

1. SINHRONE MAŠINE

Sinhronne mašine u obliku sinhronih generatora dominantno vladaju u proizvodnji električne energije u savremenoj elektroenergetici. Sinhronne mašine se pre svega sreću u generatorskom režimu rada, a osetno ređe u motorskom režimu. Sinhroni generatori su najveće rotacione električne mašine koje se danas izrađuju. U nuklearnim elektranama se nalaze najveći sinhroni generatori i njihova snaga premašuje 1000 MW. Međutim, u drugoj krajnosti u nekim aplikacijama koriste se sinhroni motori za snage od svega nekoliko delova vata.

Sinhronne mašine se pored generatorskog i motorskog režima rada sreću i u kompenzatorskom režimu - motorskom praznom hodu gde se promenom pobudne struje sinhronne mašine utiče na proizvodnju i potrošnju reaktivne snage. Te sinhronne mašine su takozvani sinhroni kompenzatori.

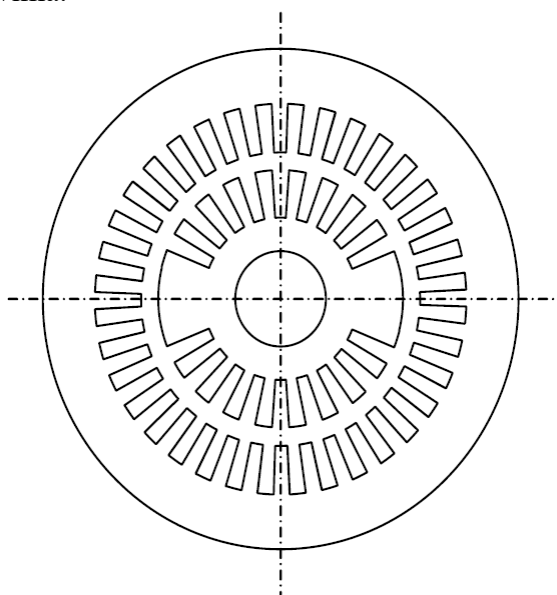
Sinhroni motori u opsegu snaga do 1000 kW su znatno manje brojni u odnosu na asinhronne motore. Razlog su kompleksnost pri pokretanju u rad i složenija konstrukcija u odnosu na asinhronne kavezne mašine.

1.1. DELOVI SINHRONIH MAŠINA

Stator sinhronne mašine je identičan sa statorom asinhronne mašine. Razlike u konstrukciji, nastaju kao posledica veličine mašina i brzine obrtanja. Elektromagnetno aktivni delovi statora sinhronne mašine su magnetno kolo i namotaji. Magnetno kolo statora se izrađuje od paketa limova kako bi se smanjili gubici usled vrtložnih struja. U žlebove magnetnog kola statora smešten je statorski namotaj sinhronne mašine - indukt (armatura). Termin armatura ukazuje da se u namotaju indukuje napon i da kroz njega teče struje opterećenja.

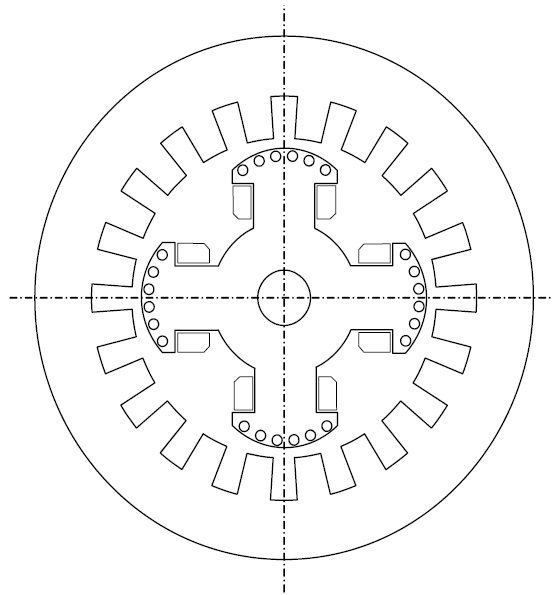
Prema obliku rotora, kao što je prikazano na slikama 1.1. i 1.2, sinhronne mašine se dele na mašine sa:

- cilindričnim rotorom,
- istaknutim polovima.



Slika 1.1. Presek magnetnog kola dvopolne sinhronne mašine sa cilindričnim rotorom.

Na slici 1.1. prikazan je poprečni presek magnetnog kola bez namotaja dvopolne sinhronne mašine sa cilindričnim rotorom.



Slika 1.2. Presek magnetnog kola četvoropolne sinhronne mašine sa istaknutim polovima.

Na slici 1.2. prikazan je poprečni presek magnetnog kola bez namotaja četvoropolne sinhronne mašine sa istaknutim polovima.

Rotor sinhronne mašine je tipičan induktor. Na magnetnom kolu rotora se nalazi pobudni namotaj. Proticanje pobudne struje stvara osnovnu komponentu magnetnog polja u mašini.

Magnetno kolo statora je šuplji valjak izrađen od štancovanih limova, ožlebljenih po unutrašnjem obimu. Debljina limova je 0,35; 0,5 ili 0,63 mm. Limovi su međusobno izolovani. Kružni venac između žlebova i spoljašnjeg prečnika statorskog paketa naziva se jaram statora.

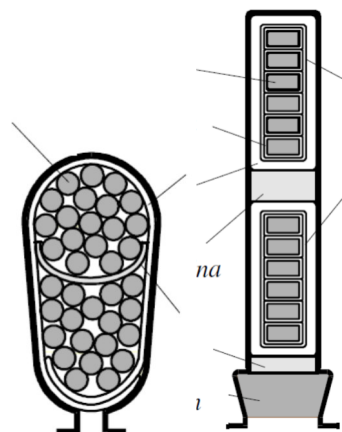
Magnetno kolo statora mašina manjih dimenzija izrađuje od limova i limovi su u jednom komadu, koristi se neorijentisan lim. Dok se magnetno kolo većih mašina izrađuje iz segmenata hladno valjanih limova sa orijentisanom kristalnom strukturom. U zavisnosti od broja polova bira se takav način sečenja kojim se postiže bolja magnetna provodnost i manja snaga gubitaka u magnetnom kolu statora.

Na slici 1.3. je prikazano slaganje segmenata paketa limova magnetnog kola statora hidrogenatora.



Slika 1.3. Slaganje limova magnetnog kola statora hidrogeneratora. Magnetno kolo većih mašina izrađuje se od segmenata. Stator u HE Bajina Bašta.

U žlebove magnetnog kola statora se smešta trofazni namotaj. Namotaj svake faze čine na red vezane sekcije. Sekcije statorskog namotaja često imaju samo jedan navojak koji je izrađen od više paralelnih provodnika – deonih provodnika. Deoni provodnici se transponuju u Rebel štapu. U zavisnosti od veličine sinhronog generatora odnosno od struje sekcije se vezuju i u paralelne grane. Sekcije statora se izrađuju od žice okruglog poprečnog preseka za male snage ili od profilnog provodnika. Sekcije su međusobno izolovane, kao i prema paketu limova magnetnog kola statora. Na slici 1.4. su prikazani tipični oblici žlebova statora sinhronih mašina.

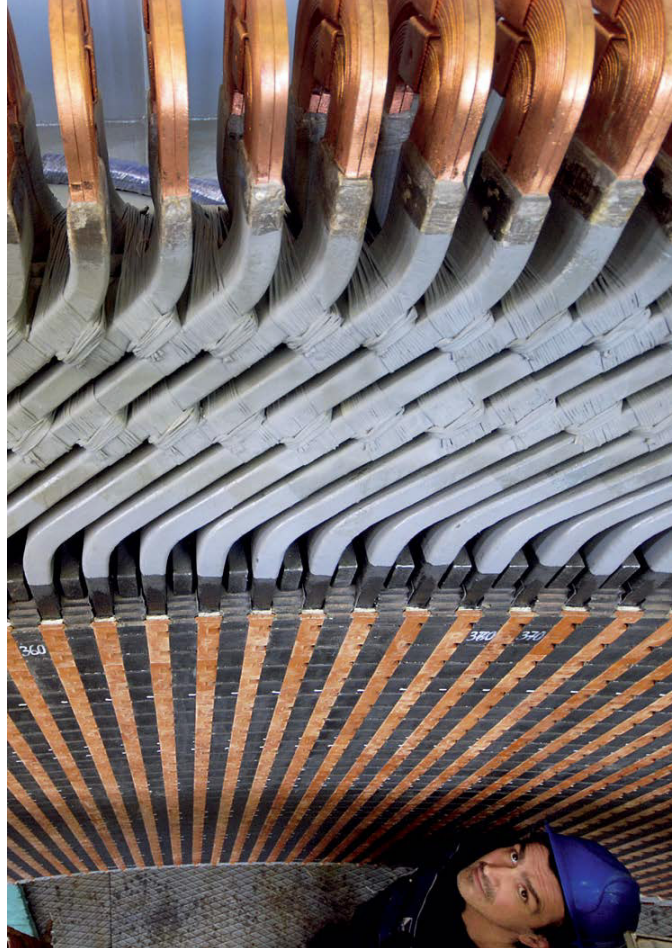


Slika 1.4. Najčešći oblici žlebova statora sinhronih mašina sa provodnicima.

U statorskom namotaju se indukuje napon – elektromotorna sila. Namotaji se izrađuju za nominalne napon do 27 kV i za nominalnu struju od 30 kA. Nominalne snage i nominalni naponi najvećih generatora u Srbiji: Đerdap – 190(210) MVA, 15,75 kV; Bajina Bašta – 315 MVA, 11 kV; Obrenovac TENT A – 247 MVA, 15,75 kV; TENT B - 723 MVA, 21 kV.

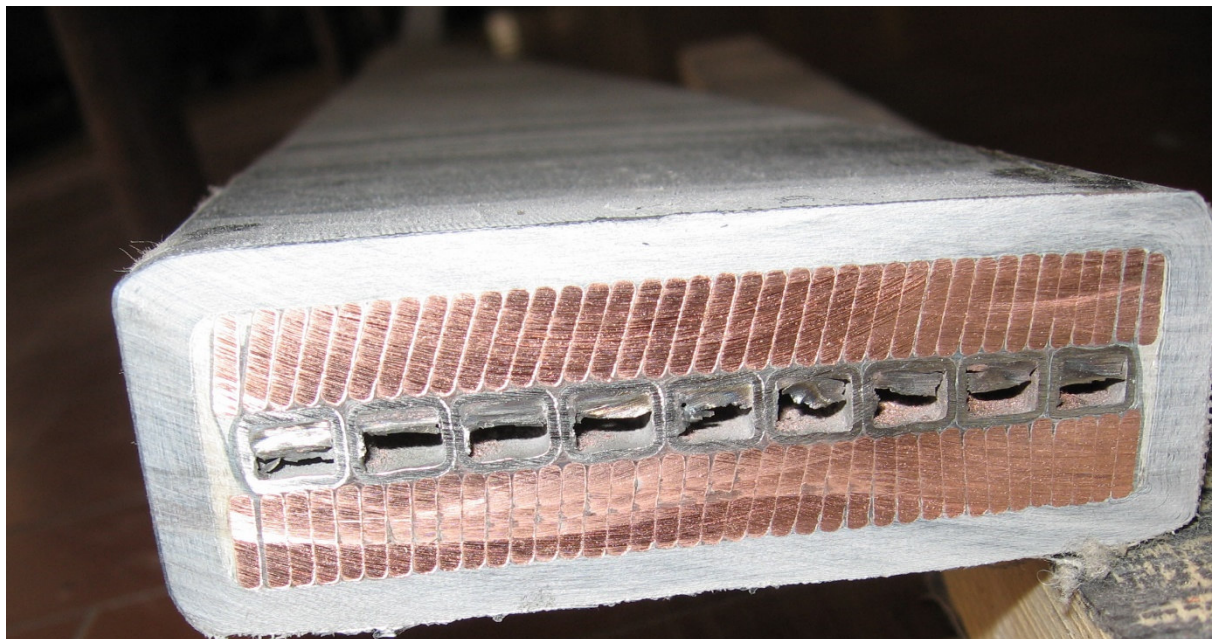
Struje u statorskom namotaju formiraju Teslino obrtno polje koje se obrće istom brzinom kao i rotor, pa otuda i naziv – sinhronne mašine. Namotaj je gotovu uvek vezan u zvezdu. Da bi se popravio harmonijski spektar indukovano napona, odnosno eliminisali pojedini harmonici, namotaj se izvodi kao dvoslojni.

Na slici 1.5. prikazane su sekcije statora uložene u žlebove paketa limova.



Slika 1.5. Sekcije namotaja statora hidrogeneratora. HE Đerdap 1.

S obzirom na snagu sinhronih mašina često se pribegava hlađenju namotaja pomoću demineralizovane vode. Tada kroz kanale u sekciji struji voda. Na slici 1.6. je prikazan poprečni presek sekcije izvedene sa deonim provodnicima i cevima za strujanje vode u cilju hlađenja namotaja. Na slici 1.7. prikazana je glava statorskog namotaja sa izvedenim cevima za hlađenje namotaja statora pomoću vode.



Slika 1.6. Kanali za hlađenje i deoni provodnici

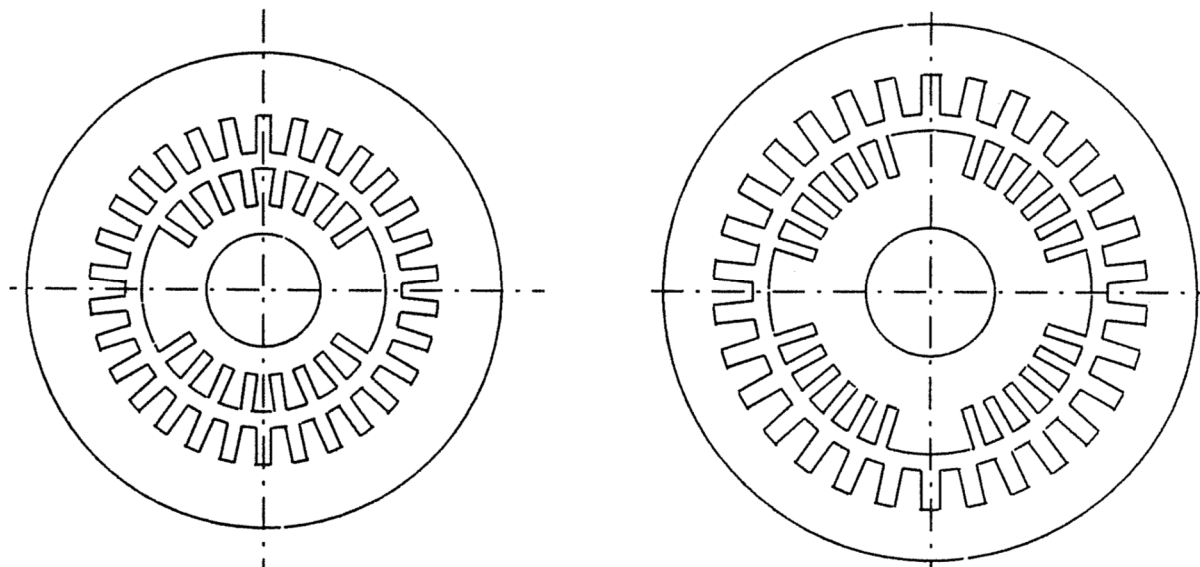


Slika 1.7. Glava namotaja statora sa izvodima kanala za hlađenje namotaja vodom.

Dvopolne mašine (3 000 o/min za 50 Hz), a eventualno i četvoropolne (1500 o/min za 50 Hz), se izrađuju sa cilindričnim rotorom. Sinhronne mašine sa cilindričnim rotorom najčešće

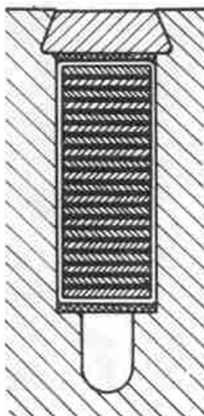
imaju 2, a ređe 4 pola. Sinhrona mašine sa cilindričnim rotorom se koriste u termoelektranama pa otuda naziv turbogeneratori.

Na slici 1.8. je prikazano magnetno kolo dvopolne i četvoropolne sinhrona mašine sa cilindričnim rotorom, bez umetnutih namotaja statora i pobudnog namotaja.



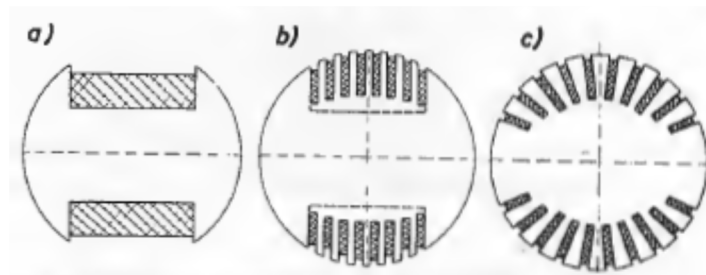
Slika 1.8. Presek magnetnog kola dvopolne i četvoropolne sinhrona mašine sa cilindričnim rotorom – turbogeneratora.

Po spoljašnjem obimu cilindričnog rotora sinhrona mašine se nalaze žlebovi u koje su smešteni provodnici pobudnog namotaja. Rotor je najčešće ožlebljen na $\frac{2}{3}$ obima. Žlebovi (žlebni korak) i provodnici (broj provodnika u želbu) na rotoru raspoređuju su tako da se u vazдушnom zazoru dobije prostoperiodična raspodela magnetnog fluksa, kako bi indukovani napon na statoru bio sa što manjim harmonijskim izobličenjem. Krajevi pobudnog namotaja izvedeni su na klizne kolutove. Telo cilindričnog rotora (magnetno kolo) je masivno, izrađeno obično iz jednog komada (zajedno sa vratilom). Žlebovi na rotoru se dobijaju mašinskom obradom – glodanjem. Brzine obrtanja rotora su velike, a zbog toga i centrifugalne sile pa su provodnici u žlebovima rotora učvršćeni zaglavlcima (klinovima) kao što je prikazano na slici 1.9, gde je prikazan poprečni presek žleba sa provodnicima. Na vrhu je zaglavak, provodnici su međusobno izolovani i u odnosu na žleb.



Slika 1.9. Presek žleba rotora.

Žlebovi po obimu mogu biti radijalni c), međusobno paralelni b). Kada se žlebovi rotora sa svake strane sliju u jedan žleb, dobija se rotor "školskog" tipa u obliku dvostrukog T. Na slici 1.10. su prikazani načini ožlebljenja cilindričnog rotora.

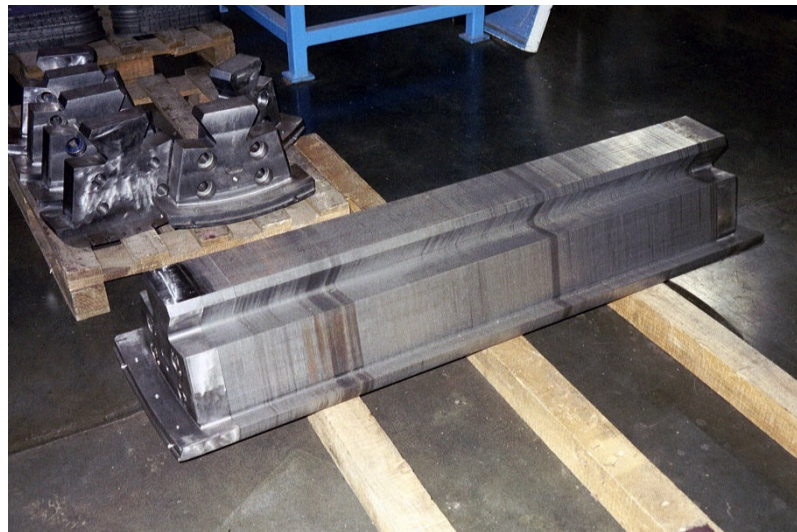
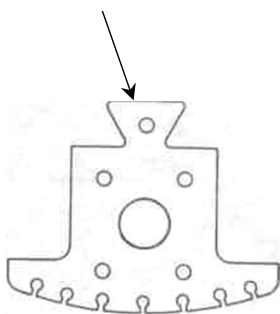


Slika 1.10. Ožlebljenje cilindričnog rotora.

Generatori sa manjom brzinom obrtanja konstruktivno se izvode sa izraženim polovima. S obzirom da najčešće dobijaju pogon od vodne turbine nazivaju se i hidrogeneratori. Na bazi rotora dvostruko "T" izrađeni su rotori sa većim brojem polova. To su, kao što je rečeno, rotori sa izraženim, polovima. Naime, ako se spoje svi žlebova u jedan, namotaj se preoblikuje od donekle kontinuirano raspoređenog na koncentrisani. Izražene polove nazivaju istaknuti polovi, istureni polovi, isturenja, rotori sa anizotropijom.

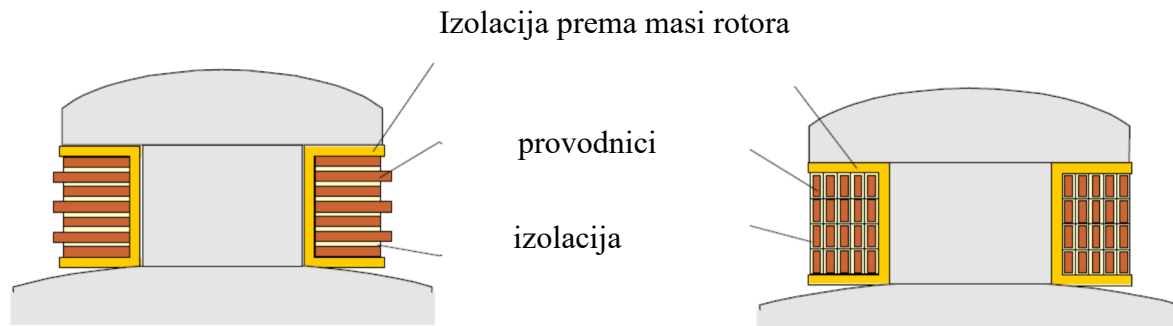
Istaknuti polovi imaju polni nastavak (polno stopalo) kao što je prikazano na slici. Oblik polnog stopala određuje oblik feromagnetnog zazora. Polno stopalo je najčešće lamelirano i ima žlebove u koje su smešteni provodnici posebnog kaveznog namotaja. Ako su polovi masivni onda nema žlebova. Nastavak u obliku lastinog repa služi za učvršćenje pola u jaram rotora. Sedam žlebova u polnom nastavku je za smeštaj kaveznog namotaja. Pet okruglih malih rupa služi za šipke kojima se limovi povezuju u celinu (pol), a šipka kroz veliku srednju rupu obezbedi krutost.

Lim od koga se izrađuje
polni nastavak

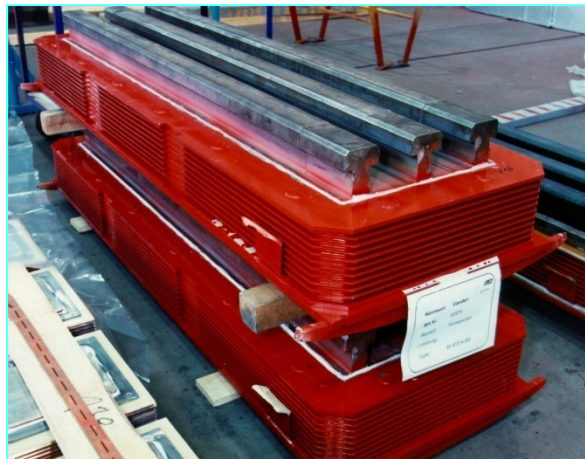


Slika 1.11. (Sl.6.1.13.) Lim izraženog pola sinhrona mašine. Fotografija polnog nastavka oko koga će biti postavljen pobudni namotaj.

Magnetno kolo rotora manjih sinhronih mašina, snage do 1 MVA se radi od limova. Lim rotorskog paketa izrezuje se u jednom komadu, pa su polovi i jaram napravljeni kao jedna celina.



Slika 1.12. Oko polnog nastavka se postavlja pobudni namotaj.



Slika 1.13. Polovi mašine sa istaknutim polovima.

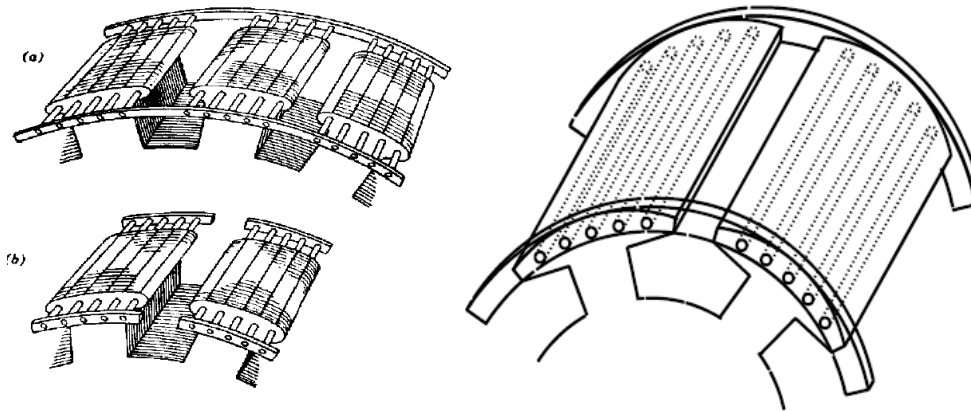


Slika 1.14. Rotor mašine sa istaknutim polovima.

Oko svakog pola se mota poseban namotaj, pa se zatim međusobno povezuju. Početak namota prvog i svršetak namota zadnjeg pola odvodi se na klizne kolute. Pomoću četkica koje klize po dva klizna koluta napaja se pobudni namot (namot magnetnih polova). Danas se rade i varijante bez četkica i kliznih kolutova (sa rotirajućim diodama).

1.1.1. Prigušni namotaj.

Na rotoru sinhronih mašina se pored pobudnog namotaja nalazi i prigušni namotaj. Prigušni namotaj je kaveznog tipa, i on se ugrađuje u polove sinhronih mašina sa istaknutim polovima.



Slika 1.15. Amortizacioni namotaj i detalj kratkospojnog prstena.

Amortizacioni namotaj ima višestruku namenu:

- prigušenje njihanja rotora,
- prigušenje inverznog polja i
- asinhroni zalet sinhronog motora.

Ako se posmatra samo simetrično opterećenje sinhronog generatora koje se ne menja vremenu, generator će se ponašati identično kao i bez prigušnog namotaja. Štapovi prigušnog kaveza se vrte sinhrono s obrtnim magnetnim poljem. Nalaze se stalno u polju jednake magnetske indukcije, i u njima se ne indukuje nikakvi naponi i ne teku nikakve struje. Linije

magnetne indukcije ne presecaju provodnike amortizacionog namotaja. Situacija je sasvim drugačija ako je generator nesimetrično opterećen (na primer usled prekida jedne faze dalekovoda). U generatoru će se pojaviti eliptično magnetno polje koje se može predstaviti i analizirati kao zbir direktnog i inverznog obrtnog polja koja polja obrću u suprotnim smerovima. Direktno polje se vrti sinhrono s rotorom i ne indukuje napone u štapovima kaveza. Inveržno polje se vrti u odnosu na rotor dvostrukom sinhronom brzinom i ono indukuje napone u štapovima. Usled toga poteći će struje koje po Lencovom zakonu nastoje poništiti polje koje ih izaziva. Ovo nije moguće u potpunosti postići, ali se inveržno obrtno polje u znatnoj meri priguši.

Prigušni kavez ima značajan uticaj i na prigušenje njihanja rotora pri naglom opterećenju i rasterećenju sinhronne mašine. Pri njihanju rotora dolazi do indukovanja napona i pojave struja u prigušnom kavezu koje (opet prema Lencovom zakonu) prigušuju njihanje rotora.

Treća je svrha prigušnog kaveza da pri pokretanju sinhronih motora omogući asinhroni zalet.

Na rotoru sinhronih mašina pored pobudnog namotaj se nalazi i prigušni namotaj. Prigušni namotaj se izvodi kao kavezni namotaj, slično kao kavezni namotaj kod asinhronih mašina. Prigušni namotaj ima za cilj da:

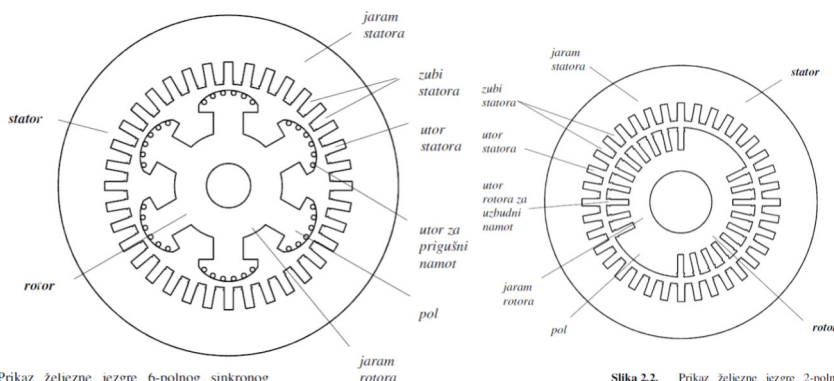
- Priguši njihanje sinhronne mašine do kojeg dolazi pri naglom opterećenju ili rasterećenju sinhronne mašine,
- Priguši inverzna polja do kojih dolazi pri nesimetričnom opterećenju po fazama,
- Omogući asinhroni zalet asinhronog motora ili kompenzatora.

Prigušni namotaj se ugrađuje u polne nastavke istaknutih polova na rotoru što bliže vazdušnom zazoru. Neizolovani provodnici se ugrađuju u žlebove u polnim stopalima i međusobom su spojeni kratkospojnim prstenom, kao što je prikazano na narednoj slici.

Pri promeni opterećenja sinhronne mašine dolazi do njihanja rotora i usled elektromagnetne indukcije od strane Teslinog obrtnog polja u provodnicima prigušnog namotaja se pojavljuju struje. Ako pored direktnog obrtnog polja - Teslino obrtno polje koje se obrće u istom smeru sa rotorom, postoji i inveržno obrtno polje koje potiče od inverznih struja usled nesimetričnog opterećenja ono će elektromagnetnom indukcijom izazvati struje u provodnicima prigušnog namotaja. Struja koja se pojavila u provodnicima prigušnog namotaja stvara momenat koji nastoji da poništi pojavu kaja je dovela do nastanka ovih struja.

Zbog jednostavnijeg izvođenja nekada se spajaju samo šipke koje se nalaze u jednom polu.

Turbogeneratori imaju rotor od masivnog, kovanog čelika pa se prigušni namotaj može izostaviti jer se masivni rotor može posmatrati kao ekvivalentan kavez. Tokom njihanja rotora do kojih dolazi pri opterećenju ili rasterećenju sinhronne mašine u rotoru se pojavljuju vrtložne struje koje imaju istu ulogu kao i struje u kavezu prigušnog namotaja - nastoje da ponište pojavu koja ih je indukovala.



ka 2.1. Prikaz željezne jezgre 6-polnog sinkronog stroja s istaknutim polovima

Slika 2.2. Prikaz željezne jezgre 2-polnog sinkronog stroja s cilindričnim rotorom

Prema vrsti pogonske mašine sinhrona mašine se dele na:

Turbogeneratore. Prema parnim turbinama koji pokreću cilindričan rotor ovakvi su rotori nazvani turborotori, a generatori - turbogeneratorima. Turbogeneratori se nalaze u termoelektranama i nuklearnim elektranama. Turbogeneratori imaju cilindričan rotor, pa su sobzirom na broj polova i konstrukciju rotora namenjeni za velike brzine obrtanja $n_s = 3000$ o/min ili $n_s = 1500$.

Hidrogeneratore. Hidrogeneratori se nalaze u hidroelektranama njihov rotor pokreće vodna turbina. Konstrukcija rotora nedozvoljava velike brzine obrtanja zbog velikih centrifugalnih sila koje se javljaju na istaknute polove. Namenjeni za male brzine obrtanja, pa se zato izrađuju sa velikim brojem polova.

Vetrogeneratori. U vetroelektranama u velikom broju se koriste sinhroni generatori sa stalnim magnetima ili sa pobudnim namotajem.

Dizel generatori. Su izvori rezervnog napajanja kod potrošača koji zahtevaju povećanu pouzdanost pri napajanju ili osnovno napajanje električnom energijom na plovilima.

Sinhroni kompenzatori.

Sinhroni motori.

1.2. OSNOVI RADA TROFAZNIH SINRONIH MAŠINA

Princip rada sinhrona mašine prvenstveno se objašnjava u generatorskom procesu rada. Princip rada asinhronih mašina je objašnjen na primeru motorskog procesa rada. To se radi tako zato, jer se sinhrona mašine upotrebljavaju prvenstveno kao generatori, a asinhrona kao motori. Razlog za "podelu" na sinhrona generatore i asinhrona motore treba tražiti prvenstveno u tome što se sinhrona mašine pobuđuju iz sopstvenog pobudnog izvora, koji poseduju kao posebnu jedinicu, dok asinhrona crpe pobudni učin iz električne mreže na koju su priključeni putem primarnog induktora u ulozi induktora.

Autohtonost sinhrona mašine u pogledu sopstvenog pobuđivanja je potpuna i u generatorskom i u motorskom procesu rada. Uobičajenim i odgovarajućim dimenzionisanjem kompletnog pobudnog kola sinhrona mašina se osposobljava da, osim elektromehaničkog pretvaranja energije, proizvede ili konzumira i pobudni učin, to jest, jalovu ili reaktivnu snagu (slika 6.2.01). Ta autohtonost u pogledu pobuđivanja, a time i mogućnosti uticanja na nivo, odnosno stalnost napona obezbedila je sinhronoj mašini pomenutu suverenost na području proizvodnje električne energije, i to kako u pojedinačnom radu na svoju sopstvenu mrežu (6.3.3.1.) tako i u grupnom radu dva ili više generatora odnosno na praktički beskonačno jaku mrežu (3.3.2.) nekog sistema.

Međutim, upravo nedostatak posebnog pobudnog sistema obezbedio jeftiniju proizvodnju asinhronih mašina manjeg broja polova i njihovu vanrednu rasprostranjenost u elektromotornim pogonima. Ovome je doprinela i kontinuiranost momentne karakteristike asinhrona mašine u svim režimima rada: od kočenja u suprotnom smeru, pa preko područja zaleta normalnog motorskog i generatorskog procesa rada, sve do eventualnog mehaničkog razaranja posle premašenja generatorskog prevojnog momenta. Sa ovim svojstvom je u vezi i osobina vanredno jednostavnog puštanja u rad asinhronih mašina, naročito kaveznih, dok su nepogodnosti u vezi sa startovanjem druga mašina sinhronih mašina (6.4.).

6.2.1. Princip rada

Osnovne karakteristike principa rada sinhronih generatora date su u poglavlju o proizvodnji naizmeničnog napona (4.1.). Tamo je prikazan rad sinhronog generatora u praznom hodu. Na to je u ovom poglavlju nadovezano opterećenje sinhrona mašine kao generatora i analizirano

njeno ponašanje u takvom procesu rada, a zatim je, pomoću te predstave, objašnjen i motorski proces rada.

