

Poglavlje 4

PRORAČUN STABILNOSTI

Zadatak 4.1

a) Izvesti opšte izraze za proračun odate aktivne i reaktivne snage generatora se cilindričnim rotorom (turbogenerator) i na primeru mašine čiji su osnovni parametri $S_{nG} = 100$ MVA; $X_d = 100\%$, koja u mrežu odaje prividnu snagu $S_G = 100$ MVA posredstvom generatorskog blok-transformatora reaktanse $X_T = 10\%$, naći sinhronizacione snage pri induktivnom i kapacitivnom faktoru snage od 0,9 i naponu na strani višeg napona generatorskog blok-transformatora (mreža) $U_n = 1,00$ r.j.

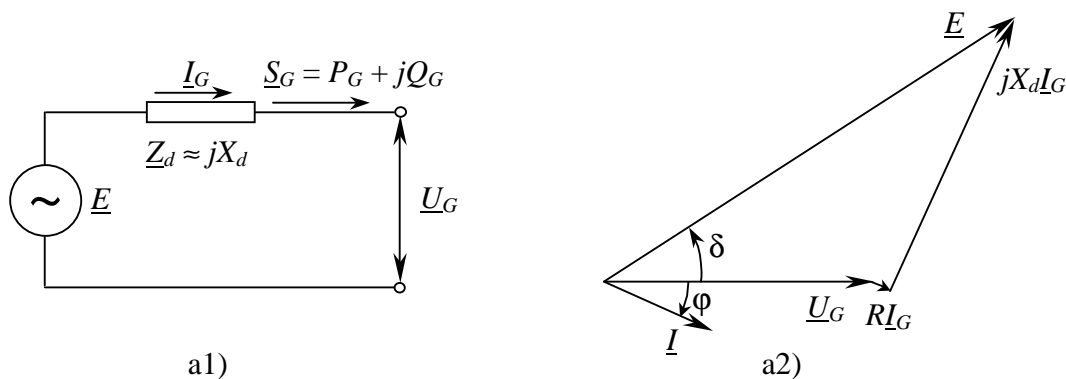
b) Izvesti opšte izraze za proračun aktivne i reaktivne snage na krajevima sinhronog generatora sa istaknutim polovima (hidrogenerator) i na primeru mašine čiji su osnovni parametri $E = 2U_G$; $X_d = 1,45X_q$, odrediti granični ugao i maksimalnu aktivnu snagu mašine sa aspekta statičke stabilnosti.

Rešenje:

a) Theveninov ekvivalent i fazorski dijagram napona i struje turbogeneratora u stacionarnom stanju, prikazani su na sl. 4.1a. Umesto faznih vrednosti napona i struja, na ovim dijagramima su, kao i u ranijim zadacima korišćene računске vrednosti napona i struja, definisane u zadatku 1.4 kao:

$$\underline{U} = \sqrt{3} \underline{U}_f ;$$

$$\underline{I} = \sqrt{3} \underline{I}_f ,$$



Sl. 4.1a Theveninov ekvivalent (a1) i fazorski dijagram napona i struje (a2) turbogeneratora

pri čemu su struje i naponi izraženi u apsolutnim jedinicama. Pri normalizaciji, za bazne vrednosti računskih napona i struja koriste se $\sqrt{3}$ veće vrednosti od baznih faznih vrednosti, odnosno:

$$U_B = \sqrt{3} U_{fB} ;$$

$$I_B = \sqrt{3} I_{fB} ,$$

tako da su računski i fazni naponi i struje izraženi u relativnim jedinicama jednaki i po amplitudi i po fazi:

$$\underline{U}_{r.j.} = \frac{\underline{U}}{U_B} = \frac{\underline{U}}{\sqrt{3}U_{fB}} = \frac{\underline{U}_f}{U_{fB}} = \underline{U}_{f.r.j.} ;$$

$$\underline{I}_{r.j.} = \frac{\underline{I}}{I_B} = \frac{\underline{I}}{\sqrt{3}I_{fB}} = \frac{\underline{I}_f}{I_{fB}} = \underline{I}_{f.r.j.} ,$$

Posledica toga je da se sve relacije mogu pisati bez posebnog isticanja da li se radi o faznim ili računskim vrednostima promenljivih, a u izrazima za snagu da li se radi o monofaznim ili trofaznim snagama. Time se vrši izjednačavanje svih relacija za monofazna i trofazna kola, što predstavlja jednu od važnih prednosti uvođenja sistema relativnih jedinica.

U izrazima za trofazne snage, date u apsolutnim jedinicama, korišćenjem računskih vrednosti napona i struja gubi se koeficijent 3:

$$\underline{S} = 3\underline{U}_f \underline{I}_f^* = \underline{U} \underline{I}^* ,$$

odnosno ovaj izraz se izjednačava sa izrazom za snagu izraženu u relativnim jedinicama. Prema tome, korišćenjem dijagrama sa sl. 4.1a, izraz za kompleksnu snagu generatora, koji važi kada se sve veličine izraze bilo u apsolutnim ili relativnim jedinicama je:

$$\underline{S}_G = \underline{U}_G \underline{I}_G^* ,$$

gde je:

$$\underline{I}_G = \frac{\underline{E} - \underline{U}_G}{\underline{Z}_d} = \frac{E \angle \delta - U_G \angle 0^\circ}{Z_d \angle \psi} , \text{ gde je } \psi = \arctg \frac{X}{R} \approx 90^\circ ,$$

tako da on postaje:

$$\underline{S}_G = P_G + jQ_G = \underline{U}_G \frac{\underline{E}^* - \underline{U}_G^*}{\underline{Z}_d^*} = U_G \frac{E \angle -\delta - U_G}{Z_d \angle -\psi} = \frac{EU_G \angle \psi - \delta - U_G^2 \angle \psi}{Z_d}$$

Iz izraza za kompleksnu snagu dobijaju se izrazi za aktivnu i reaktivnu snagu na krajevima turbogeneratora:

$$P_G = \frac{EU_G}{Z_d} \cos(\psi - \delta) - \frac{U_G^2}{Z_d} \cos \psi \approx \frac{EU_G}{X_d} \sin \delta ;$$

$$Q_G = \frac{EU_G}{Z_d} \sin(\psi - \delta) - \frac{U_G^2}{Z_d} \sin \psi \approx \frac{EU_G}{X_d} \cos \delta - \frac{U_G^2}{X_d} .$$

Numerički primer:

Induktivni režim:

$$P_G^{ind} = 0,9 \text{ r.j.}$$

$$Q_G^{ind} = 0,436 \text{ r.j.}$$

$$\underline{I}_G^{ind} = (0,9 - j0,436) \text{ r.j.}$$

$$\begin{aligned} \underline{E}^{ind} &= \underline{U}_G + j(X_d + X_T)\underline{I}_G^{ind} = \\ &= 1,0 + j1,1 \cdot (0,9 - j0,436) = \\ &= (1,4795 + j0,99) \text{ r.j.} = 1,78 \text{ r.j.} \angle 33,789^\circ \end{aligned}$$

$$\delta_0^{ind} = 33,789^\circ$$

$$P_{max}^{ind} = \frac{E^{ind} U_G}{X_d + X_T} = \frac{1,78 \cdot 1}{1,0 + 0,1} = 1,618 \text{ r.j.}$$

Kapacitivni režim:

$$P_G^{cap} = 0,9 \text{ r.j.}$$

$$Q_G^{cap} = 0,436 \text{ r.j.}$$

$$\underline{I}_G^{cap} = (0,9 + j0,436) \text{ r.j.}$$

$$\begin{aligned} \underline{E}^{cap} &= \underline{U}_G + j(X_d + X_T)\underline{I}_G^{cap} = \\ &= 1,0 + j1,1 \cdot (0,9 + j0,436) = \\ &= (0,5205 + j0,99) \text{ r.j.} = 1,1185 \text{ r.j.} \angle 62,267^\circ \end{aligned}$$

$$\delta_0^{cap} = 62,267^\circ$$

$$P_{max}^{cap} = \frac{E^{cap} U_G}{X_d + X_T} = \frac{1,1185 \cdot 1}{1,0 + 0,1} = 1,0168 \text{ r.j.}$$

Rezerve stabilnosti su onda:

$$(RS)^{ind} = \frac{P_{max}^{ind}}{P_G} = \frac{1,618}{0,9} = 1,7981 ,$$

ili 79,81 % .

$$(RS)^{cap} = \frac{P_{max}^{cap}}{P_G} = \frac{1,0168}{0,9} = 1,1298 ,$$

ili 12,98 % .

Izrazi za krive njihanja $P(\delta)$ su:

$$P^{ind} = 1,618 \sin \delta .$$

$$P^{cap} = 1,0168 \sin \delta .$$

Sinhronizacione snage su:

$$P_s^{ind} = P_{max}^{ind} \cos \delta_0^{ind} = 1,618 \cdot 0,83 = 1,345 \text{ r.j./rad} . \quad P_s^{cap} = P_{max}^{cap} \cos \delta_0^{cap} = 1,0168 \cdot 0,465 = 0,473 \text{ r.j./rad} .$$

b) Sa fazorskog dijagrama napona i struja generatora sa istaknutim polovima prikazanog na sl. 4.1b, mogu se izvesti sledeće osnovne relacije

$$\underline{I}_G = \underline{I}_d + \underline{I}_q ;$$

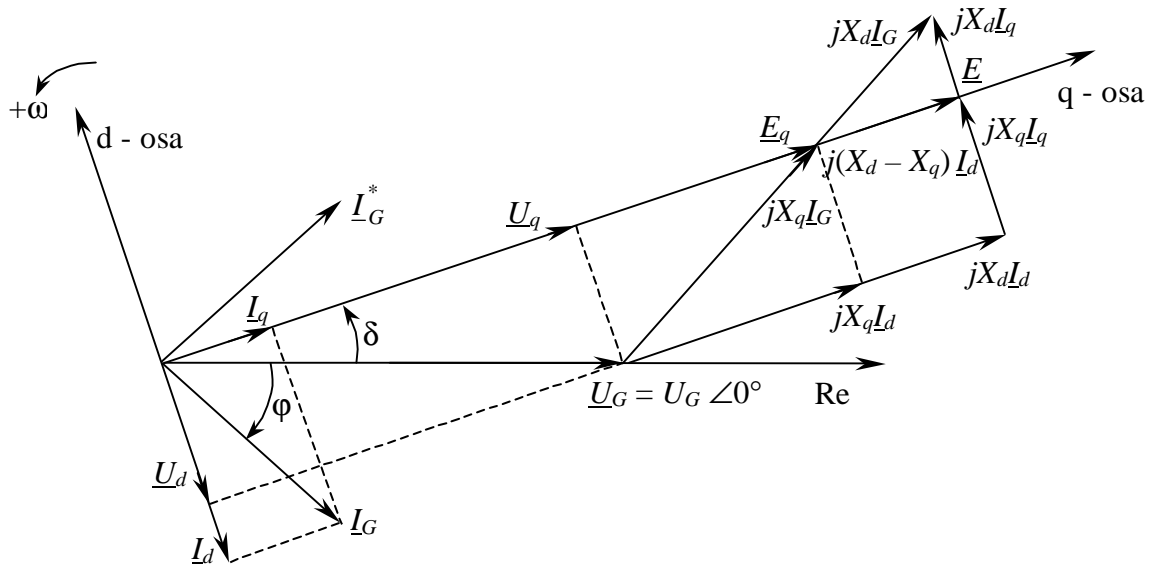
$$\underline{U}_G = \underline{U}_d + \underline{U}_q ;$$

$$I_d = -\frac{E - U_G \cos \delta}{X_d} ;$$

$$U_d = -U_G \sin \delta ;$$

$$I_q = \frac{U_G \sin \delta}{X_q} ;$$

$$U_q = U_G \cos \delta .$$



Sl. 4.1b Fazorski dijagram napona i struja sinhronog generatora sa istaknutim polovima

Aktivna i reaktivna snaga na krajevima generatora, sa svim veličinama izraženim u relativnim jedinicama računaju se preko relacija:

$$P_G = U_d I_d + U_q I_q ;$$

$$Q_G = U_d I_q - U_q I_d ;$$

odakle je:

$$P_G = (-U_G \sin \delta) \left(-\frac{E - U_G \cos \delta}{X_d} \right) + U_G \cos \delta \frac{U_G \sin \delta}{X_q} = \frac{EU_G}{X_d} \sin \delta + \frac{U_G^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\delta ;$$

$$\begin{aligned} Q_G &= (-U_G \sin \delta) \frac{U_G \sin \delta}{X_q} - U_G \cos \delta \left(-\frac{E - U_G \cos \delta}{X_d} \right) = \frac{EU_G}{X_d} \cos \delta - U_G^2 \left(\frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right) = \\ &= \frac{EU_G}{X_d} \cos \delta - U_G^2 \left(\frac{1 + \cos 2\delta}{2X_d} + \frac{1 - \cos 2\delta}{2X_q} \right) = \frac{EU_G}{X_d} \cos \delta - \frac{U_G^2}{2} \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} + \frac{U_G^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos 2\delta . \end{aligned}$$

Granica statičke stabilnosti se ima pri nultoj vrednosti sinhronizacione snage, tj. za

$$P_s = \frac{dP_G}{d\delta} = \frac{EU_G}{X_d} \cos \delta + U_G^2 \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos 2\delta = 0 ; \text{ gde je } \cos 2\delta = 2 \cos^2 \delta - 1 .$$

Posle preuređenja, gornja jednačina po $\delta = \delta_{gr}$ dobija oblik:

$$2U_G \frac{X_d - X_q}{X_q} \cos^2 \delta + E \cos \delta - U_G \frac{X_d - X_q}{X_q} = 0 .$$

Stavljajući $a = U_G \frac{X_d - X_q}{X_q}$, rešenje te jednačina je:

$$\cos \delta_{gr} = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 8a^2}}{4a} .$$

Za $a = 0,45U_G$ i $E = 2U_G$ ima se:

$$\cos \delta_{gr} = \frac{-2U_G + \sqrt{4U_G^2 + 8 \cdot (0,45U_G)^2}}{1,8U_G} = \frac{-2 + 2,3707}{1,8} = 0,20595 \Rightarrow \delta_{gr} = 78,12^\circ .$$

Maksimalna snaga generatora je onda:

$$P_{G_{max}} = \frac{2U_G \cdot U_G}{1,45 X_q} \sin 78,12^\circ + \frac{U_G^2}{2 X_q} \frac{0,45 X_q}{1,45 X_q} \sin 156,24^\circ = 1,3498 \frac{U_G^2}{X_q} + 0,0625 \frac{U_G^2}{X_q} = 1,4123 \frac{U_G^2}{X_q} .$$

