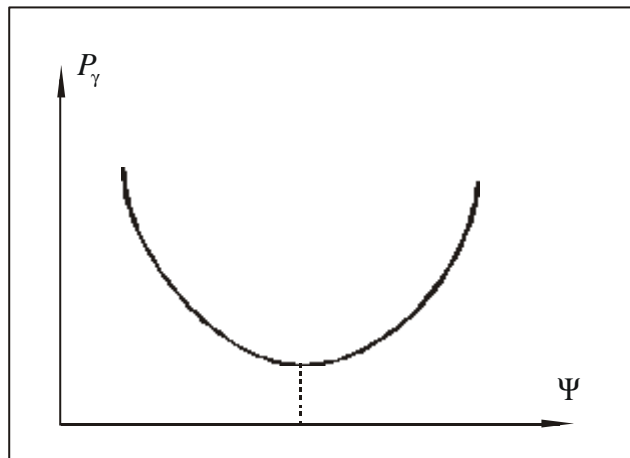


ovo je približno tačno-gubici imaju minimum.



sl.1

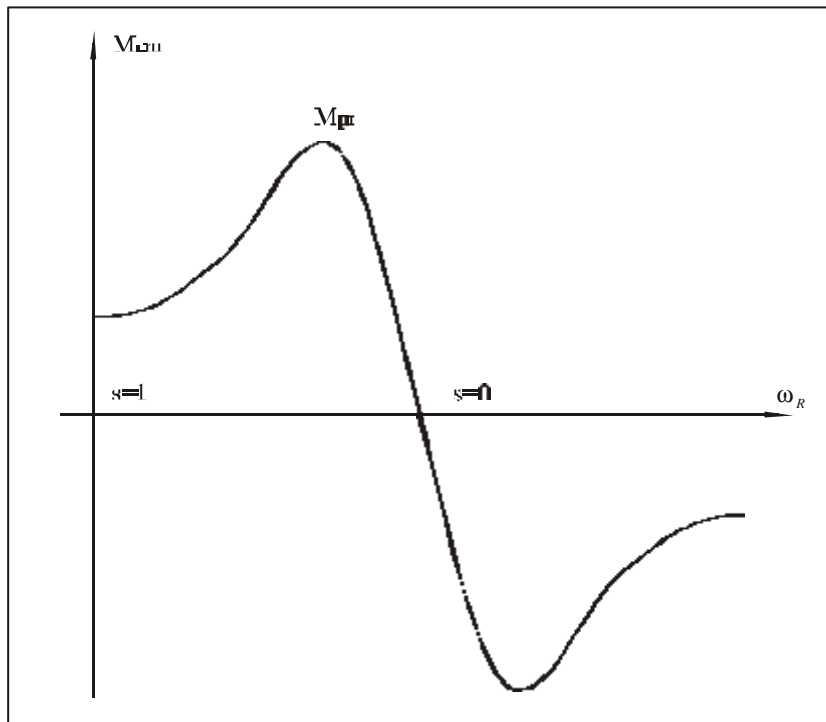
Zaključili smo da jedan isti par brzina-moment možemo zadovoljiti sa puno različitih kombinacija učestanost-napon koje se preslikavaju u puno različitih kombinacija struja  $i_d - i_q$ .

Utvdili smo da je moment u osnovi proizvod  $i_d$  i  $i_q$ , da su gubici proporcionalni zbiru kvadrata tih struja, pa je onda zahtev za momentom formulisan preko hiperbole konstantnog momenta, a optimalnu tačku nalazimo tamo gde je poteg minimalan i tako možemo za bilo koje opterećenje smanjiti gubitke u motoru što je naš cilj.

Formula koja može biti potrebna pri rešavanju ispitnih zadataka :

$$M_{em} = \frac{2}{\frac{s}{s_{pr}} + \frac{s_{pr}}{s}} M_{pr} \quad \text{Klosova formula}$$

(zanemarili smo pad napona na statorskom otporu:  $R_s=0$ ). Prirodnu karakteristiku, koja za  $s=0$  ima presek sa apscisom, a za  $s=1$  presek sa ordinatom, možemo približno prikazati Klosovom formulom.



sl.2

## Sinhrona mašina

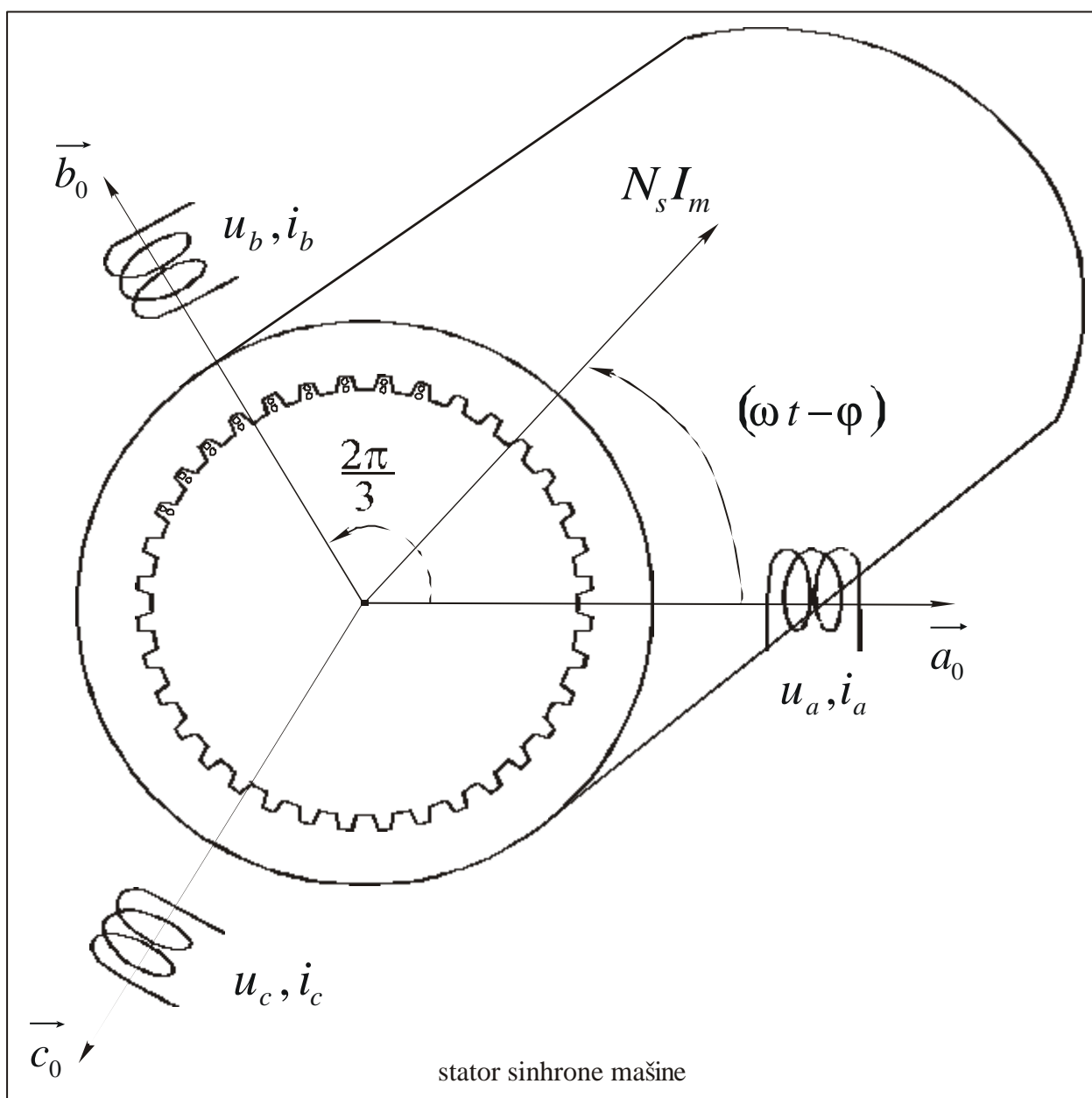
Sinhrona mašina su dvostrano napajane mašine. Kod asinhronog motora, rotorski fluks je bio prouzrokovan akcijom statora (na stator dovodimo napajanje). Rotorski fluks je kod asinhronog motora indukovano od strane statora, pa se zato taj motor i zove indukcionim. Asinhroni motor je jednostrano napajana mašina (moment zavisi od kvadrata fluksa). Kod sinhrona mašine, rotorski fluks nije posledica statora već može biti posledica:

- permanentnih magnetna na rotoru ili
- delovanja magnetopobudne sile rotorskog pobudnog namotaja

Na rotoru sinhrona mašine postoji magnet – ako je to namotaj, onda je to elektromagnetni magnet ili je prisutan baš permanentni magnet. Prema tome, po samoj konstrukciji, sinhrona mašina možemo podeliti u dve grupe: one koje imaju permanentni magnet na rotoru i one koje imaju elektromagnet.

Najpre želimo da proučimo konstrukciju sinhrona mašine. Stator sinhrona mašine je u svemu jednak statoru asinhrona mašine (čak su zamenljivi). Sastoji se od magnetnog i strujnog

kola. Magnetno kolo je načinjeno od limova zato što je u statoru priroda fluksa naizmenična. Strujno kolo se sastoji od provodnika koji su ugrađeni u naročite proreze koje zovemo žlebovi. Ova slika ujedno predstavlja i jedan komad lima od kojeg je napravljeno magnetno kolo sinhronne mašine. Mnogo limenih folija ovog oblika se slažu jedna do druge i tako se pravi statorski cilindar.



sl.3

Strujno kolo statora sastoji se od provodnika koji su smešteni u žlebove. Svi ti provodnici formiraju tri namotaja.

$\vec{a}_0, \vec{b}_0, \vec{c}_0$  - ortovi osa faznih namotaja.

Zadavanjem faznih sruja  $i_a, i_b, i_c$ , tako da su one naizmenične, a da su međusobno fazno pomerene za  $\frac{2p}{3}$ , što je ujedno i fazni pomeraj između osa namotaja:

$$i_a = I_m \cos(\omega t - j),$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - j - \frac{2p}{3}),$$

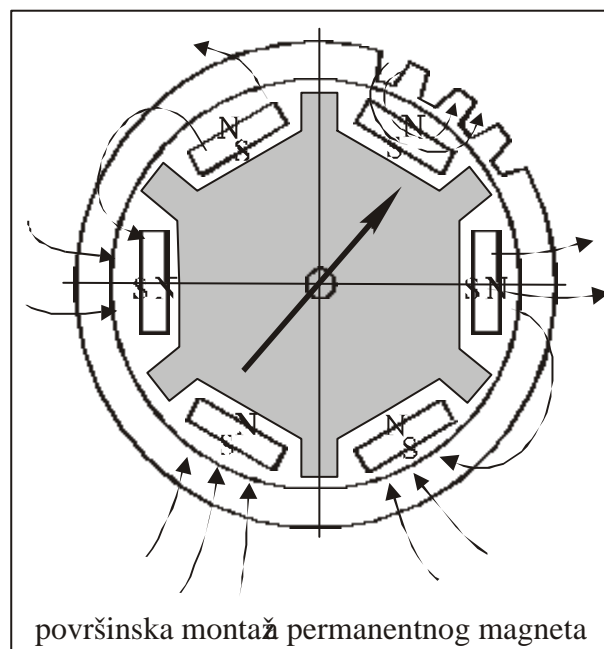
$$i_c = I_m \cos(\omega t - j - \frac{4p}{3}),$$

pojaviaće se magnetopobudna sila amplitude  $N_s I_m$  i ugla  $\omega t - j$ . Drugim rečima, postizemo obrtno polje kao i kod asinhronog motora.

Postoje različite konstrukcije rotora. Počnimo sa rotorom u kome postoji permanentni magnet. Sinhrona mašina sa permanentnim magnetom na rotoru postoje u dve varijante:

- rotor sa površinskom montažom permanentnog magnetna
- rotor sa unutrašnjim (ukopanim) permanentnim magnetima

Način montaže permanentnog magnetna utiče na eksploatacionu karakteristiku sinhronog motora.

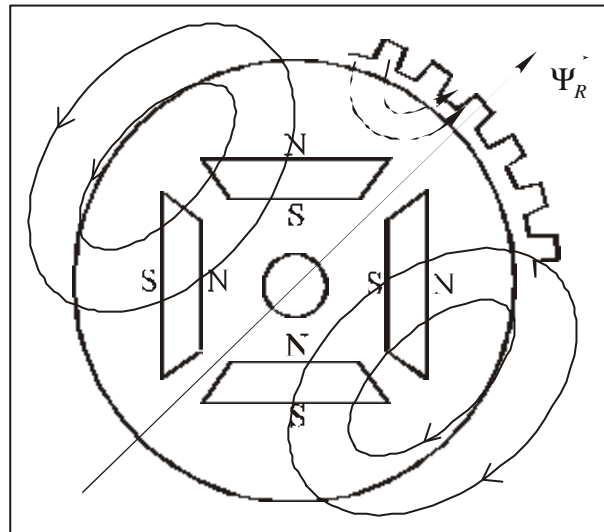


sl.4

Neposredno duž statora, na samoj površini rotora, montirani su permanentni magneti. Ispunjeni deo predstavlja lim, tj. gvozdeni deo rotora, a neospeneni delovi su permanentni magneti. U rotorskom limu postoji predviđeni prostor gde treba ugraditi permanentne magnetne. Orijentacija permanentnih magneta je takva da se formira rotorska pobuda u naznačenom smeru. Linije polja su nacrtane kao i vektor fluksa.

Primetimo da je prostorna orijentacija rotorskog fluksa jednoznačno određena položajem rotora. Ako znamo položaj rotora, znamo i položaj rotorskog fluksa. Kod asinhronog motora to nije bio slučaj: rotorski fluks je klizao (napredovao ili nazadovao) u odnosu na rotor.

Druga vrsta ugradnje magneta je tzv. unutrašnja:



sl.5

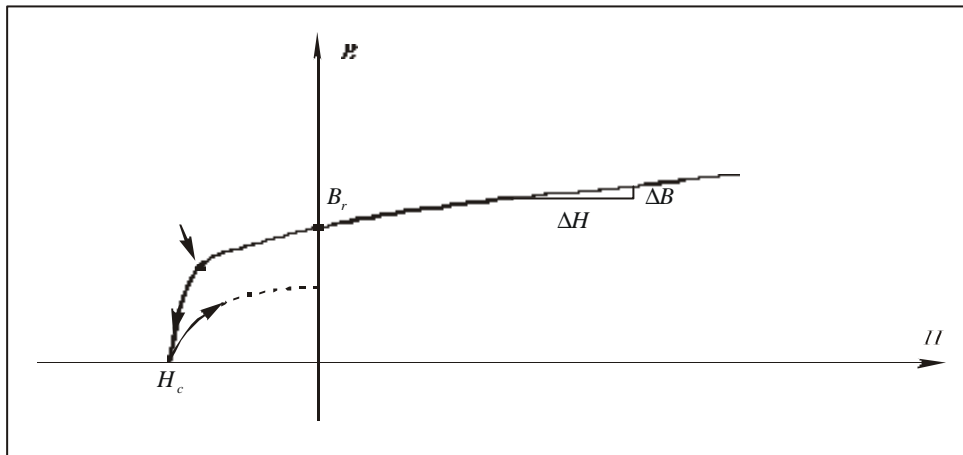
U samom telu rotora ostavljen je prazan prostor u kome se ugrađuju permanentni magneti. Oni takođe formiraju neko pobudno polje čija je prostorna orijentacija određena položajem rotora.