U daljnjem tekstu se pod sinhronim generatorom podrazumeva trofazni sinhroni generator sa simetričnim opterećenjima jednako izvedenih faznih namota, međusobno geometrijski pomenih za 120° el. Takođe se podrazumeva i induktor sa elektromagnetima na rotoru, a indukt na statoru (sl.6.2.02).

Analize rada sinhronog generatora razlikuju se prema tome da li generator radi pojedinačno ili grupno odnosno priključen na beskonačno jaku mrežu. U vezi sa tim najpre se analizira rad pojedinačnog generatora, a zatim priključenog na beskonačno jaku mrežu. Rad između tih krajnosti može se zamisliti u kvalitativnom pogledu ili interpolirati u kvantitativnom.

Kada se na priključke generatora koji razvija napon priključe korisnici, onda poteče struja. Zbog navedenih uslova o simetričnosti i međusobnoj pomenosti struja i faznih namota obrazuje se Teslino obrtno polje (videti 4.3.2.). Ono je stvoreno proticanjem struja opterećenja kroz fazne namote indukta (statora):

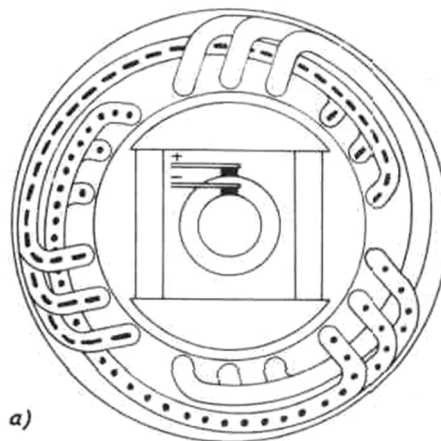
$$f = \frac{2p \cdot n}{2 \cdot 60} .$$

Brzina obrtanja rotora (magnetnih polova, induktora) definiše frekvenciju zavisno od brzine obrtanja i broja polova:

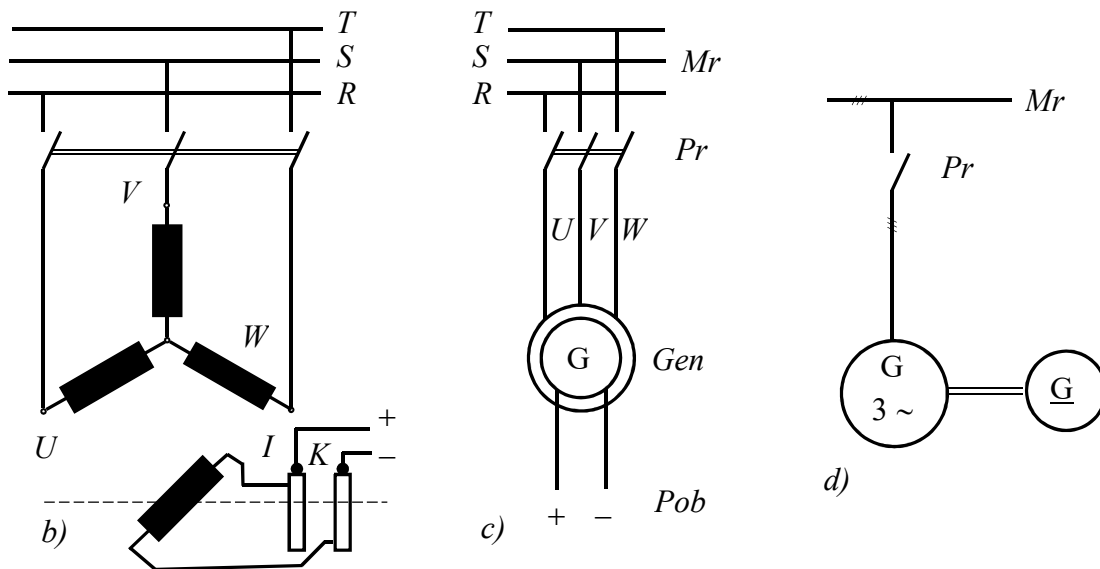
Ovo je frekvencija kojom se menja proizvedeni naizmenični napon, a time i struja koju taj napon tera. Prema tome, brzina obrtanja Teslinog obrtnog polja koje izazivaju te struje iznosi:

$$n_{rot} = \frac{2 \cdot f \cdot 60}{2p} .$$

Ova je relacija već poznata iz poglavlja o brzini obrtanja Teslinog polja (4.3.3.).

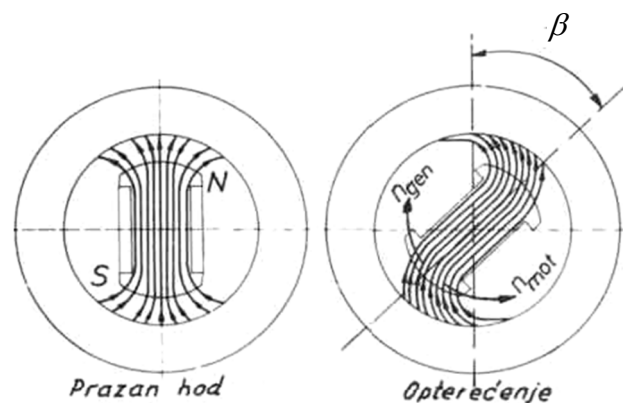


Sl.6.2.02. -a: (desno) - Shematski izgled sinhronne mašine. Na statoru se vide glave (bočne veze) tri fazna namota. Na rotoru - oblik dvostrukog T – naznačeni su klizni koluti i četkice.



Sl.6.2.02. -b: (levo) - Potpuna shema sinhronne mašine: namoti statora (trofaznog) i rotora sa dva klizna koluta (I, K su oznake za pobudu iz posebnog izvora). -c: (u sredini) Trofazna shema trofaznog sinhronog generatora. -d: (desno) Jednopolna shema trofaznog sinhronog generatora sa pobudnom mašinom.

Sl.6.2.03. (desno) - Ilustracija ugla opterećenja. Ova ilustracija važi za motorski režim pri obrtanju rotora protiv smera kazaljke časovnika ili za generatorski u smeru. Feromagnetni zazor je preterano velik radi očiglednosti, a put magnetnih linija kroz stator nije ucrtan.



GLEDAJ Binderov ppt 10 slajd

Iz navedenih relacija vidi se jednakost brzine obrtanja magnetnih polova induktora (rotora) sa, brzinom Teslinog obrtnog polja (polja statora):

$$n = n_{rot} \quad .$$

Ta jednakost u brzinama obrtanja naziva se sinhronizam, što na grčkom znači istovremenost. Usporediti sa asinhronizmom u 5.2.1.5.

Obrtna polja statora i rotora nisu poravnata (nisu "u fazi") kada je struja opterećenja radna. U takvom slučaju polje statora pokušava da zaustavi rotor i na taj način od njega preuzima energiju, odnosno između polja radne struje statora i polja pobudne struje rotora uspostavi se sila koja teži da ta dva polja međusobno poravna (sl.6.2.03.). Ukoliko je veća radna struja (odnosno njena radna komponenta), utoliko će biti veći ugao između polja statora (indukta) i polja rotora (induktora). Proporcionalno sa sinusom ugla raste i sila koja teži da poravna polja. Produkt te sile i poluprečnika rotora predstavlja obrtni moment kojim polje statora koči polje rotora. Toliki moment mora da preda pogonska mašina sinhronom generatoru da bi se njegov rotor održao u sinhronom obrtanju.

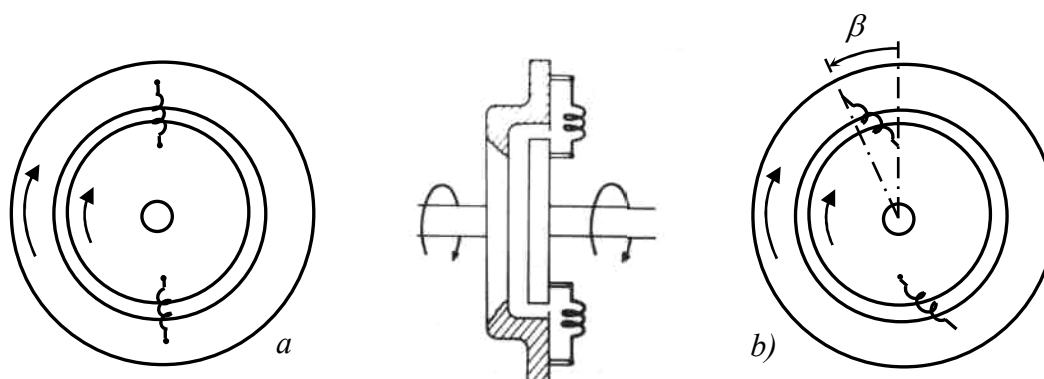
Obrtni moment je, uz stalnu brzinu obrtanja, proporcionalan radnoj struji koju generatoru oduzimaju korisnici ili koju on odaje u mrežu, uz stalan napon na priključkama generatora, dakle:

$$M :: I_{rad} \cdot \phi \quad .$$

6.2.2. Ispadni i reluktantni moment

6.2.3. Mehanički analogon sinhronne mašine

Ako treba da se prikaže analogija između sinhronne mašine i nekog mehaničkog modela, može se reći da su obrtno polje statora i rotor međusobno povezani oprugom. Ta polja se mogu predstaviti pomoću dva istoosna obrtna sistema međusobno povezana sa onoliko opruga koliko ima polova. S obzirom da pun. krug može da ima $2p \cdot 180^\circ$ el., a svega 360° geom.,



Sl.6.2.04. – Mehanički analogon sinhronne mašine (opis u tekstu)

najzgodnije je da se analogija sinhronne mašine sa pomenutim mehaničkim sistemom analizira na dvopolnom modelu, što znači: dve opruge između dva istoosna rotirajuća dela. Sila sa jednog dela se prenosi na drugi s pomoću opruga (sl.6.2.04.a).

Kada prvi deo počne da se obrće, on povlači za sobom pomoću opruga i drugi deo. U obrtanju, dok je drugi deo neopterećen, opruge su izdužene samo toliko da održe u obrtanju drugi deo. Preko njih se prenose samo gubici drugog dela. Kod sinhronog generatora to praktički znači nadoknađivanje gubitaka u gvožđu statora. Usled kočenja drugog dela on delimično zaostaje za prvim delom. To zaostajanje je upravo toliko da se opruge izduže i nategnu silom koja će obrazovati obrtni moment koji odgovara momentu kočenja. Kod sinhronih generatora analogno ovom momentu kočenja je opterećenje (sl.6.2.04), odnosno protivmoment usled toga.

Očigledno je da jedna određena opruga može da prenese izvestan maksimalno mogući moment, i to onda kada ugao zaostajanja drugog dela u odnosu, na prvi poraste na $\pi/2$. Naime, opruga je maksimalno istegnuta i zategnuta za ugao π , ali zbog promene kraka sile, moment koji se može preneti sa jenog dela na drugi proporcionalan je sinus u ugla zaostajanja a maksimalan je kada taj ugao postigne $\pi/2$. Dakle, i u tom pogledu postoji potpuni analogon sa dvopolnim sinhronin turbogeneratorom i njegovim ispadnim momentom.

Opisani mehanički analogon sinhronog generatora važi potpuno i za motorski proces rada, kao i u prelaznim pojavama, kada pri udarnim opterećenjima nastaje oscilovanje ugla zaostajanja odnosno prednjačenja (6.10.).

Dalje, veća prethodna napregnutost opruge takođe omogućuje veći ispadni moment, baš kao i prepobuđena sinhrona mašina (videti 6.3.4.3.).

Mehanički analogon sinhrona mašine eksploatiše se mnogo više u analizama sinhronih mašina nego ranije pomenuti mehanički analogon asinhronih mašina (hidraulična spojnica).

2. SINHRONA MAŠINA SA CILINDRIČNIM ROTOROM

2.1. INDUKTIVNOSTI SINHRONE MAŠINE

Fluksni obuhvati trofazne sinhrona mašine sa pobudnim namotajem na rotoru su:

$$\psi_a = L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c + L_{af} \cdot i_f,$$

$$\psi_b = L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c + L_{bf} \cdot i_f,$$

$$\psi_c = L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c + L_{cf} \cdot i_f,$$

$$\psi_f = L_{fa} \cdot i_a + L_{fb} \cdot i_b + L_{fc} \cdot i_c + L_{ff} \cdot i_f,$$

gde su $L_{aa} = L_{bb} = L_{cc}$ sopstvene induktivnosti statorskih namotaja, a L_{ff} sopstvena induktivnosti pobudnog namotaja, $L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb}$ su međusobne induktivnosti statorskih namotaja, dok su $L_{af} = L_{bf} = L_{cf}$ međusobne induktivnosti statorskih namotaja i pobudnog namotaja. Treba primetiti da su u jednačinama za fluks ne obuhvate struje orijentisane u mašinu tj. imaju referentni smer primeren motoru.

Kako izgledaju i od kojih veličina zavise pojedine induktivnosti sinhrona mašine?

Sopstvena induktivnost pobudnog namotaja.

Kako je stator sinhronih mašina cilindričan to pobudni namotaj vidi konstantan vazdušni zazor nezavisno od položaja rotora ϑ_m , bilo da je rotor cilindričan ili je sa istaknutim polovima. Dakle, kakva god da je konstrukcija rotora $L_{ff} \neq f(\vartheta_m)$ kada se zanemari ožlebljenje statora i žlebni harmonici fluksa.

Struja u pobudnom namotaju formira pobudni fluks i najveći deo ovog fluksa prolazi kroz vazdušni zazor i namotaje na statoru. Ovaj deo fluksa struje pobude koji ulančava pobudni namotaj i namotaje na statoru se može ekvivalentirati sa induktivnošću L_{ff0} koja predstavlja deo sopstvene induktivnosti pobudnog namotaja L_{ff} . Manji deo fluksa koji potiče od struje u pobudnom namotaju zatvara se samo oko namotaja pobude i to je rasipni fluks. Rasipni fluks se može ekvivalentirati sa induktivnošću rasipanja $L_{f\gamma}$.

$$L_{ff} = L_{ff0} + L_{f\gamma}.$$

Međusobna induktivnost između namotaja statora i pobudnog namotaja.

Kako se rotor obrće to je, nezavisno od konstrukcije rotora, međusobna induktivnost između namotaja statora i pobudnog namotaja funkcija pozicije rotora ϑ_m . Međusobna induktivnost statorskog namotaja a i pobudnog namotaja f se periodično menja sa uglom ϑ koji predstavlja električni ugao između magnetnih osa ova dva namotaja:

$$L_{af} = L_{fa} = M \cdot \cos \vartheta,$$

$$\vartheta = p \cdot \vartheta_m = \int \omega_s dt = \omega_s \cdot t + \vartheta_0,$$

gde su:

- M maksimalna vrednost međusobne induktivnosti koja se ima kada se magnetne ose statorskog namotaja a i pobudnog namotaja f poklope.

- ϑ_m , ϑ , pozicija rotora tj. ugao između ose statora i ose rotora u mehaničkim, odnosno električnim rad,

- ϑ_0 , je položaj rotora u početnom trenutku $t = 0$,

– ω_s električna sinhrona brzina, ugaona brzina obrtnog polja, kružna frekvencija statorskih veličina ($\omega_s = 2\pi f$) izražena u električnim rad/s.

Slične se jednačine mogu zapisati i za međusobne induktivnosti druga dva fazna namotaja i pobudnog namotaja uvažavajući odgovarajuće fazne pomake:

$$L_{bf} = M \cdot \cos(\vartheta - 120^\circ),$$

$$L_{cf} = M \cdot \cos(\vartheta - 240^\circ).$$

Sopstvena induktivnost statorskih namotaja.

Sopstvene induktivnosti statorskih namotaja su međusobno jednake, jer je sinhrona mašina uravnotežen element. Ako je rotor cilindričan vazdušni zazor je konstantan. Tada su sopstvene induktivnosti statorskih namotaja nezavisne od pozicije rotora, jer je magnetna otpornost koju vidi namotaj statora konstantna za bilo koji položaj rotora:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} \neq f(\vartheta).$$

Ovaj navod je tačan ako se još zanemari ožlebljenje rotora.

Ako struja postoji samo u statorskom faznom namotaju a ona će stvoriti fluks koji se najvećim delom zatvara kroz vazdušni zazor, preko rotora. Ovaj fluks prožima sve fazne namotaje na statoru i ulančava ih sa pobudnim namotajem. Taj fluks se može ekvivalentirati sa induktivnošću L_{aa0} koja predstavlja deo sopstvene induktivnosti statorskog namotaja L_{aa} . Manji deo fluksa koji potiče od struje koja postoji samo u statorskom namotaju a zatvara se samo oko tog namotaja, to je rasipni fluks. Rasipni fluks se može ekvivalentirati sa induktivnošću rasipanja $L_{a\gamma}$:

$$L_{aa} = L_{aa0} + L_{a\gamma}.$$

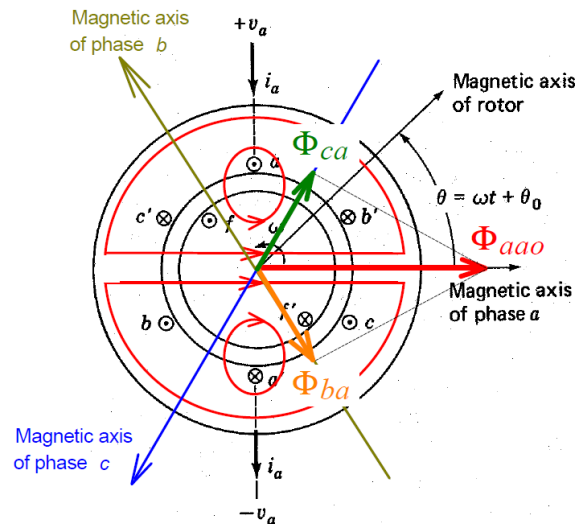
Ako se zanemari fluks rasipanje može se zapisati da je:

$$L_{aa} = \frac{\psi_{aa0}}{i_a}.$$

Treba se podsetiti da su namotaji statora i pobude raspodeljeni u žlebovima i da usled toga, pored osnovnog harmonika fluksa u vazdušnom zazoru postoje i viši harmonici fluksa. Induktivnost L_{aa0} je deo sopstvene induktivnosti i sa njom je uzet u obzir samo prvi harmonik raspodele fluksa u vazdušnom zazoru.

Međusobne induktivnost statorskih namotaja.

Međusobna induktivnost dva namotaja izražava koliki je doprinos struje u jednom namotaju fluksu kroz drugi namotaj. Ne treba smetnuti sa uma da iako postoji samo struja u statorskom faznom namotaju a , postojaće fluks i kroz druge namotaje tj. i kroz fazni namotaj b , kao što je prikazano na narednoj slici. Na slici je prikazana dvopolna sinhrona mašina sa cilindričnim rotorom. Namotaji označeni sa aa' , bb' i cc' predstavljaju raspodeljene namotaje koji obezbeđuju prostoperiodičnu raspodelu MPS, odnosno indukcije u vazdušnom zazoru. Pretpostavljeno je da struja postoji samo u namotaju a i to je naznačeno sa krstićem $\otimes$ i sa tačkom $\square$. Pobudni namotaj je na rotoru, označen je sa ff' i on je raspodeljen. Pretpostavlja se da obezbeđuje prostoperiodičnu raspodelu MPS, odnosno indukcije u vazdušnom zazoru. Kako je raspodela MPS prostoperiodična po vazdušnom zazoru MPS se mogu predstaviti prostornim vektorima. Na slici su naznačene i magnetne ose namotaja.



Fluksni obuhvat faze b

$$\psi_b = L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c + L_{bf} \cdot i_f,$$

kako postoji struja samo u faznom namotaju a to je:

$$L_{ab} = \frac{\psi_b}{i_a} = \frac{\psi_{ba}}{i_a} = -\frac{\psi_{aa0}}{i_a} \cos(60^\circ) = -\frac{1}{2} L_{aa0}$$

Kako je sinhrona mašina uravnotežen element to su sve međusobne induktivnosti statorskih namotaja sinhrona mašine jednake $L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb}$.

Kada se u jednačinu za fluksni obuhvat jedne faze statorskog namotaja smene navedene induktivnosti (uz napomenu da struje postoje u svim namotajima) dobija se:

$$\psi_a = L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c + L_{af} \cdot i_f,$$

$$\psi_a = (L_{aa0} + L_{a\gamma}) \cdot i_a - \frac{1}{2} L_{aa0} \cdot (i_b + i_c) + L_{af} \cdot i_f.$$

Kada je radni režim simetričan tada je $i_a + i_b + i_c = 0$ ili $i_b + i_c = -i_a$, pa je:

$$\psi_a = \left(\frac{3}{2} L_{aa0} + L_{a\gamma} \right) \cdot i_a + L_{af} \cdot i_f = L_s \cdot i_a + L_{af} \cdot i_f,$$

gde je L_s sinhrona induktivnost:

$$L_s = \frac{3}{2} L_{aa0} + L_{a\gamma} = L_{aa0} + \frac{1}{2} L_{aa0} + L_{a\gamma}.$$

Ovo je induktivnost koju vidi fazni namotaj a u simetričnom režimu. Sa $1/2$ uzet je uticaj druge dve faze. U jednačini za sinhronu induktivnosti prvi sabirak L_{aa0} potiče od prvog harmonika fluksa, usled struje u namotaju a . Drugi sabirak $1/2 \cdot L_{aa0}$ predstavlja fluks kroz fazni namotaj koji potiče od struje u namotajima b i c . Treći sabirak predstavlja rasipni fluks namotaja a . Objašnjenje dalje. Ako postoji struja samo u jednom faznom namotaju ona će formirati pulsirajuće polje, dok ako postoji struja u sva tri statorska namotaja sinhrona mašine – armaturi, formiraće se Teslino obrtno polje čija je amplituda $3/2$ od amplitude pulsirajućeg magnetnog polja, pa odatle direktno sledi da i induktivnost mora biti $3/2 \cdot L_{aa0}$.

U jednačini za fluksni obuhvat ψ_a sabirak $L_{af} \cdot i_f$ predstavlja deo pobudnog fluksa koji obuhvata statorski namotaj.

2.2. EKVIVALENTNO KOLO SINHRONE MAŠINE SA CILINDRIČNIM ROTOROM

Sasvim je opravdano pretpostaviti da su naponi, elektromotorne sile i struje sinhronih mašina prostoperiodične veličine te se one mogu predstaviti odgovarajućim fazorima. U ustaljenom (stacionarnom) stanju su sve veličine sinhrona mašina (napon, struja, brzina, fluks, momenat) konstantne u vremenu. Odnos između pojedinih veličina sinhronih mašina tokom ustaljenog stanja prikazuje se fazorskim dijagramom. Da bi se došlo do ekvivalentne šeme i fazorskog dijagrama sinhrona mašina potrebno je doći do jednačine naponske ravnoteže u kompleksnom domenu.

Kao što je od ranije poznato dve su mogućnosti u pogledu izbora referentnog smera za indukovanu elektromotornu silu. Referentni smer indukovane elektromotorne sile može biti nasuprot referentnom smeru za napon napajanja i tada je indukovana elektromotorna sila:

$$e_a = -\frac{d\psi_a}{dt},$$

ili se usvaja isti referentni smer za elektromotornu silu kao što je referentni smer napona napajanja i tada je:

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt}.$$

Na ovaj način orijentisana indukovana elektromotorna sila deluje nasuprot naponu napajanja pa se i naziva kontra elektromotornom silom. Ovaj pristup sa kontra elektromotornom se često koristi u rešavanju električnih kola u kojima postoje indukovane elektromotorne sile. U razmatranju koje sledi korišćen je ovaj drugi izbor za referentni smer indukovane elektromotorne sile.

Ka tom cilju kreneće se od Faradejevog zakona i od trenutne vrednost elektromotorne sile faznog namotaja a :

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt} = \frac{d}{dt}(L_s \cdot i_a + L_{af} \cdot i_f),$$

$$e_a = L_s \frac{di_a}{dt} + I_f \frac{dL_{af}}{d\vartheta} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} = L_s \frac{di_a}{dt} + e_{a0},$$

gde je e_{a0} elektromotorna sila praznog hoda:

$$e_{a0} = I_f \frac{dL_{af}}{d\vartheta} \cdot \omega_s.$$

Elektromotorna sila praznog hoda je napon koji se indukuje na u statorskom namotaju kada su statorske struje jednake nuli.

Kada se u prethodnu jednačinu uvrsti jednačina za induktivnost:

$$L_{af} = L_{fa} = M \cdot \cos \vartheta,$$

dobija se trenutna vrednost elektromotorne sile praznog hoda:

$$e_{a0} = -M \cdot \omega \cdot I_f \sin \vartheta = M \cdot \omega \cdot I_f \cos \left(\vartheta + \frac{\pi}{2} \right),$$

$$e_{a0} = M \cdot \omega_s \cdot I_f \cos \left(\omega_s t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Očigledno je da elektromotorna sila praznog hoda, e_{a0} zavisi od struje pobude I_f i od brzine obrtanja odnosno sinhrona brzine. U literaturi koja obrađuje sinhrona mašine elektromotorna sila praznog hoda se češće koristi umesto pobudne struje i pobudnog fluksa.

U praznom hodu sinhrona mašine postoji samo pobudna struja koja stvara ukupni fluks u vazdušnom zazoru. U opterećenom stanju pored struje pobude postoji i struja u statorskom namotaju - struja armature. Sinhrona mašina je pobuđena sa strane rotora i sa strane statora tj. MPS pobudne struje zajedno sa MPS struje armature stvaraju rezultantni MPS koja stvara rezultantni fluks. Delovanje armature struje se naziva reakcijom armature. Uticaj reakcije armature u sinhronoj induktivnosti je uvažen sa induktivnošću $3/2 \cdot L_{aa0}$. Ova induktivnost se još naziva induktivnost (reaktansa) reakcije armature.

Magnetna polja, odnosno prostorne raspodele magnetne indukcije po obimu vazdušnog zazora mogu se sabirati samo kada postoji linearna veza između magnetnog polja i MPS. Navedena linearna veza postoji samo kod magnetno linearnih kola, a što nije slučaj kod električnih mašina zbog pojave zasićenja magnetnog kola. Zato se prvo mora odrediti ukupna (rezultantna) MPS, a tek potom magnetni fluks, odnosno indukcija.

Jednačina naponske ravnoteže za a fazni namotaj armature glasi:

$$u_a = R_s i_a + e_a.$$

Sinhrona mašine su mašine velike snage pa je opravdano zanemariti omsku otpornost statorskog namotaja. Ako se zanemari omska otpornost namotaja jednačina naponske ravnoteže postaje $u_a = e_a$. Kada se u jednačini za indukovanu elektromotornu silu usvoji generatorski referentni smer za struju armature, dobija se:

$$u_a \approx \frac{d\psi_a}{dt} = - \left(L_\gamma + \frac{3}{2} L_{aa0} \right) \cdot \frac{di_a}{dt} + e_0.$$

Kako su veličine u_a i i_a prostoperiodične onda se prethodna jednačina naponske ravnoteže može prevesti u domen kompleksnih veličina, odnosno fazora. Pri ovom prelasku koristi se sledeća formalna zamena:

$$L_\gamma \frac{di_a}{dt} \rightarrow jX_\gamma \hat{I}, \quad \frac{3}{2} L_{aa0} \frac{di_a}{dt} \rightarrow jX_a \hat{I}, \quad e_0 \rightarrow \hat{E}_0,$$

gde su:

- X_γ reaktansa rasipanja armature,
- X_a reaktansa reakcije armature,
- $\hat{I}$ kompleksni efektivni predstavnik struje armature,
- $\hat{E}_0$ kompleksni efektivni predstavnik elektromotorne sile praznog hoda.

Nakon prelaska u domen fazora jednačina naponske ravnoteže sinhrona mašine u generatorskom režimu rada:

$$\hat{U} = \hat{E}_0 - jX_a \hat{I} - jX_\gamma \hat{I}.$$

Elektromotorna sila praznog hoda E_0 koja se pojavljuje u prethodnoj jednačini je fiktivna veličina. Fiktivna je u smislu da se u jednačini naponske ravnoteže za dati radni režim pojavljuje veličina koja ne pripada tom režimu nego praznom hodu. Stvarna elektromotorna sila E koja se u datom radnom režimu indukuje u namotaju sinhrona mašine posledica je MPS pobudnog namotaja i MPS reakcije armature. Sada je očigledno da je stvarna elektromotorna sila indukovana u namotaju sinhrona mašine:

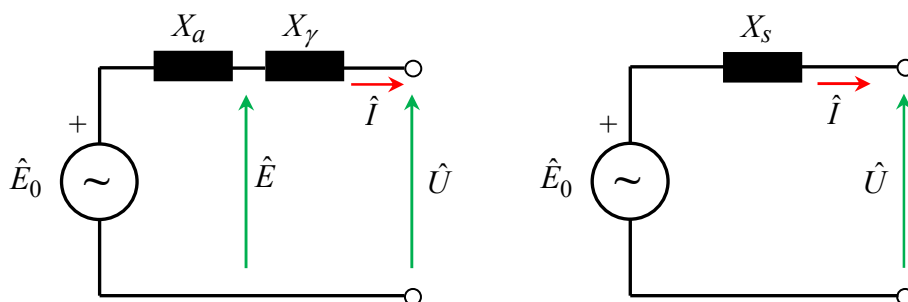
$$\hat{E} = \hat{E}_0 - jX_a \hat{I}.$$

Jednačina naponske ravnoteže se može zapisati i pomoću sinhrona reaktanse:

$$X_s = X_a + X_\gamma,$$

$$\hat{E}_0 = \hat{U} + jX_s \hat{I}.$$

Ekvivalentno kolo je bazirano na kompleksnoj notaciji u prikazu fazora, napona, struje i elektromotorne sile, tako da ove jednačine naponske ravnoteže mogu poslužiti za crtanje ekvivalentnog kola i fazorskih dijagrama sinhrona mašine. Na narednoj slici dato je ekvivalentno kolo sinhronog generatora. Prikazana su ekvivalentna kola na kojima je data stvarna elektromotorna sila E , odnosno sinhrona reaktansa. Ekvivalentno kolo se može prikazati kao redna veza elektromotorne sile praznog hoda, reaktanse reakcije armature, reaktanse rasipanja, odnosno sinhrona reaktanse. Ekvivalentno kolo prikazano na narednoj slici odnosi se na sinhronu mašinu sa cilindričnim rotorom.

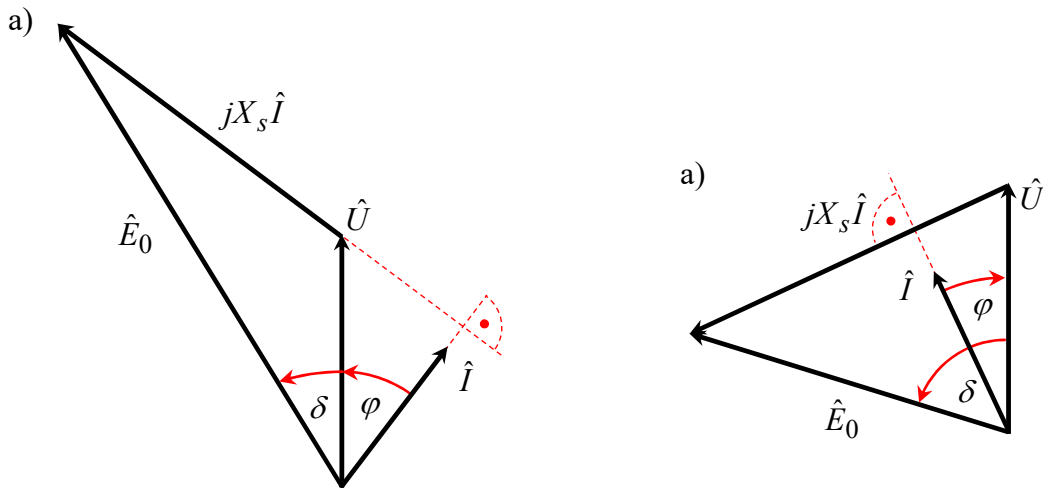


Slika 55.1. Ekvivalentno kolo sinhronog generatora.

U ekvivalentnom kolu za sinhroni motor potrebno je promeniti referentni smer za struju.

2.3. FAZORSKI DIJAGRAM SINHRONE MAŠINE SA CILINDRIČNIM ROTOROM

Ravnoteža napona može se predstaviti ekvivalentnom šemom, ali se može predstaviti i fazorskim dijagramom. Na osnovu jednačine naponske ravnoteže na narednoj slici prikazani su fazorski dijagrami sinhronog generatora. Pri crtanju fazorskog dijagrama sinhronog generatora usvaja se generatorski referentni smer za snagu tj. da je električna snaga pozitivna kada se proizvodi. Prema ovom referentnom smeru za snagu u natpobuđenom režimu rada $\cos\varphi$ je induktivan, dok je u potpobuđenom režimu rada $\cos\varphi$ kapacitivan. Na narednoj slici su nacrtani su fazorski dijagrami sinhronog generatora.

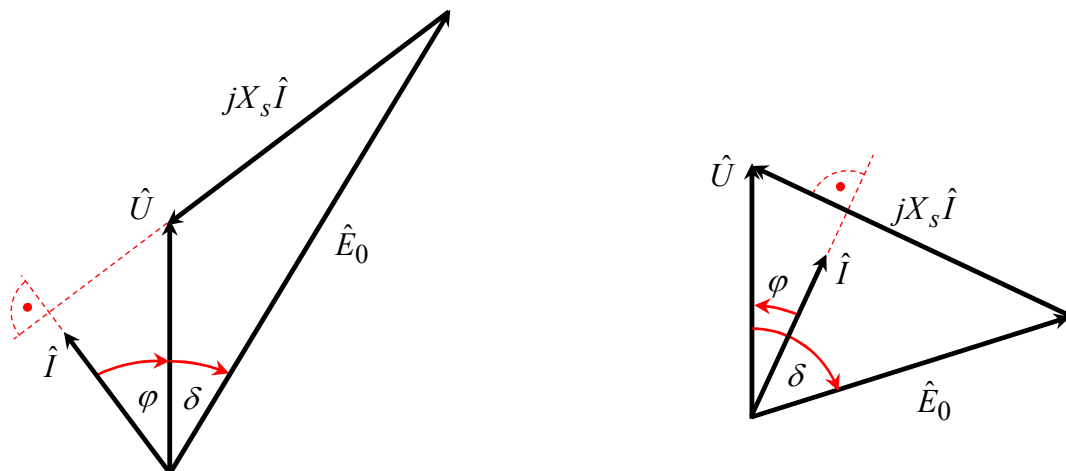


Slika 58.1. Fazorski dijagram sinhronog generatora a) natpobuđen, b) potpobuđen režim rada.

