

1. Osnovni elementi konstrukcije i vrste sinhronih mašina

Magnetsko kolo sinhronog generatora sastoji se od dva osnovna dela : nepokretnog dela ili statora i pokretnog dela ili rotora, koji se međusobno razdvojeni međugvoždjem.

Stator se pravi u obliku šupljeg cilindra i sastavljen je od dinamo limova debljine 0.5mm, koji su međusobno izolovani tankom hartijom ili slojem laka i naslonjeni jedan na drugi. Na spoljnom obimu nalaze se izrezi u obliku lastinog repa . Na svakom limu po unutrašnjem obimu izbijene su šupljine, tako da kada se limovi slože izbijeni delovi obrazuju žlebove. Žlebovi statora sinhronih mašina manjih snaga su poluzatvoreni, a po obliku mogu biti trapezni ili pravougaoni . U žlebove se stavljaju namoti. Za SM manjih snaga namoti su izrađeni od okruglih provodnika . U otvorene žlebove SM većih snaga stavljaju se štapni namoti. Uz zidove žleba dolazi najpre postava žleba, zatim u dnu žleba provodnici jednog sloja, iznad njih pregrada žleba, iznad pregrade provodnici drugog sloja i na kraju zaglavak za učvršćivanje provodnika u žlebu. Kod namota za više napone, provodnici svakog sloja zasebno se izoluju čaurama. Krajevi namota svake faze izvode se kroz oklop na posebne izolatore i sprežu se u zvezdu. Izolovani krajevi se dovode do blok transformatora.

Međugvoždje treba da bude što manje jer je to glavni otpor u magnetskom kolu mašine.

Rotor U zavisnosti od konstrukcije rotora, sinhronih generatore delimo na dve vrste: sa valjkastim rotorom (turbogeneratore) i sa istaknutim polovima (hidrogeneratore). Za velike brzine obrtanja usled čega dolazi do velikog mehaničkog naprezanja ne ide se na velike prečnike rotora i namotaji rotora se raspodeljuju što ravnomernije po obimu. Tako dobijamo sinhronu mašinu sa valjkastim rotorom. Kada se prelazi na veći broj pari polova, brzine su manje i dopušta se veći prečnik rotora. Tada se ne zahteva ravnomerna raspodela namota po obimu jer su manja mehanička naprezanja pa se onda prelazi na rotor sa istaknutim polovima. Položaj rotora može biti horizontalan ili vertikaln.

Turbogeneratori: Snage ovi mašina su do 1500MVA. One se postavljaju horizontalno . zbog veliki brzina i mehaničkog naprezanja rotor se pravi od masivnog gvožđa sa nekim primesama. Konstruiše se iz jednog dela. Rotor se obrće istom brzinom kao i obrtno polje statora i zato se u njemu ne indukuju nikakve struje. Po obimu rotora se izrezuju žljebovi u koje se stavljaju provodnici od bakra koji su dobro pričvršćeni . Kroz namote protiču jednosmerne struje koje formiraju magnetno polje. Žljebovi se ne izrezuju po celom obimu već samo 2/3 ili 3/4 obima zahvataju žljebovi. Deo bez žljebova je zona velikog zupca i tu prolazi glavni deo magnetnog polja. Kod TG međugvoždje je konstantno.

Hidrogeneratori: Kod ovi mašina broj polova je veliki pa su brzine obrtanja manje. Kreću se od 60ob/min do nekoliko stotina ob/min. Snaga najvećih je oko 750MVA. HG imaju veći prečnik a manju aksijalnu dužinu.

Kod oba tipa mašina magnetni polovi se pričvršćuju na venac rotora. Na jezgro pola se stavljaju pobudni namoti kroz koje protiče jednosmerna struja. Na polnim nastavcima se izrezuju šupljine u koje se postavljaju bakarne šipke koje se sa bočnih strana kratko spajaju i tako formiraju kavezni namot. To se naziva prigušni kavez ili Leblanov amortizer i ima značaj samo u nestacionarnim režimima rada. U normalno radu ovaj namot nema nikakvu ulogu.

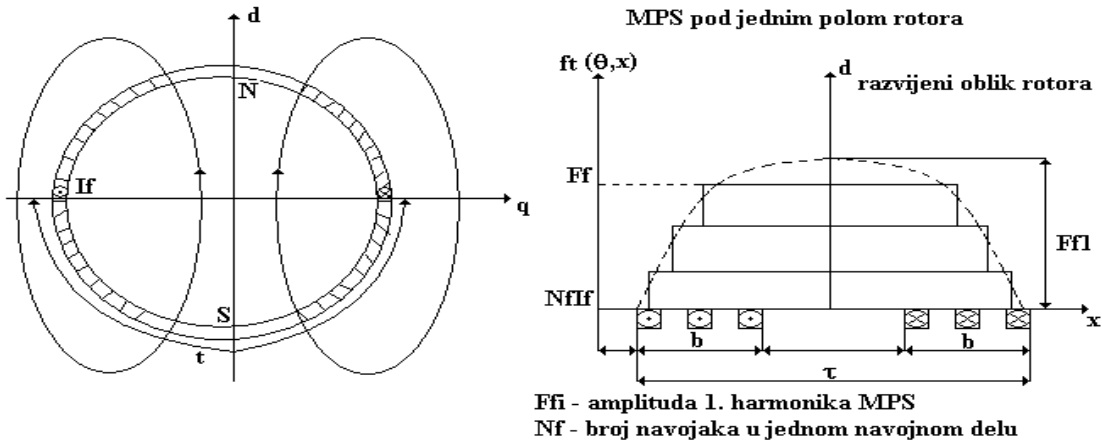
Sinhroni kompenzatori su po pravilu mašine sa istaknutim polovima.

2. Princip rada SM

Sinhrona mašina je elektromehanički pretvarač sa dvostranim napajanjem. Namot na rotoru je pobudni ili induktor. Kroz njega protiče jednosmerna struja i stvara stalno magnetno polje. Magnetno polje rotora je raspodeljeno po obimu i zavisi od konstrukcije rotora. Kada se rotor obrće nosi sa sobom to polje i obrće ga istom brzinom kojom se i on obrće. To polje preseca provodnike na statoru i u njima indukuje EMS. EMS po provodniku je $e=lvB$. Indukovane EMS u statoru su sinusne i vremenski pomerene za trećinu periode ili ako su predstavljene vektorima, oni su pomereni za $2\pi/3$.

Posmatrajmo slučaj kada rotor ima jedan par polova, $p=1$. tada pri jednom obrtaju imamo jednu potpunu promenu EMS. Ako je broj obrtaja u minuti n tada je broj promena EMS u jednoj sekundi $f'=n/60$. Ako je broj pari polova p onda za svaki obrtaj imamo p puta veći broj promena, pa je broj promena u sekundi (učestanost EMS) za p pari polova $f=pn/60$. Ako na stator vežemo neki simetrični trofazni potrošač, kroz namote statora uspostaviće se jednake struje vremenski pomerene za trećinu periode. Usled ovih struja javlja se obrtno magnetno polje čija je brzina obrtanja ista kao i brzina kojom se obrće rotor $n=60f/p$. Obrtno polje koje stvaraju namoti statora se kreće u istom smeru i istom brzinom (sinhrona brzina) kao i polje rotora. Zbog toga se mašina zove sinhrona. Povratno delovanje polja statora se zove magnetna reakcija indukta. Struje statora takođe mogu da se jave i ako je mašina vezana preko statora na mrežu. Rotor može da se obrće bilo kojom brzinom. Brzinu obrtanja rotora određuje turbina koja ima svoju optimalnu brzinu, prema kojoj se određuje broj polova. Kod TG brzine su $n=1500\text{ob/min}$ ili $n=3000\text{ob/min}$, a kod HG se kreću najčešće od $50-60\text{ob/min}$.

3. MPS i indukcija rotora SM sa valjkastim rotorom



Svaki navojni deo koji je smešten u dva, u odnosu na osu pola, simetrična žljeba ima pravougaoni oblik MPS. Pri sabiranju ovih polja dobija se stepenasta linija koja se može zameniti pravama koje čine krakove trapeza. Neka je b deo polnog koraka $\tau/3$ koji zahvataju žljebovi. Pod jednim polom imamo $2b$ i tome je odgovarajući ugao 2ρ .

$$\gamma = \frac{2b}{\tau} = \frac{2\rho}{\pi} \quad \gamma - \text{odnos koji pokazuje koliki je deo polnog koraka pod namotima u odnosu na deo pola rotora}$$

$$\rho = \gamma \frac{\pi}{2}$$

Takođe važi: $\frac{\theta}{2\pi} = \frac{2\pi}{\lambda x}$ gde je: λ - dvostrani polni korak po obimu rotora
 θ - ugao za koji posmatramo vrednost polja
 x - lučno rastojanje

Trapeznu f -ju predstaviceemo furijeovim redom:

$$f(x) = Ff1 \cos \frac{2\pi}{\lambda} x + Ff3 \cos 3 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} x + Ff5 \cos 5 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} x + \dots$$

Amplituda makojeg harmonika

$$Ffn = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} b \cdot \cos n\theta \, d\theta \implies Ffn = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{B}{\rho} \cdot \sin \frac{n\pi}{2} \sin n\rho$$

$$Ff1 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Ff}{\rho} \cdot \sin \rho = \frac{8}{\pi^2} \frac{\sin \gamma \pi/2}{\gamma} Ff = Kf \cdot Ff \quad \text{amplituda 1. harmonika}$$

$$Kf = \frac{4}{\pi} \frac{\sin \rho}{\rho} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\sin \gamma \pi/2}{\gamma} \quad \text{-odnos između amplitude I harmonikai amplitude MPS Ff}$$

Kf nam pokazuje koliko smo polje rotora uspeli da približimo prvom harmoniku.

Sada određujemo indukciju: $B_0 = \mu_0/\delta * F$

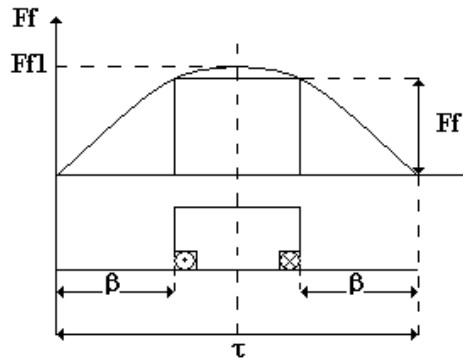
$Bf1 = \mu_0/(K\delta \delta_0 K\mu) * Kf F$ - amplituda I harmonika indukcije $K\delta > 1, K\mu > 1$

δ - trebalo bi da bude const dužina međugvoždja, ali ona se menja usled postojanja žljebova na statoru i rotoru. Promena sačinioaca δ_0 se uzima u obzir pomoću Karperovog sačinioaca $K\delta$. $K\mu$ se određuje na osnovu karakteristike magnećenja $\delta = K\delta \delta_0 K\mu$

Konstrukcijom se nastoji da u f -ji MPS postoji što manje viših harmonika. Polje rotora je nepomično u odnosu na rotor. Indukcija polja u odnosu na stator je:

$$b_{fob} = B_{f1} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \omega t\right) \quad \text{- indeks f označava pobudu}$$

4. MPS, indukcija i fluks rotora CM sa istaknutim polovima. Indukovana EMS u namotima statora, međusobna induktivnost.



Indukovana EMS zavisi od oblika polja rotora . Teži se tome da EMS bude po obliku što bliža harmoničnom jer je cilj da se pomoću indukta stvori sinusoidalni naizmenični napon. Pošto je EMS posledica promene indukcije i polje rotora treba da bude što bliže harmoničnom. Ako oblik polja nije potpuno sinusoidalan, onda uticaj komponenti viših harmonika treba učiniti što manjim. Posmatrajmo dvopolnu mašinu . Zona delovanja polja se poklapa sa širinom polja. Oblik polja aproksimiramo pravougaonom linijom. Rastojanje između dva pravougaonika je 2β .