Između ove dve konstrukcije postoji jedna bitna razlika. Statorska induktivnost i statorska induktivnost rasipanja određuju se:

$$L_s, L_{\sigma} \sim \frac{N_s^2}{R_m}$$

Za  $L_{\sigma}$ ,  $R_m$  je magnetni otpor na putu statorskog rasipnog fluksa.

Induktivnosti mašine bitno zavise od načina montaže permanentnih magneta. Ova zavisnost proizilazi iz osobina samog permanentnog magneta. Karakteristika magnetizacije permanentnog magneta izgleda ovako:



sl.6

U odsustvu bilo kakvog polja  $H$ , permanentni magnet daje relativno visoke vrednosti remanentne indukcije (0.8-1T). Promena polja  $H$  prouzrokuje varijaciju polja  $B$  u prvom kvadrantu tako da je  $\frac{\Delta B}{\Delta H} \approx \mu_0$ . Permanentni magnet je materijal koji za nultu vrednost polja  $H$  daje relativno veliku vrednost indukcije. Reagovanje tog materijala na eksterno dovedeno polje  $H$  je takvo da je priraš taj polja  $B$  uzrokovan eksternim poljem  $H$  isti kao u sluèaju da je na mestu permanentnog magneta vazduh. Ukoliko se na permanentni magnet dovede negativno polje i prevaziđe tzv. koleno karakteristike, posle koga ona viš e nije linearna, magnet se trajno oš teæuje. Povratak nultim vrednostima polja  $H$  viš e ne prouzrokuje iste vrednosti indukcije (ovo se zove trajna demagnetizacija). Ova kritična vrednost polja  $H$  na kolenu karakteristike bliska je preseku sa apscisom  $H_c$  (koercitivno polje magneta). Bitan detalj za nas je ovaj: reakcija permanentnog magneta na eksterno polje je takva kao da je on vazduh.

Ukoliko razmatramo  $L_s$  i  $L_\phi$  treba da uoèimo da se ispod statorskih zubaca kod površ inske montaže nalazi permanentni magnet-dakle vazduh. Magnetopobudna sila statora æe promeniti polje-rasipno i statorsko. Drugim reèima, ako je montaža magneta površ inska, efektivan vazduš ni zazor u magnetnom pogledu jednak je zbiru mehanièkog vazduš nog zazora i debljine permanentnih magneta. Poš to je magnetni otpor  $R_m$  proporcionalan vazduš nom zazoru, u sluèaju površ inske montaže magneta imamo jako male vrednosti statorske induktivnosti:

površinska montaža

unutrašnja montaža

$$L_s \sim (0.01-0.1) [\text{r.j}]$$

$$L_s \sim (0.1-0.5) [\text{r.j}]$$

Kada kažemo da je  $L_s = 0.1$  r.j. to znači da je  $L_s \omega_{nom} = 0.1 \frac{U_n}{I_n}$  (svodimo na nazivnu impedansu).

U slučaju da se radi o unutrašnjoj montaži (magneti su unutar rotora), ispod statorskih namotaja se nalazi gvožđe (materijal visoke permeabilnosti), pa je efektivna vrednost vazdušnog zazoru u magnetnom pogledu jednaka mehaničkoj. Varijacije ovih reaktansi bitno će uticati na karakteristike sinhronog mašine.

- Ispitni zadatak

Odrediti polje H u jednoj sinhronoj mašini na osnovu karakteristika permanentnog magneta .

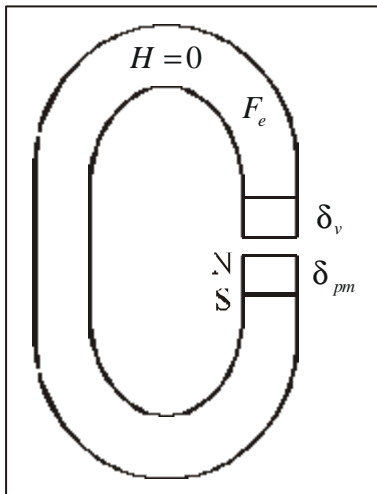
Potrebno je da na bilo kojoj od prethodne dve slike uočimo šta je put fluksa, pa da pretpostavimo da je u svim delovima tog puta koji prolaze kroz gvožđe, polje  $H=0$  zbog visoke permeabilnosti gvožđa. Zatim treba da uočimo da imamo vazdušni zazor  $d_v$  i debljinu permanentnog magneta  $d_{pm}$ , pa na osnovu toga da je kružni integral polja H jednak nuli, dođemo do izraza:

$$H_v d_v + H_{pm} d_{pm} = 0$$

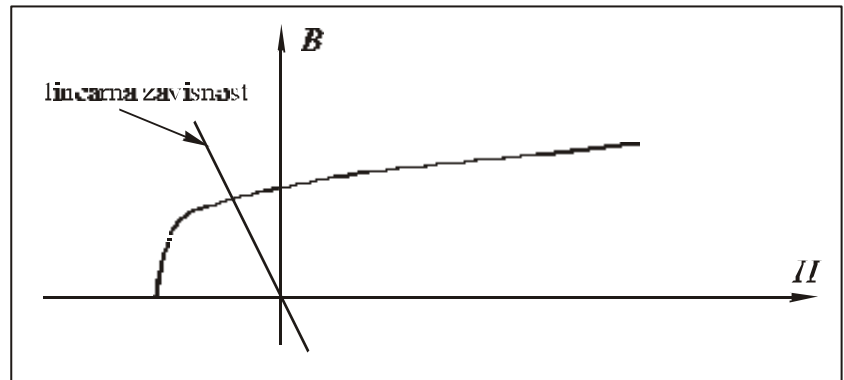
$$B_v = B_{pm} \quad \text{jer je } \text{div} B = 0$$

$$H_v = \frac{B_v}{\mu_0}$$

$$B_{pm} = -\mu_0 \frac{d_{pm}}{d_h} H_{pm}$$



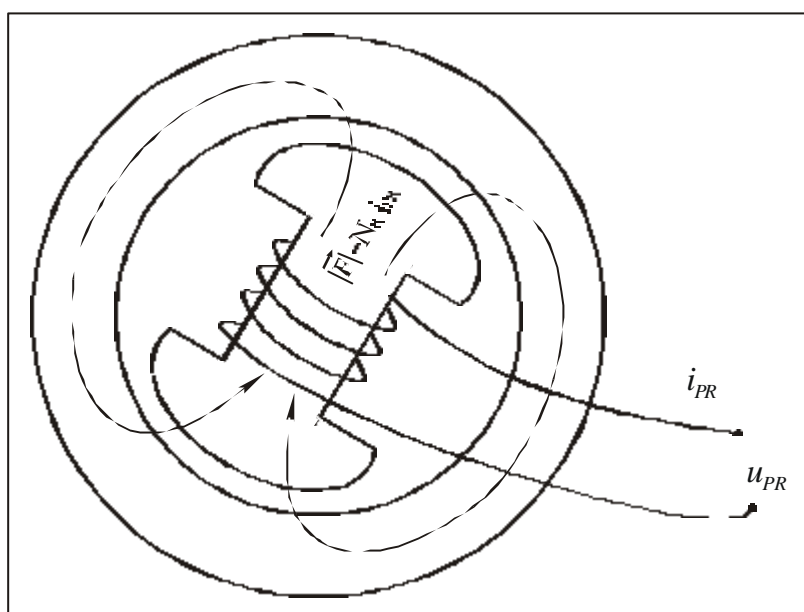
sl.7



sl.8

Treba da dobijemo pravu negativnog nagiba, koji je određen odnosom debljine permanentnog i vazdušnog zazora.

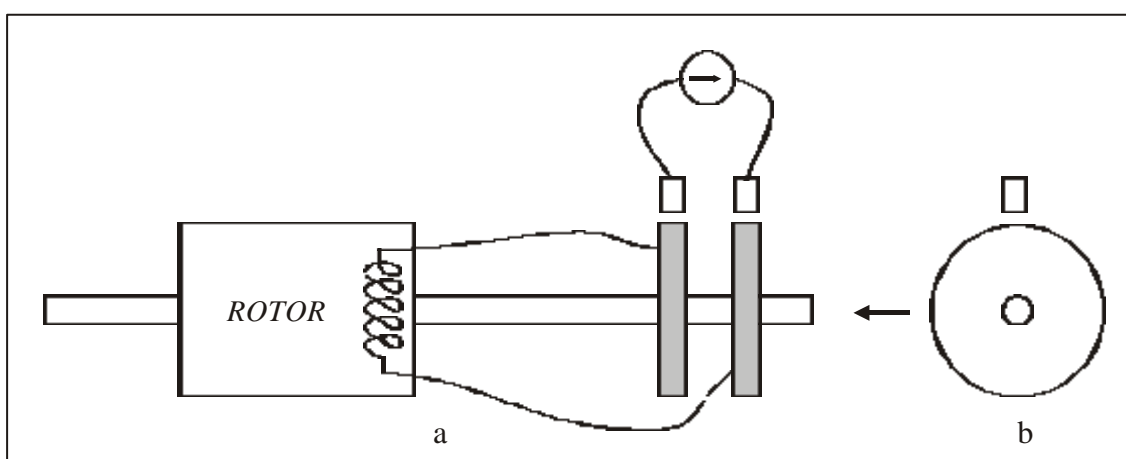
Druga vrsta sinhronih mašina na rotoru ima elektromagnetima namotani rotor (namotaje na rotoru). Kod namotanog rotora, dakle, postoje na rotoru nekakvi provodnici. Kada kroz ove provodnike propustimo struju pobude rotora  $i_{pr}$ , postojæe vektor magnetopobudne sile jednak po modulu  $N_r i_{pr}$ , gde je  $N_r$  broj provodnika na rotoru. Koliènik magnetopobudne sile i magnetnog otpora na putu rotorskog fluksa daæe sam rotorski fluks koji æe takoðe imati istu orijentaciju kao i magnetopobudna sila. Ako je rotor namotan, postoji jedan kvalitet u odnosu na rotor permanentnog magneta: varijacijom struje koja protieæe kroz rotorske namotaje, moæemo proizvoljno varirati amplitudu rotorskog fluksa. Ova struja, oèigledno, treba da bude jednosmerna.



sl.9

Ako se vratimo na idealizovanu cilindričnu mašinu i podelu mašina na one za jednosmernu struju i one za naizmeničnu struju, setimo se da smo govorili o potrebi da se relativni položaj flukseva i magnetopobudnih sila ne menja-to su mašine kod kojih je struja na rotoru jednosmerna. Kod mašina kod kojih je struja rotora jednosmerna, dakle, fluks rotora ne menja svoju orijentaciju u odnosu na sam rotor-kako ide rotor, tako ide i fluks. Vrste sinhronih mašina sa namotanim rotorom dele se po tome kako se na rotor dovodi ovakva pobuda:

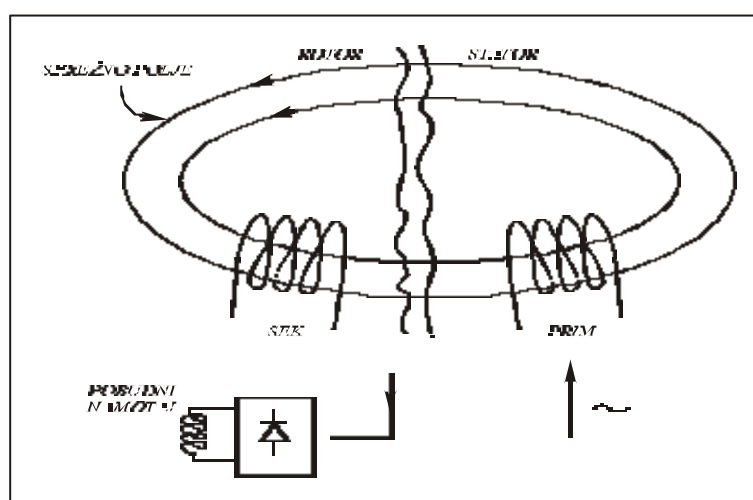
1. Rešenje zasnovano na kliznim prstenovima kao kod asinhronih mašina sa namotanim rotorom.



sl.10

Cilindrična struktura rotora koja na sebi sadrži taj pobudni namotaj, na jednom kraju ima prstenove kružnog oblika čiji poprečni presek čeno gledano izgleda kao na sl.10.b. Prstenovi su montirani na osovinu rotora i pobudni namotaji se dovode u kontakt sa njima. Spolja, na ove prstenove naležu naročite četkice koje klizu po njima i obezbeđuju električni kontakt. Preko izvora jednosmerne struje dovedenog spolja, dovodimo rotorsku pobudu. Ovako se grade rotori sinhronih mašina u termo i hidroelektranama jer tamo ima puno mesta. U aplikacijama manje snage smeta što na osovini moraju da se montiraju prstenovi i četkice-stvara se električni luk itd.