□

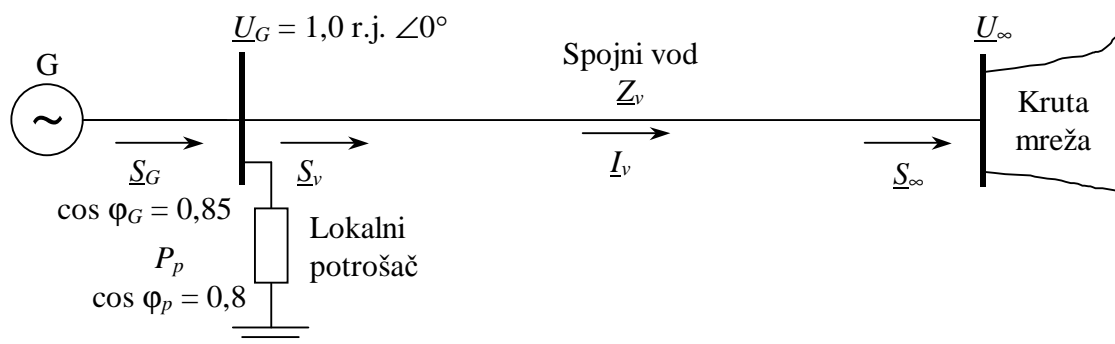
Zadatak 4.2

Sinhroni generator sa sl. 4.2a, priključen je na krutu mrežu preko spojnog voda impedanse $\underline{Z}_v = (0,1 + j0,4)$ r.j. Sa sabirnica generatora napaja se lokalno opterećenje $P_p = 0,4$ r.j. pri $\cos \varphi_p = 0,8$. Snaga merena na krajevima generatora je $P_G = 1,0$ r.j. pri $\cos \varphi_G = 0,85$ i naponu $U_G = 1,0$ r.j.

a) Naći fazore struje koja teče po vodu \underline{I}_v i napona krute mreže \underline{U}_∞ .

b) Proračunati aktivne i reaktivne gubitke u spojnom vodu, faktor snage $\cos \varphi_\infty$ i kompleksnu snagu ($\underline{S}_\infty = P_\infty + jQ_\infty$) koja se isporučuje krutoj mreži.

c) Iz izraza za tok aktivne snage na kraju spojnog voda $P_\infty(\theta)$, naći koeficijent sinhronizacione snage, za $P_\infty = P_\infty(\theta = \theta_\infty)$.



Sl. 4.2a Uprošćena šema sistema iz zadatka 4.2

Rešenje:

a) Kompleksne snage generatora i potrošača su:

$$\underline{S}_G = P_G + jQ_G = P_G(1 + j \operatorname{tg} \varphi_G) = (1 + j0,62) \text{ r.j.} = 1,177 \text{ r.j.} \angle 31,8^\circ ;$$

$$\underline{S}_p = P_p + jQ_p = P_p(1 + j \operatorname{tg} \varphi_p) = (0,4 + j0,3) \text{ r.j.} = 0,5 \text{ r.j.} \angle 36,87^\circ .$$

Kompleksna snaga koju generator isporučuje spojnom vodu je:

$$\underline{S}_v = \underline{S}_G - \underline{S}_p = (1 + j0,62) - (0,4 + j0,3) = (0,6 + j0,32) \text{ r.j.} = 0,68 \text{ r.j.} \angle 28,07^\circ .$$

Kompleksna struja koja teče kroz spojni vod je:

$$\underline{I}_v = \frac{\underline{S}_v^*}{\underline{U}_G^*} = \frac{0,68 \angle -28,07^\circ}{1,0} = (0,6 - j0,32) \text{ r.j.} = 0,68 \text{ r.j.} \angle -28,07^\circ .$$

Pad napona u spojnom vodu je:

$$\Delta \underline{U}_v = \underline{Z}_v \underline{I}_v = (0,1 + j0,4) \cdot (0,6 - j0,32) = (0,188 + j0,208) \text{ r.j.}$$

Kompleksni napon na sabirnicama krute mreže je:

$$\underline{U}_\infty = \underline{U}_G - \Delta \underline{U}_v = 1,0 - 0,188 - j0,208 = (0,812 - j0,208) \text{ r.j.} = 0,838 \text{ r.j.} \angle -14,37^\circ .$$

b) Kompleksna snaga koja se isporučuje krutoj mreži je:

$$\underline{S}_\infty = \underline{U}_\infty \underline{I}_v^* = 0,838 \angle -14,37^\circ \cdot 0,68 \angle 28,07^\circ = 0,57 \text{ r.j.} \angle 13,70^\circ = (0,554 + j0,135) \text{ r.j.}$$

Faktor snage koja se isporučuje krutoj mreži je:

$$\cos \varphi_\infty = \frac{P_\infty}{S_\infty} = \frac{0,554}{0,57} = 0,972 \text{ (ind. jer je } Q_\infty \text{ pozitivno).}$$

Gubici u spojnom vodu su:

$$\begin{aligned} \underline{S}_v^{gub} &= \underline{Z}_v \underline{I}_v^2 = (0,1 + j0,4) \cdot 0,68^2 = (0,046 + j0,185) \text{ r.j.}; \\ P_v^{gub} &= 0,046 \text{ r.j.}; \quad Q_v^{gub} = 0,185 \text{ r.j.} \end{aligned}$$

Provera:

$$\underline{S}_v^{gub} = \underline{S}_v - \underline{S}_\infty = (0,6 + j0,32) - (0,554 + j0,135) = (0,046 + j0,185) \text{ r.j.}$$

c) Izraz za tok aktivne snage na kraju prenosnog voda je:

$$P_\infty = -\frac{U_\infty^2}{Z_v} \sin \mu_v - \frac{U_G U_\infty}{Z_v} \sin(\theta_{21} - \mu_v),$$

gde je:

$$\theta_{21} = \theta_\infty - 0 = \theta_\infty;$$

$$\mu_v = 90^\circ - \arg \underline{Z}_v = 90^\circ - \arctg \frac{0,4}{0,1} = 90^\circ - 75,97^\circ = 14,03^\circ; \quad \underline{Z}_v = 0,4123 \angle 75,97^\circ,$$

tako da je:

$$P_\infty = -\frac{0,838^2}{0,4123} \sin 14,03^\circ - \frac{1,0 \cdot 0,838}{0,4123} \sin(\theta_\infty - 14,03^\circ) = -0,413 - 2,033 \sin(\theta_\infty - 14,03^\circ).$$

Sinhronizaciona snaga na kraju voda je:

$$P_s = -\frac{dP_\infty}{d\theta_\infty} = 2,033 \cos(\theta_\infty - 14,03^\circ) = 2,033 \cos(-14,37^\circ - 14,03^\circ) = 1,788 \text{ r.j./rad}$$

(znak '-' ispred izvoda $\frac{dP_\infty}{d\theta_\infty}$ u formuli za P_s potiče iz činjenice da sabirnice krute mreže predstavljaju potrošački čvor).

□

Zadatak 4.3

a) Za hidrogenerator priključen na moćnu mrežu posredstvom generatorskog blok-transformatora, u koju odaje snagu $\underline{S}_\infty = 88,2 + j66,15$ MVA, pri $U_\infty = U_n$, izračunati sinhronizacionu snagu, ako su osnovni podaci:

$$\begin{array}{ll} \text{G:} & S_{nG} = 110,25 \text{ MVA}; \\ & U_{nG} = 10,5 \text{ kV}; \\ & X_d = 125\%; \\ & X_q = 0,72X_d = 90\%; \\ \text{BT:} & S_{nT} = 110,25 \text{ MVA}; \\ & U_{nT} = 10,5/132 \text{ kV/kV}; \\ & X_T = 10\%; \\ & U_B = 132 \text{ kV}; S_B = S_{nG} = 110,25 \text{ MVA}. \end{array}$$

b) Turbogenerator nominalne snage $S_{nG} = 300$ MVA priključen je na moćnu mrežu, posredstvom generatorskog blok-transformatora nominalne snage $S_{nT} = 275$ MVA. Izračunati aktivne i reaktivne snage koje teku prema moćnoj mreži merene na strani višeg napona blok-transformatora i faktore snage prenosa za dva radna režima:

1° Napon moćne mreže: $U_\infty = 231$ kV; sinhronizaciona snaga: $P_s^{ind} = 323$ MW/rad;
ugao momenta: $\delta_0^{ind} = 29,13^\circ$.

2° Napon moćne mreže: $U_\infty = 231$ kV; sinhronizaciona snaga: $P_s^{cap} = 53$ MW/rad;
ugao momenta: $\delta_0^{cap} = 73,61^\circ$.

Ostali podaci za proračun su:

Generator: $x_d = 130\%$; $U_{nG} = 12$ kV.

Transformator: $x_T = 13\%$; $m_{nT} = 12/242$ kV/kV.

Rešenje:

a) Hidrogenerator - Proračun početnih uslova, shodno fazorskom dijagramu sa sl. 4.1b, za $S_B = 110,25$ MVA i $U_B = 132$ kV:

$$\underline{E}_{q0} = \underline{U}_\infty + j(X_q + X_T)\underline{I} = 1,00 + j(0,9 + 0,1) \cdot (0,8 - j0,6) = 1,6 + j0,8 = 1,789 \text{ r.j. } \angle 26,57^\circ;$$

$$\delta_0 = \arg \underline{E}_{q0} = 26,57^\circ; \quad \varphi = \arctg \frac{66,15}{88,2} = 36,87^\circ;$$

$$|\underline{I}_d| = I \sin(\delta_0 + \varphi) = 1,0 \sin(26,57^\circ + 36,87^\circ) = 0,8945 \text{ r.j.};$$

$$|\underline{I}_q| = I \cos(\delta_0 + \varphi) = 1,0 \cos(26,57^\circ + 36,87^\circ) = 0,4471 \text{ r.j.}$$

Aktivna snaga na visokonaponskoj strani blok-transformatora je:

$$\begin{aligned} P_\infty &= \frac{E_0 U_\infty}{X_d + X_T} \sin \delta_0 + \frac{U_\infty^2}{2} \frac{X_d - X_q}{(X_d + X_T)(X_q + X_T)} \sin 2\delta_0 = \\ &= \frac{2,013 \cdot 1,0}{1,25 + 0,1} \sin 26,57^\circ + \frac{1,0^2}{2} \cdot \frac{1,25 - 0,9}{1,35 \cdot 1,0} \sin 53,14^\circ = 0,8744 \text{ r.j.}; \end{aligned}$$

$$E_0 = E_{q0} + (X_d - X_q)I_d = 1,789 + (1,25 - 0,9) \cdot 0,8945 = 2,102 \text{ r.j.}$$

Sinhronizaciona snaga za $\delta = \delta_0 = 26,57^\circ$ je:

$$P_s = \left. \frac{\partial P_\infty(\delta)}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_0} = \frac{E_0 U_\infty}{X_d + X_T} \cos \delta_0 + U_\infty^2 \frac{X_d - X_q}{(X_d + X_T)(X_q + X_T)} \cos 2\delta_0 =$$

$$= \frac{2,102 \cdot 1,0}{1,25 + 0,1} \cos 26,57^\circ + 1,0^2 \cdot \frac{1,25 - 0,9}{1,35 \cdot 1,0} \cos 53,14^\circ = 1,549 \text{ r.j./rad} = 170,72 \text{ MW/rad} .$$

b) Turbogenerator - Proračun impedansi (svedenih na stranu višeg napona transformatora):

$$X_G = \frac{x_d}{100} \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \left(\frac{242}{12} \right)^2 = \frac{130}{100} \cdot \frac{12^2}{300} \cdot \left(\frac{242}{12} \right)^2 = 253,78 \Omega ;$$

$$X_T = \frac{x_T}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{13}{100} \cdot \frac{242^2}{275} = 27,68 \Omega ;$$

$$X = X_G + X_T = 253,78 + 27,68 = 281,46 \Omega .$$

Iz izraza za sinhronizacione snage P_s i poznate vrednosti napona U_∞ i ugla δ_0 je:

$$P_s^{ind} = \frac{E^{ind} U_\infty}{X} \cos \delta_0^{ind} = 323 \text{ MW/rad} ;$$

$$E^{ind} = \frac{323 \cdot 281,46}{231 \cos 29,13^\circ} = 450,54 \text{ kV} ;$$

$$P_s^{cap} = \frac{E^{cap} U_\infty}{X} \cos \delta_0^{cap} = 53 \text{ MW/rad} ;$$

$$E^{cap} = \frac{53 \cdot 281,46}{231 \cos 73,61^\circ} = 228,86 \text{ kV} .$$

Prenosne snage i faktori snaga prenosa su:

$$P^{ind} = \frac{E^{ind} U_\infty}{X} \sin \delta_0^{ind} = \frac{450,54 \cdot 231}{281,46} \cdot 0,4868 = 180 \text{ MW} ;$$

$$Q^{ind} = -\frac{U_\infty^2}{X} + \frac{E^{ind} U_\infty}{X} \cos \delta_0^{ind} = -\frac{231^2}{281,46} + \frac{450,54 \cdot 231}{281,46} \cdot 0,8735 = 133,41 \text{ MVar} ;$$

$$\varphi^{ind} = \arctg \frac{133,41}{180} = 36,545^\circ \Rightarrow \cos \varphi^{ind} = 0,803 ;$$

$$P^{cap} = \frac{E^{cap} U_\infty}{X} \sin \delta_0^{cap} = \frac{228,86 \cdot 231}{281,46} \cdot 0,9594 = 180,2 \text{ MW}$$

$$Q^{cap} = -\frac{U_\infty^2}{X} + \frac{E^{cap} U_\infty}{X} \cos \delta_0^{cap} = -\frac{231^2}{281,46} + \frac{228,86 \cdot 231}{281,46} \cdot 0,2822 = -136,59 \text{ MVar} ;$$

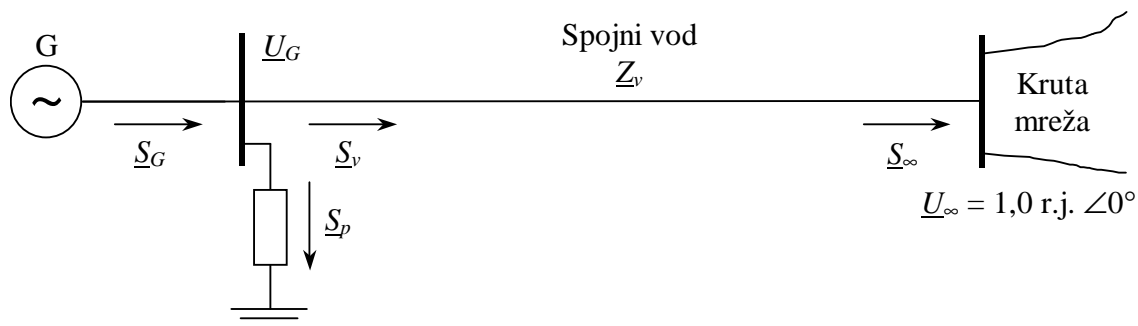
$$\varphi^{cap} = \arctg \left(-\frac{136,59}{180,2} \right) = -37,16^\circ \Rightarrow \cos \varphi^{cap} = 0,797 .$$

□

Zadatak 4.4

Sinhroni turbogenerator priključen je na krutu mrežu (čiji je napon $U_\infty = 1,0$ r.j.), u koju isporučuje snagu $\underline{S}_\infty = (0,554 + j0,135)$ r.j., posredstvom spojne impedanse $\underline{Z}_v = (0,1 + j0,4)$ r.j., shodno sl. 4.4a. Sa sabirnica generatora napaja se lokalno opterećenje $\underline{S}_p = (0,4 + j0,3)$ r.j. Proračunati:

- Fazor napona \underline{U}_G , struje \underline{I}_G i kompleksnu snagu \underline{S}_G na krajevima generatora, kao i aktivne i reaktivne gubitke u spojnoj impedansi \underline{Z}_v .
- Fazor indukovane EMS generatora \underline{E} i izraz za krivu njihanja generatora prema krutoj mreži $P_G(\delta)$, ako je sinhrona reaktansa generatora $X_d = 1,7$ r.j.
- Koeficijent sinhronizacione snage i rezervu stabilnosti generatora za napred zadato (odnosno proračunato) radno stanje.
- Faktor snage generatora za proračunato radno stanje. Takođe proveriti nađene vrednosti (u tač. a) za P_G i Q_G .