Ovu funkciju možemo predstaviti Furijeovim redom:

$$f(x) = \frac{4}{\pi} Ff \left(\cos \frac{2\pi}{\lambda} x \cos \beta - \frac{1}{3} \cos 3 \frac{2\pi}{\lambda} x \cdot \cos 3\beta + \frac{1}{5} \cos 5 \frac{2\pi}{\lambda} x \cdot \cos 5\beta \dots \right)$$

$$Ff_n = \frac{4}{\pi} \cos \frac{n\beta}{\beta} \sin \frac{n\pi}{2} Ff \quad Ff_1 = \frac{4}{\pi} Ff \cos \beta \quad K_f = \frac{Ff_1}{Ff} = \frac{4}{\pi} \cos \beta$$

Kod ovog tipa rotora su viši harmonici značajniji jer je f-ja MPS pravougaona, a ne trapezna.

$\delta = \delta_{min} / \cos(2\pi \cdot x / \lambda)$ - Teži se da se dužina međugvožđja menja po ovom zakonu

$$B_0 = \mu_0 / \delta * F \quad \delta = K_\delta \delta_0 K_\mu$$

$$b_{fob} = B_{f1} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \omega t\right) \text{ Magnetno polje koje vode provodnici na statoru}$$

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_m \tau l$$

$$Ff = \frac{Nf If}{2 \rho} \implies = \frac{\mu_0 \tau l Nf If}{\pi \delta \rho} K_f$$

$$Bf1 = \mu_0 / \delta K_f Ff$$

$$\text{Fluksni obuhvat jedne faze na statoru: } \Psi_{fad} = KN \Phi_{f1}$$

$$K = K_p K_t$$

N - broj navojaka jedne faze

$$M = L_{fad} = \frac{\Psi_{fad}}{If} \text{ - Međusobna induktivnost}$$

$$L_{fad} = \frac{\mu_0 \tau l Nf K_f KN}{\pi \rho} = M_{fad}$$

$$\Psi_{fa}(t) = \Psi_{fad} \cos(\omega t) = M_{fad} If \cos(\omega t) \text{ - Vremenska promena fluksnog obuhvata na statoru}$$

$$e = - \frac{d\Psi_{fa}(t)}{dt} = \omega M_{fad} If \sin(\omega t) = E_{max} \sin(\omega t)$$

$$E = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{X_{fad}}{\sqrt{2}} If \text{ - efektivna vrednost indukovane EMS jedne faze statora}$$

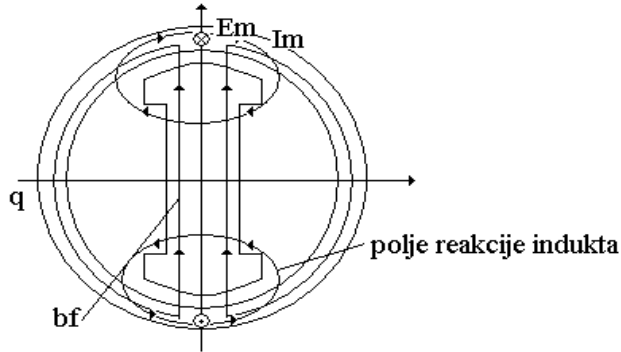
$$X_{fad} = \omega M_{fad}$$

Uslov za postojanje ovakve relacije je linearnost magnetnog materijala, jer jedino u tom slučaju mogu da se definišu induktivnosti.

5. MPS reakcije indukta pri različitim vrstama opterećenja SM

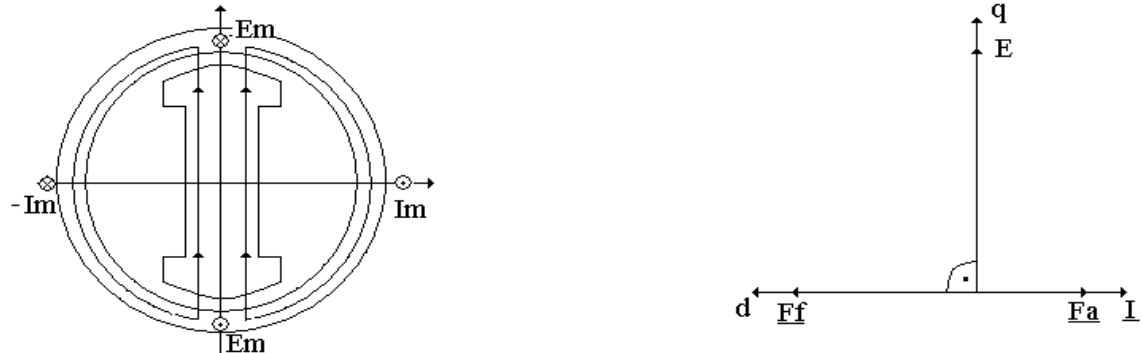
MPS induktora i indukta se kreću istim brzinama, ali položaj MPS indukta u odnosu na MPS induktora nije stalan. On zavisi od prirode opterećenja mašine tj. na šta je mašina priključena. Prirodu opterećenja određuje ugao između indukovanе EMS i struje u namotima statora: $\angle \Psi = \angle (E, I)$. Postoje 3 slučaja:

1.) Omsko opterećenje ($\Psi = 0$)



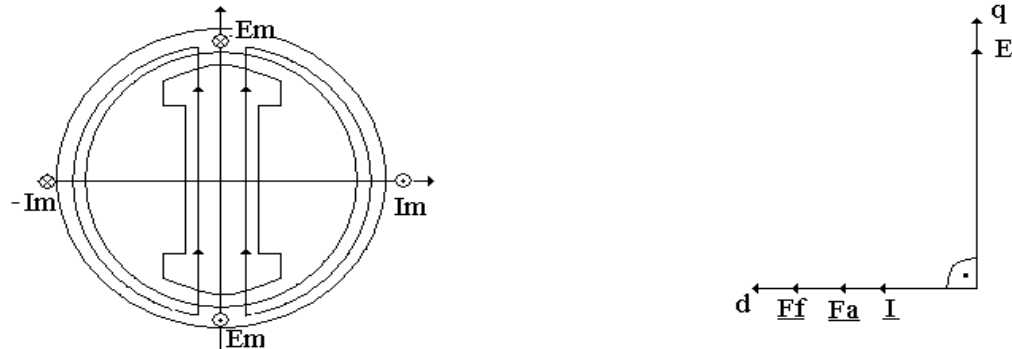
\underline{E} i \underline{I} su u fazi. Maksimalna struja biće u istim provodnicima u kojima je i EMS maksimalna. Maksimalna MPS reakcije indukta nalazi se u neutralnoj osi (poprečnoj osi).

2.) Induktivno opterećenje ($\Psi = -\pi/2$)



Ugao između EMS i MPS reakcije indukta odnosno struje je $\Psi = -\pi/2$. Ako je max EMS u provodniku koji se nalazi u osi polova, onda će max struja biti u onim provodnicima koji su pomereni od ose polova za $\pi/2$ u suprotnom smeru od smera obrtanja.

3.) Kapacitivno opterećenje ($\Psi = \pi/2$)



Ugao između EMS i struja je $\pi/2$. Ako je max EMS u provodnicima koji se nalaze u uzdužnoj osi onda je max struja u onim provodnicima koji su pomereni od ose polova za ugao $\pi/2$ u smeru obrtanje rotora. MPS reakcije indukta je istog smera kao i MPS indukta

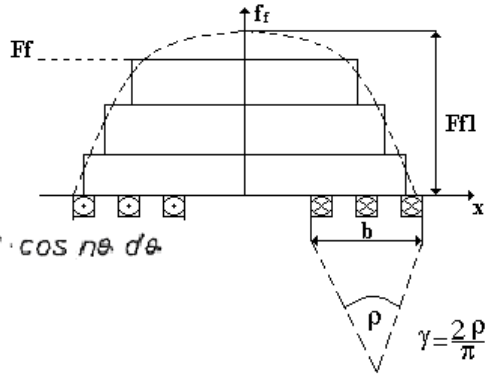
6. Sačinioi oblika polja reakcije indukta

Turbogeneratori:

$$F_{fn} = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F_f \cdot \cos n\theta \, d\theta$$

$$F_{fn} = \frac{4}{\pi} \int_0^{(1-\gamma)\frac{\pi}{2}} F_f \cdot \cos n\theta \, d\theta + \frac{4}{\pi} \int_{\frac{\pi/2-\theta}{\gamma}}^{\frac{\pi}{2}} F_f \cdot \cos n\theta \, d\theta$$

$$F_{f1} = \frac{8 \sin \frac{\gamma}{2}}{\pi^2 \gamma} F_f = K_f F_f \Rightarrow K_f = \frac{8 \sin \frac{\gamma}{2}}{\pi^2 \gamma}$$



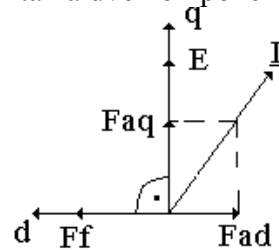
Koeficijent K_f naziva se sačinilac oblika polja i predstavlja odnos amplitude osnovnog harmonika MPS rotora i stvarne vrednosti MPS rotora.

Hidrogeneratori:

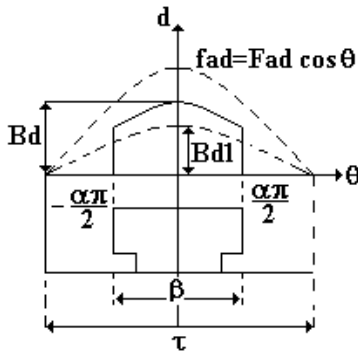
Blondel je prvi razložio reakciju indukta na dve komponente uzdužnu (d) i poprečnu (q).

$$F_{ad} = F_a \sin \Psi$$

$$F_{aq} = F_a \cos \Psi$$



1. - Reakcija indukta po uzdužnoj osi

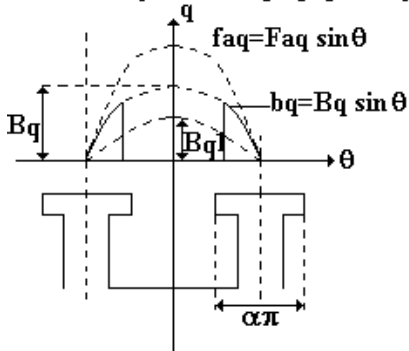


$$\alpha = \beta/\tau = \beta/\pi ; B_{d1} = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} b_d \cdot \cos \theta \, d\theta$$

$$B_{d1} = \frac{2}{\pi} \int_{-\alpha\pi/2}^{\alpha\pi/2} b_d \cdot \cos^2 \theta \, d\theta = \frac{\alpha\pi + \sin\alpha\pi}{\pi} B_d$$

$$K_d = \frac{B_{d1}}{B_d} = \frac{\alpha\pi + \sin\alpha\pi}{\pi} \quad \text{sačinilac oblika polja reakcije indukta po uzdužnoj osi}$$

2. - Reakcija indukta po poprečnoj osi



$$B_{q1} = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} b_q \cdot \sin \theta \, d\theta$$

$$B_{q1} = \frac{2}{\pi} \int_{-\alpha\pi/2}^{\alpha\pi/2} b_q \cdot \sin^2 \theta \, d\theta = \frac{\alpha\pi - \sin\alpha\pi}{\pi} B_q$$

$$K_q = \frac{\alpha\pi - \sin\alpha\pi}{\pi}$$

K_q , K_d – određuju stepen smanjenja max vrednosti reakcije indukta da bi se dobila amplituda osnovnog harmonika.

