



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
F A K U L T E T  
ELEKTROTEHNIKE  
I RAČUNARSTVA  
Z A V O D Z A  
ELEKTROSTROJARSTVO  
I AUTOMATIZACIJU

# **ELEKTROMEHANIČKE I ELEKTRIČNE PRETVORBE ENERGIJE**

*Zadaci za vježbu:*

***SINKRONI STROJEVI***

**Autori:**

**Prof. dr. sc. Zlatko Maljković**

**Stjepan Stipetić, dipl. ing.**

**Zagreb, rujan 2008.**

**SADRŽAJ**

1. PROTJECANJE, INDUCIRANI NAPON.....	3
2. FAZORSKI DIJAGRAM.....	9
3. RAZVIJENA SNAGA I MOMENT .....	20
4. POGONSKI DIJAGRAM .....	26

# 1. PROTJECANJE, INDUCIRANI NAPON

- 1.1. Kolika mora biti amplituda sinusno raspoređenog protjecanja jednoga od faznih namota trofaznog 6-polnog stroja ako treba postići okretno polje indukcije u rasporu amplitude 0,9 T, a zračni je raspor 10 mm? Kolika je brzina vrtnje okretnog protjecanja ako je frekvencija faznih struja 50 Hz?

$$2p = 6$$

$$B_m = 0,9 \text{ T}$$

$$\delta = 10 \text{ mm}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Rješenje:

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = \boxed{1000 \text{ o/min}}$$

$$R'_{m\delta} = \frac{1}{\Lambda_{\delta}} = \frac{\delta}{\mu_0} = \frac{\delta}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \doteq 800 \cdot 10^3 \cdot \delta$$

$$\Theta_{\delta} = B_{\delta} \cdot R'_{m\delta} \doteq 800 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot B_{\delta}$$

Za magnetsku indukciju od 1 T u zračnom rasporu potrebno za svaki milimetar zračnog raspora po 800 A uzbudnog protjecanja.

$$\Theta_{\delta} \doteq 800 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 = 7200 \text{ A (amperzavoja)}$$

Okretno protjecanje  $\Theta_{\delta}$ , stvoreno pulzirajućim protjecanjima triju faznih namota ima 3/2 veću amplitudu od protjecanja faznog namota  $\Theta_{lf}$ .

Dakle:

$$\Theta_{lf} = \frac{2}{3} \Theta_{\delta} = \frac{2}{3} \cdot 7200 = \boxed{4800 \text{ A}}$$

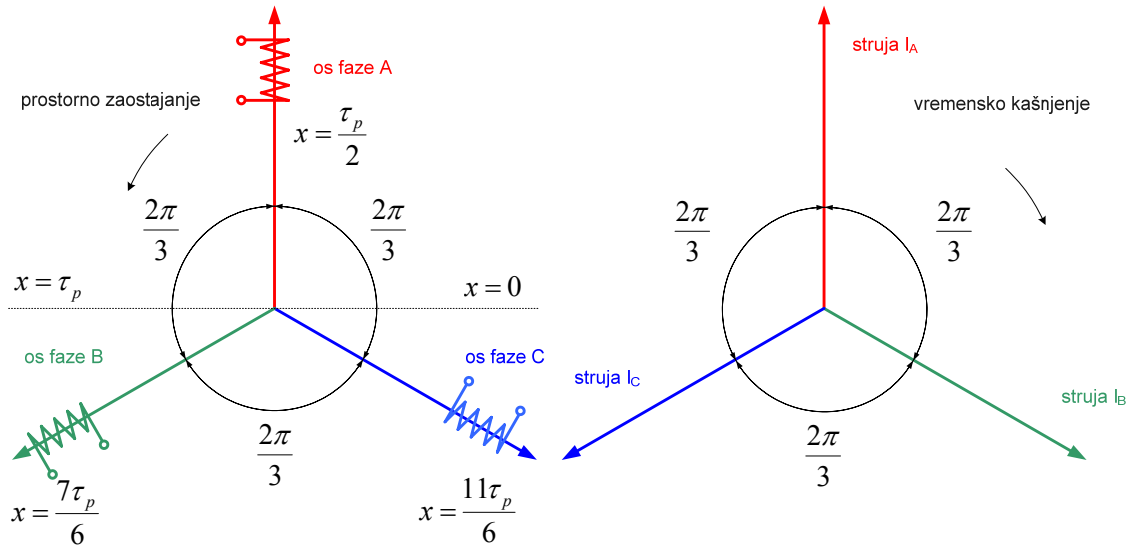
Protjecanje stvaraju amperzavoji. Isti učinak primjerice daje 1000 zavoja kojima teče struja jakosti 1 A, ili 100 zavoja kojima teče struja jakosti 10 A. ( $\Theta = NI$ ).

- 1.2. Kolika mora biti amplituda sinusno raspoređenog protjecanja jednoga od faznih namota trofaznog 10-polnog stroja ako treba postići okretno polje indukcije u rasporu amplitude 1,2 T, a zračni je raspor 5 mm? Kolika je brzina vrtnje okretnog protjecanja ako je frekvencija faznih struja 60 Hz?

$$\boxed{n = 720 \text{ o/min}}$$

$$\boxed{\Theta_{lf} = 3200 \text{ A}}$$

- 1.3. Za nacrtani raspored trofaznog namota i fazore struja treba nacrtati vektore komponenata direktnog i inverznog protjecanja za trenutak kad je struja faze C maksimalna.



Sl. 1-1 Raspored trofaznog namota i fazora struja i prostoru i vremenu

Rješenje:

Ako namotima A, B, C, prostorno pomaknutima za  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ), teku izmjenične struje, vremenski pomaknute za  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ). Kažemo da faza B prostorno zaostaje za fazom A, a struja  $i_B$  vremenski kasni za strujom  $i_A$ . U svakom se namotu stvaraju pulsirajuća protjecanja:

$$\Theta_{x,tA} = \Theta_{1A} \cos \omega t \sin \frac{\pi}{\tau_p} x$$

$$\Theta_{x,tB} = \Theta_{1B} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\Theta_{x,tC} = \Theta_{1C} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \frac{4\pi}{3}\right)$$

koja se mogu rastaviti na dva okretna, direktno i inverzno.

$$\left. \begin{aligned} \Theta_{x,tA} &= \frac{1}{2} \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t\right) + \frac{1}{2} \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x + \omega t\right) \\ \Theta_{x,tB} &= \frac{1}{2} \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t\right) + \frac{1}{2} \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x + \omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \Theta_{x,tC} &= \frac{1}{2} \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t\right) + \frac{1}{2} \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x + \omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} +$$

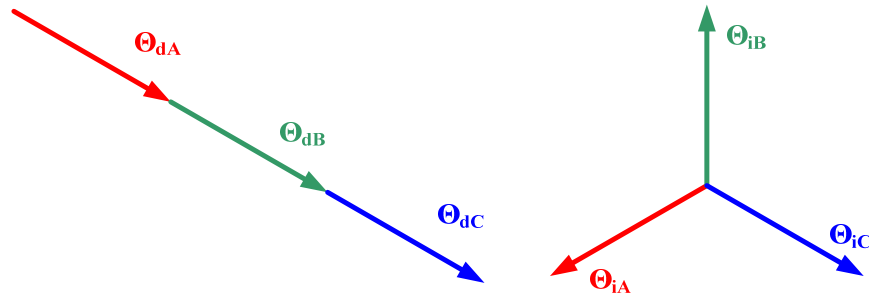
$$\sum \Theta_{x,tABC} = \Theta_d + \Theta_i = \frac{3}{2} \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t\right) + 0$$

Ukupno protjecanje je okretno i sastavljeno od 3 direktna protjecanja svake faze, koja su u svakom trenutku na istom položaju u prostoru, dok inverzno iščezava.

Direktna protjecanja rotiraju ulijevo, u pozitivnom, direktnom smjeru, a inverzna udesno, u negativnom, inverznom smjeru. Struja faze C je maksimalna u trenutku  $\omega t = 4\pi/3$ .

Vrijedi da ukupno direktno protjecanje prostorno gleda u smjeru upravo one faze u kojoj struja ima maksimalnu vrijednost, dakle u ovom slučaju, u smjeru faze C.

Položaji vektora direktnog i inverznog protjecanja svake faze posebno prikazani su na sljedećoj slici.



Sl. 1-2 Rješenje zadatka, položaj direktnih i inverznih komponenti vektora protjecanja

To se može pokazati matematički:

os faze A postavljena je prostorno u smjeru  $x = \frac{\tau_p}{2}$

pulsirajuće protjecanje faze A u trenutku  $\omega t = \frac{4\pi}{3}$  iznosi:

$$\Theta_{x,tA} = \Theta_1 \cos \frac{4\pi}{3} \sin \frac{\pi}{\tau_p} \frac{\tau_p}{2} = -0,5\Theta_1$$

os faze B postavljena je prostorno u smjeru  $x = \frac{7\tau_p}{6}$

pulsirajuće protjecanje faze B u trenutku  $\omega t = \frac{4\pi}{3}$  iznosi:

$$\Theta_{x,tB} = \Theta_1 \cos \left( \frac{4\pi}{3} - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \left( \frac{\pi}{\tau_p} \frac{7\tau_p}{6} - \frac{2\pi}{3} \right) = \Theta_1 \cos \left( \frac{2\pi}{3} \right) \sin \left( \frac{\pi}{2} \right) = -0,5\Theta_1$$

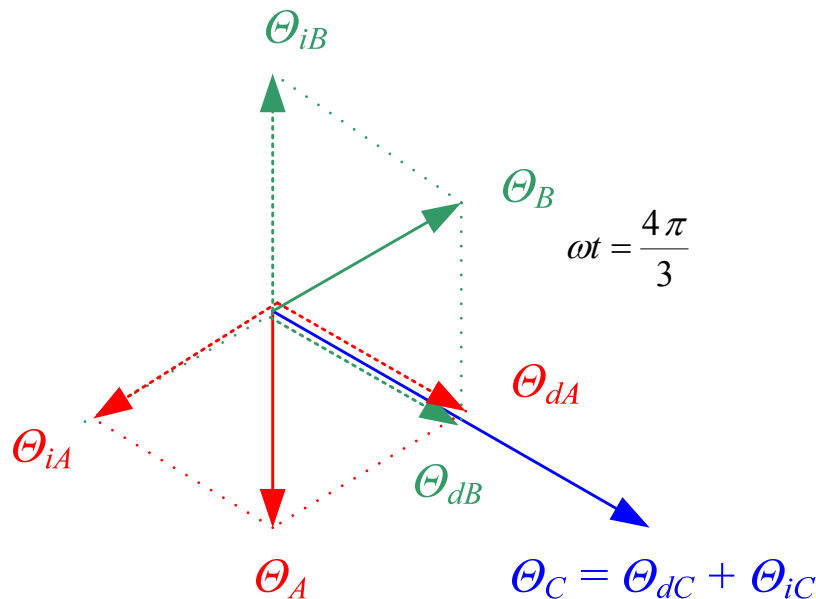
os faze C postavljena je prostorno u smjeru  $x = \frac{11\tau_p}{6}$

pulsirajuće protjecanje faze C u trenutku  $\omega t = \frac{4\pi}{3}$  iznosi:

$$\Theta_{x,tC} = \Theta_1 \cos \left( \frac{4\pi}{3} - \frac{4\pi}{3} \right) \sin \left( \frac{\pi}{\tau_p} \frac{11\tau_p}{6} - \frac{4\pi}{3} \right) = \Theta_1 \cos(0) \sin \left( \frac{\pi}{2} \right) = \Theta_1$$

Tako dobivamo stanje prikazano na sljedećoj slici. Iz njega se razabire smjer resultantnog okretnog protjecanja. A svako pulsirajuće protjecanje može se rastaviti na dva okretna.