Za crtanje fazorskog dijagrama sinhronog motora se polazi od jednačine naponske ravnoteže:

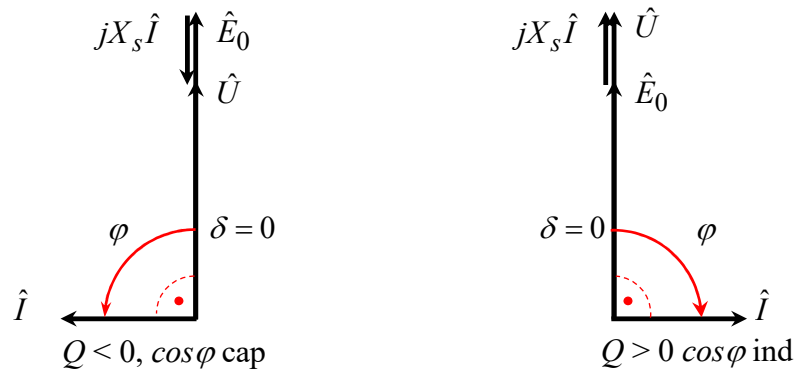
$$\hat{U} = \hat{E}_0 + jX_s \hat{I}.$$

Pri crtanju fazorskog dijagrama sinhronog motora usvaja se motorski referentni smer za snagu tj. da je električna snaga pozitivna kada se troši. Prema ovom referentnom smeru za snagu u natpobuđenom režimu rada $\cos\varphi$ je kapacitivan, dok je u potpobuđenom režimu rada $\cos\varphi$ induktivan. Na narednoj slici su nacrtani fazorski dijagrami sinhronog motora.



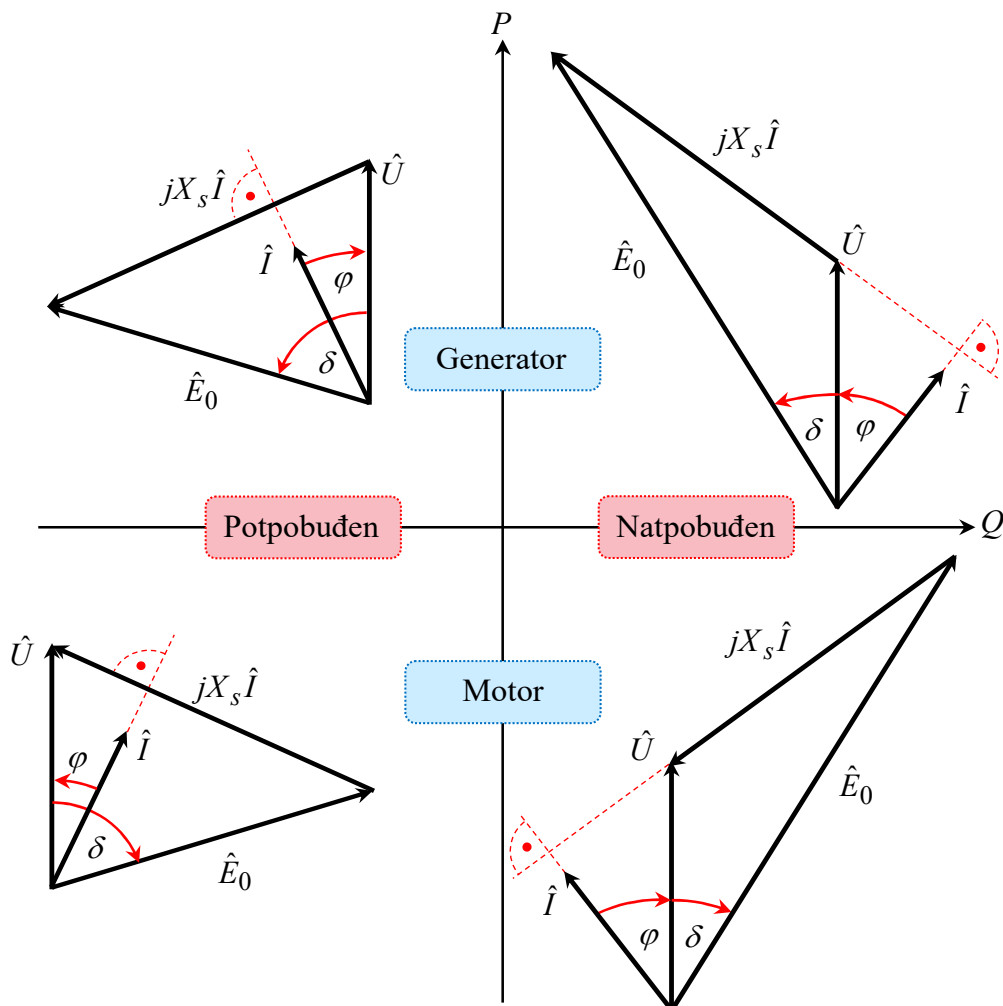
Slika 64.1. Fazorski dijagram sinhronog motora: a) natpobuđen, b) potpobuđen režim rada.

Sinhrona mašina se može naći u ulozi sinhronog kompenzatora, što je zapravo motor u praznom hodu tj. na vratilu nema mehaničkog momenta, a sinhrona mašina po potrebi proizvodi ili troši reaktivnu snagu. Na proizvodnju reaktivne snage se utiče pobudnom strujom. Na narednoj slici su prikazani fazorski dijagrami sinhronog kompenzatora kada proizvodi reaktivnu snagu – natpobuđen režim i kada troši reaktivnu snagu – potpobuđen režim rada.



Slika 58.1. Fazorski dijagram sinhronog kompenzatora a) natpobuđen, b) potpobuđen režim rada.

Sa stanovišta proizvodnje i potrošnje aktivne snage sinhronne mašine se mogu naći u ulozi motora, odnosno generatora. Sinhrona mašina može proizvoditi ili trošiti reaktivnu snagu pa se nađe u natpobuđenom odnosno potpobuđenom režimu rada. Na narednoj slici prikazani su mogući radni režimi sinhronne mašine u pogledu proizvodnje i potrošnje aktivne i reaktivne energije i odgovarajući fazorski dijagrami. Fazorski dijagrami za generator su nacrtani primereno generatorskom referentnom za snagu, dok su fazorski dijagrami za motor nacrtani primereno motorskom referentnom smeru za snagu.



Slika 64.1. Fazorski dijagrami i radni režimi sinhronne mašine.

Često se u fazorskim dijagramima pored struja armature prikazuje i struja pobude, ali se tada mora preračunati armaturna struja na pobudnu stranu ili struja pobude na armaturnu stranu. Struja pobude i struja armature teku kroz namotaje različitih naponskih nivoa i namotaje sa različitim brojem navojaka. Ako ih nanosimo na istom fazorskom dijagramu i želimo ih staviti u međusobno poređenje potrebno ih je svesti na jedan namotaj, slično kao što se kod transformatora sekundar svodi na primar. Jednačina koja nam služi kao osnov za preračunavanje armaturne struje na pobudnu stranu ili obrnuto je jednakost prvih harmonika MPS koje potiču od struja u ovim namotajima.

Struja u armaturnom trofaznom namotaju daje obrtnu MPS čiji prvi (fundamentalni) harmonik ima amplitudu:

$$F_a = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{N_a \sqrt{2} I_a}{2p} \cdot k_{na}.$$

Struja u pobudnom namotaju daje magnetopobudnu sili čiji prvi (fundamentalni) harmonik ima amplitudu:

$$F_f = \frac{4}{\pi} \frac{N_f I_f}{2p} \cdot k_{nf}.$$

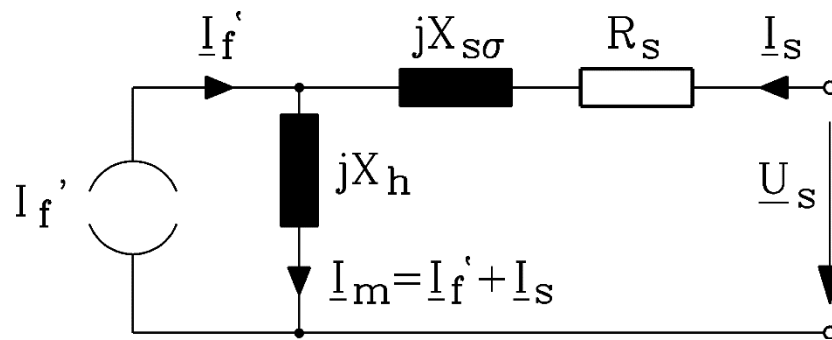
gde su: $-N_a$ broj navojaka jednog faznog armaturnog namotaja,
 $-N_f$ broj navojaka pobudnog namotaja,
 $-I_a$ efektivna vrednost armaturne struje,
 $-I_f$ pobudna struja,
 $-k_{na}$ navojni sačinilac armaturnog namotaja,
 $-k_{nf}$ navojni sačinilac pobudnog namotaja.

Struja armature svedena na pobudnu stranu I'_f može se odrediti iz jednakosti MPS:

$$\frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{N_a \sqrt{2} I_a}{2p} \cdot k_{na} = \frac{4}{\pi} \frac{N_f I'_f}{2p} \cdot k_{nf}$$

$$I'_f = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{N_a k_{na}}{N_f k_{nf}} \cdot I_a = g \cdot I_a$$

gde je I'_f struja koja kada teče kroz pobudni namotaj stvara istu MPS kao i struja armature I_a .



POGLEDAJ BINDEROV PPT PREDAVANJA SLAJD 6

2.4. REAKCIJA ARMATURE TURBOGENERATORA

OBJASNITI I DATI FAZORSKE DIJAGrame ZA REAKCIJU ARMATURE OMSKU, INDUKTIVNU I KAPACITIVNU.

Struja opterećenja u opštem slučaju nije isključivo radna, i najčešće ima i induktivnu komponentu, a ređe kapacitivnu. Prema ranije dogovorenom, to znači da će sinhroni generator morati da predaje i jalovu energiju (induktivno opterećenje), a samo ponekad i da je preuzme (kapacitivno opterećenje).

Sl.6.3.08. - Vektorski dijagrami napona i struja sinhronog generatora pri opterećenju strujom $I_{opt} = I_{stat}$: -a: (levo) pri faktoru snage jednakom jedinici - čisto radno opterećenje. Sa I_{pobrez} označena je pobuda koja rezultuje od ampernavojaka rotora (pobudne struje) i ampernavojaka statora (struje opterećenja). To je u stvari struja koja magnetiše magnetsko kolo, pa je zbog toga dodato I_u . Između I_{rot} i I_{pobrez} je ugao opterećenja β . Dijagram napona sastoji se od indukovnog napona U_i , koji stoji okomito na I_{pobrez} ; on se menja za unutrašnju razliku napona $I_{opt} X_s$ (videti i sliku 6.3.12.). Rezultanta je napon na priključkama koji treba da bude stalan. Sliku b i c videti napred.

Sl.6.3.09. - Ilustracija reakcije indukta -a: (desno) za generatorsko radno opterećenje. Na slici a je zanemaren ugao opterećenja. Na svim slikama su u kružićima "izvan statora" naznačeni smerovi i napisane vrednosti indukovnog napona na tom mestu i u posmatranom trenutku. U kružićima "unutar statora" ucrtane su vrednosti i smerovi struja na tim mestima (žlebovima) i u posmatranom trenutku. Slike b i c videti napred.

Delovanje ampernavojaka statora pri induktivnom opterećenju obrađeno je u poglavlju o kratkom spoju. Tamo je ustanovljeno da Teslino obrtno polje ampernavojaka induktivnog opterećenja deluje direktno nasuprot pobudi rotora. Ako se induktivno opterećenje shvati kao proizvodnje jalove energije, a jalova energija kao sredstvo za magnetisanje magnetnih kola, onda se nameće logičan zaključak da je za proizvodnje jalove energije potrebno povećati rotorsku pobudnu struju proporcionalno opterećenju jalovom strujom - kako bi se održao stalan napon na priključkama generatora (sl.6.3.08.b i 09.b).

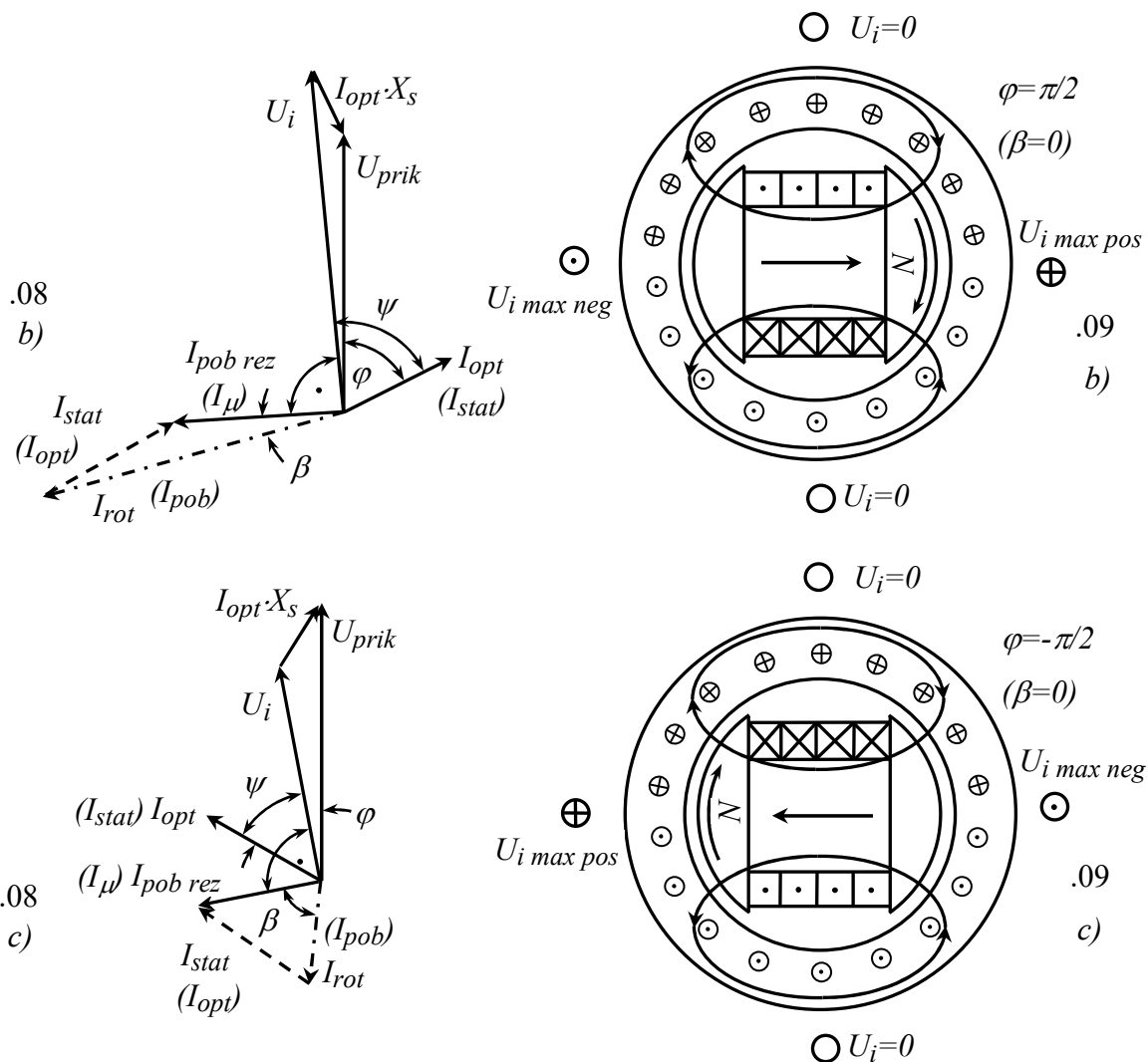
Generator je ponekad prisiljen da konzumira jalovu energiju (kapacitivno opterećenje), jer kapacitivnosti električkog sistema mogu da proizvode više jalove energije nego što induktivnosti konzumiraju. U takvim slučajevima takođe se praktički ne uspostavlja obrtni moment između statora i rotora, jer nema ni ugaone razlike između polja statora i rotora. Dakle, posmatrano sa energijske tačke, na relaciji mehanički sistem - sinhroni generator - električki sistem, jalova energija ne utiče na mehanički sistem, bez obzira da li sinhroni generator radi

kao proizvođač ili konzument jalove energije, jer jalova energija i nije energija u količinama u kojima se izražava (kilovarčasovi- videti 2.11.1.2.).

Struja induktivnog opterećenja, gledana sa strane generatora, zaostaje za naponom za $\pi/2$, dok pri kapacitivnom prednjači za isto toliki ugao. Dakle, pri opterećenju jalovom energijom, pri kojem sinhrona mašina radi kao konzument jalove energije, kroz indukt teku struje koje su pomerene za ugao veličine π u odnosu na struje kada ta ista mašina proizvodi jalovu energiju (ili pobudni učin). Ugaona razlika π znači da će ampernavojci Teslinog obrtnog polja statora pri konzumiranju jalove energije potpomagati delovanje ampernavojaka rotora, jer ga pri proizvodnji jalove energije direktno suzbijaju (sl.6.3.08.c i 09. c).

Iz aspekta prirode jalove energije, to jest da ona magnetiše magnetno kolo, prethodni zaključak je sasvim ispravan. To znači, kada je sinhrona mašina prisiljena da preuzima jalovu energiju, mora joj se smanjiti pobudna struja rotora - kako ne bi porastao napon. U objašnjavanju mehanizma konzumiranja i proizvodnja jalove energije namerno se prešlo sa sinhronog generatora na sinhronu mašinu, jer taj mehanizam važi i pri motorskom i pri generatorskom procesu rada, a na njemu se zasniva upotreba sinhrona mašine kao mašine jalove snage - zvane sinhroni kompenzator.

Zaključak za pojedinačni rad sinhronog generatora je da se frekvencija održava posredstvom automatskog regulatora brzine obrtanja koji podešava "punjenje" pogonske mašine, pa time obezbeđuje pretvaranje tražene veličine energije iz mehaničke u električnu. Dalje, automatski regulator napona održava visinu napona na priključkama generatora podešavanjem pobudne struje rotora, pa omogućuje da se električna radna energija preda, uz konstantan napon, električkom sistemu, a električna jalova energija proizvede ili konzumira, takođe uz konstantan. Umesto automatskih regulatora mogu se zamisliti, odnosno upotrebiti i ručni. Takođe se mogu zamisliti i posledice ako regulatori ne bi dejstvovali (sl.6.3.10).



Sl.6.3.08. nastavak: (b levo gore) - Kao na sl.6.3.08.a) samo uz proizvodnju jalove energije ($\varphi > 0$, $\sin \varphi > 0$, $\cos \varphi \neq 1$) i (c - levo dole) - uz apsorbovanje jalove snage ($\varphi < 0$, $\sin \varphi < 0$, $\cos \varphi \neq 1$).

Sl.6.3.09. nastavak: (b desno gore) - Pri proizvodnji jalove energije ($P=0$, prepobuđeno) i (c desno dole) - pri apsorbovanju jalove energije ($P=0$, potpobuđeno).

2.5. UGAONE KARAKTERISTIKE SINHRONE MAŠINE SA CILINDRIČNIM ROTOROM

Aktivna i reaktivna snaga trofazne sinhronne mašine se može odrediti dobro poznatim jednačinama:

$$P = 3UI \cos \varphi, \quad (2.1)$$

$$Q = 3UI \sin \varphi, \quad (2.2)$$

u kojima su napon i struja fazne vrednosti. Kada su poznate međufazne ili linijske vrednosti napona U_l i struje I_l , tada su aktivna i reaktivna snaga trofazne sinhronne mašine:

$$P = \sqrt{3}U_I I_I \cos \varphi, \quad (2.3)$$

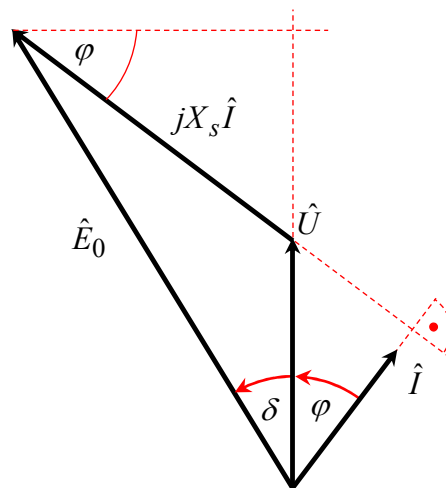
$$Q = \sqrt{3}U_I I_I \sin \varphi. \quad (2.4)$$

Kod sinhronih mašina se znatno češće snaga određuje tako što se u jednačini za snagu struja i faktor snage, odnosno $\sin \varphi$ izraze preko elektromotorne sile praznog hoda i ugla δ . Tako se dobijaju zavisnosti $P(\delta)$ i $Q(\delta)$ koje su poznate kao ugaone karakteristike sinhrona mašine.

2.5.1. Ugaona karakteristika $P(\delta)$ i $m_c(\delta)$

Jedna od ugaonih karakteristika sinhrona mašine predstavlja zavisnost aktivne snage od ugla opterećenja, $P(\delta)$. Između snage i momenta postoji linearna veza, $P = m_c \cdot \omega_m$. Pošto je brzina obrtanja rotora sinhrona mašine, ω_m , poznata i jednaka sinhronoj brzini, tada kada se odredi zavisnost $P(\delta)$ određena je i zavisnost $m_c(\delta)$. Ugaona karakteristika $m_c(\delta)$ je preskalirana ugaona karakteristika $P(\delta)$.

Da bi se došlo do ove zavisnosti polazi se od fazorskog dijagrama natpobuđenog sinhronog generatora priključenog na mrežu beskonačne snage. Otpornost statorskog namotaja se zanemaruje. Fazorski dijagram natpobuđenog sinhronog generatora prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1. Fazorski dijagram natpobuđenog sinhronog generatora.

Jednačina za aktivnu snagu trofaznog sinhronog generatora, glasi:

$$P = 3UI \cos \varphi. \quad (2.5)$$

Iz ove jednačine je potrebno eliminisati struju i faktor snage. Da bi se to postiglo, prema fazorskom dijagramu na slici 2.1. može se napisati sledeći izraz:

$$E_0 \sin \delta = X_s I \cos \varphi. \quad (2.6)$$

Sada se jednostavno dobija ugaona karakteristika, $P(\delta)$, zavisnost aktivne snage od ugla opterećenja:

$$P(\delta) = 3U \frac{E_0}{X_s} \sin \delta, \quad (2.7)$$

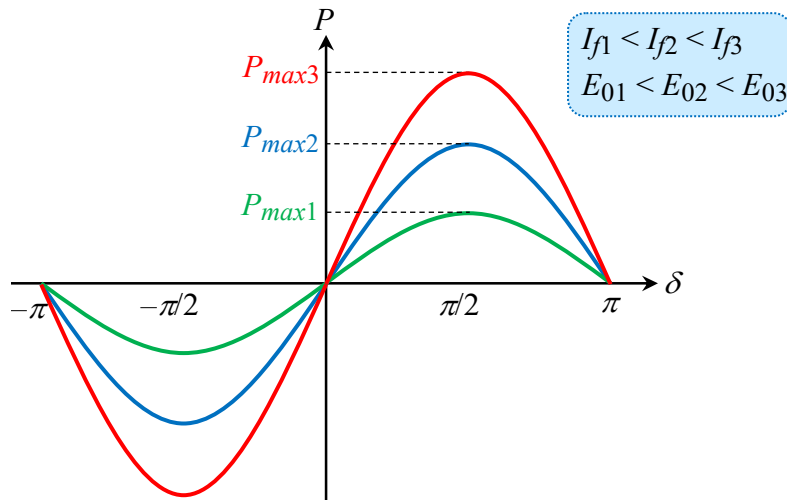
$$P(\delta) = P_{max} \sin \delta. \quad (2.8)$$

Za uglove opterećenja $-\pi/2 < \delta < 0$ sinhrona mašina se nalazi u motorskom režimu rada, dok je generatorski režim za uglove opterećenja $0 < \delta < \pi/2$.

Maksimalna snaga koju sinhrona mašina može isporučiti u mrežu:

$$P_{max} = 3U \frac{E_0}{X_s}, \quad (2.9)$$

postiče se pri uglu opterećenja od $\delta = \pm\pi/2$. Maksimalna snaga koju generator može isporučiti u mrežu određena je strujom pobude I_f , odnosno elektromotornom silom praznog hoda E_0 . Ova snaga raste sa povećavanjem struje pobude. Na slici 2.2. prikazana je familija ugaonih karakteristika za različite struje pobude.



Slika 2.2. Familija ugaonih karakteristika sinhrona mašine za tri pobudne struje.

Polazeći od fazorskog dijagrama natpobuđenog generatora došlo se do zavisnosti aktivne snage od ugla opterećenja, $P(\delta)$, međutim zavisnost data prethodnim jednačinama opisuje promenu snage od ugla δ i kod sinhronih motora.

Sada će biti uspostavljena veza između snage konverzije i ugla opterećenja, δ . Snaga obrtnog polja P_{ob} predstavlja snagu koja se prenosi obrtnim poljem sa rotor na statora ili obrnuto, to je snaga koja prolazi kroz vazdušni zazor. Kod sinhrona mašine to je i snaga konverzije $P_c = P_{ob}$. Kada sinhrona mašina radi kao generator do snage konverzije se može doći tako što se na izlaznu električnu snagu dodaju gubici koji postoje na statoru sinhrona mašine, a to su električni gubici u namotajima statora i gubici u magnetnom kolu statora:

$$P_c = P_{ob} = P + g_{es} + g_{Fe}. \quad (2.10)$$

Snaga konverzije sinhronog motora se može odrediti tako što se od ulazne električne snage oduzmu gubici koji postoje na statoru sinhrona mašine, a to su električni gubici u namotajima statora i gubici u magnetnom kolu statora.

$$P_c = P_{ob} = P - g_{es} - g_{Fe}. \quad (2.11)$$

U prethodnim jednačinama P je aktivna snaga, i određena je njena zavisnost od ugla opterećenja, $P(\delta)$. Kada se zanemare gubici u bakru statora (zanemarena omska otpornost statorskog namotaja) i zanemare gubici u magnetnom kolu:

$$P_c(\delta) = P_{ob}(\delta) = P(\delta) = 3 \frac{UE_0}{X_s} \sin \delta, \quad (2.12)$$

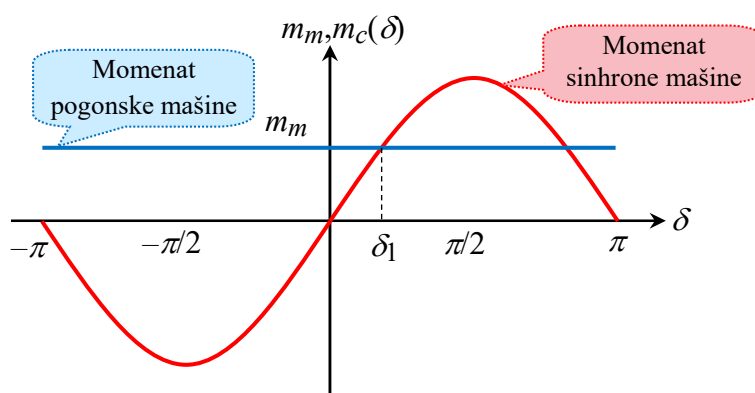
tada su aktivna snaga, snaga obrtnog polja i snaga konverzije jednake.

Kada je poznata promena snaga konverzije od ugla opterećenja, $P_c(\delta)$, lako se dolazi do zavisnosti momenta konverzije od ugla opterećenja, $M_c(\delta)$:

$$m_c(\delta) = M_c(\delta) = \frac{P_c(\delta)}{\omega_s/p} = p \frac{3U}{2\pi f} \frac{E_0}{X_s} \cdot \sin \delta, \quad (2.13)$$

gde je p broj pari polova.

U stacionarnom stanju momenat konverzije se mora izjednačiti sa mehaničkim momentom, $m_c = m_m$, da bi brzina obrtanja ostala konstantna i jednaka sinhronoj brzini. Sada se može izvesti zaključak da je ugao δ određen mehaničkim momentom. Kada sinhrona mašina radi u motorskom režimu rada, mehanički momenat predstavlja opterećenje motoru, pa se zato ugao δ zove ugao opterećenja. Na slici 2.3. su prikazani ugaona karakteristika $m_c(\delta)$ sinhrona mašine i mehanički momenat radne mašine. Vrednost ugla opterećenja δ_1 je definisana mehaničkom ravnotežom, tj. jednakošću momenata $m_c = m_m$. Mehanički momenat radne mašine ne zavisi od ugla δ .



Slika 2.3. Ugaona karakteristika sinhrona mašine i momenat radne mašine.

Snaga sinhrona mašine na granici stabilnog rada $\delta = \pm\pi/2$ predstavlja maksimalnu snagu, P_{max} , koju sinhrona mašina može konvertovati. U literaturi se ova snaga često naziva prevalnom snagom, a odgovarajući momenat prevalnim momentom.

$$m_{max} = m_c(\delta = \pi/2) = \frac{P_{max}}{\omega_s/p}. \quad (2.14)$$

Nominalni momenat sinhrona mašine je momenat koji mašina može trajno da razvija pri nominalnoj brzini obrtanja, priključena na nominalan napon i frekvenciju, nominalno pobuđena a da joj temperatura namotaja ne pređe dozvoljeno povišenje temperature. Vrednost ovog momenta je ograničena termičkim uslovima, odnosno termičkom klasom izolacije. Prevalni momenat pri nominalnoj struji je $1,5 \div 2$ puta veći od nominalnog momenta sinhrona mašine.

Prevalni moment je utoliko veći ukoliko je veća pobudna struja. Naime, ne može se upotrebiti sinhrona mašina tako da je istovremeno i preopteretiva u pogledu ispadnog momenta i da troši reaktivnu energiju (što podrazumeva malu struju pobude). Dakle, maksimalna mogućnost apsorpcije reaktivne energije (odnosno potpobuđenost sinhrona mašine) ograničena je iznosom ispadnog momenta.

2.5.2. Ugaona karakteristika $Q(\delta)$

Reaktivna snaga sinhrona mašine se takođe može izraziti u funkciji ugla opterećenja δ . Neka se ponovo pretpostavi da je sinhroni generator natpobuđen, sa fazorskim dijagramom na slici 2.1. Reaktivna snaga trofaznog sinhronog generatora je data sledećim izrazom:

$$Q = 3UI \sin \varphi. \quad (2.15)$$

Prema fazorskom dijagramu se može zapisati sledeća pomoćna jednačina:

$$E_0 \cos \delta = U + X_s I \sin \varphi, \quad (2.16)$$

što omogućuje da se iz jednačine za reaktivnu snagu dođe do ugaone karakteristike $Q(\delta)$:

$$Q(\delta) = 3 \frac{U}{X_s} (E_0 \cos \delta - U) \quad (2.17)$$

Iz jednačine (2.17) sledi da je reaktivna snaga pozitivna, $Q > 0$, kada je $E_0 \cos \delta > U$, tada se reaktivna energija proizvodi. Reaktivna snaga je negativna, $Q < 0$, kada je $E_0 \cos \delta < U$, tada se reaktivna energija troši. Ovi zaključci se odnose kako na sinhrona generatore tako i na sinhrona motore.

2.6. OBLAST STABILNOG RADA SINHRONE MAŠINE SA CILINDRIČNIM ROTOROM

Stabilan kontinualan proces pretvaranja energije pomoću sinhrona mašine može se realizovati samo na delu ugaone karakteristike na kojem je izvod momenta konverzije po uglu opterećenja pozitivan:

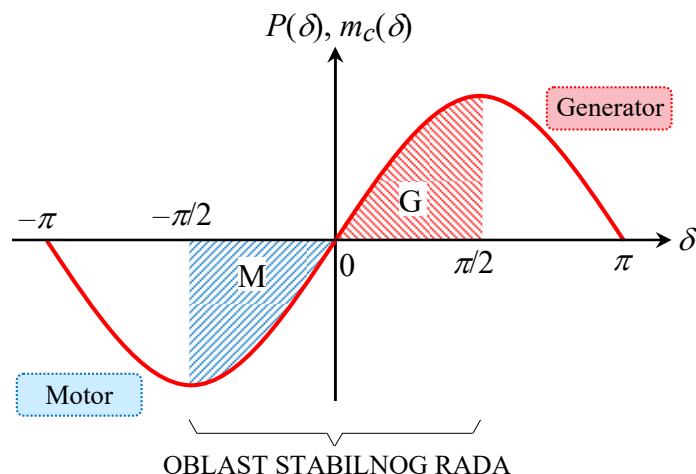
$$\frac{m_c(\delta)}{d\delta} > 0. \quad (2.18)$$

Ovaj izvod je pozitivan za uglove opterećenja $-\pi/2 < \delta < \pi/2$, što predstavlja oblast stabilnog rada sinhrona mašine. Ovaj interval uglova opterećenja obuhvata deo motorskog i deo generatorskog režima rada. Uglovima opterećenja u intervalu $-\pi/2 < \delta < 0$ definisana je oblast stabilnog rada motora, dok je stabilan rad sinhronog generatora za uglove opterećenja u intervalu $0 < \delta < \pi/2$.

Po analogiji sa izvodom momenta konverzije po uglu opterećenja (2.18), oblast stabilnog rada se može definisati i preko karakteristike $P(\delta)$, tako da uslov za stabilan rad sinhrona mašine glasi:

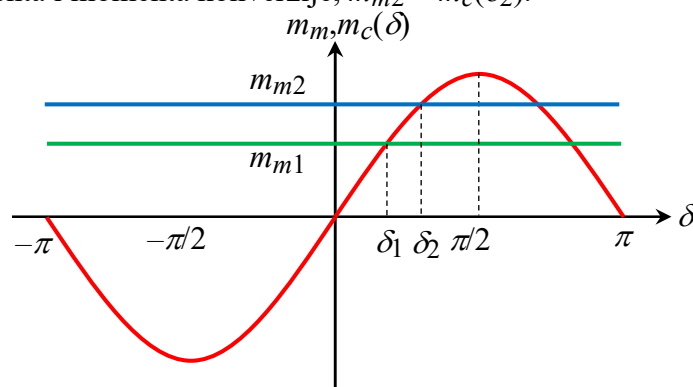
$$\frac{dP(\delta)}{d\delta} > 0. \quad (2.19)$$

Na slici 2.4. prikazana je oblast stabilnog rada sinhrona mašine sa cilindričnim rotorom.



Slika 2.4.. Ilustracija oblasti stabilnog rada sinhronog generatora sa cilindričnim rotorom.

Na slici 2.5. data je ilustracija oblasti stabilnog rada sinhronog generatora. Sinhrona mašina radi sa mehaničkim momentom m_{m1} , tada je ugao opterećenja δ_1 . Ako se mehanički momenat poveća na vrednost m_{m2} rotor sinhronog generatora će ubrzati i doći će do povećanja ugla opterećenja na vrednost δ_2 . Ugla opterećenja δ_2 odgovara momenat konverzije $m_c(\delta_2)$ koji je dovoljan da se uspostavi novo stabilno stacionarno stanje u kome je postignuta ravnoteža mehaničkog momenta i momenta konverzije, $m_{m2} = m_c(\delta_2)$.



Slika 2.5. Ugaona karakteristika sinhronog generatora i momenat radne mašine.