## 2. Napajanje rotora pomoću beskontaktnog obrtnog transformatora

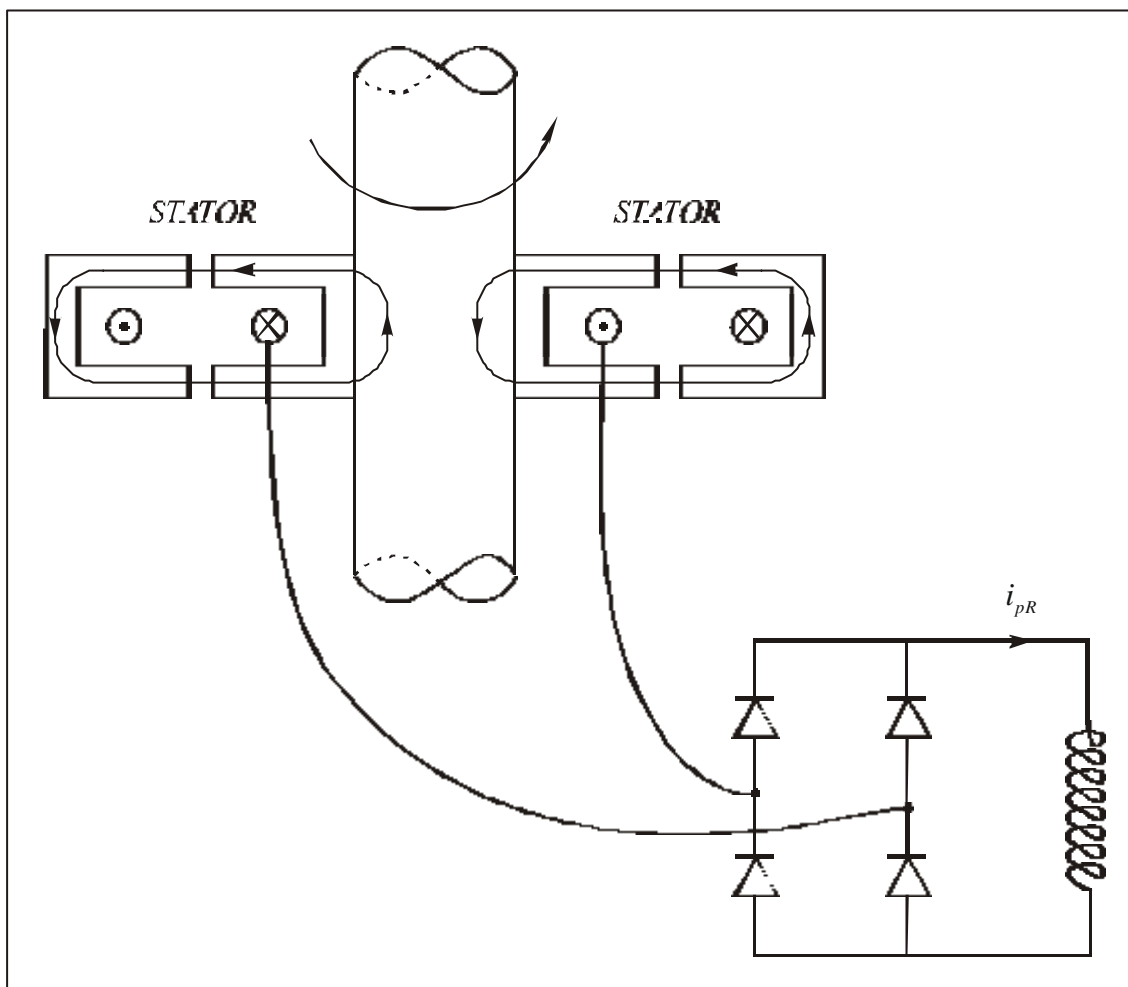


sl.11

To je transformator kod koga se primar nalazi na statoru, sekundar na rotoru, a naročito konstrukcijom je omogućeno da imaju zajedničko sprežno polje. Na primar saopštavamo naizmeničnu struju, na sekundaru dobijamo naizmeničnu struju koju posle ispravljanja dovodimo na pobudni namotaj. Nema nikakvog kontakta-sada treba da vidimo kako se to obezbeđuje.

Transformator je podeljen tako da se jedan deo vrti, a drugi deo se ne vrti i nalazi se na statoru. Na osovini mašine se montira magnetno kolo-sekundar transformatora, koje izgleda kao kalem za konac. Na statoru se nalazi drugi deo magnetnog kola-on izgleda kao prsten. Namotaj primara transformatora nalazi se nepokretan, ugrađen na stator. Ako propustimo struju kroz njega, on će prouzrokovati sprežno polje. Polje će se zatvarati kroz ovako formirano magnetno kolo bez obzira što se ovaj deo vrti, tako da će se u namotaju koji je montiran na rotoru indukovati naizmenična ems. Dakle, na ovakav način će zaista biti omogućeno da imamo transformator čiji je primar na statoru, sekundar na rotoru; preko primara se dovode naizmenična struja i napon

promenljive amplitude (proizvoljne); naizmenièni napon i struja na sekundaru, koje dobijamo sa unutraš njeg para provodnika, dovodimo na ispravljaè i dobijamo jednosmernu struju na rotoru. Možemo regulisati rotorsku pobudnu struju-ona æe biti jednosmerna i promenljiva, a neæemo imati kontakt sa statorom.



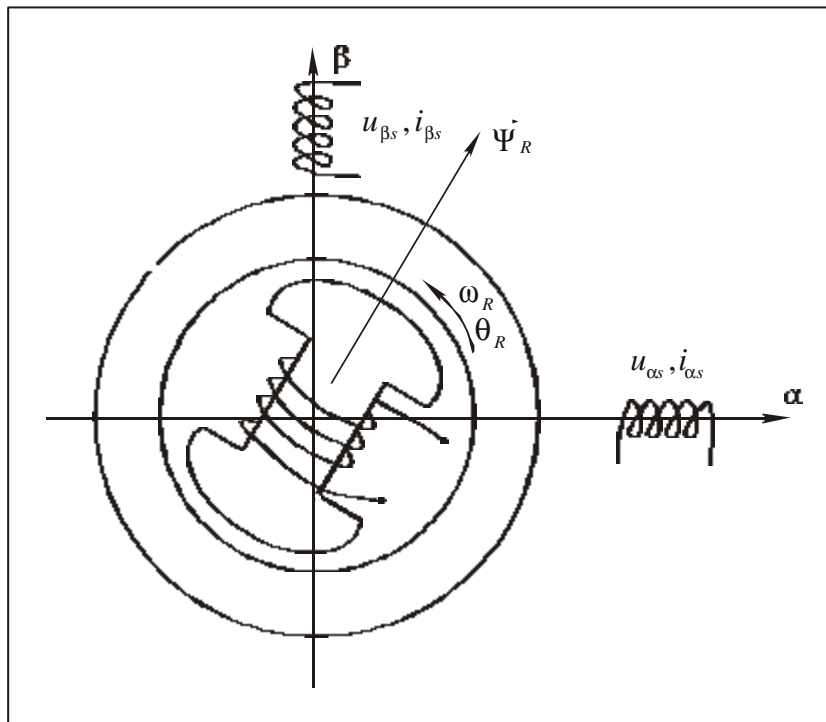
sl.12

Prouèili smo kakva je konstrukcija sinhronih maš ina-sada treba da napravimo dinamièki model iz koga æemo izvesti jednaèine stacionarnog stanja i zamensku š emu.

Sinhrona maš ina poseduje tri fazna namotaja na statoru:  $a, b, c$ .

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

Trofaznu sinhronu maš inu možemo da ekvivalentiramo dvofaznom, pomoæu Klarkove transformacije (namotaji  $a$  i  $b$ ).



sl.13

Na rotoru postoji pobudni namotaj koji se nalazi na gvozdenom magnetnom telu rotora; postoji rotorski fluks. Rotor se obrće istom brzinom kao i rotorski fluks. U ovakvom modelu sinhronne mašine, dakle, postoje tri namotaja: a i b namotaji statora i pobudni namotaj rotora. Kada postoji permanentni magnet, nema pobudnog namotaja već postoji neka ekvivalentna magnetopobudna sila permanentnog magneta.

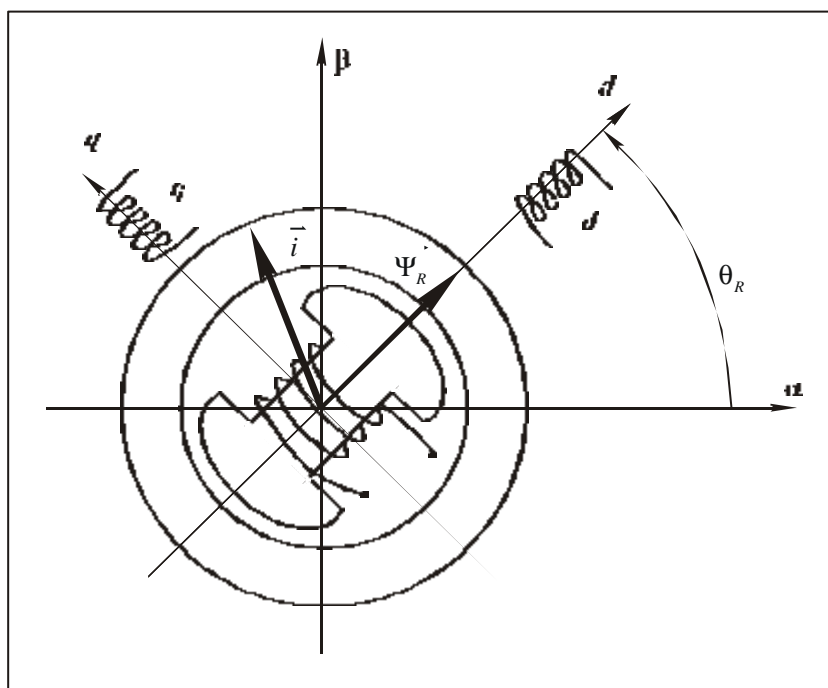
Problem ovakvog modelovanja je u tome što matrica induktivnosti, tj. veza između struja i fluksnih obuhvata je jedna nestacionarna matrica:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{a s} \\ \Psi_{b s} \\ \Psi_R^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m \cos \alpha_R \\ 0 & L_s & L_m \sin \alpha_R \\ L_m \cos \alpha_R & L_m \sin \alpha_R & L_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a s} \\ i_{b s} \\ i_{p R} \end{bmatrix}$$

$L_s$  - samoinduktivnost statorskog namotaja

$L_p$  - samoinduktivnost pobudnog namotaja

Nule na određenim mestima pokazuju da nema međusobne induktivnosti između  $a$  i  $b$  namotaja statora, jer su oni međusobno normalni (spregnutost preko nelinearnosti magnetnog kola ne razmatramo). Koeficijenti međusobne induktivnosti  $a$  namotaja statora i rotora su funkcije ugla  $\alpha_R$ . Kao i kod asinhronog motora, u diferencijalnim jednačinama naponskog balansa pojavljuju se koeficijenti koji su trigonometrijske funkcije ugla  $\alpha_R$ , što je neprijatno za modelovanje i ne obezbeđava nikakvu zamensku šemu za stacionarna stanja. Zato ćemo mi, isto kao i kod asinhronog motora, izvršiti transformaciju koordinata stanja koju zovemo Parkova, a kojom transformišemo koordinate stacionarnog  $a, b$  koordinatnog sistema u obrtni  $dq$  koordinatni sistem. Osu  $d$  postavljamo tako da je ona kolinearna sa rotorskim fluksom; ugao rotora  $\alpha_R$  je ujedno i ugao između  $a$  ose (koja je i osa  $a$ -faze motora) i  $d$  ose  $dq$  koordinatnog sistema.



sl.14

$dq$  transformacija koordinata stanja se sastoji u tome da realne  $a$  i  $b$  namotaje zamenjujemo virtuelnim  $dq$  statorskim namotajima. Da ne bismo narušili ponašanje motora, potrebno je da ovi namotaji daju istu magnetopobudnu silu. To postizemo tako što primenimo matricu transformacije  $T$  (videti kod asinhronog motora). Jednačine naponskog balansa virtuelnih namotaja tada uključuju konstantne koeficijente induktivnosti i one glase:

$$u_d = R_s i_d + \Psi'_d - \omega_R \Psi_q$$

$$\Psi_d = L_s^* i_d + L_m i_{pR}$$

$$u_q = R_s i_q + \Psi'_q + \omega_R \Psi_d$$

$$\Psi_q = L_s^* i_q$$

$$u_p = R_p i_{pR} + \Psi'_p$$

$$\Psi_p = L_p i_{pR} + L_m i_d$$

$R_s$  - otpornost namotaja statora

$i_d, i_q$  - projekcije vektora statorske struje na ose  $d$  i  $q$

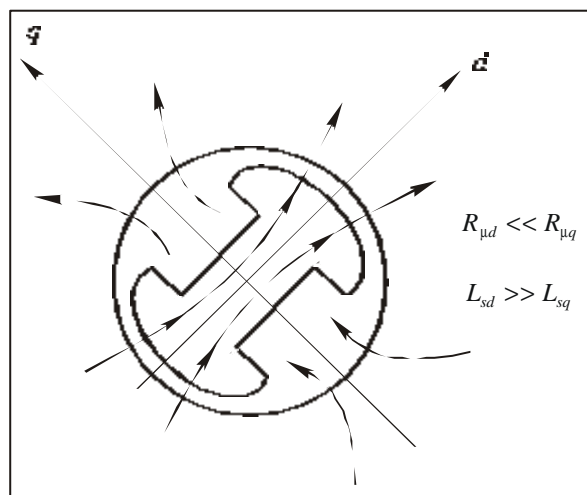
$\Psi_d$  - ukupni fluksni obuhvat statorskog namotaja u  $d$  osi

$\Psi_q$  - ukupni fluksni obuhvat statorskog namotaja u  $q$  osi

$\Psi_p$  - ukupni fluksni obuhvat pobudnog namotaja

Fluks u  $q$  osi zavisi isključivo od struje  $i_q$  zato što je  $q$  osa postavljena tako da je normalna i na pobudni i na  $d$  namotaj. Fluks u  $d$  osi zavisi od struja pobudnog i  $d$  namotaja (ove se struje nalaze u toj osi).

Induktivnost u  $d$  i  $q$  osi mogu biti različite. U slučaju da je konstrukcija rotora kao na sl.15 (“oglodana koska”), magnetni otpor u  $d$  osi je mali-fluks u  $d$  osi prolazi samo kroz vazdušni zazor na dva kraja koske; samim tim je induktivnost u  $d$  osi veća od induktivnosti u  $q$  osi.



sl.15

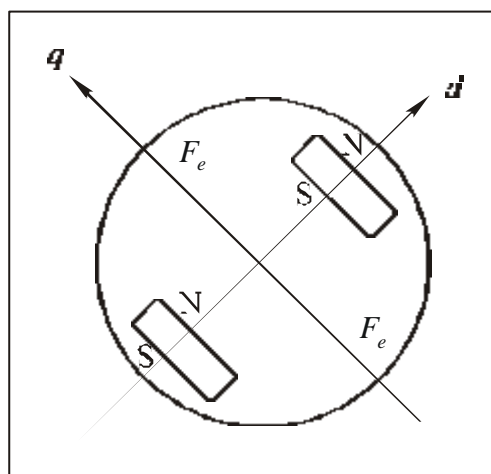
Fluks u  $q$  osi mora da prođe kroz relativno velike prostore ekvivalentne vazdušnom zazoru. Pošto u  $d$  i  $q$  osi nemamo isti magnetni otpor, reakcija na magnetopobudnu silu (fluks) biće različita-induktivnosti će biti različite. U opštem slučaju:

$$\Psi_d = L_{sd}i_d + L_m i_{pR}$$

$$\Psi_q = L_{sq}i_q$$

$$\Psi_p = L_p i_{pR} + L_m i_d$$

U slučaju da se radi o mašini sa permanentnim magnetima na rotoru, situacija će biti obrnuta od prethodne:



sl.16

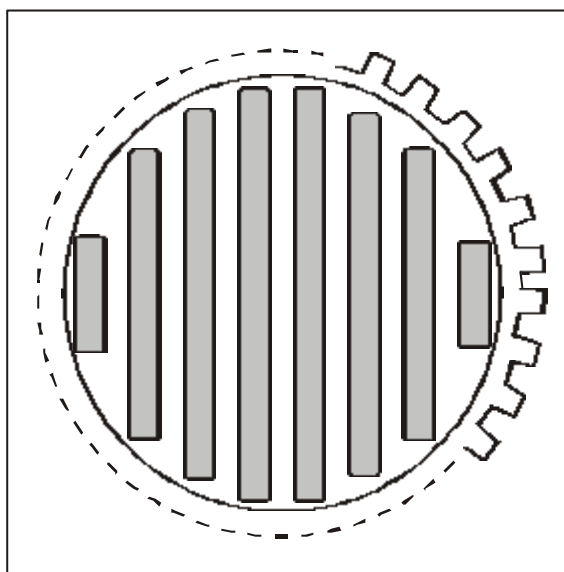
$$R_{md} \gg R_{mq}$$

$$L_d \ll L_q$$

- $d$  osa je u pravcu rotorskog fluksa
- $q$  osa je normalna na rotorski fluks

Magnetni otpor u pravcu  $d$  je veliki zato što fluks prolazi kroz permanentne magnete čija je diferencijalna permeabilnost  $\frac{\Delta B}{\Delta H} = \mu_0$ . U  $q$  osi na putu fluksa je gvožđe, pa je  $R_{mq}$  malo.

