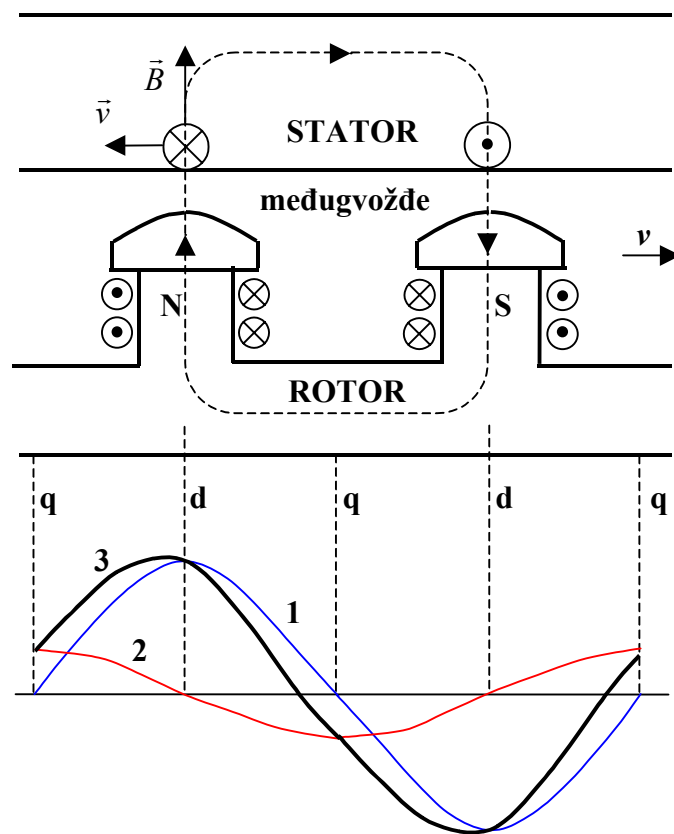
Kod sinhronih mašina postoje dve magnetopobudne sile, $m_p s$ induktora (rotora), \underline{F}_p , i $m_s s$ indukta (statora), \underline{F}_a , koje daju zajedničku $m_p s$ mašine, $\underline{F} = \underline{F}_p + \underline{F}_a$. $M_p s$ indukta deluje povratno na $m_p s$ induktora, pa se zbog toga naziva reakcija indukta. Kod sinhronih mašina položaj $m_p s$ indukta, u odnosu na $m_p s$ induktora nije stalan, već zavisi od vrste opterećenja, odnosno od kašnjenja struje statora u odnosu na $e_m s$ statora.

Uz vektorsko prikazivanje ove dve veličine ovo kašnjenje ćemo izraziti uglom ψ . Kod fizičkog objašnjenja ove pojave razmotrićemo tri granična slučaja:

- omsko opterećenje ($\psi = 0$),
- potpuno induktivno opterećenje ($\psi = -\pi/2$),
- potpuno kapacitivno opterećenje ($\psi = \pi/2$).

1.9.1 Aktivno (radno) opterećenje

Posmatrajmo sliku 1-8. Pobudni fluks je prikazan isprekidanom linijom. U osi pola pobudni fluks je maksimalan, a indukovana $e_m s$ minimalna.



Slika 1-8 Reakcija indukta uz omsko opterećenje

1- mps pobude, 2- mps reakcije indukta, 3- resultantna mps

Indukovani napona u provodnicima statora određen je jednačinom:

$$e = \int_l (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}.$$

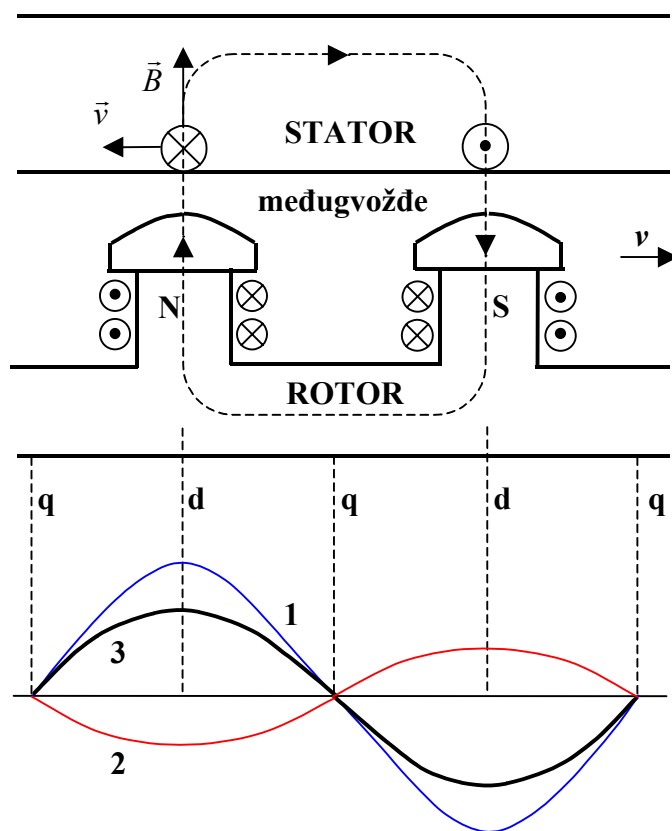
Dakle, smer indukovane ems je određen vektorskim proizvodom vektora brzine obrtanja \vec{v} i magnetne indukcije \vec{B} . Pri određivanju smera indukovane ems smatramo da rotor stoji, a da se provodnici statora kreću brzinom \vec{v} u suprotnom smislu od rotora. Prema datom smeru obratnja i indukcije označeni su smerovi ems. Uz omsko opterećenje, struja statora je jednovremena sa ems.

Mps rotora ima svoj maksimum u osi pola (uzdužna os - os d), dok mps statora ima svoj maksimum u netralnoj osi, ili kako je drugačije nazivamo poprečnoj osi, q . Zbog toga se kaže da je reakcija indukta, pri omskom opterećenju, poprečna.

Sa slike se vidi da se zajednička (resultantna) mps, a time i indukcija, povećava na odlaznom kraju pola, a smanjuje na nailaznom. Budući da se radna tačka na $B(H)$ karakteristici nalazi na kolenu, za istu vrednost promene ΔH levo i desno od radne tačke, porast indukcije ΔB će biti manji od smanjenja, pa se ukupna indukcija, a time i napon smanjuje. Dakle, i kod čisto omskog opterećenja napon na priključcima će ipak opasti.

1.9.2 Induktivno opterećenje

Posmatrajmo sliku 1-9.



Slika 1-9 Reakcija indukta uz induktivno opterećenje

1- *m*ps pobude, 2- *m*ps reakcije indukta, 3- rezultantna *m*ps

Kod potpuno induktivnog opterećenja struja kasni za naponom za $\pi/2$, tako da *m*ps indukta ima takođe svoj maksimum u osi polova (direktnoj osi), i suprotnog je smera od smera *m*ps pobudnih polova i kažemo da je direktna i suprotna. Prema tome, pri induktivnom opterećenju *m*ps reakcije indukta ima demagnetišuće delovanje, pa bi se napon na priključcima generatora jako smanjio.

Da bi naznačeni napon ostao isti, moramo jako povećati pobudnu struju. Možemo grubo pisati da je potrebna pobudna struja sinteza dva stanja - praznog hoda i ustaljenog kratkog spoja, tj.:

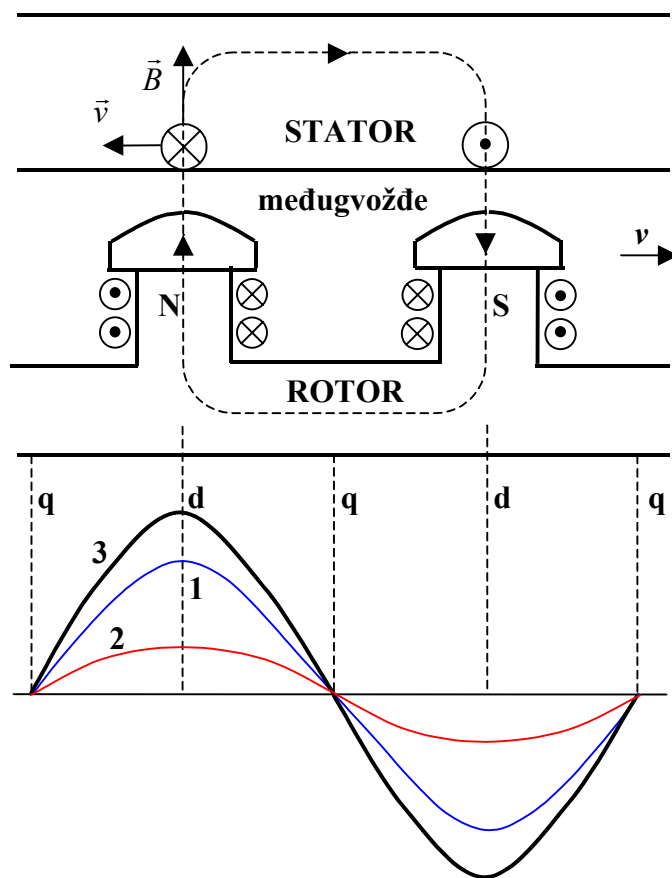
$$J_p \text{ (za } U_n, I_n, \cos \varphi = 0 \text{ (ind))} \cong J_0 + J_k,$$

zato što nam je za postizanje naznačenog napona, U_n , potrebna struja J_0 , a za naznačenu struju, I_n , uz $\cos \varphi = 0$ (ind), potrebna nam je struja J_k , jer je karakter opterećenja u trolnom, ustaljenom, kratkom spoju praktično induktivan (namotaji tri faze statora imaju zanemarivi radni otpor, pa je impedansa namotaja približno jednaka reaktansi).

Važno je uočiti da smo stuje pobude J_0 i J_k mogli algebarski sabrati jer sa slike vidimo da su ose polja indukta i indukta nalaze u istom pravcu ose d .

1.9.3 Kapacitivno opterećenje

Posmatrajmo sliku 1-10.



Slika 1-10 Reakcija indukta uz kapacitivno opterećenje

1- *m*ps pobude, 2- *m*ps reakcije indukta, 3- rezultatna *m*ps

Kod potpuno kapacitivnog opterećenja struja prethodi naponu za $\pi/2$, tako da *m*ps indukta ima takođe svoj maksimum u osi polova (direktnoj osi), i istog je smera u odnosu na smer *m*ps pobudnih polova. Prema tome, pri kapacitivnom opterećenju *m*ps reakcije indukta ima magnetišuće delovanje, pa bi se napon na priključcima generatora jako povećao.

Da bi naznačeni napon ostao isti, moramo jako smanjiti pobudnu struju. Kao i u slučaju induktivnog opterećenja, možemo grubo pisati da je potrebna pobudna struja sinteza dva stanja - praznog hoda i ustaljenog kratkog spoja, tj.:

$$J_p \text{ (za } U_n, I_n, \cos \varphi = 0 \text{ (kap))} \cong J_0 - J_k .$$

Važno je uočiti da smo i u ovom slučaju stuje pobude J_0 i J_k mogli algebarski sabrati jer sa slike vidimo da su ose polja induktora i indukta nalaze u istom pravcu ose d .

1.9.4 Zaključak o delovanju reakcije indukta

Svi preostali slučajevi mešanog opterećenja $R-L$, $R-C$, $R-LC$ se nalaze između tri pomenuta granična slučaja. U opštem slučaju ugao ψ je između 0 i $\pm\pi/2$. Zbog značajno različitog delovanja feromagnetskih polova u d -osi i vazduha u q -osi Blondel je predložio da se reakcija indukta podeli u podužnu (uzdužnu) i poprečnu komponentu (dvo-osna teorija sinhronih mašina).

Mps reakcije indukta, F_a , ćemo rastaviti na dve komponente:

- podužnu reakciju indukta: $F_{ad} = F_a \cdot \sin \psi$ i
- poprečnu reakciju indukta: $F_{aq} = F_a \cdot \cos \psi$.

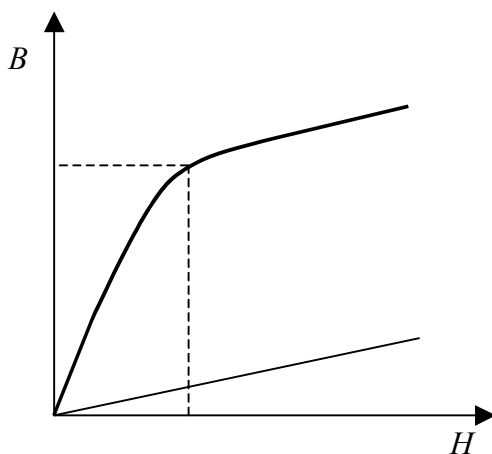
Blondelova, dvo-osna, teorija se može primeniti za flukseve (ako nema zasićenja) i električne sile.

Pri sračunavanju raznih veličina sinhrona mašine ili pri crtanju vektorskih dijagrama (na primer *mps*), potrebno je, da se vrednost *mps* indukta da svede na induktor, tj. da se odredi odgovarajuća ekvivalentna vrednost *mps* induktora. Ekvivalentna vrednost induktora je ona vrednost *mps* induktora čiji je osnovni harmonik jednak osnovnom harmoniku *mps* reakcije indukta.

Na osnovu definicije induktivnosti $L = \frac{\Psi}{i}$, te karakteristike $B(H)$, vidi se da je induktivitetu d -osi (magnetski polovi, gvožđe), L_{ad} , puno veći nego induktiviteta u q -osi (vazduhu), L_{aq} , te možemo pisati: $L_{ad} \gg L_{aq}$. Pomnoženo sa kružnom frekvencijom ω , za reaktanse imamo: $X_{ad} \gg X_{aq}$.

