

RJEŠENJE Završnog ispita iz kolegija:
SINKRONI STROJEVI I UZBUĐNI SUSTAVI
23.6.2010.

1. Dva trofazna sinkrona turbogeneratorska, linijskog napona 10,5 kV, spoj Y, spojena su paralelno i napajaju mrežu snage 1500 kW, faktora snage $\cos \varphi = 0,84$ ind. Snage pogonskih strojeva su tako podešene da prvi generator daje dvostruko veću radnu snagu od drugog. Više opterećenom generatoru uzbuda je tako namještena da radi sa faktorom snage $\cos \varphi_1 = 0,76$ ind. Sinkrona reaktancija drugog stroja je $X_{d2} = 52 \Omega$ po fazi. Izračunati radnu snagu, jalovu snagu, prividnu snagu, armaturnu struju, faktor snage, prividni inducirani napon i kut opterećenja, sve za drugi stroj. Radni otpor namota zanemariti.

(4 boda)

$$P = P_1 + P_2$$

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = \frac{1}{3} P = \frac{1}{3} 1500 = 500 \text{ kW} \\ P_1 = 2P_2 = 1000 \text{ kW} \end{array} \right\} \quad \boxed{0,5}$$

$$\left. \begin{array}{l} S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1500}{0,84} = 1785,7 \text{ kVA} \\ S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} = \frac{1000}{0,76} = 1315,8 \text{ kVA} \end{array} \right\}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{1785,7^2 - 1500^2} = 968,9 \text{ kVAr}$$

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = \sqrt{1315,8^2 - 1000^2} = 855,2 \text{ kVAr} \quad \boxed{Q_2 = Q - Q_1 = 113,7 \text{ kVAr}} \quad \boxed{1,0}$$

$$\boxed{S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{500^2 + 113,7^2} = 512,8 \text{ kVA}} \quad \boxed{0,5}$$

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{512,8}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 28,2 \text{ A} \quad \boxed{0,5}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{500}{512,8} = 0,975 \text{ ind.} \quad \boxed{0,5}$$

$$\text{Iz fazorskog dijagrama: } E_{02} = \sqrt{\left(\frac{U}{\sqrt{3}} + I_2 \cdot X_{d2} \cdot \sin \varphi_2 \right)^2 + (I_2 \cdot X_{d2} \cdot \cos \varphi_2)^2}$$

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = 0,222$$

$$E_{02} = \sqrt{\left(\frac{10500}{\sqrt{3}} + 28,2 \cdot 52 \cdot 0,222 \right)^2 + (28,2 \cdot 52 \cdot 0,975)^2}$$

$$E_{02} = 6546 \text{ V po fazi} \quad \boxed{0,5}$$

$$\delta_2 = \arctan \frac{I_2 \cdot X_{d2} \cdot \cos \varphi_2}{\frac{U}{\sqrt{3}} + I_2 \cdot X_{d2} \cdot \sin \varphi_2} = \arctan \frac{989,7}{6908,7} = 12,6^\circ \quad \boxed{0,5}$$

2. Trofazni sinkroni turbogenerator s podacima 247 MVA, 13,8 kV, $\cos \varphi_n = 0,9$, $I_{fn} = 2500$ A $X_d = 210$ % radi u nazivnoj radnoj točki (N). U jednom trenutku se pojavi zahtjev za povećanjem jalove snage koju generator daje u mrežu za 20 %. Uz uvjet da generator u **novoj radnoj točki** (T) istovremeno daje u mrežu **najveću moguću radnu snagu** s obzirom na **ograničenja uzbude i armature**, odredite pomoću **fazorskog** ili **pogonskog** dijagrama:

- iznos radne snage (u MW) i uzbudne struje (u A) u tom slučaju.
- s kojim faktorom snage i kojom strujom armature (u A) će generator raditi u novoj radnoj točki?

Ucrtajte nazivnu radnu točku (N) i novu radnu točku (T) u pogonski dijagram određen sa granicama ($P_{\min} = 0,1P_n$, $P_{\max} = P_n$, praktična granica stabilnosti: $\delta = 75^\circ$, $I_{f\min} = 0,1 I_{fn}$). Crtajte u mjerilu 10 cm = 1 p.u.