Primjerice, struja u fazi C stvara direktno i inverzno protjecanje koja gledaju u istom smjeru, struja u fazi B stvara direktno koje gleda u smjeru faze C, a inverzno u smjeru faze A.



Sl. 1-3 Položaj pulsirajućih protjecanja u zadanom trenutku

Isti dokaz moguće je sprovesti razlažući posebno inverzna i direktna protjecanja.

Sva 3 direktna protjecanja imaju konstantnu amplitudu  $\frac{\Theta_1}{2}$ , a gibaju se u prostoru istom brzinom gledajući uvijek u istom smjeru.

U trenutku  $\omega t = 4\pi/3$  to je:

$$\frac{\pi}{\tau_p} x - \frac{4\pi}{3} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow x = \frac{11\tau_p}{6}, \text{ što je smjer osi faze C u prostoru.}$$

Sva 3 inverzna protjecanja imaju konstantnu amplitudu  $\frac{\Theta_1}{2}$ , a gibaju se u prostoru istom brzinom zadržavajući prostorni razmak od  $4\pi/3$ .

Za fazu A, u trenutku  $\omega t = 4\pi/3$ :

$$\frac{\pi}{\tau_p} x + \frac{4\pi}{3} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow x = -\frac{5\tau_p}{6} = \frac{7\tau_p}{6}, \text{ što je smjer osi faze B u prostoru.}$$

Za fazu B, u trenutku  $\omega t = 4\pi/3$ :

$$\frac{\pi}{\tau_p} x + \frac{4\pi}{3} - \frac{4\pi}{3} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow x = \frac{\tau_p}{2}, \text{ što je smjer osi faze A u prostoru.}$$

Za fazu C, u trenutku  $\omega t = 4\pi/3$ :

$$\frac{\pi}{\tau_p} x + \frac{4\pi}{3} - \frac{2\pi}{3} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow x = \frac{11\tau_p}{6}, \text{ što je smjer osi faze C u prostoru.}$$

Ako se znade ponašanje direktnog i inverznog protjecanja, zadatak se rješava praktički jednim potezom, crtajući dijagram. Međutim zbog kompleksne prirode pojma okretnog polja sproveden je i egzaktn matematički dokaz koristeći i pulsirajuće i okretna protjecanja.

- 1.4. Koliki se napon inducira u vodiču na obodu stroja promjera 1 m i dužine željeza 1 m, uz amplitudu indukcije u rasporu 1 T, i brzinu vrtnje 100 o/min?

$$D = 1 \text{ m}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$B = 1, \text{ T}$$

$$n = 100 \text{ o/min}$$

Rješenje:

$$E = B \cdot l \cdot v$$

$$v = \omega \cdot \frac{D}{2} = \frac{n \cdot \pi}{30} \cdot \frac{D}{2} = 5,24 \text{ m/s}$$

$$E_m = B \cdot l \cdot v = \boxed{5,24 \text{ V}}$$

$$E_{ef} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \boxed{3,7 \text{ V}}$$

- 1.5. Amplituda sinusno raspoređenog pulsirajućeg protjecanja jedne faze 3-faznog namota statora kad u njoj teče nazivna struja iznosi 250 A. Ako u sve 3 faze teku struje trofaznog sistema iznosa nazivne struje, kolika će biti amplituda okretnog protjecanja koje stvaraju?

$$\Theta_{rez} = 375 \text{ A}$$

- 1.6. Kolika je kutna brzina, a kolika brzina vrtnje (o/min) okretnog protjecanja 3-faznog 6-polnog namota napajanog iz mreže 50 Hz?

$$n = 1000 \text{ o/min}$$

$$\omega_m 104,72 \text{ rad/s}$$

- 1.7. Kolika je brzina vrtnje, a kolika kutna brzina okretnog polja 2-faznog 4-polnog stroja napajanog iz mreže 50 Hz?

$$n = 1500 \text{ o/min}$$

$$\omega_m 157,08 \text{ rad/s}$$

- 1.8. Amplituda sinusno raspoređenog pulsirajućeg protjecanja jedne faze 2-faznog namota statora iznosi 150 A. Ako u oba fazna namota teku 2-fazne struje isto tolikog iznosa, kakovo protjecanje rezultira, i kolika mu je amplituda.

$$\Theta_{rez} = 150 \text{ A}$$

- 1.9. U simetričnom 3-faznom namotu teku 3-fazne struje fazno razmaknute za  $120^\circ$ , ali je zbog nesimetrije napona mreže struja u jednoj fazi za 20% veća. Ako se amplituda protjecanja jedne faze s manjom strujom označi sa 100%, koliko je direktno i inverzno protjecanje čitavog sistema?

$$\Theta_d = 160 \%$$

$$\Theta_i = 10 \%$$

- 1.10. Ako označimo obod 6-polnog 3-faznog statora geometrijskim stupnjevima počev od osi faze 1, gdje će se nalaziti amplituda 3-faznog okretnog protjecanja u času kad je struja faze 1: a) maksimalna, b) nula, c) minimalna?

$$\text{a) } 0^\circ, \text{ b) } 30^\circ, \text{ c) } 60^\circ$$

- 1.11. Trofazni namot na statoru provrta 40 cm uzbuđen strujama frekvencije 50 Hz stvara okretno polje. Koliki put prevali amplituda okretnog protjecanja u rasporu kroz vrijeme potrebno da struja prijeđe 1 poluperiodu, ako je stroj: a) 2-polni, b) 6-polni?

$$\text{a) } \tau_p = 0,628 \text{ m}$$

$$\text{b) } \tau_p = 0,209 \text{ m}$$

- 1.12. Koliki je geometrijski kut koji prevali amplituda okretnog polja uzbuđenog strujama frekvencije 50 Hz u vremenu trajanja 1 periode struje, ako je stroj: a) 2-polni, b) 4-polni?

$$\text{a) } \alpha_g = 360^\circ$$

$$\text{b) } \alpha_g = 180^\circ$$

- 1.13. Ako sinkroni stroj radi s kutom opterećenja  $40^\circ$ , koliki je stvarni kut zakreta rotora (geometrijski kut opterećenja), ako je sinkrona brzina stroja 300 o/min, frekvencija 60 Hz?

$$\alpha_g = 3,3^\circ$$



## 2. FAZORSKI DIJAGRAM

- 2.1. Trofazni sinkroni turbogenerator 5 MVA, 10,5 kV, 50 Hz,  $\cos\varphi_n = 0,7$ ,  $n = 1500$  o/min ima sinkronu reaktanciju  $X_d = 160$  %. Za nazivni teret, napon i  $\cos\varphi$  treba grafički i analitički odrediti kut opterećenja  $\delta$  i relativnu vrijednost fiktivnog inducirano napona  $E_0$ .

$$S_n = 5 \text{ MVA}$$

$$U_n = 10,5 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\cos\varphi_n = 0,7$$

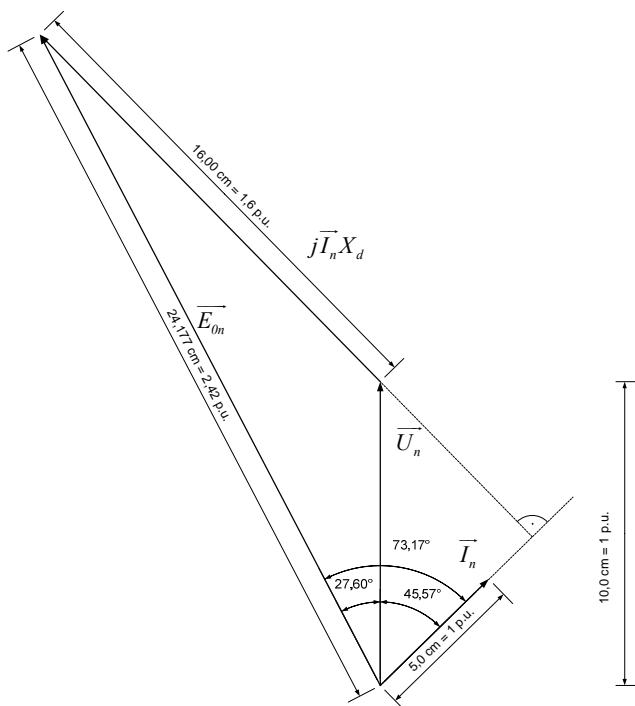
$$n = 1500 \text{ r/min}$$

$$X_d = 160 \%$$

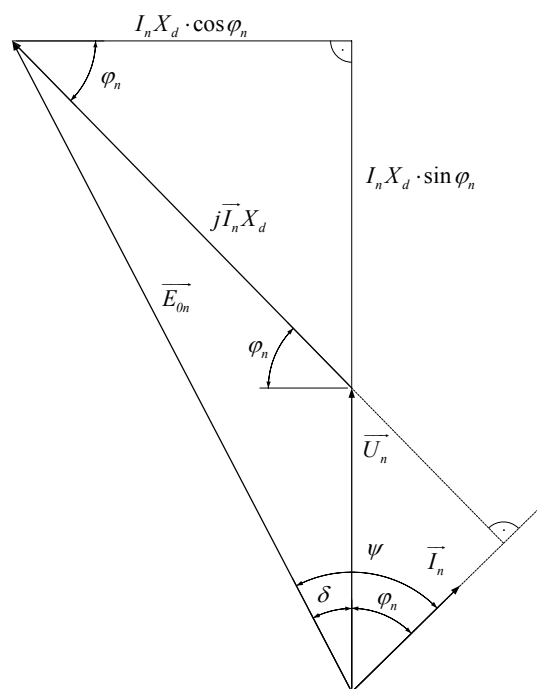
Rješenje:

$$\cos\varphi_n = 0,7 \rightarrow \varphi_n = 45,57^\circ$$

$$\underline{I}_n \underline{X}_d = 1 \cdot 1,6 = 1,6$$



Sl. 2-1 Fazorski dijagram (grafičko rješenje)