Sl. 4.4a Jednopolna šema sistema iz zadatka 4.4

Rešenje:

- Proračun fazora napona, struje i kompleksne snage generatora:

Za:

$$\underline{S}_\infty = (0,554 + j0,135) \text{ r.j.} = 0,5702 \text{ r.j.} \angle 13,70^\circ ;$$

$$\underline{I}_\infty = (0,554 - j0,135) \text{ r.j.} = 0,5702 \text{ r.j.} \angle -13,70^\circ ;$$

$$\underline{S}_p = (0,4 + j0,3) \text{ r.j.} = 0,5 \text{ r.j.} \angle 36,87^\circ ;$$

$$\underline{Z}_v = (0,1 + j0,4) \text{ r.j.} = 0,4123 \text{ r.j.} \angle 75,96^\circ ;$$

$$X_d = j1,7 \text{ r.j.} = 1,7 \text{ r.j.} \angle 90^\circ ;$$

$$\underline{Z}_p = \frac{\underline{U}_G^2}{\underline{S}_p^*} = \frac{1,1288^2}{0,5} \angle 36,87^\circ = 2,5484 \text{ r.j.} \angle 36,87^\circ = (2,0387 + j1,529) \text{ r.j.} ,$$

napon \underline{U}_G , čiji je moduo izražen u relativnim jedinicama, a fazni ugao u $^\circ$ je:

$$\begin{aligned} \underline{U}_G &= \underline{U}_\infty + \underline{Z}_v \underline{I}_\infty = 1,0 + (0,1 + j0,4) \cdot (0,554 - j0,135) = \\ &= (1,1094 + j0,2081) \text{ r.j.} = 1,1288 \text{ r.j.} \angle 10,63^\circ , \end{aligned}$$

dok su kompleksni gubici:

$$\underline{S}_v^{gub} = \frac{\underline{Z}_v \underline{S}_\infty^2}{U_\infty^2} = (0,1 + j0,4) \cdot \frac{0,5702^2}{1^2} = (0,0325 + j0,131) \text{ r.j.},$$

tako da je kompleksna snaga na početku voda:

$$\underline{S}_v = \underline{S}_\infty + \underline{S}_v^{gub} = (0,554 + j0,135) + (0,0325 + j0,131) = (0,5865 + j0,266) \text{ r.j.},$$

a odata snaga generatora:

$$\underline{S}_G = \underline{S}_v + \underline{S}_p = (0,5865 + j0,266) + (0,4 + j0,3) = (0,9865 + j0,566) \text{ r.j.} = 1,1367 \text{ r.j.} \angle 29,8^\circ,$$

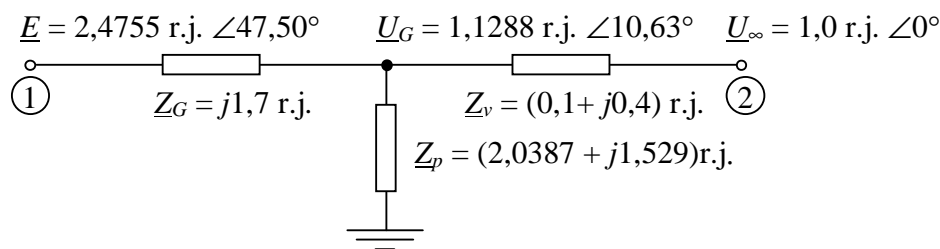
dok je struja generatora:

$$\underline{I}_G = \frac{\underline{S}_G^*}{\underline{U}_G^*} = \frac{1,1367 \angle -29,8^\circ}{1,1288 \angle -10,63^\circ} = 1,007 \text{ r.j.} \angle -19,17^\circ = (0,951 - j0,331) \text{ r.j.}$$

b) Proračun fazora indukovane EMS i izraza za krivu njihanja turbogeneratora:

$$\begin{aligned} \underline{E} &= \underline{U}_G + jX_d \underline{I}_G = (1,1094 + j0,2081) + j1,7 \cdot (0,951 - j0,331) = \\ &= (1,6724 + j1,8251) = 2,4755 \text{ r.j.} \angle 47,50^\circ; \end{aligned}$$

$$E = 2,4755 \text{ r.j.}; \quad \delta = 47,50^\circ.$$



Sl. 4.4b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.4a

Za proračun izraza za krivu njihanja generatora prema krutoj mreži, posmatra se zamenska šema sistema sa sl. 4.4a, prikazana na sl. 4.4b, odakle se transfer impedansa dobija transfiguracijom zvezde koju formiraju impednase generatora (\underline{Z}_G), potrošača (\underline{Z}_p) i spojnog voda (\underline{Z}_v) u trougao. Njena vrednost je

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{12} &= \underline{Z}_G + \underline{Z}_v + \frac{\underline{Z}_G \underline{Z}_v}{\underline{Z}_p} = j1,7 + (0,1 + j0,4) + \frac{1,7 \angle 90^\circ \cdot 0,4123 \angle 75,96^\circ}{2,5484 \angle 36,87^\circ} = \\ &= (-0,073 + j2,3134) \text{ r.j.} = 2,315 \text{ r.j.} \angle 91,82^\circ; \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{12} = 2,315 \text{ r.j.}; \quad \mu_{12} = 90^\circ - 91,82^\circ = -1,82^\circ.$$

Sopstvena (ulazna) impedansa punog sistema u tački 1 gde deluje EMS \underline{E} , shodno ekvivalentnoj šemi sa sl. 4.4a je:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{11} &= \underline{Z}_G + \underline{Z}_v + \frac{\underline{Z}_p \underline{Z}_v}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_v} = j1,7 + \frac{2,5484 \angle 36,87^\circ \cdot 0,4123 \angle 75,96^\circ}{2,5484 \angle 36,87^\circ + 0,4123 \angle 75,96^\circ} = \\ &= (0,12 + j2,044) \text{ r.j.} = 2,048 \text{ r.j.} \angle 86,639^\circ;\end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{11} = 2,048 \text{ r.j.}; \quad \mu_{11} = 90^\circ - 86,639^\circ = 3,361^\circ.$$

Onda je izraz za krivu njihanja generatora:

$$\begin{aligned}P &= \frac{E^2}{Z_{11}} \sin \mu_{11} + \frac{EU_\infty}{Z_{12}} \sin(\delta - \mu_{12}) = \frac{2,4755^2}{2,048} \sin 3,361^\circ + \frac{2,4755 \cdot 1,0}{2,315} \sin(\delta + 1,82^\circ) = \\ &= 0,1754 + 1,0693 \sin(\delta + 1,82^\circ) \text{ [r.j.]}\end{aligned}$$

c) Proračun koeficijenta sinhronizacione snage i rezerve stabilnosti za $\delta = 47,50^\circ$:

$$P_s = P_{max} \cos(\delta - \mu_{E\infty}) = 1,0693 \cos(47,50^\circ + 1,82^\circ) = 0,697 \text{ r.j./rad};$$

$$RS = \frac{P_{max}}{P_G} = \frac{1,0693}{0,9865} = 1,084 \text{ (ili 8,4 \%)}.$$

d) Faktor snage generatora je kosinus ugla između fazora \underline{U}_G i \underline{I}_G . Taj ugao je, shodno fazorskom dijagramu na sl. 4.4c:

$$\varphi_G = \arg \underline{U}_G - \arg \underline{I}_G = 10,63^\circ + 19,17^\circ = 29,8^\circ,$$

pa je

$$\cos \varphi_G = \cos 29,8^\circ = 0,8678.$$

Provera:

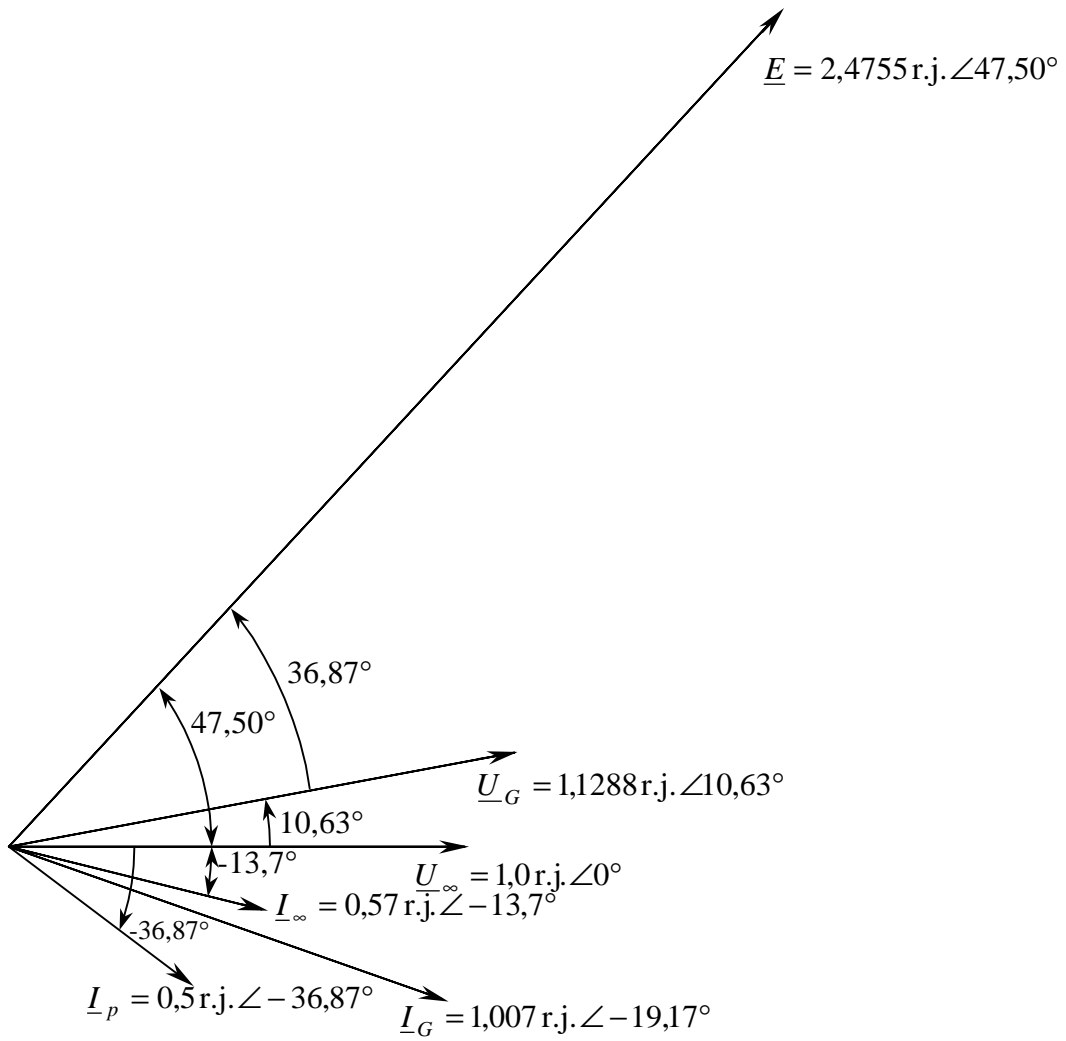
$$P_G = U_G I_G \cos \varphi_G = 1,1288 \cdot 1,007 \cdot 0,8678 = 0,98643 \text{ r.j.}$$

(ranije proračunato: $P_G = 0,9865$ r.j.).

$$Q_G = U_G I_G \sin \varphi_G = 1,1288 \cdot 1,007 \cdot 0,496974 = 0,5649 \text{ r.j.}$$

(ranije proračunato: $Q_G = 0,566$ r.j.).

Male razlike u proračunima P_G i Q_G su posledica zaokruživanja rezultata proračuna.