Dakle, zbog različitih reluktansi po obodu rotora, nastaju različite reakcije indukta, što ima za posledicu različite reaktanse indukta X_{ad} i X_{aq} .

U zanimljive detalje izračunavanja reaktansi ovde se nećemo upuštati.



Slika 1-11 Karakteristika $B(H)$

1.10 Reaktansa rasipanja

Reaktansa rasipanja (Potjeova reaktansa), X_σ , potiče od rasipnih polja statora: čeonih veza namotaja, zuba statora, feromagnetskog kola statora. To su polja koja ne dopiru do rotora. Relativna vrednost reaktanse rasipanja,

$$x_\sigma [\%] = (X_\sigma / X_n) \cdot 100,$$

kreće se u granicama od 10% do 14%. Ovde naznačena reaktansa, $X_n = U_n / \sqrt{3} I_n$, koju izračunavamo iz podataka natpisne pločice, nema fizičko značenje, već je referentna veličina koja služi radi upoređivanja.

1.11 Sinhronne reaktanse

Algebarski zbir pojedinih komponenti reaktanse indukta sa reaktansom rasipanja čine:

- sinhronu podužnu reaktansu $X_d = X_{ad} + X_\sigma$,
- sinhronu poprečnu reaktansu $X_q = X_{aq} + X_\sigma$.

Sinhronne reaktanse X_d i X_q su merodavne za stacionarno pogonsko stanje (stanje dinamičke ravnoteže). Podaci za ove reaktanse ne nalaze se na natpisnoj pločici, ali ih proizvođači daju.

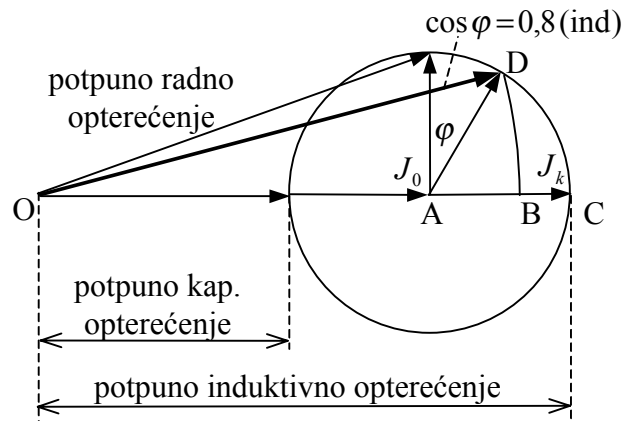
U odnosu na reaktansu rasipanja, relativne vrednosti sinhronih reaktansi su daleko veće. Na primer, za hidrogeneratore iznose:

$$x_d = 120\% , x_q = 65\% .$$

1.12 Pobudna struja

Na natpisnoj pločici sinhronne mašine dati su podaci za sledeće veličine: S_n [VA], U_n [V], I_n [A], n_n [min⁻¹], $\cos \varphi_n$. Vrednosti ovih veličina ukazuju na granice opterećenja za koje je mašina građena u trajnom radu. Važno je istaći da vrednost faktora snage ($\cos \varphi_n$) predstavlja ograničenje vezano za strujnu opteretivnost pobudnog namotaja generatora. Naime, kod analize delovanja reakcije indukta pri raznim vrstama opterećenja, pokazali smo da je vrednost pobudne struje funkcija naznačenog napona, struje i faktora snage.

Kod raznih opterećenja (faktora snage) na način prikazan na slici 1-13 približno možemo odrediti potrebnu vrednost pobudne struje za date vrednosti naznačenog napona i struje.



Slika 1-12 Približno određivanje potrebne pobudne struje pri raznim opterećenjima

Sa slike 1-12 se može videti da, sa smanjenjem faktora snage induktivnog karaktera, raste potrebna pobudna struja, odnosno zagrevanje pobudnog namotaja. Dakle, ako se zahteva gradnja sinhronne mašine za manji induktivni faktor snage, to ukazuje na potrebu za većom pobudnom strujom, odnosno potrebnim većim presekom provodnika pobudnog namotaja, što ima za posledicu poskupljenje mašine. Radi toga proizvođač generatora traži od kupca da precizira faktor snage. Današnje hidro i termoelektrane uglavnom imaju $\cos \varphi = 0,8$. Neke termoelektrane u blizini velikih industrijskih centara, gde ima puno motora, imaju $\cos \varphi = 0,6$.

Postavimo sada jedno praktično pitanje: da li smemo generator, koji je građen za $\cos \varphi = 0,8$ opteretiti sa $\cos \varphi = 0$ (ind). Odgovor je: smemo, ali ne sa punom naznačenom strujom indukta. Smanjenje struje indukta možemo proceniti tako što ćemo, uz poluprečnik jednak naznačenoj struji pobude J_n (duž \overline{OD}), napraviti kružni luk iz tačke D u tačku B. Odnos dužina $\overline{AB}/\overline{AC}$ predstavlja potrebno smanjenje struje opterećenja.

Navedeno razmatranje daje grubu fizičku predstavu. Postoji više metoda za određivanje naznačene pobudne struje J_n . Najbliže ovoj (gruboj) metodi je "Švedska metoda".

1.13 Fazorski dijagram SG sa istaknutim polovima opterećenog radno-induktivno

U daljem tekstu biće data kratka analiza fazorskog dijagrama sa odgovarajućim crtežom za sinhroni generator sa istaknutim polovima, opterećen radno-induktivno. Radna komponentna struje indukta pokriva aktivne potrošače (npr. rasveta, peći), kao i mehaničku snagu na vratilima elektromotora, dok induktivna komponenta snabdeva magnećenje elektromotora i transformatora.

Na osnovu relacije $e = -\frac{d\psi}{dt}$, indukovani napon zaostaje za odgrovarajućim fluksom za 90° . Dijagram mps u nekoj drugoj razmeri predstavlja i dijagram struja. Zbog zgodne ilustracije uzećemo da je oga ψ između indukovanog napona u praznom hodu, \underline{E}_0 , i struje indukta, \underline{I} , odnosno mps indukta, \underline{F}_a , 45° , što dobro odgovara stvarnim odnosima. Tada su podužna komponenta struje indukta I_d i poprečna komponenta I_q po vrednosti jednake, ali odgovarajući fluksevi indukta, ϕ_d i ϕ_q su različitih vrednosti zbog različitih karakteristika za feromagnetski materijal, odnosno vazduh. Time će i odgovarajući padovi napona po vrednosti biti različiti, pa ćemo imati: $X_{ad} I_d > X_{aq} I_q$.

Kao i kod ekvivalentne šeme, sve veličine u fazorskom dijagram su fazne.

Važno je uočiti povezanost određenih indukovanih *ems* i *mps*, koje su međusobno pomerene za 90° . Indukovani napon (*ems*) u praznom hodu, E_0 , uzrokovan je od *mps* pobude F_f , dok je indukovani napon u opterećenom stanju, E , uzrokovan rezultantnom (ukupnom) *mps*, F .

Ugao δ , između indukovanog napona u praznom hodu i napona na priključcima mašine, naziva se uglom opterećenja.

Elektromotorna sila u praznom hodu, \underline{E}_0 , je jednaka zbiru napona na priključcima generatora i svih padova napona: omskog $R_s \underline{I}$, usled rasutog fluksa, $j X_\sigma \underline{I}$, usled poprečne reakcije indukta $j X_{aq} \underline{I}_q$ i usled podužne reakcije indukta, $j X_{ad} \underline{I}_d$:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R_s \underline{I} + j X_\sigma \underline{I} + j X_{aq} \underline{I}_q + j X_{ad} \underline{I}_d.$$

Pad napona usled rasutog fluksa može se prikazati kao zbir dve komponente (vidi sliku 1-13)- poprečne $j X_\sigma \underline{I}_q$ (na slici σq) i podužne $j X_\sigma \underline{I}_d$ (na slici σd).

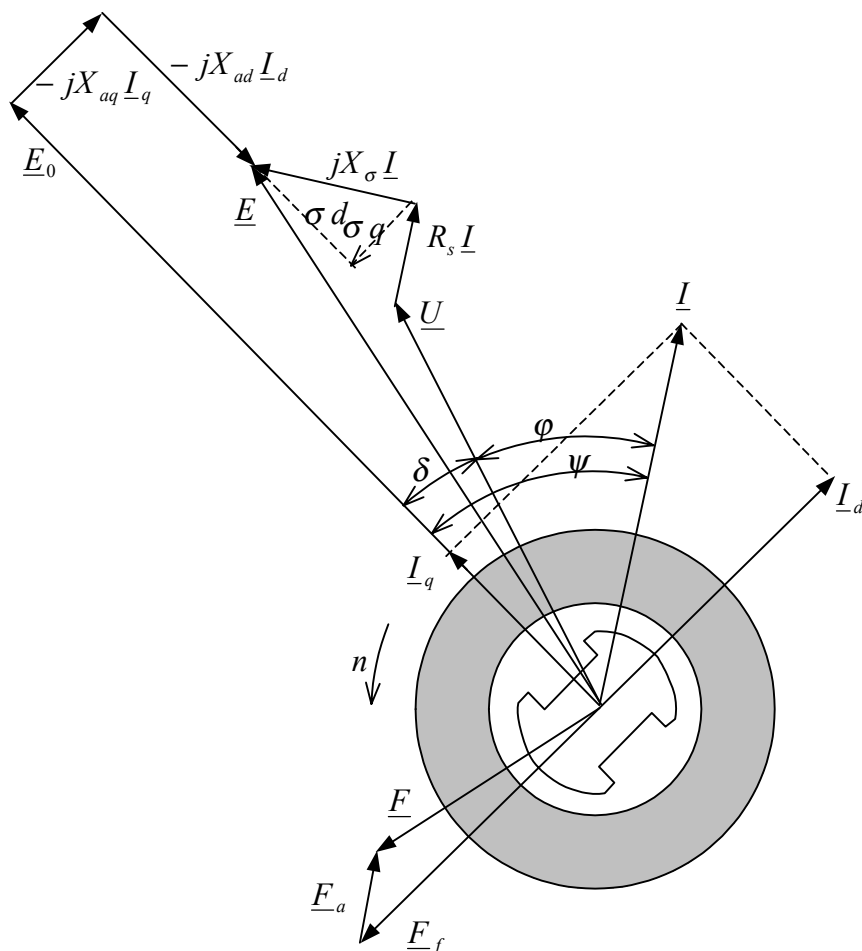
Ukupni reaktivni pad napona usled poprečne komponente struje indukta je: $j(X_\sigma + X_{aq})\underline{I}_q = j X_q \underline{I}_q$,

odnosno ukupni reaktivni pad napona usled podužne komponente struje indukta je: $j(X_\sigma + X_{ad})\underline{I}_d = j X_d \underline{I}_d$,

gde je X_q sinhrona reaktansa po poprečnoj osi, a X_d sinhrona reaktansa po podužnoj osi.

Neka su brojčane vrednosti za crtanje fazorskog dijagrama sledeće:

$$E_0 = 18,4 \text{ cm}, \quad X_{aq} I_q = 3 \text{ cm}, \quad X_{ad} I_d = 6,6 \text{ cm}, \quad \psi = 45^\circ, \quad \delta = 15^\circ, \quad \varphi = 30^\circ.$$



Slika 1-13 Fazorski dijagram SG sa istaknutim polovima opterećen radno-induktivno

1.14 Pojednostavljeni fazorski dijagram sa radno-induktivnim opterećenjem

Na osnovu egzaktnog fazorskog dijagrama koji smo već prikazali, sada ćemo nacrtati pojednostavljeni dijagram sinhronog generatora, kod kojeg ćemo izostaviti skicu mašine i slike magnetopobudnih sila te ćemo zanemariti radni pad napona. Reaktivne padove napona prikazaćemo zbirno, preko podužne, X_d i poprečne, X_q sinhronne reaktanse.

U ovom, pojednostavljenom slučaju, vredi sledeći izraz za ems u praznom hodu \underline{E}_0 :

$$\underline{E}_0 \cong \underline{U} + j X_q \underline{I}_q + j X_d \underline{I}_d .$$

Za crtanje dijagrama su nam potrebni sledeći podaci sa natpisne pločice: $S[\text{VA}]$, $U_n[\text{V}]$, $\cos \varphi$, te tražimo od proizvođača podatke, ili pomoću merenja određujemo procentualne vrednosti podužne, $x_d[\%]$ i poprečne $x_q[\%]$ sinhronne reaktanse.

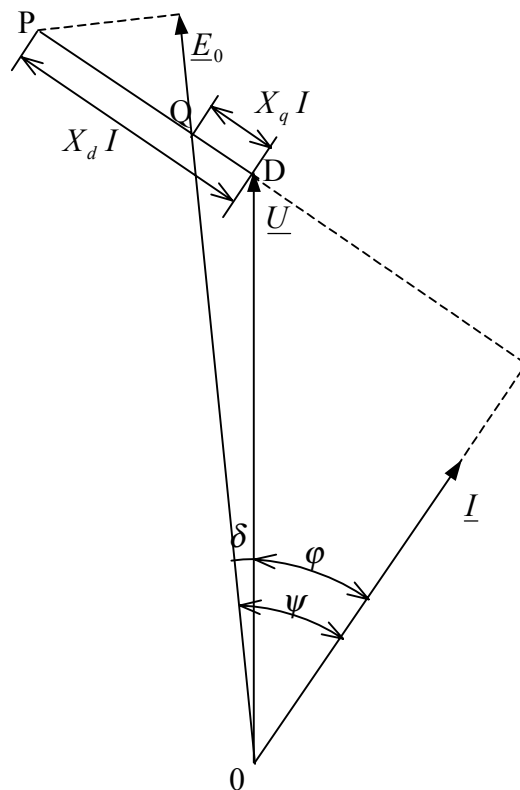
Naznačenu struju I_n izračunavamo iz izraza: $I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n}$,

gde su naznačeni napon i naznačena struja linijske veličine.