7. MPS, fluksevi i EMS kod SM. Vektorski dijagram

Hidrogenerator

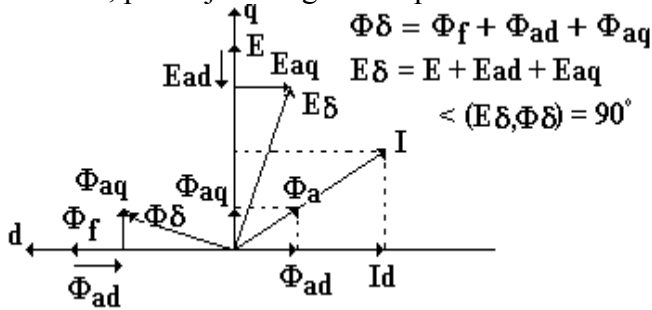
$$B_{f1} = K_f B_f \quad K_f = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\pi}{2}$$

$$B_{d1} = K_d B_d \quad K_d = \frac{\alpha\pi + \sin\alpha\pi}{\pi}$$

$$B_{q1} = K_q B_q \quad K_q = \frac{\alpha\pi - \sin\alpha\pi}{\pi}$$

Polazeći od namotaja rotora kroz koji prolazi jednosmerna struja I_f čiji iznos znamo, poznato nam je i MPS F_{f1} te na osnoviu nje određujemo B_{f1} , iz nje Φ_{f1} , a iz fluksa indukovanu EMS u namotima statora od strane rotora, E . Ako imao zatvoreno kolo statora,

kroz njega protiče struja I , koja se posmatra preko svoje dve komponente I_d i I_q . Od polja koje postoji u mašini javljaju se tri EMS: E induktora, E_{ad} i E_{aq} od reakcije indukta. Po d osi deluje MPS rotora F_f i stvara fluks Φ_f koji je u fazi sa njom. Usled Φ_f nastaje E koja u odnosu na Φ_f kasni za $\pi/2$. U opštem slučaju struja statora je pomerena u odnosu na E za ugao $\varphi = (-\pi/2, \pi/2)$. Tu struju razlažemo na komponente I_d i I_q . Onda možemo odrediti F , pa znajući magnetni otpor možemo odrediti flukseve.



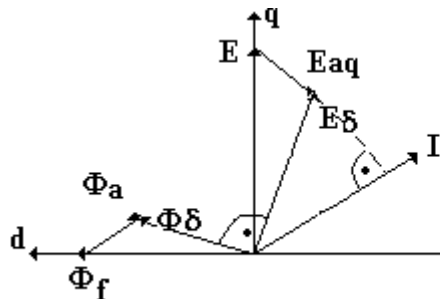
E_{ad} kasni za $\pi/2$ u odnosu na Φ_{ad} . E_{aq} kasni za $\pi/2$ u odnosu na Φ_{aq} . Rezultantni fluks Φ_{δ} je onaj koji realno postoji u međugvoždju i on određuje stepen zasićenosti magnetnog kola. Fluks rasipanja Φ_{γ} ne postoji u namotima rotora jer kroz njih protiče jednosmerna struja.

Dakle, postojisamo fluks rasipanja statora. Struja I stvara Φ_{γ} a on indukuje $E_{\gamma} = -jX_{\gamma} I$ ili $E_{\gamma} = -j X_{\gamma} (I_d + I_q) = E_{\gamma d} + E_{\gamma q}$

Turbogenerator

$$B_{f1} = K_f B_f \quad K_f = \frac{4}{\pi} \frac{\sin \rho}{\rho} \quad K_d = K_q = 1$$

To znači da osnovni harmonik indukcije ne razlažemo na komponente $\Phi = \frac{2}{\pi} B_m \tau l$. Tako da na osnovu poznate indukcije možemo odrediti flukseve, a na osnovu njih EMS. Kroz namotaj rotora protiče $I_f \rightarrow F_{f1} \rightarrow B_{f1} \rightarrow \Phi_f \rightarrow E$. U statoru imamo struju I , na osnovu nje određujemo F_{a1} , pa B_{a1} , pa Φ_{a1} i na kraju E_a . $E_a = X_a I$, $E_a = -jX_a I$



$$\Phi_{\delta} = \Phi_f + \Phi_a$$

$$E_{\delta} = E + E_a \quad \gamma$$

Usled fluksa rasipanja indukuje se:
 $E_{\gamma} = X_{\gamma} I$
 $E_a + E_{\gamma} = -j (X_a + X_{\gamma}) I = -j X_s I$
 $X_s = X_a + X_{\gamma}$ -sinhrona reaktansa

8. Svođenje MPS reakcije indukta i struja na namote pobude

Turbogenerator

$$F_{al} = K \frac{2 q N_n I \sqrt{2}}{p} \quad \text{- po paru polova}$$

$$F_{alp} = K \frac{1 q N_n I \sqrt{2}}{p} \quad \text{- po polu}$$

$$F_{fle} = \frac{8 \sin \gamma \pi / 2}{\gamma \pi^2} \quad F_{fe} = K_f F_{fe} = F_{alp} \Rightarrow K_a = \frac{F_{fe}}{F_{alp}} = \frac{\gamma \pi^2}{8 \sin \gamma \pi / 2}$$

Sačinilac svođenja MPS
reakcije indukta na MPS
rotora |

Hodrogenerator

- Po uzdužnoj osi:

$$B_{dl} = B_{fl}$$

$$K_d B_d = K_f B_{fe} \Rightarrow \frac{\mu_0}{\delta} K_d F_{adl} = \frac{\mu_0}{\delta} K_f F_{fed}$$

$$F_{fed} = \frac{K_d}{K_f} F_{adl} = K_{ad} F_{adl} \Rightarrow \text{MPS reakcije indukta svedena narotor (d-osu)}$$

$$K_{ad} = \frac{K_d}{K_f} = \frac{\alpha \pi - \sin \alpha \pi}{4 \sin \frac{\alpha \pi}{2}} \Rightarrow \text{Sačinilac uzdužne reakcije}$$

- Po poprečnoj osi:

$$B_{ql} = B_{fl}$$

$$K_q B_q = K_f B_{fe} \Rightarrow \frac{\mu_0}{\delta} K_q F_{aq1} = \frac{\mu_0}{\delta} K_f F_{feq}$$

$$F_{feq} = \frac{K_q}{K_f} F_{aq1} = K_{aq} F_{aq1} \Rightarrow \text{MPS reakcije indukta svedena narotor (q-osu)}$$

$$K_{aq} = \frac{K_q}{K_f} = \frac{\alpha \pi - \sin \alpha \pi}{4 \sin \frac{\alpha \pi}{2}} \Rightarrow \text{Sačinilac poprečne reakcije}$$

9. Jednačine naponske ravnoteže i vektorski dijagram kod SM sa istaknutim polovima

Posmatrajmo jednu fazu statora SM sa istaknutim polovima. U statoru mašine imamo indukovane EMS.

$\Phi_f \Rightarrow E$ – indukovana EMS u namotima statora od strane rotora.

$\Phi_{ad} \Rightarrow E_{ad}$ – indukovana EMS u namotima statora uzrokovana podužnom komponentom struje statora.

$\Phi_{aq} \Rightarrow E_{aq}$ – indukovana EMS u namotima statora uzrokovana poprečnom komponentom struje statora.

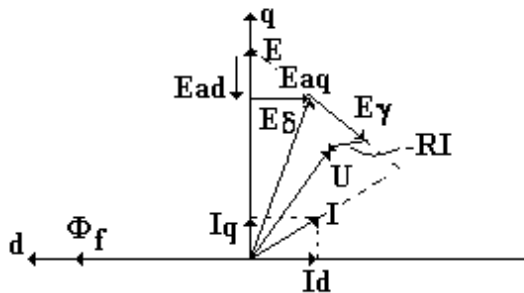
$\Phi_{\delta} \Rightarrow E_{\delta}$ - Rezultantna EMS u Namotima statora

$\Phi_{\gamma} \Rightarrow E_{\gamma}$ - Ems usled rasipanja u namotima statora

Ove EMS se sabiraju, pa za mašinu važi: $\underline{U} = \underline{E} + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_{\gamma} - \underline{RI} = \underline{E}_{\delta} + \underline{E}_{\gamma} - \underline{RI}$

U praznom hodu je $\underline{U} = \underline{E}$ pošto nema reakcije indukta.

Prethodnu jednačinu možemo prikazati grafikom:



δ - ugao snage ili ugao momenta mašine

$\delta = \angle(U, E)$

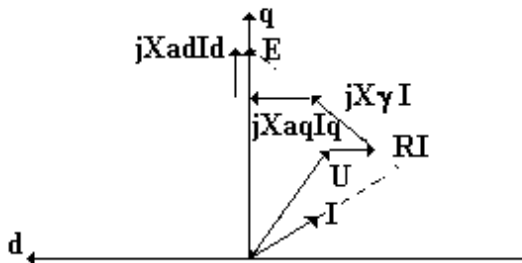
$\angle(U, I) = \varphi$ - određuje prirodu opterećenja

Dalje se može pisati:

$U = E - jX_{ad}I_d - jX_{aq}I_q - jX_{\gamma}I - RI$

$E_{\delta} = E - jX_{ad}I_d - jX_{aq}I_q$

$U = E_{\delta} - jX_{\gamma}I - RI$



Ovi dijagrami su nacrtani za pretežno

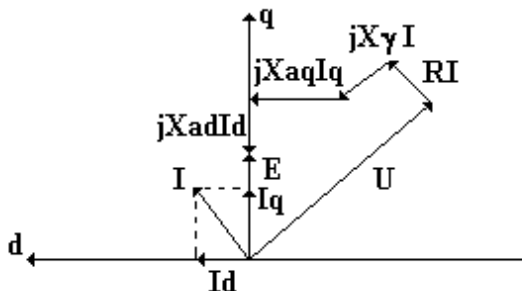
induktivno opterećenje tada je $0 < \varphi < \pi/2$

$E = U + RI + X_{\gamma}I + jX_{ad}I_d + jX_{aq}I_q$

Za ovakav režim rada mašine kažemo da je

mašina nadpobuđena $E > U$. Tada je $D > 0$,

$Q > 0$ i mašina radi u generatorskom režimu.



Mašina troši reaktivnu energiju $Q < 0$, $D > 0$, režim rada je aktivno-kapacitivni.

Za ovakav režim kažemo da je mašina podpobuđena $E < U$

$-\pi/2 < \varphi < 0$

10. Blondelov i modifikovani Blondelov dijagram

Posmatrajmo jednu fazu statora SM sa istaknutim polovima. U statoru mašine imamo indukovane EMS.

$\Phi_f \Rightarrow E$ – indukovana EMS u namotima statora od strane rotora.

$\Phi_{ad} \Rightarrow E_{ad}$ – indukovana EMS u namotima statora uzrokovana podužnom komponentom struje statora.

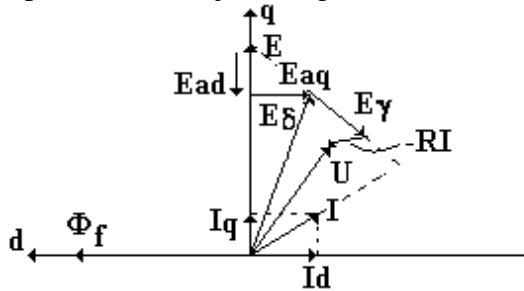
$\Phi_{aq} \Rightarrow E_{aq}$ – indukovana EMS u namotima statora uzrokovana poprečnom komponentom struje statora.

$\Phi_{\delta} \Rightarrow E_{\delta}$ - Rezultantna EMS u Namotima statora

$\Phi_{\gamma} \Rightarrow E_{\gamma}$ - Ems usled rasipanja u namotima statora

Ove EMS se sabiraju, pa za mašinu važi: $\underline{U} = \underline{E} + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_{\gamma} - \underline{RI} = \underline{E}_{\delta} + \underline{E}_{\gamma} - \underline{RI}$

U praznom hodu je $\underline{U} = \underline{E}$ pošto nema reakcije indukta.