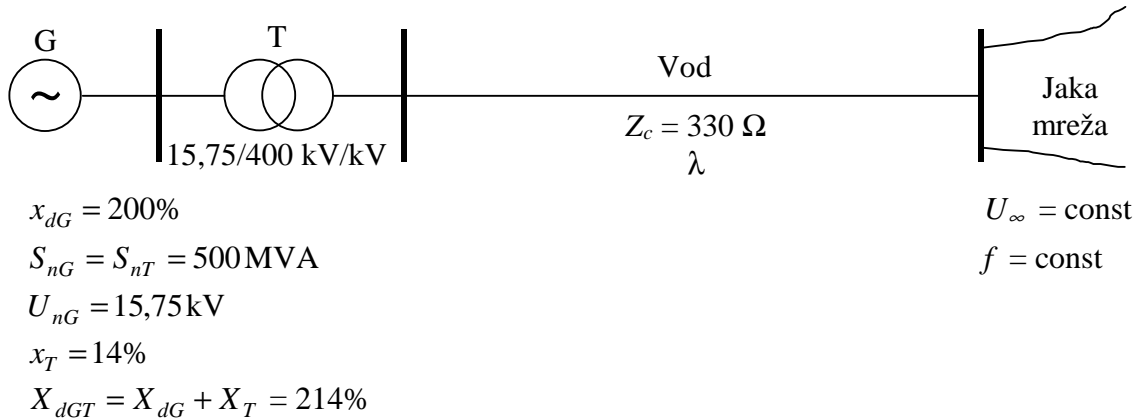


Sl. 4.4c Fazorski dijagram napona i struja za sistem iz zadatka 4.4



Zadatak 4.5

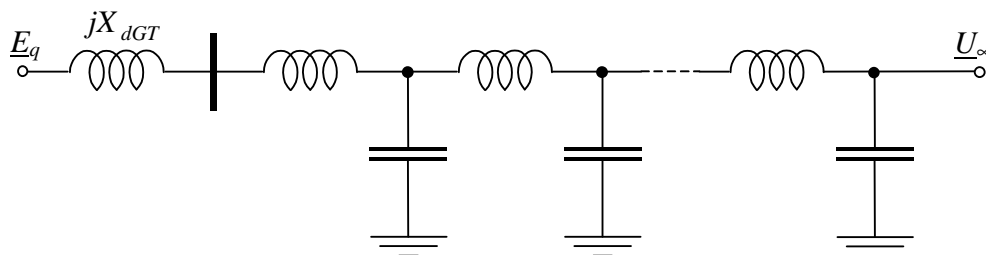
Kolika je granična električna dužina λ , u pogledu statičke stabilnosti, za trofazni, na sl. 4.5a jednopolno prikazani jednomašinski sistem, uzimajući da je elektromotorna sila iza sinhrona reaktanse konstantna, a idealizovanim vodom se prenosi prirodna snaga.



Sl. 4.5a Jednopolna šema i osnovni podaci o elementima sistema iz zadatka 4.5

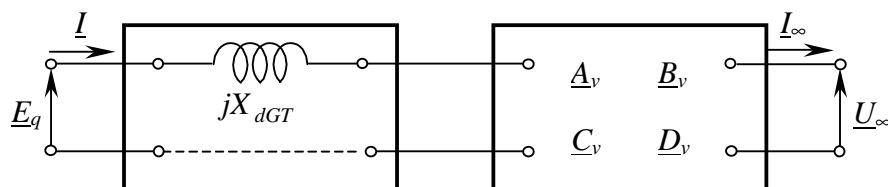
Rešenje:

Jednopolna zamenska šema impedansi sistema ima izgled prikazan na sl. 4.5b.



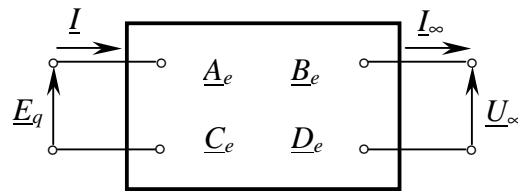
Sl. 4.5b Jednopolna zamenska šema impedansi sistema sa sl. 4.5a

Ako se pojedini elementi ekvivalentne šeme (blok generator-transformator i vod) predstave preko odgovarajućih četvorokrajnika, dobija se ekvivalentna šema na sl. 4.5c, na kojoj su sve struje i naponi dati kao računski.



Sl. 4.5c Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.5b, pri predstavljanju elemenata odgovarajućim četvorokrajnicima

Lanac četvorokrajnika na sl. 4.5c može se uprostiti tretmanom preko odgovarajućeg ekvivalentnog četvorokrajnika sa sl. 4.5d, čiji se parametri nalaze primenom matričnog računa:



Sl. 4.5d Ekvivalentni četvorokrajnik sistema sa sl. 4.5c

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \underline{A}_e & \underline{B}_e \\ \underline{C}_e & \underline{D}_e \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & j(X'_{dG} + X_{T1}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\lambda & jZ_{ce} \sin\lambda \\ j\frac{1}{Z_{ce}} \sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\lambda - \frac{X_{dGT}}{Z_c} \sin\lambda & j\cos\lambda(X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg}\lambda) \\ j\frac{1}{Z_c} \sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Veza između struja i napona na krajevima četvorokrajnika sa sl. 4.5d je:

$$\begin{bmatrix} \underline{E}_q \\ \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_e & \underline{B}_e \\ \underline{C}_e & \underline{D}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_\infty \\ \underline{I}_\infty \end{bmatrix}.$$

Prikazivanjem ove matrične relacije preko skalarnih jednačina, dobija se sistem jednačina:

$$\begin{aligned} \underline{E}_q &= \underline{A}_e \underline{U}_\infty + \underline{B}_e \underline{I}_\infty; \\ \underline{I} &= \underline{C}_e \underline{U}_\infty + \underline{D}_e \underline{I}_\infty. \end{aligned}$$

Izračunavanjem struje \underline{I}_∞ iz prve relacije i njenim zamenjivanjem u drugu, dobija se izraz za struju \underline{I} :

$$\underline{I} = \underline{C}_e \underline{U}_\infty + \underline{D}_e \left(\frac{1}{\underline{B}_e} \underline{E}_q - \frac{\underline{A}_e}{\underline{B}_e} \underline{U}_\infty \right) = \frac{\underline{D}_e}{\underline{B}_e} \underline{E}_q - \frac{\underline{A}_e \underline{D}_e - \underline{B}_e \underline{C}_e}{\underline{B}_e} \underline{U}_\infty = \frac{\underline{D}_e}{\underline{B}_e} \underline{E}_q - \frac{1}{\underline{B}_e} \underline{U}_\infty.$$

Kompleksna snaga generatora se tada izračunava iz relacije:

$$\underline{S} = \underline{E}_q \underline{I}^* = \underline{E}_q \left(\frac{\underline{D}_e}{\underline{B}_e} \underline{E}_q - \frac{1}{\underline{B}_e} \underline{U}_\infty \right)^* = \frac{\underline{D}_e^*}{\underline{B}_e^*} E_q^2 + \frac{\underline{E}_q \underline{U}_\infty^*}{\underline{B}_e^*}.$$

Zamenjivanjem izraza za \underline{B}_e i \underline{D}_e :

$$\underline{B}_e = j \cos\lambda (X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg}\lambda);$$

$$\underline{D}_e = \cos\lambda,$$

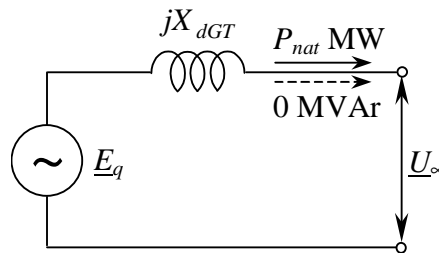
i usvajanjem da su naponi $\underline{E}_q = E_q \angle 0^\circ$ i $\underline{U}_\infty = U_\infty \angle -\delta = U_\infty (\cos \delta - j \sin \delta)$ gde je δ ugao između faznih vrednosti elektromotorne sile iza sinhronne reaktanse X_d generatora i napona na sabirnicama jake mreže (sabirnice beskonačne snage), izraz za kompleksnu snagu postaje:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= jE_q^2 \frac{1}{(X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg} \lambda)} - j \frac{E_q U_\infty}{\cos \lambda (X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg} \lambda)} (\cos \delta + j \sin \delta) = \\ &= \frac{E_q U_\infty}{\cos \lambda (X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg} \lambda)} \sin \delta + j \left(E_q^2 \frac{1}{(X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg} \lambda)} - \frac{E_q U_\infty}{\cos \lambda (X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg} \lambda)} \cos \delta \right), \end{aligned}$$

odnosno, izraz za odatu električnu aktivnu snagu generatora u sistemu je:

$$P = \frac{E_q U_\infty}{\cos \lambda (X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg} \lambda)} \sin \delta.$$

Kako se idealizovanim vodom prenosi prirodna snaga voda i kako je na kraju voda linijski napon U_∞ , to je $P_{nat} = \frac{U_\infty^2}{Z_c}$, pa će elektromotorna sila iza sinhronne reaktanse X_d generatora, shodno ekvivalentnoj šemi sa sl. 4.5c, biti:



Sl. 4.5c Theveninov ekvivalent generatora i transformatora sistema iz zadatka 4.5

$$\underline{E}_q = U_\infty + j \frac{P_{nat} X_{dGT}}{U_\infty} = U_\infty + j \frac{U_\infty X_{dGT}}{Z_c},$$

odnosno

$$E_q = \frac{U_\infty}{Z_c} \sqrt{Z_c^2 + X_{dGT}^2}.$$

Granična električna dužina voda λ se određuje iz karakteristika odate električne aktivne snage generatora kada se P zameni sa P_{nat} a ugao δ sa 90° , tako da je

$$\frac{U_\infty^2}{Z_c} = \frac{E_q U_\infty}{\cos \lambda (X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg} \lambda)} = \frac{\frac{U_\infty^2}{Z_c} \sqrt{Z_c^2 + X_{dGT}^2}}{\cos \lambda (X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg} \lambda)},$$

ili:

$$\begin{aligned}\cos \lambda (X_{dGT} + Z_c \operatorname{tg} \lambda) &= \sqrt{Z_c^2 + X_{dGT}^2} ; \\ (X_{dGT} \cos \lambda + Z_c \sin \lambda)^2 &= Z_c^2 + X_{dGT}^2 ; \\ X_{dGT}^2 \cos^2 \lambda + 2Z_c X_{dGT} \sin \lambda \cos \lambda + Z_c^2 \sin^2 \lambda &= Z_c^2 + X_{dGT}^2 ; \\ (X_{dGT} \sin \lambda - Z_c \cos \lambda)^2 &= 0 .\end{aligned}$$

Rešenje gornje jednačine je:

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{Z_c}{X_{dGT}} .$$

Kako je

$$X_{dGT} = \frac{214}{100} \cdot \frac{400^2}{500} = 684,8 \Omega ,$$

to je granična električna dužina voda:

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{330}{684,8} = 0,4819 ,$$

odakle je

$$\lambda = 25,729^\circ = 0,06 L_v ,$$

a stvarna dužina voda

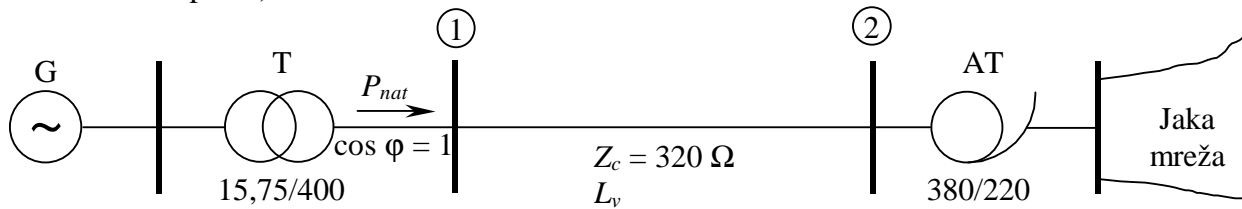
$$L_v = 428,8 \text{ km} .$$

□

Zadatak 4.6

a) Na koju maksimalnu udaljenost se za dati, jednopolno prikazani trofazni sistem, usvajajući nacrtanu zamensku šemu sa sl. 4.6a, može statički stabilno preneti prirodna snaga voda 380 kV sa dva provodnika u snopu po fazi ($Z_c = 320 \Omega$)?

b) Na koju maksimalnu udaljenost se može statički stabilno preneti ista snaga ako se na sredini uključi baterija kondenzatora čija reaktansa kompenzuje 50% reaktanse voda 380 kV, dužine nađene pod a)?



$$S_{nG} = S_{nT} = 2 \cdot 250 \text{ MVA}$$

$$x_{dG} = 160\%$$

$$U_{nG} = 15,75 \text{ kV}$$

$$x_T = 15\%$$

$$U_1 = U_{nv} = 380 \text{ kV}$$

$$S_{nAT} = 2 \cdot 250 \text{ MVA}$$

$$x_{AT} = 10\%$$

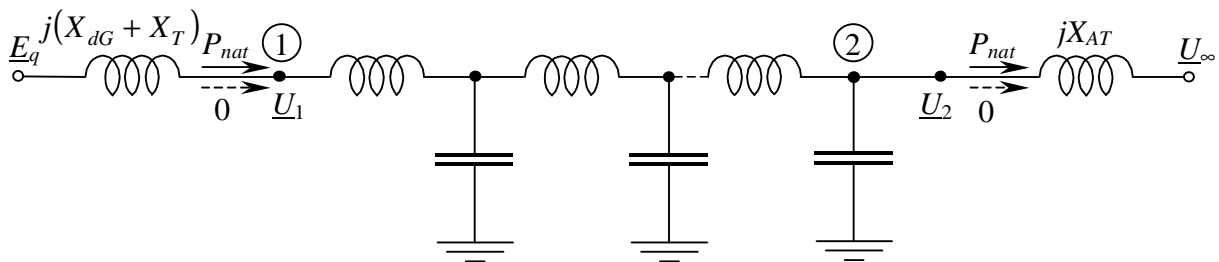
$$U_\infty = \text{const}$$

$$f = \text{const}$$

Sl. 4.6a Jednopolna šema i parametri sistema iz zadatka 4.6

Rešenje:

Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.6a ima izgled kao na sl. 4.6b.



Sl. 4.6b Jednopolna zamenska šema sistema sa sl. 4.6a

a) Kako je vod idealizovan i kako je na početku voda $P_1 = P_{nat}$, $Q_1 = 0$ i $\underline{U}_1 = U_{nv}$ to su poznate i radne veličine na kraju voda $P_2 = P_{nat}$, $Q_2 = 0$ i $\underline{U}_2 = U_1 \angle -\lambda$, gde je $\lambda = 0,06 L_v [^\circ]$ (dužina L_v data je u kilometrima). Onda su:

- Reaktanse elemenata sistema:

$$X_{dG} + X_T = \frac{175}{100} \cdot \frac{400^2}{2 \cdot 250} = 560 \Omega;$$

$$X_{AT} = \frac{10}{100} \cdot \frac{380^2}{2 \cdot 250} = 28,88 \Omega ;$$

- Prirodna snaga voda:

$$P_{nat} = \frac{U_{nv}^2}{Z_c} = \frac{380^2}{320} = 451,25 \text{ MW} ;$$

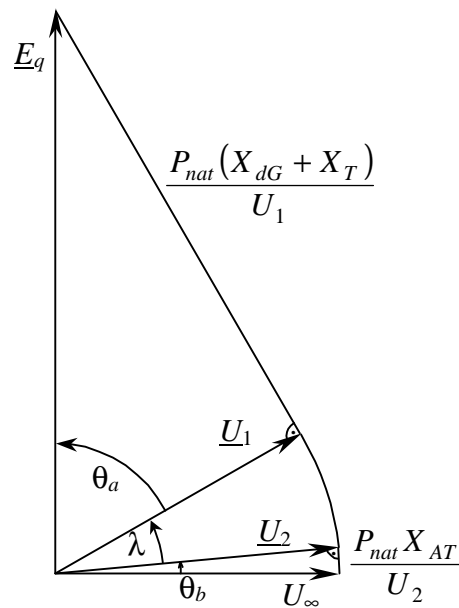
- Elektromotorna sila iza sinhronne reaktanse:

$$\underline{E}_q = U_1 + j \frac{P_{nat} (X_{dG} + X_T)}{U_1} = 380 + j \frac{451,25 \cdot 560}{380} = 765 \text{ kV } \angle 60^\circ 15' ;$$

- Napon na sabirnicama beskonačne snage (kruta mreža):

$$\underline{U}_\infty = U_2 - j \frac{P_{nat} X_{AT}}{U_2} = 380 - j \frac{451,25 \cdot 28,88}{380} = 381 \text{ kV } \angle -5^\circ 10' .$$

Na sl. 4.6c nacrtan je fazorski dijagram napona, za slučaj a. Ovaj fazorski dijagram važi za slučaj kad su sve veličine međufazne (linijske), ili kad su sve veličine fazne. Isto tako on je validan i u sistemu relativnih jedinica.