Kasnije æemo videti da se kao posledica razlike induktivnosti u  $d$  i  $q$  osi javlja naroèita komponenta momenta koja se zove reluktantni moment. Ovakav rotor zovemo anizotropni rotor jer su mu induktivnosti razlièite u razlièitim pravcima. Postoje i takve sinhronne mašine koje uopš te nemaju ni permanentne magnete niti bilo kakav namotaj na rotoru. Poš to se kod mašina kod kojih su induktivnosti  $L_d$  i  $L_q$  razlièite javlja tzv. reluktantni moment, postoji mogućnost da se ostvari elektromagnetni moment èak i onda kada nema nikakve rotorske pobude. Ovakve mašine se zovu sinhronne reluktantne mašine.



sl.17

Rotor sinhronne reluktantne mašine se konstruiše tako da u jednom smeru (npr. u smeru naviš e) ima mali magnetni otpor. Sivi delovi predstavljaju gvožde i tuda prolaze tube fluksa. U horizontalnom,  $q$  smeru, nije moguæe uspostaviti nikakav znaèajni fluks jer je magnetni otpor jako veliki (nekoliko puta fluks mora da pođe kroz prostor između dve osenène štrafte). Anizotropija je u ovom sluèaju jako velika, velika je razlika  $L_d$  i  $L_q$ , pa se može postići veliki reluktantni moment. Na ovo æemo se vratiti kasnije. Sada recimo da je  $L_{sd} = L_{sq}$  (mašina je izotropna). Napišimo sada jednaèine naponskog balansa u funkciji struja, da bismo dobili zamensku šemu za stacionarna stanja.

$$i_{pR} = \text{const} = I_p \quad \text{predpostavimo}$$

$$L_m I_p = \Psi_R \quad \text{doprinos pobudnog namotaja fluksu statorskog namotaja } d$$

$$u_d = R_s i_d + L_s i'_d - \omega_R L_s i_q$$

$$u_q = R_s i_q + L_s i'_q + \omega_R L_s i_d + \omega_R \Psi_R, \quad \omega_R L_s i_d + \omega_R \Psi_R = \omega_R \Psi_d$$

Odabrali smo da nam se  $dq$  sistem poklopi sa rotorom pa zato u izrazu za  $u_d$  stoji razlika između brzine obrtanja  $dq$  sistema i realnih namotaja. Kod asinhronog motora, to je bilo  $\omega_R - \omega_s$  jer  $dq$  koordinatni sistem nije bio sinhron sa rotorom.

U slučaju da se radi o stacionarnom stanju:

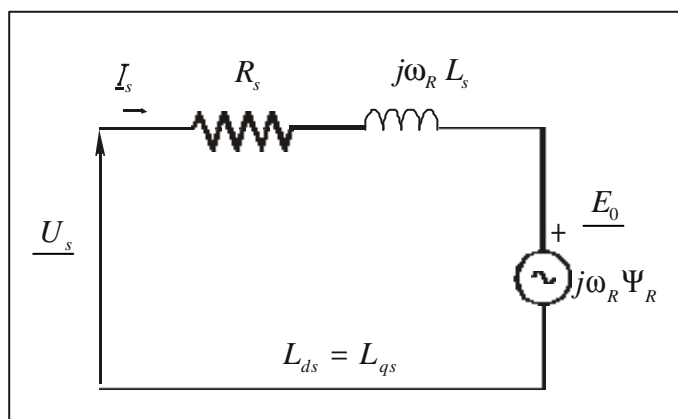
$$u_d = R_s i_d - \omega_R L_s i_q$$

$$j u_q = j R_s i_q + j \omega_R L_s i_d + j \omega_R \Psi_R \quad \text{pomnožili smo ovu jednačinu sa } j$$

$$\underline{u}_s = u_d + j u_q$$

$$\underline{i} = i_d + j i_q \quad \Rightarrow \quad \boxed{\begin{array}{l} \underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + j \omega_R L_s \underline{i}_s + j \omega_R \Psi_R \\ L_{ds} = L_{qs} \end{array}}$$

$\Psi_R$  je takođe kompleksan broj, samo što je njegova  $q$  komponenta jednak nula:  $\underline{\Psi}_R = \Psi_R$  jer je  $\Psi_{Rq} = 0$ . Iz ovoga dobijamo zamensku šemu za stacionarna stanja sinhronne mašine koja je izotropna:



sl.18

$$\underline{E}_0 = j\omega_R \Psi_R$$

$$M_{em} = \frac{3}{2} \Psi_R i_q + \frac{3}{2} (L_d - L_q) i_d i_q, \quad \omega_R = \omega_s - \text{uslov sinhronne mašine}$$

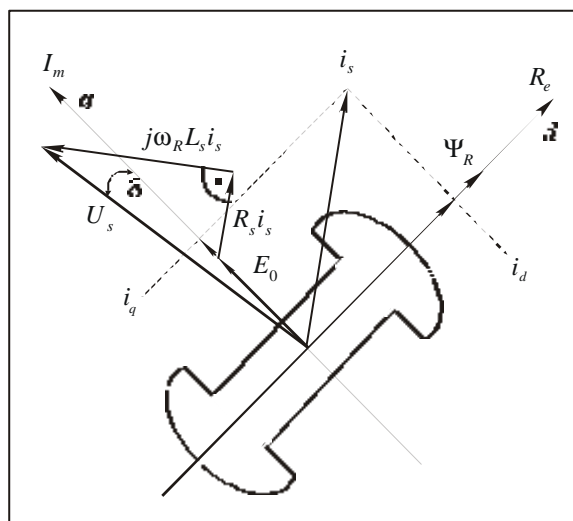
Fazorski dijagram sinhronne mašine ilustruje zamensku šemu-mi ga ipak crtamo da bismo objasnili neke oznake. Fazor je kompleksan broj koji svojom amplitudom određuje amplitudu neke prostoperiodične, a argumentom, fazni stav te prostoperiodične veličine. Fazore statorskog napona i statorske struje možemo definisati kao kompleksne brojeve usvajajući da je realna osa poklopljena sa osom  $d$  (to smo radili i kod asinhronog motora), a da je  $I_m$  osa poklopljena sa osom  $q$ . Tada će fazor  $\underline{I}_s$  za  $R_e$  deo imati struju  $i_d$ , a za  $I_m$  deo, struju  $i_q$ . Na  $d$  osi prikazali smo rotor da bi se videla naša odluka da  $d$  osu u kojoj rotor modelujemo postavimo tako da se poklapa sa pravcem rotorskog fluksa  $\Psi_R$ . Odlučili smo da  $dq$  koordinatni sistem postavimo tako da se poklapa sa rotorskim fluksom i sada statorsku struju u stacionarnom stanju predstavljamo kao kompleksan broj čiji je  $R_e$  deo  $i_d$ , a  $I_m$  deo  $i_q$ .

Zašto to ems zovemo  $\underline{E}_0$ ?

Kada nema struje u statoru (mašina je otvorena-nije doveden nikakav napon),  $\underline{E}_0$  će biti napon na krajevima statorskog namotaja, pa zato  $\underline{E}_0$  zovemo ems praznog hoda.

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_R L_s \underline{I}_s + j\omega_R \Psi_R$$

Iz ove relacije dobijamo fazorski dijagram koji predstavlja zamensku šemu.



sl.19

$\underline{E}_0$  je normalno na rotorski fluks ( $\underline{E}_0 = j\omega_R \Psi_R = e^{j\frac{p}{2}} \omega_R \Psi_R$ ) i leži na  $q$  osi. Pad napona na  $R_s$  kolinearan je sa strujom, a pad napona na rednoj impedansi je normalan na struju-prednjaèi joj za  $\frac{p}{2}$ . Ugao koji fazor statorskog napona u stacionarnom stanju zaklapa sa ems se oznaèava sa  $\alpha$  i kod sinhronih mašina se uvek zove ugao snage:

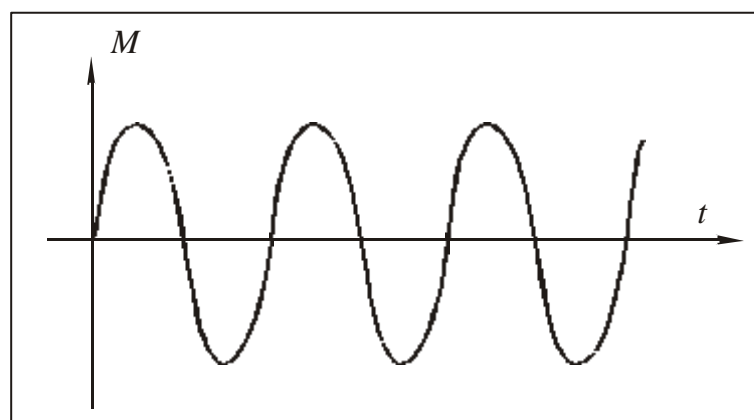
$$\alpha = \arg(\underline{U}_s) - \arg(\underline{E}_0)$$

Ovaj fazorski dijagram važi samo za izotropne mašine. Izotropne mašine su one kod kojih je  $L_d = L_q$ . Kod anizotropnih mašina ( $L_d \neq L_q$ ) fazorski dijagram bi bio složeniji jer komponente  $i_d$  i  $i_q$  ne bi pravile isti reakcioni pad napona. Posledica  $d$  struje bi bilo  $j\omega_R L_d i_d$  itd.

Potrebno je da nacrtamo i mehanièku karakteristiku. Ona je vrlo jednostavna. Pošto mora da važi  $\omega_R = \omega_s$ , ovaj motor razvija moment samo onda kada se relativni položaj napona napajanja u odnosu na rotor ne menja-napon mora da se vrti istom brzinom kao i rotor, inaèe nema srednje vrednosti momenta. Kako se rotor obraèe, on sa sobom nosi svoj strujni plašt. Ako nema sinhronizma u obrtanju, moment postoji ali kakav?

Kod idealne cilindriène mašine, došli smo do zakljuèka da je momenat proporcionalan uglu između dva strujna plašta:

$$M \sim \sin \Delta\alpha$$

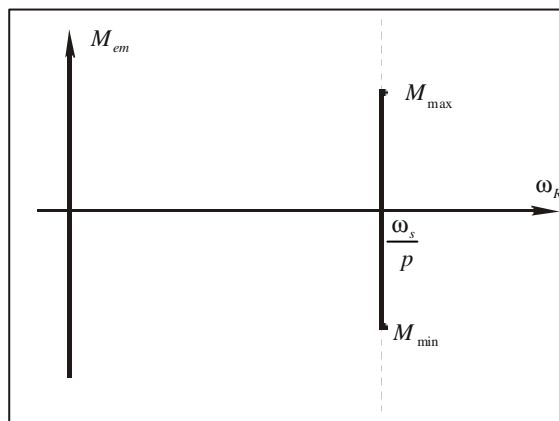


sl.20

Ako ne postoji sinhronizam, ugao između dva strujna plašta raste, pa je onda moment  $M$  prostoperiodična funkcija vremena, srednje vrednosti nula.

Dakle, kod sinhronih mašina, nenulta srednja vrednost momenta može se dobiti samo za  $\omega_R = \omega_s$ . Ako na ispitu dobijemo pitanje: šta se dešava kada je sinhrona mašina van sinhronizma, ne smemo da odgovorimo da nema momenta, već treba da kažemo da ne postoji srednja vrednost momenta, a elektromagnetni momenat postoji i on je prostoperiodična veličina čija je učeštanost jednaka razlici brzina dva strujna plašta.

Mehanička karakteristika sinhronne mašine:



sl.21

## Karakteristike sinhronne mašine priključene na statorski napon konstantne amplitude i učeštanosti

Želimo da vidimo koliki je  $M_{\max}$  na mehaničkoj karakteristici sinhronne mašine. Da bismo ga izračunali, moramo da proučimo karakteristike sinhronne mašine priključene na statorski napon konstantne amplitude i učeštanosti. Ako je to nominalni napon i nominalna učeštanost, dobićemo mehaničku karakteristiku koju zovemo prirodna.

Proračun zavisnosti momenta od ugla  $\alpha$  (vidi fazorski dijagram):

$$U_d = -U_s \sin \alpha = R_s i_d - \omega_R L_q i_q$$

$$U_q = +U_s \cos \alpha = R_s i_q + \omega_R L_d i_d + \omega_R \Psi_R$$

$U_s$  - efektivna vrednost statorskog napona

Relaciju æemo izvesti tako da u obzir uzmemo i anizotropiju. Interesuju nas samo jednaèine stacionarnog stanja .

U prvoj jednaèini imamo samo  $-\omega_R L_q i_q$  zato š to se fluks rotora ne reflektuje na  $q$  osu ( $dq$  koordinatni sistem smo postavili tako da  $\Psi_R$  leži samo u  $d$  osi). Zanemarujemo pad napona na  $R_s$ , da bi relacije bile jasnije. Pomeraj između napona i ems  $\underline{E}_0$  je  $\alpha$ ; pomeraj između napona i fluksa, tj. između napona i  $d$  ose je  $\frac{\rho}{2} + \alpha$ .

$$i_q = + \frac{U_s \sin \alpha}{\omega_R L_q} = \frac{U_s \sin \alpha}{x_q}$$

$$i_d = \frac{U_s \cos \alpha - \omega_R \Psi_R}{\omega_R L_d} = \frac{U_s \cos \alpha - E_0}{x_d}$$

$$M_{em} = \frac{P_e}{\omega_R} \left( \frac{3}{2} \right)$$

↑ Zavisi od Klarkove transformacije

$$M_{em} = \frac{U_d I_d + U_q I_q}{\omega_R} \left( \frac{3}{2} \right)$$

$$M_{em} = \frac{3}{2} \Psi_R i_q + \frac{3}{2} (L_d - L_q) i_d i_q$$

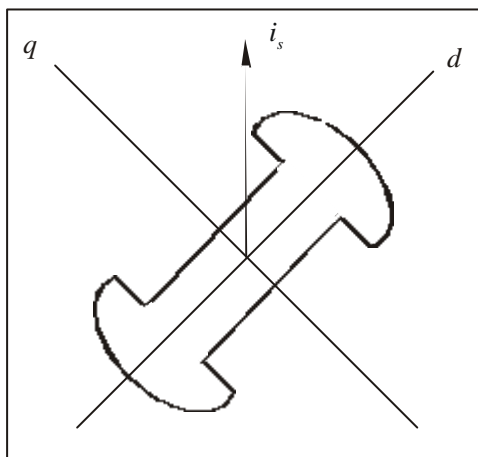
$$M_{em} \omega_R = \frac{3 U_s E_0}{2 x_d} \sin \alpha + \frac{3}{2} U_s^2 \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{\sin 2\alpha}{2},$$

$\frac{3 U_s E_0}{2 x_d} \sin \alpha$  -postoji i kod izotropnih i kod anizotropnih mašina,

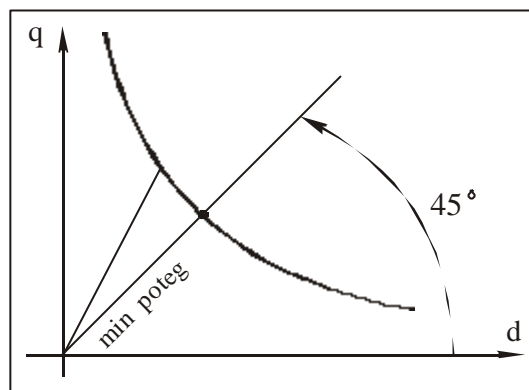
$\frac{3}{2} U_s^2 \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{\sin 2\alpha}{2}$  -reluktantni moment,

$\frac{\sin 2\alpha}{2}$  -je max za  $\alpha = 45^\circ$ .