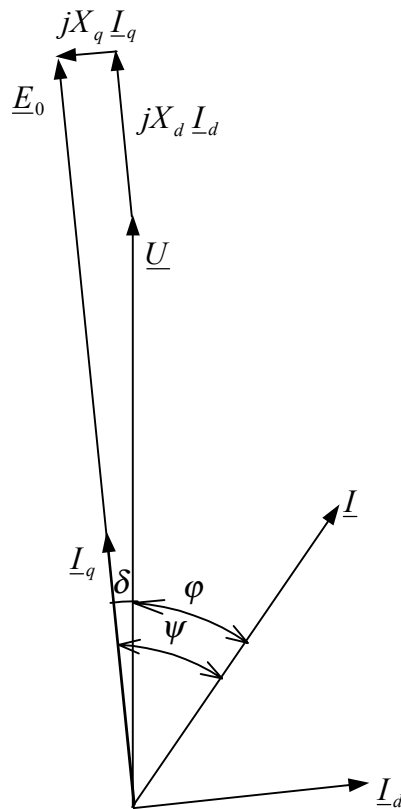
Referentnu, naznačenu reaktansu izračunavamo iz $X_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n}$, a zatim i podužnu i poprečnu sinhronu reaktansu $X_d [\Omega] = \frac{x_d [\%]}{100} \cdot X_n$ i $X_q [\Omega] = \frac{x_q [\%]}{100} \cdot X_n$.

Fazor faznog napona na priključcima mašine, \underline{U} crtamo vertikalno prema gore. Struja indukta, \underline{I} , zaostaje za za naponom ugao φ . Normalno na struju \underline{I} , iz tačke D nanosimo napone, odnosno odgovarajuće dužine $X_q I \rightarrow \overline{DQ}$, te $X_d I \rightarrow \overline{DP}$. Kroz tačku Q prolazi pravac napona $\underline{E}_0 \rightarrow \overline{0A}$, a samu tačku A odredimo tako što iz tačke P spustimo normalu na duž $\overline{0A}$. Ovim grafičkim postupkom smo odredili indukovani napon $\underline{E}_0 \rightarrow \overline{0A}$ i ugao aktivnog (radnog, vatnog) opterećenja δ (vidi sliku 1-14).

Sada možemo da razložimo struju indukta na poprečnu, \underline{I}_q i podužnu, \underline{I}_d , komponentu i nacrtamo reaktivni poprečni, $j X_q \underline{I}_q$ i podužni, $j X_d \underline{I}_d$ pad napona (vidi sliku 1-15).



Slika 1-14 Pojednostavljeni fazorski dijagram SG sa istaknutim polovima opterećen radno-induktivno



Slika 1-15 Pojednostavljeni fazorski dijagram SG sa istaknutim polovima, opterećen radno-induktivno, sa reaktivnim poprečnim i podužnim padom napona

1.15 Aktivna snaga u sinhronizmu i sinhroni obrtni moment generatora

Aktivna snaga u sinhronizmu iznosi:

$$P[\mathcal{W}] = 3UI \cos \varphi = 3UI \cos(\psi - \delta) = 3UI [\cos \delta \cdot \cos \psi + \sin \delta \cdot \sin \psi], \text{ odnosno:}$$

$$P[\mathcal{W}] = 3 [U \cos \delta \cdot I \cos \psi + U \sin \delta \cdot I \sin \psi]$$

Sa slike 1-15 je

$$U \cdot \cos \delta = E_0 - X_d I_d = E_0 - X_d I \sin \psi \Rightarrow I \sin \psi = \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d}$$

odnosno

$$U \cdot \sin \delta = X_q I_q = X_q I \cos \psi \Rightarrow I \cos \psi = \frac{U \sin \delta}{X_q}$$

Smenom izraza za $I \cos \psi$ i $I \sin \psi$ u izraz za aktivnu snagu dobijamo aktivnu snagu u sinhronizmu:

$$P[\mathcal{W}] = 3 \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + \frac{3 U^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin 2\delta .$$

Sinhroni obrtni moment je:

$$M [\text{Nm}] = \frac{60}{2\pi} \frac{P [\text{W}]}{n [\text{min}^{-1}]}$$

Vidimo, da pored aktivne snage $3 \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta$, koju određuje fazor pobude \underline{E}_0 , imamo i dodatni član $\frac{3 U^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin 2\delta$, koji je određen sa U^2 i razlikom reaktansi $(X_d - X_q)$. To je dodatna (reluktantna, reakciona) aktivna snaga.

1.16 Motorni režim rada sinhronog generatora

Motorni režim rada sinhronog generatora može da nastupi npr. ako se hidroturbini prekine dovod vode. U ovom slučaju, generator bi se i dalje obrtao u sinhronizmu i mašina bi iz mreže uzimala aktivnu snagu za savladavanje aktivnih gubitaka usled trenja i ventilacije, kao i električnih gubitaka. Aktivna snaga bi dakle bila “negativna”, to jest nju bi generator uzimao iz mreže. U analitičkom obliku aktivne snage to bi se ispoljilo preko “negativnog” ugla δ :

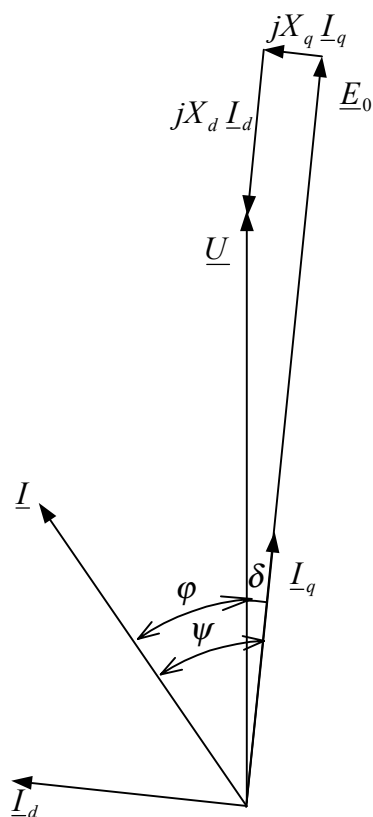
$$P [W] = 3 \frac{E_0 U}{X_d} \sin(-\delta) + \frac{3 U^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin(-2\delta).$$

Ovakve pojave su se dešavale u starijim hidroelektrana i bile su jedino indikovane skretanjem kazaljke vatmetra u levo od nule. Danas vatmetrički releji u releji u slučaju “negativne” snage isključuju prekidač.

Ovde ćemo uvesti dogovor da je u motornom režimu generatora napon na priključcima “motora” rezultatna veličina, tj. da je

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + j X_q \underline{I}_q + j X_d \underline{I}_d.$$

Ugao φ je poprimio pozitivnu vrednost, dok je ugao opterećenja δ poprimio negativnu vrednost $(-\delta)$.



Slika 1-16 Fazorski dijagram sinhronog generatora u motornom režimu rada

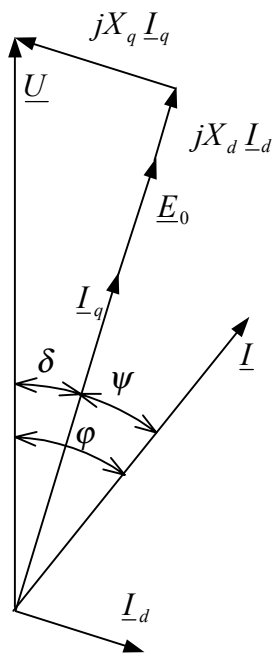
Uopšteno, gornji fazorski dijagram predstavlja režim faznog kompenzatora ili sinhronog “kondenzatora”, koji pored aktivne struje potrebne za savladavanje momenta opterećenja na osovini motora daje i kapacitivnu struju (koja prednjači naponu \underline{U}), odnosno popravlja faktor snage mreže.

1.16.1 Reluktantni režim sinhronog motora

Ako bi sada (pored zaustavljenog dotoka vode turbini) smanjivali vrednost pobudne struje mašine, tj. smanjivali fazor \underline{E}_0 , fazorski dijagram sinhronog motora bi poprimio izgled kao na slici 1-17.

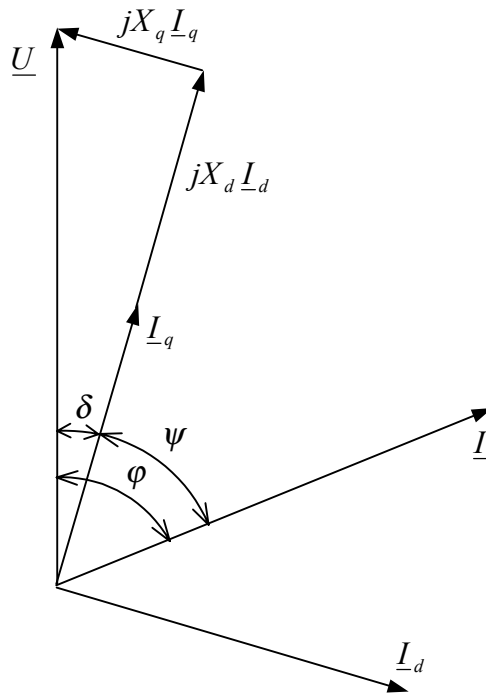
To je režim podpobuđenog sinhronog motora, kada za svoju pobudu motor vuče iz mreže reaktivnu (induktivnu) struju, pa dakle ugao φ postaje negativan, tj. ima vrednost $(-\varphi)$. Ugao δ je ostao negativan (motorni rad), ali se povećava jer uz isto opterećenje na osovini motora (istu aktivnu snagu P) smanjenjem ems E_0 , uz nepromenjen napon U povećava ugao δ .

Ovaj režim rada se u praksi izbegava, jer udarci opterećenja na osovini motora mogu udarno da povećaju ugao $(-\delta)$, da motor ispadne iz sinhronizma.



Slika 1-17 Fazorski dijagram potpobuđenog sinhronog motora

Ako potpuno isključimo pobudu ($E_0 = 0$), mašina će se i dalje obrtati u sinhronizmu (naravno ako opterećenje na vratilu nije preveliko). Naponu mreže \underline{U} ravnotežu će držati samo padovi napona na poprečnoj, $jX_q \underline{I}_q$, odnosno podužnoj, $jX_d \underline{I}_d$, sinhronoj reaktansi. Motor će za svoje magnetisanje vući veliku induktivnu struju (faktor snage je jako loš), a ugao φ je približno 70° (vidi sliku 1-18)

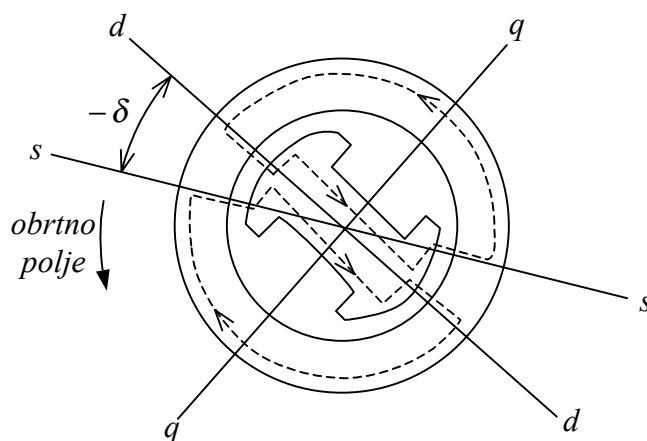


Slika 1-18 Fazorski dijagram reluktanog sinhronog motora

Moment na vratilu motora postoji samo od reluktantnog (reakcionog) člana:

$$M = \frac{1}{\omega_s} \frac{3 U^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \sin 2\delta$$

Postojanje tog momenta objašnjava sledeća fizička slika dvopolne mašine:

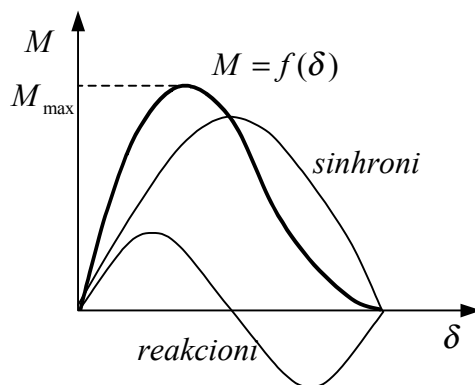


Slika 1-19 Fizička predstava stvaranja reluktantnog reakcionog momenta

Kod porasta opterećenja na osovini motora povećava se ugao $-\delta$. Magnetske linije obrtnog polja statora (os $s-s$) teže da prolaze kroz put manjeg magnetskog otpora (reluktanse), tj. kroz os $d-d$. U težnji da se skupe (kao elastične gumene niti) stvaraju reluktantni obrtni moment. Dakle, na akciju povećanja opterećenja na osovini, motor reaguje reakcijom stvaranja momenta. Zbog toga se ovaj moment naziva i reakcioni. Takođe se naziva i reluktantni, jer zbog postojanja reluktancija i odgovarajuće razlike reaktansi ($X_d - X_q$) ovaj moment deluje sinhrono.

1.16.2 Dijagram obrtnog momenta sinhronog mašine sa isturenim polovima

Iz izloženog zaključujemo da karakteristika $M = f(\delta)$ ima ovaj oblik:

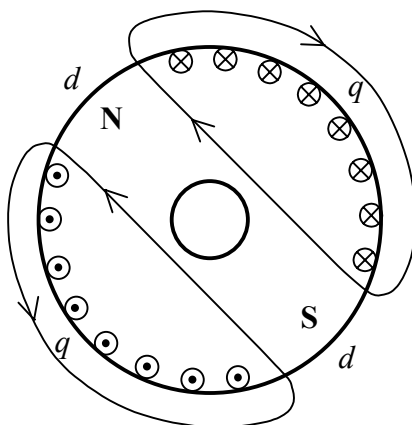


Slika 1-20 Karakteristika momenta sinhronog mašine sa isturenim polovima

Reakcioni reluktantni moment doprinosi većoj vrednosti maksimalnog momenta, ali maksimum momenta nastupa pre 90° .