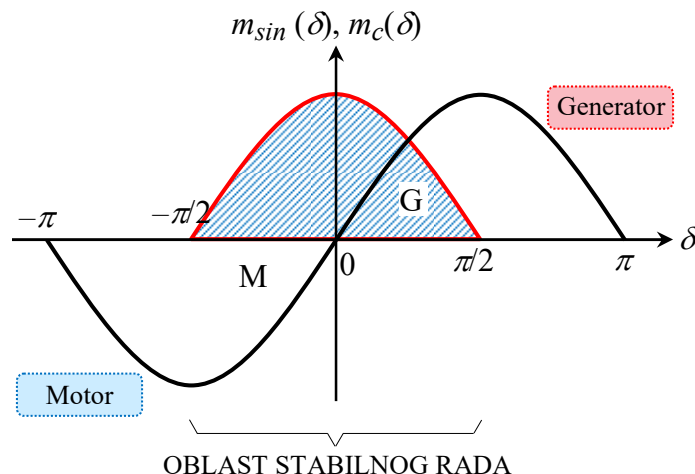
Ukoliko se posmatra granična radna tačka u kojoj je ugao opterećenja $\delta = \pi/2$, tada sinhrona mašina radi sa maksimalnim momentom koju može konvertovati, P_{max} . Pretpostavimo da pri ovom opterećenju dolazi do povećanja mehaničkog momenta, tada rotor ubrza i poveća se ugao opterećenja. Sad će povećanje ugla δ biti praćeno sa smanjenjem momenta konverzije sinhronog generatora i neće moći da se uspostavi novo stacionarno radno stanje. Mehanički momenat je porastao, a momenat konverzije je opao, rotor ubrzava i mašina ispada iz sinhronizma, brzina obrtanja više nije jednaka sinhronoj brzini, $p\omega_m \neq \omega_s$. Neće se uspostaviti novo stabilno radno stanje. Ispad iz sinhronizma bi bio praćen sa oscilacijama momenta velike amplitude i ogromnim strujama armature. U ovom režimu rada mašina se mora brzo isključiti sa mreže.

U objašnjenju stabilnog rada sinhronog generatora do sada je posmatran generatorski režim rada vrlo slično objašnjenje je u motorskom režimu rada s tim da će povećanje momenta biti praćeno sa usporavanjem rotora i odgovarajućom promenom ugla opterećenja.

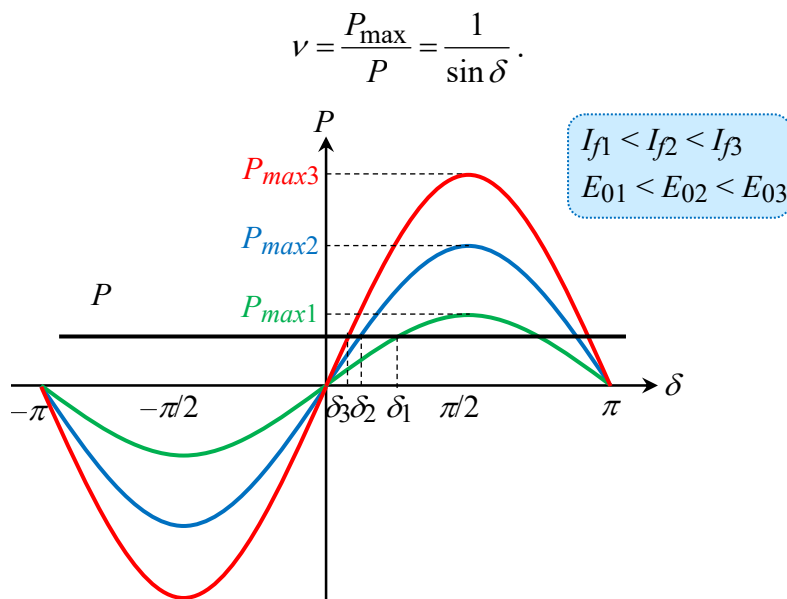
U statički stabilnom području rada $\delta \in [-\pi/2, \pi/2]$ promena ugla opterećenja δ usled dejstva poremećaja kakvo je promena opterećenja je praćena pojavom sinhronizacione komponente momenta koja održava sinhronu mašinu u sinhronizmu.

$$m_{sin} = \frac{dm_c}{d\delta} = \frac{P_{max}}{\omega_s/p} \cos \delta, \quad (2.20)$$

Tako da svako povećanje mehaničke snage na vratilu sinhronog generatora je praćeno ubrzanjem rotora i povećanjem ugla opterećenja δ . Ovo je praćeno povećanjem snage konverzije i uspostavljanjem novog stabilnog radnog režima u kome su se izjednačili mehanička snaga i snaga konverzije, a brzina obrtanja rotora je naravno ponovno sinhrona.



Koliko je sinhrona mašina daleko od ispada iz sinhronizma određeno je sačinioocem statičke preopteretivosti. Mogućnost preopterećenja je utoliko veća koliko je ugao opterećenja δ manji.



Slika. Ilustracija statičke preopteretivosti. Sa povećanjem struje pobude raste mogućnost preopterećenja.

Stabilnost sinhronog generatora pri datoj mehaničkoj snazi koja se dovodi na vratilo sinhronog generatora, a time i snazi koju generator isporučuje u mrežu, zavisi od vrednosti pobudne struje. Na prethodnoj slici je prikazana familija ugaonih karakteristika turbogeneratora za različite vrednosti pobudne struje, kao i karakteristika pogonske mašine P_m generatora.

2.7. ZA DORADU

Sila između magnetnih polja statora i rotora, a time i obrtni moment koji ona razvija, proporcionalna je sinus uga zaostajanja statorskog polja za rotorskim. Prema tome, uz jednu određenu pobudnu struju pri radu na mrežu postoji neki maksimalni moment koji može sinhroni turbogenerator (generator sa cilindričnim rotorom) da razvije kada ugao zaostajanja postane jednak $\pi/2$, odnosno za $\sin \beta = 1$. To je takozvani ispadni obrtni moment, jer kada obrtni moment usled opterećenja premaši maksimalno moguću vrednost momenta, nastaje poremećaj istovremenosti - sinhronizma. Ovaj poremećaj se naziva "ispadanje iz koraka". Otuda naziv ispadni moment za maksimalno mogući sinhroni moment generatora priključenog na krutu mrežu:

$$M_{max} \equiv M_{isp} \quad .$$

Kao što je rečeno, vrednost ispadnog momenta jednog određenog generatora (uz određenu mrežu) jeste funkcija pobudne struje:

$$M_{isp} = f(I_{pob}) \quad .$$

Razvijeni obrtni moment u posmatranom slučaju može se izraziti pomoću ugla zaostajanja i vrednosti ispadnog momenta:

$$M = -M_{isp} \cdot \sin \beta \quad .$$

Za generatorski proces rada ugao β je pozitivan, a razvijeni moment odnosno protivmoment generatora je negativan.

"Ispadanje iz koraka" predstavlja diskontinuiranost u radu sinhrona mašine, koja zbog toga ne može kao takva da obavi samostalan zalet, niti da radi u bilo kom režimu u kojem se brzina obrtanja rotora trajno razlikuje od brzine obrtanja obrtnog polja statora. Ta povezanost sa sinhronizmom karakteriše sinhronu mašinu u odnosu na ostale električne mašine, bez obzira na njihovu, sličnost u delovima, principima rada ili načinima funkcionisanja.

Osnovna karakterističnost sinhrona mašine u sistemu stalne frekvencije jeste principiska nemogućnost zaleta i kruta karakteristika moment – brzina obrtanja.

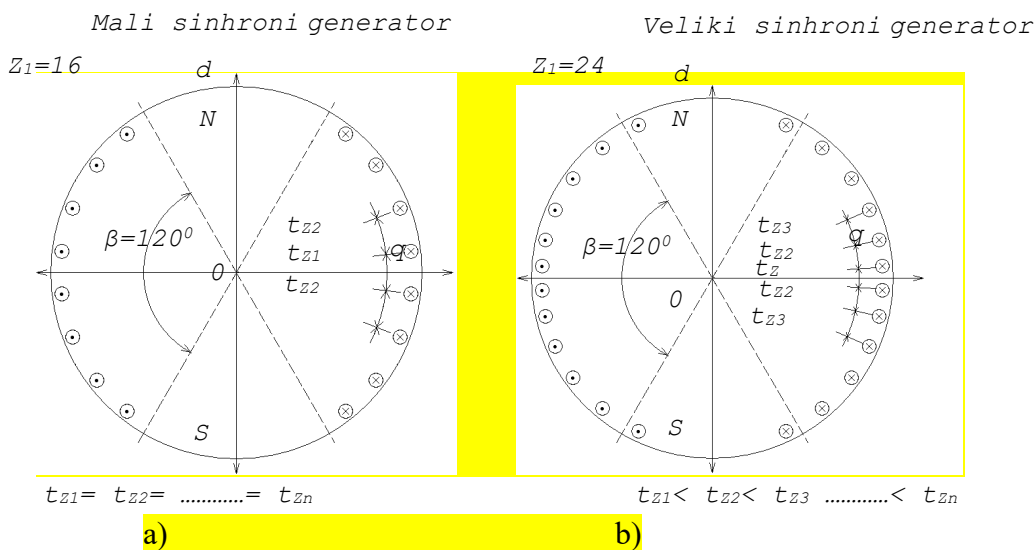
Kada se zamisli da β raste ka $\pi/2$, vidi se da kod mašina sa izraženim polovima postoji i efekat privlačenja između magnetnog polja statora i feromagnetika izraženog pola rotora. Ovaj efekat je posledica pojave opisane u poglavlju o elektromehaničkom pretvaranju energije (2.1. pod c). Ova pojava u radu sinhronih mašina manifestuje se kao dodatni obrtni sinhroni moment rotora sa izraženim polovima kod kojih je magnetna otpornost različita po obodu. Opisani dodatni moment se naziva reluktantnim momentom (reluktancija je magnetna otpornost). Zove se i reaktivni moment, jer se može smatrati da nastaje kao posledica reakcije pri pokušaju da se feromagnetik izvede iz područja najveće gustine magnetnog fluksa (6.2.03.).

Reluktantni moment otežava "ispadanje iz koraka" kako u generatorskom tako i u motorskom procesu rada. Postoje i takozvani reluktantni motori (6.7.1.).

Ožlebljenja rotora sinhronih mašina sa valjkastim rotorom su prikazana na slici 10.4. Žlebovi se tako raspoređuju da obezbeđuju kosinusoidalnu raspodelu magnetne indukcije u vazдушnom procepu. Ovaj kriterijum kod manjih sinhronih generatora možemo zadovoljiti tako da obim valjkastog rotora ožlebiamo samo na dve trećine obima sa žlebovima koji su simetrično raspoređeni u zonama koje imaju zonske širine $\beta = 120^\circ$ prema slici 10.4a.

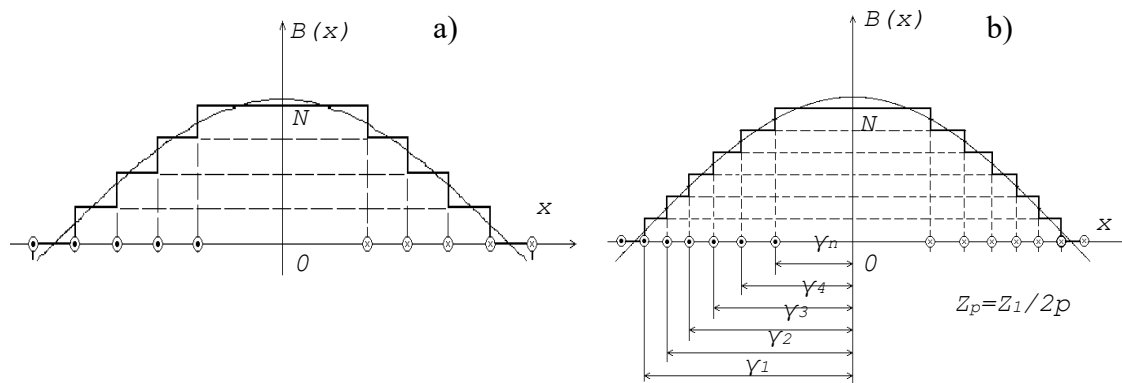
Kod većih generatora sa valjkastim rotorom postizanje željene kosinusoidalne raspodele magnetne indukcije možemo dodatno poboljšati tako što žlebove na spoljašnjem obimu rotora

postavljamo na mesta koja diktira kosinusoidalne funkcija, prema slici 10.4b. Kod ovog rešenja žlebovi su najgušći u okolini poprečne ose q , a u pravcu podužne ose gustina žlebova opada.



Sl.10.4. Raspodela žlebova po spoljašnjem obimu kod rotora valjkaste izvedbe

Obimna raspodela magnetne indukcije u vazдушnom procepu kod rotora malih (a) i velikih (b) sinhronih generatora je prikazana na slici 10.5.



Sl. 10.5. Obimna raspodela magnetne indukcije u vazдушnom procepu usled pobude rotora valjkaste izvedbe

Pobuđivanje polova se vrši pomoću jednosmerne struje pomoću pobudnog namotaja.

Dovođenje pobudne struje (I_1) za pobudu polova vrši se korišćenjem četkica i kliznih prstena koji su izolovano nasađeni na vratilo rotora. Pri tom su krajevi namotaja pobude spojeni sa kliznim prstenovima. Principijelna šema za dovođenje jednosmerne struje za pobudu prikazana je na slici 10.6.

Treba ovde napomenuti da se kod sinhronih generatora velike snage, jednosmerna struja za pobuđivanje polova obezbeđuje uz pomoć posebne budilice koja je na istom vratilu integrisana sa glavnim generatorom.

Pod magnetopobudnom silom (mps) u opštem slučaju podrazumevamo proizvod broja navojaka i vrednosti pobudne struje.

Kod primarne magnetopobudne sile rotora sa izraženim polovima to je zaista tako.

Kod rotora valjkaste izvedbe, međutim, kalemovi pobudnog namotaja su raspoređeni po žlebovima. Zbog toga kod njih možemo govoriti samo o raspodeli mps i o njihovim amplitudama.

6.10. OSCILACIJE SINHRONE MAŠINE I STABILNOST

Kada se poremeti ravnoteža između proizvedenog i nametnutog obrtnog momenta, tada se, zbog nastale razlike u momentima menja ugao opterećenja. Prilikom toga rotor se ubrza ili uspori, već prema procesu rada i smeru nastale promene momenta. Svaki ugao opterećenja, to jest prostorna fazna razlika između polja rotora i statora, prouzrokuje prvenstveno faznu razliku između napona mreže i napona indukovano u mašini. Zbog toga poteče radna struja kroz namot indukta (statora). Polje njenih ampernavojaka se privlači sa magnetnim poljem rotora. To je poznati mehanizam obrazovanja obrtnog sinhronog momenta. Ovde se samo dodaje, da se ta sila privlačenja naziva sinhronizacijska sila, jer teži da održi sinhronizam.

Usled uticaja sinhronizacijske sile ubrzava ili usporava rotorska masa i dostiže nov ugao opterećenja pri kojem razvija moment jednak novonametnutom ali ga zatim pređe zbog svoje tromosti. Usled toga se promeni smer sinhronizacijske sile i ona vuče rotor natrag - da bi se posle nekoliko oscilacija oko novog ravnotežnog položaja umirio, ako nije - prilikom prevazilaženja ravnotežnog ugla opterećenja - "ispao iz sinhronizma".

Do opisanog poremećaja ravnoteže momenata može doći bilo zbog promene nametnutog mehaničkog momenta, bilo zbog promene proizvedenog momenta kada se menja radna struja opterećenja.

Opisane oscilacije sinhrona mašine su očigledne i kada se analizira mehanički analogon obrađen u 6.2.3. Naime, zbog promene momenta - promeni se sila opruge i izazove ubrzanje ili usporenje rotora, koji zbog tromosti osciluje oko novog ravnotežnog položaja, dok se oscilovanje ne priguši usled gubitaka trenja.

Kod sinhrona mašine se oscilovanje prigušuje takođe trenjem, ali znatno više strujama kaveznog namota ili vrtložnim strujama masivnih polova i, donekle, strujama indukovanim u pobudnom namotu. Naime, i u jednom i u drugom namotu indukuju se naponi i struje zbog oscilujuće razlike u brzini obrtanja, tokom menjanja ugla opterećenja (pri čemu srednja vrednost brzine ostaje konstantna).

U vezi sa opisanim oscilovanjem postoje i pojmovi statičke i dinamičke stabilnosti sinhrona mašine. Dalja razmatranja se odnose na rad mašine priključene na krutu, odnosno relativno vrlo jaku mrežu.

Statički je stabilna ona mašina kod koje se, usled veoma (beskonačno) lagane konačne promene opterećenja, uspostavi konačna promena ugla opterećenja. Sinhrona mašina može da radi statički stabilno sve dok moment ne dostigne ispadnu vrednost. To je onda, kao što je već rečeno, kada ugao opterećenja kod turbomašina dostigne vrednost $\pi/2$, a kod rotora sa izraženim polovima je taj ugao nešto manji zbog reluktantnog momenta, koji povišava vrednost ispadnog momenta i smanjuje vrednost ispadnog ugla opterećenja. Statička stabilnost je veća pri većoj pobudnoj struji uz ostale nepromenjene uslove, jer se zbog toga poveća ispadni moment (sl.6.3.22.).

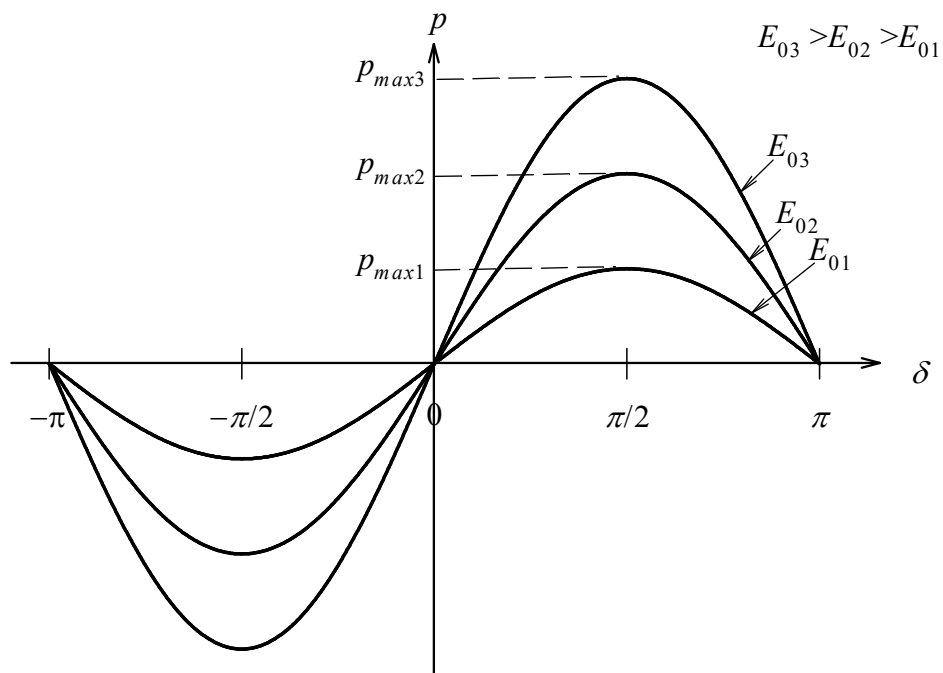
Dinamički je stabilna mašina za ona udarna opterećenja - kao i za one udare zbog kvarova u mreži - koja ne prouzrokuju "ispadanje" iz sinhronizma. Naime, usled udarnog opterećenja može doći do toga da ubrzanе mase rotora prouzrokuju premašenje maksimalne vrednosti ugla opterećenja. Dinamičku stabilnost popravljaju povećane zamajne mase, smanjenje takozvane prolazne reaktancije, odgovarajuće konstruisan kavezni namot, specijalni sistem pobuđivanja itd. To se ovde međutim, s obzirom na svrhu knjige, ne razmatra dalje.

Oscilovanja su prisilna kada, usled prirode gonjenog uređaja ili pogonske mašine (klipne), mehanički moment na osovini pulzira oko neke srednje vrednosti. Pulziranje mehaničkog momenta uz ostale iste uslove, izaziva utoliko jača oscilovanja ukoliko je njihova frekvencija bliža prirodnoj frekvenciji oscilovanja sinhrona mašine. Ovakve pulzacije mogu u pojedinačnom radu generatora da izazovu štetno treperenje električnih svetlosnih uređaja (sijalica sa usijanim vlaknom). U radu sinhronih motora mogu pulzacije momenta opterećenja da izazovu ispadanje iz sinhronizma i u slučaju kada ni maksimalna vrednost pulzirajućeg momenta ne prelazi vrednost nominalnog momenta sinhronog motora. Ova oscilovanja su prvenstveno posledica prirode rada klipnih mašina (kompresori, parne mašine, dizelski motori). Kada se frekvencija prisilnih oscilacija podudara sa frekvencijom prirodnih oscilacija mašine, tada se obično mora pribeći povećanju zamajne mase dodavanjem zamajca.

Kada više klipnih mašina radi u istoj zgradi, tada se koji put pribegava ili mora primeniti takozvano detaktiranje, to jest izbegavanje istovremenog odigravanja iste operacije u svakoj od klipnih mašina. Primenom "detaktora" može se postići da sinhrona mašine (mnogopolne) zaostaju za po $180^\circ \text{ el} = 180^\circ \text{ geom} : 2p$ i na taj način se postigne odgovarajuća "fazna razlika" između klipnih mašina (usklađena sa brojem i rasporedom agregata koji su u pogonu).

Do oscilovanja sinhronog generatora gonjenog rotacijskim primarnim motorom (turbinom) može doći i usled oscilacija koje prouzrokuje regulacijski uređaj za punjenje primarnog motora. Oscilacije generatora, mogu da izazovu oscilovanja snage i energije, koja prouzrokuju raspadanje sistema zbog ispadanja generatora iz sinhronizma.

Izložena problematika oscilovanja i stabilnosti sinhrona mašine treba da kvalitativno upozori na te pojmove ukazujući samo u osnovnim i grubim crtama na uzroke i posledice, na preventivu i intervenciju. Analiza oscilacija i stabilnosti je višestruko kompleksna problematika, jer obuhvata razna svojstva mašina koja su definisana prilikom njenog projekta i konstrukcije a u ovoj knjizi se ni ne spominju, dalje zavisi vrlo mnogo od sistema pobuđivanja, zatim od snage mreže, odnosno od stalnosti napona i frekvencije mreže, kao i od onoga što je već navedeno u ovom poglavlju.



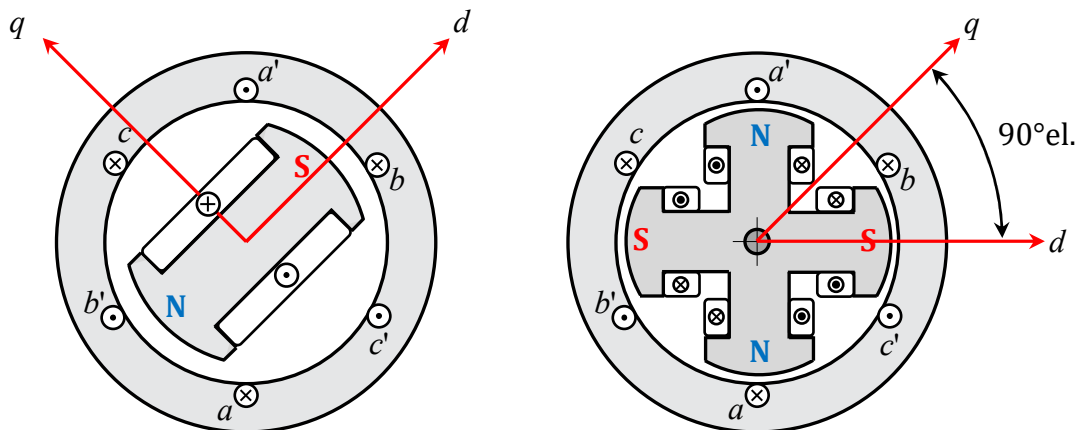
Slika. Ilustracija statičke preopteretivosti. Sa povećanjem struje pobude raste mogućnost preopterećenja.

Stabilnost sinhronog generatora pri datoj mehaničkoj snazi koja se dovodi na vratilo sinhronog generatora, a time i snazi koju generator isporučuje u mrežu, zavisi od vrednosti pobudne struje.

3. SINHRONA MAŠINA SA ISTAKNUTIM POLOVIMA

3.1. FAZORSKI DIJAGRAM SINHRONE MAŠINE SA ISTAKNUTIM POLOVIMA

Fluks u vazdušnom zazoru sinhrona mašine sa cilindričnim rotorom ne zavisi od položaja prostornog vektora MPS u odnosu na osu magnetnog pola. Kod ove mašine vazdušni zazor je konstantan i može se smatrati da je magnetna otpornost nezavisna od položaja rotora ili pravca prostornog vektora MPS. Kod sinhrona mašine sa istaknutim polovima veličina vazdušnog zazora je promenljiva duž obima mašine. Najmanji je vazdušni zazor ispod magnetnog pola, a najveći je u međupolnom prostoru, što je očigledno sa slike 3.1. Kako se veličina vazdušnog zazora menja po obimu mašine tako se menja i veličina magnetnog otpora. Najmanji magnetni otpor je u pravcu ose pola, a najveći je u simetrali između polova.



Slika 3.1. d – q koordinatni sistem kod dvopolne i četvoropolne sinhrona mašine sa istaknutim polovima.

Magnetopobudna sila rotora sa istaknutim polovima deluje duž simetrale pola, odnosno u podužnoj d – osi. Simetralom međupolnog prostora prolazi q – osa. Ove ose formiraju d – q koordinatni sistem koji je vezan za rotor i zajedno sa njime rotira. Kod dvopolne mašine d – q ose su pod uglom od 90° . Kod višepolne mašine, $p > 1$, d i q osa su i dalje pod uglom od 90° električnih.

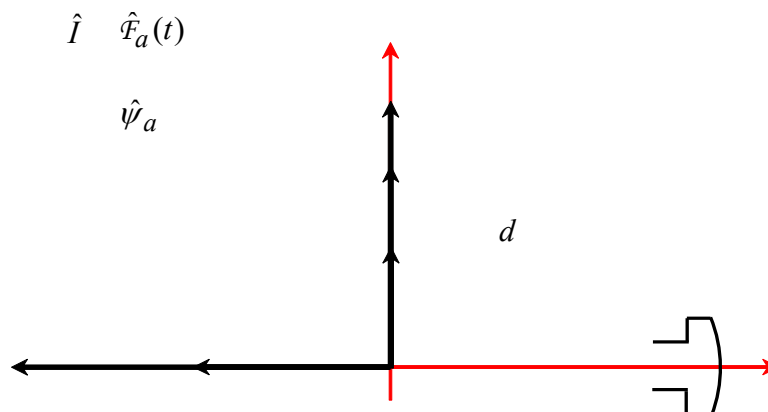
Struja u pobudom namotaju daje $\mathcal{F}_f$ koja generiše pobudni fluks ψ_f . Prostorni vektori magnetopobudne sile pobude i fluksa pobude su u pravcu d – ose. Ovaj fluks usled obrtanja rotora, u armaturnom namotaju indukuje elektromotornu silu, u vremenskom domenu:

$$e_a = \frac{d\psi_f}{dt},$$

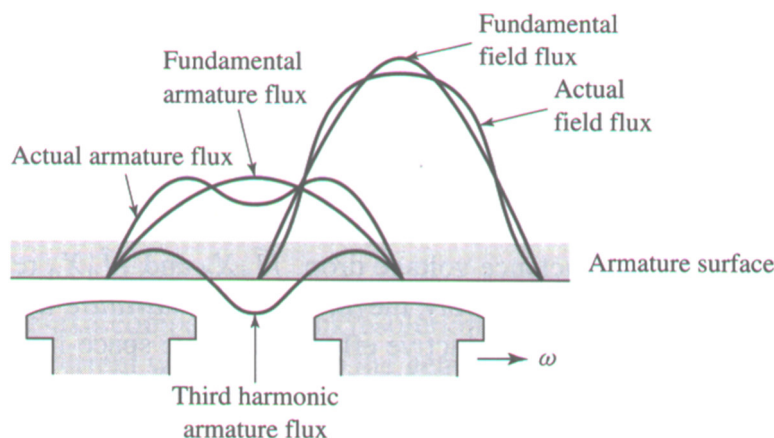
a ako se pređe u domen kompleksnih veličina, odnosno fazora:

$$\hat{E}_0 = j\omega \cdot \psi_f = \omega \cdot \psi_f \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}.$$

Elektromotorna sila kasni za fluksom za 90° , odnosno leži u pravcu q – ose, kao što je prikazano na narednom fazorskom dijagramu.



Ako se sada na krajeve armaturnog namotaja sinhronog generatora priključi omski potrošač poteći će struja armature. Fazor struje armature, I , je kolinearan sa fazorom elektromotorne sile praznog hoda E_0 . Struja armature stvara svoju MPS – MPS reakcije armature, $\mathcal{F}_a$, i ona deluje u pravcu q – ose, kao što je naznačeno na prethodnoj slici. Količnik MPS reakcije armature, $\mathcal{F}_a$, i magnetne otpornosti u pravcu q – ose određuje fluks reakcije armature, ψ_a . Na narednoj slici u razvijenom preseku su prikazane prostorne raspodele fluksa pobude i fluksa reakcije armature.

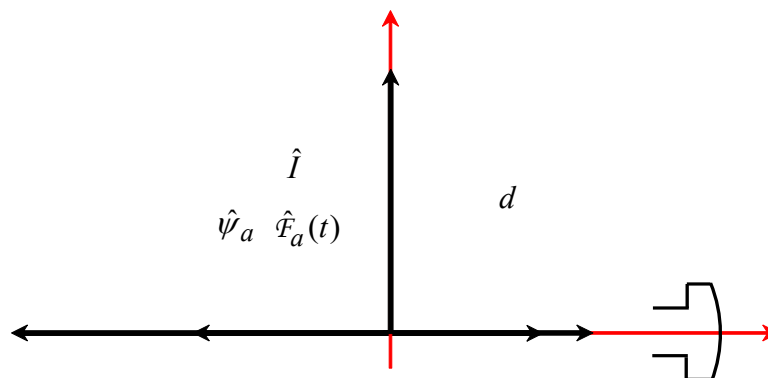


Slika. Prostorna raspodela fluksa pobude i fluksa reakcije armature za termogeni potrošač.

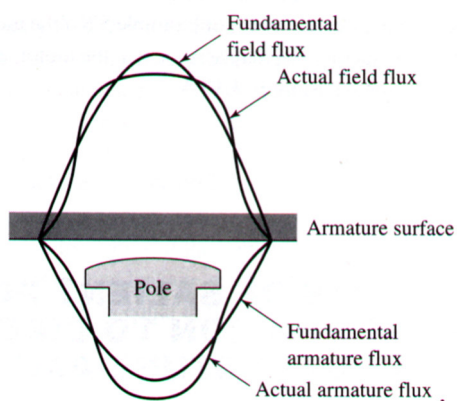
Oblikom pola postiže se da raspodela fluks po obodu vazdušnog zazora mašine bude što bliža sinusnoj raspodeli. Na prethodnoj slici prikazani su fluks pobude i njegov prvi harmonik. Zbog oblika vazdušnog zazora kroz koji MPS reakcije armature, $\mathcal{F}_a$, tera fluks reakcije armature, ψ_a , on je značajno izobličen kao što je prikazano na prethodnoj slici. Fluks reakcije armature pored osnovnog harmonika ima dominantan treći harmonik.

Treći harmonik fluksa generiše treći harmonik indukovane elektromotorne sile u faznim namotajima armature. Kako je treći harmonik nultog redosleda to se u linijskom (međufaznom) naponu ne pojavljuje treći harmonik napona.

Neka je sada generator sa istaknutim polovima opterećen sa čisto induktivnim opterećenjem. Sada zbog induktivnog karaktera potrošača struja kasni za indukovanim naponom, E_0 , za 90° kao što je prikazano na narednoj slici. MPS reakcije armature deluje duž d - ose, a u suprotnom smeru od pobudnog fluksa, ψ_f ; odnosno MPS, $\mathcal{F}_f$.



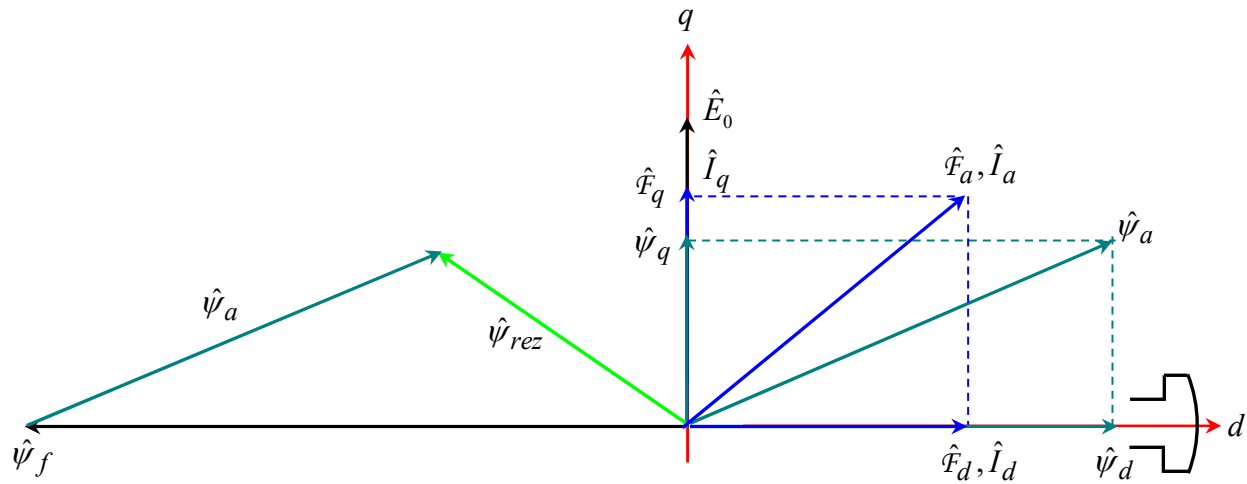
Na narednoj slici u razvijenom preseku su prikazane prostorne raspodele fluksa pobude i fluksa reakcije armature ako je na krajeva generatora priključen induktivni potrošač.



Slika. Prostorna raspodela fluksa pobude i fluksa reakcije armature za induktivni potrošač.

Fluks pobude i fluks reakcije armature, s obzirom na oblik vazdušnog zazora, su malo harmonijski izobličeni. U harmonijskom spektru se nalaze samo neparni harmonici. Kod dobro sagrađenih sinhronih mašina ovo harmonijsko izobličenje se može zanemariti tj. dovoljno je razmatrati samo osnovni harmonik.