Na ispitu može da bude pitanje: pokazati da je  $M_{\max} \sim \frac{U_s E_0}{x_d}$  za izotropne mašine. Ako postoji samo reluktantni moment, onda je on srazmeran proizvodu  $i_d i_q$ .

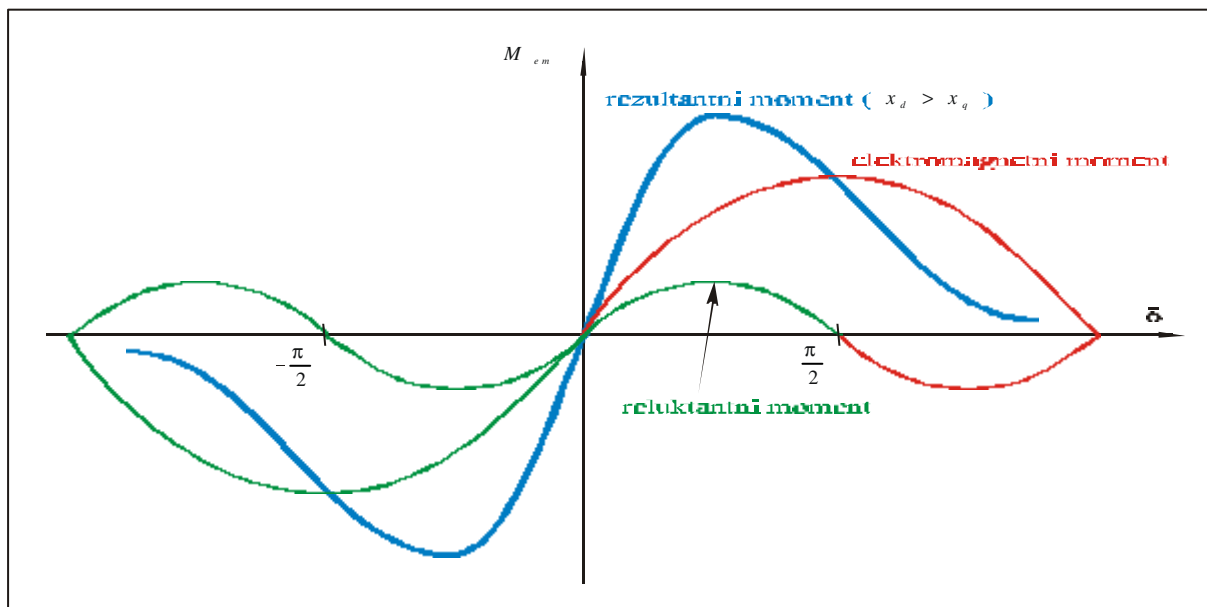


sl.22



sl.23

Maksimalan proizvod  $i_d i_q$  je za  $i_d = i_q$ . Kod reluktantnih mašina, treba orijentisati statorku struju  $i_s$  tako da bude pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na rotor.

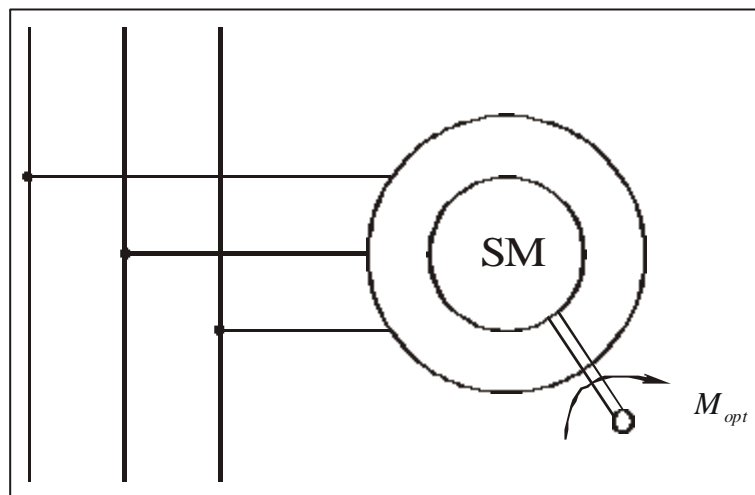


sl.24

Reluktantni moment ima max u  $\frac{p}{4}$ .

Elektromagnetni moment ima max u  $\frac{p}{2}$ .

Šta se dešava kada je  $\omega_s = const$ , a  $\omega_r$  se menja?



sl.25

$$\dot{d} = \omega_s - \omega_r$$

Ako se smanji  $\omega_r$  (rotor zaostaje), tada će se  $d$  povećavati. Njutnova jednačina:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_{em} - M_m \Rightarrow$$

$$J \ddot{d} = -M_{em} + M_m$$

$$\ddot{d} = \dot{\omega}_s - \dot{\omega}_r = -\dot{\omega}_r, (\omega_s = const - \text{uèestanost napajanja})$$

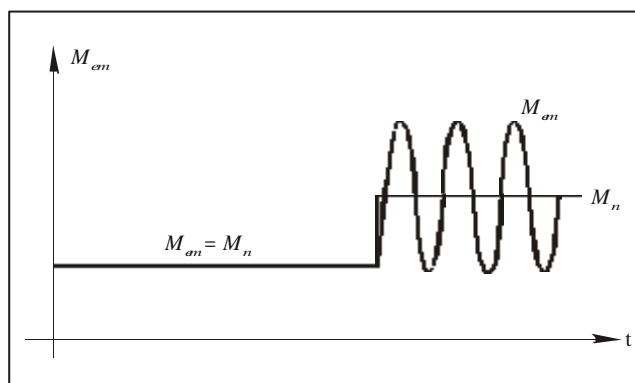
Ako je uèestanost napajanja const  $\Rightarrow \ddot{d} = -\dot{\omega}_r$ . Ako povećavamo moment opterećenja  $\omega_r >$ ,  $d >$   $\Rightarrow M_{em} >$  pa postoji mogućnost da se uspostavi novo stacionarno stanje,

jer æe dve velièine ( $M_{em}$  i  $M_m$ ) doæi u balans. Prelazni proces je vrlo slabo priguš en (š ta viš e, uopš te nije priguš en).

U zoni oko  $d \approx 0$ , imamo da je  $M_{em} \sim kd$ :

$$J\ddot{d} + kd = M_m \quad \Rightarrow \quad s_{1,2} = \pm j\frac{k}{J}$$

Odziv æe biti oscilatoran (bez priguš enja) u prelaznom režimu usled skoka  $M_{opt}$ . Polovi  $s_{1,2}$  nemaju  $R_e$  deo-to znaèi da nam je potrebna komponenta koja je srazmerna sa  $\dot{d}$  da bismo uneli priguš enje.



sl.26

Znaèi, potrebno je da unesemo neko priguš enje u prethodnu jednaèinu koja, preslikana u Laplasov domen, glasi:

$$Js^2d(s) + kd(s) = M_m(s)$$

$$Js^2 + k = 0 \quad \text{karakteristièan polinom}$$

Da bismo uneli priguš enje, potrebno je da imamo èlan proporcionalan izvodu  $d$ :

$$J\ddot{d} + k_p\dot{d} + kd = M_m \quad \text{želeli bismo da jednaèine bude ovakva}$$

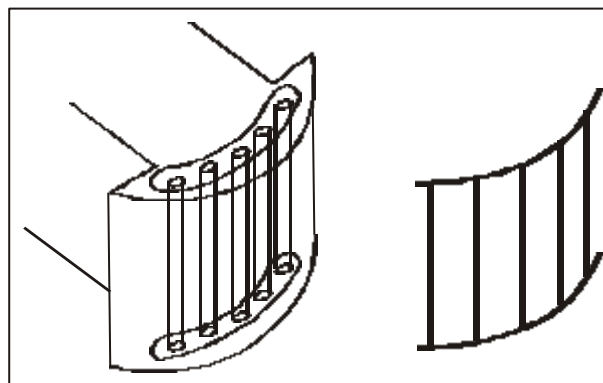
$$s^2 + \frac{k_p}{J}s + \frac{k}{J} = 0 \quad \text{karakteristièni polinom prethodne jednaèine}$$

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$$

$k_p$  doprinosi prigušenju ovog odziva (kada je prigušenje 1, odziv je aperiodičan). Kako da postignemo prigušenje?

Kada bismo imali kontrolu nad uglom  $\alpha$ , to bi bilo jednostavno. Međutim, ovde imamo motor koji bez upravljanja treba da radi stabilno-znači, treba konstruktivno preduzeti nešto da bismo imali koeficijent  $k_p$  nenulte vrednosti. Potrebna nam je prigušna komponenta  $M_{em}$  proporcionalna  $\dot{\alpha} = k_p (\omega_s - \omega_r)$ .

$M_{em}$  kod asinhronog motora je proporcionalan kvadratu fluksa i klizanju  $\omega_s - \omega_r$ . Ako bismo na ovoj sinhronoj mašini imali još jedan mali asinhroni motor, koji bi se napajao istim naponom (tj. imao isto polje), on bi davao baš moment koji je nama potreban da prigušimo odziv na skokovitu promenu opterećenja. Ali, asinhroni motor se ne ugrađuje u sinhroni. Radije se u polove rotora sinhronog motora ugrađuju provodnici koji imaju ulogu kratkospajajućeg kaveza.



sl.27

U polove ugrađujemo provodnike koji se kratko spajaju, kao što su se kratko spajali provodnici asinhronog motora, pa ovi provodnici formiraju jedan kratkospojeni kavez. Ovo, naravno, nije idealni rotor asinhronog motora, ali ako postoji pokretanje pobudnog polja i rotora, tj.  $\dot{\alpha}$ , ovi provodnici će se sa strujama koje se u njima indukuju, protiviti promeni fluksnog obuhvata i praviti asinhroni momenat baš kao kod asinhronog motora.

Ukoliko dođe do oscilacija ugla  $\alpha$ , to znači da će rotor u odnosu na pobudno polje i vektor  $\underline{U}_s$  da osciluje. Fluks kroz kratkospojene zavojke će da se menja i baš kao kod asinhronog motora imaćemo moment proporcionalan učestanosti klizanja, odnosno prvom izvodu ugla snage  $\alpha$ . Ovaj namotaj, se shodno funkciji koju ima, naziva prigušni namotaj kod sinhronih mašina. On se primenjuje, kako i piše u naslovu, samo onda kada se radi o sinhronoj mašini priključenoj na

napon konstantne amplitude i konstantne uèestanosti (tj. kod maš ine koja se napaja iz gradske mreže). Ne radi se, dakle, priguš ni namotaj kod servo-motora koji se napaja na naroèit naèin.

Primene sinhro-motora: kompresori, ventilatori, pumpe velike snage (svuda gde je potreban motor koji se obræe konstantnom brzinom i pretvara elektriènu energiju u mehanièku). Sinhrona maš ine se koriste i kao generatori. Bilo koja vrsta elektriènih centrala u sebi ima sinhronu maš inu, koja mehanièku energiju pretvara u elektriènu (generator). Ta sinhrona maš ina je prikljuèena na visokonaponsku mrežu od 400kV, konstantne uèestanosti, pa prema tome mora da ima priguš en namotaj. Kod naponski napajanih maš ina potreban je priguš ni namotaj da bi se ostvario stabilan priguš eni odziv na skok optereæenja.

## **Karakteristike sinhrona maš ine napajane iz strujnog izvora**

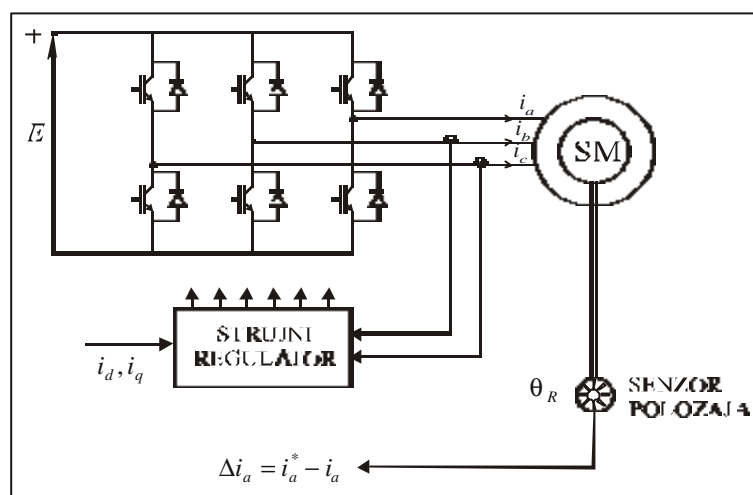
Sinhrona maš ine, pogotovo one sa permanentnim magnetima na rotoru, veoma èesto se koriste u brzinskim i pozicionim servo-sistemima kao aktuatori momenta. To je primena koja je sasvim razlièita od rada na konstantnoj uèestanosti napajanja. Sinhrona maš ine u servo primenama su strujno napajane i njihove karakteristike su zbog promenjenog naèina napajanja sasvim drugaèije.

Zaš to su za ove primene sinhrona maš ine bolje od asinhronih?

Potrebno je regulisati brzinu i položaj. Kod servo pogona, brzina i položaj su vrlo brzo promenljivi (zato se i napajaju strujno iz jednog posebnog izvora).