δ - ugao snage ili ugao momenta mašine

$\delta = \angle(U, E)$

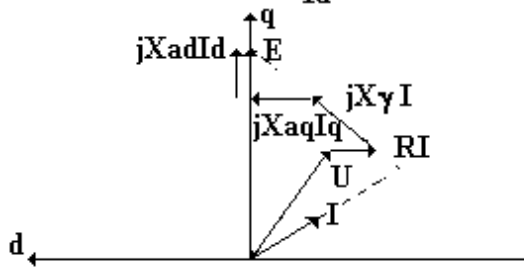
$\angle(U, I) = \varphi$ - određuje prirodu opterećenja

Dalje se može pisati:

$$U = E - jX_{ad}I_d - jX_{aq}I_q - jX_{\gamma}I - RI$$

$$E_{\delta} = E - jX_{ad}I_d - jX_{aq}I_q$$

$$U = E_{\delta} - jX_{\gamma}I - RI$$



Ovi dijagrami su nacrtani za pretežno induktivno opterećenje tada je $0 < \varphi < \pi/2$

$$E = U + RI + X_{\gamma}I + jX_{ad}I_d + jX_{aq}I_q$$

Za ovakav režim rada mašine kažemo da je mašina nadpobuđena $E > U$. Tada je $D > 0$, $Q > 0$ i mašina radi u generatorskom režimu.

Pad napona usled rasutog fluksa je:

$$E_{\gamma} = -jX_{\gamma}I = -jX_{\gamma}I_d - jX_{\gamma}I_q$$

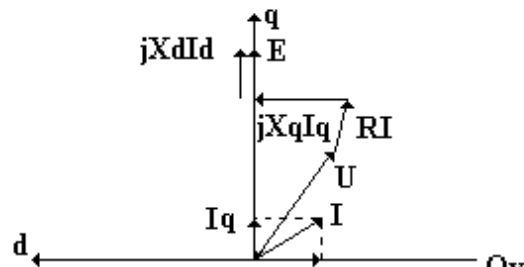
Uvedimo sinhronne reaktanse:

$$X_d = X_{ad} + X_{\gamma} \quad X_q = X_{aq} + X_{\gamma}$$

$$\text{Tada imamo: } U = E - jX_d I_d - jX_q I_q - RI$$

$$E = U + RI + jX_d I_d + jX_q I_q$$

Ovo je pogodan dijagram ako imamo sinhronne reaktanse X_d i X_q , a nemamo reaktansu rasipanja



Ovaj dijagram možemo modifikovati: povlačimo duž iz vrha vektora RI pod uglom ψ . Projekcija ove duži na q osu daje EMS E.

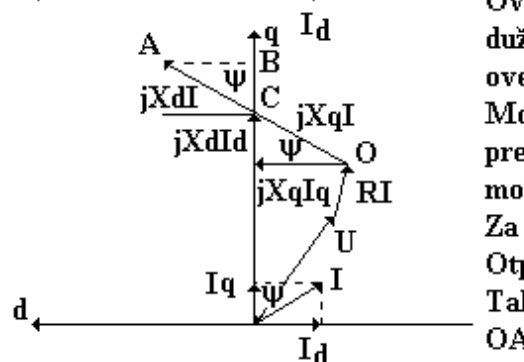
Modifikovan Blondelov dijagram se crta za pretežno induktivno opterećenje, a takođe se može nacrtati i za pretežno kapacitivno.

Za TG Blondelov dijagram važi samo do tačke C.

Otpadaju duži AC i BC jer za TG važi $X_d = X_q$.

Tako se dobija Potijev dijagram.

$$OA = jX_d I, \quad OC = jX_q I, \quad BC = j(X_d - X_q)I_q - j(X_d - X_q)I_d$$



11. Vektorski dijagram napona EMS SM sa valjkastim rotorom. Potijeov dijagram. Ekvivalentna šema

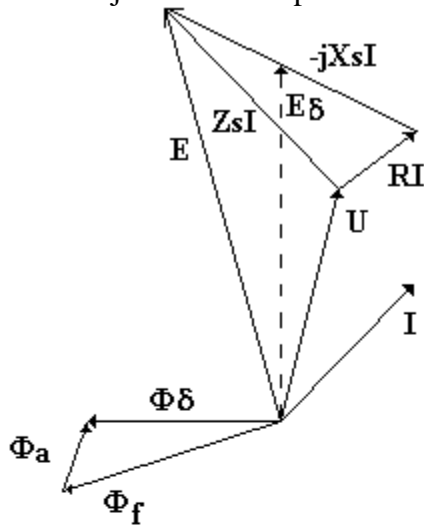
Za turbogenerator važi:

$$X_{ad} = X_{aq} = X_q$$

$$X_d = X_q = X_s - \text{sinhrona reaktansa}$$

$$E = U - jX_\gamma I + jX_a I + RI$$

$$U = E - jX_s I - RI - \text{napon na krajevima mašine.}$$



$$Z_s = R + jX_s$$

Z_s - sinhrona impedansa

X_s - sinhrona reaktansa

R - omska otpornost

Jednačina sada glasi : $U = E - Z_s I$

$$E_\delta = E + E_a = E - jX_a I$$

Ako poznajemo zajednički fluks u mašini Φ_δ onda određujemo E_δ

Φ_a je u fazi sa I .

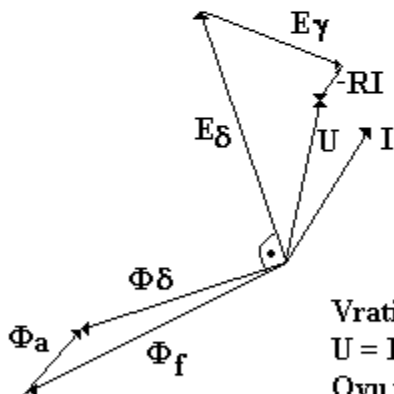
Primećujemo da u statoru postoje sledeće EMS:

$E_j = -RI$ - EMS suprotnog smera od smera struje

$E_\gamma = -jX_\gamma I$ - EMS usled rasutog fluksa statora Φ_γ

$E_a = -jX_a I$ - EMS usled reakcije indukta

Nacrtani dijagram je za pretežno induktivno opterećenje. Može se nacrtati i za pretežno kapacitivno opterećenje.



Ovo je potijeov dijagram EMS i napona.

Na njemu su prikazane dve jednačine:

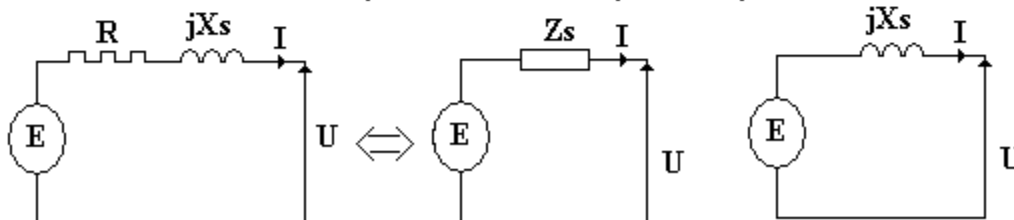
$$U = E_\delta + E_\gamma - RI$$

$$\Phi_\delta = \Phi_f + \Phi_a$$

Vratimo se na jednačinu:

$$U = E - jX_a I - jX_\gamma I - RI = E - Z_s I$$

Ovu jednačinu možemo prikazati pomoću ekvivalentne šeme

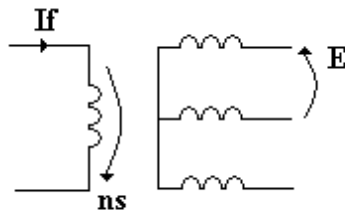


Kod većine mašina je $R \ll X_s$, praktično je $R=0$ pa se dobija ekvivalentna šema u najjednostavnijem obliku.

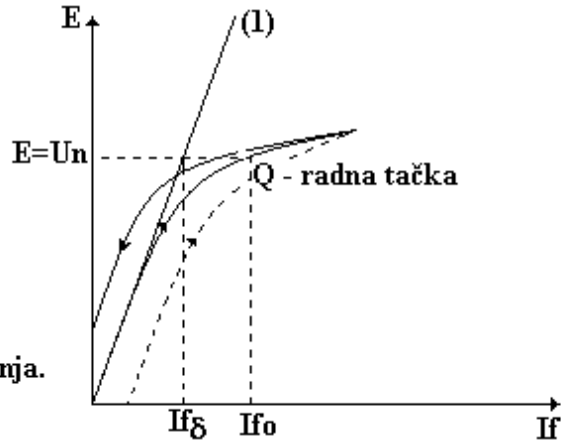
12. Karakteristika praznog hoda i reaktivnog opterećenja SM

1. Karakteristika praznog hoda je kriva koja pokazuje kako se menja EMS neopterećenog generatora u funkciji pobudne struje, a pri stalnoj brzini obrtanja.

$$E = f(I_f), I = 0, n = \text{const.}$$



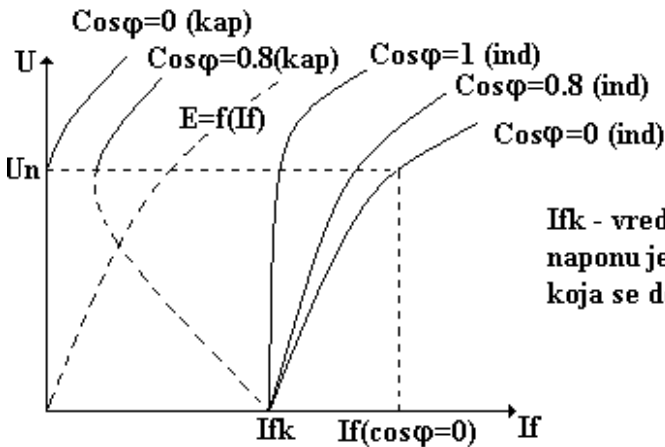
- U proračunima uzimamo srednju krivu
- površina oivičena uzlaznom i silaznom granom k-ke praznog hoda predstavlja histerezisne gubitke i treba da je što manja.



Na početku je k-ka praznog hoda prava linija, pošto magnetsko kolo nije zasićeno. Tangenta (1) predstavlja bi k-kupraznog hoda kada ne bi bilo zasićenja i naziva se k-ka međugvoždja. Značajan podatak sa k-ke praznog hoda je I_{f0} pri kojoj je $E=U_1$.

2. Karakteristika opterećenja je kriva koja pokazuje kako se menja napon na krajevima generatora u f-ji pobudne, pri stalnom opterećenju stalnoj učestanosti i pri stalnom sačinioću snage. Najvažnija je ona k-ka koja se dobija pri nominalnom opterećenju i $\cos\varphi=0$ (ind) i ona se naziva k-ka reaktivnog opterećenja.