Sl. 2-2 Fazorski dijagram (analitičko rješenje)

**GRAFIČKI:** Iz fazorskog dijagrama (Sl. 2 1) slijedi:  $\underline{E}_0 = 2,42$ ,  $\delta = 27,60^\circ$

**ANALITIČKI:** 1. način:

$$\begin{aligned} E_0^2 &= \left[ \underline{U}_n + (\underline{I}_n \underline{X}_d \cdot \sin\varphi_n) \right]^2 + (\underline{I}_n \underline{X}_d \cdot \cos(\varphi_n))^2 \\ &= \left[ 1 + (1 \cdot 1,6 \cdot \sin 45,57^\circ) \right]^2 + (1 \cdot 1,6 \cdot \cos 45,57^\circ)^2 = (1 + 1,6 \cdot 0,714)^2 + (1,6 \cdot 0,7)^2 = 5,84 \end{aligned}$$

$$\underline{E}_0 = 2,42 \text{ p.u.}$$

$$\tan \delta = \frac{\underline{I}_n \underline{X}_d \cos \varphi_n}{\underline{U}_n + \underline{I}_n \underline{X}_d \sin \varphi_n} = \frac{1 \cdot 1,6 \cdot 0,7}{1 + 1 \cdot 1,6 \cdot 0,714} = \frac{1,12}{2,14} = 0,523$$

$$\boxed{\delta = 27,6^\circ}$$

2. način:

$$\begin{aligned} \underline{E}_0^2 &= \underline{U}_n^2 + (\underline{I}_n \underline{X}_d)^2 - 2 \cdot \underline{U}_n \cdot \underline{I}_n \underline{X}_d \cdot \cos(90 + \varphi_n) = \\ &= \underline{U}_n^2 + (\underline{I}_n \underline{X}_d)^2 + 2 \cdot \underline{U}_n \cdot \underline{I}_n \underline{X}_d \cdot \sin \varphi_n = 1^2 + 1,6^2 + 2 \cdot 1 \cdot 1,6 \cdot \sin 45,57^\circ = 5,85 \end{aligned}$$

$$\boxed{\underline{E}_0 = 2,42 \text{ p.u.}}$$

$$\frac{\sin \delta}{\sin(90 + \varphi_n)} = \frac{\underline{I}_n \underline{X}_d}{\underline{E}_0}$$

$$\sin \delta = \cos \varphi_n \cdot \frac{\underline{I}_n \underline{X}_d}{\underline{E}_0} = 0,7 \cdot \frac{1 \cdot 1,6}{2,42} = 0,463$$

$$\boxed{\delta = 27,6^\circ}$$

- 2.2. Trofazni sinkroni turbogenerator 5 MVA, 10,5 kV, 50 Hz,  $\cos \varphi_n = 0,7$ ,  $n = 1500$  o/min ima sinkronu reaktanciju  $X_d = 160$  %. Uzbudni namot je termički potpuno iskorišten kod nazivnog napona, struje i  $\cos \varphi$ . Treba odrediti najveću prividnu i radnu snagu koju generator može dati uz  $\cos \varphi = 0,5$  ind.

$$S_n = 5 \text{ MVA}$$

$$U_n = 10,5 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\cos \varphi_n = 0,7$$

$$n = 1500 \text{ r/min}$$

$$X_d = 160 \%$$

$$\cos \varphi = 0,5 \text{ ind.}$$

Rješenje:

$$\begin{aligned} \underline{E}_{0n}^2 &= \underline{U}_n^2 + (\underline{I}_n \underline{X}_d)^2 - 2 \cdot \underline{U}_n \cdot \underline{I}_n \underline{X}_d \cdot \cos(90 + \varphi_n) = \\ &= \underline{U}_n^2 + (\underline{I}_n \underline{X}_d)^2 + 2 \cdot \underline{U}_n \cdot \underline{I}_n \underline{X}_d \cdot \sin \varphi_n \end{aligned}$$

Za  $\cos \varphi = 0,5 < \cos \varphi_n = 0,7$  slijedi  $\sin \varphi > \sin \varphi_n$ ,

pa je za nazivni napon  $U_n$  i nazivnu struju  $I_n$ ,  $E_0 > E_{0n}$ .

To znači da bi uzbudni namot bio termički preopterećen.

Treba dakle generator opteretiti tako da je  $E_0 = E_{0n}$ .

$$\underline{E}_{0n}^2 = \underline{U}_n^2 + (\underline{I}_n \underline{X}_d)^2 + 2 \cdot \underline{U}_n \cdot \underline{I}_n \underline{X}_d \cdot \sin \varphi_n = 1^2 + 1,6^2 + 2 \cdot 1 \cdot 1,6 \cdot \sin 45,57^\circ = 5,85$$

$$\underline{E}_0^2 = \underline{U}_n^2 + (\underline{I} \underline{X}_d)^2 + 2 \cdot \underline{U}_n \cdot \underline{I} \underline{X}_d \cdot \sin \varphi = \underline{E}_{0n}^2$$

$$(\underline{I} \underline{X}_d)^2 + 2 \underline{U}_n \sin \varphi \cdot (\underline{I} \underline{X}_d) + \underline{U}_n^2 - \underline{E}_{0n}^2 = 0$$

Treba riješiti kvadratnu jednadžbu po nepoznatici  $\underline{IX}_d$ .

$$(\underline{IX}_d)^2 + \sqrt{3} \cdot (\underline{IX}_d) - 4,85 = 0 \left( 2\underline{U}_n \sin \varphi = 2 \cdot 1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

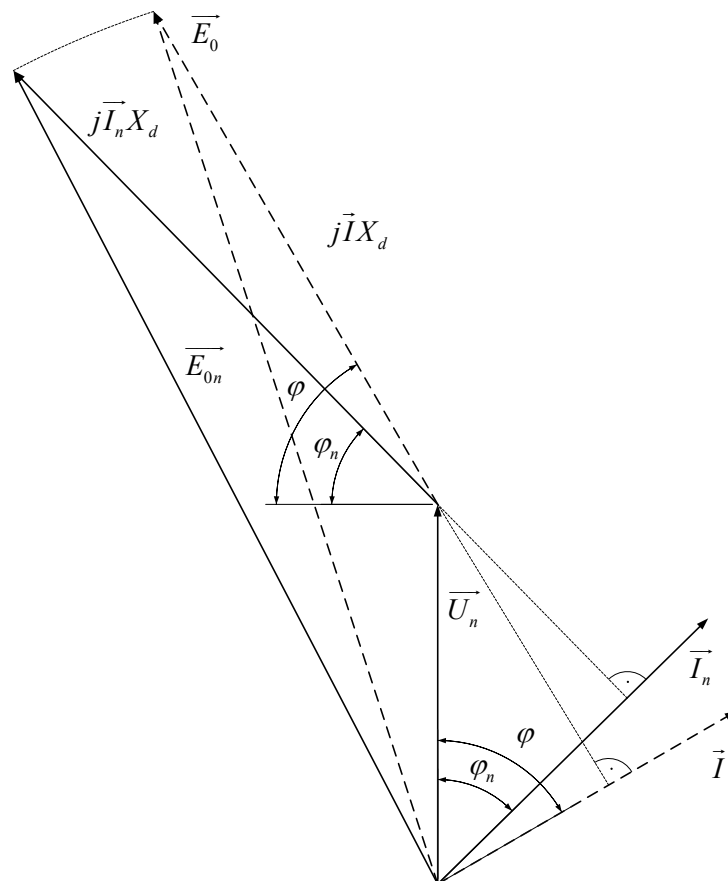
$$(\underline{IX}_d)_{1/2} = \frac{-\sqrt{3} \pm \sqrt{3 + 4 \cdot 4,85}}{2} = \frac{-\sqrt{3} \pm 4,733}{2}$$

$$(\underline{IX}_d)_1 = 1,50$$

$$\frac{\underline{IX}_d}{\underline{I}_n \underline{X}_d} = \frac{\underline{I}}{\underline{I}_n} = \frac{S}{S_n}$$

$$S = S_n \cdot \frac{\underline{IX}_d}{\underline{I}_n \underline{X}_d} = 5 \cdot \frac{1,50}{1 \cdot 1,60} = \boxed{4,69 \text{ MVA}}$$