1.16.3 Fazorski dijagram sinhrona mašine sa cilindričnim rotorom

Cilindrični (turbo) rotor, kao što je već rečeno, iz mehaničkih razloga se primenjuje se kod sinhronih generatora gonjenih parnim turbinama na velikim brzinama. U ovom slučaju nema izrazite vazdušne šupljine u poprečnoj $q-q$ osi. Tu se nalaze bakarni provodnici pobudnog namotaja, koji nisu magnetični, pa zato ipak dolazi do izvesne razlike u reluktansi u odnosu na podužnu, $d-d$ os. Npr. za dvopolni generator relativne vrednosti sinhronih reaktansi su $x_d=180$ [%], $x_q=170$ [%]. U većini primena, tu razliku $\Delta=(180-170)/180=5,6$ [%] možemo da zanemarimo, pa često uzimamo da je $x_d \cong x_q$.



Slika 1-21 Magnetsko polje turbo rotora

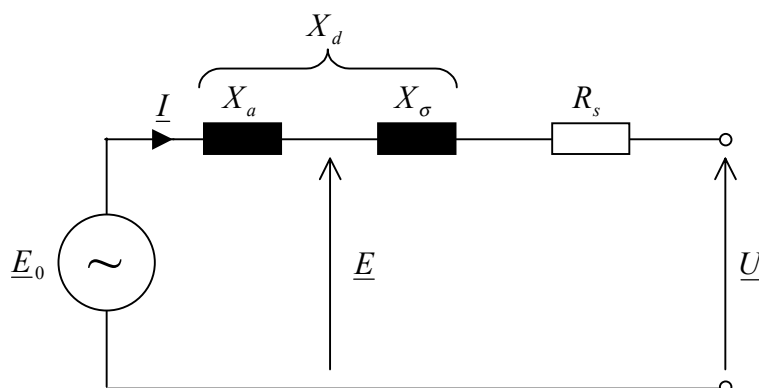
Zbog približne jednakosti podužne i poprečne sinhronne reaktanse, približni izraz za moment je:

$$M \cong \frac{1}{\omega_s} \frac{3E_0 U}{X_d} \sin \delta .$$

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



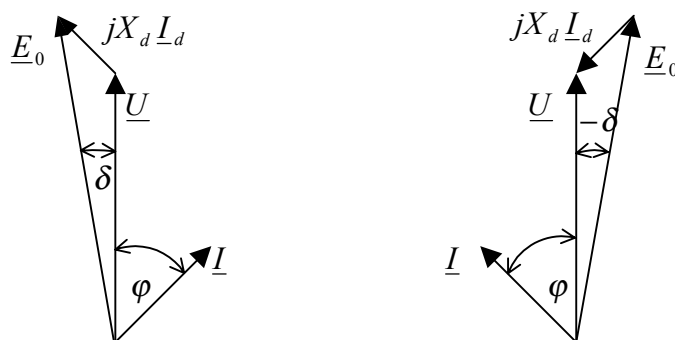
Slika 1-22 Ekvivalentna šema sinhronog turbo generatora

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 (fazni kompenzator).

Ako zanemarimo radni pad napona, pojednostavljeni fazorski dijagrami za sinhroni generator i sinhroni kompenzator su:



Slika 1-23 a) fazorski dijagram za turbo SG b) fazorski dijagram za turbo SM

Važna napomena: Kada govorimo o aktivnoj snazi generatora, onda mislimo na aktivnu električnu snagu na priključcima generatora $P[\text{W}] = S[\text{VA}] \cos \varphi = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi$, dok se kod motora misli na mehaničku snagu na vratilu motora.

1.17 Rad sinhronih generatora na sopstvenu i opštu i mrežu

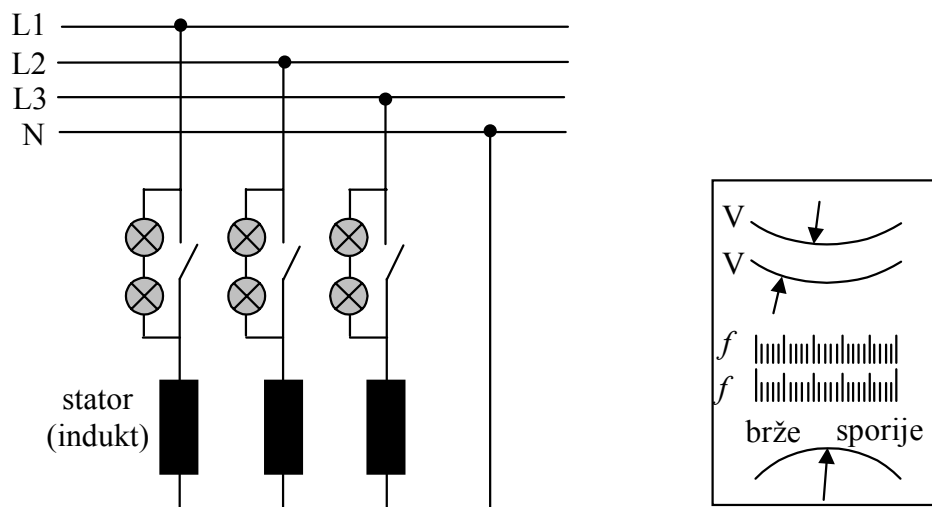
Sinhroni generator može da radi u različitim pogonskim prilikama, pri čemu su krajnja stanja rad na *sopstvenu* i *opštu mrežu*.

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.

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*. 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*.

Stalan (čvrst) napon mreže na koji je generator priključen određuje magnetski fluks u međugvožđu, koji se pod raznim opterećenjima menja samo u vrlo uskim granicama (samo zbog otpora i rasipanja namotaja indukta), nezavisno od promene pobudne struje. Drugim rečima, u mašini deluju dve međusobno nezavisne magnetopobudne sile (uz zanemarenje otpora i rasipanja namotaja indukta): ukupna (rezultirajuća) magnetopobudna sila u međugvožđu i magnetopobudna sila pobude. Ukupna magnetopobudna sila mora da stvori u međugvožđu takav magnetski fluks da se u namotajima indukta indukuje napon koji je u ravnoteži sa naponom na priključcima mašine. Magnetopobudna sila pobude može se nezavisno menjati po vrednosti i položaju u odnosu na ukupnu magnetopobudnu silu u međugvožđu.



Slika 1-24 a) Sinhonzacione sijalice, b) Sinhronoskop

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

Kod sinhronizacije pomoću sinhronizacionih sijalica redosled faza se ispituje pre spajanja provodnika na prekidač. U toku postupka istovremeno se deluje na brzinu turbine i na struju pobude generatora. Kada su učestanosti mreže i generatora vrlo bliske, sijalice se vrlo sporo pale i gase. Prekidač se brzo uključuje kada su sijalice ugašene (tamni spoj).

Postoji i poseban uređaj za sinhronizaciju, sinhronoskop. On se sastoji od dvostrukog voltmetra i frekvencmetra (jedan za mrežu, a drugi za generator), te indikatorom, *Brže-*

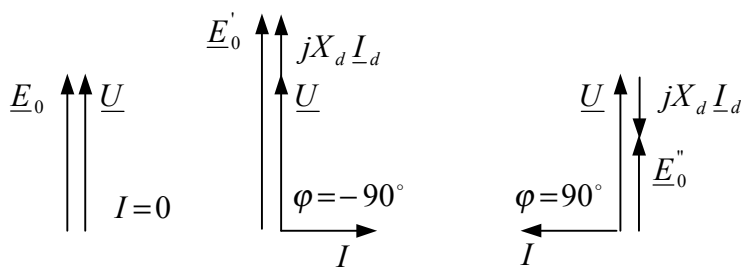
Sporije (koji radi na principu asinhronog motora) za regulisanje učestanosti generatora kojeg treba sinhronizovati.

1.18 Upravljanje proizvodnjom reaktivne snage Q

Analizu upravljanja proizvodnje reaktivne snage, radi jednostavnosti, sprovedćemo za slučaj turbogeneratora ($X_d \cong X_q$). Posmatraćemo čisto reaktivno opterećenje, koje je karakterisano sa: $\delta=0$, $P[W]=0$, $Q[VAR]=\sqrt{3}U_n I$, $\varphi=\pm 90^\circ$, gde se predznak "+" odnosi na potpuno kapacitivnu snagu, a "-" na potpuno induktivnu snagu.

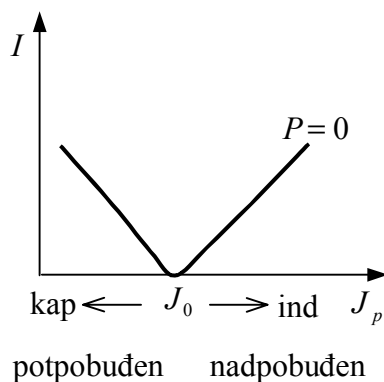
1.18.1 Mordejeva kriva

Neka za početno stanje imamo neopterećen, sinhronizovan generator. Ako povećamo pobudnu struju, fazor \underline{E}_0 će porasti na vrednost \underline{E}'_0 . Tada se usled razlike napona, \underline{E}'_0 i \underline{U} , u kolu indukta javlja induktivna struja, odnosno pad napona $jX_d \underline{I}$. Ako smanjimo pobudnu struju, u odnosu na početno stanje, smanjiće se fazor \underline{E}_0 na vrednost \underline{E}''_0 . Usled ove razlike, u kolu indukta će se sada javiti kapacitivna struja. Ovaj režim (podpobuđenog sinhronog generatora) nije poželjan jer je magnećenje slabo i udarci opterećenja mogu da izbace generator iz sinhronizma.



Slika 1-25 Upravljanje reaktivnom snagom

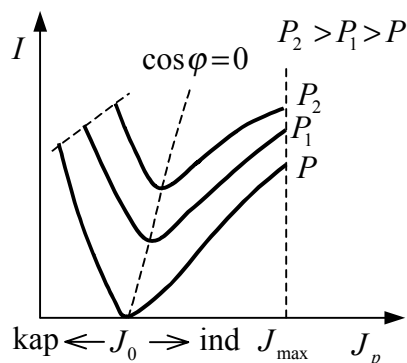
Iz fazorskih dijagrama prikazanih slikom 1-25 zaključujemo da će kriva zavisnosti naizmenične struje indukta, I , od jednosmerne struje pobude, J_p , imati sledeći oblik:



Slika 1-26 V (Mordejeva) kriva generatora uz $P = 0$

Ovu krivu nazivamo *V krivom*, ili *Mordejevom (Mordey) krivom*. Vrednost pobudne struje J_0 je određena u ogledu praznog hoda.

Ako povećanjem količine pogonskog sredstva pogonskoj mašini (vode vodnoj (hidro) turbini, pare (gasa) parnoj turbini odnosno gasa ekspanzionom motoru) povećamo aktivnu snagu, onda dobijamo familiju *V* kriva (vidi sliku 1-27).



Slika 1-27 *V* krive generatora za nekoliko aktivnih snaga

Za svako opterećenje pobudna struja ima minimalnu vrednost koja prethodi ispadanju iz sinhronizma, a takođe i maksimalnu vrednost, J_{\max} , koja je vezana za ograničenje termičke prirode.

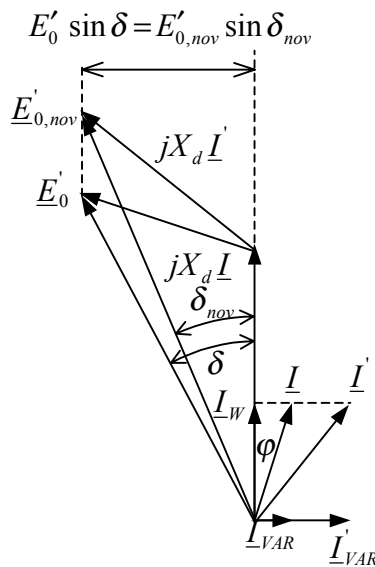
1.18.2 Upravljanje normalnom režimu rada nadpobuđenog generatora (opterećenog radno-induktivno)

Ako se želi povećati proizvodnja reaktivne snage sa Q na Q' , onda se povećava pobudna struja. Time se fazor \underline{E}'_0 poveća na vrednost $\underline{E}'_{0, nov}$. Pošto nismo dirali dovod, aktivna snaga je ostala ista, pa imamo:

$$P[W] = 3 \frac{E'_0 U}{X_d} \sin \delta = 3 \frac{E'_{0, nov} U}{X_d} \sin \delta_{nov} \Rightarrow E'_0 \sin \delta = E'_{0, nov} \sin \delta_{nov}$$

Povećanjem vrednosti fazora \underline{E}'_0 na $\underline{E}'_{0, nov}$ mora se smanjiti vrednost ugla sa δ na δ_{nov} . Vrednost ugla φ se povećava na φ' , tj. povećava se vrednost induktivne komponente struje indukta I_{VAR} . Vrednost aktivne (vatne) komponente struje indukta, I_w ostaje ista, jer nismo povećali količinu pare u dovodu turbini, bez čega se ne može povećati aktivna snaga (slika 1-28).

U novom radnom stanju, zbog veće pobudne struje, odnosno zbog manjeg ugla δ_{nov} rad generatora je stabilniji.