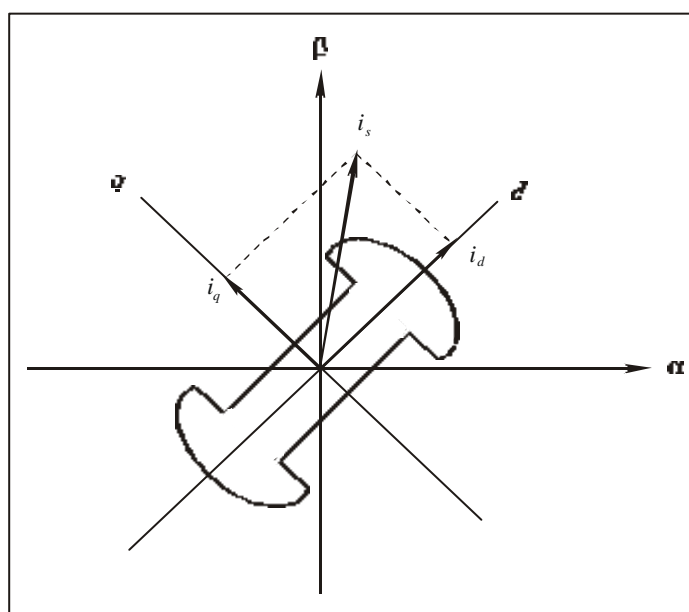
Šta nas najviše boli kod asinhronih maš ina?

Upravljanje se nekako i reš i, ali utroš ak gvoždãa, bakra i utroš ak snage!?! Sinhrona maš ina ima rotor koji se ne greje (nema gubitke, ne treba ga hladiti). Zato možemo za istu snagu, tj. za isti moment, naèiniti sinhronu maš inu koja je manja od asinhrona. Kod asinhrona maš ine, ili moramo da hladimo rotor, ili ako ga ne hladimo on za istu primenu mora da bude veæi. Zato se sinhro-maš ine vrlo èesto primenjuju u servo-aplikacijama. Da bi se sinhro maš ina upotrebljavala u ove svrhe, potrebno je da ona razvija moment onakav kakav želimo pri bilo kojoj brzini (brzina treba da se menja od 0 do neke max vrednosti). Zato ne možemo motor napajati kao u prethodnom sluèaju (const naponom const uèestanosti), jer takvo, naponsko napajanje, traži da je  $V_k = V_s$ . Poš to želimo da  $V_k$  bude promenljivo i da razvijamo moment pri bilo kojoj brzini, napajamo sinhro-maš inu iz strujnog izvora.



sl.28

Ukoliko fazne struje mašine  $i_a$ ,  $i_b$  i  $i_c$  možemo proizvoljno zadavati (uz uslov da je njihov zbir jednak nuli), tada možemo nezavisno kontrolisati  $d$  i  $q$  komponente struje. Komponente statorske struje  $d$  i  $q$  su Parkovom transformacijom vezane za  $a$  i  $b$  komponente struje, a  $a$  i  $b$  komponente Klarkovom transformacijom za fazne struje mašine  $i_a$ ,  $i_b$  i  $i_c$ .



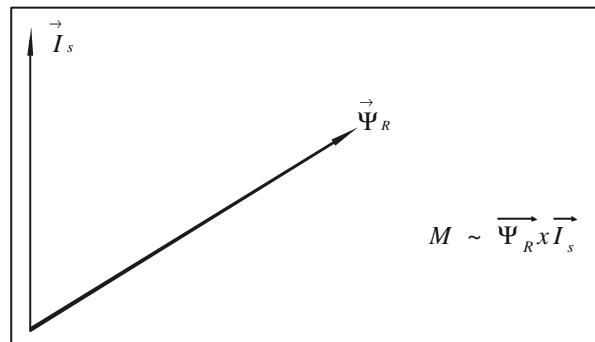
sl.29

Ukoliko možemo proizvoljno zadavati fazne struje mašine  $i_a$ ,  $i_b$  i  $i_c$  tako da njihov zbir bude jednak nuli, tada možemo nezavisno kontrolisati  $d$  i  $q$  komponentu struje.

Konvertori koji napajaju sve mašine naizmenične struje koje trebaju da rade sa promenljivom brzinom imaju istu topologiju. Sl. 28 predstavlja trofazni tranzistorski inverter koji napaja asinhroni motor. Redovno se kod napajanja sinhronih mašina upotrebljava lokalna povratna sprega po struji u jednom strujnom regulatoru. Taj strujni regulator ima zadatak da stanja u prekidačima podesi tako da bilo koje odstupanje zadate struje od željene vrednosti bude minimizirano. Potrebno je da jedna sinhrona mašina koja je strujno napajana ima detektor položaja-neophodno je da znamo gde se rotor nalazi. Ako je položaj rotora poznat, tada možemo u odnosu na prostornu orijentaciju rotora i rotorskog fluksa injektovati struje  $i_d$  i  $i_q$  koje želimo.

Ako je mašina izotropna, za  $\omega < \omega_{nom}$  optimalna vrednost struje  $i_d$  je nula:  $i_d^{opt} = 0$ .

Moment je vektorski proizvod  $\vec{\Psi}_R \times \vec{I}_s$  (ukoliko nema reluktantnog momenta), dakle, moment je proporcionalan sinus uga između rotorskog fluksa i statorske struje.



sl.30

Najveći moment postizemo za  $i_d = 0$  (ugao između  $\Psi_R$  i  $I_s$  je  $90^\circ$ ). Zato je upravljanje ovakvim mašinama jednostavno-potrebno je samo napraviti  $i_q$  tako da ona odgovara željenom momentu, pa će biti:

$$M_{em} = \frac{3p}{2} \Psi_R i_q \Big|_{\omega < \omega_{nom}}$$

Sinhrono mašine napajane iz strujnog izvora koriste se kao aktuatori momenta (kada treba obezbediti neki pokretački moment). Vidimo da je upravljanje njima vrlo jednostavno-samo je potrebno izmeriti gde je rotor i pod uglom od  $90^\circ$  u odnosu na rotor injektovati struju statora koja

æe oèigledno imati samo  $q$  komponentu. Odziv mašine æe biti moment koji nam treba-onoliko brzo i taèno koliko kontrolišemo struju  $i_q$ , kontrolisaæemo i momenat. Sve ovo važi za sluæaj kada je brzina manja od nominalne. Za  $\omega > \omega_{nom}$ , struju  $i_d$  ne možemo održavati na nuli. Setimo se šta je to nominalna brzina:  $\omega_{nom}$  je brzina pri kojoj indukovana ems uz nominalan fluks dostiže nominalan napon. Ems se uglavnom indukuje usled fluksa u  $d$  osi.

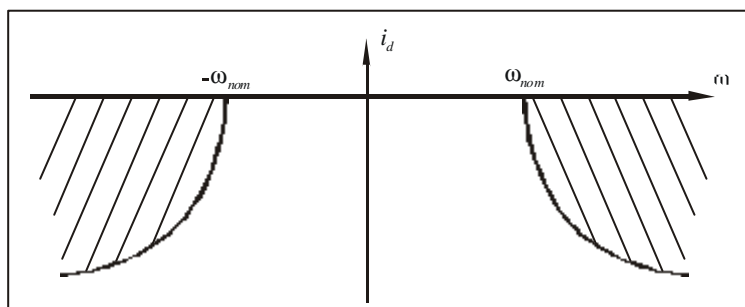
$$\Psi_d = \Psi_R + L_d i_d$$

$$\Psi_d(\omega) \Big|_{\omega > \omega_{nom}} = \Psi_R \frac{\omega_{nom}}{\omega}$$

U zoni slabljenja polja moramo imati fluks koji opada sa brzinom, da bi ems bila zadržana na nominalnoj vrednosti.

$$i_d(\omega) \Big|_{\omega > \omega_{nom}} = -\Psi_R \left(1 - \frac{\omega_{nom}}{\omega}\right) \frac{1}{L_d}$$

U zoni slabljenja polja moramo injektovati negativnu struju  $i_d$  kako bismo umanjili, tj. oslabili polje prouzrokovano permanentnim magnetom. Potrebno je da  $i_d$  bude ovako zavisna od brzine obrtanja:



sl.31

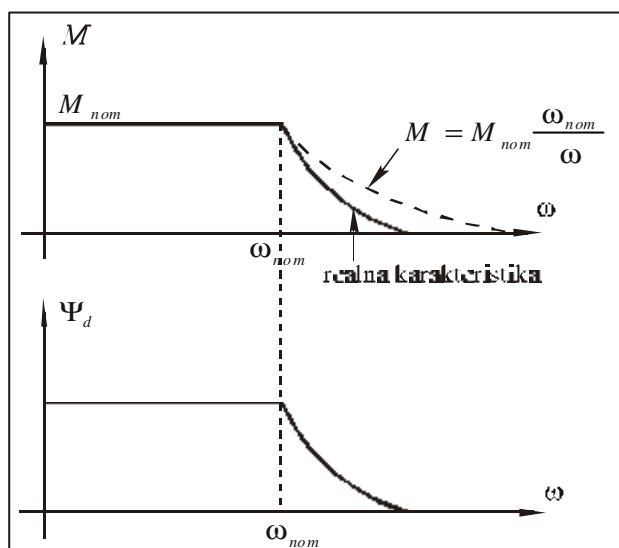
Struja  $i_d$  između negativne i pozitivne vrednosti  $\omega_{nom}$  treba da bude jednaka nuli, a da ima negativnu vrednost koja raste sa uèestanošæu onda kad se radi u zoni slabljenja polja.

Zaš to je to tako?

Na rotoru imamo permanentni magnet, što znaèi da nije moguæe umanjiti fluks bez negativne vrednosti struje  $i_d$ , a neophodno je da fluks bude umanjen u zoni slabljenja polja. Kolika æe

struja  $i_d$  biti potrebna zavisi i od  $L_d$ . Kod mašina koje imaju izuzetno malu vrednost induktivnosti  $L_d$ , potrebne su ogromne struje, koje zovemo struje demagnetizacije, tako da rad u zoni slabljenja polja nije ni moguć (struja demagnetizacije je obrnuto proporcionalna  $L_d$ ). Ukoliko induktivnost  $L_d$  ima znatniju vrednost, možemo da radimo u oblasti slabljenja polja, ali ne možemo imati const snagu (to ćemo sada pokušati da objasnimo).

Nacrtajmo eksploatacionu karakteristiku sinhronne mašine sa permanentnim magnetima na rotoru koja je strujno napajana.



sl.32

Sve do  $\omega_{nom}$ , svu raspoloživu struju možemo usmeriti u  $q$  osu i postići nominalni moment. Moment ovde generiše struja  $I_q$ . Ukoliko nam je poznata nominalna struja  $I_{nom}$  onda je:

$$I_{qnom} = \sqrt{I_{nom}^2 - I_d^2}$$

$I_{qnom}$  - nominalna vrednost struje  $I_q$ .

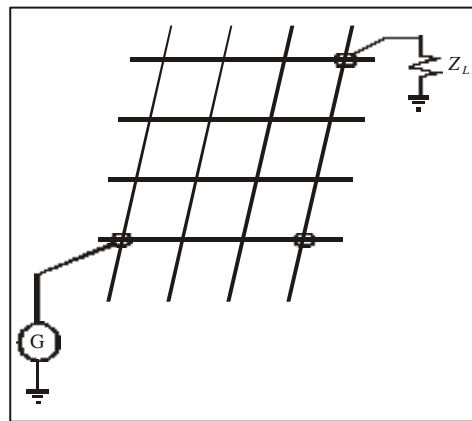
Kada bismo mogli u obe zone (iznad i ispod  $\omega_{nom}$ ) da struju  $I_q$  držimo konstantnom, moment bi izgledao kako treba (isprekidana karakteristika). Međutim, u zoni slabljenja polja  $q$  komponenta struje mora da opadne i realna karakteristika je ispod karakteristike konstantne snage. Struja  $I_q$  mora da opadne zato što je za slabljenje polja potrebno uložiti demagnetizacionu struju u motor. Potrebno je izvršiti demagnetizaciju, tj. smanjiti  $q$  komponentu struje, što znači da

se poveæava  $d$  komponenta. Poš to æe  $q$  komponenta biti manja, moment neæe biti lik fluksa, veæ æe se spustiti.

## Elektroenergetski sistem (EES)

Najveæi deo energije koji se troš i predstavlja upravo elektriæna energija, a najveæi deo cene skoro svih proizvoda predstavlja energija. Energija se dobija dosta složenim sistemom koji æemo samo ukratko prikazati-to je elektroenergetski sistem. Ono š to od EES-a možeme da vidimo su:

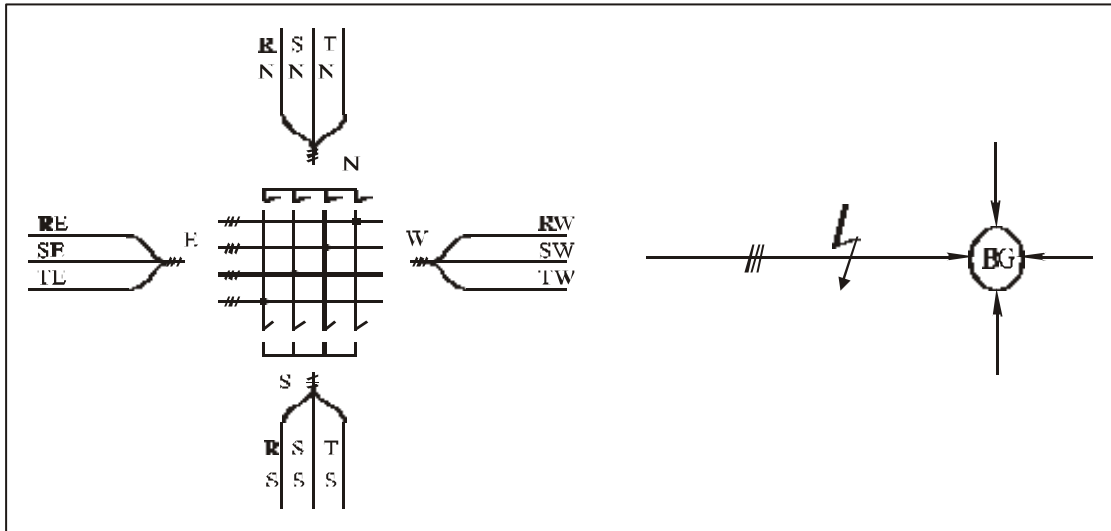
**dalekovodi**-mreža visokonaponskih, trofaznih, prenosnih linija. Na svakom stubu dalekovoda se nalaze tri provodnika trofaznog sistema i gromobransko uže. Celokupna teritorija jedne zemlje prekrivena je mrežom dalekovoda:



sl.33

U svakom èvoru može biti prikljuæen izvor (generator) ili potroš æe elektriæne energije. U svakom èvoru postoji naroèit komplet visokonaponskih prekidaæa koji se zove **razvodno postrojenje**. Razvodna postrojenja služe da pojedine dalekovode (trofazne linije) mogu međusobno da se spoje. Nacrtaæemo (informativno) jedno razvodno postrojenje u koje se stiæu dalekovodi sa èetiri strane sveta.

Razvodno postrojenje:



sl.34

Pri crtanju jednog EES-a, gotovo se nikada faze ne crtaju zasebno, već se povezuju u sabirnice (koje predstavljamo sa tri crte).