$$P = S \cdot \cos \varphi = 4,69 \cdot 0,5 = \boxed{2,35 \text{ MW}}$$



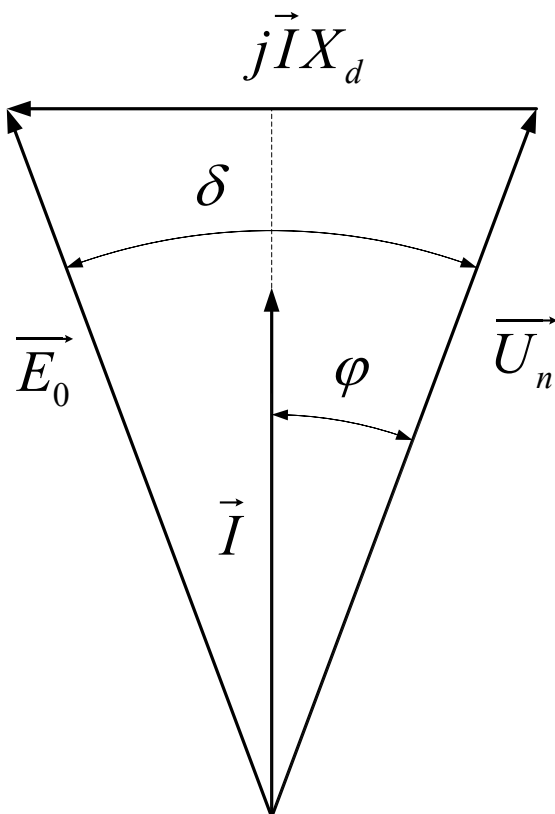
Sl. 2-3 Fazorski dijagram

2.3. Sinkroni generator je opterećen strujom  $I < I_n = 100 \%$ .

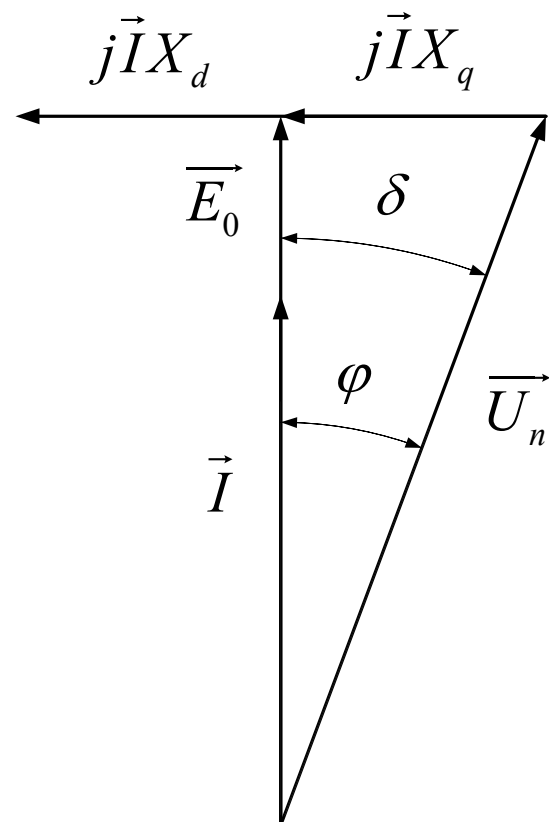
- Ako je  $X_d = X_q = 100 \%$  i kut opterećenja  $\delta = 41^\circ$ , treba izračunati koliki je fazni pomak  $\varphi$  i relativna vrijednost struje  $I$  uz uzbudu za prazni hod i nazivni napon. Kolika je i kakva snaga koju generator daje u mrežu? O kakvom je generatoru riječ?
- Izračunati koliki mora biti fiktivni inducirani napon  $E_0$  generatora ( $X_d = 100 \%$ ,  $X_q = 50 \%$ ), ako je struja opterećenja  $I$  jednaka kao u a) dijelu zadatka, a fazni pomak  $\varphi = -20,5^\circ$  (generator je poduzbuđen) pri nazivnom naponu? O kakvom je generatoru riječ?

$$I < I_n = 100 \%$$

Rješenje:



Sl. 2-4 Fazorski dijagram, a)



Sl. 2-5 Fazorski dijagram, b)

a)  $X_d = X_q = 100 \%$

$$\delta = 41^\circ$$

Radi se o turbogeneratoru ( $X_d = X_q$ ).

Očito je da se vrhovi fazora  $U_n$  i  $E_0$  moraju nalaziti na kružnici, jer su fazori jednaki po iznosu. Struja  $I$  prethodi naponu  $U_n$ , jer je generator poduzbuđen (uzbudna struja za PH je manja od uzbudne struje za nazivno stanje).

Iz fazorskog dijagrama (Sl. 2-4) mogu se uočiti neki geometrijski odnosi između veličina.

$$\delta = 2\varphi \rightarrow \varphi = \frac{\delta}{2} = \frac{41}{2} = 20,5^\circ$$

$$\sin \varphi = \frac{1}{2} \frac{I X_d}{I_n} \rightarrow I = \frac{2 \sin \varphi}{X_d} = 2 \cdot 0,35 \cdot 1 = 0,7 \text{ p.u.}$$

$$P = \underline{P} \cdot S_n = \frac{I}{I_n} \cdot \cos \varphi \cdot S_n = I \cdot \cos \varphi \cdot S_n = 0,7 \cdot \cos(-20,5^\circ) \cdot S_n = \boxed{0,656 \cdot S_n}$$

$$Q = \underline{Q} \cdot S_n = \frac{I}{I_n} \cdot \sin \varphi \cdot S_n = I \cdot \sin \varphi \cdot S_n = 0,7 \cdot \sin(-20,5^\circ) \cdot S_n = \boxed{-0,245 \cdot S_n}$$

Generator u mrežu daje radnu snagu P i kapacitivnu snagu Q.

$$\text{b) } X_d = 100 \%$$

$$X_q = 50 \%$$

$$\varphi = 20,5^\circ$$

Radi se o hidrogeneratoru ( $X_d \neq X_q$ ). Struja  $I$  jednaka je kao u a) dijelu zadatka, a fazorski dijagram prikazan je na slici Sl. 2-5. Vrijede slični geometrijski odnosi.

$$I X_q = 0,7 \cdot 0,5 = 0,35$$

$$E_0 = \sqrt{U_n^2 - (I X_q)^2} = \sqrt{1 - 0,35^2} = \sqrt{0,8775} = \boxed{0,937 \text{ p.u.}}$$

- 2.4. Trofazni sinkroni turbogenerator radi na krutu mrežu uz struju opterećenja  $I = 250 \text{ A}$  i faktor snage  $\cos \varphi = 0,7$  ind., pri čemu fiktivni inducirani napon  $E_0$  iznosi  $1270 \text{ V}$  fazno, a kut opterećenja  $\delta = 11^\circ$ . Tijekom rada s opisanom opterećenjem došlo je do smanjenja momenta pogonske turbine pa je smanjen kut opterećenja na  $\delta' = 8^\circ$ , a nezavisno o promjeni momenta pogonske turbine došlo je do povećanja uzbudne struje tako da je fiktivni inducirani napon porastao na  $E_0' = 1450 \text{ V}$ . Uz zanemarivanje otpora  $R$  treba analitički odrediti:

a) napon mreže na koju generator radi.

b) fazni pomak  $\varphi'$  za opterećenje kod smanjenog momenta pogonske turbine i povećane uzbudne struje

$$I = 250 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = 0,7$$

$$E_0 = 1270 \text{ V/fazi}$$

$$\delta = 11^\circ$$

$$\delta' = 8^\circ$$

$$E_0' = 1450 \text{ V/fazi}$$

Rješenje:

$$\text{a) } \cos \varphi = 0,7 \rightarrow \varphi_n = 45,57^\circ$$

Treba uočiti dva pravokutna trokuta, sa zajedničkim pravim kutom i hipotenuzama  $E_0$  i  $U$ .

$$E_0 \cos(\delta + \varphi) = U \cos \varphi$$

$$U_{mfaz} = U = \frac{\cos(\delta + \varphi)}{\cos \varphi} E_0 = \frac{\cos(11^\circ + 45,57^\circ)}{\cos 45,57^\circ} \cdot 1270 = 0,787 \cdot 1270 = 1000 \text{ V}$$

$$U_m = U_{m\text{faz}} \cdot \sqrt{3} = \boxed{1732 \text{ V}}$$

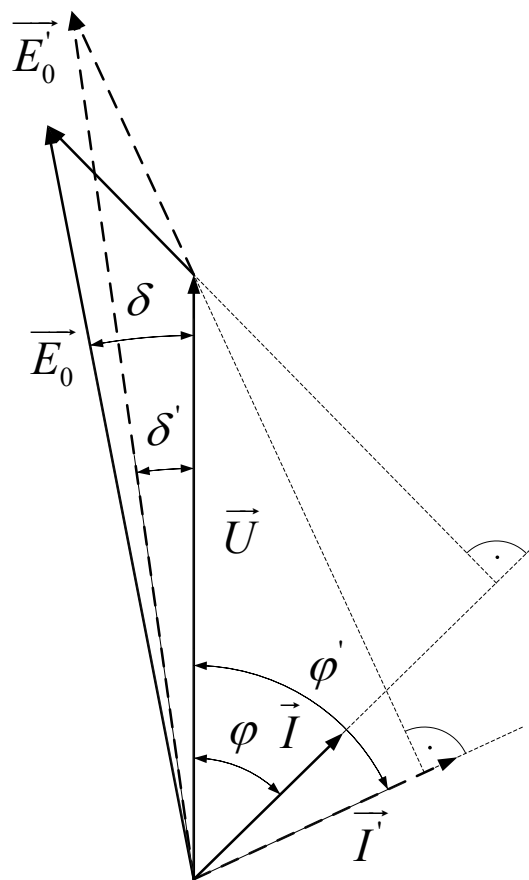
$$\text{b) } E'_0 \cos(\delta' + \varphi') = U \cos \varphi'$$

$$E'_0 \cdot (\cos \delta' \cdot \cos \varphi' - \sin \delta' \cdot \sin \varphi') = U \cos \varphi'$$

$$-E'_0 \cdot \sin \delta' \cdot \sin \varphi' = (U - E'_0 \cdot \cos \delta') \cdot \cos \varphi'$$

$$\tan \varphi' = \frac{E'_0 \cdot \cos \delta' - U}{E'_0 \cdot \sin \delta'} = \frac{1450 \cdot \cos 8^\circ - 1000}{1450 \cdot \sin 8^\circ} = \frac{1450 \cdot 0,990 - 1000}{1450 \cdot 0,139} = 2,161$$

$$\boxed{\varphi' = 65,17^\circ}$$



Sl. 2-6 Fazorski dijagram

- 2.5. Trofazni sinkroni generator 10 MVA, 10 kV,  $\cos\varphi_n = 0,8$ ,  $n = 300$  o/min,  $X_d = 100$  %,  $X_q = 50$  %, opterećen je sa 6 MVA uz  $\cos\varphi = 0,6$  ind. Treba nacrtati fazorski dijagram napona i odrediti  $E_0$  i  $\delta$  za zadano opterećenje.

$$S_n = 10 \text{ MVA}$$

$$U_n = 10 \text{ kV}$$

$$\cos\varphi_n = 0,8$$

$$n = 300 \text{ r/min}$$

$$X_d = 100 \%$$

$$X_q = 50 \%$$

$$S = 6 \text{ MVA}$$

$$\cos\varphi = 0,6 \text{ ind.}$$

Rješenje:

$$\cos\varphi = 0,6 \rightarrow \varphi = 53,13^\circ$$

$$S = 6 \text{ MVA} \rightarrow \underline{S} = \frac{S}{S_n} = \frac{6}{10} = 0,6 \text{ p.u.} \rightarrow \underline{I} = \underline{S} = 0,6 \text{ p.u.}$$

$$\underline{I}X_d = 0,6 \cdot 1 = 0,6 \text{ p.u.}$$

$$\underline{I}X_q = 0,6 \cdot 0,5 = 0,3 \text{ p.u.}$$

$$\psi = \delta + \varphi$$

$$\tan\psi = \frac{\underline{I}X_q + \underline{U}_n \sin\varphi}{\underline{U}_n \cos\varphi} = \frac{0,3 + 1 \cdot 0,8}{1 \cdot 0,6} = 1,833$$