(5 bodova)

Rješenje preko fazorskog dijagrama:

Jalova snaga regulira se strujom uzbude. Za više jalove snage uzbudnu struju trebalo bi povećati. Međutim nazivna uzbudna struja već je najveća moguća s obzirom na zagrijavanje uzbudnog namota jer generator radi u nazivnoj radnoj točki.

Zato regulatorom turbine moramo malo smanjiti radnu snagu predanu generatoru pri čemu se smanjuje ukupni iznos struje armature i smanjuje $\cos \varphi$, ali i povećava jalova snaga uz maksimalnu moguću radnu snagu.

$$\cos \varphi_n = 0,9 \rightarrow \sin \varphi_n = 0,4359 \quad I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{247 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 10334 \text{ A}$$

$$E_0 = \sqrt{U^2 + (IX_d)^2 + 2UIX_d \sin \varphi} = \sqrt{1^2 + (1 \cdot 2,1)^2 + 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,1 \cdot 0,4359} = 2,691 \text{ p.u.} \quad [0,5]$$

$$Q = Q_n = UI \sin \varphi_n = 1 \cdot 1 \cdot 0,4359 = 0,4359 \text{ p.u.} \quad [0,5]$$

$$Q' = 1,2 \cdot Q_n = 1,2 \cdot 0,4359 = 0,5231 \text{ p.u.} \quad [0,5]$$

$Q' = UI' \sin \varphi'$ – dva nepoznata parametra u ovoj jednakosti

$$I'_f = I_{fn} \Rightarrow E'_0 = E_0 \quad I'_f = 2500 \text{ A} \quad [0,5]$$

$$E_0^2 = U^2 + (IX_d)^2 + 2X_d UI' \sin \varphi' = U^2 + (IX_d)^2 + 2X_d Q'$$

$$I' = \frac{1}{X_d} \sqrt{E_0^2 - U^2 - 2X_d Q'} = \frac{1}{2,1} \sqrt{2,691^2 - 1^2 - 2 \cdot 2,1 \cdot 0,5231} = 0,9577 \text{ p.u.} \quad [0,5]$$