Sl. 4.6c Fazorski dijagram napona iz zadatka 4.6a

Potrebno je napomenuti da je pri određivanju fazora napona, na sabirnicama beskonačne snage fazor napona na kraju voda uslovno postavljen po faznoj osi.

Tražena dužina voda L_v određuje se iz uslova da je maksimalan fazni pomeraj između fazora elektromotorne sile \underline{E}_q i napona na sabirnicama beskonačne snage \underline{U}_∞ jednak 90° :

$$\theta_a + \lambda + \theta_b = 90^\circ ,$$

gde su θ_a i θ_b fazni pomeraji između fazora elektromotorne sile \underline{E}_q i fazora napona \underline{U}_1 , odnosno fazora napona \underline{U}_2 i napona na sabirnicama beskonačne snage \underline{U}_∞ , respektivno, shodno sl. 4.6c:

$$\theta_a = 60^\circ 15';$$

$$\theta_b = 5^\circ 10';$$

dok je $\lambda = 0,06 \cdot L_v$ električna ugaona dužina voda. Zamenom brojčanih vrednosti dobija se:

$$60^\circ 15' + \lambda + 5^\circ 10' = 90^\circ,$$

odakle je

$$\lambda = 24^\circ 35' = 24,58^\circ,$$

odnosno maksimalna dužina voda na koju se može statički stabilno preneti prirodna snaga voda:

$$L_v = \frac{24,58^\circ}{0,06} = 408 \text{ km.}$$

b) Ako se sa l označi podužna pogonska induktivnost, a sa c podužna kapacitivnost voda, onda je po definiciji $Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}}$.

Kako je $c_0 = \frac{1}{\sqrt{lc}}$ (brzina svetlosti), to se podužna pogonska induktivnost može odrediti iz izraza:

$$\frac{c_0}{Z_c} = \frac{\frac{1}{\sqrt{lc}}}{\sqrt{\frac{l}{c}}} = \frac{1}{l},$$

odakle je

$$l = \frac{Z_c}{c_0} = \frac{320}{300} \cdot 10^{-3} = 1,066 \cdot 10^{-3} \text{ H/km.}$$

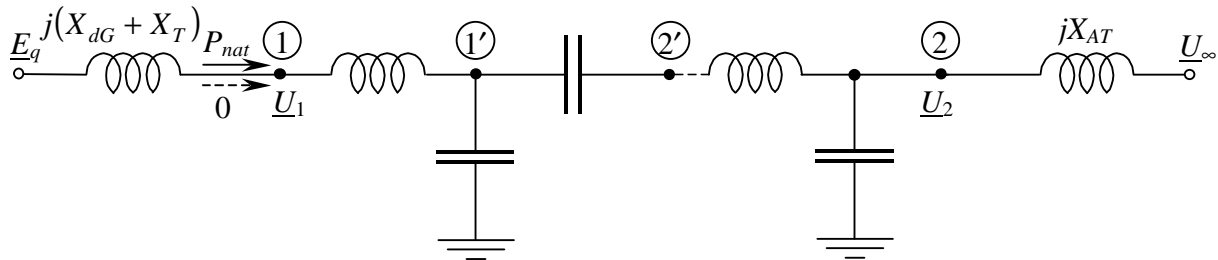
Induktivna reaktansa voda dužine $L_v = 408$ km, nađene u tač. a, onda je:

$$X_v = l\omega L_v = 1,066 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot 408 = 137 \Omega,$$

a kapacitivna reaktansa rednog kondenzatora prema uslovu zadatka:

$$X_C = -\frac{1}{2} X_v = -68,5 \Omega.$$

Ova reaktansa se smešta na sredinu voda, kako je to prikazano na sl. 4.6d, tako da su za idealizovan vod i radno stanje na početku voda $P_1 = P_{nat}$, $Q_1 = 0$ i $\underline{U}_1 = U_{nv}$ u ovom slučaju poznate radne veličine na kraju polovine voda, odnosno u tački priključenja kondenzatorske baterije $P_{1'} = P_{nat}$, $Q_{1'} = 0$ i $\underline{U}_{1'} = U_1 \angle -\lambda/2$.

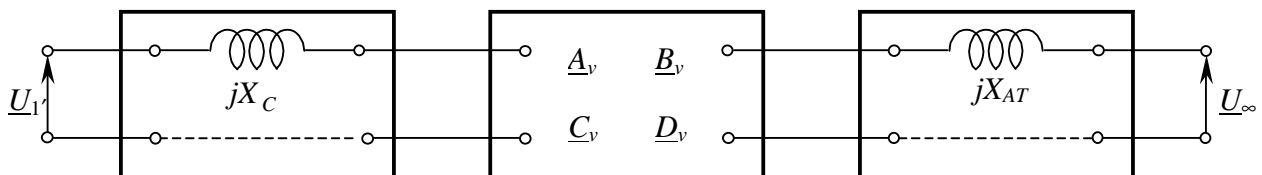


Sl. 4.6d Jednopolna zamenska šema sistema iz zadatka 4.6b

Uslov statičke stabilnosti je u ovom slučaju:

$$\theta_a + \lambda/2 + \theta_c = 90^\circ ,$$

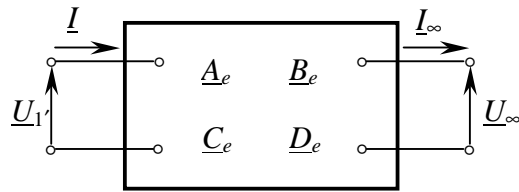
gde je $\theta_a = 60^\circ 15'$ ugao između fazora elektromotorne sile \underline{E}_q i fazora napona \underline{U}_1 , proračunat u tač. a, dok je θ_c ugao između fazora napona $\underline{U}_{1'}$ i napona na sabirnicama beskonačne snage \underline{U}_∞ . Ovaj ugao je najjednostavnije odrediti korišćenjem modela mreže prikazanog preko četvorokrajnika. Ako se pojedini elementi dela ekvivalentne šeme od tačke 1' do sabirnica beskonačne snage predstave preko odgovarajućih četvorokrajnika, dobija se ekvivalentna šema na sl. 4.6e.



Sl. 4.6e Ekvivalentna šema dela sistema od tačke 1', pri predstavljanju elemenata odgovarajućim četvorokrajnicima

Ekvivalentni četvorokrajnik ovom lancu četvorokrajnika, prikazan je na sl.4.6f. Njegovi parametri su:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \underline{A}_e & \underline{B}_e \\ \underline{C}_e & \underline{D}_e \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & jX_C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\lambda/2 & jZ_c \sin\lambda/2 \\ j\frac{1}{Z_c} \sin\lambda/2 & \cos\lambda/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jX_{AT} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\lambda/2 - \frac{X_C}{Z_c} \sin\lambda/2 & j \left(X_{AT} \cos\lambda/2 - \frac{X_{AT}}{Z_c} X_C \sin\lambda/2 + Z_c \sin\lambda/2 + X_C \cos\lambda/2 \right) \\ j\frac{1}{Z_c} \sin\lambda/2 & \cos\lambda/2 - \frac{X_{AT}}{Z_c} \sin\lambda/2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$



Sl. 4.6f Ekvivalentni četvorokrajnik sistema sa sl. 4.6e

Veza između struja i napona na krajevima četvorokrajnika sa sl. 4.6f je:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_e & \underline{B}_e \\ \underline{C}_e & \underline{D}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_\infty \\ \underline{I}_\infty \end{bmatrix}.$$

Inverzijom ove matrice dobija se zavisnost veličina na prijemnom kraju u funkciji napona i struje na predajnom kraju četvorokrajnika, odnosno:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_\infty \\ \underline{I}_\infty \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{D}_e & -\underline{B}_e \\ -\underline{C}_e & \underline{A}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I} \end{bmatrix}.$$

Prva relacija za napon na kraju voda je

$$\underline{U}_\infty = \underline{D}_e \underline{U}_1 - \underline{B}_e \underline{I}.$$

Postavljanjem napona \underline{U}_1 u faznu osu $\underline{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$ i zamenjivanjem izraza za \underline{B}_e i \underline{D}_e , kao i struje \underline{I} koja je, shodno datoj pretpostavci:

$$\underline{I} = \frac{P_{nat}}{U_1} = \frac{451,25}{380} = 1,1875 \text{ A } \angle 0^\circ,$$

izraz za napon \underline{U}_∞ postaje:

$$\begin{aligned} \underline{U}_\infty &= \left(\cos \lambda / 2 - \frac{X_{AT}}{Z_c} \sin \lambda / 2 \right) U_1 - j \left(X_{AT} \cos \lambda / 2 - \frac{X_{AT}}{Z_c} X_C \sin \lambda / 2 + Z_c \sin \lambda / 2 + X_C \cos \lambda / 2 \right) I = \\ &= (380 \cos \lambda / 2 - 34,295 \sin \lambda / 2) + j(47,049 \cos \lambda / 2 - 387,34 \sin \lambda / 2). \end{aligned}$$

Ugao θ_c je jednak negativnoj vrednosti argumenta fazora \underline{U}_∞ , pa se uslov statičke stabilnosti prevodi u:

$$\theta_a + \lambda / 2 - \arctan \frac{47,049 \cos \lambda / 2 - 387,34 \sin \lambda / 2}{380 \cos \lambda / 2 - 34,295 \sin \lambda / 2} = 90^\circ.$$

Rešavanje ove transcendentne jednačine po λ daje vrednost granične električne dužine voda:

$$\lambda = 35,709^\circ = 35^\circ 42',$$

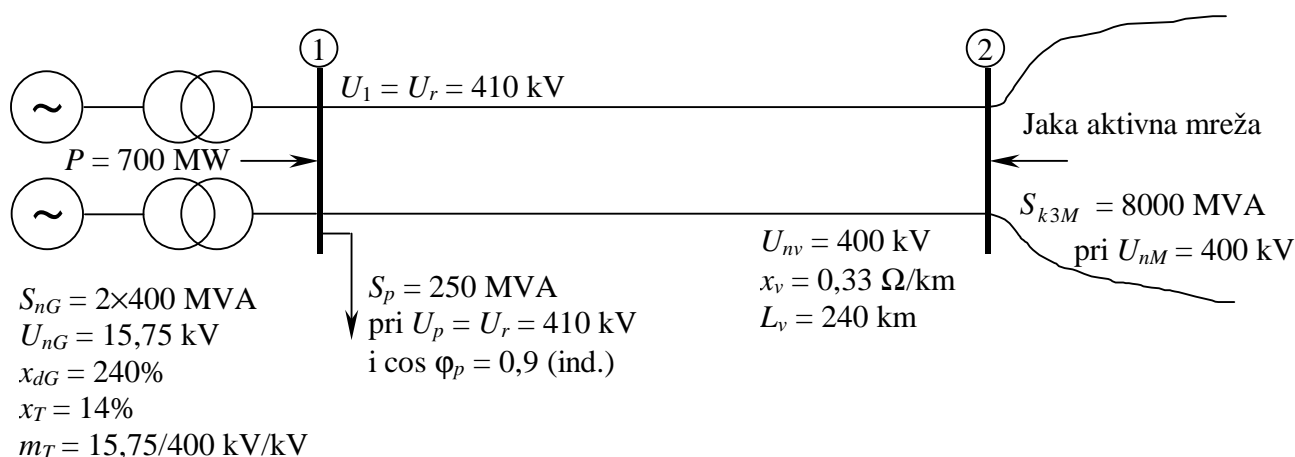
odnosno, granična dužina voda u ovom slučaju iznosi:

$$L_v = 595,15 \text{ km}.$$

□

Zadatak 4.7

Za dati trofazni, jednofazno prikazani elektroenergetski sistem, sa sl. 4.7a izračunati do koje i kakve (induktivne ili kapacitivne) reaktivne (spoljne) snage Q mogu da rade statički stabilno ravnomerno opterećeni generatorsko-transformatorski blokovi koji na sabirnice 1 odaju ukupnu aktivnu snagu $P = 700$ MW, ako se jaka mreža na kraju može zameniti reaktansom izračunatom iz udela te mreže u trajnoj trofaznoj snazi kratkog spoja na sabirnicama 2 i konstantnim naponom iza te reaktanse.



Sl. 4.7a Jednofazna šema i parametri elemenata sistema iz zadatka 4.7

Rešenje:

Oba generatorsko-transformatorska bloka, identična po konstrukciji i podjednako opterećena, mogu se tretirati zajedno sa reaktansom svedenom na stranu voda. Njihova ukupna reaktansa je:

$$X_{dGT_{sv}} = \frac{x_{dGT} \%}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{nGT}} = \frac{240 + 14}{100} \cdot \frac{400^2}{2 \cdot 400} = 508 \Omega .$$

Reaktansa oba paralelna voda je:

$$X_v^{ekv} = \frac{x_v L_v}{2} = \frac{0,33 \cdot 240}{2} = 39,6 \Omega .$$

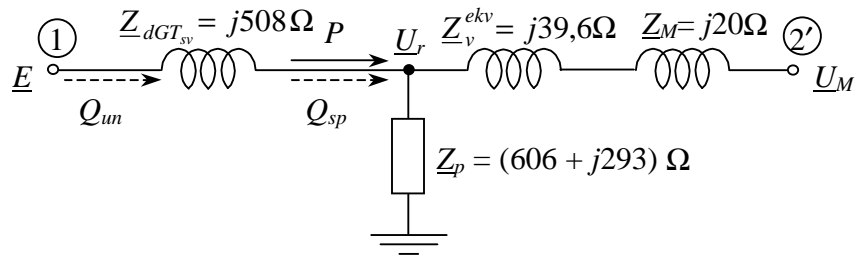
Ekvivalentna reaktansa jake mreže u stacionarnim stanjima (normalnim ili poremećenim) je:

$$X_M = \frac{U_{nM}^2}{S_{k3M}} = \frac{400^2}{8000} = 20 \Omega .$$

Ekvivalentna impedansa potrošačkog centra na sabirnicama 1 je:

$$\underline{Z}_p = \frac{U_p^2}{S_p} (\cos \varphi_p + j \sin \varphi_p) = \frac{410^2}{250} \cdot (0,9 + j0,4359) = (605,16 + j293) \Omega .$$

Na osnovu izračunatih parametara zamenska šema sistema sa sl. 4.7a ima izgled prikazan na sl. 4.7b.