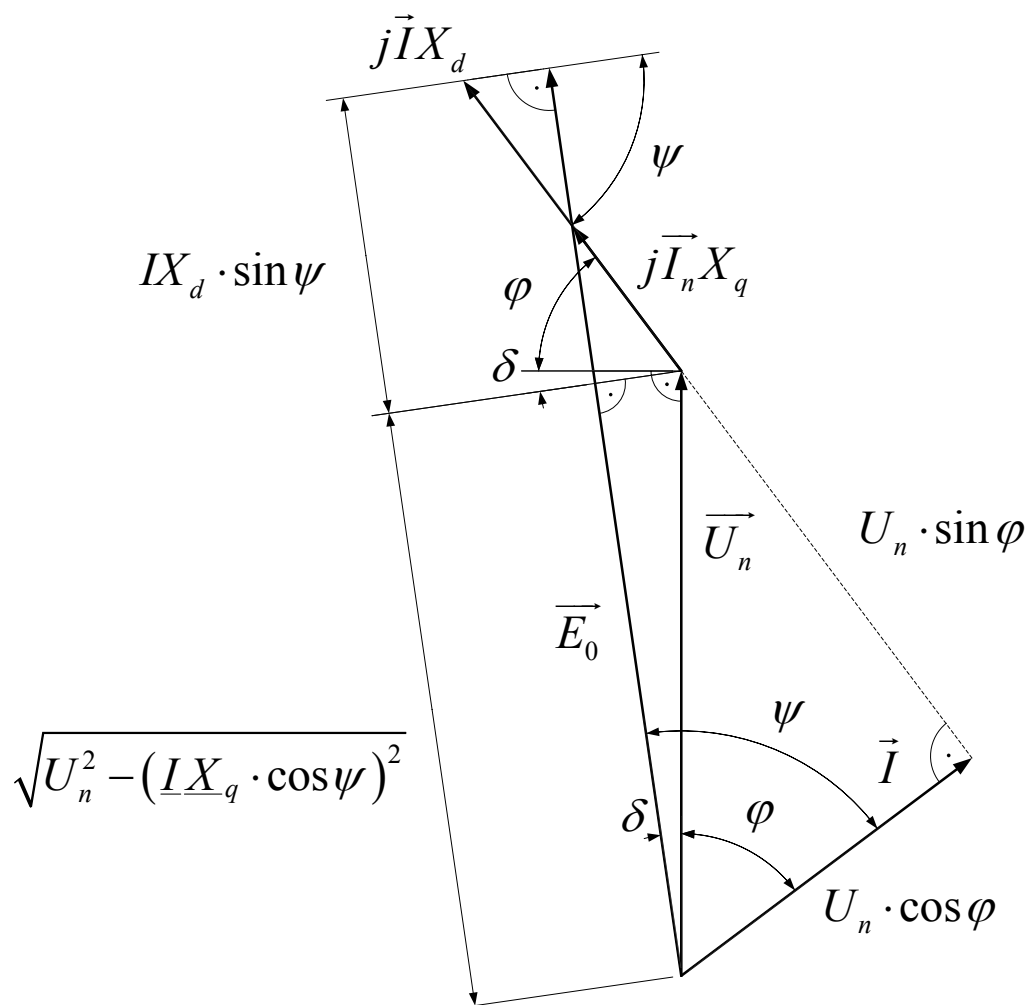
$$\psi = 61,39^\circ \rightarrow \delta = \psi - \varphi = 61,39^\circ - 53,13^\circ$$

$$\boxed{\delta = 8,26^\circ}$$

$$\underline{E}_0 = \sqrt{\underline{U}_n^2 - (\underline{I}X_q \cdot \cos\psi)^2} + \underline{I}X_d \sin\psi$$

$$\underline{E}_0 = \sqrt{1 - (0,3 \cdot \cos 61,39^\circ)^2} + 0,6 \sin 61,39^\circ = \sqrt{1 - (0,3 \cdot 0,479)^2} + 0,6 \cdot 0,878$$

$$\boxed{\underline{E}_0 = 1,52 \text{ p.u.}}$$



Sl. 2-7 Fazorski dijagram

- 2.6. Trofazni sinkroni motor, spoj zvijezda, 2000 KS, 2300 V,  $\eta = 96 \%$ ,  $\cos \varphi_n = 1$ , 60 Hz,  $p = 6$ , ima sinkrone reaktancije  $X_d = 1,95 \Omega/\text{fazi}$ ,  $X_q = 1,4 \Omega/\text{fazi}$ . Treba konstruirati fazorski dijagram napona, odrediti vrijednosti  $E_0$  i  $\delta$ , te izračunati  $I_d$  i  $I_q$  za nazivni teret, napon, frekvenciju i  $\cos \varphi$ .

$$P_n = 2000 \text{ KS}$$

$$U_n = 2300 \text{ V}$$

$$\eta = 96 \%$$

$$\cos \varphi_n = 1$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$X_d = 1,95 \Omega/\text{fazi}$$

$$X_q = 1,40 \Omega/\text{fazi}$$

$$p = 6$$



Rješenje:

Kod nazivnih podataka motora, zadaje se radna snaga, tj. mehanička snaga na osovini!

Električna radna snaga je veća od mehaničke radne snage za gubitke u stroju:

$$P_{el} = P_{meh} + P_g; \quad P_{el} = \frac{P_{meh}}{\eta}; \quad S = \frac{P_{el}}{\cos \varphi} = \frac{P_{meh}}{\eta \cos \varphi}$$

$$1 \text{ metric KS} = 735,5 \text{ W} \rightarrow S_n = \frac{P_n}{\eta \cos \varphi_n} = \frac{2000 \cdot 735,5}{0,96 \cdot 1} = 1532 \text{ kVA}$$

$$U_{n, faz} = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1327,9 \text{ V}$$

$$\underline{X}_d = X_d \cdot \frac{I_{n, faz}}{U_{n, faz}} = X_d \cdot \frac{S_n}{U_n^2} = 1,95 \cdot \frac{1532 \cdot 10^3}{2300^2} = 0,5647 = 56,47 \%$$

$$\underline{X}_q = X_q \cdot \frac{I_{n, faz}}{U_{n, faz}} = X_q \cdot \frac{S_n}{U_n^2} = 1,4 \cdot \frac{1532 \cdot 10^3}{2300^2} = 0,4054 = 40,54 \%$$

$$\tan \delta = \frac{\underline{I}_n \underline{X}_q}{U_{2n}} = \frac{1 \cdot 0,40}{1} = 0,40 \rightarrow \boxed{\delta = 21,8^\circ}$$

$$\underline{E}_0 = \frac{U_n}{\cos \delta} + \underline{I}_n (\underline{X}_d - \underline{X}_q) \cdot \sin \delta = \frac{1}{\cos 21,8^\circ} + 1 \cdot (0,56 - 0,40) \cdot \sin 21,8^\circ = \boxed{1,136 \text{ p.u.}}$$

ili

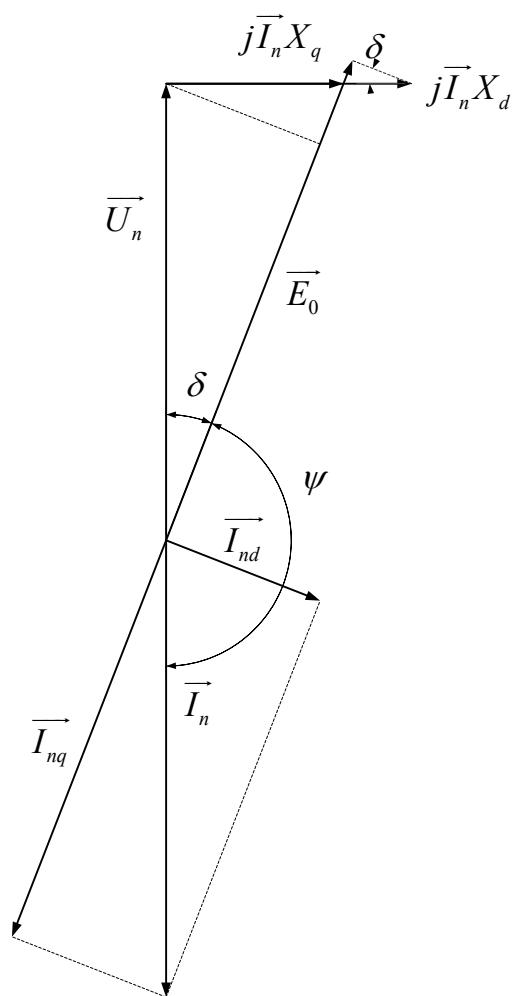
$$\underline{E}_0 = U_n \cdot \cos \delta + \underline{I}_n \underline{X}_d \cdot \sin \delta = 1 \cdot \cos 21,8^\circ + 1 \cdot 0,56 \cdot \sin 21,8^\circ = 1,136 \text{ p.u.}$$

$$E_0 = \underline{E}_0 \cdot U_{n, faz} = 1,136 \cdot \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1508,5 \text{ V}$$

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot \eta \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{2000 \cdot 735,5}{\sqrt{3} \cdot 0,96 \cdot 2300} = 384,6 \text{ A}$$

$$I_{nd} = I_n \cdot \sin \delta = 384,6 \cdot \sin 21,8^\circ = \boxed{142,8 \text{ A}}$$

$$I_{nq} = I_n \cdot \cos \delta = 384,6 \cdot \cos 21,8^\circ = \boxed{357,1 \text{ A}}$$



Sl. 2-8 Fazorski dijagram sinkronog motora

- 2.7. Trofazni sinkroni turbogenerator 3 MVA, 6,3 kV, 50 Hz,  $\cos\varphi_n = 0,75$ ,  $n = 1500$  o/min, ima sinkronu reaktanciju  $X_d = 148$  %. Za nazivne podatke treba nacrtati fazorski dijagram i odrediti:

- a) fiktivni inducirani napon  $E_0$ ,
- b) kut opterećenja  $\delta$ ,
- c) fazni pomak između vektora  $E_0$  i  $I_2$  (kut  $\psi$ ).

a)  $\underline{E_0} = 2,27 \text{ p.u.}$

b)  $\underline{\delta} = 29,27^\circ$

c)  $\underline{\psi} = 70,68^\circ$

- 2.8. Trofazni sinkroni turbogenerator 50 MVA, 10 kV, 50 Hz,  $\cos\varphi_n = 0,8$ ,  $n = 1500$  o/min, ima sinkronu reaktanciju  $X_d = 160$  %. Koliku djelatnu snagu može dati generator uz  $\cos\varphi = 0,5$  ind., ako je maksimalno dozvoljeno opterećenje uzbuđnog namota određeno nazivnom strujom armature i maksimalnim  $\cos\varphi_n = 0,8$ ?