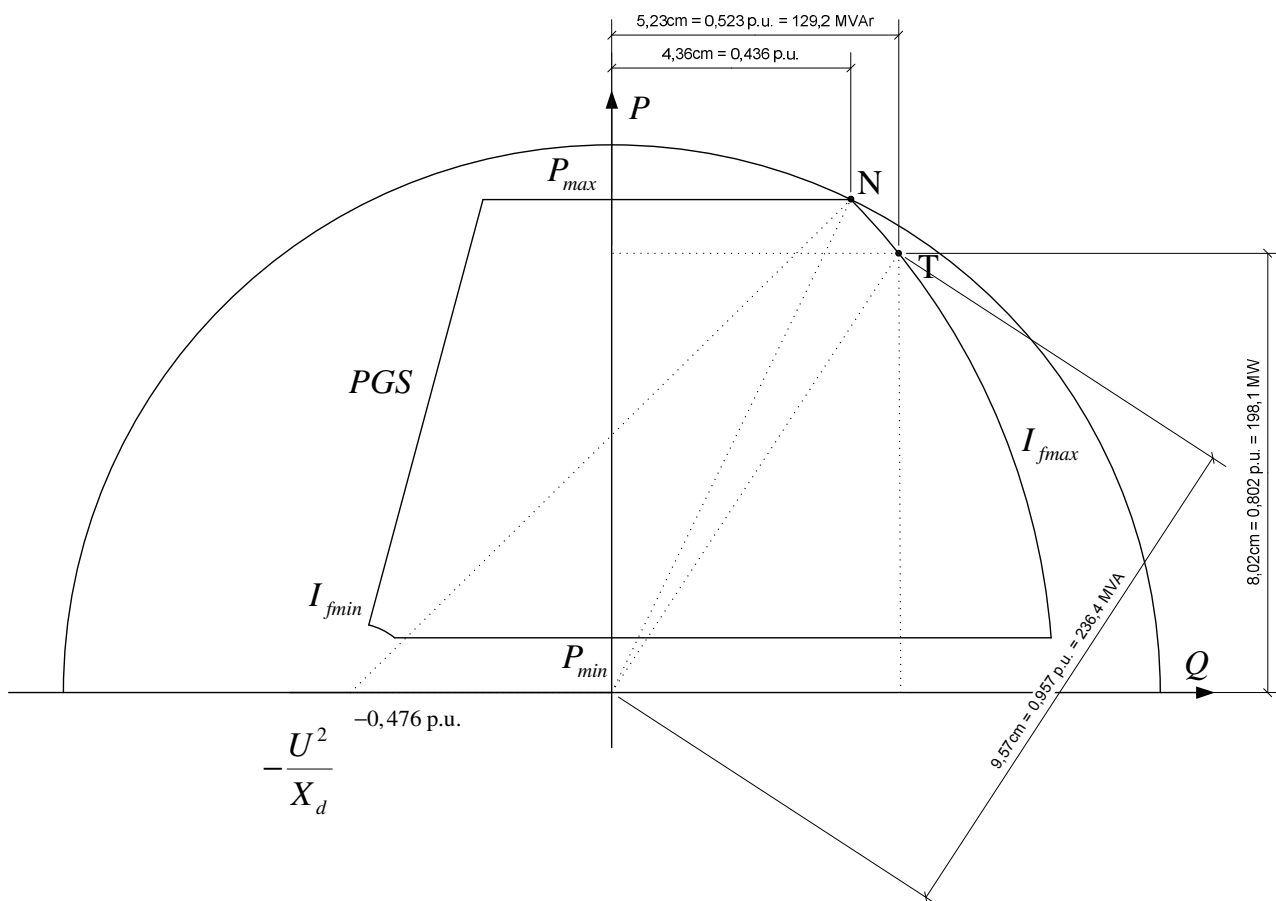
$$I' = 0,9577 \cdot I_n = 0,9577 \cdot 10334 = 9897 \text{ A} \quad [0,5]$$

$$\sin \varphi' = \frac{Q'}{UI'} = \frac{0,5231}{1 \cdot 0,9577} = 0,5462 \Rightarrow \varphi' = 33,11^\circ \Rightarrow \cos \varphi' = 0,838 \quad [0,5]$$

$$P' = S_n UI' \cos \varphi' = 247 \cdot 1 \cdot 0,9577 \cdot 0,8377 = 198,2 \text{ MW} \quad [0,5]$$

Korektan dijagram s granicama: [0,5]

Korektno ucrtana točka na dijagramu: [0,5]



Rješenje preko pogonskog dijagrama:

Izmjeriti: $Q_N = 4,36\text{ cm} = 0,436\text{ p.u.}$

Izračunati: $Q_T = 1,2 \cdot Q_N = 1,2 \cdot 0,436 = 0,523\text{ p.u.} = 5,23\text{ cm}$

Točka T mora biti na granici zagrijavanja uzbuđenog namota: $I'_f = I_{fn} = 2500\text{ A}$ 1,0

Izmjeriti: $P_T = 8,02\text{ cm} = 0,802\text{ p.u.} = 0,802 \cdot 247 = 198,1\text{ MW}$ 1,0

Izmjeriti: $S_T = 9,57\text{ cm} = 0,957\text{ p.u.}$

$\underline{S} = \underline{I} \Rightarrow$

$$I' = 0,957 \cdot I_n = 0,957 \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 0,957 \cdot \frac{247 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 9890\text{ A} \quad \text{1,5}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{0,802}{0,957} = 0,838 \quad \text{0,5}$$

Korektan dijagram s granicama: 0,5

Korektno ucrtana točka na dijagramu: 0,5

3. 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 (u Nm) nazivno opterećenog generatora uz nazivni napon?

b) Kolika je prekretna radna snaga (u MW), ako je generator opterećen s 10 MVA uz $\cos\varphi = 0,6$ ind. i napon 8 kV?