Sl. 4.7b Ekvivalentna jednopolna šema impedansi sistema sa sl. 4.7a

Sopstvena impedansa u fiktivnom čvoru dejstva ems \underline{E} je

$$\underline{Z}_{11} = jX_{dGTsv} + \underline{Z}_p \parallel j(X_v^{ekv} + X_M) = j508 + (605,16 + j293) \parallel j(39,6 + 20) = (4,4 + j565) \Omega,$$

odnosno

$$\underline{Z}_{11} = Z_{11} \angle \psi_{11} \approx 565 \Omega \angle 90^\circ \Rightarrow \mu_{11} = 90^\circ - \psi_{11} = 0^\circ.$$

Granica statičke stabilnosti ima se kada se sinhronizaciona snaga, tj. prvi izvod aktivne snage po uglu, izjednači sa nulom, pri čemu se najbrže dolazi do rezultata ako se upotrebe izrazi za odatu aktivnu i reaktivnu snagu generatora u fiktivnom čvoru dejstva ems \underline{E} (unutrašnji generatorski čvor):

$$P_{un} = P = \frac{E^2}{Z_{11}} \sin \mu_{11} + \frac{EU_\infty}{Z_{12}} \sin(\delta - \mu_{12});$$

$$Q_{un} = \frac{E^2}{Z_{11}} \cos \mu_{11} - \frac{EU_\infty}{Z_{12}} \cos(\delta - \mu_{12}).$$

Izraz za prvi izvod aktivne snage po uglu je:

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{EU_\infty}{Z_{12}} \cos(\delta - \mu_{12}).$$

Zamenom izraza za reaktivnu snagu Q_{un} može se izvršiti eliminacija člana zavisnog od ugla δ , te se za sinhronizacionu snagu dobija izraz:

$$P_s = \frac{dP}{d\delta} = \frac{E^2}{Z_{11}} \cos \mu_{11} - Q_{un}.$$

Korišćenjem relacije koja povezuje spoljašnju Q_{sp} i unutrašnju Q_{un} reaktivnu snagu

$$Q_{un} = Q_{sp} + \frac{P^2 + Q_{sp}^2}{U_r^2} X_{dGTsv}$$

i njenim zamenjivanjem u izraz za sinhronizacionu snagu, granica statičke stabilnosti se određuje iz jednačine:

$$P_s = \frac{E^2}{Z_{11}} \cos \mu_{11} - Q_{sp} - \frac{P^2 + Q_{sp}^2}{U_r^2} X_{dGT_{sv}} = 0 .$$

Ems E može se izračunati iz relacije:

$$E^2 = \left(U_r + \frac{Q_{sp} X_{GT_{sv}}}{U_r} \right)^2 + \left(\frac{P X_{GT_{sv}}}{U_r} \right)^2 .$$

Posle zamene relacije za E^2 u izraz za P_s uz uvažavanje činjenice da je $\cos \mu_{11} = 1$, dobija se jednačina:

$$\frac{U_r^2}{Z_{11}} + \frac{2 Q_{sp} X_{GT_{sv}}}{Z_{11}} + \frac{Q_{sp}^2 X_{GT_{sv}}^2}{U_r^2 Z_{11}} + \frac{P^2 X_{GT_{sv}}^2}{U_r^2 Z_{11}} - Q_{sp} - \frac{P^2 + Q_{sp}^2}{U_r^2} X_{GT_{sv}} = 0 .$$

Ako se u gornju jednačinu smene brojčane vrednosti dobija se jednačina:

$$\frac{410^2}{565} + \frac{2 Q_{sp} \cdot 508}{565} + \frac{Q_{sp}^2 \cdot 508^2}{410^2 \cdot 565} + \frac{700^2 \cdot 508^2}{410^2 \cdot 565} - Q_{sp} - \frac{700^2 + Q_{sp}^2}{410^2} \cdot 508 = 0 .$$

Posle sređivanja gornjeg izraza sa leve strane, dobija se kvadratna jednačina po Q_{sp} :

$$Q_{sp}^2 - 2618,2 Q_{sp} - 485881 = 0 ,$$

čija su rešenja:

$$Q_{sp1} = 2782 \text{ MVA}r ;$$

$$Q_{sp2} = -174 \text{ MVA}r .$$

Pošto se uslovi statičke stabilnosti normalno pogoršavaju kada se pri istoj aktivnoj snazi prelazi sa reaktivnom snagom iz induktivnog u kapacitivno područje, može se zaključiti da su sva induktivna opterećenja (naravno samo ona koja dolaze u obzir sa gledišta dozvoljenih reaktivnih snaga generatora i naponskih prilika u mreži) stabilna, kao i ona kapacitivna, sve dok je reaktivna snaga manja od 174 MVA_{cap}. (174/2 MVA_{cap} po generatoru).

Granični faktor snage je:

$$\cos \varphi_{cap} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_{cap}^2}} = \frac{700}{\sqrt{700^2 + 174^2}} = \frac{700}{721,3} = 0,97$$

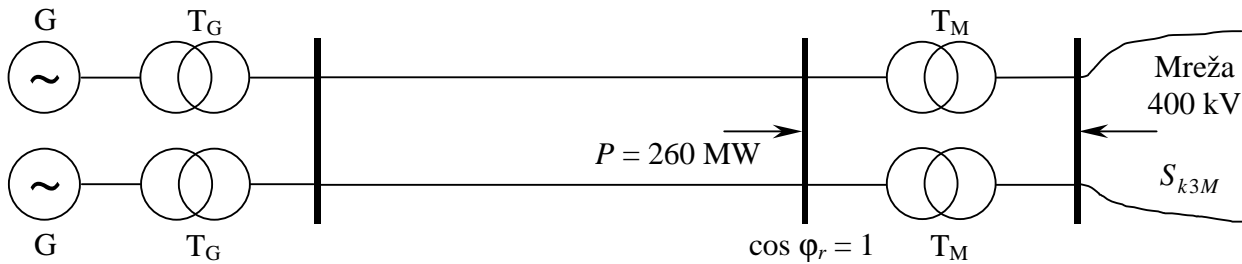
i on naravno važi kako za ukupno opterećenje oba bloka tako i za svaki blok posebno.

□

Zadatak 4.8

Preko jednopolno prikazanog trofaznog sistema 220 kV sa sl. 4.8a, predaje se iz udaljene hidroelektrane jakoj mreži nominalnog napona 400 kV na ulazu u postrojenje 220/400 kV aktivna snaga od 260 MW pri 220 kV, uz faktor snage jednak jedinici.

Proveriti statičku stabilnost ako se relativno jaka mreža 400 kV može zameniti reaktansom izračunatom iz udela te mreže u trajnoj trofaznoj snazi kratkog spoja, a napon U_M iza te reaktanse smatrati konstantnim. Takođe smatrati konstantnom i ems E iza sinhronne reaktanse generatora.



$$S_{nG} = S_{nTG} = 150 \text{ MVA}$$

$$U_{nG} = 15,75 \text{ kV}$$

$$x_{dG} = 100\%$$

$$x_{qG} = 65\%$$

$$x_{TG} = 12\%$$

$$m_{TG} = 15,75/231 \text{ kV/kV}$$

$$U_{nv} = 220 \text{ kV}$$

$$L_v = 350 \text{ km}$$

$$Z_c = 400 \Omega$$

$$S_{nTM} = 150 \text{ MVA}$$

$$x_{TM} = 13\%$$

$$m_{TM} = 220/400 \text{ kV/kV}$$

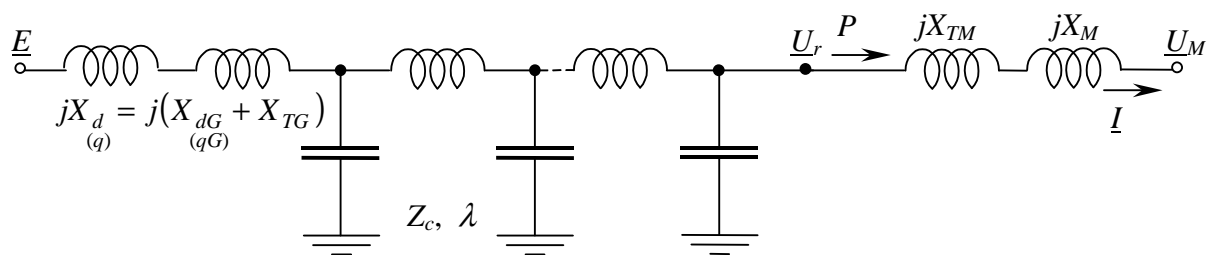
$$S_{k3M} = 10000 \text{ MVA}$$

$$\text{pri } 400 \text{ kV}$$

Sl. 4.8a Jednopolna šema i parametri sistema iz zadatka

Rešenje:

Zamenska šema impedansi sistema sa sl. 4.8a ima izgled prikazan na sl. 4.8b.

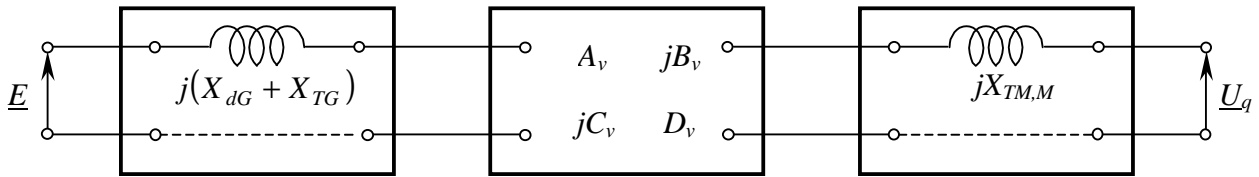


Sl. 4.8b Zamenska šema impedansi sistema sa sl. 4.8a

Analizu stanja u sistemu u kom je vod predstavljen modelom sa raspodeljenim parametrima, slično zadatku 4.6, najjednostavnije je rešiti korišćenjem prezentacije mreže preko ekvivalentnog četvorokrajnika. Osnovna naponska jednačina sistema je:

$$\underline{E} = \underline{A}_e \underline{U}_M + \underline{B}_e \underline{I},$$

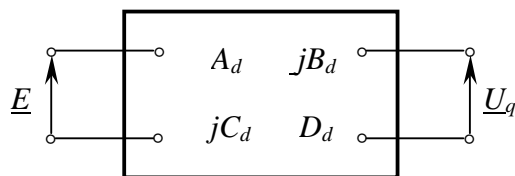
Elementi četvorokrajnika A_d i B_d se dobijaju ekvivalentiranjem lanca četvorokrajnika po d osi elemenata sistema prikazanim na sl. 4.8d.



Sl. 4.8d Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.8b, pri predstavljanju elemenata odgovarajućim četvorokrajnicima po d osi

Parametri ekvivalentnog četvorokrajnika, prikazanog na sl. 4.8e, nalaze se primenom matričnog računa:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_d & jB_d \\ jC_d & D_d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & jX_d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\lambda & jZ_c^{ekv} \sin\lambda \\ j\frac{1}{Z_c^{ekv}} \sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jX_{TM,M} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\lambda - \frac{X_d}{Z_c^{ekv}} \sin\lambda & j \left[X_{TM,M} \cos\lambda - \frac{X_{TM,M}}{Z_c^{ekv}} X_d \sin\lambda + Z_c^{ekv} \sin\lambda + X_d \cos\lambda \right] \\ j\frac{1}{Z_c^{ekv}} \sin\lambda & \cos\lambda - \frac{X_{TM,M}}{Z_c^{ekv}} \sin\lambda \end{bmatrix}. \end{aligned}$$



Sl. 4.8e Ekvivalentni četvorokrajnik sistema sa sl. 4.8d

Koeficijent B_d istovremeno predstavlja i transfer reaktansu ovog sistema, odnosno reaktansu produženog statora hidrogenatora po d osi X_d^{ekv} :

$$X_d^{ekv} = X_d \left(\cos\lambda - \frac{X_{TM,M}}{Z_c^{ekv}} \sin\lambda \right) + Z_c^{ekv} \sin\lambda + X_{TM,M} \cos\lambda,$$

gde je:

$$X_{TM,M} = X_{TM} + X_M.$$

dok je koeficijent A_d :

$$A_d = \cos\lambda - \frac{X_d}{Z_c^{ekv}} \sin\lambda.$$

Sličnim izvođenjem za sistem po q osi, uz uočavanje da jedina razlika postoji kod četvorokrajnika generatora gde se umesto reaktanse X_d po d osi koristi reaktansa X_q , dobijaju se sledeći izrazi za koeficijente A_q i $B_q = X_q^{ekv}$:

$$A_q = \cos \lambda - \frac{X_q}{Z_c^{ekv}} \sin \lambda ;$$

$$X_q^{ekv} = X_q \left(\cos \lambda - \frac{X_{TM,M}}{Z_c^{ekv}} \sin \lambda \right) + Z_c^{ekv} \sin \lambda + X_{TM,M} \cos \lambda .$$

Zamenom ovih koeficijenata u prvi od naponskih izraza, dobija se izraz za ems E :

$$E = U_M \cos \delta \left(\cos \lambda - \frac{X_d}{Z_c^{ekv}} \sin \lambda \right) + X_d^{ekv} I \sin(\delta + \varphi) .$$