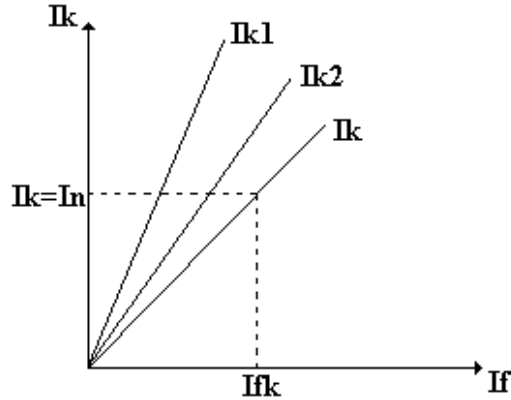
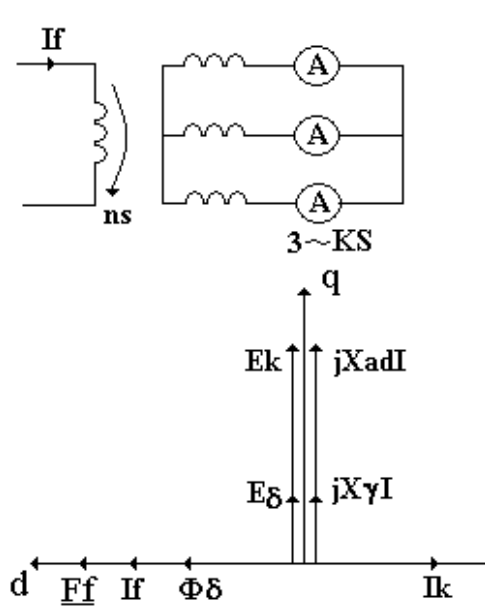
$$U = f(I_f), I = \text{const.}, f = \text{const.}, \cos\varphi = \text{const.} (n = ns).$$



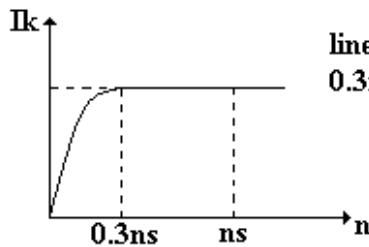
I_{fk} - vrednost pobudne struje koja odgovara naponu jednakom nula, tj. ista pobudna struja koja se dobija iz k-ke kratkog spoja

13. Karakteristika kratkog spoja i odnos kratkog spoja

- Karakteristika kratkog spoja je linija koja pokazuje kako se menja struja statora u f-ji pobudne struje kada su krajevi generatora kratko spojeni i kada je brzina obrtanja nominalna. $I_k = f(I_f)$, $U = 0$, $n = n_s$



$E_{\delta} < E \Rightarrow$ nalazimo se u linearnoj zoni magnetenja



linearna k-ka KS važi do $0.3n_s$ ispod toga ne važi

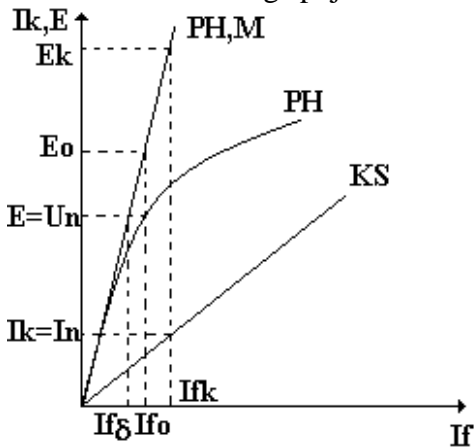
$$I_k = \frac{E_k}{X_{\gamma} + X_{ad}} = \frac{E}{X_d} = \frac{K I_f}{X_d}$$

$$X_d = \text{const} \Rightarrow I_k = K I_f$$

$$\text{jednakost KS: } I_{k1} = \frac{3E}{X_d + X_i + X_o}$$

$$\text{- dvopolni KS: } I_{k2} = \frac{\sqrt{3} E}{X_d + X_i} ; X_o, X_i = 0.1 X_o$$

- Odnos KS je jedan od važnih podataka SM pomoću kojeg se ocenjuje uticaj reakcije indukta, a time i mogućnost promene napona. Odnos KS je odnos pobudne struje pri kojoj se ima na karakteristici praznog hoda $E = U_n$ i pobudne struje pri kojoj se na karakteristici kratkog spoja ima $I_k = I_n$.



$$K_{ks} = O.K.S = \frac{I_{fo}}{I_{fk}} = \frac{E_0}{E_k} = \frac{E_0}{X_d I_n} = \frac{I_{fo}}{I_{f\delta}} \frac{U_n}{X_d I_n}$$

$$\frac{E_0}{U_n} = \frac{I_{fo}}{I_{f\delta}}$$

$$O.K.S = \frac{I_{fo}}{I_{f\delta}} \frac{1}{X_d}$$

δ

$$O.K.S = K_{\mu} \frac{1}{X_d}$$

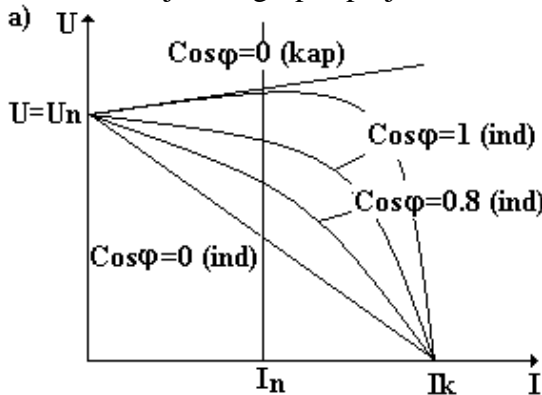
14. Spoljne i regulacione karakteristike

Kod SM radne k-ke pri ustaljenom stanju se mogu dobiti iz međusobne zavisnosti veličina koje mogu da se menjaju, kao što su: EMS, napon na krajevima mašine, pobudna struja, struja indukta.

Spoljna k-ka:

To je k-ka koja pokazuje kako se menja napon na krajevima generatora u f-ji struje opterećenja (struje statora) pri stalnoj pobudnoj struji, pri stalnom sačiniocu snage i stalnoj brzini obrtanja. $U=f(I)$, pri $I_f=\text{const}$, $\cos\varphi=\text{const}$, $n=n_s$.

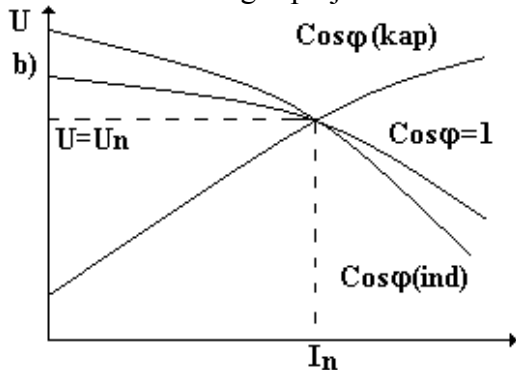
Nas interesuju dve grupe spoljnih k-ka:



U praznom hodu ($I=0$) pri nekoj podužnoj struji Ifo EMS je jednaka nominalnom naponu $U=U_n=E$. Za sve veću struju opterećenja I napon opada sve do vrednosti 0, pri čemu se prelazi u stanje kratkog spoja $I=I_k$. Za svaki sačinilac snage imamo drugu spoljnu k-ku. Pri nekoj struji I_n , ako menjamo $\cos\varphi$ možemo videti kako se menja napon na krajevima mašine.

I_k - struja statora u KS koja odgovara struji Ifo

Više se koristi druga spoljna k-ka:

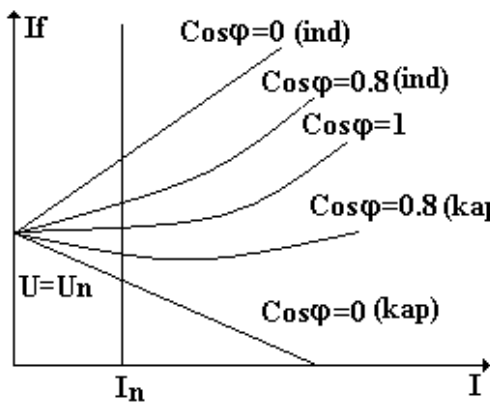


Na ovoj k-ci posmatramo kako se menja napon U u okolini nominalne struje opterećenja I . To zavisi od sačinioca snage i od njega zavisi vrednost pobudne struje. Ako smo podesili da se sve k-ke presecaju u tački (U_n, I_n) vidimo kako se u okolini I_n menja pri različitim $\cos\varphi$

$n_s = n_n$

Regulaciona k-ka:

To je kriva koja pokazuje kako se menja pobudna strujageneratoru u f-ji struje opterećenja, pri stalnom naponu, stalnom sačiniocu snage i nominalnoj brzini obrtanja $I_f=f(I)$ pri $U=\text{const}$, $\cos\varphi=\text{const}$ i $n=n_s$



Kao karakterističan napon uzimamo U_n . U praznom hodu pri $U=U_n$ imamo pobudnu struju $I_f=I_{fo}$. Onda se generator opteret nekim opterećenjem pri $\cos\varphi=\text{const}$. Usled opterećenja napon U povećavamo dok napon ponovo ne dostigne nominalnu vrednost. U preseku I_n i regulacionih k-ka možemo videti kolike su potrebne pobudne struje pri raznim sačiniocimasnage da bi imali nominalni napon. Regulaciona k-ka se koristi za projektovanje pobudnog sistema mašine jer E na osnovu nje znaju granice za pobudnu struju, I_{fmin} i I_{fmax}

15. Gubici snage i stepen iskorišćenja

Gubitke snage podelićemo prema njihovoj prirodi na mehaničke, električne magnetne gubitke.

I Mehanički gubici

-Gubici na trenje u ležištima, P_f

-Ventilacioni gubici, P_v

$$P_{meh} = P_f + P_v + P_d$$

-gubici na trenje dirki o prstenove, P_d

II Magnetni gubici

-Gubici snage u gvoždju statora, P_{fe} . Dele se na magnetne gubitke u zupcima P_{fez} i na gubitke u zoni jarma magnetnog kola statora P_{fej} . Ovi gubici se razlikuju i po iznosu i po načinu određivanja, ali i P_{fez} i P_{fej} imaju deo usled histerezesa koji zavisi od f i deo usled vihornih struja koji zavisi od f^2 . $P_{fe} = P_{fez} + P_{fej}$

-Postoje i dodatni magnetni gubici, P_{fev} , koji se dobijaju i na rotoru i na statoru. To su gubici usled viših harmonika u magnetnom polju (to su površinski gubici na zupcima statora i rotora okrenutih međugvoždju) i gubici zbog promene preseka zubaca (pulzacioni gubici)

III Gubici u bakru

Gubici u bakru javljaju se u namotima

-Pobudni gubici – gubici snage u bakru rotora, P_p to je snaga koja se dovodi da bi mašina radila $P_p = U_f \cdot I_f$

Ako na vratilu mašine imamo prigradenu pobudnu mašinu koja proizvodi obudnu struju I_f , tada su pobudni gubici jednaki utrošenoj snazi pobudne mašine, $P_p' = U_f \cdot I_f / n_p$, n_p -stepen iskorišćenja pobudne mašine

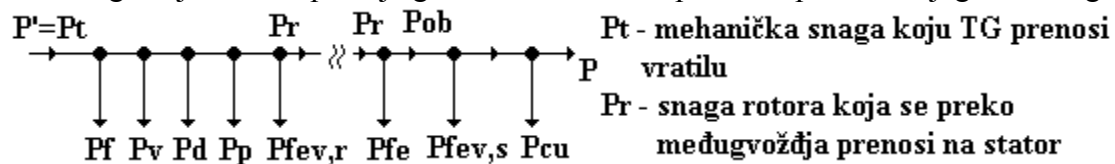
-Gubici snage u bakru statora, P_{cu}

$P_{cu} = qRI^2$ R -omska otpornost statora pri prolaskunaizmeničnih struja

Kod većih mašina mora se uzeti u obzir uticaj skin efekta. Ako je omski otpor koji namot pruža jednosmernoj struji R_j onda je $R = K_f R_j$ gde je K_f – Fildov sačinilac ($R > R_j$)

$P_{cu} = qK_f R_j I^2$

Tok snage koju turbina predaje generatoru možemo prikazati pomoću dijagrama snage



Ukupna snaga gubitaka je $P_\gamma = P_{meh} + P_p + P_{fev} + P_{fe} + P_{cu}$

Stepen iskorišćenja

Stepen iskorišćenja definišemo kao odnos korisne (izlazne) i utrošene (ulazne) snage.

$$\eta = \frac{P}{P'} = \frac{P}{P + \Sigma P_\gamma} = 1 - \frac{\Sigma P_\gamma}{P + \Sigma P_\gamma}$$

Korisnu snagu P možemo da merimo, a gubitke P_γ ili merimo ili računamo.