Ako je vrednost MPS reakcije armature, F_a , ista za termogeni i za induktivni potrošač vrednost fluksa reakcije armature će biti različita za ova dva potrošača. Razlog tome je što za termogeni potrošač MPS reakcija armature deluje u pravcu q - ose, gde je vazdušni zazor najveći, a time i najveća magnetna otpornost. Kod induktivnog potrošača MPS reakcije armature deluje u pravcu d - ose gde je vazdušni zazor najmanji, a time i najmanja magnetna otpornost. Imajući na umu da je količnik MPS i magnetnog otpora fluks, zaključuje se da će za termogeni karakter potrošača ista MPS reakcija armature proterati manji fluks nego za induktivni karakter potrošača, naravno uz istu vrednost MPS reakcije armature. Dakle, vrednost fluksa reakcije armature određena je vrednošću MPS reakcije armature ali i faznim stavom potrošača koji je priključen na krajeve generatora, jer fazni stav potrošača određuje položaj MPS reakcije armature u odnosu na osu magnetnog pola. Na narednoj slici je prikazan fazorski dijagram kada je potrošač omsko induktivnog karaktera.



Kako je vazdušni zazor neravnomeran to magnetna otpornost zazora nije jedinstvena po obimu, pa nije tako jednostavno odrediti fluks reakcije armature kao količnik:

$$\psi_a = N_a \frac{\hat{F}_a}{\mathfrak{R}_m}$$

Prema ovome kod sinhronih mašina sa istaknutim polovima više nije moguće samo pomoću jedne reaktanse uzeti u obzir reakciju armature kao što je bio slučaj kod sinhronih mašina sa cilindričnim rotorom. Blondel je reakciju armature razložio na dva ortogonalna prostorna vektora u pravcu d - ose i u pravcu q - ose.

$$\hat{F}_a = \hat{F}_d + \hat{F}_q$$

Treba primetiti da je u prethodnoj jednačini prostorni vektor magnetopobudne sile reakcije armature predstavljen kao zbir dva fazora koji su locirani u pravcu d - i q - ose, $\hat{F}_d$ i $\hat{F}_q$.

Po Blondelovoj teoriji svi fazori i svi prostorni vektori odgovarajućih veličina hidrogenatora rastavljaju se na podužne i poprečne komponente. Ovo rastavljanje na dve ortogonalne komponente je u skladu sa matematičkim znanjima da su dva orta (jedinичna vektora) dovoljna za predstavljanje vektora u ravni.

Fazor struja armature se takođe razlaže na dva fazora $\hat{I}_d$ i $\hat{I}_q$ u pravcu d - ose i u pravcu q - ose. Ove komponente struje asociirane su odgovarajućim komponentama MPS reakcije armature.

$$\hat{I}_a = \hat{I}_d + \hat{I}_q$$

Vrednost reluktanse duž d i q ose se može smatrati da je poznata i definisana veličinom vazdušnog zazora, tako da su komponente fluksa reakcije armature:

$$\psi_d = N_a \frac{\hat{F}_d}{\mathfrak{R}_d} \qquad \psi_q = N_a \frac{\hat{F}_q}{\mathfrak{R}_q}$$

jednoznačno definisane, bez obzira na prostorni položaj MPS reakcije armature, a koji je određen faktorom snage potrošača. Kako je magnetni otpor po d osi manji od otpora po q osi to ψ_a i $\hat{F}_a$ nisu kolinearni. Što opet dovodi do zaključka da se armatura ne može modelovati sa samo jednom sinhronom reaktansom. Kod turbogeneratorsa su zbog ravnomernog vazdušnog zazora uvek kolinearni ψ_a i $\hat{F}_a$.

Po analogiji na sinhronu mašinu sa cilindričnim rotorom, svakom od flukseva reakcije armature ψ_d i ψ_q može se asocirati odgovarajuća reaktansa reakcije armature X_{ad} i X_{aq} , respektivno. Uz podsećanje da fluksevi ψ_d i ψ_q ulančavaju stator i rotor, a kada se uvaži fluks rasipanja armaturnog namotaja definišu se dve sinhronne reaktanse:

$$X_d = X_{ad} + X_\gamma$$

$$X_q = X_{aq} + X_\gamma$$

Odnos sinhronih reaktansi mašine sa istaknutim polovima (hidrogeneratora, dizel generatora, reluktantnih motora) je $X_q/X_d = 0,5 \div 0,8$. Sinhrona mašina sa cilindričnim rotorom može se posmatrati kao specijalan slučaj mašine sa istaknutim polovima kod koje je $X_d = X_q = X_s$. Kod sinhronne mašine sa cilindričnim rotorom 2/3 obima je ožlebljeno, sa najčešće otvorenim žlebovima za smeštaj pobudnog namota, a na 1/3 obima predstavlja „veliki zub“ što dovodi da vazdušni zazor nije stalan po obimu mašine manji je u oblasti „veliki zub“, a ekvivalentno je nešto veći u zoni ožlebljenja. Ovo ima za posledicu da je kod sinhronih mašina sa cilindričnim rotorom $X_q/X_d = 0,8 \div 0,9$.

Za generator sa cilindričnim rotorom, u jednačini naponske ravnoteže armaturnog namotaja:

$$\hat{E}_0 = \hat{U} + jX_s \hat{I},$$

poslednji sabirak ekvivalentira uticaj reakcije armature. Prema upravo izloženoj teoriji reakcija armature se razlaže na dve komponente koje se u jednačini naponske ravnoteže uvažava dva sabirka, koja se sada pojavljuju u jednačini naponske ravnoteže:

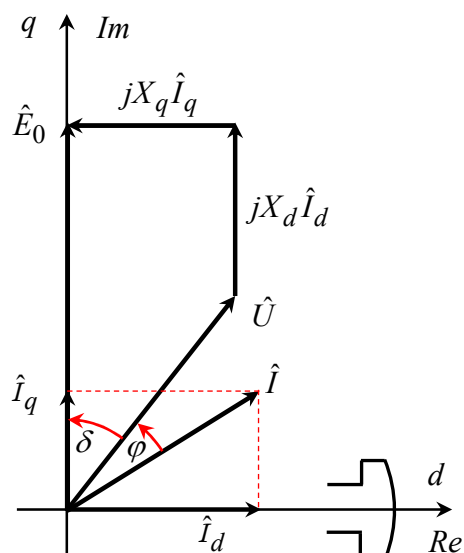
$$\hat{U} = \hat{E}_0 + jX_d \cdot \hat{I}_d + jX_q \cdot \hat{I}_q.$$

Jednačina naponske ravnoteže sinhronog motora sa istaknutim polovima se jednostavno dobija promenom predznaka kod fazora struje:

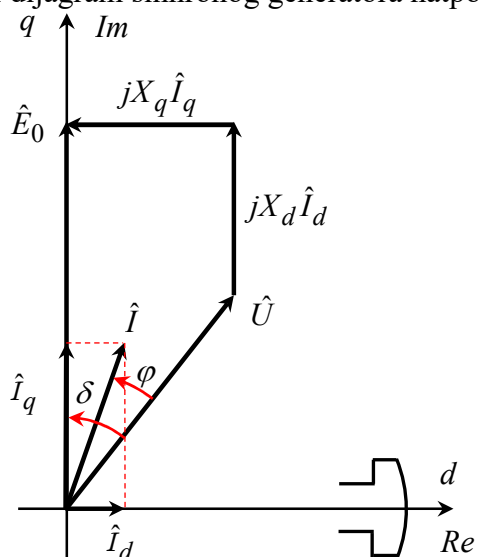
$$\hat{E}_0 = \hat{U} + jX_d \cdot \hat{I}_d + jX_q \cdot \hat{I}_q.$$

Ove jednačine mogu poslužiti za konstruisanje fazorskog dijagrama SM sa istaknutim polovima u generatorskom i motorskom režimu rada.

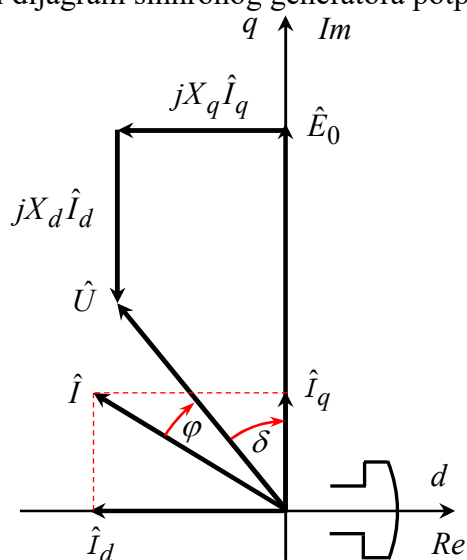
Pri crtanju fazorskog dijagrama treba se prisetiti da se d osa nalazi u osi pola i da je sa njome kolinearan pobudni fluks, a da poprečna osa q, prednjači za ugao $\pi/2$ u odnosu na d osu. Elektromotorna sila praznog hoda $\hat{E}_0$ se nalazi na q osi. Fazor napona kasni za fazorom elektromotorne sile praznog hoda za ugao opterećenja δ u generatorskom režimu rada. U motorskom režimu rada fazor napona prednjači fazoru elektromotorne sile za ugao δ . Fazor napona se dobija tako što se na elektromotornu silu praznog hoda dodaju omski pad napona $R \cdot \hat{I}$, i padovi napona na sinhronim reaktansama $jX_d \cdot \hat{I}_d$ i $jX_q \cdot \hat{I}_q$.



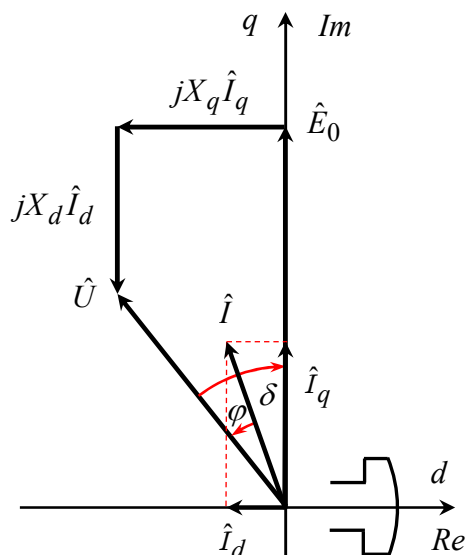
Slika 58.1. Fazorski dijagram sinhronog generatora natpobuđen režim rada.



Slika 58.1. Fazorski dijagram sinhronog generatora potpobuđen režim rada.

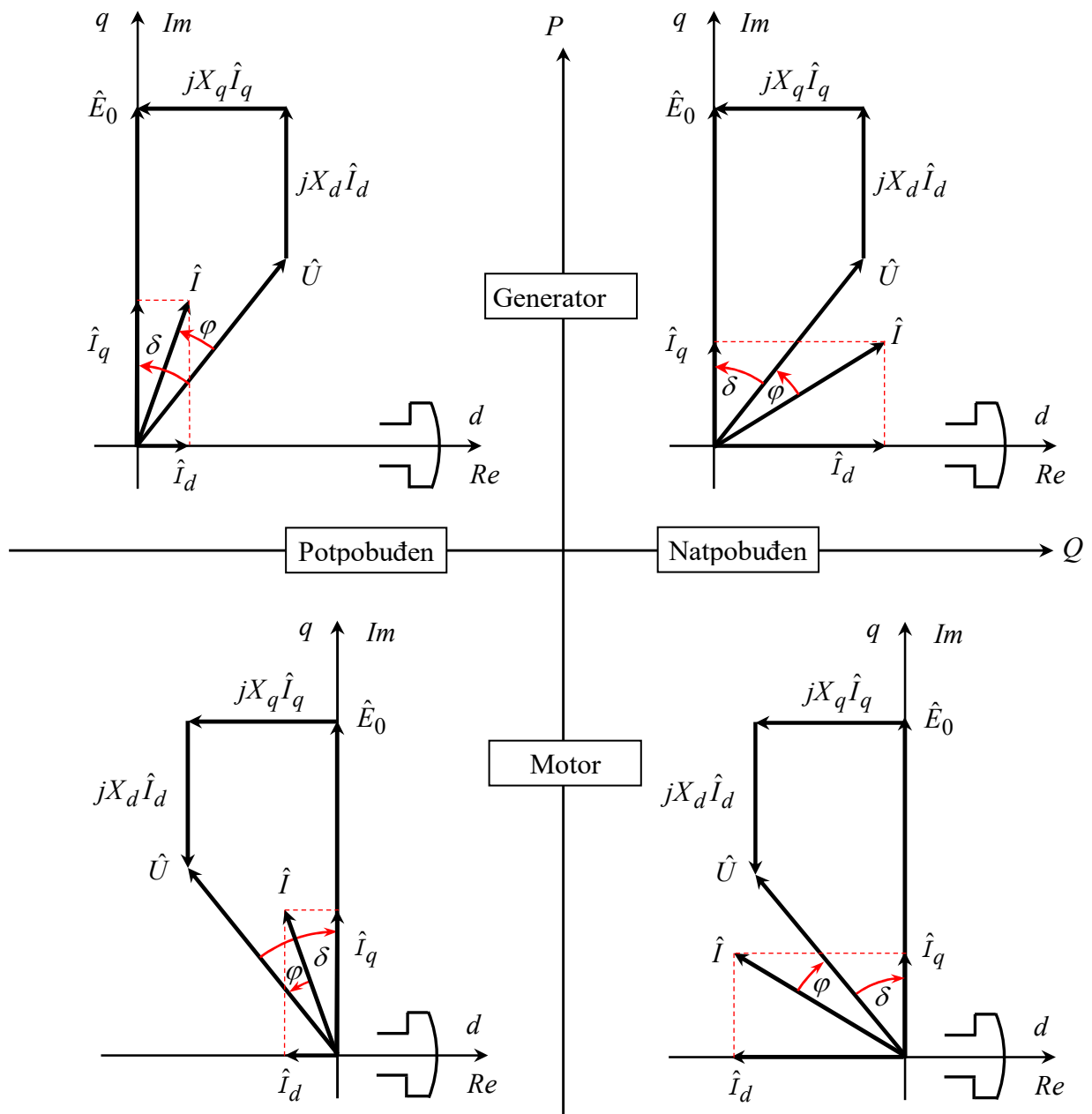


Slika 58.1. Fazorski dijagram sinhronog motora natpobuđen režim rada.



Slika 58.1. Fazorski dijagram sinhronog motora potpobuđen režim rada.

Na narednoj slici prikazani su mogući radni režimi sinhronne mašine u pogledu proizvodnje i potrošnje reaktivne energije i odgovarajući fazorski dijagrami za sinhronu mašinu sa istaknutim polovima. Fazorski dijagrami za generator su nacrtani primereno generatorskom referentnom za snagu, dok su fazorski dijagrami za motor nacrtani primereno motorskom referentnom smeru za snagu.

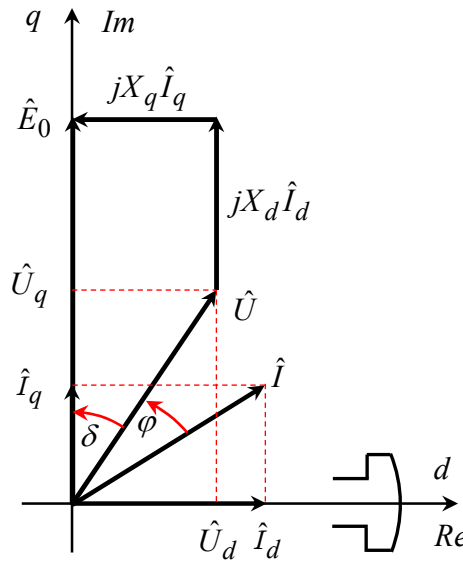


Slika 64.1. Fazorski dijagrami i radni režimi sinhrona mašine sa istaknutim polovima.

3.2. UGAONE KARAKTERISTIKE SINHRONE MAŠINE SA ISTAKNUTIM POLOVIMA

U stacionarnom režimu (ustaljenom stanju) naponi, struje, elektromotorna sila, brzina obrtanja rotora imaju konstantne vrednosti. Ugaone karakteristike su zavisnosti aktivne i reaktivne snage od ugla opterećenja $P(\delta)$ i $Q(\delta)$ sinhrona mašine koja se nalazi u stacionarnom

režimu rada. Da bi se došlo do ovih zavisnosti polazi se od fazorskog dijagrama natpobuđenog sinhronog generatora koji je prikazan na narednoj slici.



Slika. Fazorski dijagram sinhronog generatora u natpobuđenom režimu.

Položaj kompleksne ravni u kojoj se predstavljaju fazori napona i struje u ustaljenom stanju može biti proizvoljan. Neka se realna osa poklapa sa d – osom, a imaginarna osa sa q – osom, sinhrono rotirajućeg $d - q$ koordinatnog sistem. Fazori napona i struje se mogu predstaviti pomoću sume fazora po d i q osi ili preko projekcija na d i q ose:

$$\hat{U} = \hat{U}_d + \hat{U}_q = U_d + jU_q \quad \hat{I} = \hat{I}_d + \hat{I}_q = I_d + jI_q$$

Prema datom fazorskom dijagramu, d i q projekcije fazora napona i struje su:

$$\begin{aligned} U_d &= U \cdot \sin \delta & U_q &= U \cdot \cos \delta \\ I_d &= I_a \sin(\delta + \varphi) & I_q &= I_a \cos(\delta + \varphi) \end{aligned}$$

Kompleksna snaga mašine se može izračunati koristeći sledeći izraz:

$$\begin{aligned} \hat{S} &= 3\hat{U} \cdot \hat{I}^* = 3(U_d + jU_q) \cdot (I_d - jI_q) \\ \hat{S} &= 3 \left[(U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q) + j(U_q \cdot I_d - U_d \cdot I_q) \right] = P + jQ \end{aligned}$$

Iz prethodne jednačine je očigledno da su aktivna i reaktivna snaga definisane preko d i q komponenta napona i struje:

$$\begin{aligned} P &= 3(U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q) \\ Q &= 3(U_q \cdot I_d - U_d \cdot I_q) \end{aligned}$$

Prema datom fazorskom dijagramu mogu se napisati dve pomoćne jednačine kako bi se izrazile d i q komponente struje:

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

$$E_0 = U \cos \delta + X_d \cdot I_d \Rightarrow I_d = \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d}$$

Kada se u jednačinu za aktivnu snagu (električna snaga koja izlazi iz generatora) smene komponente napona, a potom i struje:

$$P = 3 \left(U \cdot \sin \delta \cdot I_d + U \cdot \cos \delta \cdot I_q \right) = 3 \left(U \cdot \sin \delta \cdot \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d} + U \cdot \cos \delta \cdot \frac{U}{X_q} \sin \delta \right),$$

dobija se kako električna snaga zavisi od ugla opterećenja:

$$P(\delta) = 3U \frac{E_0}{X_d} \cdot \sin \delta + 3 \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta.$$

Kod sinhrona mašine snaga konverzije je isto što i snaga obrtnog polja. Snaga konverzije je veća od predate električne snage sinhronog generatora P , za iznos gubitaka u namotajima i u gvožđu statora:

$$P_c = P_{obrtno} = P + g_{es} + g_{Fe}.$$

Očigledno je da ako se zanemare gubici u namotajima, kao i gubici u gvožđu statora, da su snaga konverzije, snaga obrtnog polja i predata električna snaga generatora iste:

$$P_c = P_{obrtno} = P(\delta) = 3U \frac{E_0}{X_d} \cdot \sin \delta + 3 \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta.$$

Momenat i snaga su međusobno povezani preko mehaničke ugaone brzine obrtanja rotora. Rotor sinhrona mašine se obrće mehaničkom sinhronom brzinom koja je p puta manja od električne sinhrona brzine, $\omega = 2\pi f_s$. Uz poznatu zavisnost $P(\delta)$ dolazi se do zavisnosti momenta konverzije od ugla opterećenja:

$$m_c(\delta) = \frac{P(\delta)}{\omega/p} = \frac{3p}{p} \left[U \frac{E_0}{X_d} \cdot \sin \delta + 3 \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta \right] \quad [\text{Nm}].$$

Da bi se dobio bolji osećaj o kolikom se opterećenju SM radi bez obzira na njenu veličinu koristi se sistem relativnih jedinica r.j. (*per unit* – p.u.). Bazna snaga pri normalizaciji je nominalna prividna snaga. Normalizovana vrednost snage i razvijenog momenta konverzije izražene u relativnim jedinicama su iste:

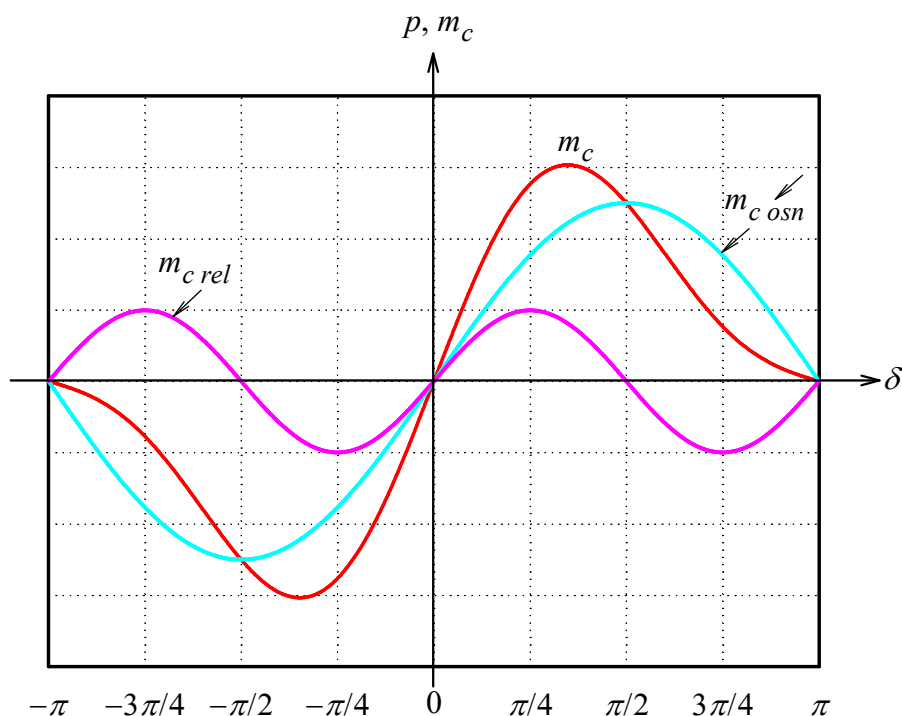
$$p(\delta) = \underbrace{u \frac{e_0}{x_d} \cdot \sin \delta}_{\text{Osnovna}} + \underbrace{\frac{u^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\delta}_{\text{Reluktantna}} = m_c \quad [\text{r.j.}].$$

$$m_c(\delta) = m_{c \text{ osn}} + m_{c \text{ rel}}.$$

U prethodnoj jednačini napon, elektromotorna sila praznog hoda i reaktanse su u relativnim jedinicama. Prvi sabirak predstavlja osnovnu komponentu momenta koja postoji usled uzajamne interakcije magnetnih polja koja potiču od armaturne struja i struje u pobudnom namotaju. Ukoliko sinhrona mašina ostane bez pobudne struje neće i osnovna komponenta snage. Drugi sabirak postoji usled različite reluktanse po obimu mašine, pa otud i naziv

reluktantna komponenta momenta. Ova komponenta je nezavisan od pobudne struje. Očigledno je da je reluktantna komponenta utoliko veća što je X_q manje od X_d .

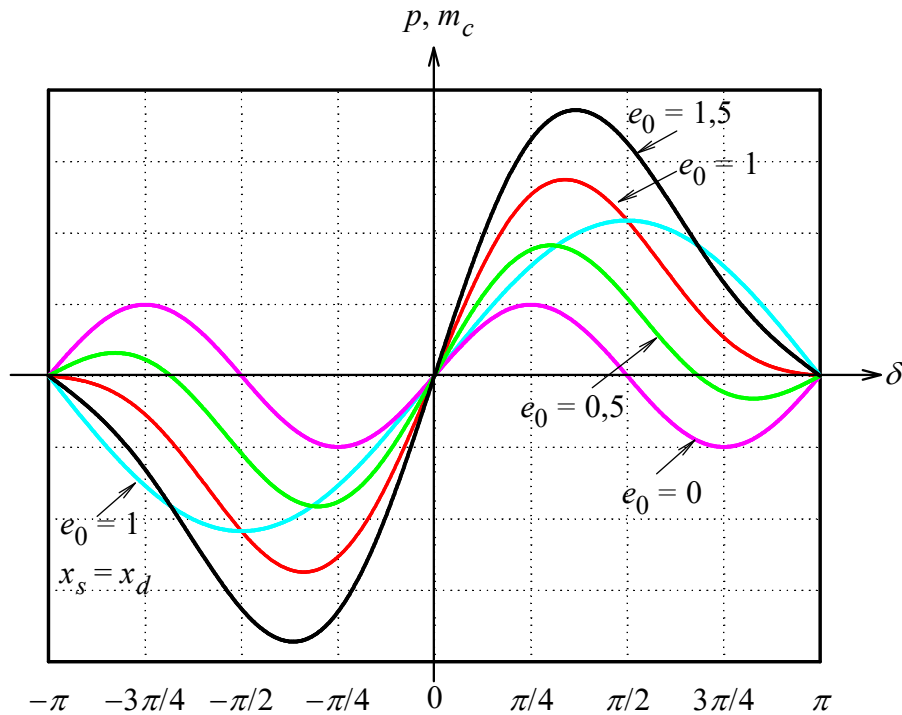
Na narednoj slici je prikazana ugaona karakteristika $P(\delta)$ kao i osnovan i reluktantna komponenta sinhrona mašine sa istaknutim polovima.



Slika. Ugaona karakteristika sinhrona mašine sa istaknutim polovima

Na narednoj slici je prikazana familija ugaonih karakteristika sinhrona mašine sa istaknutima polovima, za različite vrednosti elektromotorne sile praznog hoda. Prikazane su karakteristike za 0,5, 1 i 1,5 u odnosu na nominalnu vrednost. Sa porastom elektromotorne sile praznog hoda raste vrednost vršne snage koju sinhrona mašina može konvertovati. Takođe, prikazan je karakteristika ekvivalentnog turbogeneratora čija je sinhrona reaktansa jednaka podužnoj sinhronoj reaktansi hidrogenatora $x_s = x_d$, a pobuda mu je nominalna.

Reluktantna komponenta povećava maksimalnu snagu koja se može odati bez gubitka sinhronizma. Prema prirodi reluktantne komponente, za istu predatu snagu sinhrona mašina sa istaknutim polovima radi sa manjim uglom opterećenja od turbogeneratora. Nagib karakteristike $(dp/d\delta)$ hidrogenatora je veći nego kod turbogeneratora pa se oscilacije rotora pri naglom opterećenju ili rasterećenju brže priguše nego kod turbogeneratora.



Slika. Familija ugaonih karakteristika sinhrona mašine sa istaknutim polovima za različitu pobudu

3.3. OBLAST STABILNOG RADA SINHRONE MAŠINE SA ISTAKNUTIM POLOVIMA

Reluktantna komponenta momenta sa jedne strane povećava vrednost ispadne snage, a zbog nje se ispadna snaga dostiže pri uglu opterećenja koji je manji od $\pi/2$. Sa prethodne slike je očigledno da je oblast stabilnog rada sinhrona mašine sa istaknutim polovima manja od oblasti stabilnog rada turbogeneratora $\delta \in [-\pi/2, \pi/2]$. Takođe sa slike je očigledno da se oblast stabilnog rada smanjuje kako se smanjuje vrednost pobudne struje. Kada hidrogenerator ostane bez pobude oblast stabilnog rada je $\delta \in [-\pi/4, \pi/4]$. Na granici stabilnog rada sinhrona mašina radi sa maksimalnom snagom koju može konvertovati – ispadna snaga. Ugao opterećenja pri kome se dostiže maksimalna snaga predstavlja kritičan ugaon opterećenja – δ_{kr} . Za ovaj ugaon opterećenja ugaone karakteristike imaju maksimalnu vrednost $p(\delta_{kr}) = p_{max}$.

Kritičan ugaon opterećenja zavisi od parametara sinhrona mašine x_s i x_d i pobude. Ako se pođe od ranije poznatog uslova za stabilan rad sinhrona mašine:

$$\frac{dp}{d\delta} > 0,$$

može se doći do kritičnog ugla opterećenja:

$$\frac{dp(\delta)}{d\delta} = u \frac{e_0}{x_d} \cdot \cos \delta + u^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \cos 2\delta,$$

$$\frac{dp(\delta)}{d\delta} = 0 \quad \Rightarrow \delta_{kr},$$

$$\cos \delta_{kr} = -\frac{x_q}{x_d - x_q} \frac{e_0}{4u} \pm \sqrt{\left(\frac{x_q}{x_d - x_q} \frac{e_0}{4u}\right)^2 + \frac{1}{2}}.$$

Zbog reluktantne komponente momenta ispadni momenat se dostiže pri uglu opterećenja koji je manji od $\pi/2$. Takođe sa slike se vidi da će sinhrona mašina sa istaknutim polovima zbog reluktantne komponente momenta imati veći ispadni momenat nego mašina sa cilindričnim rotorom pri istoj struji pobude i uz pretpostavku da su im sinhronne reaktanse iste tj. $X_s = X_d$

Ugaona karakteristika $Q(\delta)$ se može dobiti ako se u jednačinu

$$Q = 3(U_q \cdot I_d - U_d \cdot I_q)$$

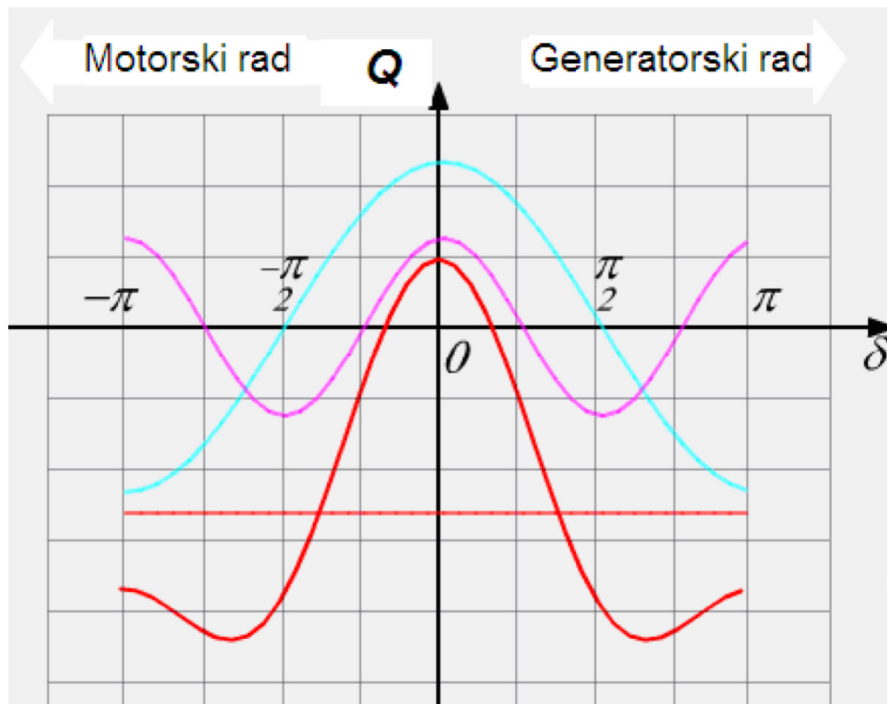
smene d i q komponente napona i struje:

$$Q(\delta) = 3U \frac{E_0}{X_d} \cdot \cos \delta + 3 \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos 2\delta - 3 \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right)$$

Normalizovana reaktivna snaga sinhrona mašine:

$$q(\delta) = u \frac{e_0}{X_d} \cdot \cos \delta + 3 \frac{u^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \cos 2\delta - 3 \frac{u^2}{2} \left(\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q} \right).$$

Na narednoj slici je prikazana ugaona karakteristika $Q(\delta)$ kao i pojedine komponente iz prethodne jednačine.



Slika. Ugaona karakteristika sinhrona mašine sa istaknutim polovima.

Sinhroni kompenzatori su sinhronne mašine u motorskom praznom hodu. Njihova glavna uloga je proizvodnja i potrošnja reaktivne snage. proizvode i troše reaktivnu snagu. Ako se u prethodnu jednačinu uvrsti da je $\delta = 0$ dobija se reaktivna snaga sinhronog kompenzatora.

$$q(\delta) = \frac{u}{x_d}(e_0 - u).$$

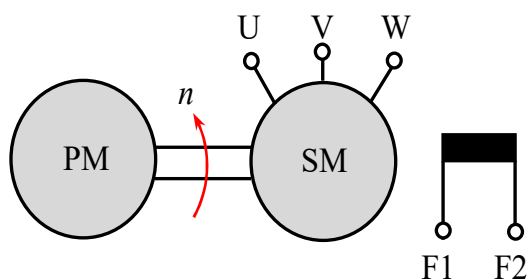
4. PRAZAN HOD I KRATAK SPOJ SINHRONE MAŠINE

4.1. KARAKTERISTIKA PRAZNOG HODA

U praznom hodu mašina je neopterećena. Prazan hod može biti motorski i generatorski. U motorskom praznom hodu sinhrona mašina se napaja iz električne mreže, a na vratili nema mehaničkog opterećenja. Mašina iz mreže uzima energiju da pokrije gubitke praznog hoda. U generatorskom praznom hodu sinhrona mašina nije priključena na mrežu. Rotor se obrće pogonskom mašinom, i ona pokriva gubitke praznog hoda. Lakše je obaviti ogled generatorskog od motorskog praznog hoda. Sinhrona mašina ima svoju pobudu, pa zbog toga ne mora biti vezana za mrežu kao asinhrona tokom ogleda praznog hoda. Za razliku od sinhrona mašine kod asinhrona mašina se može realizovati samo motorski prazan hod.

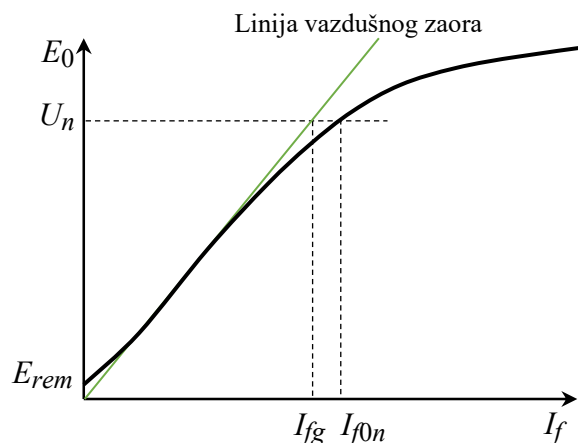
U ogledu praznog hoda određuje se karakteristika praznog hoda i gubici u praznom hodu. Karakteristika praznog hoda je karakteristika magnetnog kola (karakteristika magnećenja) $B = f(\text{MPS})$, odnosno $\Phi = f(I_f)$. Umesto da se mere magnetne veličine B , Φ meri se električna veličina koja je njihova manifestacija – meri se napon, odnosno elektromotorna sila praznog hoda E_0 , umesto B ili Φ . Dakle karakteristika praznog hoda sinhrona mašine je zavisnost $E_0 = f(I_f)$.

Prilikom generatorskog praznog hoda sinhrona mašina se pokreće pogonskom mašinom, slika 4.1. Tokom ogleda praznog hoda menja se pobudna struja sinhrona mašine i meri vrednost napona na priključcima (armature) za konkretne vrednosti struje pobude. Izmereni napon predstavlja indukovanu elektromotornu silu praznog hoda. Pobudna struja se povećava sve do dostizanja nominalne vrednosti.