$\underline{P} = 22,2 \text{ MW}$

- 2.9. Trofazni sinkroni turbogenerator s podacima 247 MVA, 13800 V,  $\cos\varphi_n = 0,85$ ,  $X_d = 230$  % radi u nazivnoj radnoj točki. U jednom trenutku se pojavi zahtjev za povećanjem jalove snage koju generator daje u mrežu za 10 %. Uz uvjet da generator u novoj radnoj točki istovremeno daje u mrežu najveću moguću radnu snagu s obzirom na ograničenja uzbude i armature, na temelju fazorskog dijagrama odredite iznos te radne snage (u MW) te relativni iznos uzbudne struje u odnosu na nazivnu u tom slučaju. S kojim faktorom snage i kojom strujom armature (u p.u.) će generator raditi u novoj radnoj točki?

$\underline{I'} = 0,9769$

$\underline{\cos\varphi'} = 0,805$

$\underline{P} = 194,2 \text{ MW}$

### 3. RAZVIJENA SNAGA I MOMENT

3.1. Trofazni sinkroni hidrogenerator ima nazivne podatke 10 MVA, 10,5 kV, 375 o/min, 50 Hz,  $\cos \varphi_n = 0,8$ ,  $X_d = 100\%$  i  $X_q = 50\%$ . Treba odrediti maksimalnu snagu koju stroj može dati, ako se opterećenje polako povećava:

a) od praznog hoda uz uzбудu za prazni hod

b) od opterećenja 8 MVA uz nazivni napon i frekvenciju te uz  $\cos \varphi = 0,6$  ind.

$$S_n = 10 \text{ MVA}$$

$$U_n = 10,5 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$n = 375 \text{ o/min}$$

$$\cos \varphi_n = 0,8$$

$$X_d = 100\%$$

$$X_q = 50\%$$

$$S = 8 \text{ MVA}$$

$$\cos \varphi = 0,6 \text{ ind.}$$

Rješenje:

$$a) \underline{P} = \left[ \frac{\underline{E}_{0ph} \cdot \underline{U}_n}{\underline{X}_d} \cdot \sin \delta + \frac{\underline{U}_n^2}{2} \left( \frac{1}{\underline{X}_q} - \frac{1}{\underline{X}_d} \right) \cdot \sin 2\delta \right]$$

$$\frac{d\underline{P}}{d\delta} = \left[ \frac{\underline{E}_{0ph} \cdot \underline{U}_n}{\underline{X}_d} \cdot \cos \delta_{pr} + \underline{U}_n^2 \left( \frac{1}{\underline{X}_q} - \frac{1}{\underline{X}_d} \right) \cdot \cos 2\delta_{pr} \right] = 0$$

$$\left( \frac{1 \cdot 1}{1} \cdot \cos \delta_{pr} + 1 \left( \frac{1}{0,5} - \frac{1}{1} \right) \cdot \cos 2\delta_{pr} \right) = 0$$

$$\cos \delta_{pr} + \cos 2\delta_{pr} = 0$$

$$2 \cos^2 \delta_{pr} + \cos \delta_{pr} - 1 = 0 \quad (\cos 2\delta_{pr} = 2 \cos^2 \delta_{pr} - 1)$$

$$\cos^2 \delta_{pr} + 0,5 \cdot \cos \delta_{pr} - 0,5 = 0$$

$$\cos \delta_{pr1/2} = \frac{-0,5 \pm \sqrt{0,25 + 4 \cdot 0,5}}{2} = \frac{-0,5 \pm 1,5}{2}$$

$$\cos \delta_{pr} = 0,5 \rightarrow \delta_{pr} = 60^\circ$$

$$P_{pr} = \underline{P}_{pr} \cdot S_n = \left[ \frac{\underline{E}_{0ph} \cdot \underline{U}_n}{\underline{X}_d} \cdot \sin \delta_{pr} + \frac{\underline{U}_n^2}{2} \left( \frac{1}{\underline{X}_q} - \frac{1}{\underline{X}_d} \right) \cdot \sin 2\delta_{pr} \right] \cdot S_n$$

$$P_{pr} = \left[ \frac{1 \cdot 1}{1} \cdot \sin 60^\circ + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0,5} - \frac{1}{1} \right) \cdot \sin (2 \cdot 60^\circ) \right] \cdot 10$$

$$P_{pr} = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \cdot 10 = \boxed{12,99 \text{ MW}}$$

$$b) \cos \varphi = 0,6 \rightarrow \varphi = 53,13^\circ$$

$$S = 8 \text{ MVA} \rightarrow \underline{S} = \frac{S}{S_n} = \frac{8}{10} = 0,8 \text{ p.u.} \rightarrow \underline{I} = \underline{S} = 0,8 \text{ p.u.}$$

$$\underline{IX}_d = 0,8 \cdot 1 = 0,8 \text{ p.u.}$$

$$\underline{IX}_q = 0,8 \cdot 0,5 = 0,4 \text{ p.u.}$$

$$\psi = \delta + \varphi$$

$$\tan \psi = \frac{\underline{IX}_q + \underline{U}_n \sin \varphi}{\underline{U}_n \cos \varphi} = \frac{0,4 + 1 \cdot 0,8}{1 \cdot 0,6} = 2$$

$$\psi = 63,43^\circ$$

$$\underline{E}_0 = \sqrt{\underline{U}_n^2 - (\underline{IX}_q \cdot \cos \psi)^2} + \underline{IX}_d \sin \psi$$

$$\underline{E}_0 = \sqrt{1 - (0,4 \cdot \cos 63,43^\circ)^2} + 0,8 \sin 63,43^\circ = \sqrt{1 - (0,4 \cdot 0,447)^2} + 0,8 \cdot 0,894$$

$$\underline{E}_0 = 1,70 \text{ p.u.}$$

$$\frac{\underline{E}_{0n} \cdot \underline{U}}{\underline{X}_d} \cdot \cos \delta + \underline{U}^2 \left( \frac{1}{\underline{X}_q} - \frac{1}{\underline{X}_d} \right) \cdot \cos 2\delta = 0$$

$$\left( \frac{1,7 \cdot 1}{1} \cdot \cos \delta + 1 \left( \frac{1}{0,5} - \frac{1}{1} \right) \cdot \cos 2\delta \right) = 0$$

$$1,7 \cos \delta + \cos 2\delta = 0$$

$$2 \cos^2 \delta + 1,7 \cos \delta - 1 = 0$$

$$\cos^2 \delta + 0,85 \cdot \cos \delta - 0,5 = 0$$

$$\cos \delta_{1/2} = \frac{-0,85 \pm \sqrt{0,723 + 4 \cdot 0,5}}{2} = \frac{-0,85 \pm 1,65}{2}$$

$$\cos \delta_{pr} = 0,4 \rightarrow \delta_{pr} = 66,42^\circ$$

$$P_{pr} = \underline{P}_{pr} \cdot S_n = \left[ \frac{\underline{E}_0 \cdot \underline{U}_n}{\underline{X}_d} \cdot \sin \delta_{pr} + \frac{\underline{U}_n^2}{2} \left( \frac{1}{\underline{X}_q} - \frac{1}{\underline{X}_d} \right) \cdot \sin 2\delta_{pr} \right] \cdot S_n$$

$$P_{pr} = \left[ \frac{1,7 \cdot 1}{1} \cdot \sin 66,42^\circ + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0,5} - \frac{1}{1} \right) \cdot \sin (2 \cdot 66,42^\circ) \right] \cdot 10$$

$$\boxed{P_{pr} = 19,25 \text{ MW}}$$

- 3.2. Trofazni sinkroni generator ima nazivne podatke 10 MVA, 10,5 kV, 375 o/min, 50 Hz,  $\cos\varphi_n = 0,8$ ,  $X_d = 100\%$  i  $X_q = 50\%$ . Što će se dogoditi ako stroju uz nazivni napon i frekvenciju i pri opterećenja od 8 MVA,  $\cos\varphi = 0,6$  ind. prekinemo uzbudu?

$$S_n = 10 \text{ MVA}$$

$$U_n = 10,5 \text{ kV}$$

$$n = 375 \text{ r/min}$$

$$X_d = 100\%$$

$$X_q = 50\%$$

$$\cos\varphi_n = 0,8$$

$$S = 8 \text{ MVA}$$

$$\cos\varphi = 0,6 \text{ ind.}$$

Rješenje:

Prije prekida uzbude generator je davao snagu:

$$P = \left[ \frac{E_0 \cdot U_n}{X_d} \cdot \sin\delta + \frac{U_n^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta \right]$$

$$P = S \cdot \cos\varphi = 8 \cdot 0,6 = 4,8 \text{ MW}$$

Prekidom uzbude  $E_0 = 0$ , daje samo reluktantnu snagu:

$$P = \frac{U_n^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta$$

Prekretni kut za reluktantnu snagu iznosi  $\delta_{pr} = 45^\circ$ , a prekretna snaga:

$$P_{pr} = S_n \cdot \frac{U_n^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta_{pr} = 10 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{0,5} - \frac{1}{1} \right) \cdot \sin 90^\circ = 10 \cdot 0,5 \cdot 1 = 5 \text{ MW}$$

$$P = 4,8 \text{ MW} < P_{pr} = 5 \text{ MW} \rightarrow \text{Generator može dati veću snagu, nego što je davao}$$

u trenutku isključenja uzbude, zato ostaje u sinkronizmu, u kapacitivnom području rada.