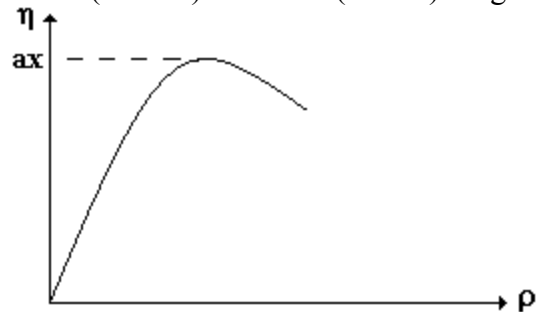
$\eta = f(\rho)$ - k -ka stepena iskorišćenja

nominalni stepen iskorišćenja je

obično nešto manji od 0.9 η_{max}

$\eta = (0.92 - 0.99)$

Kod savremenih generatora η ide do 0.99



16. Sinhronizacija – uslovi, oprema

Postupak uključanja generatora na mrežu naziva se sinhronizacija. Obavlja se automatski, poluautomatski ili ručno.

Uslovi:

I uslov je da redosled faza generatora i mreže budu isti. Ako se pogreši javljaju se velike struje. Ovaj uslov se ispunjava pri konstrukciji elektrane.

II uslov je da je EMS novog generatora jednaka po vrednosti naponu mreže ($E=U$). Koriste se dupli voltmetri i kada se kazaljke poklope naponi su jednaki.

III uslov je da EMS generatora mora biti u fazi sa naponom mreže.

IV uslov je da učestanost generatora mora biti jednaka sa učestanosti mreže

Između generatora i mreže možemo postaviti sijalice. Sijalice će se paliti i gasiti. Gasiće se u trenucima u kojima je razlika E i U jednaka nuli. Na taj nači možemo odrediti kada je $U-E=0$. Kada se postigne sinhronizacija biće 1 sijalica ugašena dok će 2 najjače da svetle .

Oprema:

Oprema za sinhronizacijuse sastoji se iz dvostrukog voltmetra dvostrukog frekvencijometra, sinhronizacionih sijalica i nultog voltmetra i sinhronoskopa.

Dvostruki voltmetar sadrži dva merna sistema, sa dve kazaljke na istoj skali. Jedan meri U , a drugi E .

Dvostruki frekvencijometar takođe sadrži, u istom kućištu, dva vibraciona sistema od kojih jedan pokazuje učestanost mreže, a drugi učestanost EMS generatora.

Na red sa sinhronizacionim sijalicame veže se nulti voltmetar. On je naročito osetljiv na male vrednosti napona, pa se prekidač uključuje kada je kazaljka voltmetra na nuli.

Sinhronoskop je aparat koji može da zameni sinhronizacione sijalice i nulti voltmetar. To je motor na čiji se namot statora dovodi napon generatora koji treba sinhronizovati, a na namot rotora napon mreže. Sinhronoskop radi na principu AM, odnosno na razlici učestanosti napona statora i rotora. Ako su učestanosti jednake rotor stoji, a time i kazaljka.

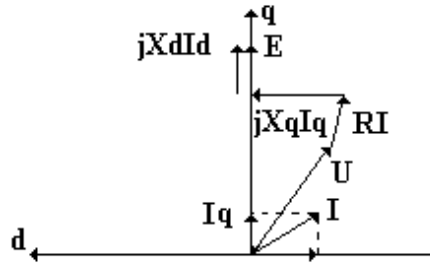
Pored ručnog načina sinhronizovanja, postoje i uređaji koji obavljaju automatsko sinhronizovanje, a to su sinhronizatori sa mikroprocesorskim uređajima.

17. Ugaone karakteristike SM

$$P = q U I \cos \varphi$$

Snagu je najpovoljnije izražavati pomoću veličina koje izražavaju paralelan rad. Ove veličine su napon mreže, EMS generatora i ugao δ između napona i EMS. Kada su napon i učestanost mreže konstantni i kada je pobuda generatora konstantna, onda snaga mašine zavisi samo od ugla δ . U tim uslovima f-ja $P=f(\delta)$ ($Q=f(\delta)$) naziva se ugaon k-ka SM.

Hidrogeneratori



Ako padove napona projektujemo na realnu osu, a zatim na imaginarnu osu dobijaju se j-ne:

$$E = U \cos \delta + RI_q + jX_d I_d$$

$$0 = -U \sin \delta - RI_d + X_q I_q$$

$$I_d = \frac{EX_q - UX_q \cos \delta - UR \sin \delta}{X_d X_q + R^2}$$

$$I_q = \frac{ER + UX_d \sin \delta - UR \cos \delta}{X_d X_q + R^2}$$

Ako zanemarimo gubitke u bloku statora: $I_d = \frac{E - U \cos \delta}{X_d}$ i $I_q = \frac{U \sin \delta}{X_q}$

$$U = U \cos \delta - jU \sin \delta \quad I = I_q - jI_d \quad S = qUI^* = P + jQ$$

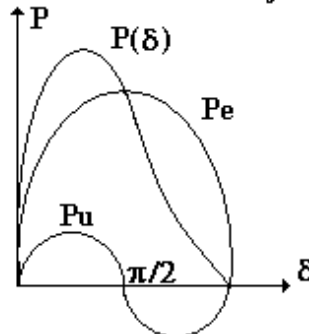
$$P = q \left[\frac{EU}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right] = P(\delta)$$

$$Q = q \left[\frac{EU}{X_d} \cos \delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \right] = Q(\delta)$$

$$P(\delta) = P_e + P_u \quad P_e - \text{osnovna komponenta aktivne snage}$$

$$P_e = \frac{qEU}{X_d} \sin \delta \quad P_u - \text{reluktantna komponenta snage}$$

P_u je mnogo manje od P_e (do 20% ukupne snage kod velikih SM)



$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{P_e}{\Omega} + \frac{P_u}{\Omega}$$

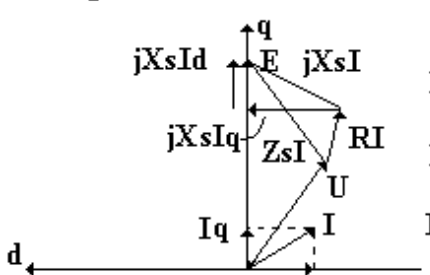
Pri opterećenju generatora na rotor deluje kočioni momenat elektromagnetnih sila koji je jednak količniku snage obrtnog polja i mehaničke brzine obrtanja rotora.

za $\delta \in [-\pi, 0]$ $M < 0 \Rightarrow$ mašina radi kao motor

često se ove veličine izražavaju relativnim jedinicama:

$$p = \frac{P}{S_n} = \frac{EU}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

Turbogeneratori



$$E = U \cos \delta + RI_q + X_s I_d$$

$$0 = -U \sin \delta - RI_d + X_s I_q$$

$$I_d = \frac{(E - U \cos \delta) X_s - UR \sin \delta}{Z_s^2}$$

$$I_q = \frac{(E - U \cos \delta) R + UX_s \sin \delta}{Z_s^2}$$

$$P = \frac{qU}{Z_s} [E \sin(\delta + \epsilon) - U \sin \epsilon]$$

$$Q = \frac{qU}{Z_s} [E \cos(\delta + \epsilon) - U \cos \epsilon]$$

$$Z_s = R + X_s$$

$$Z_s - \text{sinh. reaktansa}$$

$$U = U \cos \delta - jU \sin \delta$$

$$I = I_q - jI_d$$

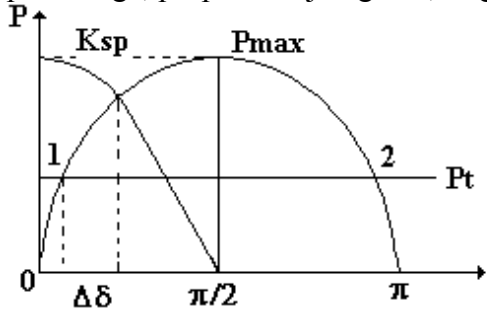
$$S = qUI^* = P + jQ$$

$$\sin \epsilon = \frac{R}{Z_s} \quad \cos \epsilon = \frac{X_s}{Z_s}$$

Ponekad se desi da generator radi sam na mreži ili radi paralelno sa slabom mrežom tada se mora uvažiti omska otpornost ($\epsilon=0$)

18. Statička stabilnost. Sinhronizaciona snaga i sačinilac sinhronizacione snage

Iz ugaonih k-ka se vidi da se teorijski maksimalna snaga generatora ima za ugao $\delta=90^\circ$. Praktično je $\delta<90^\circ$ i ono kod HG zavisi od dopunske komponente snage, kod TG od odnosa omskog i induktivnog pada napona. Do max snage generator radi stabilno, a preko toga, pri povećanju ugla δ , snaga se smanjuje i mašina ispada iz sinhronizma.



Posmatramo TG koji radi priključen na krutu mrežu i ima const pobudu. Njegova snaga se može menjati samo promenom ugla δ . Max snaga se ima za $\delta=\frac{\pi}{2}$. Snaga pogonske mašine P_t ne zavisi od ugla δ . Radna tačka mašine se nalazi u preseku ove dve k-ke. Postavlja se pitanje da li mašina može da radi u obe presečne tačke i to je problem statičke ravnoteže.

Posmatrajmo r.t.1: Ako se na bilo koji način rotor generatora ubrza, ugao δ se poveća za neko $+\Delta\delta$ što izaziva promenu snage generatora za ΔP . Ispada da je otporni moment veći od onog koji se ulaže na turbini ($P+\Delta P>P_t$) i dolazi do kočenja rotora. Ako se pak smanji δ za neku malu vrednost javlja se da je uloženi moment veći od otpornog, pa se rotor ubrzava. U oba slučaja se sinhroni generator vraća u ravnotežno stanje, nakon promene δ . Imamo da je za pozitivnu promenu δ , pozitivna i promena P . Isto tako je za negativnu promenu δ , negativna i promena P . Pošto se u ovim slučajevima rad generatora vraća u ravnotežno stanje, ovo možemo smatrati za uslov stabilnosti rada SM: $\Delta P/\Delta\delta>0$

Posmatrajmo r.t.2: Ako dođe do pozitivne promene δ , generator daje manju snagu od snage na turbini, razliku ovih snaga prima rotor pa se dodatno ubrzava $\Rightarrow \delta$ raste i generator ispad iz sinhronizma. Imamo $\Delta P/\Delta\delta<0$ – kriterijum nestabilnosti rada
Statički stabilan rad SM sa valjkastim rotorom je za $\delta<90^\circ$, za $\delta=90^\circ$ ima se max snaga $P_{max}=qEu/X_s$

Definišemo sačinilas statičke preopterećenosti mašine kao odnos max i nominalne snage $V=P_{max}/P_n$

Ukoliko imamo veće V , imamo veću rezervu za statički režim rada. V je proporcionalno odnosu KS.

Hidrogenerator je statički stabilniji od turbogeneratora.