Slika 4.1. Prikaz sinhrona mašine u praznom hodu.

Karakteristika praznog hoda sinhrona mašine prikazana je na slici 4.2.

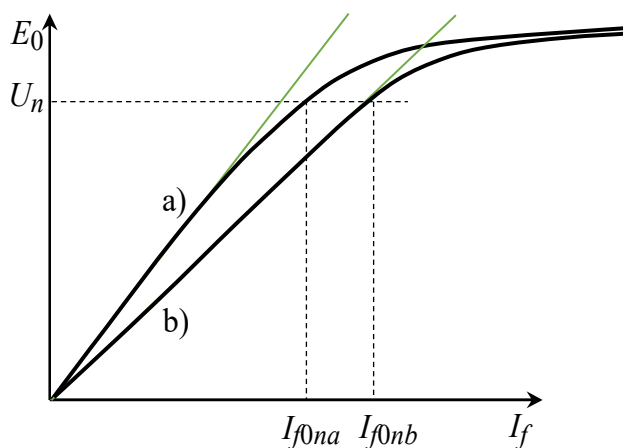


Slika 4.2. Karakteristika praznog hoda sinhrona mašine.

Linija koja prolazi linearnim delom karakteristike praznog hoda zove se linija vazdušnog zazora. Po ovoj liniji se menja elektromotorna sila praznog hoda sa promenom pobudne struje, kada je zanemareno zasićenje magnetnog kola. Linija vazdušnog zazora pokazuje kolika je potrebno magnetopobudne sile da se pokrije pad magnetnog napona na vazdušnom zazoru. Na slici je sa I_{fg} označena potrebna struja pobude da bi se pokrio pad magnetnog napona na vazdušnom zazoru – struja vazdušnog zazora. Ova struja je potrebna da se dobije nominalan napon armature u praznom hodu, ako je zanemareno zasićenje magnetnog kola, odnosno magnetno kolo je tako dimenzionisano da se radna tačka nalazi na linearnom delu karakteristike praznog hoda. Na prethodnoj slici je pokazano da karakteristika praznog hoda polazi iz koordinatnog početka. To je tačno samo za nove mašine koje nisu bivale magnetno pobudene. Ako generator pobudimo – propustimo struju kroz pobudni namot, pa razbudimo ostaje remanentni (zaostali) magnetizam koji kod visokonaponskih generatora može indukovati napon E_{rem} nekoliko 100 V pri obrtanju sinhronom brzinom.

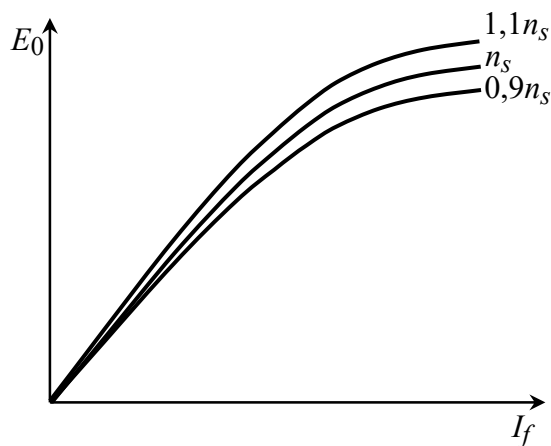
Sa karakteristike praznog hoda se može odrediti vrednost potrebne pobudne struje da bi se u praznom hodu dobio nominalni napon indukovano u armaturi, to je nominalna struja pobude praznog hoda, I_{f0n} .

Povećanjem veličine vazdušnog zazora karakteristika praznog hoda postaje tvrđa kao što je prikazano na narednoj slici. Sa povećanjem veličine vazdušnog zazora raste potrebna pobudna struja u praznom hodu da bi se dobio nominalan napon na armaturi. Generator sa većim vazdušnim zazorom imaće i veću struju I_{f0n} . Na slici 4.3. prikazane su karakteristike praznog hoda dve sinhrona mašine sa različitim veličinom vazdušnog zazora, $l_{0b} > l_{0a}$.



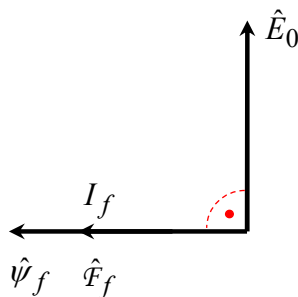
Slika 4.3. Karakteristika praznog hoda dve sinhrona mašine sa različitim vazдушnim zazorima, $l_{0b} > l_{0a}$.

Da bi se odredila karakteristika praznog hoda, sinhrona mašina ne mora da se obrće sinhronom brzinom. Karakteristika praznog hoda se može snimiti pri nekoj poznatoj brzini, a potom preračunati na sinhronu brzinu. Ovo se obično izvodi kada pogonska mašina ne može da vrti sinhronu mašinu na sinhronoj brzini. Elektromotorna sila praznog hoda direktno je srazmerna sa brzinom obrtanja. Na slici 4.4. prikazane su karakteristike praznog hoda sinhrona mašine koje su snimljene pri različitim brzinama obrtanja.



Slika 4.4. Karakteristika praznog hoda za tri različite brzine obrtanja.

Fazorski dijagram sinhrona mašine tokom praznog hoda prikazan je na slici 4.5.



Slika 4.5. Fazorski dijagram sinhrona mašine u praznom hodu.

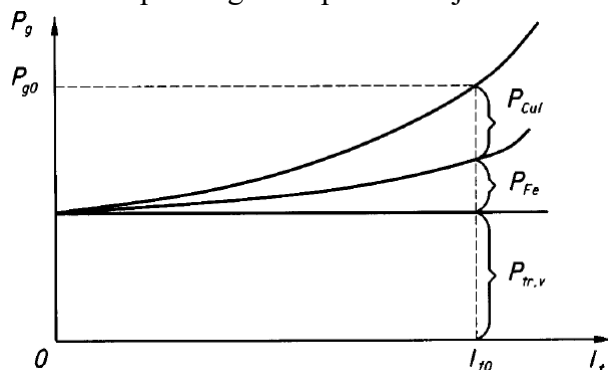
Tokom generatorskog praznog hoda pogonska mašina pokriva gubitke praznog hoda sinhrona mašine. Gubici praznog hoda sinhrona mašine su mehanički gubici (gubici na trenje i ventilaciju), gubici u gvožđu i gubici u pobudnom namotu. Kako u praznom hodu kroz statorski namot ne teče struja to ne postoje gubici u bakru statora. U ogledu praznog hoda se menja struja pobude, pa je potrebno sagledati kako se menjaju gubici tokom praznog hoda.

Mehanički gubici su određeni brzinom obrtanja i oni ne zavise od struje pobude. Ako se može odrediti mehanička snaga koju pogonska mašina predaje sinhronoj tada se mogu odrediti i gubici sinhrona mašine tokom ogleda praznog hoda. Snaga potrebna za pogon ne pobuđene sinhrona mašine jednaka je snazi njenih mehaničkih gubitaka.

Gubitke u gvožđu pokriva pogonska mašina. Gubici u gvožđu zavise od frekvencije, indukcije i debljine lima. Gubici usled histerezisa zavise od frekvencije i kvadrata indukcije, a gubici usled vrtložnih struja zavise od kvadrata frekvencije i indukcije. Gubici u gvožđu su srazmerni sa indukcijom na drugi stepen. Indukcija u mašini je određena strujom pobude. Tako da sa porastom struje pobude rastu i gubici u gvožđu tokom praznog hoda.

Gubici pobude predstavljaju Džulovu snagu koja se oslobodi u pobudnom namotu usled proticanja struje pobude. Dakle, ovi gubici su srazmerni sa kvadratom struje pobude. Njih pokriva izvor jednosmernog napona – sistem za pobuđivanje.

Dijagram gubitaka tokom praznog hoda prikazana je na slici 4.6.

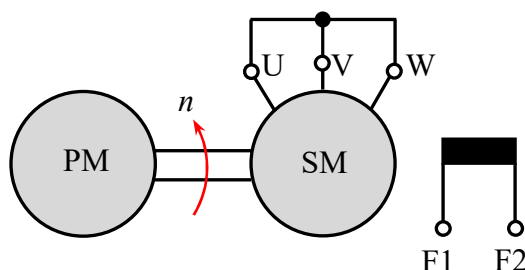


Slika 4.6. Gubici sinhrona mašine u praznom hodu.

4.2. KARAKTERISTIKA KRATKOG SPOJA

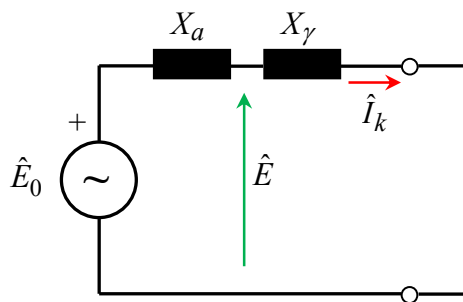
Kratak spoj električnih mašina može biti motorski i generatorski. U motorskom kratkom spoju rotor je mehanički ukočen, a mašina je magnetno pobuđena. Kod asinhronih mašina stanje kratkog spoja se, po pravilu, pojavljuje kao normalno motorsko pogonsko stanje sa ograničenim vremenskim trajanjem zbog termičkih naprezanja. Stanje mehaničkog kratkog spoja sinhrona mašine je apsurdno s obzirom da funkcionisanje sinhrona mašine podrazumeva da se rotor obrće sinhronom brzinom. Dakle, postoji samo generatorski kratak spoj sinhrona mašine. Generatorski kratki spoj sinhrona mašine i motorski kratak spoj asinhrona mašine govore takođe u prilog podele na sinhrona generatore i asinhrona motore.

U kratkom spoju sinhrona mašine krajevi statorskog namotaja su kratko spojeni, pogonska mašina obrće rotor, a sinhrona mašina je magnetno pobuđena, slika 4.7.



Slika 4.7. Prikaz sinhrona mašine u kratkom spoju.

Mašina je magnetno pobuđena, tj. struja pobude stvara pobudni fluks. Rotor se obrće i sa njime pobudni fluks ψ_f , usled čega se u statorskom namotaju indukuje elektromotorna sila. Kako je statorski namotaj kratko spojen, pod dejstvom indukovane elektromotorne sile u njemu će teći struja kratkog spoja, I_k . Ekvivalentno kolo sinhrona mašine u kratkom spoju je prikazano na slici 4.8.



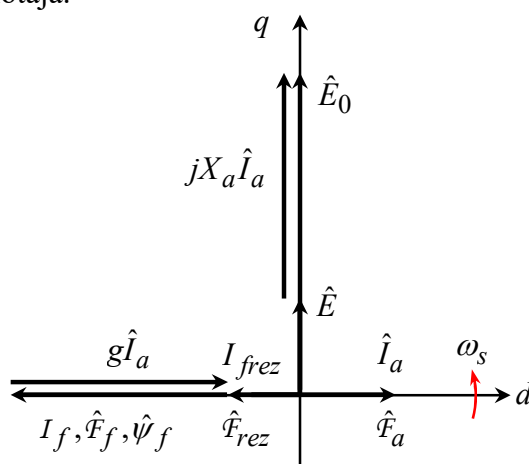
Slika 4.8. Ekvivalentno kolo sinhronog generatora u kratkom spoju.

Vrednost pobudne struje određuje elektromotornu silu praznog hoda E_0 . Struja kratkog spoja I_k , količnik elektromotorne sile praznog hoda i sinhronne reaktanse:

$$I_k = \frac{E_0}{X_s} = \frac{\omega \frac{\psi_f}{\sqrt{2}}}{\omega L_s} = \frac{\psi_f}{L_s}, \quad (4.1)$$

ne zavisi od brzine obrtanja. Interesantan je zaključak $I_k = \frac{E_0}{X_s} = \frac{\omega \frac{\psi_f}{\sqrt{2}}}{\omega L_s} = \frac{\psi_f}{L_s}$, (4.1) da brzina obrtanja sinhronne mašine tokom kratkog spoja ne mora biti sinhrona, a ni konstantna.

Fazorski dijagram sinhronne mašine tokom kratkog spoja prikazan je na slici 4.9. U ekvivalentnom kolu slika 4.8. i na fazorskom dijagramu na slici 4.9. zanemarena je omska otpornost statorskog namotaja.

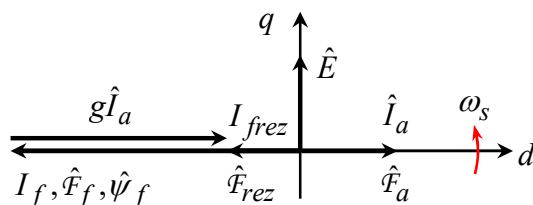


Slika 4.9. Fazorski dijagram sinhronne mašine tokom kratkog spoja –prema ekvivalentnoj šemi.

Elektromotorna sila praznog hoda $\hat{E}_0$ u odnosu fluksa pobude $\hat{\psi}_f$ pomenjena je za $\pi/2$ i nalazi se u pravcu q – ose. Namotaj statora je zapravo armatura sinhronne mašine. Kako je namotaj mašine dominantno induktivnog karaktera to struja armature $\hat{I}_a$ tokom kratkog spoja kasni za $\pi/2$ u odnosu na fazor elektromotorne sile praznog hoda. Stoga je i reakcija armature $\hat{F}_a$ u opoziciji sa magnetopobudnom silom pobude $\hat{F}_f$. Sa $g\hat{I}_a$ je prikazana struja armature svedena na pobudnu stranu i ona omogućuje da se odredi rezultantna struja pobude I_{frez} , koja je merodavna za indukovanu elektromotornu silu u mašini. Rezultantna magnetopobudna sila $\hat{F}_{rez}$ je mala, pa je i vrednost fluksa u mašini mala. Ovom fluksu odgovara indukovana elektromotorna sila $\hat{E}$. Usled reakcije armature javlja pad napona na reaktansi reakcije armature $jX_a \hat{I}_a$. Sa ekvivalentnog kola se vidi da elektromotorna sila E pokriva pad napona na reaktansi rasipanja. Pre nego što se dalje nastavi sa izlaganjem o kratkom spoju treba primetiti

da je u mašini tokom kratkog spoja usled rezultantne magnetopobudne sile indukovana elektromotorna sila $\hat{E}$, a ne elektromotorna sila praznog hoda. Međutim, pri crtanju fazorskih dijagrama znatno češće se crta i koristi elektromotorna sila praznog hoda.

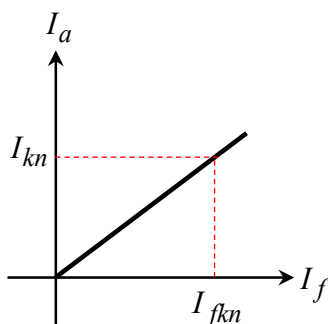
Fazorski dijagram na slici 4.9 nacrtan je prema ekvivalentnom kolu sinhrona mašine. Ako se uzme u fokus fizička slika u mašini tada je fazorski dijagram dat na slici 4.10. Na takvom fazorskom dijagramu nema mesta za fiktivnu veličinu – elektromotornu silu praznog hoda. Krenimo od početka – magnetopobudnih sila. U sinhronoj mašini koja je u kratkom spoju struja pobude i struja armature daju rezultantnu magnetopobudnu silu $\hat{F}_{rez}$, koja je odgovorna za fluks u mašini, odnosno elektromotornu silu $\hat{E}$.



Slika 4.10. Fazorski dijagram sinhrona mašine tokom kratkog spoja –prema fizičkoj slici u mašini.

Struje u pobudnom namotu i armaturnom namotu tokom kratkog spoja imaju znatne vrednosti. Rezultantna magnetopobudna sila je mala, pa mašina radi na linearnom delu karakteristike magnećenja.

Promenom struja pobude, menja se struja kratkog spoja sinhrona mašine. U ogledu kratkog spoja snima se zavisnost struje kratkog spoja od pobudne struje. Ta zavisnost predstavlja karakteristiku kratkog spoja. Kako je magnetno kolo nezasićeno to je karakteristika kratkog spoja linearna, prikazana je na slici 4.11. Karakteristika kratkog spoja se dobija eksperimentalno tako što se uspostavi struja pobude, izmere se struja pobude i struja armature. Za drugu vrednost struju pobude ponovi se postupak. Izmerene tačke se unesu u ravni $I_a - I_f$ i kroz njih se ucrtava karakteristika kratkog spoja.



Slika 4.11. Karakteristika kratkog spoja.

Sa karakteristike kratkog spoja može se odrediti potrebna je struja pobude I_{fkn} da bi se u armaturi uspostavila nominalna struja u kratkom spoju I_{kn} . Struja I_{fkn} – je nominalna struja pobude kratkog spoja. Ovo je jedna bitna karakteristična veličina sinhrona mašine.

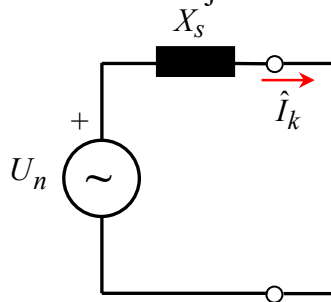
Da bi kroz armaturu tekla nominalna struja – I_{kn} , indukovana elektromotorna sila je znatno manja od nominalnog napona generatora,

$$E = I_{kn} \cdot X_s \approx 0,2U_n. \quad (4.2)$$

4.3. ODREĐIVANJE SINHRONIH REAKTANSI

4.3.1. Određivanje sinhronne reaktanse turbogeneratorsa

Karakteristike praznog hoda i kratkog spoja omogućuju da se odredi brojna vrednost sinhronne reaktanse X_s . Pri nominalnoj struji pobude praznog hoda I_{f0n} u praznom hodu u statorskom namotaju se indukuje nominalan napon U_n . Ako se pri ovoj struji pobude (I_{f0n}) namotaj statora kratko spoji kroz statorski namot će proteći struja kratkog spoja I_k . Ekvivalentno kolo sinhronne mašine pod ovim okolnostima je dato na slici 4.12.

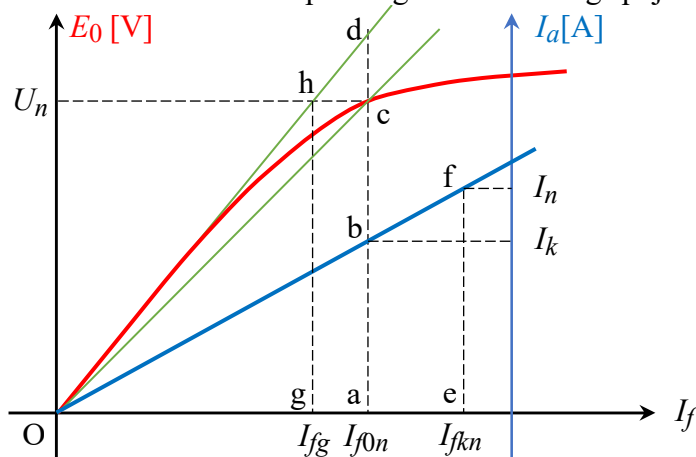


Slika 4.12. Ekvivalentno kolo sinhronog generatora u kratkom spoju pri nominalnoj struji pobude praznog hoda I_{f0n} .

Sada je iz ekvivalentnog kola jasno da je sinhrona reaktansa:

$$X_s = \frac{U_n}{I_k}. \quad (4.3)$$

Na slici 4.13. prikazane su karakteristika praznog hoda i kratkog spoja.



Slika 4.13. Karakteristike praznog hoda i kratkog spoja.

Ako se iz praznog hoda, pri nominalnoj pobudnoj struji praznog hoda I_{f0n} , desi kratak spoj uspostaviće se struja kratkog I_k koja je manja od nominalne struje I_n . Da bi se u kratkom spoju, kroz armaturu, dobila nominalna struja I_n potrebna je struja pobude I_{fkn} koja je veća od I_{f0n} . Razlog ovome je reakcije armature. U prethodnom delu je pokazano da je reakcija armature tokom kratkog spoja izrazito demagnetišuća, tj. deluje u smeru smanjenja ukupnog fluksa u mašini.

U literaturi se definiše nezasićena i zasićena sinhrona reaktansa. Prema prethodnoj jednačini

$$X_{s\ zas} \approx \frac{E_{ca}}{I_{ba}} = \frac{U_n}{I_k} [\Omega]. \quad (4.4)$$

Sinhrona reaktansa se obično iskazuje u relativnim jedinicama nakon normalizacije sinhrona reaktanse sa baznom impedansom. Postoji više mogućnosti za izbor bazne impedanse, neka je bazna impedansa definisana kao:

$$Z_b = \frac{U_n}{I_n}, \quad (4.5)$$

tada je normalizovana sinhrona reaktansa:

$$x_{s\ zas} = \frac{X_{s\ zas}}{Z_b} = \frac{U_n}{I_k} \cdot \frac{I_n}{U_n} = \frac{I_n}{I_k} \quad [\text{r.j.}], \quad (4.6)$$

količnik nominalne struje sinhrona mašine i struje kratkog spoja I_k pri nominalnoj struji pobude praznog hoda, I_{f0n} . Iz sličnosti trouglova Oab i Oef sinhrona reaktansa se može izraziti pomoću karakterističnih veličina oglada praznog hoda i kratkog spoja:

$$x_{s\ zas} = \frac{I_n}{I_k} = \frac{I_{fkn}}{I_{f0n}} \quad [\text{r.j.}]. \quad (4.7)$$

Pored zasićene sinhrona reaktanse sličnim postupkom se definiše i nezasićena sinhrona reaktansa. Pri nominalnoj struji pobude praznog hoda I_{f0n} , u praznom hodu u statorskom namotaju se indukuje napon koji se sada određuje sa nezasićene karakteristike – linije vazdušnog zazora i on je veći od nominalnog napona U_n . Ako se pri ovoj struji pobude (I_{f0n}) namotaj statora kratko spoji kroz statorski namot će proteći struja kratkog spoja I_k . Ponovo se sa ekvivalentnog kola u kratkom spoju može definisati sinhrona reaktansa, ali ovaj put nezasićena.

$$X_{s\ nzas} \approx \frac{E_{da}}{I_{ba}} = \frac{E_{da}}{I_k} \quad [\Omega]. \quad (4.8)$$

Nezasićena zato što je indukovani napon određen sa nezasićene karakteristike magnetnog kola. Nakon normalizacije dobija se normalizovana nezasićena sinhrona reaktansa:

$$x_{s\ nzas} = \frac{X_{s\ nzas}}{Z_b} = \frac{E_{da}}{U_n} \frac{I_n}{I_k} \quad [\text{r.j.}]. \quad (4.9)$$

Iz sličnosti trouglova Oad i Ogh se može izraziti odnos napona preko karakterističnih veličina iz oglada praznog hoda:

$$\frac{E_{da}}{U_n} = \frac{I_{f0n}}{I_{fg}}. \quad (4.10)$$

Sada je nezasićena sinhrona reaktansa:

$$x_{s\ nzas} = \frac{E_{da}}{U_n} \frac{I_n}{I_k} = \frac{I_{f0n}}{I_{fg}} \frac{I_{fkn}}{I_{f0n}} = \frac{I_{fkn}}{I_{fg}} \quad [\text{r.j.}], \quad (4.11)$$

izražena pomoću karakterističnih veličina praznog hoda i kratkog spoja.

Odnos nezasićene i zasićene sinhrona reaktansa iznosi:

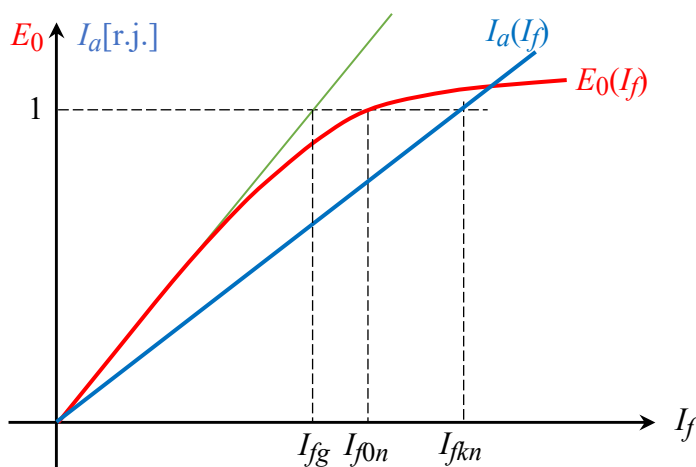
$$\frac{x_{s\text{ nzas}}}{x_{s\text{ zas}}} = \frac{I_{fkn}}{I_{fg}} \cdot \frac{I_{f0n}}{I_{fkn}} = \frac{I_{f0n}}{I_{fg}} = 1,05 \div 1,2, \quad (4.12)$$

Kod izučavanja sinhronih mašina se često koristi kratkospojni odnos. Definisan je kao recipročna vrednost sinhrona reaktanse:

$$k_k = \frac{1}{x_{s\text{ zas}}} = \frac{I_{f0n}}{I_{fkn}} = 0,4 \div 0,5. \quad (4.13)$$

Sinhrona mašine sa većim kratkospojnim odnosom stabilnije jer mogu podneti veća preopterećenja. Interesantno je pogledati kako kratkospojni odnos utiče na cenu same mašine. Povećanje kratkospojnog odnosa utiče na smanjenje sinhrona reaktanse. Ako se reaktansa smanjuje to znači da raste vazdušni zazor. Uz veći vazdušni zazor da bi se postiglo isto magnetno polje potrebna je veća osnovna magnetna pobuda – amperevoji pobude. Veća magnetna pobuda praćena je povećanim gubicima u bakru pobudnog namota. Potrebna je veća zapremina da bi se smestilo više amperevojava i odvela oslobođena toplota. Veća zapremina je više utrošenog materijala, a to znači i veću cenu mašine. Istorijski sa godinama kratkospojni odnos se smanjivao od nekadašnjih $0,8 \div 1$ do sadašnjih $0,4 \div 0,5$.

Karakteristike praznog hoda se uobičajeno crtaju u koordinatnom sistemu gde je ordinata normalizovani napon i normalizovana struja armature. Ove veličine se normalizuju nominalnim vrednostima. Na slici 4.14. date su karakteristike praznog hoda i kratkog spoja sa normalizovanom ordinatnom osom.



Slika 4.14. Karakteristike praznog hoda i kratkog spoja – nakon normalizacije.

Primer. Za sinhroni generator sprege zvezda, sledećih podataka $U_n = 6300$ V; $S_n = 16$ MVA; $I_n = 1468$ A; $\cos \varphi = 0,8$; $n_s = 3000$ o/min, pobuda $U_{fn} = 115$ V; $I_{fn} = 470$ A, sproveden je ogled praznog hoda i kratkog spoja. Na slici 4.15. su unete merne tačke tokom ogleda praznog hoda i kratkog spoja. Kroz ove tačke su provučene karakteristike praznog hoda i kratkog spoja. Koliko iznosi sinhrona reaktansa ovog generatora?

Sa karakteristike praznog hoda može se odrediti nominalna pobudna struja praznog hoda $I_{f0n} = 169$ A i nominalna pobudna struja kratkog spoja $I_{fkn} = 311$ A. Sinhrona reaktansa ovog generatora iznosi:

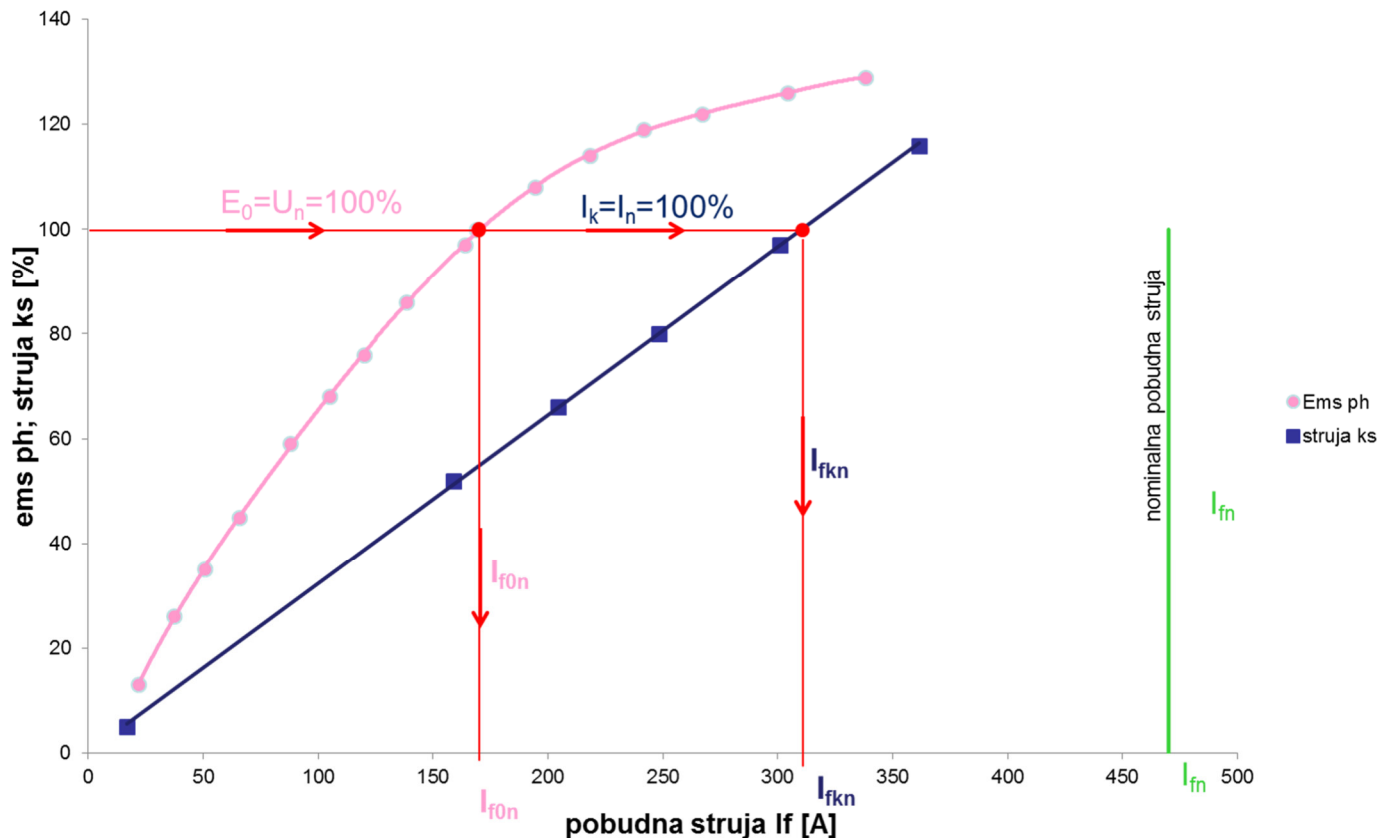
$$x_{s\text{ zas}} = \frac{I_{fkn}}{I_{f0n}} = \frac{311}{169} = 1,84 \text{ r.j.},$$

dok je kratkospojni odnos:

$$k_k = \frac{1}{1,84} = 0,54.$$

Nezasićena sinhrona reaktansa ovog generatora iznosi:

$$x_{s\ nzas} = \frac{I_{fkn}}{I_{fg}} = , \text{ TREBA DA DORADIM}$$



Slika 4.15. Karakteristike praznog hoda i kratkog spoja – eksperimentalni rezultati. **Nacrtati liniju vazdušnog zazora**

Na slici 4.15. treba zapaziti da je $I_{f0n} < I_{fkn} < I_{fn}$, gde je I_{fn} nominalna struja pobude sinhrona mašine.

4.3.2. Određivanje sinhronih reaktansi mašine sa istaknutim polovima

Sinhrona reaktanse X_d i X_q , mašine sa istaknutim polovima određuju se eksperimentalno. Rotor se obrće pogonskom mašinom brzinom koja je različita od sinhrona, rotor kliza u odnosu na obrtno polje. Sinhrona mašina je magnetno ne pobuđena. Snima se oscilogram struje tokom ovog oglada klizanja. To je dominantno struja magnećenja ne pobuđene sinhrona mašine. Rotor i obrtno polje se ne vrte u sinhronizmu. Usled klizanja rotora u odnosu na obrtno polje, tokom vremena obrtno polje bude u nekim trenucima u pravcu pola, d – osa, a u nekim trenucima u pravcu međupolnog prostora, q – osa. Sada treba da se prisetimo da je struja magnećenja određena veličinom vazdušnog zazora, kao i da je vazdušni zazor po obimu mašine sa istaknutim polovima neravnomeran. Kada obrtno polje bude bilo u pravcu pola struja magnećenja će biti manja, nego kada obrtno polje bude u međupolnom prostoru. Na slici 4.16. prikazana je struja armature sinhrona mašine sa istaknutim polovima tokom oglada

klizanja. Struja je naizmjenična, ali se njena amplituda menja jer obrtno polje statora naizmjenično nailazi na pol i međupolni prostor. Vrhovi sinusoida trenutne struje opisuju karakterističnu anvelopu. Perioda ponavljanja ove anvelope određena je klizanjem rotora.

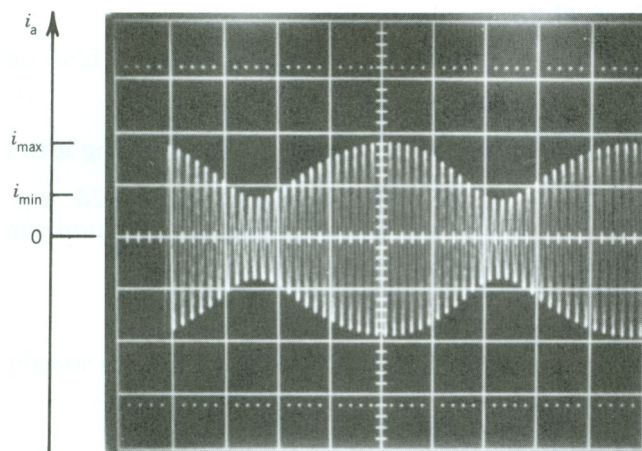


FIGURE 6.30 Armature current during the slip test.

Slika 4.16. Struja armature mašine sa istaknutim polovima u ogledu klizanja.