Sređivanjem drugog izraza dobija se:

$$U_M \sin \delta \left(\cos \lambda - \frac{X_q}{Z_c^{ekv}} \sin \lambda \right) = X_q^{ekv} I \cos(\delta + \varphi) = X_q^{ekv} I \cos \delta \cos \varphi - X_d^{ekv} I \sin \delta \sin \varphi ;$$

$$\left[U_M \left(\cos \lambda - \frac{X_q}{Z_c^{ekv}} \sin \lambda \right) + X_d^{ekv} I \sin \varphi \right] \sin \delta = X_q^{ekv} I \cos \varphi \cos \delta ,$$

odnosno izraz za ugao δ između elektromotorne sile iza sinhronne reaktanse X_d generatora i napona na sabirnicama jake mreže (sabirnice beskonačne snage):

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{X_q^{ekv} I \cos \varphi}{U_M \left(\cos \lambda - \frac{X_q}{Z_c^{ekv}} \sin \lambda \right) + X_d^{ekv} I \sin \varphi} .$$

Izraz za odatu električnu snagu hidroelektrane je:

$$P = U_d I_d + U_q I_q .$$

$$\begin{aligned} P &= (-U_M \sin \delta) \left(-\frac{E - A_d U_M \cos \delta}{X_d^{ekv}} \right) + U_M \cos \delta \frac{A_q U_M \sin \delta}{X_q^{ekv}} = \\ &= \frac{E U_M}{X_d^{ekv}} \sin \delta - \frac{A_d U_M^2}{X_d^{ekv}} \sin \delta \cos \delta + \frac{A_q U_M^2}{X_q^{ekv}} \sin \delta \cos \delta = \\ &= \frac{E U_M}{X_d^{ekv}} \sin \delta + \frac{U_M^2}{2} \frac{X_d^{ekv} A_q - X_q^{ekv} A_d}{X_d^{ekv} X_q^{ekv}} \sin 2\delta . \end{aligned}$$

Konačno, sređivanjem ovog izraza dobija se:

$$P = \frac{EU_M}{X_d^{ekv}} \sin \delta + \frac{U_M^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d^{ekv} X_q^{ekv}} \sin 2\delta,$$

Parametri zamenske šeme sa slike 4.8b su:

$$X_{dG} = \frac{1}{2} \frac{x_{dG} \%}{100} \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} m_{TG}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{100}{100} \cdot \frac{15,75^2}{150} \cdot \left(\frac{231}{15,75} \right)^2 = 177,87 \Omega;$$

$$X_{qG} = \frac{1}{2} \frac{x_{qG} \%}{100} \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} m_{TG}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{65}{100} \cdot \frac{15,75^2}{150} \cdot \left(\frac{231}{15,75} \right)^2 = 115,61 \Omega;$$

$$X_{TG} = \frac{1}{2} \frac{x_{TG} \%}{100} \frac{U_{nTG}^2}{S_{nTG}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{12}{100} \cdot \frac{231^2}{150} = 21,34 \Omega;$$

$$X_M = \frac{U_{nM}^2}{S_{k3M}} m_{TM}^2 = \frac{400^2}{10000} \left(\frac{220}{400} \right)^2 = 4,84 \Omega;$$

$$X_{TM} = \frac{1}{2} \frac{x_{TM} \%}{100} \frac{U_{nTM}^2}{S_{nTM}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{13}{100} \cdot \frac{220^2}{150} = 20,97 \Omega.$$

Dalje je:

$$X_d = X_{dG} + X_{TG} = 177,87 + 21,34 = 199,15 \Omega;$$

$$X_q = X_{qG} + X_{TG} = 115,61 + 21,34 = 136,95 \Omega;$$

$$X_{TM,M} = X_{TM} + X_M = 21 + 4,84 = 25,81 \Omega;$$

$$Z_c^{ekv} = \frac{1}{2} Z_c = 200 \Omega;$$

$$\lambda = \beta L_v = 0,06 \cdot 350 = 21^\circ;$$

$$\begin{aligned} X_d^{ekv} &= X_d \left(\cos \lambda - \frac{X_{TM,M}}{Z_c^{ekv}} \sin \lambda \right) + Z_c^{ekv} \sin \lambda + X_{TM,M} \cos \lambda = \\ &= 199,15 \cdot \left(\cos 21^\circ - \frac{25,81}{200} \sin 21^\circ \right) + 200 \sin 21^\circ + 25,81 \cos 21^\circ = 272,48 \Omega; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_q^{ekv} &= X_q \left(\cos \lambda - \frac{X_{TM,M}}{Z_c^{ekv}} \sin \lambda \right) + Z_c^{ekv} \sin \lambda + X_{TM,M} \cos \lambda = \\ &= 136,95 \cdot \left(\cos 21^\circ - \frac{25,81}{200} \sin 21^\circ \right) + 200 \sin 21^\circ + 25,81 \cos 21^\circ = 217,29 \Omega; \end{aligned}$$

$$\underline{U}_M = U_r - j \frac{PX_{TM,M}}{U_r} = 220 - j \frac{260 \cdot 25,81}{220} = 220 - j30,5 = 222,1 \text{ kV} \angle -7,89^\circ.$$

Ako je:

$$\underline{U}_r = U_r \angle 0,$$

to je:

$$\underline{U}_M = U_M \angle \theta \Rightarrow \theta = -7,89^\circ.$$

Računska struja I nalazi se kao:

$$I = \frac{P}{U_r} = \frac{260}{220} = 1,18 \text{ kA}.$$

Pošto je struja \underline{I} u fazi sa naponom \underline{U}_r to ona prednjači naponu \underline{U}_M za ugao $7,89^\circ$, odnosno $\varphi = \theta = -7,89^\circ$.

Dalje je:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{X_q^{ekv} I \cos \varphi}{U_M \left(\cos \lambda - \frac{X_q}{Z_c^{ekv}} \sin \lambda \right) + X_q^{ekv} I \sin \varphi} = \\ &= \frac{217,29 \cdot 1,18 \cos(-7,89^\circ)}{222,1 \cdot \left(\cos 21^\circ - \frac{136,95}{200} \sin 21^\circ \right) + 217,29 \cdot 1,18 \sin(-7,89^\circ)}, \end{aligned}$$

odakle je:

$$\operatorname{tg} \delta = 2,16 \Rightarrow \delta = 65,14^\circ.$$

Sada je:

$$\begin{aligned} E &= U_M \cos \delta \left(\cos \lambda - \frac{X_d}{Z_c^{ekv}} \sin \lambda \right) + X_d^{ekv} I \sin(\delta + \varphi) = \\ &= 222,1 \cos 65,14^\circ \cdot \left(\cos 21^\circ - \frac{199,15}{200} \sin 21^\circ \right) + 272,48 \cdot 1,18 \sin(65,14^\circ - 7,89^\circ) = \\ &= 324,27 \text{ kV}. \end{aligned}$$

Na kraju je:

$$\begin{aligned} P &= \frac{EU_M}{X_d^{ekv}} \sin \delta + \frac{U_M^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d^{ekv} X_q^{ekv}} \sin 2\delta = \\ &= \frac{324,27 \cdot 222,1}{272,48} \sin \delta + \frac{222,1^2}{2} \cdot \frac{199,15 - 136,95}{272,48 \cdot 217,29} \sin 2\delta = \\ &= 264,31 \sin \delta + 25,91 \sin 2\delta; \end{aligned}$$

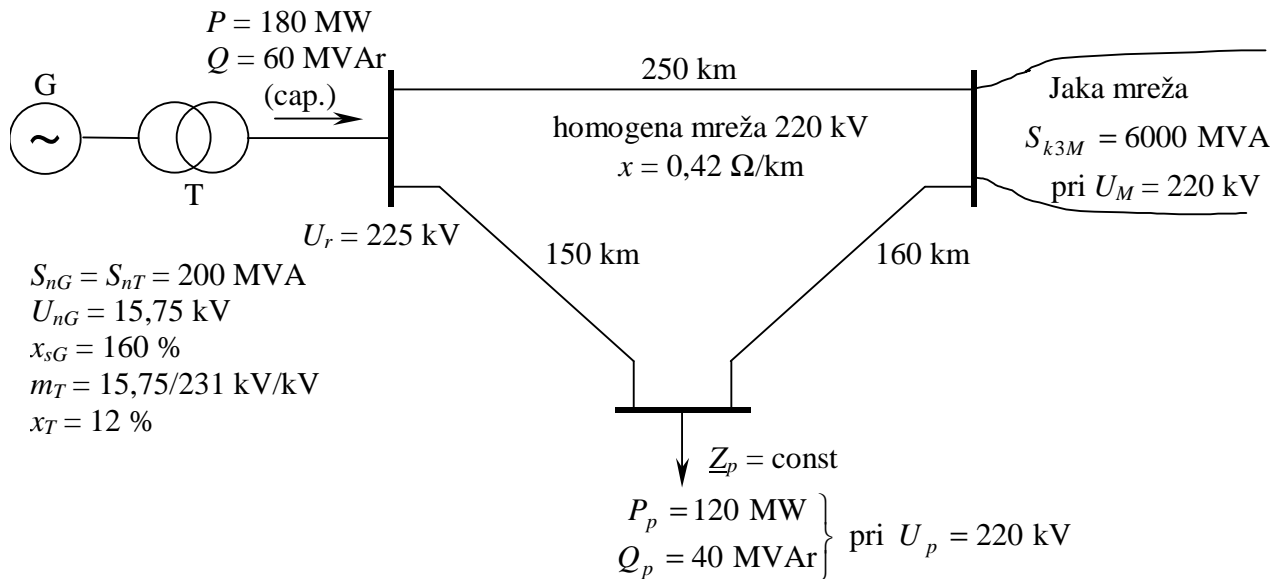
$$P_s = \frac{dP}{d\delta} = 264,31 \cos \delta + 2 \cdot 25,91 \cos 2\delta = 77,61 \text{ MW} / ^\circ.$$

Kako je $P_s > 0$ to se zaključuje da je sistem statički stabilan.

□

Zadatak 4.9

Za dati trofazni, jednopolno prikazani elektroenergetski sistem na sl. 4.9a proveriti statičku stabilnost generatora.



Sl. 4.9a Jednopolna šema i parametri sistema iz zadatka 4.9

Rešenje:

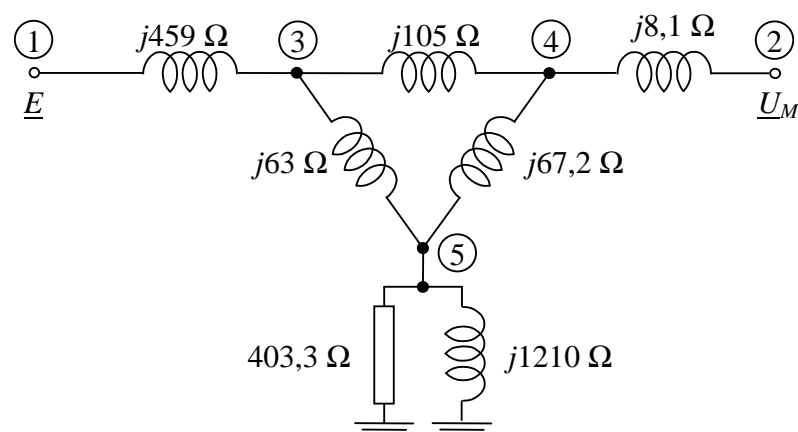
Parametri ekvivalentne šeme sistema sa sl. 4.9a, prikazane na sl. 4.9b su:

$$X_{GT} = 1,72 \cdot \frac{231^2}{200} = 459 \Omega;$$

$$X_{v1} = 0,42 \cdot 250 = 105 \Omega;$$

$$X_{v2} = 0,42 \cdot 150 = 63 \Omega;$$

$$X_{v3} = 0,42 \cdot 160 = 67,2 \Omega;$$



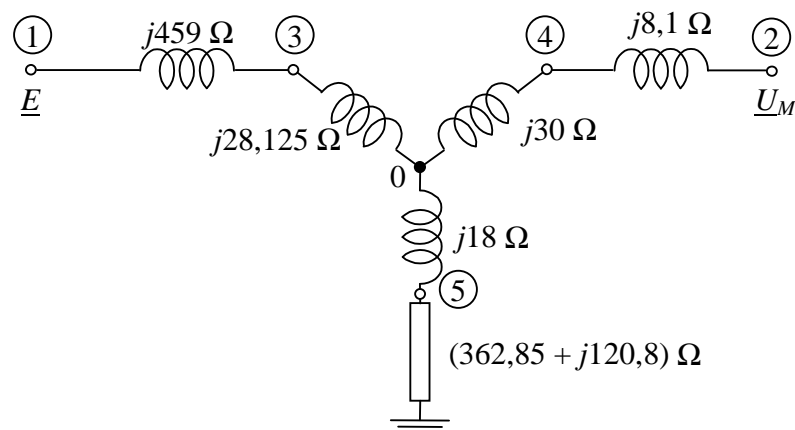
Sl. 4.9b Ekvivalentna šema impedansi sa sl. 4.9a

$$R_p = \frac{U_p^2}{P_p} = \frac{220^2}{120} = 403,3 \Omega;$$

$$X_p = \frac{U_p^2}{Q_p} = \frac{220^2}{40} = 1210 \Omega;$$

$$X_M = \frac{U_M^2}{S_{k3M}} = \frac{220^2}{6000} = 8,1 \Omega.$$

Posle transfiguracije trougla 345 u zvezdu, dobija se šema prikazana na sl. 4.9c.



Sl. 4.9c Ekvivalentna šema sistema posle transfiguracije trougla 345 sa sl. 4.9b u zvezdu

Sa prethodne šeme se nalazi sopstvena impedansa za čvor 1:

$$\underline{Z}_{11} = j459 + j28,125 + (j30 + j8,1) \parallel (j18 + 362,85 + j120,8) = (3,2 + j523,5) \Omega,$$

odnosno:

$$\underline{Z}_{11} \approx j523,5 \Omega \Rightarrow \mu_{11} \approx 0.$$

Dalje je, za \underline{U}_r uslovno u faznoj osi:

$$\begin{aligned} \underline{E} &= U_r + \frac{QX_{GT}}{U_r} + j \frac{PX_{GT}}{U_r} = 225 + \frac{(-60) \cdot 459}{225} + j \frac{459 \cdot 180}{225} = \\ &= (102,6 + j367,2) \text{ kV} = 381,4 \text{ kV} \angle 74,4^\circ. \end{aligned}$$

Gubici reaktivne snage u reaktansi bloka generator-transformator su:

$$Q^{sub} = X_{GT} \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = 459 \cdot \frac{180^2 + 60^2}{225^2} = 326,4 \text{ MVar},$$

tako da je unutrašnja reaktivna snaga generatora:

$$Q_u = Q_{sp} + Q^{sub} = -60 + 326,4 = 266,4 \text{ MVar}.$$

Generator je statički stabilan ako mu je sinhronizaciona snaga veća od nule, tj. ako je, shodno izrazu izvedenom u zadatku 4.7, ispunjen uslov

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{E^2}{Z_{11}} \cos \mu_{11} - Q_u > 0,$$

odakle je

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{381,4^2}{523,5} \cdot 1 - 266,4 = 11,52 > 0.$$

Odavde se vidi da je generator statički stabilan.