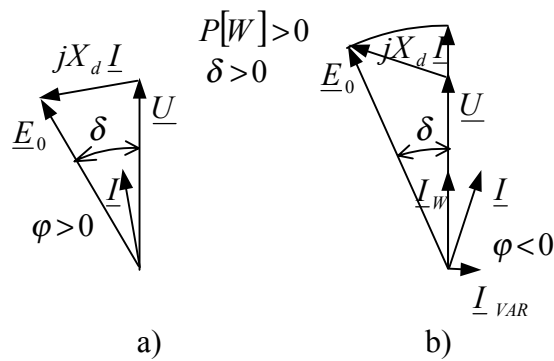
Slika 1-28 Upravljanje proizvodnjom reaktivne snage Q nadpobuđenog generatora opterećenog radno-induktivno

1.19 Upravljanje proizvodnjom aktivne snage P

Aktivnu snagu P sinhronizovanog generatora možemo da dobijemo samo dovodom pogonskog sredstva, npr. dovodom pare parnoj turbini. Uz zanemarenje gubitaka, iz izraza:

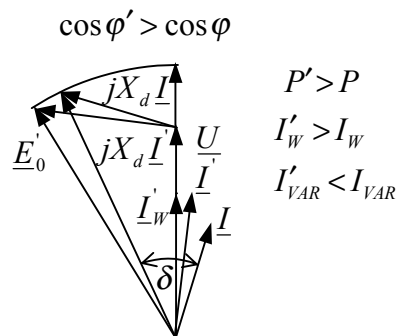
$$P = \frac{3 E_0 U}{X_d} \sin \delta,$$

sledi da se usled povećanja snage P , uz nepromenjenje vrednosti veličina E_0 i U , povećava ugao δ . Fazor razlike, $\underline{E}_0 - \underline{U}$, uzrokuje struju indukta, \underline{I} , koja ima radnu i kapacitivnu komponentu (slika 1-29, a). Ovaj režim bi bio potpobuđen, što se zbog nestabilnosti izbegava. Zato se generator prvo mora natpobuditi sa \underline{E}_0 na \underline{E}_0' , a potom se povećanjem količine pare turbini fazor \underline{E}_0' pomeri za ugao δ . Tako smo došli do normalnog stanja rada generatora. Struja indukta \underline{I} sada ima radnu i induktivnu komponentu (slika 1-29, b).



Slika 1-29 Upravljanje proizvodnjom aktivne snage P

Upravljanje proizvodnjom aktivne snage P u normalnom režimu rada natpobuđenog generatora (opterećenog radno-induktivno):



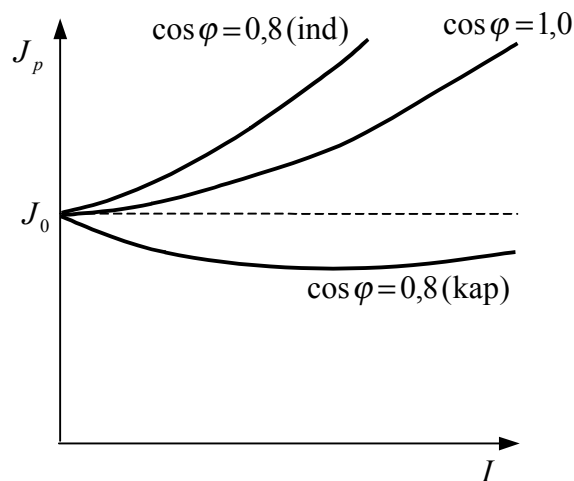
Slika 1-30 Upravljanje aktivnom snagom P u normalnom režimu rada natpobuđenog generatora

1.20 Karakteristike regulacije

Karakteristike regulacije prikazuju zavisnost pobudne struje od struje indukta, pri raznim faktorima snage, tj.

$$J_p = f(I, \cos \varphi), \text{ uz } U = \text{const i } n = \text{const}.$$

Ova karakteristika je značajna za automatsku regulaciju konstantnosti napona sinhronog generatora. Iz prethodnog razmatranja smo videli da potpuno induktivno opterećenje, $\cos \varphi = 0$ (ind), jako smanjuje napon sinhronog generatora, jer reakcija indukta deluje u osi polova suprotno od fluksa pobude. Dakle, da bi zadržali zadani naznačeni napon, moramo jako povećati pobudnu struju.



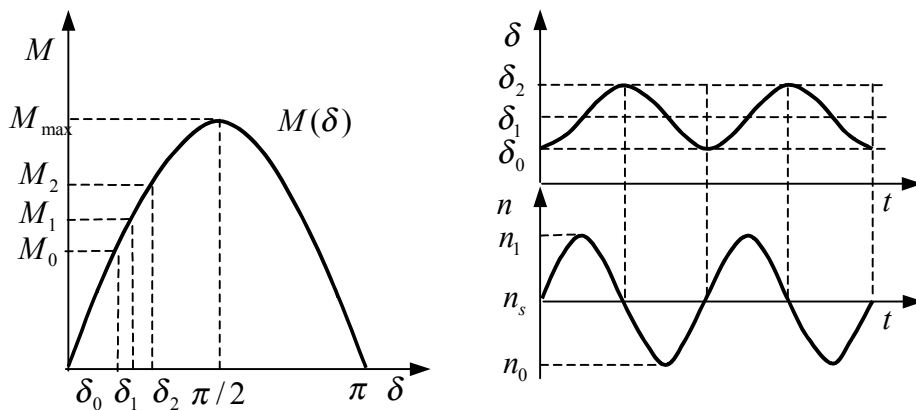
Slika 1-31 Karakteristike regulacije

Za upravljanje strujom pobude, potrebno je u uređaj za automatsku regulaciju dovesti informaciju o veličini struje indukta, I , i faktoru snage, odnosno uglu φ .

1.21 Elektromehaničke oscilacije sinhronne mašine

Sinhrona mašina priključena na mrežu ima osobine oscilujućeg sistema. Kod parnih i vodnih turbina, koje su danas najčešće u upotrebi, obrtni moment je stalan te se kod njih javljaju samo slobodna ili sopstvena njihanja, dok se kod primene dizel generatora i motora koji pogone klipne kompresore, koji rade u impulsima, javljaju i prisilne oscilacije.

Prema slici 1-32 mašina pri ustaljenom stanju daje moment M_0 i radi sa uglom opterećenja δ_0 . Neka u određenom momentu dođe do poremećaja, tj. nastane promena momenta pogonske mašine na vrednost M_1 . Rotor zbog inercije (tromosti) ne može trenutno da promeni ugao opterećenja od δ_0 na δ_1 , nego iz početka ostaje na uglu δ_0 . Zbog toga nastaje višak momenta ($M_1 - M_0$) koji ubrzava rotor. Usled tog ubrzanja rotor postepeno distigne ugao δ_1 , no njegova brzina obrtanja je tada veća od sinhronne. Zbog tako povećane brzine rotor zauzima uglove veće od δ_1 . U tom području je moment generatora veći od momenta pogonske mašine, pa taj višak koči rotor. Usled tog kočenja rotor pri uglu δ_2 opet poprima sinhronu brzinu. Ali tada postoji višak momenta ($M_2 - M_1$) koji i dalje usporava rotor, pa njegova brzina postaje manja od sinhronne. Ugao opterećenja se smanjuje, tako da rotor u jednom trenutku opet zauzima ugao δ_1 , no tada je brzina manja od sinhronne, pa se kretanje nastavlja do ugla δ_0 . Na taj se način rotor njiše oko novog ustaljenog stanja (δ_1, M_1).



Slika 1-32 Fizička predstava elektromehaničkog oscilovanja

Ovakva njihanja se nazivaju elektromehaničkim oscilacijama sinhronne mašine. Ona mogu relativno lako da se izračunaju kada su amplitude male, te se kriva $M(\delta)$ može linearizovati oko neke radne tačke (δ_0, M_0) :

$$\Delta M = \left(\frac{dM}{d\delta} \right)_{\delta_0} \cdot \Delta\delta = k_{sm} \cdot \Delta\delta,$$

gde je $k_{sm} = \left(\frac{dM}{d\delta} \right)_{\delta_0}$ sinhronizacioni sačinilac (koeficijent) sinhronizacionog momenta sinhronne mašine, tj. sinhronizacioni moment po jedinici ugla.

Da bi generator mogao da radi, a da ne ispadne iz sinhronizma sa mrežom, mora da ima dovoljnu sinhronizacionu snagu, tj. sposobnost da nastavlja rad sinhrono sa mrežom, čak i pri značajnijim promenama momenta opterećenja, M_t , a time i ugla opterećenja δ . Dogovorom ćemo sačinioem sinhronizacione snage, k_{sp} , nazivati izvod aktivne snage u sinhronizmu, P , po uglu δ :

$$k_{sp} = \frac{dP}{d\delta} = \omega_s \frac{dM}{d\delta} = \frac{3E_0 U}{X_d} \cos\delta + 3U^2 \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos 2\delta.$$

Dakle, koeficijent sinhronizacione snage je maksimalan pri $\delta=0$, dok je minimalan pri $\delta=90^\circ$. Praktično već mnogo ranije od $\delta=90^\circ$ generator počinje da radi nestabilno, a u njemu se javljaju oscilovanja.

Pri elektromehaničkim oscilacijama rotora sinhronne mašine u prigušnom namotaju se indukuju naponi, pa u njemu teku struje koje stvaraju moment koji se protivi njihanju. Taj moment se naziva *prigušnim momentom*. Pri malim odstupanjima od sinhronne brzine prigušni moment je proporcionalan sa klizanjem:

$$M_{pr} = k_p s = k_p \frac{d(\Delta\delta)}{dt},$$

gde je k_p koeficijent prigušnog momenta.

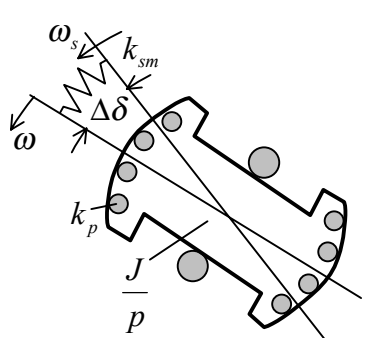
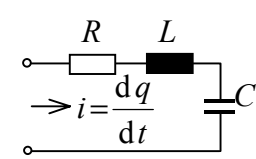
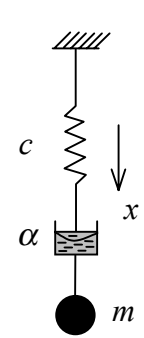
Kada na vratilo ne deluje nikakav spoljni naizmenični moment, ono će pri bilo kakvim promenama slobodno zaoscilovati prema jednačini:

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} + k_p \frac{d(\Delta\delta)}{dt} + k_{sm} \Delta\delta = 0,$$

gde je J moment inercije rotora, p broj pari polova i $\Delta\delta$ porast ugla opterećenja.

Na osnovu prethodne jednačine može se postaviti analogija elektromehaničkog oscilatornog sistema s električkim i mehaničkim oscilatornim sistemima. Analogne veličine su prikazane u narednoj tabeli.

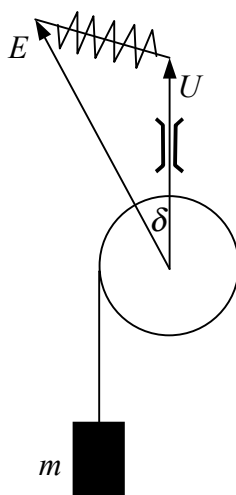
Tabela 1-2 Analogija elektromehaničkih, električnih i mehaničkih oscilatornih sistema

Oscilatorni sistem	Elektromehanički	Električni	Mehanički
			
Analogne veličine	priraštaj ugla opterećenja $\Delta\delta$ moment inercije po paru polova J/p sačinilac prigušenja k_p sinhronizacioni sačinilac k_{sm}	naelektrisanje q induktivnost L otpor R 1/kapacitet $1/C$	pomeraj x masa m sač. prigušenja α konstanta opruge c
sopstvena učestanost (bez prigušenja)	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{sm} p}{J}}$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$

U režimu generatora os polja rotora napreduje u odnosu na os obrtnog polja statora za ugao $\Delta\delta$, dok u režimu motora kasni za isti ugao.

1.21.1 Ekvivalentna mehanička slika sinhronne mašine

U ekvivalentnoj mehaničkoj slici sinhronne mašine naponi U i E su prikazani odgovarajućim polugama, a pad napona na sinhronoj reaktansi oprugom (vidi sliku 1-33). Poluga U predstavlja čvrstu (krutu) mrežu, dok E , zajedno sa rotorom, može da osciluje. Teg predstavlja obodnu silu, koju stvara pogonska mašina.



Slika 1-33 Ekvivalentna mehanička slika

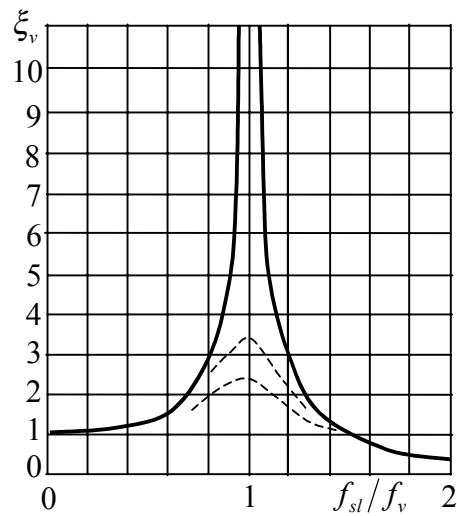
Kada na vratilo deluje naizmenični moment, dolazi do trajnog prisilnog oscilovanja s frekvencijom naizmeničnog momenta. Ako se frekvencija nametnutog momenta približi sopstvenoj frekvenciji elektromehaničkog sistema, može da nastupi nedopustivo veliko oscilovanje ugla opterećenja, mašina ispada iz koraka i pogon je onemogućen.