Ako se sa oscilograma očitaju minimalna i_{min} i maksimalna i_{max} vrednost struje anvelope, sinhronne reaktanse su:

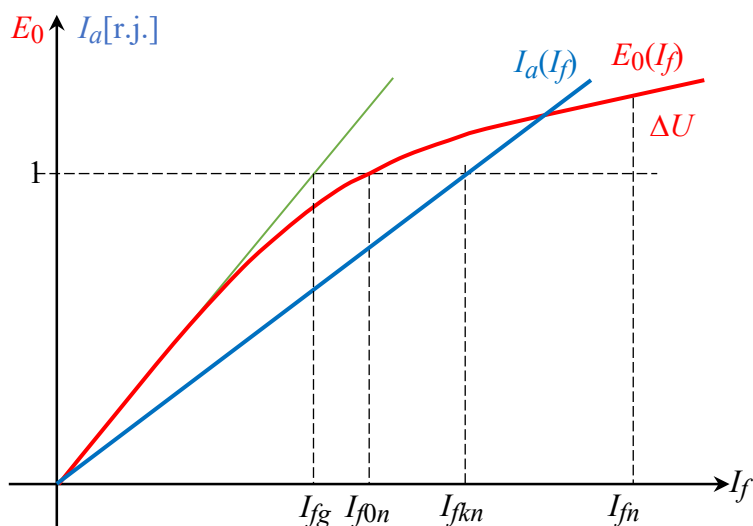
$$X_d = \frac{U}{i_{min}/\sqrt{2}}, \quad (4.14)$$

$$X_q = \frac{U}{i_{max}/\sqrt{2}}. \quad (4.15)$$

4.4. RASTEREĆENJE GENERATORA

Tokom eksploatacije sinhronih generatora dešavaju se havarijska stanja u kojima se magnetno pobuđen generator, sa pogonskim momentom na vratilu, delovanjem zaštite isključuje sa mreže. Generator se isključuje sa mreže, ali mu se pogonski momenta i struja pobude ne mogu istom brzinom ukinuti. Karakteristika praznog hoda omogućuje da se odredi koliki se napon indukuje u armaturi pri isključenju generatora sa mreže, a pri struji pobude koja je primerena opterećenju sa kojim je generator radio. Propisima se dopušta porast napona armature, pri isključenju generatora pobuđenog nominalnom pobudnom strujom I_{fn} , od $0,5U_n$. Smatra se da je brzina obrtanja nominalna – sinhrona. Situacija sa porastom napona je dodatno otežana činjenicom, da pri naglom rasterećenju generatora, brzina raste što takođe doprinosi porastu napona indukovnog u armaturi.

Na slici 4.17. je prikazano da generator radi priključen na mrežu nominalnog napona i sa I_{fn} . Kada se generator isključi sa mreže, to postaje je generatorski prazan hod, pri struji pobude I_{fn} napon će biti veći od nominalnog za ΔU kao što je prikazano.

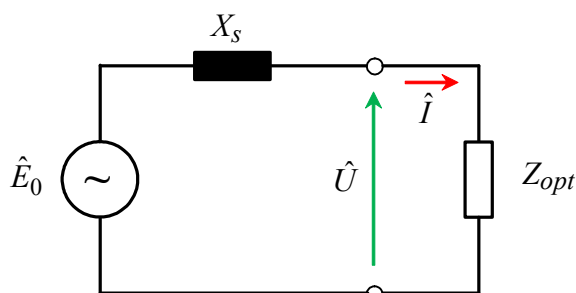


Slika 4.17. Porast napona nakon isključenja sinhronog generatora pri nominalnoj pobudnoj struji.

5. SINHRONI GENERATOR U RADU NA SOPSTVENU MREŽU

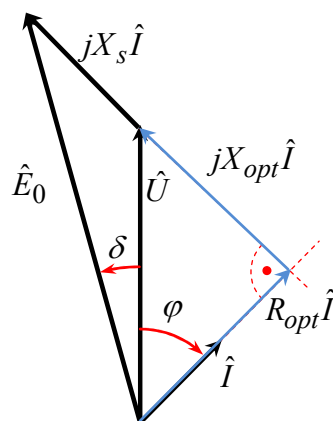
U pogledu mreže sinhroni generatori mogu da rade paralelno i zajedno sa drugim generatorima čineći jaku i krutu mrežu. Kada generator radi na krutoj mreži, mreža diktira napon i učestanost u mreži. Generator svojim radom ne može uticati na napon i frekvenciju.

Međutim, sinhroni generatori se nalaze i u okolnostima da je u mreži on (generator) jedini izvor električne energije. Tada generator radi na sopstvenoj (vlastitoj) mreži i napaja potrošače. Pri radu na sopstvenoj mreži na veličinu učestanosti i napona utiče i potrošač. U zavisnosti od potrošača struja sinhronog generatora pri radu na sopstvenoj mreži menja se od nule u praznom hodu do struje kratkog spoja. Na slici 5.1. prikazana je ekvivalentna šema sinhronog generatora koji radi na sopstvenoj mreži i opterećen je potrošačem koji je ekvivalentiran impedansom. Struja armature generatora je struja opterećenja.



Slika 5.1. Ekvivalentna šema sinhronog generatora opterećenog impedansom.

Fazorski dijagram natpobuđenog sinhronog generatora opterećenog impedansom, prikazan je na slici 5.2.



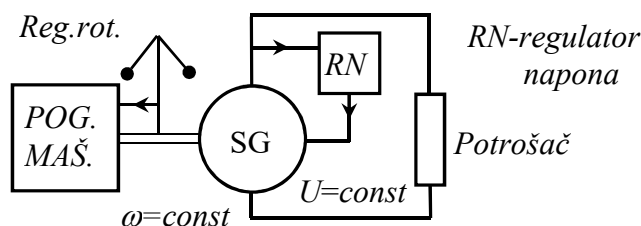
Slika 5.2. Fazorski dijagram natpobuđenog sinhronog generatora opterećenog impedansom.

Regulacijom struje pobude reguliše se napon na željenoj vrednosti, a regulacijom brzine obrtanja pomoću regulatora na pogonskoj mašini reguliše se učestanost napona. Da bi dobili željenu učestanost napona, pogonska mašina treba da daje onoliku snagu kolika se troši na termogenoj komponenti potrošača. Ta snaga zavisi i od napona.

Da bi dobili željeni napon na potrošaču treba regulisati pobudnu struju. Pri radu sinhronog generatora na krutoj mreži, mreža apsorbira aktivnu i reaktivnu snagu koju proizvodi generator. Ako generator radi na sopstvenoj mreži potrošač diktira zahtevanu aktivnu i reaktivnu snagu. Potrošač diktira faktor snage sa kojim radi sinhroni generator.

Kada je sopstvena mreža neopterećena generator je pobuđen tako da pri nominalnoj, sinhronoj brzini obrtanja generiše upravo nominalni napon. Opterećenjem generatora omskim

potrošačem električna snaga počinje da izlazi iz generatora. Da bi se rotor i posle opterećenja obrtao sinhronom brzinom, mora se povećati mehanička snaga koja se dovodi generatoru. Dovedena mehanička snaga mora biti veća od predate električne snage generatora za iznos snage gubitaka. Ako se poveća opterećenje generatora na električnoj strani, mora se dovesti i veća mehanička snaga. Dakle čim se naruši ravnoteža snage koja se dovodi sa snagom opterećenja i snagom gubitaka generatora, brzina će se promeniti u odnosu na željenu brzinu. Sa promenom brzine promeni će se i učestanost. Zato čim se promeni snaga opterećenja treba delovati na mehaničku snagu koju daje pogonska mašina. Može se uspostaviti jednostavna regulaciona struktura koja prati brzinu obrtanja i po potrebi deluje na pogonsku mašinu kako bi ona povećala mehaničku snagu na vratilu, a da bi brzina obrtanja ostala sinhrona. Dakle, učestanost u mreži sa samo jednim generatorom diktira pogonska mašina. Na slici 5.3. prikazana je principna šema za regulaciju učestanosti i napona generatora koji radi na sopstvenoj mreži.



Slika 5.3. Blok šema sinhronog generatora koji radi na sopstvenoj mreži. Regulacija napona i frekvencije.

Ako je opterećenje omsko usled reakcije armature rezultatna magnetopobudna sila će biti nešto manja od one u praznom hodu, to znači da je magnetno kolo posmatranog sinhronog generatora slabije namagnetisano. Posledica ovoga je da će napon na priključcima generatora biti nešto manji. Objašnjenje može i ovako, zbog porasta struje javlja se pad napona na sinhronoj reaktansi, pa će napon na generatoru postati manji od onog u praznom hodu. Da bi se napon na priključcima generatora vratio na nominalnu vrednost potrebno je povećati pobudnu struju.

Da bi se obezbedilo automatsko delovanje u cilju obezbeđenja stalnog napona na krajevima generatora, koristi se regulator napona, koji menja pobudnu struju, tako da održava konstantan napon na priključcima generatora, slika 5.3.

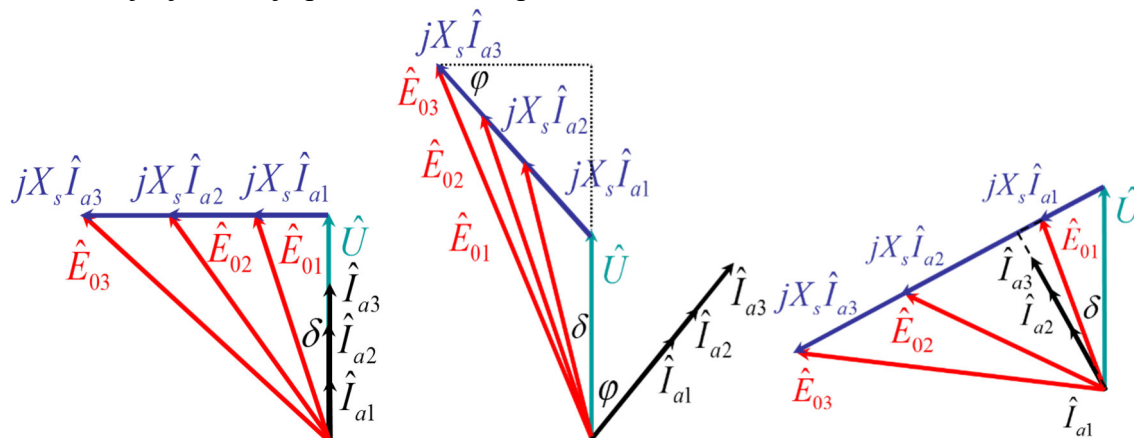
Struja opterećenja u opštem slučaju nije isključivo aktivna, i najčešće ima i induktivnu komponentu, a ređe kapacitivnu. Prema ranije dogovorenom, to znači da će sinhroni generator morati da proizvodi reaktivnu energiju (za induktivno opterećenje), a samo ponekad i da je preuzme (za kapacitivno opterećenje).

U delu o kratkom spoju sinhronog generatora objašnjeno je da struja armature ima demagnetišuće dejstvo tj. deluje direktno nasuprot pobudi rotora. Ako se induktivno opterećenje shvati kao proizvođenje reaktivne energije, a reaktivna energija kao sredstvo za magnećenje magnetnih kola, onda se nameće logičan zaključak da je za proizvođenje reaktivne energije potrebno povećati pobudnu struju proporcionalno opterećenju reaktivnom strujom – kako bi se održao stalan napon na priključcima generatora.

Generator je ponekad u situaciji da troši reaktivnu energiju (kapacitivno opterećen). Iz aspekta prirode reaktivne energije, to jest da ona magnetiše magnetno kolo, kada je sinhrona mašina prisiljena da preuzima reaktivnu energiju, mora joj se smanjiti pobudna struja – kako ne bi porastao napon.

Treba primeti da mehanizam konzumiranja i proizvođenja reaktivne energije važi i pri motorskom i pri generatorskom procesu rada. Na ovom mehanizmu se zasniva upotreba sinhrona mašine kao mašine u kompenzatorskom režimu rada – kompenzatora.

Na slici 5.4. prikazani su fazorski dijagrami turbogeneratorsa za omsko, induktivno i kapacitivno opterećenje, pri promeni opterećenja. Turbogenerator radi na sopstvenoj mreži. Sa datih fazorskih dijagrama jednostavno se izvode sledeći zaključci. Ako je opterećenje omsko ili induktivno, tada svaki porast struje opterećenja mora biti praćen sa porastom struje pobude, kako bi napon ostao isti. Ako je opterećenje kapacitivno, onda je porast struje opterećenja praćen smanjenjem struje pobude, da bi napon ostao isti.

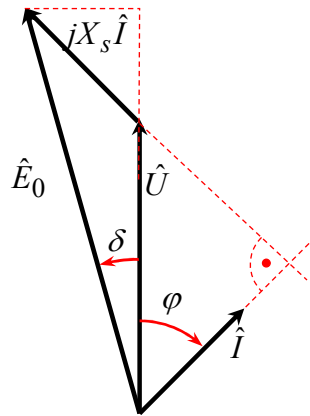


Slika 5.4 Fazorski dijagrami turbogeneratorsa pri radu na sopstvenoj mreži za različite struje opterećenja.

Zaključak za pojedinačni rad sinhronog generatora je da se frekvencija održava posredstvom automatskog regulatora brzine obrtanja koji podešava "punjenje" pogonske mašine, pa time obezbeđuje pretvaranje tražene veličine energije iz mehaničke u električnu. Dalje, automatski regulator napona održava visinu napona na priključkama generatora podešavanjem pobudne struje rotora, pa omogućuje da se električna radna energija preda, uz konstantan napon, električnom sistemu, a reaktivna energija proizvede ili konzumira, takođe uz konstantan.

5.1. SPOLJNA KARAKTERISTIKA TURBOGENERATORA

Spoljna karakteristika turbogeneratorsa predstavlja zavisnost napona od struje armature (opterećenja) kada sinhroni generator radi na sopstvenoj mreži. Ovde će biti izvedena spoljna karakteristika turbogeneratorsa uz stalnu brzinu obrtanja, što znači da sinhroni generator daje električnu snagu koju zahteva opterećenje u svakom trenutku. Polazi se od vektorskog dijagrama natpobuđenog turbogeneratorsa prikazanog na slici 5.5.



$$Q > 0 \cos \varphi \text{ ind}$$

Slika 5.5. Fazorski dijagram natpobuđenog sinhronog generatora.

Sa fazorskog dijagrama se može napisati sledeća jednačina:

$$E_0^2 = (U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + X_s \cdot I)^2$$

kada se obavi naznačeno kvadriranje i kada se cela jednačina normalizuje deljenjem sa elektromotornom silom praznog hoda:

$$E_0^2 = U^2 + 2U \cdot I \cdot X_s \sin \varphi + X_s^2 \cdot I^2 \quad \bigg/ E_0^2$$

dobija se sledeća jednačina:

$$1 = \left(\frac{U}{E_0} \right)^2 + 2 \frac{U}{E_0} \cdot \frac{I}{\frac{E_0}{X_s}} \cdot \sin \varphi + \frac{I^2}{\left(\frac{E_0}{X_s} \right)^2}.$$

Količnik,

$$I_k = \frac{E_0}{X_s}.$$

predstavlja struju kratkog spoja turbogeneratora.

Nakon što se uvedu normalizovane vrednosti napona i struje, definisane sledećim količnicima:

$$u = \frac{U}{E_0}, \quad i = \frac{I}{I_k},$$

dobija se jednačina koja predstavlja spoljnu karakteristiku turbogeneratora:

$$1 = u^2 + 2u \cdot i \cdot \sin \varphi + i^2,$$

kojom je data veza između napona turbogeneratora i struje armature, pri čemu je faktor opterećenja parametar.

Ako je opterećenje omsko tada je $\cos \varphi = 1$, $\sin \varphi = 0$, spoljna karakteristika je data sledećom jednačinom:

$$1 = u^2 + i^2,$$

a što predstavlja jednačinu kružnice.

Kada je opterećenje čisto induktivno tada je $\cos\varphi = 0$, $\sin\varphi = 1$, spoljna karakteristika je data sledećom jednačinom:

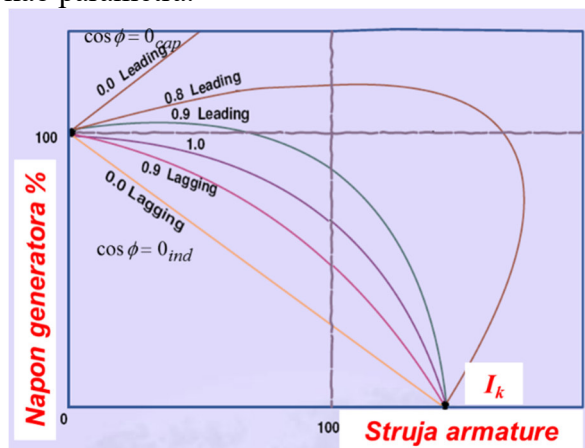
$$I = U + i.$$

Ako je opterećenje čisto kapacitivno tada je $\cos\varphi = 0$, $\sin\varphi = -1$, spoljna karakteristika je data sledećom jednačinom:

$$I = U - i.$$

Spoljna karakteristika za čisto induktivno ili čisto kapacitivno opterećenje je jednačina prave.

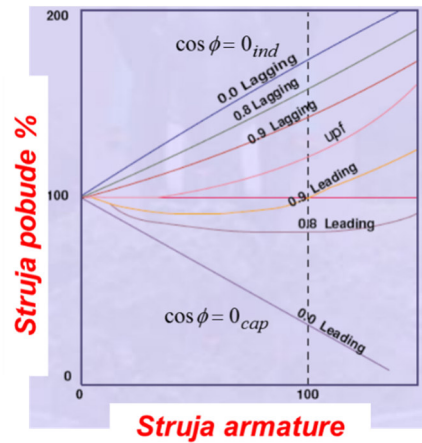
Na slici 5.6. prikazana je familija spoljnih karakteristika turbo generatora za različite vrednosti faktora snage kao parametra.



Slika 5.6. Familija spoljnih karakteristika turbo generatora.

Na slici 5.6. naznačena je nominalna vrednost napona i struje (100%), kao i struja kratkog spoja turbogeneratora. Ako je opterećenje čisto omsko, sa porastom struje opterećenja napon na priključcima generatora opada. Kada je opterećenje induktivno, sa porastom struje opterećenja napon opada, ali znatno brže nego da je opterećenje čisto omsko. Ako je opterećenje kapacitivno tada sa porastom struje opterećenja napon na priključcima generatora raste. Za bilo koju struju armature, struja pobude se smanjuje kako $\cos\varphi$ menja karakter tj. prelazi sa induktivnog na kapacitivni.

Da bi se napon na priključcima generatora održao na nominalnoj vrednosti potrebno je menjati struju pobude sa promenom struje opterećenja. Na slici 5.7. prikazana je potrebna pobudna struja za različite struje opterećenja kako bi se obezbedio nominalan napon na generatoru, faktor snage je parametar. Sa slike se vidi da ako je faktor snage $\cos\varphi = 1$, sa porastom struje opterećenja potrebno je povećati struju pobude kako bi se obezbedio nominalan napon. Kada je opterećenje induktivno ono stvara reakciju armature koja je demagentišuća (objašnjenje je isto kao za kratak spoj) smanjuje rezultantni fluks u mašini, što za posledicu ima smanjenje indukovano napona. Da bi napon ostao nominalan potrebno je sa porastom struje opterećenja povećavati struju pobude. Kod kapacitivnog opterećenja dešava se tačno suprotno. Kapacitivno opterećenje je praćeno reakcijom armature koja ima magnetišuće dejstvo tj. povećava ukupan fluks u mašini što dovodi do povećanja napona na generatoru. Da bi napon ostao nominalan potrebno je sa porastom struje opterećenja smanjivati struju pobude.



Slika 5.7. Dijagram struje pobude od struje opterećenja u cilju održanja nominalnog napona, faktore snage je parametar.

5.4.2 Control Characteristics

Even in isolated operation the loads should be connected to a constant voltage source, independent from the load current. Therefore, the excitation current has to be controlled in dependency of the load (amplitude and phase shift of the load current). From the phasor diagram (Fig. 5.16) it follows with the requirement $U = U_{N,phase}$:

$$U_{N,phase}^2 + 2U_{N,phase}XI \sin(\varphi) + (XI)^2 = U_P^2 \quad (5.32)$$

With $\frac{U_P}{U_{N,phase}} = \frac{I_F}{I_{F,0}}$ it follows further:

$$\begin{aligned} \frac{I_F}{I_{F,0}} &= \sqrt{1 + \frac{2XI \sin(\varphi)}{U_{N,phase}} + \left(\frac{XI}{U_{N,phase}}\right)^2} \\ &= \sqrt{1 + 2x \frac{I}{I_N} \sin(\varphi) + \left(x \frac{I}{I_N}\right)^2} \end{aligned} \quad (5.33)$$

With this the so-called *control characteristics* (excitation current I_F of the generator in dependency of the load current I) of the synchronous machine in isolated operation are given, to fix the terminal voltage to the constant nominal voltage at synchronous speed $n = n_0$. Figure 5.18 shows the excitation current I_F as a function of the load current I for different loads $\cos(\varphi)$.

For resistive-inductive loads the excitation current has to be increased to fix the terminal voltage to the nominal voltage at increasing load; for purely capacitive loads the excitation current has to be decreased (for resistive-capacitive loads with phase angles less than $30^\circ \triangleq \pi/6$ the excitation current maybe has to be increased, depending on the value of the load current).

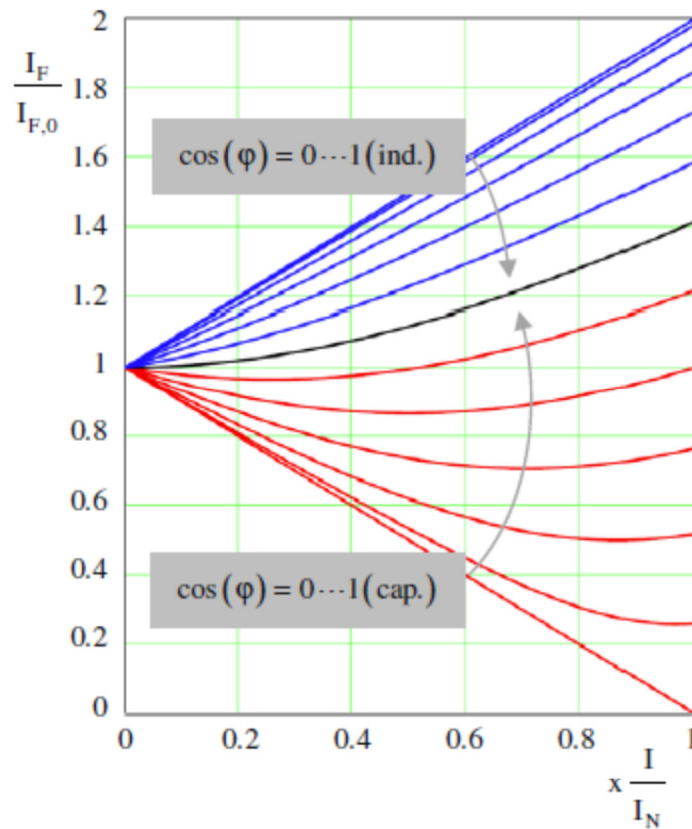


Fig. 5.18. Control characteristics of the synchronous machine in isolated operation.

In Fig. 5.19 the main load and control characteristics are summarized.

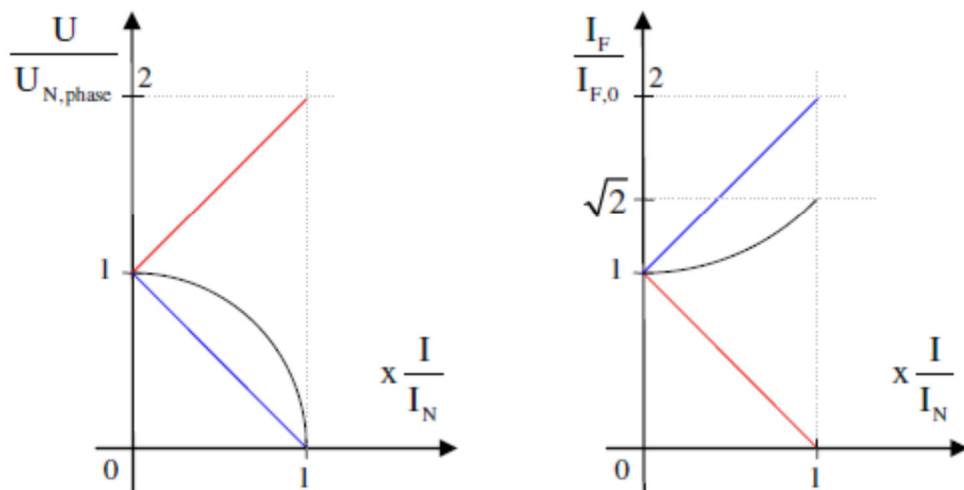
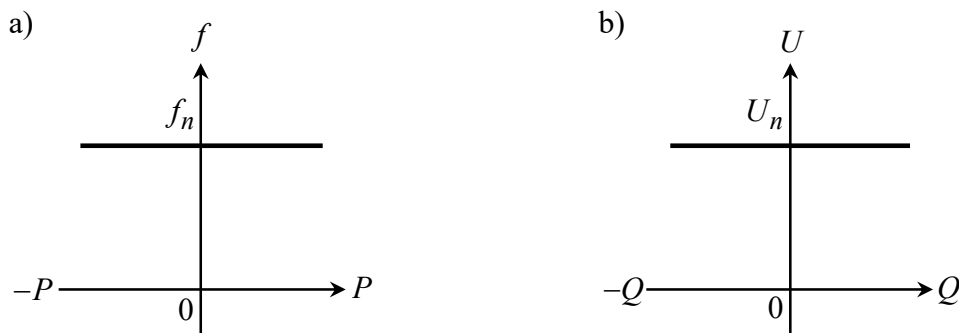


Fig. 5.19. Main load (*left*) and control (*right*) characteristics of the synchronous machine in isolated operation for zero (capacitive and inductive) and unity power factor in red, blue, and black, respectively.

Knjiga Dieter Gerling

6. SINHRONE MAŠINE U RADU NA KRUTU MREŽU

Kruta mreža je po definiciji ona mreža na čiju frekvenciju i napon ne može da utiče rad posmatrane sinhrona mašine. Analizirajući te uslove, vidi se da snaga takve mreže mora biti beskonačna. Kruta mreža apsorbira svu snagu koju sinhroni generator može proizvesti, odnosno predaje motoru potrebnu električnu snagu. Savremeni elektroenergetski sistemi pojedinih država su međusobno povezani čineći velike interkonektivne mreže koje pokrivaju teritorije više država, i približavaju se definiciji krute mreže. Za krutu mrežu na slici 6.1. prikazane su karakteristike učestanost – aktivna snaga i napon – reaktivna snaga su prikazani na slici



Slika 6.1. Karakteristike mreže beskonačne snage: a) učestanost – aktivna snaga, b) napon – reaktivna snaga.

6.1. UTICAJ PROMENE MEHANIČKOG MOMENTA NA FUNKCIONISANJE SINHRONE MAŠINE

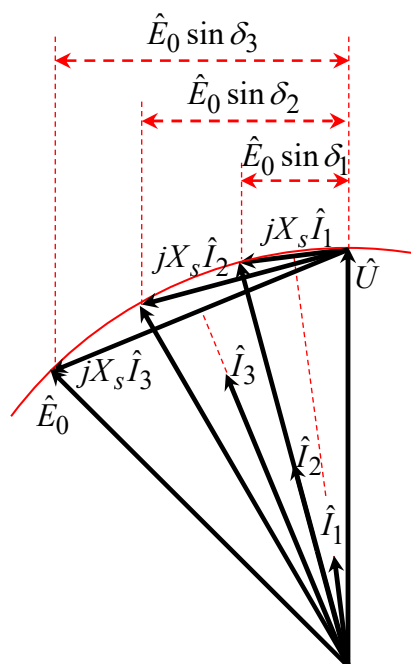
Mehanički momenat na vratilu sinhrona mašine potiče od pogonske mašine u slučaju generatora ili od radne mašine u slučaju motora. Pogonska mašina sinhronih generatora je parna turbina za turbogeneratore, vodna turbina za hidrogeneratore ili vetroturbina za vetrogeneratore. Kod vetroturbina i vetrogeneratora upravljanjem se pokušava izvući maksimalna energija iz vetra. Energija i snaga dobijena iz vetrogeneratora nepredvidiva je kao što je i sam vetar. Nasuprot tome, kod vodne i parne turbine koriste se manje ili više složeni turbinski regulatori kako bi se upravljalo sa momentom na vratilu sinhronog generatora. Momenat koji je doveden na vratilo sinhronog generatora određuje snagu koju sinhroni generator injektuje u električnu mrežu. Potreban mehanički momenat na vratilu sinhronog motora određen je potrebama radne mašine koja je uobičajeno podređena složenim tehnološkim zahtevima, donoseći nepredvidivost za potrebnim momentom.

U delovima koji slede sagledaće se kako promena mehaničkog momenta utiče na funkcionisanje sinhronih generatora i sinhronih motora. Biće pokazano da se promenom mehaničkog momenta utiče na vrednost proizvedene aktivne snage, odnosno na vrednost snage koju sinhroni motor povlači iz mreže.

6.1.1. Promena mehaničkog momenta u radu sinhronog generatora

Mehanički momenat na vratilu sinhronog generatora je momenat turbine, dizel motora. Vrednost pogonskog momenta određena je dotokom vode, odnosno para u turbinu, goriva kod dizel motora.

Neka je generator priključen na krutu mrežu, normalno je pobuđen strujom I_{f0} . Struja normalne pobuđenosti obezbeđuje da sinhrona mašina niti proizvodi niti troši reaktivnu energiju. Nominalna struja pobude je veća od struje normalne pobuđenosti $I_{fn} > I_{f0}$. Navodno o nominalnoj pobuđenosti se odnosi podjednako na motorski i na generatorski proces rada. Neka je sinhroni generator u praznom hodu, pogonska mašina pokriva gubitke. Pogonska mašina za sinhroni generator je turbina. Da bi ovaj generator počeo da predaje mreži odgovarajuću aktivnu snagu potrebno je delovanjem turbinskog regulatora povećati mehanički momenat na vratilu generatora. Na slici 6.2. je prikazana familija fazorskih dijagrama sinhronog generatora za tri različite vrednosti mehaničke snage – snage turbine.



Slika 6.2. Familija fazorskih dijagrama sinhronog generatora pri povećanju mehaničke snage

Kada je generator u praznom hodu fazori napona praznog hoda i napona mreže se poklapaju. Na dalje se smatra da se struja pobude ne menja, što ima za posledicu da se elektromotorna sila praznog hoda ne menja. Kada se dovede mehanička snaga sinhronom generatoru, rotor će ubrzati iznad sinhronne brzine pojaviće se ugao opterećenja, doći će do razmicanja fazora napona i elektromotorne sile praznog hoda. Sa povećanjem ugla opterećenja pojaviće se snaga konverzije koja će se izjednačiti sa dovedenom mehaničkom snagom, brzina rotora će ponovo postati sinhrona. Novoj mehaničkoj snazi odgovara novi fazorski dijagram. Može se primetiti da je E_0 konstantno, a da se proizvod $E_0 \cdot \sin \delta$ povećava sa porastom mehaničke snage. Sa fazorskih dijagrama se jasno vidi da je pri struji pobude normalne pobuđenosti I_{f0} sa dovođenjem mehaničke snage generatora otišao u potpobuđen režim rada, tj. faktor snage ima kapacitivan karakter.

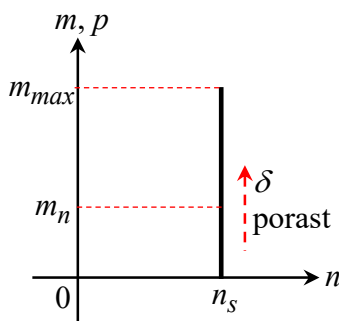
Mehanički momenat na vratilu sinhronog generatora određuje aktivnu snagu koju generator injektuje u mrežu. Mreža za ovaj generator predstavlja opterećenje. Uobičajeno za tu električnu snagu kažemo da predstavlja snagu opterećenja.

Od ranije je poznato da promena znaka mehaničkog momenta dovodi do prelaska iz generatorskog u motorski režim rada ili u obrnutom smeru. Kod sinhronih generatora koji rade na krutu mrežu ne dozvoljava se odlazak u motorski režim rada, da ne bi došlo do oštećenja

turbine. U okviru mikroprocesorske zaštite generatora integrisana je zaštita od odlaska u motorski režim rada. Međutim, u pogledu odlaska u motorski režim rada sasvim druga situacija kod reverzibilnih hidroelektrana, gde se sinhrona mašina nalazi u ulozi generatora u vreme vršne potrošnje, ali i u ulozi motora kada se voda iz donjeg jezera pumpa u gornje jezero.

6.1.2. Promena mehaničkog momenta u radu sinhronog motora

U ovom delu će biti objašnjen uticaj promene mehaničkog momenta na funkcionisanje sinhronog motora. Sinhroni motoru se sreću u elektromotornim pogonima sa konstantnom brzinom obrtanja napajani iz mreže. Snaga i najvećih sinhronih motora još uvek znatno manja od snage mreže. Možemo smatrati da se sinhroni motori napajaju iz krute mreže. U ovakvim uslovima krute mreže može se smatrati da su napon i frekvencija na mestu priključenja sinhronog motora na mrežu konstantni bez obzir na snagu koju povlači sinhroni motor. Brzina obrtanja motora određena je frekvencijom napona napajanja, a pošto je mreža kruta brzina obrtanja sinhronog motora je konstantna i jednaka sinhronoj brzini bez obzira na mehaničko opterećenje na vratilu sinhronog motora. Zavisnost brzine od momenta sinhronog motora se zove i mehanička karakteristika, i ona je prikazana na slici 6.3.



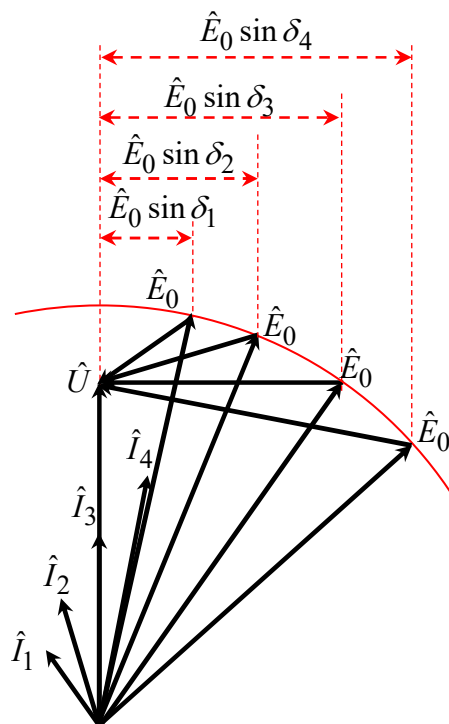
Slika 6.3. Mehanička karakteristika sinhronog motora.

Sa karakteristike se vidi da je brzina obrtanja sinhronog motora u stacionarnom stanju konstanta i jednaka sinhronoj pri promeni mehaničkog momenta od praznog hoda do maksimalnog momenta koga motor može iskonvertovati. U literaturi se ovaj momenat naziva i ispadni momenta (*pullout torque*). Na ugaonoj karakteristici to je momenat pri uglu opterećenja od $\delta = \pi/2$. Vrednost ispadnog momenta određena je elektromotornom silom praznog hoda odnosno strujom pobude:

$$m_{max} = u \frac{e_0}{x_s}$$

i što je veća struja pobude veći je i ispadni momenat. Ispadni momenta je približno tri puta veći od nominalnog momenta sinhronog motora. Takođe, je jasno da je ispadni momenat u natpobuđenom režimu veći nego u potpobuđenom režimu, jer je u natpobuđenom režimu struja pobude veća nego u potpobuđenom režimu rada.