Pri promeni δ za $\Delta\delta$ menja se snaga za ΔP . Ako je reč o oblasti stabilnog rada ovaj iznos snage omogućava da se mašina vrati u prethodni režim (sinhronizam). Što je ΔP veće, mašina se brže vraća uravnotežnu tačku. ΔP je sinhronizaciona snaga, njen iznos direktno utiče na brzinu vraćanja mašine u sinhronizam: $\Delta P=dP \Delta\delta/d\delta$

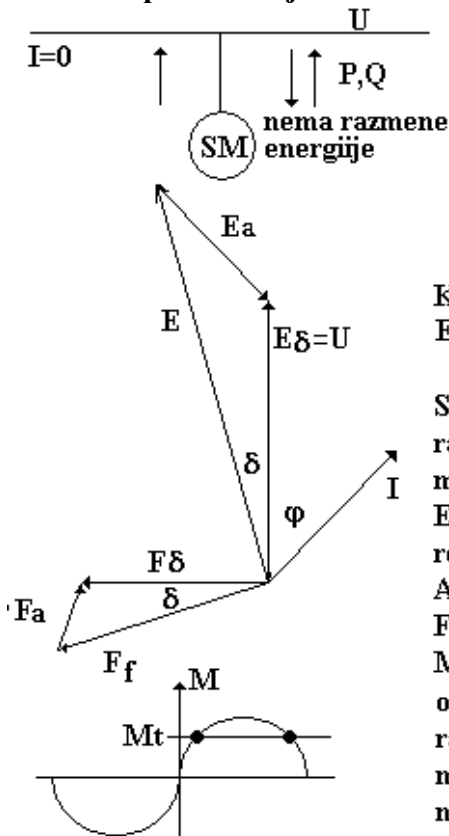
$dP/d\delta = K_{sp}$ – sačinilac sinhronizacione snage. On predstavlja nagib k-ke $P(\delta)$ u ravnotežnoj tački. On pokazuje koliko će za jedno odstupanje $\Delta\delta$ iznositi promena ΔP .

Kod TG je: $K_{sp} = dP/d\delta = qUE\cos\delta/X_s >0$

Kod HG je: $K_{sp} = dP/d\delta = qUE\cos\delta/X_d + qU^2(1/X_q - 1/X_d)\cos 2\delta$

Sinhronizacionoj snazi ΔP , odgovara sinhronizacioni moment ΔM koji deluje na rotorgeneratora. Sačinilac sinhronizacionog momenta je: $K_{sm} = K_{sp}/\Omega$.

19. Način podešavanja aktivnih i reaktivnih snagaposle sinhronizacije na mrežu



Posmatramo mašinu koja je nakon sinhronizacije priključena na mrežu. Tada nema razmene energije između mašine i mreže. Pretstavimo da smo mašinu opteretili i da takvom opterećenju odgovara vektorski dijagram sa slike. $E_{\delta} = U$ jer je $R=0, X_{\gamma}=0$
 $F_{\delta} = F_f + F_a$

Kada je mašina vezana na mrežu napon je const.

$E_{\delta} = \text{const.}, \Phi_{\delta} F_{\delta} = \text{const}$

- fluks u međugvoždju

Sinhrona mašina koja je vezana na stalni napon pri raznim opterećenjima ima konstantan fluks u međugvoždju (bez obzira na opterećenje).

Elektromagnetni moment koji deluje između statora i rotora: $M = K\Phi_{\delta}F_f \sin\delta$

Ako ne menjamo pobudnu struju imamo da je i

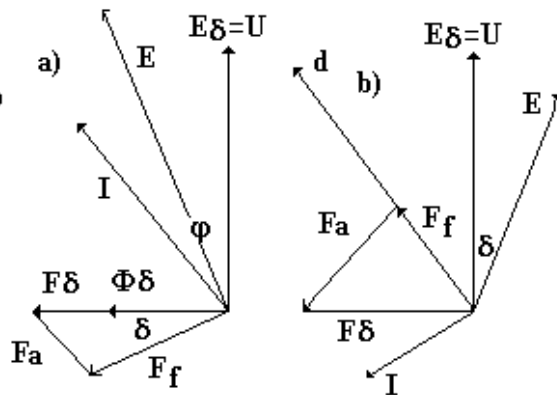
$F_f = \text{const}$ pa moment možemo prikazati kao $M = K I \sin\delta$

M_t - moment turbine ne zavisi od ugla δ , zavisi samo od promene radnog fluida. U preseku k-ka M i M_t je radna tačka režima mašine. Pri promeni opterećenja, može se menjati samo ugao δ . On može biti pozitivan i negativan.

Slučaj kada nema razmene energije $\delta=0$

a) Ako hoćemo da SM na neki način ubrzamo rotor, Φ_{δ} mora biti konstantan. To je generatorski režim rada.

b) Ako rotor SM kočimo, tada ona u stvari uzima struju iz mreže i ovo je motorni režim rada.



Mehanički moment kojim delujemo na rotor srazmeran je P . Ovo je dokaz da mehaničkim delovanje na rotor mašine mi menjamo aktivnu snagu koju mašina razmenjuje sa mrežom. Kod motornog režima moment ima negativan znak pa i P ima negativan znak, što znači da mašina uzima energiju iz mreže.

Reaktivna snaga: $F_f \cos\delta + F_a \sin\phi = F_{\delta}$

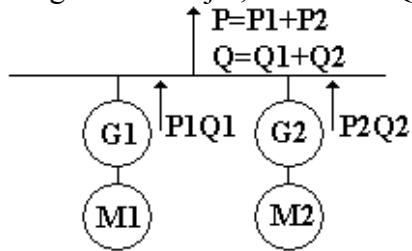
F_a je srazmerno struji I pa je $F_a \sin\phi$ srazmerno reaktivnoj snazi koja se razmenjuje sa mrežom. Promenom pobudne struje može se menjati reaktivna snaga, ali pritom F_{δ} ostane const. Q se može menjati i promenom δ , ali se tada menja i P .

Zaključak: Reaktivnu snagu kod SM podešavamo promenom pobudne struje. Aktivnu snagu kod SM podešavamo promenom radnog fluida.

Za već podešenu aktivnu snagu se vrši regulacija reaktivne snage. δ zavisi samo od aktivne snage, odnosno od mehaničkog momenta koji se dovodi turbini.

20. Preraspodela aktivne i reaktivne snage između dva sinhrona generatora

Ako dva generatora rade paralelno na mreži, može se raspodeljivati aktivna i reaktivna snaga između njih, tako da P i Q ostanu nepromenjene na sabirnicama.



P menjamo promenom snage turbine, promenom dotoka radnog fluida

Q menjamo promenom pobudne struje

K -ke brzine zavisnosti od P su prikazane za pogonske motore generatora $G1$ i $G2$ ($M1$ i $M2$). Generator $G1$ daje snagu $P1$, a $G2$ daje snagu $P2$. Ako povećamo dotok u pogonski motor $M2$ prelazi se na njegovu k -ku $M2'$. Ukupna snaga koja je srazmerna sa dužinom AB ostaje isti tako da $G1$ daje snagu $P1'$, a $G2$ daje

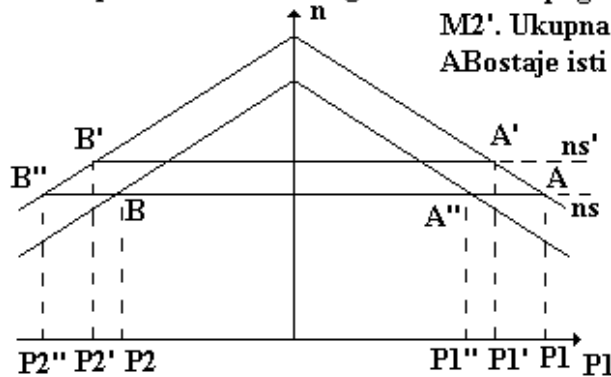
snagu $P2'$. Brzina oba generatora je sada veća, a time i učestanost mreže.

Učestanost mreže mora biti stalna pa se smanji dotok radnog fluida pogonskom motoru $M1$, pa se prelazi na k -ku $M1'$.

Generator $G1$ daje snagu $P1''$, a $G2$ daje snagu $P2''$. ukupna snaga je ista samo je izvršena preraspodela snaga između

generatora.

Preraspodela Aktivne snage



Zaključak: Ako se pri istom opterećenju želi promeniti raspodela snaga između generatora, dovodi se više radnog fluida onom pogonskom motoru koji želimo više opteretiti, a istovremeno se za isti iznos smajuje dovod radnog fluida drugom pogonskom motoru. Na ovaj način je moguće celu snagu preneti na $G1$ ili $G2$.

Preraspodela reaktivne snage

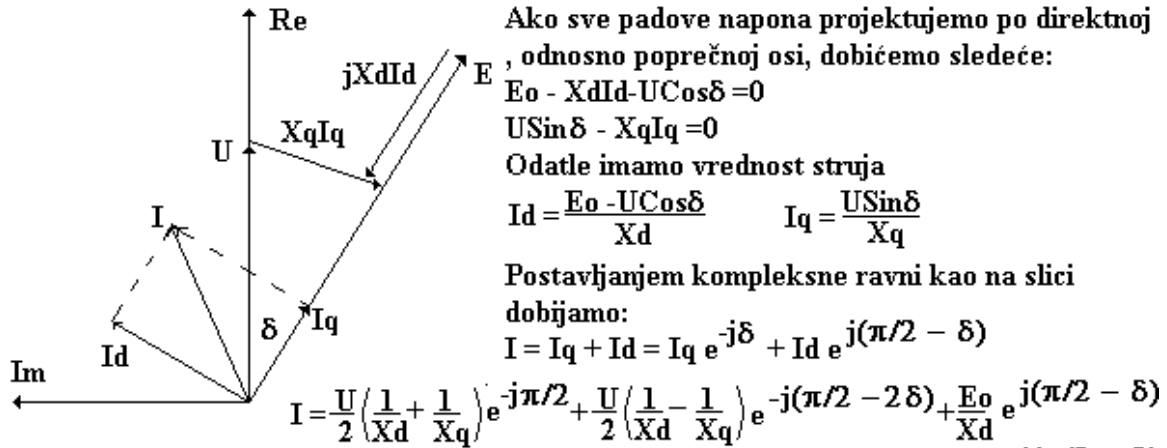
Polazimo od toga da generatori rade paralelno i da dele i aktivno i reaktivno opterećenje. Napon oba generatora pa i mreže je U . Svaki generator daje po struju I_g pa je struja mreže $I_m = 2I_g$. EMS svakog generatora je E , a pad napona u svakom generatoru je $jx_s I_g$. Povećanjem pobude $G2$ njegova E_{ms} postaje $E2$. Istovremeno bi porastao i napon mreže. Da se to ne bi desilo smajujemo pobudu $G1$, pa njgova EMS postaje $E1$. Aktivna snaga ostaje nepromenjena jer se dalje menja dotok radnog fluida. Ali promenila se preraspodela reaktivne snage, pa $G2$ sada daje veću reaktivnu snagu. $G1$ sada ne daje reaktivnu snagu. Struja generatora $G2$ je još reaktivnija, a struja $G1$ je u fazi sa naponom. Njihov zbir ostaje jednak struji mreže.

Za rad više generatora smatramo da je njihov napon jednak naponu mreže i da se vrši raspodela aktivne i reaktivne snage između svakog generatora i mreže.

21. Kružni dijagram struja SM

Pri nekom stalnom opterećenju mašine struja je konstantna. Stalna je i pobudna struja, pa je stalan i vektorski dijagram struja. Kada se promeni opterećenje menja se struja I i po vrednosti i po faznom stavu u odnosu na U . Ako je stalna pobuda EMS konstantna, pa ako je stalan napon, onada se menjaju padovi napona, pa se menja i ugao δ . To znači da se pri promeni opterećenja I i ugla δ vrh vektora struje menja se po nekoj krivoj linija koju nazivamo dijagram struja.

Motor sa istaknutim polovima



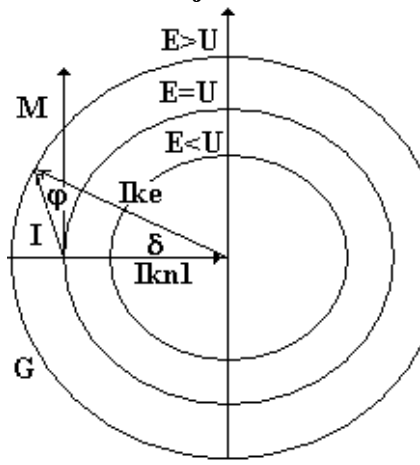
$I = I_{kn1} + I_{kn2} + I_{ke}$ $I_{kn1} = I_{kn1} e^{-j\pi/2}$ $I_{kn2} = I_{kn2} e^{-j(\pi/2 - 2\delta)}$ $I_{ke} = I_{ke} e^{j(\pi/2 - \delta)}$

I_{kn1} – struja KS kada bi na namot statora čija je ekv. impedansa $2X_q X_d / (X_d + X_q)$ delovao napon U

I_{kn2} – struja KS kada bi na namot statora čija je ekv. impedansa $2X_q X_d / (X_d - X_q)$ delovao napon U

I_{ke} – Struja KS u namotima statora čija je reaktansa X_d , usled delovanja E_0 .