Odnos između amplitude prinudnih njihanja ν -tog harmonika i amplitude sopstvenih njihanja naziva se modul rezonancije i iznosi:

$$\xi_{\nu} = \frac{1}{1 + (f_{sl}/f_{\nu})^2},$$

gde je f_{sl} učestanost slobodnih oscilacija, a $f_{\nu} = \nu f_1$ učestanost ν -tog harmonika.

Na slici 1-34 prikazana je kriva $\xi_{\nu} = f(f_{sl}/f_{\nu})$. Kada je učestanost slobodnih oscilacija $f_{sl} = 0$, onda je $\xi = 1$. Kada je učestanost slobodnih njihanja jednaka učestanosti prinudnih njihanja onda je $\xi_{\nu} = \infty$, čime je rad mašine nemoguć. Područje u kojem se smatra da je rad mašine nemoguć je $0,8 < f_{sl}/f_{\nu} < 1,2$. Kada postoji prigušni namotaj, onda je njegov uticaj takav da smanjuje modul rezonancije, što je na slici prikazano isprekidanim linijama za razne vrednosti stepena prigušenja.



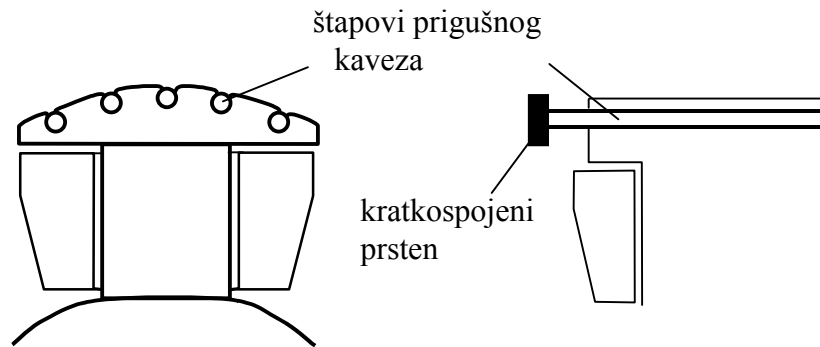
Slika 1-34 Kriva ξ_v

1.21.2 Prigušni namotaj

U svrhu prigušenja oscilacija rotora ugrađuju se u polne nastavke (iz lameliranih limova) bakreni štapovi, koji se sa strane spajaju sa dva kratkospojena prstena, slično kavezu kod asinhronih kavezniha mašina. Pri oscilovanju rotora, obrtno polje statora preseca štapove kaveza, te indukuje u njima napone, koji proteraju takve struje koje svojim obrtnim poljem stvaraju moment koji se protivi relativnom kretanju, pa ga prema tome prigušuju. Kod generatora sa masivnim polovima postiže se prigušni efekt usled vrtložnih struja, koje se zbog oscilacija stvaraju u masivnim polovima, koje, opet po Lencovom pravilu, nastoje da priguše oscilacije.

Prigušni namotaj (ili kavez) ima sledeće uloge:

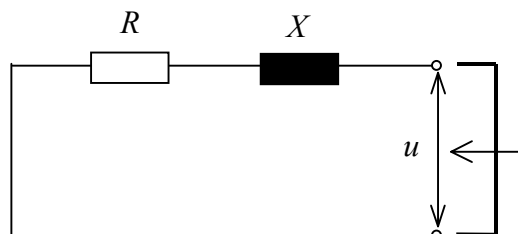
- Prigušuje elektromehaničke oscilacije;
- Prigušuje inverzne komponente polja koje nastaju pri nesimetričnim opterećenjima i koje mogu da izazovu neželjene gubitke i prenapone. Prigušenje inverznog polja je posebno značajno kod jednofaznih sinhronih generatora;
- Omogućuje asinhrono zaletanje sinhronih motora i kompenzatora. Kada je zalet završen, uključuje se pobudna struja polova i motor se sam sinhronizuje.



Slika 1-35 Prigušni namotaj

1.22 Fizičko objašnjenje struje kratkog spoja

Za fizičko objašnjenje struja kratkog spoja veoma je važan zakon o održanju (nepromenljivosti) fluksa. Pogledajmo sledeće jednostavno RL kolo u kojem je otpornost zanemariva u odnosu na reaktansu $X = \omega L$, što u osnovi odgovara namotaju statora sinhronne mašine:



Slika 1-36 Kratko spajanje RL kola

Jednačina naponske ravnoteže za ovo kolo je:

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt},$$

U kratkom spoju napon u na priključcima je jednak nuli, a uz pretpostavku da je otpornost R , takođe jednaka nuli, jednačina prelazi u sledeći oblik:

$$0 \cong \frac{d\psi}{dt},$$

što je ispunjeno uz uslov da je magnetski fluks konstantan ($\psi = \text{const.}$). Primenjeno na sinhronu mašinu, ni magnetski fluks koji obuhvata namotaj statora, odnosno namotaje

rotora ne može da se promeni. Da bi se održala konstantna vrednost fluksa, mora se u namotajima statora i rotora pojaviti odgovarajuća struja koja će ovaj fluks podržavati.

Poseban, a ujedno i najpovoljniji, slučaj jeste situacija u kojoj je magnetski fluks u namotaju statora u momentu nastanka kratkog spoja bio jednak nuli, odnosno da je ugao između položaja osa namotaja rotora u odnosu na osu namotaja referentne faze statora - recimo faze a , $\theta = 90^\circ$. Prema eksperimentalno snimljenoj struji kratkog spoja faze a , ili prema izvedenoj analitičkoj jednačini, u ovom posebnom slučaju, ne postoji jednosmerna komponenta struje, jer i fizički gledano, njeno prisustvo nije potrebno, jer u statorskom namotaju nije ni bilo magnetskog fluksa koja bi ona održavala. U ovom slučaju struja kratkog spoja sadrži, dakle, jedino naizmenične, prigušene, komponente i simetrična je u odnosu na osu a -ose. U opštem slučaju, postoji magnetski fluks koji obuhvata namotaj statora, tako da se u eksperimentalno snimljenoj struji kratkog spoja namotaja statora, odnosno u odgovarajućem analitičkom izrazu za struju, javlja i jednosmerna komponenta, koja podržava ovaj "zatečeni" magnetski fluks. Ova jednosmerna komponenta struje statora proizvodi u međugvožđu komponentu polja koja je nepokretna u prostoru, ali koja u namotajima rotora, koji se obrće sinhronom brzinom, indukuje naizmeničnu *ems* odnosnu struju (kola rotora su zatvorena) statorske učestanosti. Stoga se na jednosmernu komponentu struje rotora, koju smo imali pri simetričnom kratkom spoju, dodaje i ova naizmenična komponenta. Fizički gledano ovo je prirodno, jer ne možemo očekivati trenutnu, već postupnu, porast struje.

Najnepovoljniji slučaj jeste kada se kratki spoj desi u trenutku kada je magnetski fluks u kolu najveći, jer je stoga i najveća vrednost jednosmerne komponente struje kratkog spoja, odnosno sledstveno tome i najveća udarna struja kratkog spoja (prvi maksimum struje kratkog spoja).

Posmatrajmo sinhroni generator u stacionarnom stanju koji se obrće sinhronom brzinom. Pobudni namotaj je priključen na stalni pobudni napon. Na rotoru postoji amortizacioni (prigušni) namotaj koji, u trenutku kratkog spoja obrazuje pored pobudnog namotaja još jedan namotaj po uzdužnoj (d -osi).

Neka se na krajevima statorskog namotaja desi kratak spoj. Kada se analizira kriva struje kratkog spoja uočavaju se tri perioda:

- subtranzitni (početni, udarni) period, koji traje samo nekoliko perioda i u toku kojeg struja vrlo brzo opada (reaktance X_d'' i X_q'' , vremenska konstanta T_d''),
- tranzitni (prelazni) period, koji traje relativno duže i u toku kojeg je opadanje struje umerenije (reaktance X_d' i X_q' , vremenska konstanta T_d') i
- ustaljeni period u toku kojeg struja ima ustaljenu vrednost (reaktance X_d i X_q , vremenska konstanta T_d).

Ako se kratak spoj desi u trenutku kada postoji fluks kroz namotaj posmatrane faze, tada se u namotaju kola te faze mora pojaviti i komponenta jednosmerne struje da bi održala fluks na vrednosti pre kratkog spoja. Ona bi ostala stalna da nema omskog otpora te faze. Pošto ipak postoji omski otpor ona će se smanjivati sa vremenskom konstantom koja zavisi od odnosa ekvivalentne induktivnosti i omskog otpora namotaja te faze. Najveća vrednost jednosmerne komponente struje biće kada se kratak spoj desi u trenutku kada je kroz to električno kolo fluks najveći.

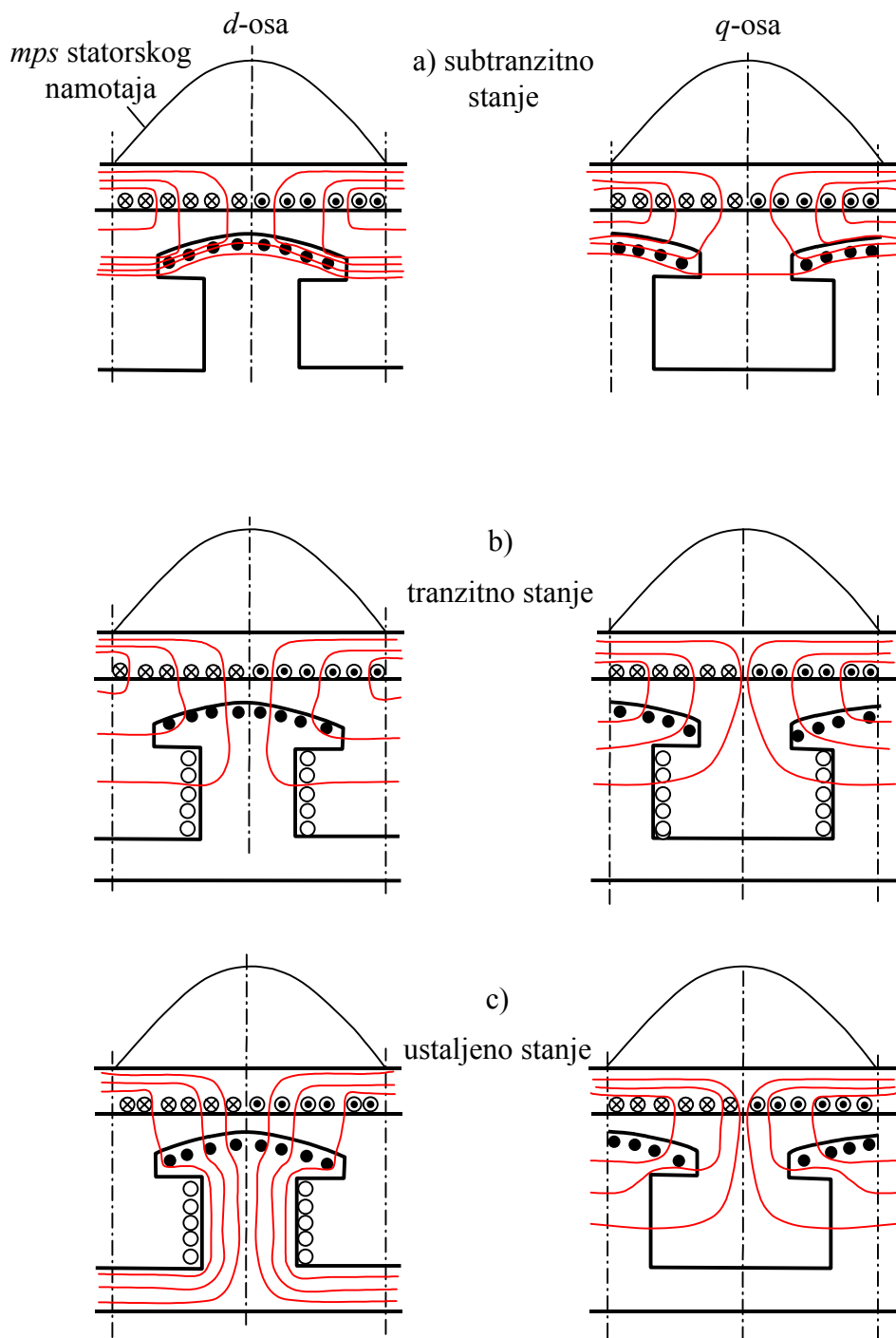
U namotajima rotora (namotaju pobude i prigušnom namotaju) moraju se pojaviti odgovarajuće struje, koje trebaju da podrže magnetski fluks, koji je pre kratkog spoja postojao u namotajima rotora, usprkos demagnetišućem delovanju struja kratkog spoja statora. Magnetski fluks pre kratkog spoja u pobudnom namotaju je određen induktivnošću i strujom pobude, dok je u prigušnom namotaju određen međusobnom induktivnošću između pobudnog i prigušnog namotaja i pobudnom strujom. Struje u prigušnom i pobudnom namotaju u trenutku kratkog spoja naglo porastu, jer one prema teoremi o zaleđenom fluksu treba da održe konstantan fluks kroz namotaje uprkos demagnetišućem dejstvu struja statora. Kao što je već pomenuto, na jednosmeru komponentu struje prigušnog i pobudnog namotaja se superponira naizmenična komponentna usled jednosmerne komponente struje kratkog spoja statora. Struje prigušnog i pobudnog namotaja opadaju po eksponencijalnom zakonu. Vremenska konstanta ovih kola je konstantna i određena odnosom odgovarajućih induktivnosti i otpornosti. Pošto je ovaj odnos kod prigušnog kola veći nego kod pobudnog kola, opadanje subtranzitne struje je mnogo brže nego tranzitne. Odgovarajuće komponente struje namotaja statora opadaju istom brzinom.