(4 boda)

Rješenje:

$$\underline{M} = \underline{P} = \frac{\underline{E}_0 \cdot \underline{U}}{\underline{X}_d} \cdot \sin \delta \quad M = \frac{S_n}{\omega_m} \cdot \underline{M} = \frac{S_n}{\frac{n \cdot \pi}{30}} \cdot \frac{\underline{E}_0 \cdot \underline{U}}{\underline{X}_d} \cdot \sin \delta$$

$$a) M_{npr} = \frac{S_n}{\omega_m} \cdot \underline{M} = \frac{S_n}{\frac{n \cdot \pi}{30}} \cdot \frac{\underline{E}_{0n} \cdot \underline{U}_n}{\underline{X}_d} \cdot \sin \delta_{pr}$$

$$\delta_{pr} \rightarrow \sin \delta_{pr} = 1$$

$$\cos \varphi_n = 0,8 \rightarrow \sin \varphi_n = 0,6$$

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

$$\underline{E}_{0n}^2 = \underline{U}_n^2 + (\underline{I}_n \underline{X}_d)^2 + 2 \cdot \underline{U}_n \cdot \underline{I}_n \underline{X}_d \cdot \sin \varphi_n = 1^2 + 2^2 + 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,6 = 7,4$$

$$\underline{E}_{0n} = 2,72 \text{ p.u.} \quad \boxed{1,0}$$

$$M_{npr} = \frac{S_n}{\frac{n \cdot \pi}{30}} \cdot \frac{\underline{E}_{0n} \cdot \underline{U}_n}{\underline{X}_d} \cdot \sin \delta_{pr} = \frac{16 \cdot 10^6}{3000 \cdot \pi} \cdot \frac{2,72 \cdot 1}{2} \cdot 1 = \boxed{69264 \text{ Nm}} \quad \boxed{1,0}$$

$$b) \cos \varphi = 0,6 \rightarrow \sin \varphi = 0,8$$

$$\underline{U} = \frac{\underline{U}}{\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}}} = \frac{8000}{10500} = 0,762 \quad \underline{I} = \frac{\underline{I}}{\underline{I}_n} = \frac{\frac{S}{\sqrt{3}U}}{\frac{S_n}{\sqrt{3}U_n}} = \frac{S \cdot U_n}{S_n \cdot U} = \frac{10 \cdot 10,5}{16 \cdot 8} = 0,82$$

$$\underline{E}_0^2 = \underline{U}^2 + (\underline{I} \underline{X}_d)^2 + 2 \cdot \underline{U} \cdot \underline{I} \underline{X}_d \cdot \sin \varphi_n = 0,762^2 + (0,82 \cdot 2)^2 + 2 \cdot 0,762 \cdot 0,82 \cdot 2 \cdot 0,8 = 5,27$$

$$\underline{E}_{0n} = 2,30 \text{ p.u.} \quad \boxed{1,0}$$

$$P_{pr} = S_n \cdot \frac{\underline{E}_0 \cdot \underline{U}}{\underline{X}_d} \cdot \sin \delta_{pr} = \frac{2,30 \cdot 0,762}{2} \cdot 1 = \boxed{14,02 \text{ MW}} \quad \boxed{1,0}$$

4. Koliki je fazni inducirani napon trofaznog 4-polnog turbogenerators koji ima dvoslojni štapni namot (2 vodiča po utoru) smješten u 60 utora? Faktor namota iznosi 0,9. Stroj je uzbuđen tako da magnetski tok po polu iznosi 1,264 Vs. Brzina vrtnje iznosi 1500 o/min.