Obično u svakom razvodnom postrojenju postoji isti broj naročitih sabirnica (onoliko koliko ima dalekovoda). Te sabirnice su u stvari kompleti od po 3 provodnika koji se mogu proizvoljno spojiti sa bilo kojim od dalekovoda. Ako aktiviramo prekidače koji na iste sabirnice spajaju npr. sever i jug, možemo ih spojiti. Zašto je ovo potrebno? U EES-u se često događaju kvarovi, pa kada bi jedan izolovani potrošač (npr. neki manji grad) bio napajan samo sa jedne strane, kvar na tom dalekovodu bi ga potpuno odsekao. Zato se obično praktikuje da jedan potrošač bude napajan sa više strana, tako da u slučaju kvara opterećenje koje je bilo dozvoljava da potrošač može da se zadovolji nekim drugim dalekovodom. Zato dalekovodi u EES-u imaju formu mreže, gde svakom čvoru možemo pristupiti sa više strana.

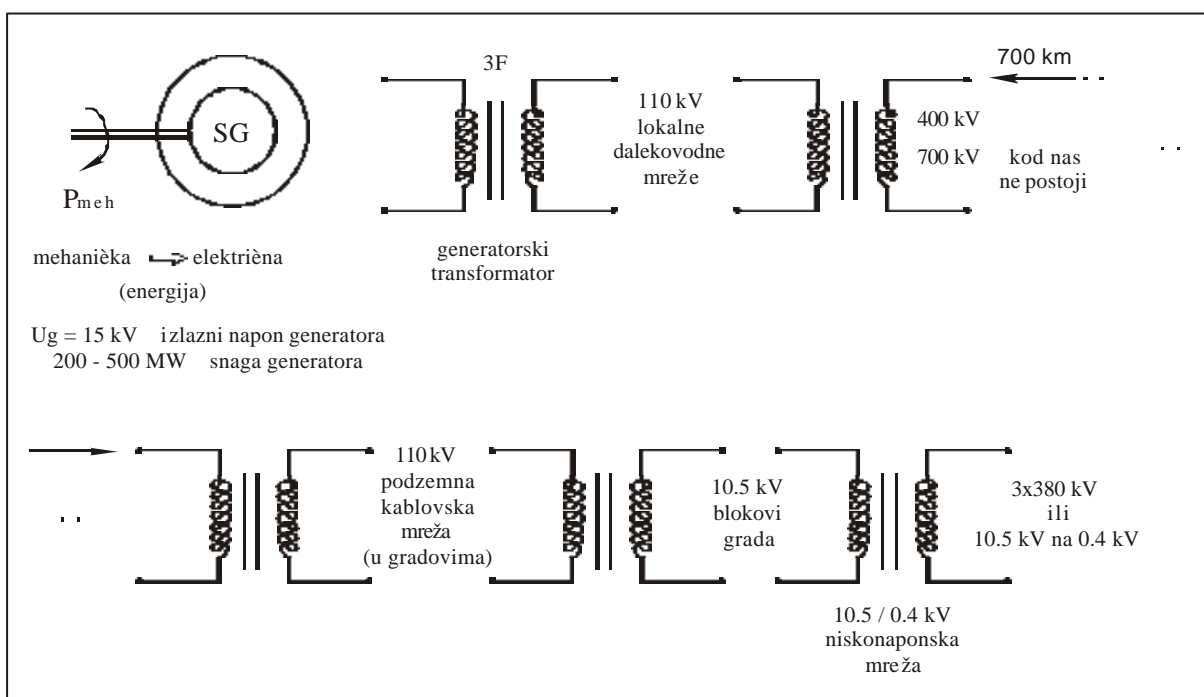
Napon na dalekovodima je reda 400kV. Prenos električne energije od generatora ka potrošaču vrši se što je god moguće većim naponom da bi struja bila mala za istu snagu (a struja će biti mala za istu snagu ako je napon veći).

Zašto nemamo 1MV?

Pri projektovanju EES-a uvek se traži neki optimalan nivo. Suviše veliki napon prouzrokovao bi velike probleme sa izolovanjem provodnika od stuba dalekovoda u gradnji EES-a. Znači, podizanje naponskog nivoa u jednom EES-u vezano je sa uvećanjem troškova za izolaciju. Ako su naponi na dalekovodu veći, moramo imati veće rastojanje između provodnika,

jer æ u protivnom doæi do preskoka (varnica). Npr. za 1MV bismo morali da imamo provodnike koji su udaljeni oko 3m teorijski, ali u praksi još i viš e jer polje između provodnika nije homogeno. Dakle, suviš e veliki napon se izbegava zato š to su rastojanja između provodnika velika (š to znaèi da bi viš e koš tala i trasa dalekovoda- zauzimao bi viš e zemljiš ta). Na niske napone se ne ide jer nizak napon znaèi i debela žica, veliki gubici, velika cena. Provodnici dalekovoda se ne prave od bakra veæ od aluminijuma zato š to je mnogo jeftiniji i èvrš æi. Jedan provodnik dalekovoda u svojoj sredini uvek ima èelièno uže zbog èvrstoæe.

Izvor elektriène energije u EES-u je obièno sinhroni generator.

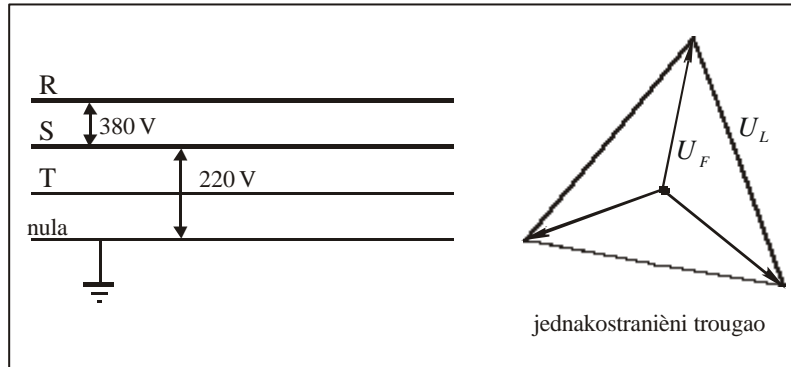


sl.35

Mi bismo želeli da sinhroni generator na svojim prikljuècima ima š to je moguæe veæi napon; međutim, generator je još teže napraviti od dalekovoda. U žlebove sinhronog generatora se mogu umetnuti provodnici na naponu od 400kV, ali zbog problema u izolovanju generatora, izlazni naponi generatora su reda 15kV. Ako imamo u vidu snagu za koju se prave generatori, vidimo da se radi o veoma jakim strujama (reda kA), pa bi smanjenje napona prouzrokovalo potrebu da se koristi jako debeli provodnik. Energiju do potroš aèa ne možemo prenositi sa naponskim nivoom od 15kV, jer bi to prouzrokovalo jako velike gubitke snage. Zato uz svaki generator postoji tzv. generatorski transformator itd.

U svakom od ovih nivoa (bilo da se radi o 110kV ili 10.5kV) imamo strukturu mreže gde se jedan òvor može napojiti sa barem tri strane, iz razloga pouzdanosti.

U stanu imamo 4 provodnika-3 faze i nulu:



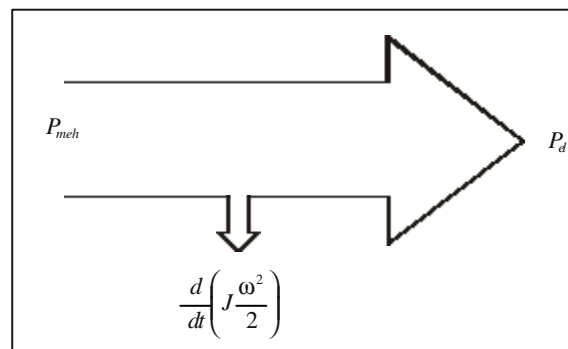
sl.36

$U_L = 380V$  - linijski napon (standardi su se upravo promenili i sada iznosi 400V)

$U_F = 220V$  - fazni napon (težiš ne linije)

Kako generator “zna” koliku snagu treba da preda u mrežu?

Pojavljuje se problem energetskog bilansa-proizvodnja mora da bude jednaka potroš nji. Šta æe se dogoditi ako nije tako, tj. mehanièka snaga koju saopš tavamo na osovinu sinhronog generatora nije jednaka potroš nji veæ je veæa? Sinhroni generator æe se ubrzavati zato š to imamo akumulator mehanièke snage.



sl.37

Pri poveæanju potroš nje, rotori sinhrogeneratora æe da usporavaju-uèestanost mrežnog napona pada. Pri smanjenju poroš nje, rotori sinhrogeneratora ubrzavaju.

Sinhronih generatora u mreži ima puno, tako da njihove obrtne mase (momenti inercije) upravo služe kao najvažniji akumulator energije u EES-u. Međutim, energija koja se akumulira u obrtnim masama je mala i može da pokrije samo kratkotrajne razlike.

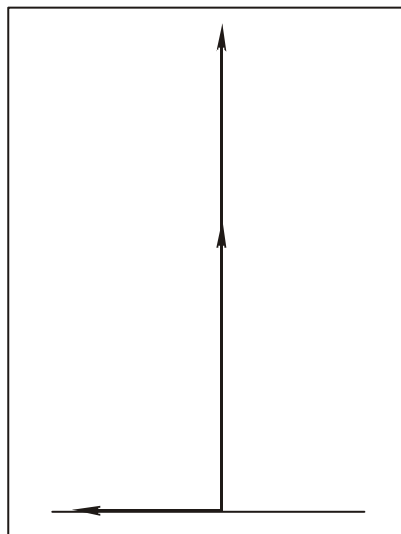
## Problem regulacije kod elektroenergetskog sistema

Osnovni problemi regulacije u EES-u su:

1. Problem regulacije učestanosti (problem balansa potrošnje i proizvodnje)
2. Problem regulacije napona (problem regulacije pobudnih struja svih generatora u mreži)

Ako pogledamo fazorski dijagram za slučaj da su napon generatora i EMS generatora kolinearni, tada će zaključak iz uprosjene zamenske šeme biti:

$$I_G = \frac{U - E}{jx_s}$$



sl.38

Struja napreduje u odnosu na napon generatora za  $90^\circ$ . Ovakva struja definiše reaktivnu snagu:

$$Q = |\underline{U}| |\underline{I}_G|$$

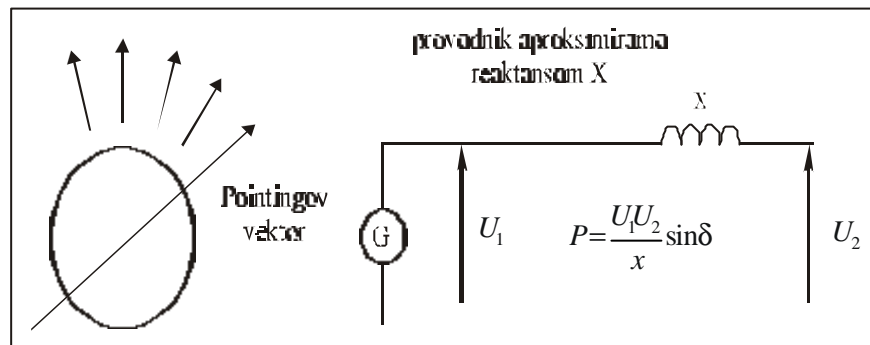
Zato se problem regulacije napona, pored toga što se zove i problem regulacije pobudne struje, zove i problem regulacije reaktivne snage.

Trebalo bi sada da kažemo nekoliko reči o tome kako dobijamo tu mehaničku snagu.

**Pitanje:** Do kolikog rastojanja možemo da prenesemo električnu energiju koristeći trofazni sistem napona učestanosti 50Hz?

Brzina prostiranja elektromagnetnog talasa je konačna. Snaga ne ide baš kroz žicu, već kroz okolni prostor. Radi se o niskim učestanostima-mi uvek zanemarimo sve efekte (mreža sa skoncentrisanim parametrima, idealni transformator itd.). Samo radi naše informisanosti računamo Pointingov vektor. Pošto snaga ide kroz okolni prostor, polje E je ravnomerno, a polje H kružno (vidi sledeću sliku). Znači, ipak se radi o elektromagnetnom talasu, koji ima svoju talasnu dužinu.

Prenos električne energije moguć je do rastojanja koja su jednaka četvrtini talasne dužine elektromagnetnog talasa (učestanosti 50Hz).



sl.39

To je jako veliki broj. Naravno, brzina prostiranja elektromagnetnog talasa nije baš  $c$  i zavisi od oblika provodnika, ali četvrtina te talasne dužine u praksi iznosi 700km (teorijski 1500km). To je rastojanje nakon koga ne možemo stabilno preneti snagu. Koliko god bio dugačak provodnik, na osnovu relacije za sinhro-generator znamo da je snaga razmene između dve udaljene tačke:

$$P = \frac{U_1 U_2}{x} \sin \alpha$$

gde je  $\alpha$  ugao između dva fazora  $U_1, U_2$ . Kao što smo to izveli za sinhroni generator, to možemo uraditi i za bilo koji detalj mreže EES-a.  $\alpha$  mora da bude manje od  $\frac{\pi}{2}$  da bi generator stabilno radio, tj. sve dok je rastojanje manje od četvrtine talasne dužine. Zbog toga se vrlo često u razmeni energije između udaljenih čvorova upotrebljava jednosmerna struja, visokog napona.

Talasna dužina elektromagnetnog talasa koji definiše jednosmernu struju je mnogo veća od 6000km, pa tu nema ograničenja. Zato danas veoma često koristimo jednosmernu struju za razmenu energije između dve zemlje (npr. Italija i Grčka su povezane jako složenim konvertorima snage koji su bidirekcionni tj. mogu da konvertuju snagu u oba smera, a nalaze se ispod mora). Jednosmerne interkonekcije se prave u slučajevima kada se energija razmenjuje između dve zemlje koje nemaju iste učestanosti mreže.

## Termoelektrane i hidroelektrane; sekundarni izvori

### Termoelektrane

$$J \frac{dW}{dt} = M_{em} - M_m$$

Najčešći način za generisanje energije je u termoelektranama (80%)-one koriste fosilna goriva (najčešće niskokvalitetni uglj-lignit).

(ovde fali deo časa)

Kroz kotao prolaze kilometri cevi u kojima se voda pretvara u paru. Svakog sata se u kotlu sagori desetine tona uglja, zdrobljenog u finu prašinu i ubacivanog u ložište mlazovima sabijenog vazduha. Para koja izlazi pod pritiskom, na visokoj temperaturi se širi i pokreće rotor sa lopaticama turbine. Para se zatim hladi, kondenzuje i vraća u kotao. Konstrukcija parnih turbina se razlikuje: jedna je za veoma veliki pritisak i temperaturu, druga je za malo manji pritisak i temperaturu itd.

Zašto se toliko trudimo da maksimalno iskoristimo toplotnu energiju, pa pravimo veliko zagrevanje pare, složenu parnu turbinu itd. Najvažniji razlog za to je taj, što ono što u ovom procesu uđe kao energija (energija uglja) će završiti ili u potrošnji ili tako što izlazna para (koja izlazi iz parne turbine i hladi se da bi ponovo ušla u kotao) greje okolinu. Stepenn korisnog dejstva jedne termoelektrane i onako je mali (30-40%), tako da je strašno loše što ona emituje toplotnu energiju u okolinu.