U novom ustaljenom (stacionarnom) stanju struje u pobudnom i prigušnom namotaju imaju upravo onu vrednost koju su imale i pre kratkog spoja. Struja u prigušnom namotaju je u stacionarnom stanju jednaka nuli.

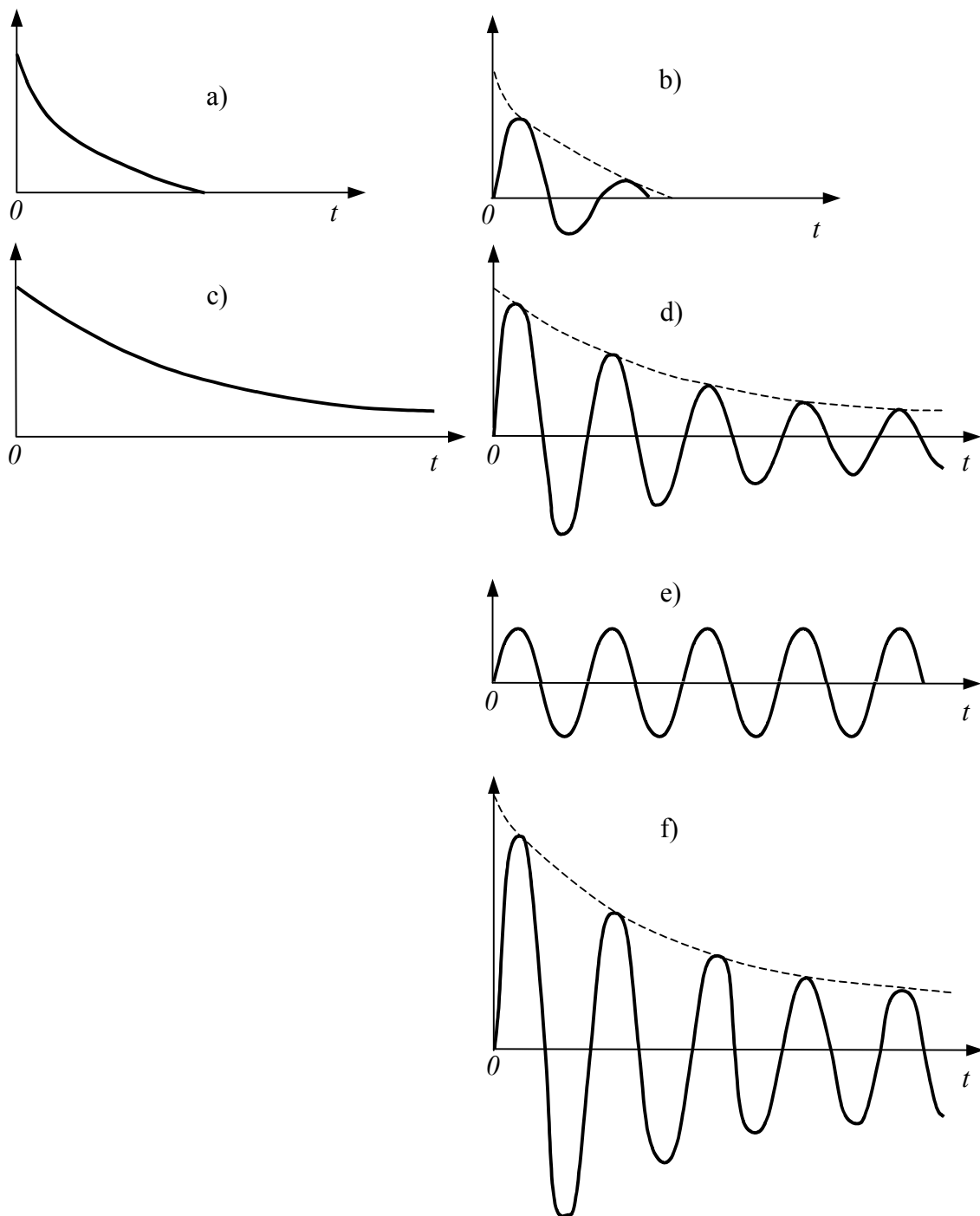
Momenat konverzije u trenutku kratkog spoja naglo poraste da bi pokrio povećanje potrošnje energije. On mnogo brže opada nego struje u fazama statora. Nakon završetka prelaznog procesa moment konverzije je nula.

Analitički izraz za struju trolnog kratkog spoja sinhronog generatora je:

$$i_a(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} U_n \left\{ \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} - \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \cos(\omega_s t - \theta) - \right. \\ \left. - 0,5 e^{-\frac{t}{T_a}} \left[\left(\frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right) \cos \theta + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) \cos(2\omega_s t - \theta) \right] \right\}$$

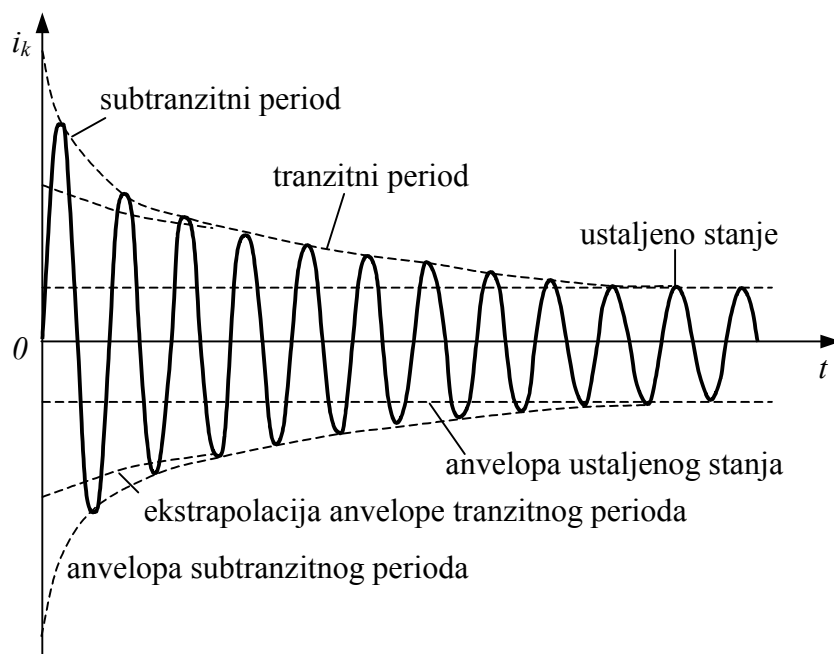


Slika 1-37 Magnetski fluks u a) subtranzitnom b) tranzitnom c) ustaljenom stanju

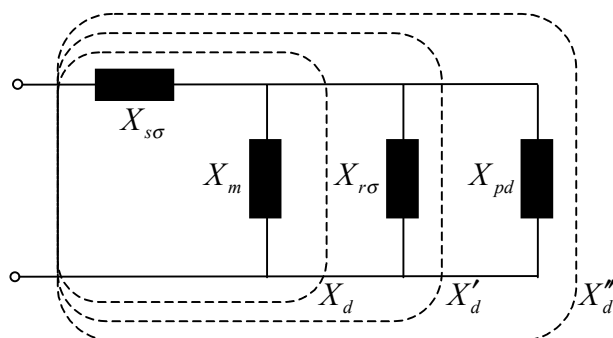


Slika 1-38 Krive struja kratkog spoja

- a) struja u prigušnom namotaju
- b) komponenta te struje u namotaju statora
- c) struja u pobudnom namotaju
- d) komponenta te struje u namotaju statora
- e) trajna struja kratkog spoja u namotaju statora
- f) resultantna struja kratkog spoja u namotaju statora



Slika 1-39 Simetrična struja kratkog spoja



Slika 1-40 Ekvivalentno kolo sinhronne mašine za analizu trofaznog kratkog spoja

Legenda: $X_{s\sigma}$ - rasipna reaktansa statorskog namotaja,

$X_{r\sigma}$ - rasipna reaktansa rotorskog namotaja,

X_m - reaktansa međuinduktivne veze statorskog i rotorskog namotaja,

X_{pd} - reaktansa prigušnog namotaja u uzdužnoj osi

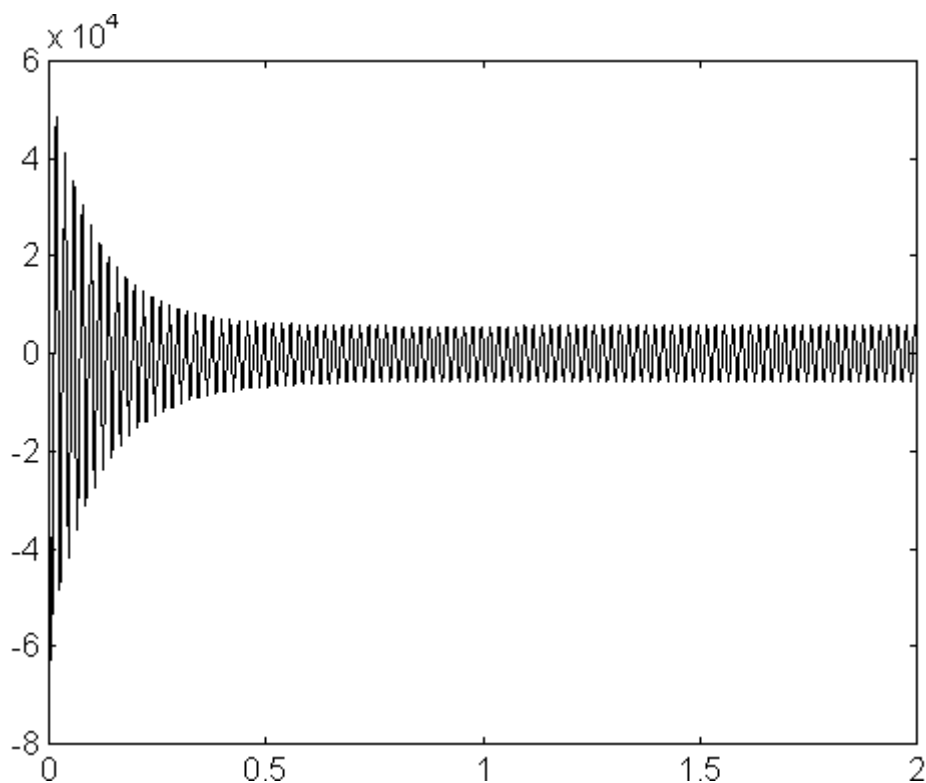
Pojave prilikom pojave kratkog spoja ilustrovaćemo na primeru sledećeg sinhronog generatora:

KAKANJ

$S_n = 137,5 \text{ MVA}$	$x_d = 200\%$	$x_q = 190\%$	$x_0 = 9,2\%$
$U_n = 13,8 \text{ kV}$	$x'_d = 21\%$		
	$x''_d = 15,2\%$	$x''_q = 21\%$	$x_2 = 15,2\%$
$2p = 2$	$T'_{d0} = 0,98 \text{ s}$	$T_a = 0,25 \text{ s}$	
$f = 50 \text{ Hz}$	$T''_{d0} = 0,04 \text{ s}$	sprega Y	

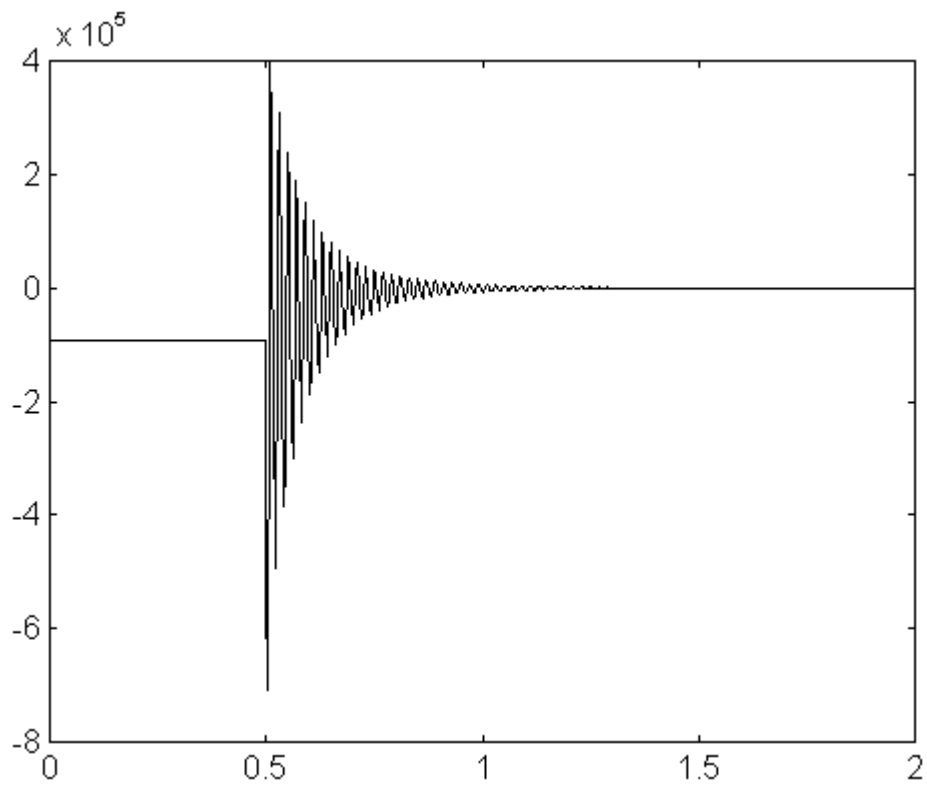
Prethodno stacionarno stanje:

$$I = 0,8 I_n ; U = U_n ; \cos \varphi = 0,8 .$$

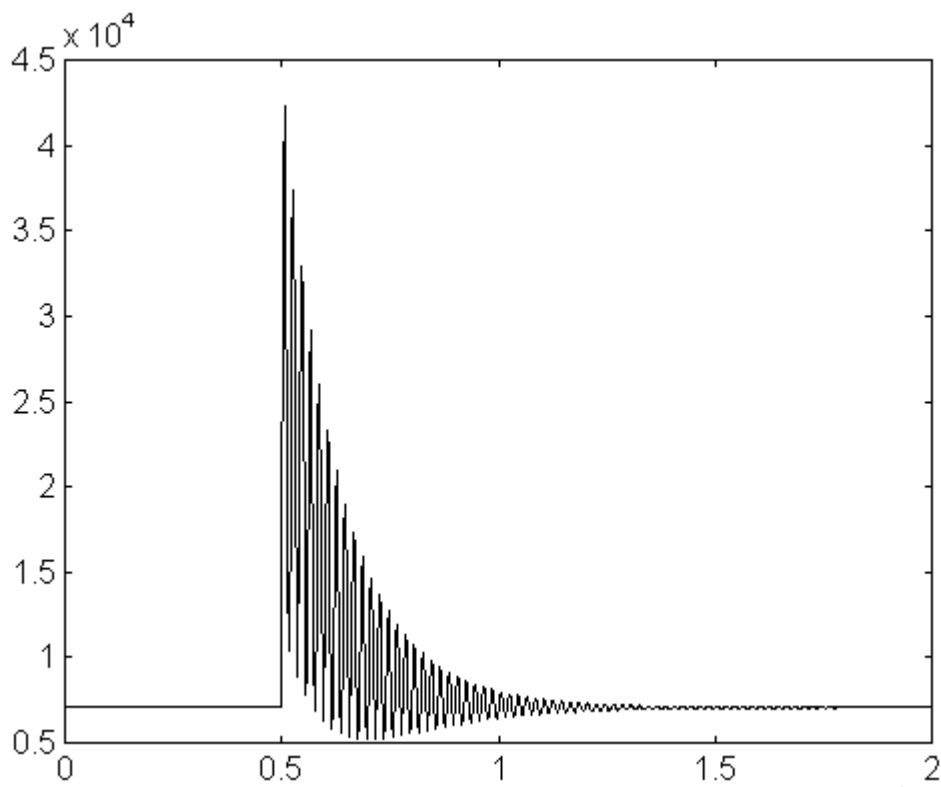


Slika 1-41 Struja faze a sinhronog generatora u trofaznom kratkom spoju dobijena na osnovu analitičkog izraza

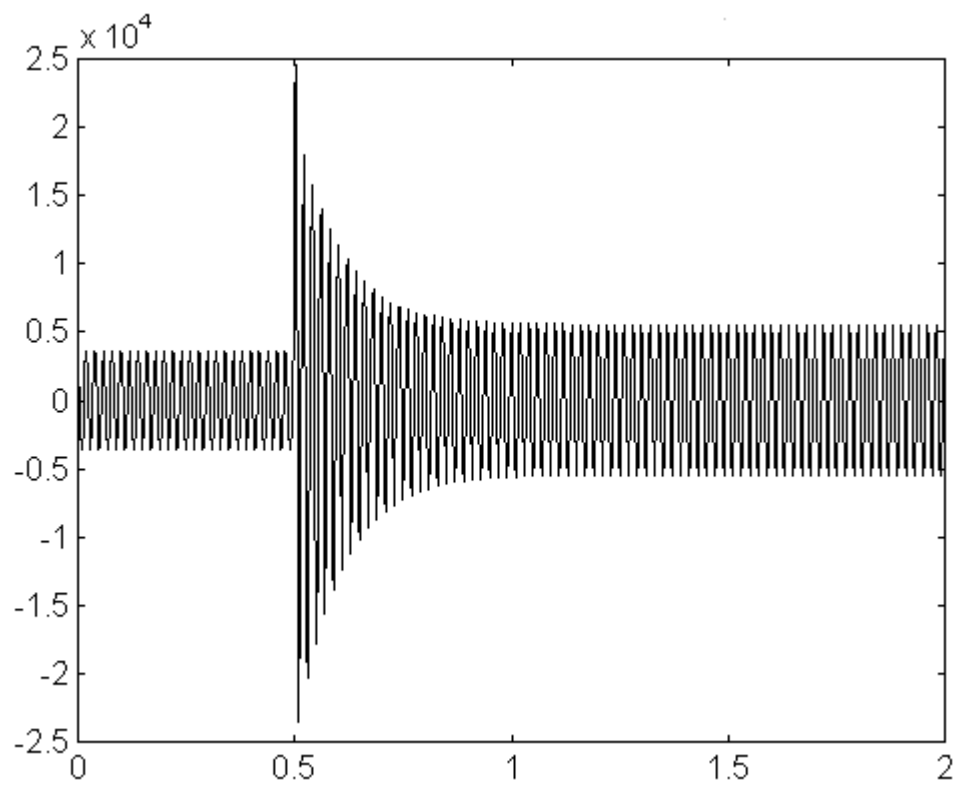
Slike koje slede dobijene su simulacijom trofaznog kratkog spoja programom MATLAB, uz korišćenje odgovarajućeg matematičkog modela.



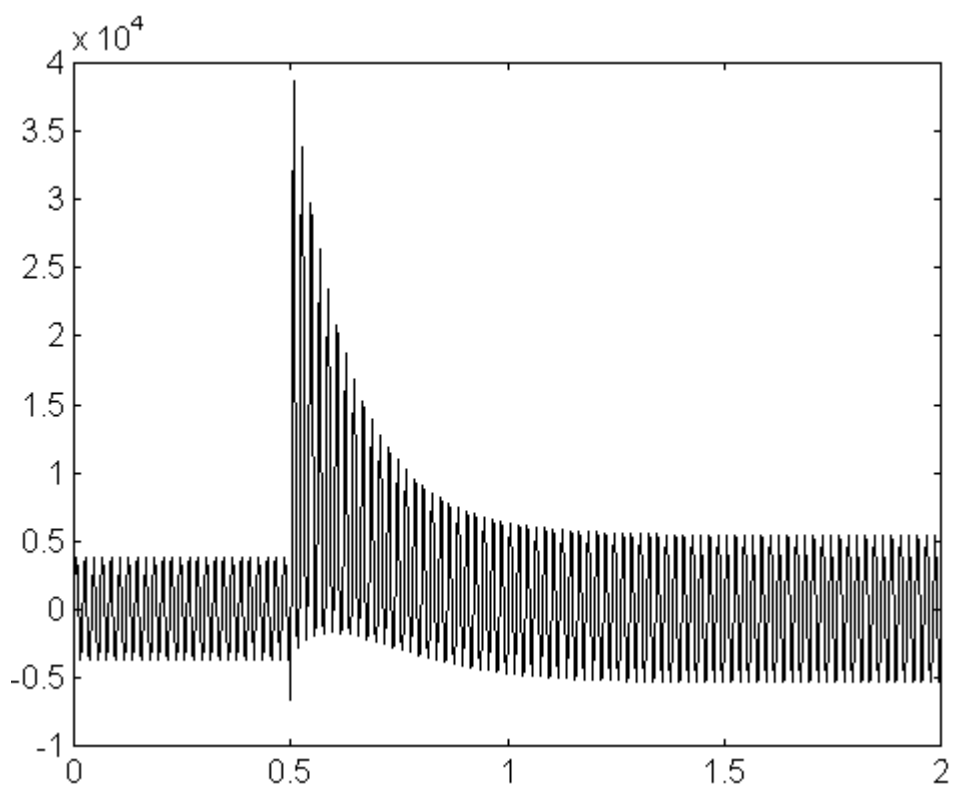
Slika 1-42 Momenat konverzije u funkciji vremena



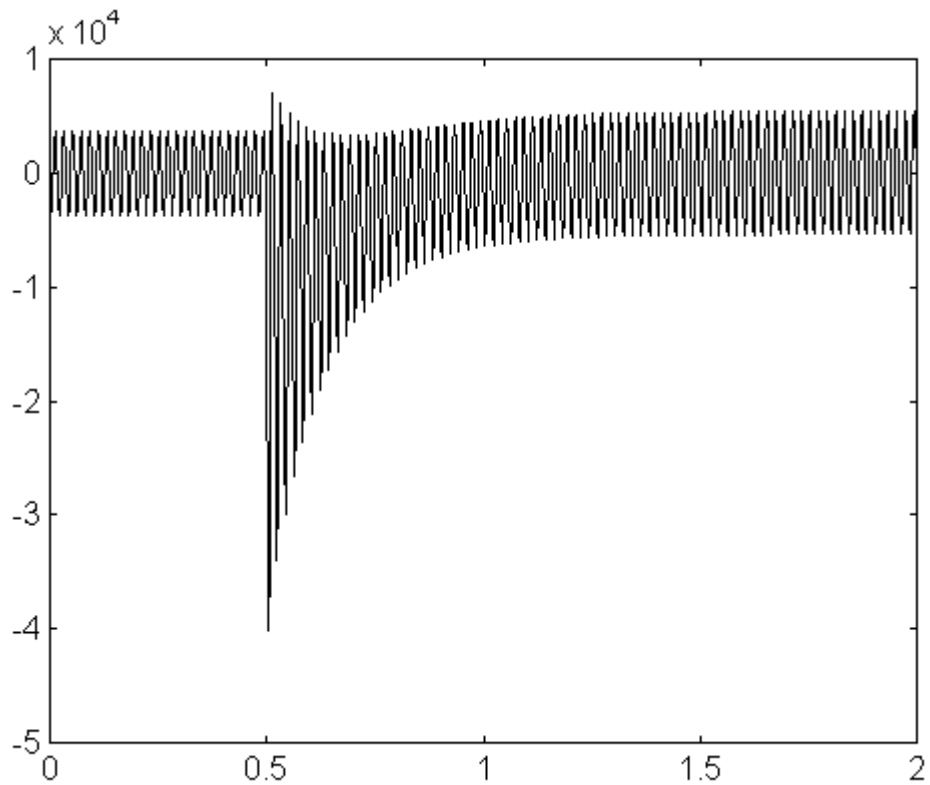
Slika 1-43 Pobudna struja u funkciji vremena



Slika 1-44 Struja faze *a* u funkciji vremena



Slika 1-45 Struja faze *b* u funkciji vremena



Slika 1-46 Struja faze c u funkciji vremena

Vrednosti najvažnijih reaktansi (relativne vrednosti) i vremenskih konstanti u sekundama navedene su u tabeli 1-3.

Tabela 1-3 Najvažnije reaktanse i vremenske konstante

	Vrsta rotora mašine		
	Cilindrični rotor (dvopolni)	Istaknuti polovi, prig. namot do p=8	Istaknuti polovi, prig. namot p > 8
x_d''	0,10÷0,15	0,14÷0,23	0,15÷0,25
x_q''	0,10÷0,15	0,14÷0,26	0,16÷0,28
x_d'	0,16÷0,21	0,22÷0,35	0,24÷0,40
x_d	1,4÷2,6	0,8÷1,4	0,75÷1,25
$x_q = x_q'$	1,1÷1,8	0,52÷0,90	0,45÷0,80
$T_d'' [s]$	0,05÷0,10	0,02÷0,08	0,02÷0,08
$T_d' [s]$	0,6÷2,0	0,5÷2,5	0,55÷2,5
$T_a [s]$	0,04÷0,25	0,04÷0,25	0,05÷0,25

1.23 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.

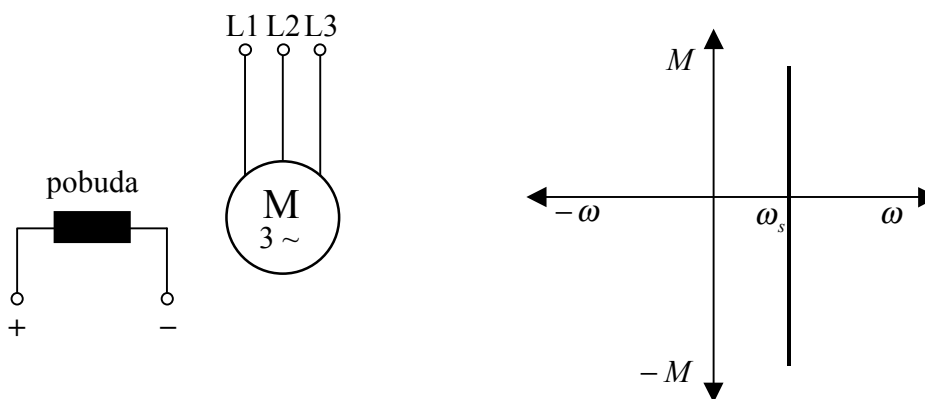
Zbog velike brzine obrtanja i sledstveno velikih mehaničkih napreznja, ograničen je prečnik rotora turbogeneratora. Maksimalna dužina mašine određena je elastičnim svojstvima rotora- kritičnim brzinama obrtanja i problemima u vezi sa mirnim hodom rotora. Kod jedinica najvećih snaga, provodnici se direktno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

Da bi se povećavo 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.

1.24 Sinhroni motor

Kod motora za naizmennu struju najviše je zastupljen, po značaju i masovnosti primene, asinhroni motor, a posle njega sledi *sinhroni motor* (slika 1-47). 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.



Slika 1-47 Sinhroni motor: a) principijelna šema b) karakteristika momenta

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 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.

U novije vreme, u elektromotornim pogonima napajanim iz pretvarača energetske elektronike, primenjuju se sinhronne mašine sa permanentnim 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 ravnoteža dvaju momenata i mašina ispada iz stabilnog rada ("ispada iz koraka").

1.25 Literatura

[1] B. Mitraković: *Sinhronne mašine*, Naučna knjiga, Beograd, 1986.

[2] A. Dolenc: *Sinhroni strojevi*, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1976.