(2 boda)

Rješenje:

Inducirani napon po fazi iznosi:

$$E = 4,44 \cdot f_n \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_{gl} \quad \boxed{0,5}$$

Frekvencija se dobije iz broja pari polova i brzine vrtnje: $f = \frac{np}{60} = 50 \text{ Hz}$. $\boxed{0,5}$

Dvoslojni štapni namot (2 vodiča po utoru) u 60 utora daje broj svitaka:

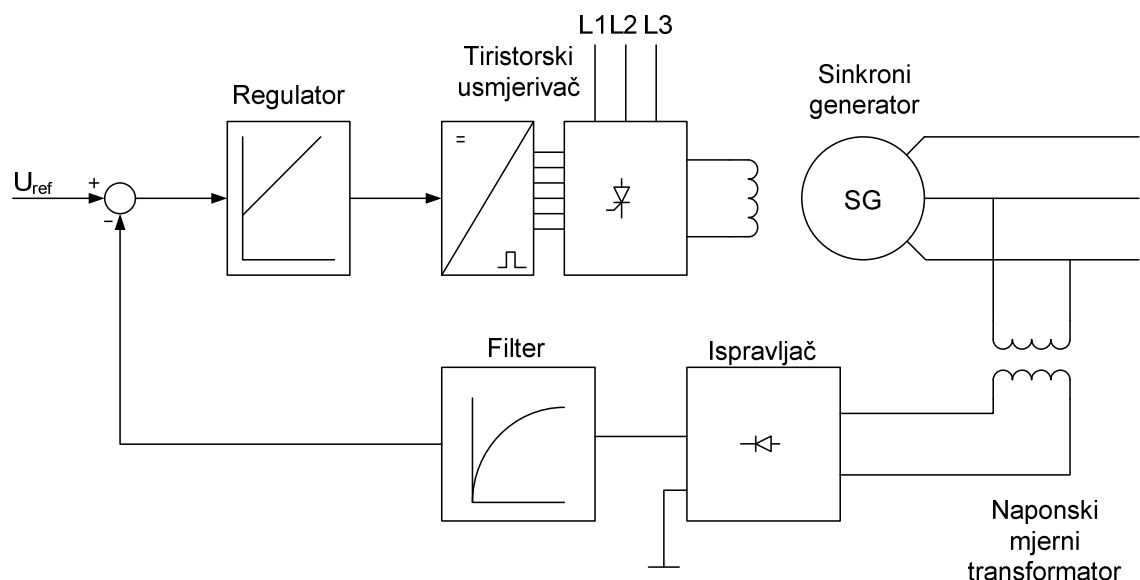
$$w_2 = \frac{60 \text{ (utora)} \cdot 2 \text{ (vodiča po utoru)}}{2 \text{ (vodiča u svitku)} \cdot 3 \text{ (broj faza)}} = 20 \quad \boxed{0,5}$$

$$E = 4,44 \cdot f_n \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_{gl} = 4,44 \cdot 0,9 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 1,264 = 5051 \text{ V} \quad \boxed{0,5}$$

5. U sustavu regulacije napona prema slici ugrađen je regulator napona prijenosne funkcije

$$G_R(s) = 2,7 \frac{1+2s}{s}. \text{ Potrebno je:}$$

- Odrediti da li je ugrađeni regulator podešen po tehničkom optimumu?
- Skicirati odziv napona sinkronog generatora na skokovitu ulaznu pobudu u iznosu od 0 do U_{refn} za ugrađeni regulator i regulator podešen po tehničkom optimumu.
- Kvalitativno skicirati odziv napona generatora ukoliko u sustavu regulacije napona prema slici u nekom trenutku t dođe do pucanja povratne veze po naponu. Referentna vrijednost napona generatora je podešena na $0,5U_{refn}$, a izlaz iz regulatora napona limitiran je na $1,2U_n$. (potrebno je kvalitativno skicirati odziv napona prije i poslije pucanja povratne veze).
- Odrediti da li će se napon generatora u sustavu regulacije napona prema slici promijeniti ukoliko se ispravljač s konstantom $k_i = 0,8$ zamijeni ispravljačem s konstantom $k_{i2} = 0,9$ (potrebno je u jednoj rečenici komentirati odgovor).



- tiristorski most: $k_{tm}=15$
- sinkroni generator: $k_g=12$, $T_g=2s$
- naponski mjerni transformator: $k_t=0.03$
- ispravljač: $k_i=0.8$
- filter: $k_f=1$, $T_f=0.2s$

(5 bodova)

Rješenja potražiti kod dr. sc. Nevena Bulića.