Neka je sinhroni motor priključen na krutu mrežu i pobuđen strujom pobude I_f . Motor se optereti mehaničkim momentom na vratilu motora, ovaj momenat se zove i momenat opterećenja. Pod dejstvom momenta opterećenja, rotor će usporiti u odnosu na obrtno polje, porasće ugaon opterećenja, motor će početi da konvertuje energiju i pojaviće se momenat konverzije koji će se izjednačiti sa momentom opterećenja, brzina rotora će ponovo postati sinhrona, a ugaon opterećenja će postati veći od onog pre opterećenja. Mehanički momenat na vratilu se posmatra kao opterećenje, a ugaon δ zavisi od tog opterećenja pa otud naziv ugaon opterećenja. Na slici je prikazana familija fazorskih dijagrama sinhronog motora za tri različite vrednosti momenta opterećenja.



Slika 6.4. Familija fazorskih dijagrama sinhronog motora pri povećanju mehaničke snage

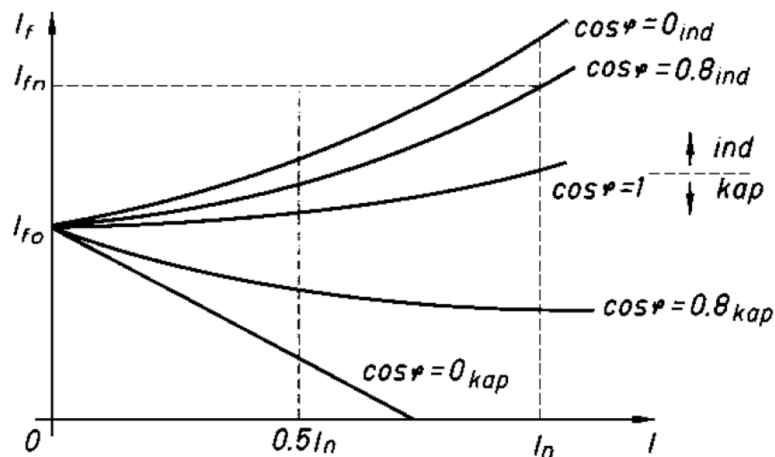
Kako se struja pobude ne menja, što ima za posledicu da se elektromotorna sila praznog hoda ne menja, može se primetiti da je E_0 konstantno, a da se proizvod $E_0 \cdot \sin \delta$ povećava sa porastom mehaničkog momenta.

Mehanički momenat na vratilu sinhronog motora određuje aktivnu snagu koju će motor uzimati iz mreže. Mehanički momenat na vratilu motora predstavlja njegovo opterećenje.

6.2. UTICAJ PROMENE STRUJE POBUDE NA FUNKCIONISANJE SINHRONE MAŠINE

6.2.1. Krive regulacije

Tokom eksploatacije sinhrona mašina potrebno je odrediti struju pobude da bi sinhrona mašina radila sa željenim faktorom snage, a pri datoj armaturnoj struji. Za određivanje potrebne pobudne struje mogu poslužiti krive regulacije. Kriva regulacije predstavlja zavisnost pobudne struje od struje armature uz isti faktora snage. Familija krivih regulacije daje zavisnost pobudne struje od struje armature faktor snage kao parametar. Familija krivih regulacije data je na slici 6.5.



Slika 6.5. Familija krivih regulacije uz faktor snage kao parametar.

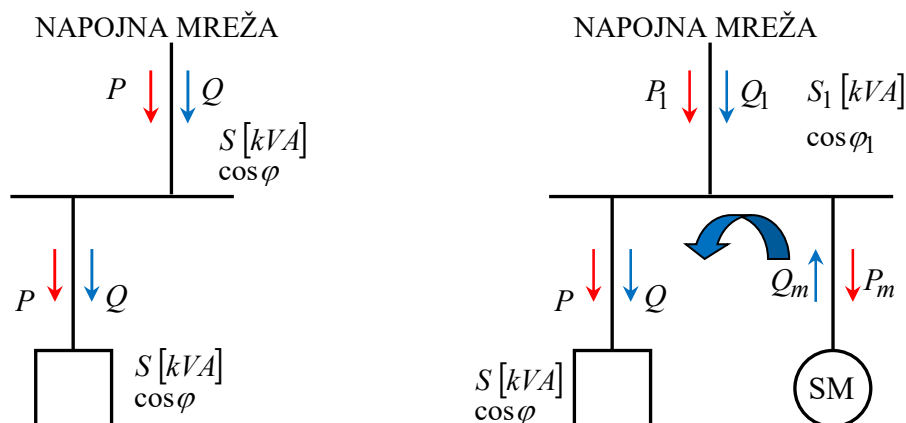
Sa krivih regulacije se može odmah očitati potrebna pobudna struja za zadanu struju armature i željeni faktor snage.

Oblik i karakter krivih regulacije mora se uzeti u obzir pri projektovanju regulatora napona.

6.2.2. V krive

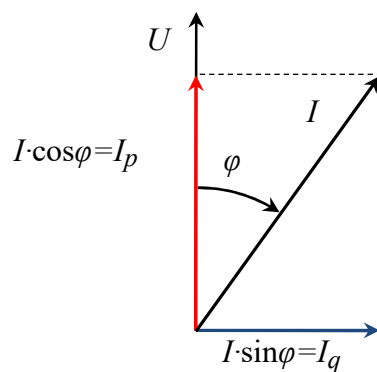
Jedna od prednosti sinhronog motora u odnosu na asinhroni motor je njegova mogućnost da radi sa kapacitivnim ili induktivnim faktorom snage. Faktor snage sinhronog motora se može podešavati na željenu vrednost. Asinhrona mašina može samo da troši reaktivnu snagu dok je sinhroni motor u mogućnosti da je proizvodi ili troši već prema potrebama u datim okolnostima. U industrijskim objektima kao pogonski motor raznih radnih mašina gotovo isključivo se koristi asinhroni motor, koji je potrošač reaktivne energije. Ako se na nekoj od radnih mašina kao elektromotor koristi sinhroni motor moguće je radom sinhronog motora u natpobuđenom režimu rada pokriti – iskompenzovati potrošnju reaktivne energije celog industrijskog objekta, odnosno obezbediti rad ovog industrijskog objekta sa $\cos \varphi = 1$. Razlozi za ovakvu primenu i rad sinhronog motora u natpobuđenom režimu su ekonomski (smanjenje ili eliminacija računa za utrošenu električnu energiju) ali i tehnički (manji padovi napona na napojnim vodovima, manji gubici snage na napojnim vodovima i transformatorima, moguć manji presek napojnih kablova ili oslobađanje u prenosnim kapacitetima za veći prenos aktivne snage). Sinhroni motor mora svojom proizvodnjom reaktivne energije pratiti potrošnju reaktivne energije asinhronih motora. Ovo se postiže promenom struje pobude asinhronog motora.

Na slici 6.6. je data ilustracija kompenzacije reaktivne energije pomoću sinhronog motora.



Slika 6.6. Ilustracija napajanja potrošača sa i bez sinhronog motora u potrošačkom konzumu.

Pre nastavka, podsećanje da je struju u naizmeničnom sistemu moguće razložiti na aktivnu i reaktivnu komponentu.



Slika 6.7. Prikaz struje preko aktivne i reaktivne komponente.

Neka se sinhroni motor napaja iz krute mreže. Aktivna snaga sinhronog motora se može odrediti jednim od sledeća dve izraza:

$$P = 3UI \cos \varphi,$$

$$P = 3U \frac{E_0}{X_s} \sin \delta.$$

Kada je opterećenje na vratilu sinhronog motora konstantno tada je i aktivna snaga konstantna. Neka se pod ovim okolnostima struja pobude menja, to će uticati na proizvodnju ili potrošnju reaktivne energije, ali će aktivna snaga ostati konstanta. Sa promenom struje pobude menjaće se struja armature, menjaće se faktor snage ali će njihov proizvod ostati konstantan. Proizvod:

$$I \cos \varphi = \text{const.},$$

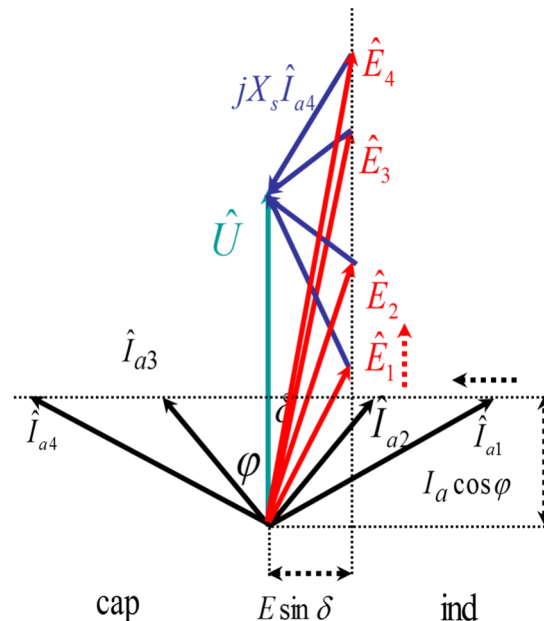
aktivna komponenta struje, je takođe konstantan, jer je opterećenje na vratilu motora konstantno. Naravno da se zbog promene struje pobude menja reaktivna komponenta struje.

Ako je opterećenje na vratilu sinhronog motora konstantno, sa promenom struje pobude menjaće se elektromotorna sila praznog hoda, menja će se ugao opterećenja ali će proizvod:

$$E_0 \cdot \sin \delta = \text{const.},$$

biti konstantan.

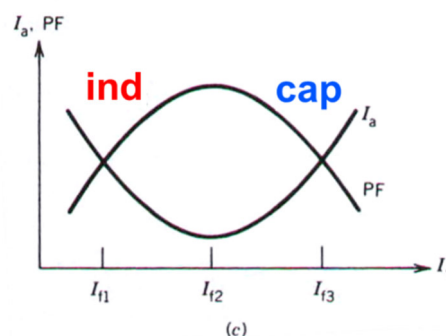
Na slici 6.8. je prikazana familija fazorskih dijagrama za različite vrednosti struje pobude.



Slika 6.8. Familija fazorskih dijagrama za različite struje pobude pri konstantnom opterećenju sinhronog motora

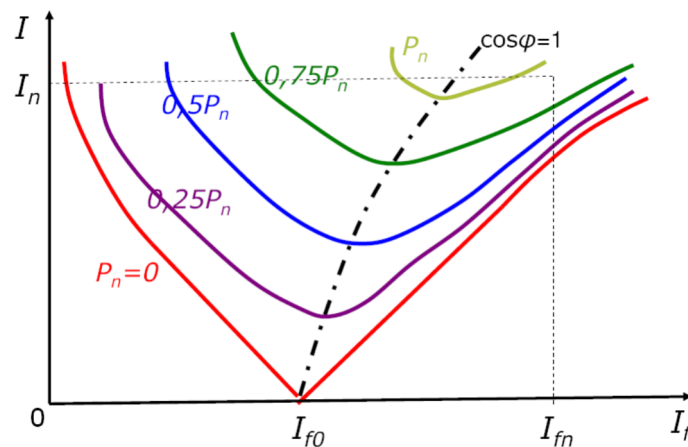
Na slici je prikazano da se sa promenom struje pobude $I_{f1} < I_{f2} < I_{f3} < I_{f4}$ vrh fazora armature kreće duž naznačene horizontalne prave, dok se vrh fazora elektromotorne sile praznog hoda kreće duž naznačene vertikalne prave. Struja pobude I_{f1} je najmanja sinhroni motor rad potpobuđen, troši reaktivnu snagu i faktor snage je induktivan. Kada se struja pobude poveća sa vrednosti I_{f1} na vrednost I_{f2} smanjiće se reaktivna komponenta struje a onda i struja armature, pa je $I_{a2} < I_{a1}$. Sa povećanjem struje pobude struja armature će opadati i u jednom trenutku motor će raditi sa $\cos\varphi = 1$. Tada struja armature ima najmanju vrednost i jednaka je aktivnoj komponenti, reaktivna komponenta je nula. Ako se struja pobude i dalje poveća i dostigne vrednost I_{f3} sinhroni motor će preći iz potpobuđenog u natpobuđeni režim rada. Sinhroni motor radi sa faktorom snage koji kapacitivan. Reaktivna komponenta struje je promenila smer. Struja armature ponovo raste. Dalje povećanje struje pobude na I_{f4} praćeno je daljim povećanjem struje armature i reaktivne energije koju isporučuje sinhroni motor.

Na slici 6.9. prikazana je promena struje armature i faktora snage od struje pobude. Pri malim vrednostima struja armature ima značajnu reaktivnu komponentu, kako struja pobude raste struja armature opada ima minimalnu vrednost pri struji pobude koja obezbeđuje normalnu pobuđenost, I_{f0} . Ako se struja pobude poveća iznad ove vrednosti struja armature će početi da raste. Sa slike se vidi da zavisnost struje armature od struje pobude ima oblik slova V.

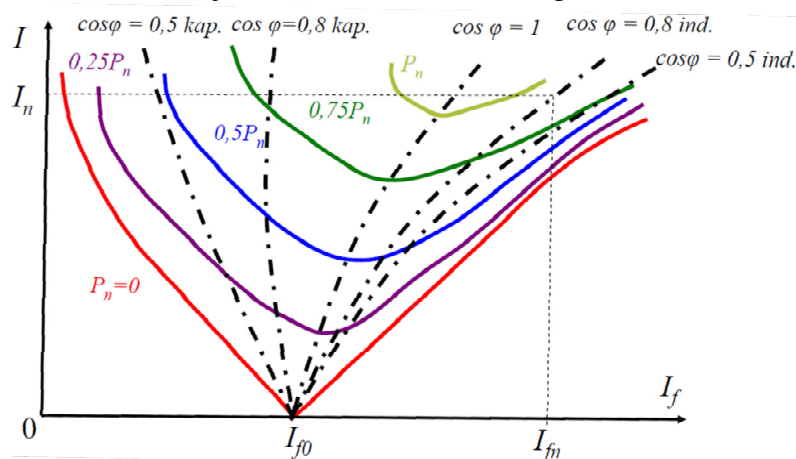


Slika 6.9. Dijagram promena struje armature i faktora snage od pobudne struje.

Ako se pri nekom drugom opterećenju na vratilu sinhronog motora menja struja pobude dobiće se neka druga V kriva. Na slici 6.10. prikazana je familija V krivih za različite snage na vratilu sinhronog motora. Naznačeno je ograničenje po struji pobude I_{fn} i struji armature I_{an} . U tački gde V kriva ima minimum $\cos\varphi = 1$.



Slika 6.10 Familija V krivih za različite snage na vratilu motora.



Slika 6.11. Dijagram zavisnosti struje armature od pobudne struje, a pri raznim vrednostima radnog opterećenja (V-krive). Crticama su naznačene iste zavisnosti, samo pri različitim faktorima snage. **POTREBNO JE PRILAGODITI IND. – KAP. MOTORSKOM REŽIMU RADA**

Izlaganje u ovom delu o V krivama dato je za motorski režim rada. Zaključci se naravno isti i za generatorski režim rada. Krive važe podjednako za motorski i generatorski proces rada.

6.2.3. Rezime za generatorski proces rada

U stvarnom radu mreža nije kruta, naročito u pogledu napona. Naime, frekvencija je jednaka za ceo sistem, ali napon je na raznim tačkama mreže različit, prema iznosu i vrsti opterećenja. Ako se poveća "punjenje" pogonske mašine nekog relativno velikog generatora, može doći do povećanja frekvencije cele mreže, ali to zavisi od snage agregata koji održava frekvenciju mreže, jer veći deo agregata, naročito manjih, radi sa snagama po unapred utvrđenom programu, bez učešća automatskog regulatora brzine. Automatski regulatori napona svih sinhronih generatora dejstvuju i u paralelnom radu, ali sa određenim ograničenjima u tom smislu da ne dođe do slanja jalove energije iz jednog sinhronog generatora u drugi, a održavajući ujedno i napon na priključcima na jednoj unapred određenoj visini, shodno uslovima mreže i opterećenja.

Učešće statorskih ampernavojaka u ukupnoj magnetnoj pobudi sinhronih generatora naziva se reakcija indukta, kao što je rečeno pri opisu kratkog spoja.

Ovde treba dodati da dejstvo reakcije indukta zavisi ne samo od jačine struje opterećenja nego i od njenog karaktera, to jest da li je induktivna, radna ili kapacitivna. U slučaju induktivnog opterećenja reakcija indukta predstavlja direktno suprotstavljanje pobudi rotora, pri radnom suprotstavljanje ne dolazi naročito do izražaja, dok u slučaju kapacitivnog opterećenja predstavlja direktno potpomaganje dejstva pobudne struje rotora (sl.6.3.08. i 09.).

Na ovom mestu treba da se objasne i unutrašnje promene napona usled termogene i rasipne otpornosti namota indukta. Već je rečeno da je kod većih mašina termogena otpornost zanemariva u odnosu na rasipnu, koja je induktivnog karaktera. Kada je sinhrona mašina opterećena induktivno, produkt struje i rasipne otpornosti predstavlja sniženje indukovanog napona (sl.6.4.13.).

$$\overline{U}_{gen} = \overline{U}_i - \Delta \overline{U}_{int} \quad ,$$

gde je:

$$\Delta U_{int} \approx I_Q \cdot X_s \quad .$$

Ovde je uzeto u obzir samo I_Q , jer je praktički sniženje indukovanog napona sinhronog generatora jednako produktu jalove komponente struje opterećenja i rasipne otpornosti X_s . To znači da se pri induktivnom opterećenju (potpunom ili delimičnom, $\varphi > 0$) indukovani napon biti snižen, a pri kapacitivnom ($\varphi < 0$) povišen za iznos:

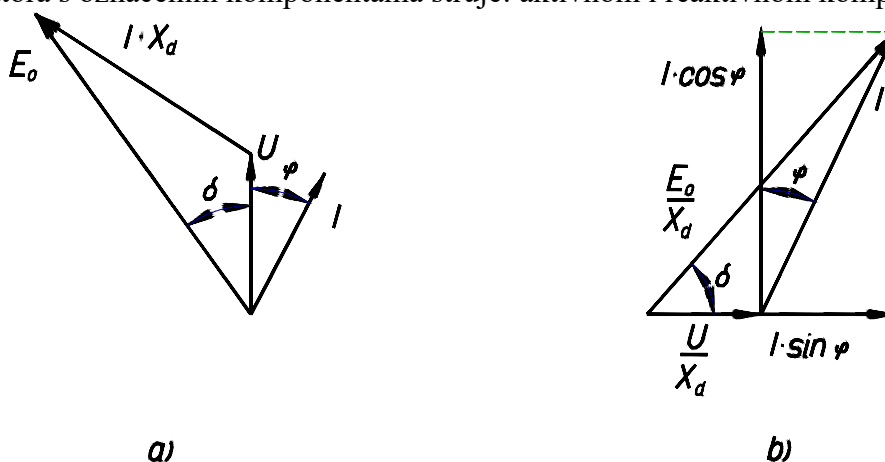
$$I_Q \cdot X_s = I \cdot \sin \varphi \cdot X_s \quad .$$

Iz navedenog se zaključuje da se induktivna komponenta struje opterećenja suprotstavlja pobudi rotora i još naknadno prouzrokuje sniženje već indukovanog napona (ΔU_{int}), dok kapacitivna komponenta potpomaže pobudu rotora i naknadno povišava indukovani napon (zbog $\varphi < 0$ je $\sin \varphi < 0$, pa ΔU_{int} postane negativno i povisi indukovani napon). Videti i vektorske dijagrame na slikama 6.3.02. i 6.3.08.

7. OBLAST MOGUĆEG RADA

Oblast mogućeg rada ili pogonska karta predstavlja skup dozvoljenih – dopuštenih radnih tačaka u $Q - P$ ravni sinhrona mašine. Do pogonske karte se dolazi tako što se u $Q - P$ ravan ucrtaju ograničenja koja postoje od samog generatora i od turbine. Pogonska karta se crta se u relativnim jedinicama. U razmatranjima koja su u ovoj lekciji smatraće se da je napon sinhrona mašine nominalan.

Do sada je fazorski dijagram crtan sa fazorima koji su dimenziono bili naponi. Do pogonske karte se dolazi polazeći od strujnog fazorskog dijagrama sinhrona mašine. Fazorski strujni dijagram sinhrona mašine dobija se na osnovu naponskog fazorskog dijagrama zakretanjem svih veličina za -90° i deljenjem sa sinhronom reaktansom, odnosno deljenjem svih veličina sa jX_d . Na slici 7.1. su prikazani naponski i strujni fazorski dijagrami turbogeneratora s označenim komponentama struje: aktivnom i reaktivnom komponentom.

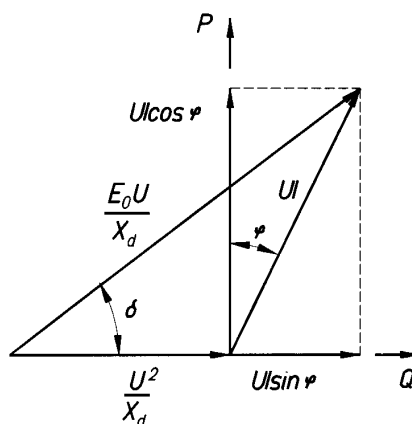


a)

b)

Slika 7.1. Naponski i strujni fazorski dijagram.

Množenjem veličina u strujnom dijagramu s naponom dobije se dijagram snage u $Q - P$ ravni i on je prikazan na slici 7.2.



Slika 7.2. Dijagram snage sinhrona mašine

Kada se pogleda dijagram snage u $Q - P$ sa slike 7.2. vidi se da je jedan od vektora srazmeran proizvodu UI odnosno struji armature, a drugi vektor je određen elektromotornom silom praznog hoda, odnosno strujom pobude. Vektor koji je označen sa $E_0 U / X_d$ sa $Q -$ osom zaklapa ugao opterećenja δ . Na osnovu ovih iznetih navoda za dijagram snage odmah postaje jasno da nisu sve tačke u ovoj ravni dostupne. Kada se na dijagramu snage datom u $Q - P$ ravni uključe ograničenja koje unosi sam generator i turbina dobija se skup mogućih radnih tačaka sinhronog generatora – pogonska karta. Moraju se uvažiti sledeća ograničenja:

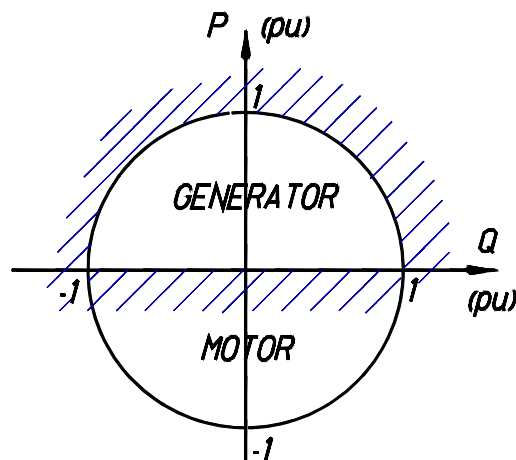
- usled struje armature,
- usled struje pobude,
- stabilnog rada,
- maksimalnog i minimalnog opterećenje turbine.

Ograničenje usled struje armature

Dozvoljeno zagrevanje statorskog namotaja je definisano termičkom klasom izolacije za ugrađenu vrstu izolacije. Dozvoljenom temperaturom izolacije je ograničena maksimalna statorska struja koja u trajnom radu sme teći kroz armaturni namotaj, a da se on ne pregreje. Najčešće je to nazivna struja generatora. Ako je napon konstantan i nominalan, tada je ograničena i prividna snaga sinhrona mašine. Dakle ograničenje struje armature na nazivnu vrednost (da se namotaj na bi pregrejao) uz nazivni napon se svodi na ograničenje prividne snage, koja mora biti manja od nazivne. S obzirom na vezu između aktivne, reaktivne i prividne snage:

$$p^2 + q^2 = s^2$$

dobija se da je ograničenje po struji armature zapravo kružnica. Poluprečnik kružnice je određen strujom armature. Kružnica jedinične vrednosti (u r.j, odnosno p.u.) u $Q - P$ ravni predstavlja granicu prividne snage zbog zagrevanja statorskog namotaja, što je prikazano na slici 7.3. Radna tačka se mora naći unutar kružnice, prvi i drugi kvadrant su generatorski režim dok je treći i četvrti kvadrant motorski režim rada. Tačke izvan kružnice nisu dozvoljene jer bi se stator pregrejao.



Slika 7.3. Ograničenje po struji armature, usled zagrevanja statora.

Ograničenje usled struje pobude.

Govori se o ograničenju maksimalne i minimalne struje pobude.

Generator sme trajno da radi u natpobuđenom režimu sa pobudnom strujom koja je manja od trajno dopuštene. Trajno dopuštena struja pobude je za nekih 10% veća od nominalne struje pobude. Za struje pobude koje su veće od trajno dopuštene pobudni namotaj bi se pregrejao. Ako se pođe od ugaonih karakteristika $p(\delta)$ i $q(\delta)$:

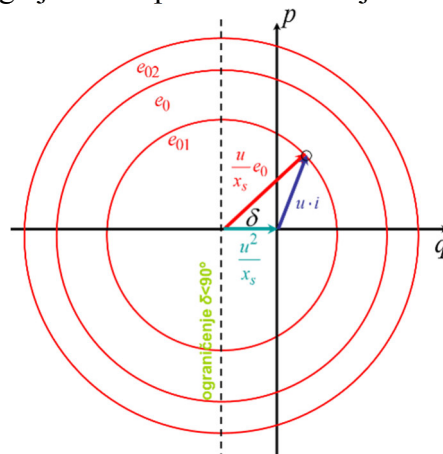
$$p = u \frac{e_0}{x_s} \cdot \sin \delta,$$

$$q = \frac{u}{x_s} \cdot (e_0 \cos \delta - u),$$

dobija se kružnica:

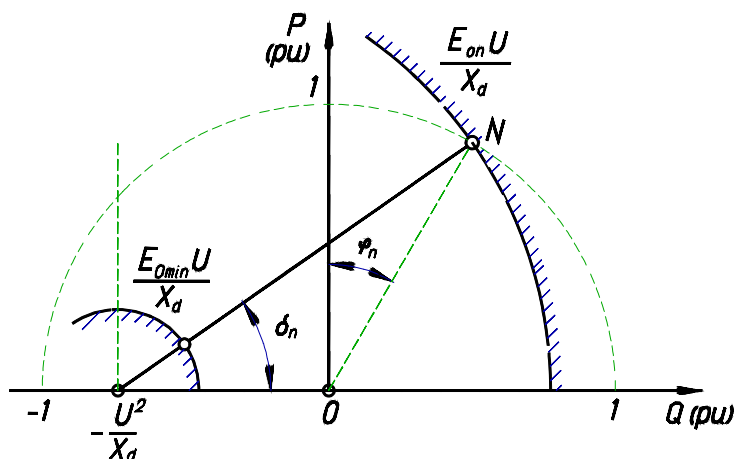
$$p^2 + \left(q + \frac{u^2}{x_s} \right)^2 = \left(u \frac{e_0}{x_s} \right)^2$$

koja predstavlja geometrijsko mesto tačaka u $Q - P$ ravni za datu e_0 , odnosno struju pobude. Na slici 7.4. prikazane su tri kružnice koje predstavljaju geometrijsko mesto tačaka sa konstantnom strujom pobude. Ove kružnice imaju centar izmešten iz koordinatnog početka. Neka kružnica sa označenom elektromotornom silom praznog hoda e_{02} odgovara dozvoljenoj trajnoj struji pobude, tada su moguće radne tačke u trajnom radu samo unutar te kružnice. Pri većoj struji od dopuštene pregrijao bi se pobudni namotaj.



Slika 7.4. Ograničenje po struji pobude, usled zagrevanja pobudnog namotaja.

U potpobuđenom režimu zbog male struje pobude smanjena je i maksimalna snaga koju generator može konvertovati pa je generator podložan ispadanju iz sinhronizma. Da bi se ovo predupredilo uvodi ograničenje po minimalnoj struji pobudne sa kojom može da radi sinhrona mašina. Ovo ograničenje se pogotovu primenjuje kod generatora kod kojih regulacija male struje pobude može biti problematična. Ograničenje po minimalnoj struji pobude predstavlja kružnicu u potpobuđenom području rada za vrednost pobudne struje od 10% do 30% nazivne pobudne struje.



Slika 7.5. Ograničenja po maksimalnoj i minimalnoj struji pobude.

Na slici 7.5. prikazano je ograničenje po struji armature (nominalna struja armature), ograničenje po maksimalnoj struji pobude (nominalna struja pobude), i ograničenje po

minimalnoj struji pobude. U preseku ograničenja po nominalnoj struji armature i po nominalnoj struji pobude definisana je nominalna radna tačka i nominalan faktor snage.

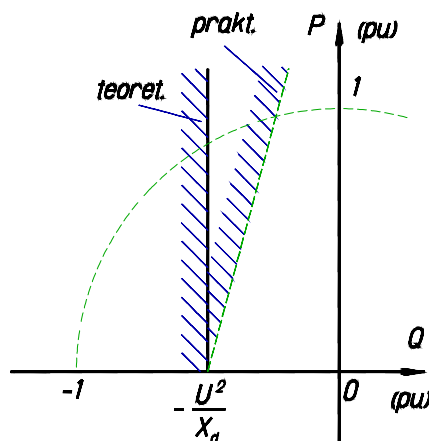
Da bi se u fazi projektovanja odredila struja pobude I_f potrebna za dimenzionisanje pobudnog namotaja potrebno je definisati (usvojiti) koliki želimo da bude nominalni faktor snage $\cos\varphi_{nom} = 0,6 \div 0,95$. Nazivni faktor snage definiše moguću reaktivnu snagu koju može proizvesti generator. Nazivni faktor snage se nalazi na tablici generatora. Sa slike 7.5. se vidi da se generator sme opteretiti nazivnom strujom sve dok je faktor snage između 1 i $\cos\varphi_{nom}$. Ako φ i dalje raste tj. $\cos\varphi$ pada ispod nazivnog tada se sa slike 7.5. vidi da struja pobude mora rasti preko nazivne vrednosti, tako da dolazi do pregrevanja pobudnog namotaja. Ako je potrebo da sinhroni generatora radi sa $\cos\varphi < \cos\varphi_{nom}$ mora se smanjiti struja armature ispod nominalne vrednosti. Sa slike 7.5. se vidi da sinhroni generator može raditi tako da mu je aktivna snaga jednaka prividnoj $P = S_{nom}$ ako turbina može to da obezbedi. Međutim, sinhroni generator ne može raditi sa $Q = S_{nom}$ jer bi to značilo da struja pobude mora biti veća od nominalne, obično je $Q_{max} = 0,7 \div 0,8 S_{nom}$.

Ograničenje zbog mogućeg nestabilnog rada

Ograničenje rada sinhrona mašine u stacionarnom stanju definirano je i statičkom granicom stabilnosti. Turbogenerator se sme opteretiti do maksimalnog ugla opterećenja od $\delta = 90^\circ$, ali zbog sigurnosti se ne dopuštaju ni uglovi opterećenja bliski 90° jer postoji opasnost od ispadanja iz sinhronizma. Zbog sigurnosti neprekidnog rada sinhronih generatora definiše se praktična granica stabilnosti s određenom rezervom u snazi. Najčešće se rezerva određuje od 10% nazivne snage, tako da se od teoretske do praktične granice stabilnosti dolazi smanjujući aktivnu snagu za 0,1Sn. Kod turbogeneratora praktična granica određuje jednostavnije uzimajući praktičnu prevalni ugao opterećenja od $\delta = 70^\circ$ umesto teorijskih $\delta = 90^\circ$. Teoretska i praktična granica stabilnosti prikazane su na slici.

Teoretska granica statičke stabilnosti je kod turbogeneratora definisana uglom opterećenja od $\delta = 90^\circ$ što na pogonskoj karti predstavlja vertikalnu pravu potpobuđenom području rada.

Zbog sigurnosti se ne dopušta rad sa uglom opterećenja većim od $\delta = 70^\circ$ što predstavlja praktičnu granicu statičke stabilnosti.



Slika 7.6. Teorijska i praktična granica stabilnog rada.

Ograničenje zbog turbine

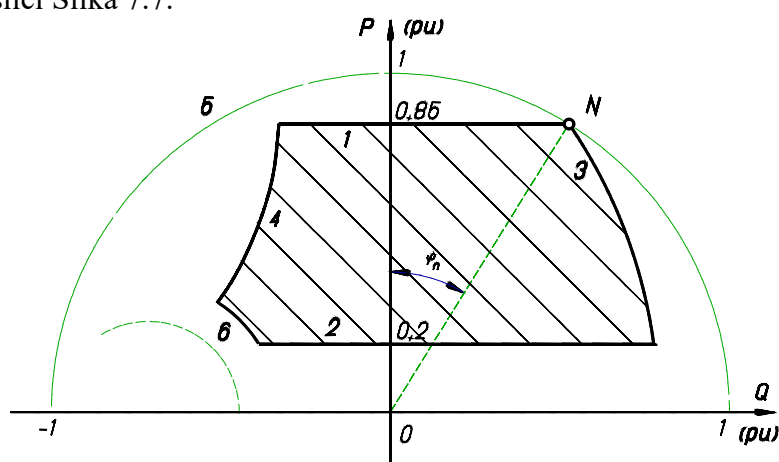
Maksimalna aktivna snaga generatora snaga je po pravilu jednaka nazivnoj aktivnoj snazi generatora jer se turbina odabire za tu snagu. Ponekada je turbine veće snage od nominalne aktivne snage generatora, pa onda generator može davati veću aktivnu snagu od svoje nazivne. Maksimalna aktivna snaga generatora jednaka je nazivnoj prividnoj snazi, ali sa faktorom snage

$\cos\varphi = 1$, naravno uslov je da tu snagu može davati turbina. U praksi se ponekad događa da turbina ne može trajno davati ni nazivnu aktivnu snagu generatora, što znaci da se generator ne može trajno nazivno opteretiti.

Minimalna aktivna snaga ograničava se kod turbogeneratora zbog nemogućnosti ekonomičnog i stabilnog rada parnog kotla (u kojem se stvara para za pogon turbine). Zato se definiše minimalna aktivna snaga turbogeneratora i ona obično od 10% do 40% nazivne aktivne snage generator. Kod nekih vrsta vodnih turbina ograničava se minimalna količina vode zbog pojave vibracija pri jako malim dotocima vode.

Pogonska karta turbogeneratora sa svim ranije uvedenim ograničenjima:

- 1 - maksimalna aktivna snaga ograničena turbinom,
 - 2 - minimalna aktivna snaga ograničena tehničkim minimumom kotla,
 - 3 - granica po maksimalnoj struji pobude, zbog pregrijavanja pobudnog namotaja,
 - 4 - praktična granica statičke stabilnosti u, potpobuđenom području,
 - 5 - granica po maksimalnoj armaturnoj struji zbog pregrijavanja armaturnog namotaja,
- prikazana je na slici Slika 7.7.



Slika 7.7. Pogonska karta turbogeneratora

Performanse sinhronne mašine u svim trajnim procesima rada zadane su prvenstveno zagrejanjem provodnika statora usled nominalne struje opterećenja (I_n) i zagrejanjem provodnika rotora nominalnom pobudnom strujom ($I_{pob\ n}$). Ova zavisi i od faktora snage struje opterećenja i povećava se ako se pri istoj struji opterećenja smanjuje faktor snage u prepobuđenom stanju ($\sin\varphi > 0$).