Efekti toga se mogu videti u zemljama gde je koncentracija termoelektrana u malom prostoru velika (npr. Nemačka)-biljni i životinjski svet je u okolini potpuno uništen, jer se srednja temperatura u krugu od oko 20km povećava za 4-5°C što je fatalno. Utoliko fatalnije što su gradovi

guš æi i potreba za elektriènom energijom veæa. Znaèi, straš no loš a stvar kod termoelektrane je to š to one rade na fosilna goriva (koja nestaju) i š to zagađuju okolinu ne samo sumporom koji izlazi iz dimnjaka, veæ i toplotom. Osim toga, imaju još jednu loš u osobinu, koja se tièe balansa proizvodnje i potroš nje. Snagu jedne termoelektrane možemo da reguliš emo sa vremenskom konstantom od 1 sat (termièki procesi u kotlu i u sistemu koji sprovodi paru su jako spori). Od trenutka kada nam treba veæa snaga jedne termoelektrane, do trenutka kada tu snagu pustimo u mrežu, treba nam 1 sat. Takođe, termoelektrane su jako neefikasne ako ne rade na sopstvenoj (projektovanoj) snazi, tako da one u praksi ili rade sa projektovanom snagom ili uopš te ne rade. Prema tome, termoelektrana uopš te nije zgodna za održavaje balansa između proizvodnje i potroš nje. Osim toga, termoelektrana nije reverzibilna-elektriènu energiju ne možemo da pretvorimo u ugalj. Međutim, kWh dobijen iz termoelektrane je najjeftiniji i zbog toga su one tako raš irene. Danas termoelektrane uglavnom grade siromaš ne zemlje.

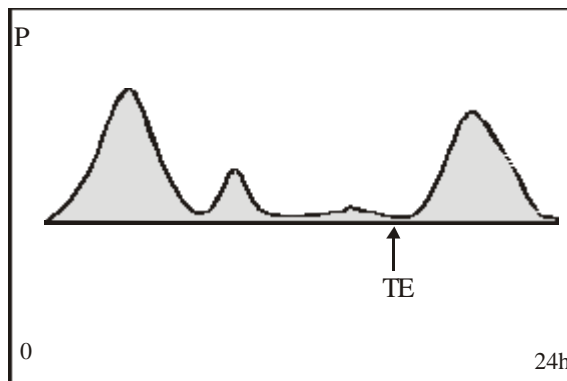
## Hidroelektrane

$$P[MW] = \frac{Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] H[m] \rho}{102 \left( t.j. \frac{1000}{g} \right)}$$

Kako radi hidroelektrana?

Voda koja pada sa visine dovodi se na turbinu sa lopaticama, stvara se pokretaèki moment koji dovodimo na osovину sinhrogeneratora. Prednosti: nema termièkog zagađenja okoline, stepen korisnog dejstva je velik (80-90%). Ali, da bi se napravila hidroelektrana, mora se napraviti akumulaciono jezero, š to znaèi da deo zemljiš ta (pa èak i cela naselja) mora biti trajno potopljen. Sem toga, velika akumulaciona jezera menjaju klimu u okolini. Naprava kojom se energija vodenog toka pertvara u elektriènu energiju se zove turbina. Naèin na koji se turbina konstruiš e zavisi od toga koliki je protok i koliki je pad. Za hidroelektrane koje imaju jako veliki pad koriste se turbine sa lopaticama (Daltonove). Druga vrsta konstrukcije turbine je ona kod koje vodeni tok dolazi na horizontalno postavljenu elisu (Frensisova)-upotrbljava se za srednje padove (100-150m). Kod elektrana sa malim padom (manje od 50m) koristi se modifikacija Frensisove turbine sa još š irim lopaticama (Kaplanova).

Hidroelektrana je jako pogodna za održavanje balansa između potrošnje i proizvodnje, zato što je vrlo jednostavno i gotovo trenutno moguće promijeniti snagu koju ona emituje u mrežu. Zbog toga se hidroelektrane često koriste kao tzv. vršne elektrane.



sl.40

Na prethodnoj slici je prikazana ukupna potrošnja zemlje u toku jednog dana. Termoelektrane ne možemo projektovati prema vršnoj snazi, već ih pravimo do nekog nivoa projektovane srednje snage (tj. do nivoa ispod koga potrošnja nikad ne opada).

Same vrhove koji ne mogu da se zadovolje termoelektranama, zadovoljimo tako što uključujemo hidroelektrane. Te hidroelektrane, koje se uključuju u vrhovima potrošnje zovemo vršne elektrane. Balans između proizvodnje i potrošnje je tako akutan i tako se jako odražava na novac koji mora da se utroši, da sve zemlje tesno sarađuju u razmeni energije.

Druga dobra strana hidroelektrana osim što pokrivaju takve potrošnje, je u tome što su one reverzibilne. Protokom vode iz akumulacije naniže, hidroelektrana vrši i funkciju generatora – predaje električnu energiju u mrežu. U slučaju da se desi nagli pad potrošnje, termoelektrane ne mogu da se ugase (desila bi se eksplozija, tj. havarija). Zato onda hidroelektranama saopštavamo energiju, tj. pumpamo vodu iz donjeg toka u gornju akumulaciju. Reverzibilnost hidroelektrana se koristi kad god je to moguće.

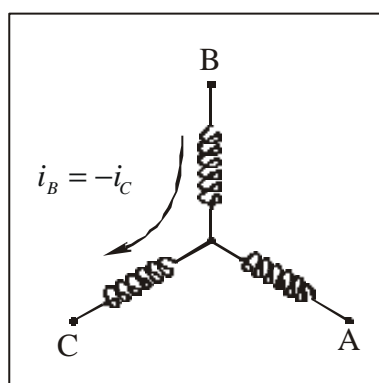
Višak energije se obično predaje drugoj zemlji, ali vremenska konstanta njenog odziva je obično 5-10min (moraju se zatvoriti prekidači na sabirnicama, razvodnim postrojenjima itd.) Postoje međudržavni ugovori koji to regulišu. Da bismo spasili termoelektranu, potrebno je reagovati brzo (za nekoliko desetina sekundi), jer kada potrošnja pada, ona pada odmah. Zato je reverzibilnost hidroelektrana dragocena.

Pored hidro i termoelektrana, postoje i nuklearne elektrane koje rade isto kao i termoelektrane, samo što se toplota ne dobija iz lignita. Takođe imamo i sekundarne izvore energije-elektrane na vetar, plimu i oseku, fotoæelije-one nemaju nikakav ekonomski znaèaj. Ovde spadaju i lokalne hidroelektrane na malim vodenim tokovima. Međutim, odnos jednog kWh dobijenog iz velike hidroelektrane i jedne minijaturne je 1:100, dakle ekonomski potpuno neisplativo. Sekundarni izvori energije se uglavnom koriste u zemljama treæeg sveta, gde iz ekonomskih razloga nije opravdano stotinama km voditi napojni vod ( a on napaja npr. èetiri kuæe). Tada se u tim izolovanim oblastima koriste sekundarni izvori, uz nekakvu akumulaciju (npr. na ostrvima imamo puno sekundarnih izvora).

Pitanje na usmenom (za desetku):

Šta se dešava ako se stator asinhronog motora ne napaja trofazno?

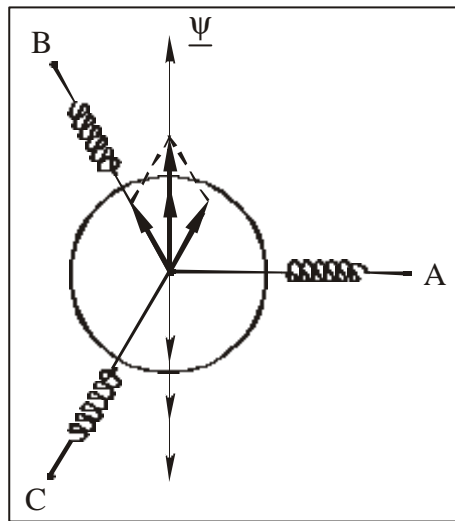
Ako prekinemo jedan namotaj, ako se motor obræe, on æe nastaviti da se obræe.



sl.41

Poznate su nam osnove na kojima poèiva asinhroni motor-potrebno je da postoji obrtno statorsko polje koje bi trebalo da ima const amplitudu i da se vektor koji ga predstavlja u prostoru obræe nekom brzinom.

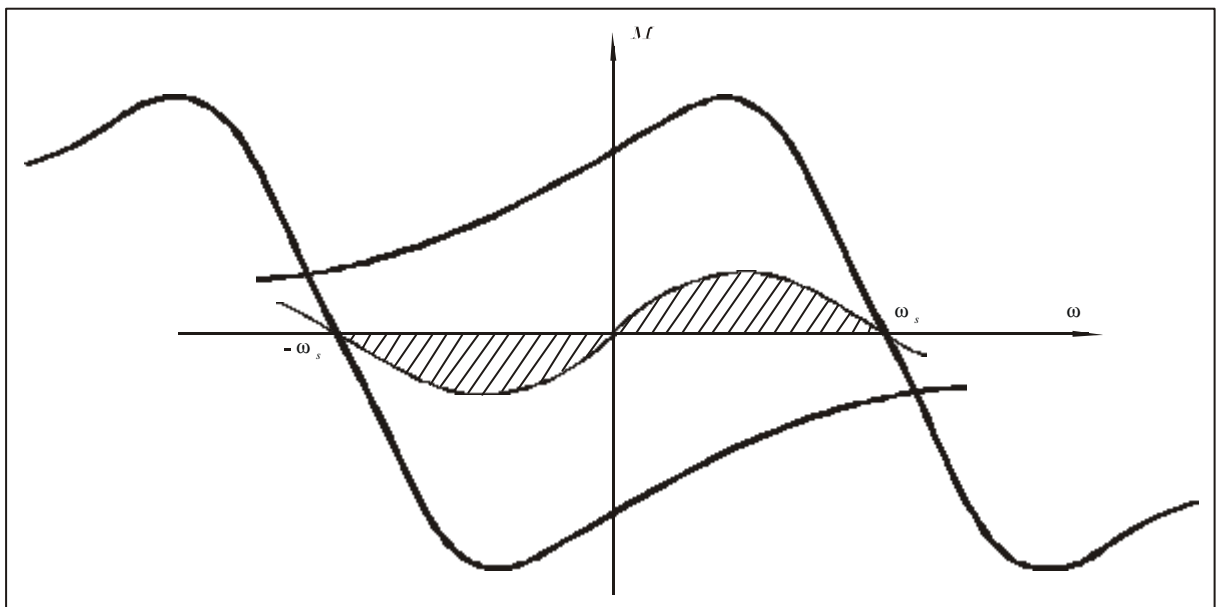
Rezultat napajanja koje daje takvo obrtno polje je mehanièka karakteristika koja nam je poznata. Kada preseèemo jedan od provodnika, kroz njega ne teèe struja i nema moguænosti da se napravi obrtno polje. Struja koja teèe kroz namotaje B,C je naizmenièna. Kakav æe fluks postojati u mašini?



sl.42

Fluks koji æe postojati u mašini æe uvek imati samo jedan pravac, a amplituda æe mu se u vremenu menjati po prostoperiodičnom zakonu (vrh vektora æe oscilovati gore-dole). Vektor koji ovako osciluje može biti razložen na dva vektora jednakih amplituda, a ta amplituda je jednaka polovini maksimalne vrednosti. Ovi vektori su amplitude  $\frac{\Psi}{2}$ , obræu se istom brzinom na suprotnu stranu.

Sada treba razmisliti kakve to posledice ima na mehaničku karakteristiku.

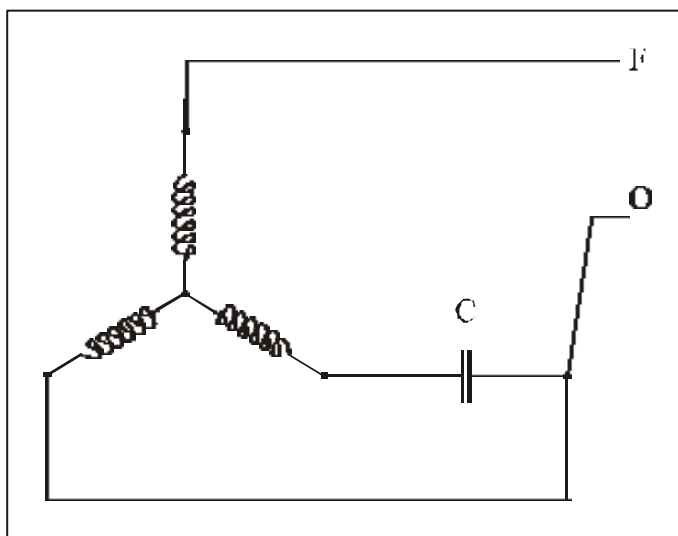


sl.43

Nama je poznato da ona polovina vektora koja se obræe u smeru suprotnom od kazaljke na satu daje mehanièku karakteristiku èiji oblik znamo. Vrh ove mehanièke karakteristike (prevalni moment) æe biti èetiri puta manji od prevalnog momenta asinhronog motora u uslovima normalnog rada, jer je prevalni moment srazmeran kvadratu fluksa. Polje koje se obræe na suprotnu stranu rezultovaæe mehanièkom karakteristikom koja izgleda kao lik u ogledalu. Poš postoje oba polja, mi možemo uèiniti jednu aproksimaciju, a to je da je motor linearan pa možemo primeniti superpoziciju (š to nije taèno, ali daje odgovor na pitanje). Rezultantna mehanièka karakteristika se dobija sabiranjem.

Odavde se vidi da motor koji nije poš ao, neæe ni poæi (u nuli se ne razvija nikakav moment). Međutim, ukoliko se motor zaletao do nazivne brzine, možemo da damo sledeæi odgovor: ako prekinemo fazu , motor æe verovatno prestati da se obræe ako je moment optereæenja znatno iznad nominalnog.

Konstruiš u se asinhroni motori koji upravo ovako rade –to su jednofazni asinhroni motori. Oni polaze tako š to se pored motora upotrebi i jedan kondenzator.



sl.44

Mi bismo želeli da imamo obrtno polje, ali ne možemo zato š to imamo samo jedan fazor. Ne raspolažemo bilo kakvim fazorom koji bi bio zaokrenut za neki ugao. Pokušavamo da fazno prednjaèenje postignemo kondenzatorom. Time favorizujemo jedan od vektora (veæi je po amplitudi), š to znaèi da æe mehanièka karakteristika imati nenultu vrednost u nuli. Kada ni jedno od polja nije favorizovano, moment koji motor razvija pri nultoj brzini je nula.

Ovako se uglavnom prave motori manje snage koji se koriste po domaćinstvima. Mnogo bi bolje bilo kada bi se monofazni motori pravili od dva namotaja koji su međusobno osno pomereni u prostoru za  $90^{\circ}$ . Međutim, to se ne èini, veæ se motori koji su napravljeni za trofazni rad obogate jednim kondenzatorom i prodaju kao monofazni iz èisto ekonomskih razloga (da ne bi pravili dva razlièita proizvoda).