Mašina sa valjkastim rotorom



$$X_d = X_q = X_s \Rightarrow I_{kn2} = 0$$

$$I = \frac{U}{X} e^{-j\pi/2} + \frac{E_0}{X} e^{j(\pi/2 - \delta)}$$

Ako je mašina nadpobuđena onda je E_0 veliko, pa samim tim i struja I_{ke} , tako da ukupna struja prednjači naponu. Pošto je vrednost struje I_{kn1} konstantna znači ugao δ može da se menja od 0 do 2π . Prema tome, pri stalnoj pobudi vrh vektora I_{ke} vrteće se po krugu čiji je centar u vrhu vektora I_{kn1} , a radijus E_0/X_s . To znači da će se za razne uglove δ struja kretati po istom krugu. Svakoј vrednosti EMS odgovara jedan krug.

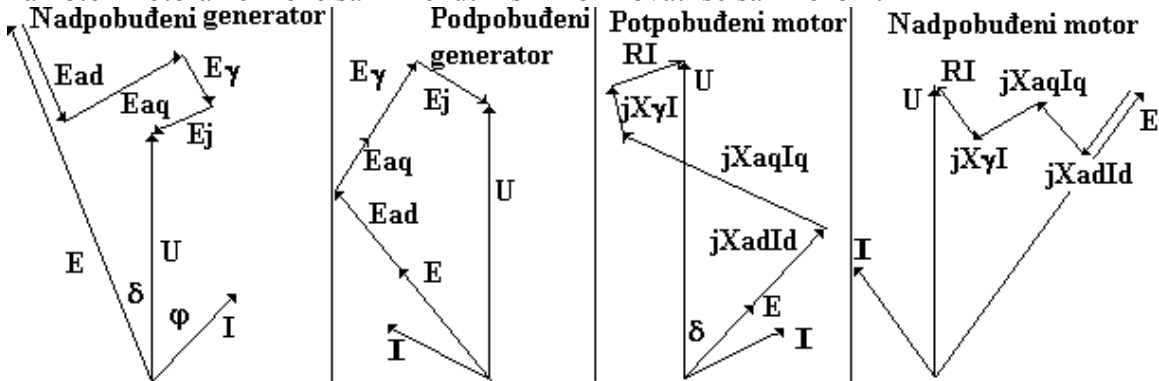
23. Sinhroni motor. Način rada. Vektorski dijagram napona.

Sinhronne mašine su reverzibilne. One mogu raditi kao generator, motor i kao generator reaktivne energije, sinhroni kompenzator. Sinhroni kompenzatori ne vrše pretvaranje energije, već imaju ulogu izvora ili potrošača reaktivne snage. SM najviše rade kao generatori. SM se unapred određuje uloga.

Sinhroni motori se uglavnom prave za veće snage i upotrebljavaju se u pogonima gde se zahteva konstantna brzina. Prednost u odnosu na asinhronne motore je što mogu da rade za $\cos\phi=1$, pa čak i da daju reaktivnu snagu mreži, ali to je potrebno u slučaju kada su predviđeni da popravljaju sačinilac snage neke lokalne mreže, moraju i konstruktivno biti izvedeni za to. Rotor mora imati veći MPS i namot statora mora biti za veću struju, pa je cena takvog motora veća. U konstruktivnom delu sinhroni motori se grade sa istakutim polovima.

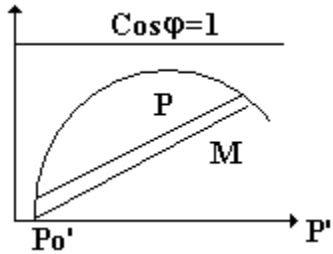
Kada SM radi u generatorskoj ulozi, rotor se obrće konstantnom brzinom i sa sobom nosi svoje pobudno polje. Stator stvara obrtno polje koje se takođe obrće sinhronom brzinom. Ose polja rotora i statora su malo pomerene, odnosno osa statora zaostaje za ugao δ za osom rotora. Pri smanjenju opterećenja smanjuje se i ugao δ . Ako odvojimo vratilo pogonskog motora od vratila rotora SM, rotor SM nastavlja da se obrće pa SM nastavlja da radi kao motor u praznom hodu, a ugao snage je $\delta=0$. Ako opteretimo rotor, SM nastavlja da radi kao motor pri opterećenju, a osa polja rotora zaostaje za osom rotora polja statora za ugao δ . Sada je utrošena snaga električna i dobija se iz mreže, a korisna snaga je mehanička i ona se preko rotora daje radnoj mašini.

Problem kod sinhronih motora je puštanje u rad. Motor sa namotom statora i pobudnim namotom rotora ne može sam krenuti i sinhronizovati se sa mrežom.



Napon mreže U na koji je priključen motor, troši se na savladavanje visokog otpora i induktivnog otpora usled rasipanja i otpora usled reakcije po uzdužnoj i poprečnoj osi, a ostatak je jednak kontra EMS kod potpobuđenog motora. Reaktivna komponenta struje zaostaje za naponom, pa motor uzima iz mreže tu struju i njoj odgovarajuću reaktivnu snagu. Kod nadpobuđenog motora EMS E je veća od napona, a struja prednjači naponu, te njena reaktivna komponenta takođe prednjači naponu. Motor iz mreže uzima kapacitivnu struju i daje mreži reaktivnu snagu.

24. Karakteristike sinhronih motora

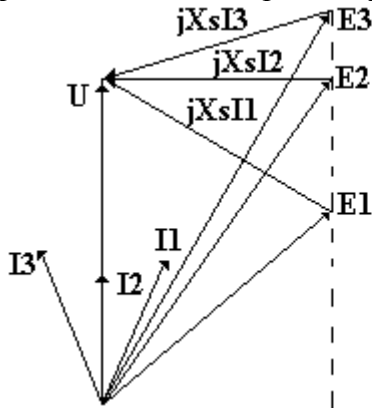


Bitna je k-ka stepena iskorišćenja
Za određivanje k-ke stepena iskorišćenja obično se podešava da sinhroni motor radi pri $\text{Cos}\phi=1$

P' - električna snaga

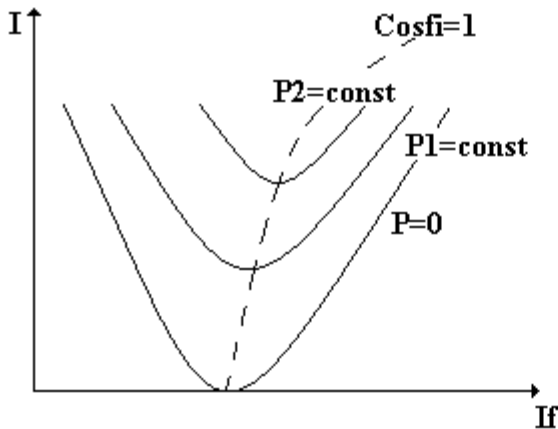
Za sinhronne motore može se dobiti još jedna vrsta k-ka:

To su Mordejeve krive, koje pokazuju kako se menja struja statora u f-ji pobudne struje pri nekom stalnom opterećenju: $I=f(I_f)$, $P=\text{const}$, $U=U_n$, $n=n_n$



Neka je pobudna struja mala i EMS motora je E_1 . Pad napona je $jX_s I$. Kako je EMS znatno manja od napona, pa je za megnćenje magnetnog kola potrebna još reaktivna struja $I_1 \sin \phi_1$ i njoj odgovarajuća reaktivna snaga. Za takvo stanje kaže se da je motor podpobuđen. Ako se sada poveća pobudna struja, poveća se i EMS i neka je njena vrednost sada E_2 . Snaga ostaje stabilna, a pošto je napon stalan, onda ostaje i aktivna komponenta struje stalna. Vektor struje menja stav i onda je struja čisto aktivna $\cos \phi_2=1$

Sinhroni motor ima takvu pobudu da ona sama magneti magnetno kolo te nije potrebna reaktivna snaga, niti reaktivna snaga iz mreže. Ako se pobudna struja i dalje povećava, poraste i EMS na vrednost E_3 . Aktivna snaga je ista i vektor struje dolazi u položaj I_3 . Njena aktivna komponenta je opet ista, a reaktivna komponenta je promenila smer. To znači da motor daje reaktivnu snagu mreži. Motor predstavlja za mrežu kapacitivno opterećenje i kaže se da je nadpobuđen.



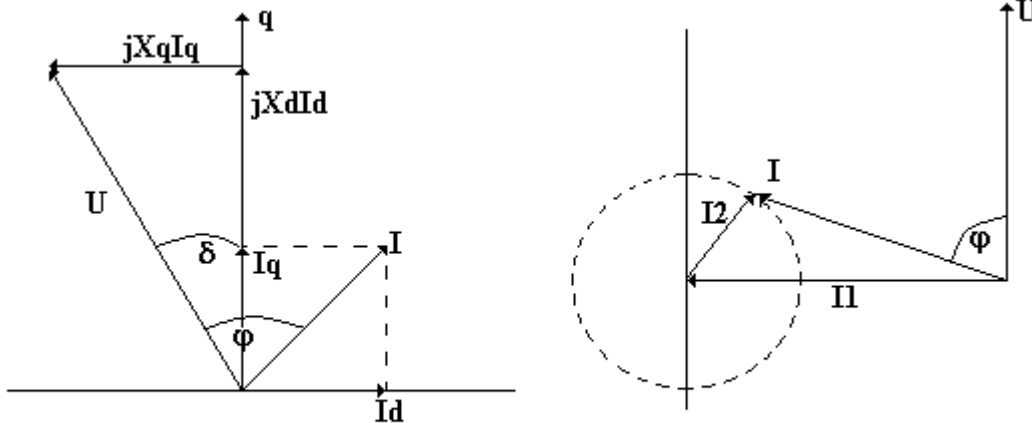
Pobudnu struju za koju se pri jednom stalnom opterećenju ima najmanja struja statora nazivamo optimalnom strujom. Tada su gubici u bakru statora najmanji. Ako se na dijagramu spoje tačke najmanjih strujaza razna opterećenja onda se dobija k-ka regulacije: $I_f=f(I)$ pri $\cos \phi=1$

25 reluktantni sinhroni motor; način rada; vektorski i kružni dijagram

Sinhrona mašina sa istaknutim polovima može da razvija dopunsku komponentu snage i u slučaju kada njen rotor nije pobuđen. Na toj činjenici se zasniva rad malih sinhronih mašina koje se nazivaju reakcione. Reakciona mašina može da radi i kao generator i kao motor. U praksi se prave reakcioni motori malih snaga, Reakcioni motor se pušta u rad kao asihroni. Pri puštanju u rad indukuju se vihorne struje u masivnim polovima rotora, na koje deluju elektromagnetne sile. Ulazak u sinhronizam obezbeđuje **Reluktantni Moment**

$$M_r = \frac{q}{2\Omega} U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

koji potiče usled obrtnog polja statora, koji teži da održi rotor u sinhronizmu, a to znači u onom položaju pri kome je magnetni otpor obrtnom fluksu najmanji. Pri opterećenju osa rotora zaostaje iza ose obrtnog polja za ugao δ .



$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) e^{j\pi/2} + \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) e^{j(2\delta - \pi/2)}$$