Sada radi s kutom opterećenja:

$$\sin 2\delta = \frac{P}{S_n \cdot 0,5} = \frac{4,8}{10 \cdot 0,5} = 0,96$$

$$2\delta = 73,74^\circ \rightarrow \delta = 36,87^\circ$$

Valja pogledati koliko iznosi struja armature:

$$I_d X_d = U_n \cos\delta$$

$$I_d = \frac{U_n \cos\delta}{X_d} = \frac{1 \cdot 0,8}{1}$$

$$I_d = 0,8$$

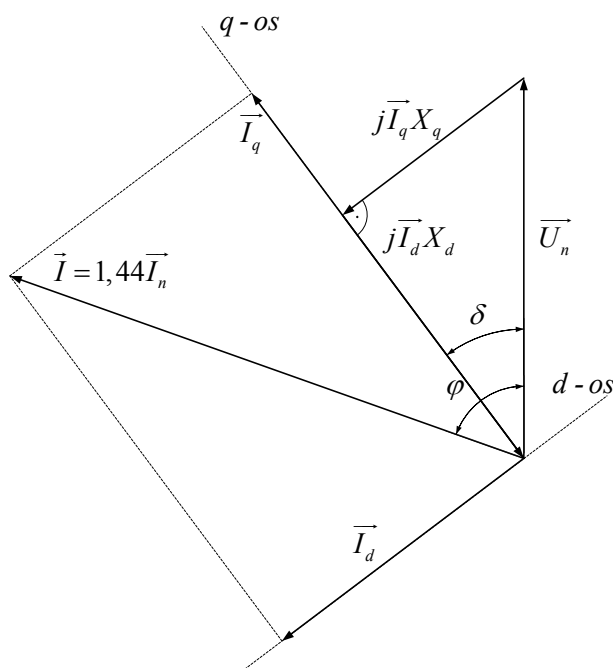
$$I_q X_q = U_n \sin\delta$$

$$I_q = \frac{U_n \sin\delta}{X_q} = \frac{1 \cdot 0,6}{0,5}$$

$$\underline{I}_d = 1,2$$

$$\underline{I} = \sqrt{\underline{I}_d^2 + \underline{I}_q^2} = \sqrt{0,8^2 + 1,2^2} = 1,44 \rightarrow \boxed{I = 1,44 I_n}$$

Struja armature je veća od nazivne. Uz takav rad došlo bi do vrlo brzog pregrijavanja, zato bi trebala proraditi prekostrujna zaštita.



Sl. 3-1 Fazorski dijagram

3.3. Trofazni turbogenerator s podacima: 10 MVA, 10 kV,  $\cos \varphi_n = 0,8$  opterećen je sa 6 MVA uz nazivni napon i  $\cos \varphi = 0,6$  ind. Što će se dogoditi ako generatoru:

- prekinemo uzбудu?
- prekinemo dovod pare turbini?

$$S_n = 10 \text{ MVA}$$

$$U_n = 10 \text{ kV}$$

$$\cos \varphi_n = 0,8$$

$$S = 6 \text{ MVA}$$

$$\cos \varphi = 0,6 \text{ ind.}$$

Rješenje:

- Radi se o turbogeneratoru, stroju bez reluktantnog momenta i snage:

$$\underline{P} = \frac{\underline{E}_0 \cdot \underline{U}}{\underline{X}_d} \cdot \sin \delta$$

Ako snaga turbine ostaje ista i odgovara opterećenju generatora od 6 MW, snaga bi bila iznosa 0.

$$\underline{E}_0 = 0 \rightarrow \underline{P} = 0$$

Stroj u početnom trenutku ne daje elektromagnetski moment koji bi se suprotstavljao pogonskom momentu turbine, te ubrzava u nadsinkrono područje, gdje je  $n > n_s$ .

U prigušnom namotu i masivnim dijelovima rotora, induciraju se struje frekvencije

$$f_r = \left| \frac{n_s - n}{60} p \right| = \left| \frac{-n_r}{60} p \right|.$$

Te struje stvaraju okretno polje koje se prema rotoru giba brzinom vrtnje  $-n_r$ , tako da je brzina okretnog polja rotora prema statoru  $n - n_r = n_s$  tj. jednaka je brzini vrtnje okretnog polja statora, odnosno sinkronoj brzini.

Kako se u svim slučajevima u kojima su polja statora i rotora međusobno nepomična razvija elektromagnetski moment, to će stroj raditi u režimu asinkronog generatora i davati u mrežu snagu koja odgovara snazi turbine. Kod toga može doći, ako se takav režim ne prekine dovoljno brzo, do pregrijavanja prigušnog namota.

b) S obzirom da je snaga turbine jednaka nuli, generator će prijeći u motorski režim rada uzimajući iz mreže radnu snagu za pokrivanje mehaničkih i električkih gubitaka i dajući u mrežu samo jalovu snagu po iznosu veću od one prije prekida dovoda pare turbini. Kažemo da radi kao kompenzator jalove snage.

- 3.4. Kod kojeg radnog opterećenja će ispasti iz sinkronizma turbogenerator čiji je  $X_d = 180 \%$ , ako je uzbuđen za prazni hod i ako mu se opterećenje polako povećava od praznog hoda?

$$\underline{X_d} = 180 \%$$

Rješenje:

$$\underline{P} = \frac{\underline{E}_0 \cdot \underline{U}}{\underline{X_d}} \cdot \sin \delta$$

$$\underline{E}_{0ph} = 1 \quad \delta_{pr} = 90^\circ \rightarrow \sin \delta_{pr} = 1$$

$$\underline{P}_{pr} = \frac{\underline{E}_{0ph} \cdot \underline{U}}{\underline{X_d}} \cdot \sin \delta_{pr} = \frac{1 \cdot 1}{1,8} \cdot 1 = 0,556$$

Generator će ispasti iz sinkronizma kod radnog opterećenja  $\underline{P}_{pr} > 0,556 S_n$ .

- 3.5. Turbogenerator s podacima: 16 MVA, 6300 V,  $X_d = 100 \%$  uzbuđen je u praznom hodu na nazivni napon. Treba odrediti:

- uz koji  $\cos \varphi$  možemo opteretiti generator sa 16 MVA uz nazivni napon i uzбудu za prazni hod?
- kolika je prekretna prividna snaga i koliki je  $\varphi$  uz nazivni napon i uzбудu za prazni hod, ako teret polagano raste od praznog hoda?

a)  $\cos \varphi = 0,87$  kap.

b)  $S_{pr} = 22,68$  MVA

- 3.6. Trofazni hidrogenerator s podacima: 10 MVA, 50 Hz,  $\cos \varphi_n = 0,8$ , 4 para polova, ima reaktancije  $X_d = 142 \%$  i  $X_q = 70 \%$  i opterećen je s 6 MVA uz nazivni napon i



$\cos\varphi = 0,6$  kap. Kolika je vrijednost momenta u točki zadanog opterećenja, u Nm i p.u.? Kolika je radna snaga u p.u.?

$$\underline{M} = 45837 \text{ Nm}$$

$$\underline{M} = 0,36 \text{ p.u.}$$

$$\underline{P} = 0,36 \text{ p.u.}$$

3.7. Trofazni turbogenerator ima nazivne podatke 16 MVA, 10,5 kV,  $\cos\varphi_n = 0,8$ , dva pola, 50 Hz,  $X_d = 200 \%$ .

- a) Koliki je prekretni moment nazivno opterećenog generatora uz nazivni napon?  
b) Kolika je prekretna snaga, ako je generator opterećen s 10 MVA uz  $\cos\varphi = 0,6$  ind. i napon 8 kV?

a)  $\underline{M}_{npr} = 69264 \text{ Nm}$

b)  $\underline{P}_{pr} = 14,02 \text{ MW}$

## 4. POGONSKI DIJAGRAM

4.1. Nacrtajte pogonski dijagram trofaznog sinkronog turbogeneratorsa sljedećih nazivnih podataka: 247 MVA, 13800 V,  $\cos\varphi = 0,85$ , 50 Hz, 3000 o/min,  $\eta = 98,6\%$  koji ima uzbudni namot iskorišten do maksimuma. Uzbudna struja praznog hoda potrebna za induciranje nazivnog napona iznosi 822 A, a pri kratko spojenom armaturnom namotu i uzbudnoj struji od 1750 A armaturom teče nazivna struja. Maksimalna trajna snaga pogonskog stroja iznosi 230 MW, a minimalna 30 MW. Praktična granica stabilnosti određena je pravcem konstantnog kuta opterećenja koji iznosi  $75^\circ$ . Minimalna uzbudna struja iznosi 15 % nazivne uzbude. Iz pogonskog dijagrama odredite:

- S kolikom maksimalnom radnom snagom (u MW) može generator raditi u kapacitivnom području uz  $\cos\varphi = 0,8$ ?
- Može li generator raditi u radnoj točki određenoj s  $P = 150$  MW,  $Q = 180$  Mvar? Zašto? Prikažite u dijagramu točke iz a) i b).

$$S_n = 247 \text{ MVA}$$

$$U_n = 13800 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\cos\varphi = 0,5$$

$$n = 3000 \text{ o/min}$$

$$\eta = 98,6\%$$

$$I_{f0} = 822 \text{ A}$$

$$I_{fk} = 1750 \text{ A}$$

$$P_{\max} = 230 \text{ MW}$$

$$P_{\min} = 30 \text{ MW}$$

$$\delta_{\max} = 75^\circ$$

$$I_{f\min} = 0,15 I_{fn}$$

Rješenje:

$$X_d = \frac{I_{fk}}{I_{f0}} = \frac{1750}{822} = 2,13 \text{ p.u.}$$

Sinkroni stroj ima visoku korisnost  $\eta$ , no ona nije jednaka 1. Izlazna, električna radna snaga, manja je od ulazne, mehaničke radne snage primljene od pogonskog stroja, turbine za gubitke u stroju.

$$P_{\max} = \frac{\eta P_{\max t}}{S_n} = \frac{0,986 \cdot 230}{247} = 0,92 \text{ p.u.}$$

$$P_{\min} = \frac{\eta P_{\min t}}{S_n} = \frac{0,986 \cdot 30}{247} = 0,12 \text{ p.u.}$$

Nakon ucrtavanja ograničenja minimalne i maksimalne radne snage, zagrijavanja armaturnog i uzbudnog namota, minimalne struje uzbude i praktične granice stabilnosti, mogu se očitati tražene radne točke.

a)  $\cos \varphi = 0,8$  kap.

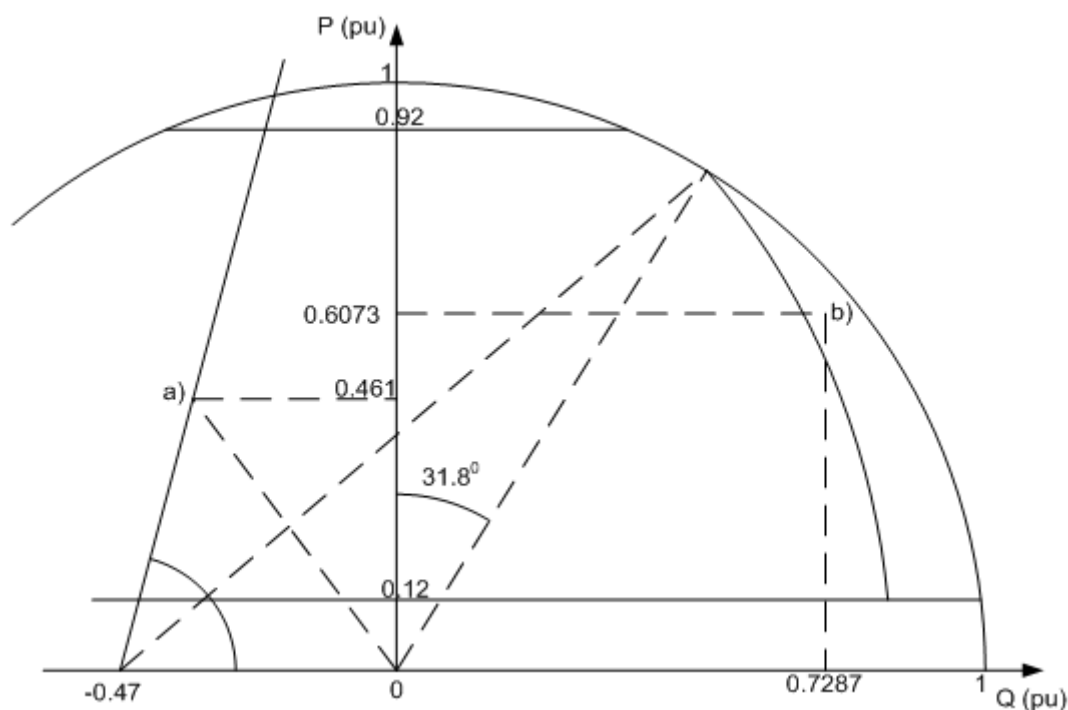
$$\underline{P}_{\max} = 0,461 \Rightarrow \underline{P}_{\max} = \underline{P}_{\max} \cdot S_n = \boxed{113,9 \text{ MW}}$$

a)  $P = 150 \text{ MW}$ ,  $Q = 180 \text{ MVar}$

$$\underline{P} = \frac{150}{247} = 0,6073 \text{ p.u.}$$

$$\underline{Q} = \frac{180}{247} = 0,7287 \text{ p.u.}$$

Stroj ne može trajno raditi u ovoj radnoj točki zbog pregrijavanja uzbudnog namota.



Sl. 4-1 Pogonski dijagram

4.2. Nacrtajte pogonski dijagram trofaznog sinkronog hidrogeneratora sljedećih nazivnih podataka: 35 MVA, 10,5 kV,  $\cos \varphi_n = 0,9$ , 50 Hz, 500 o/min,  $X_d = 126 \%$ ,  $X_q = 72 \%$ . Maksimalna trajna snaga pogonskog stroja koja može biti pretvorena u električnu energiju je 5 % veća od nazivne radne snage generatora, a minimalna snaga pogonskog stroja iznosi 10 % nazivne radne snage generatora. Maksimalna dozvoljena trajna uzbuđna struja je definirana s  $E_{0n}$ , a minimalna s  $0,1E_{0n}$ . Praktična granica stabilnosti je definirana 10%-tnom rezervom nazivne prividne snage od teorijske granice stabilnosti. Iz pogonskog dijagrama odredite:

- s kojim minimalnim  $\cos \varphi$  može generator raditi u kapacitivnom području (na praktičnoj granici stabilnosti) uz nazivnu struju armature?
- s kojom uzbuđnom strujom u odnosu na nazivnu uzбудu će generator raditi u radnoj točki u kojoj daje u mrežu 15 MW uz  $\cos \varphi = 0,6$  induktivno?

Prikažite u dijagramu točke iz a) i b).

$$S_n = 35 \text{ MVA}$$

$$U_n = 10,5 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\cos \varphi_n = 0,9$$

$$n = 500 \text{ o/min}$$

$$X_d = 126 \%$$

$$X_q = 72 \%$$

$$P_{\max} = 1,05 P_n$$

$$P_{\min} = 0,1 P_n$$

Rješenje:

Jedinice na pogonskom dijagramu mogu biti apsolutne (MVA, MW, Mvar) i relativne (p.u.). Lakše je čitati i crtati, koriste li se relativne jedinice.

$$\underline{P}_n = \frac{P_n}{S_n} = \frac{S_n \cos \varphi_n}{S_n} = \cos \varphi_n = 0,9 \text{ p.u.}$$

$$P_{\max} = 1,05 P_n = 1,05 \cdot 0,9 = 0,945 \text{ p.u.}$$

$$P_{\min} = 0,1 P_n = 0,1 \cdot 0,9 = 0,09 \text{ p.u.}$$

Nakon ucrtavanja ograničenja minimalne i maksimalne radne snage, zagrijavanja statorskog i rotorskog namota, minimalne struje uzbude i praktične granice stabilnosti, mogu se očitati tražene radne točke.

a) Traži se minimalni  $\cos \varphi$  u kapacitivnom režimu rada. Očitavanjem s dijagrama dobiva se:  $\boxed{\cos \varphi = 0,876 \text{ kap}}$ .

b)  $P = 15 \text{ MW} \Rightarrow \underline{P} = \frac{P}{S_n} = \frac{15}{35} = 0,43 \text{ p.u.}$  Ucrtavanjem nazivne i zadane radne točke

u dijagram, mogu se očitati i vrijednosti  $E_0$ , naponskog ekvivalenta uzbudnoj struji  $I_f$ .

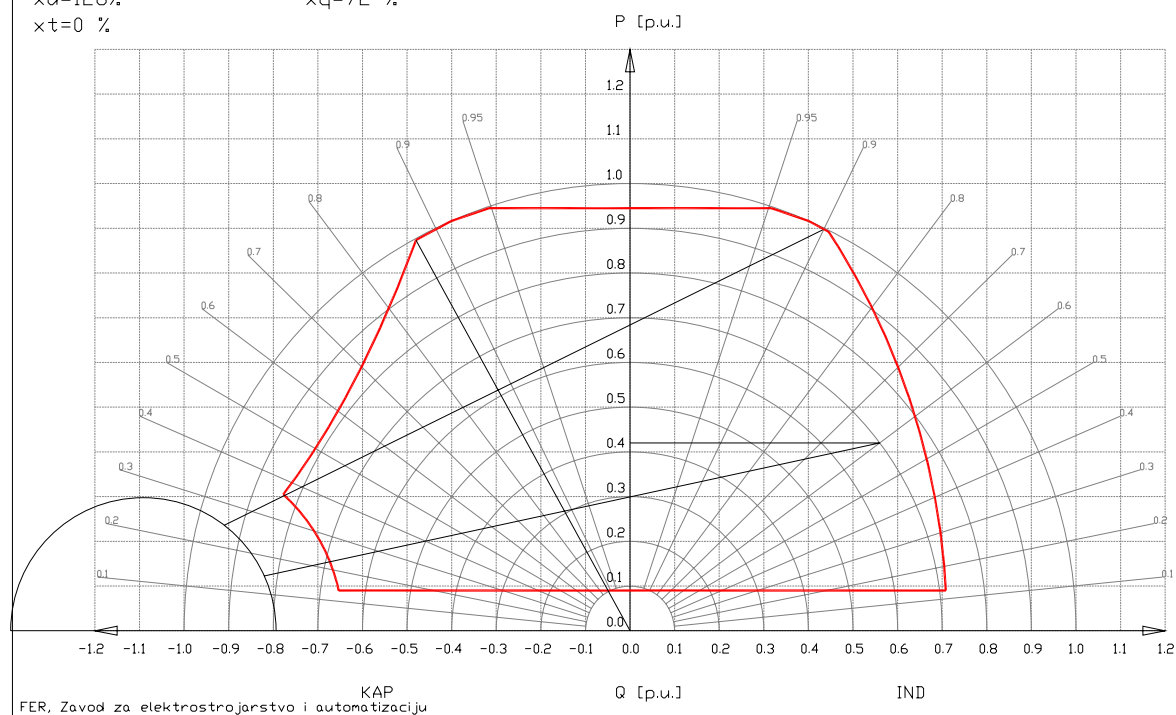
$$\frac{I_f}{I_{fn}} = \frac{8,15 \text{ cm}}{8,65 \text{ cm}} = \boxed{0,94}$$

HE Vinodol G1

Pogonski dijagram generatora

 $S_n = 35 \text{ MVA}$        $\cos\phi_n = 0.9$  $U_n = 10.5 \text{ kV } +0.5, -0.5 \%$        $I_n = 1.93 \text{ kA}$  $x_d = 126\%$        $x_q = 72\%$  $x_t = 0\%$ 

—— Nazivni napon 10.5 kV



Sl. 4-2 Pogonski dijagram

4.3. Nacrtajte pogonski dijagram trofaznog sinkronog hidrogeneratora sljedećih nazivnih podataka: 35 MVA, 10,5 kV,  $\cos\varphi_n = 0,9$ , 50 Hz, 500 o/min,  $\eta = 98,6\%$ ,  $X_d = 126\%$ ,  $X_q = 72\%$ . Maksimalna trajna snaga pogonskog stroja koja može biti pretvorena u električnu energiju je jednaka je nazivnoj radnoj snazi generatora, a minimalna snaga pogonskog stroja iznosi 11 % nazivne radne snage generatora. Maksimalna dozvoljena trajna uzbudna struja je definirana s  $E_{0n}$ , a minimalna s  $0,1E_{0n}$ . Praktična granica stabilnosti je definirana 10%-tnom rezervom nazivne prividne snage od teorijske granice stabilnosti. Iz pogonskog dijagrama odredite:

- S kolikom maksimalnom radnom snagom (u MW) može generator raditi u kapacitivnom području uz  $\cos\varphi = 0,7$ ?
- Može li generator raditi u radnoj točki određenoj s  $P = 21$  MW,  $Q = 24$  Mvar? Zašto?
- Može li generator raditi u radnoj točki određenoj s  $P = 7$  MW,  $Q = -21$  Mvar? Zašto?
- Može li generator raditi u radnoj točki određenoj s  $P = 7$  MW,  $Q = -28$  Mvar? Zašto?
- Može li generator raditi u radnoj točki određenoj s  $P = 17,5$  MW,  $Q = -24,5$  Mvar? Zašto?
- Odredite najveću induktivnu snagu koju stroj može dati u mrežu, ako istovremeno daje 17,5 MW?

Prikažite u dijagramu točke od a) i f).

- $P_{\max} = 21$  MW
- ne može
- može
- ne može
- ne može
- $Q_{\max} = 23,5$  Mvar