Zadatak 4.10

a) Sinhroni motor funkcioniše u natpobuđenom stanju, apsorbujući iz mreže aktivnu snagu od $P_{SM} = -0,61$ r.j. i odajući reaktivnu snagu $Q_{SM} = +0,36$ r.j., pri naponu $U = 1,0$ r.j.

a1) Naći ugao snage δ ;

a2) Proračunati indukovanu EMS motora E ;

a3) Pokazati da se gledano sa strane mreže motor može predstaviti sa prostim RC kolom.

Reaktanse motora su $X_d = 1,10$ r.j. i $X_q = 0,80$ r.j..

b) Sinhroni generator je priključen na mrežu u čvoru čiji je napon $U = U_0$ konstantan, sa snagom određenom uglom snage δ_0 . Pod pretpostavkom da je mehanički momenat turbine takođe konstantan, naći izraz za proračun malih promena reaktivne snage (ΔQ_G), pri promeni pobude (koja je u r.j. jednaka promeni EMS ΔE).

Rešenje:

a1) Aktivna i reaktivna snaga sinhronog motora izražavaju se preko formula:

$$P_{SM} = \frac{EU}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta;$$

$$Q_{SM} = -\frac{U^2}{X_q} + \frac{EU}{X_d} \cos \delta + U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos^2 \delta.$$

Posle množenja prve formule sa $\cos \delta$, a druge sa $\sin \delta$ i oduzimanja tako dobijenih drugog od prvog izraza, dobija se:

$$P_{SM} \cos \delta - Q_{SM} \sin \delta = \frac{U^2}{X_q} \sin \delta,$$

odakle je:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_{SM}}{Q_{SM} + \frac{U^2}{X_q}} = \frac{-0,61}{0,36 + \frac{1^2}{0,8}} = -0,379;$$

$$\delta = -20,75^\circ.$$

a2) Iz izraza za P_{SM} u tač. a1), dobija se jednačina:

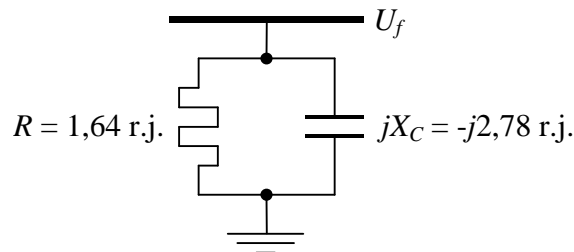
$$-0,61 = \frac{E \cdot 1}{1,1} \sin(-20,75^\circ) + \frac{1^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{0,8} - \frac{1}{1,1} \right) \sin(-41,5^\circ),$$

odakle je $E = 1,543$ r.j.

a3) Motor troši aktivnu snagu (od 0,61 r.j.) i proizvodi reaktivnu snagu (0,36 r.j.), pa se može predstaviti kao potrošač sa ekvivalentnim RC paralelnim kolom, sa sl. 4.10a, čiji su otpor i reaktansa

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{1}{0,61} = 1,64 \text{ r.j.};$$

$$X_C = -\frac{U^2}{Q} = -\frac{1}{0,36} = -2,78 \text{ r.j.}$$



Sl. 4.10a RC ekvivalent sinhronog motora iz zadatka 4.10

b) Iz uslova zadatka ($P_G = \text{const.}$ i $U = U_0 = \text{const.}$) i izraza za P_G izvedenog u zadatku 1a, ako se sve veličine izraze u relativnim jedinicama, je:

$$\Delta P_G = \left(\frac{U_0 E}{X_d} \cos \delta \right) \Delta \delta + \left(\frac{U_0}{X_d} \sin \delta \right) \Delta E = 0,$$

odakle je

$$\Delta \delta = -\frac{\sin \delta}{E \cos \delta} \Delta E.$$

Kako je izraz za promenu reaktivne snage turbogeneratorsa za $U = U_0 = \text{const.}$ shodno izrazu za Q_G izvedenom u zadatku 4.1b, ako se sve veličine izraze u relativnim jedinicama:

$$\Delta Q_G = -\left(\frac{U_0 E}{X_d} \sin \delta \right) \Delta \delta + \left(\frac{U_0}{X_d} \cos \delta \right) \Delta E,$$

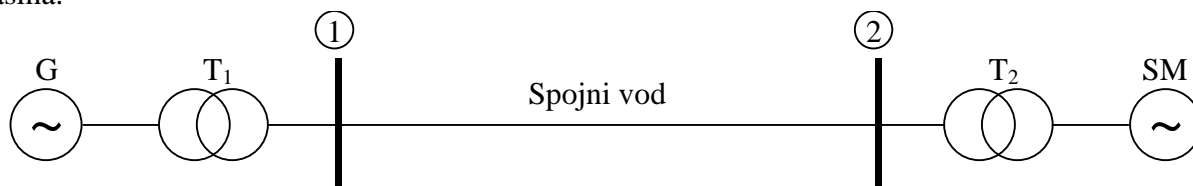
to se zamenom napred nađenog izraza za $\Delta \delta$, u izraz za ΔQ_G , dobija da je:

$$\Delta Q_G = \left(\frac{U_0}{X_d} \frac{\sin^2 \delta}{\cos \delta} \right) \Delta E + \left(\frac{U_0}{X_d} \cos \delta \right) \Delta E = \left(\frac{U_0}{X_d} \frac{\sin^2 \delta + \cos^2 \delta}{\cos \delta} \right) \Delta E = \left(\frac{U_0}{X_d \cos \delta} \right) \Delta E.$$

□

Zadatak 4.11

a) Izvesti jednačinu kretanja obrtnih masa dvomašinskog elektroenergetskog sistema tipa sinhroni generator – sinhroni motor, shodno šemi sa sl. 4.11a. Takođe izvesti izraze za učestanost i periodu oscilacija međusobnog ugla rotora, na granici dinamičke stabilnosti sistema, pod pretpostavkom da se radi o malim poremećajima. U proračunima zanemariti sopstvena prigušenja mašina.



Sl. 4.11a Uprošćena šema dvomašinskog sistema iz zadatka 4.11

b) Izvršiti numeričke proračune učestanosti i periode oscilacija iz tač. a, ako su parametri sistema sledeći:

Generator:

$$E'_G = 1,80 \text{ r.j.}$$

$$X'_G = 0,25 \text{ r.j.}$$

$$T_{iG} = 7 \text{ MWs/MVA}$$

$$X_{T1} = 0,12 \text{ r.j.}$$

$$X_v = 0,60 \text{ r.j.}$$

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

Motor:

$$E'_{SM} = 1,0 \text{ r.j.}$$

$$X'_{SM} = 0,20 \text{ r.j.}$$

$$T_{iSM} = 4,2 \text{ MWs/MVA}$$

$$X_{T2} = 0,105 \text{ r.j.}$$

$$\delta_{120} = 30^\circ$$

$$X = X'_G + X_{T1} + X_v + X_{T2} + X'_{SM} = 0,25 + 0,12 + 0,60 + 0,105 + 0,20 = 1,275 \text{ r.j.}$$

Rešenje:

a) Jednačine obrtnih masa generatora i motora (iz uslova zadatka) su:

$$\frac{T_{iG}}{\omega_n} \frac{d^2(\Delta\delta_1)}{dt^2} + P_{s12}\Delta\delta_{12} = 0;$$

$$\frac{2T_{iSM}}{\omega_n} \frac{d^2(\Delta\delta_2)}{dt^2} + P_{s21}\Delta\delta_{21} = 0,$$

gde je:

P_{s12} (P_{s21}) - sinhronizaciona snaga generatora (motora) u MW/rad;

$\delta_{12} = -\delta_{21} = \delta_1 - \delta_2$ - međusobni ugao rotora generatora i motora u rad.

Oduzimanjem druge od prve jednačine dobija se jednačina

$$\frac{d^2(\Delta\delta_{12})}{dt^2} + \omega_n \left(\frac{P_{s12}}{T_{iG}} \Delta\delta_{12} - \frac{P_{s21}}{T_{iSM}} \Delta\delta_{21} \right) = 0.$$

Jednačina aktivne snage, koju razmenjuju sinhroni generator i motor je:

$$P_{12} = \frac{E'_G E'_{SM}}{X} \sin \delta_{12} = P_{max} \sin \delta_{12};$$

gde je

$$P_{max} = \frac{E'_G E'_{SM}}{X}.$$

Onda je pri početnom uglu $\delta_{120} = -\delta_{210}$:

$$P_{s12} = P_{max} \cos \delta_{120};$$

$$P_{s21} = P_{max} \cos \delta_{120} = P_{s12} \text{ [r.j./rad]}.$$

Konačno, jednačina kretanja obrtnih masa sistema postaje:

$$\frac{d^2(\Delta\delta_{12})}{dt^2} + P_{max} \omega_n \cos \delta_{120} \left(\frac{1}{T_{iG}} + \frac{1}{T_{iSM}} \right) \Delta\delta_{12} = 0,$$

odnosno:

$$\frac{d^2(\Delta\delta_{12})}{dt^2} + \frac{\omega_n P_{s12}}{T_i} \Delta\delta_{12} = 0,$$

gde je:

$$T_i = \frac{T_{iG} T_{iSM}}{T_{iG} + T_{iSM}}.$$

b) Karakteristična jednačina sistema ovde je:

$$s^2 + \omega_n \frac{P_{s12}}{T_i} = 0,$$

čiji su koreni:

$$s_{1,2} = \pm j \sqrt{\frac{\omega_n P_{s12}}{T_i}} = \pm j s_0,$$

gde je:

$$s_0 = \sqrt{\frac{\omega_n P_{s12}}{T_i}}.$$

Onda su tražene veličine učestanosti i periode oscilacija:

$$\omega_{osc} = s_0 \text{ [rad]},$$

odnosno:

$$f_{osc} = \frac{s_0}{2\pi} \text{ [Hz];}$$

$$T_{osc} = \frac{1}{f_{osc}} \text{ [s].}$$

Numeričke vrednosti traženih veličina su:

$$P_{s12} = P_{s21} = \frac{E'_G E'_{SM}}{X} \cos \delta_{120} = \frac{1,8 \cdot 1,0}{1,275} \cos 30^\circ = 1,223 \text{ r.j./rad;}$$

$$\omega_n = 2\pi f_n = 314 \text{ rad/s ;}$$

$$T_i = \frac{T_{iG} T_{iSM}}{T_{iG} + T_{iSM}} = \frac{7 \cdot 4,2}{7 + 4,2} = 2,625 \text{ MWs/MVA;}$$

$$\omega_{osc} = s_0 = \sqrt{\frac{\omega_n P_{s12}}{T_i}} = \sqrt{\frac{314 \cdot 1,223}{2,625}} = 12,095 \text{ rad/s;}$$

$$f_{osc} = \frac{\omega_{osc}}{2\pi} = \frac{12,095}{2\pi} = 1,925 \text{ Hz;}$$

$$T_{osc} = \frac{1}{f_{osc}} = \frac{1}{1,925} = 0,52 \text{ s.}$$

□

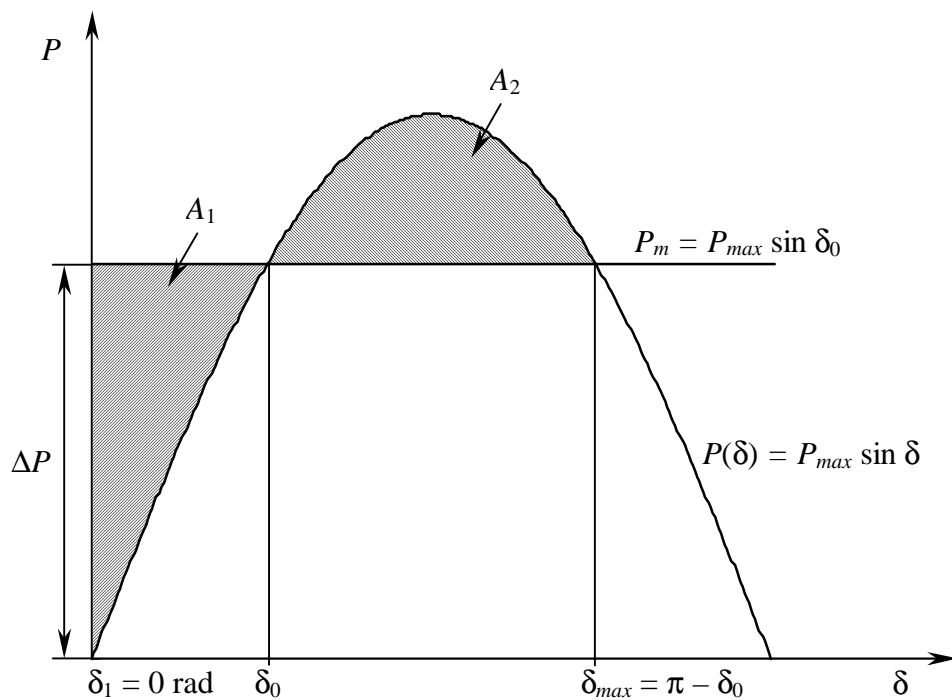
Zadatak 4.12

Metodom jednakih površina utvrditi graničnu snagu $P_{gr} = kP_{max}$ ($k \leq 1$), pri kojoj se turbogenerator (generator sa cilindričnim rotorom) vezan na krutu mrežu, pri potpunom rasterećenju ($\Delta P = -P_m$) nalazi na granici stabilnosti (P_{max} je amplituda krive njihanja $P(\delta)$ mašine), pri čemu je dozvoljena greška rešenja $\varepsilon \leq 1\%$.

Rešenje:

Na sl. 4.12a, nacrtana je kriva njihanja $P(\delta)$ generatora. Uslov stabilnosti pri potpunom rasterećenju mašine je jednakost površina A_1 i A_2 , koji se analitički izražava preko jednačine:

$$P_{max} \left(\delta_0 \sin \delta_0 - \int_{\delta_1}^{\delta_0} \sin \delta d\delta \right) = P_{max} \left[\int_{\delta_0}^{\delta_{max}=\pi-\delta_0} \sin \delta d\delta - (\delta_{max} - \delta_0) \sin \delta_0 \right],$$



Sl. 4.12a Kriva njihanja turbogeneratora iz zadatka 4.12

iz koje se, posle sređivanja dobija transcendentna jednačina po početnom uglu δ_0 (koji određuje rasterećenje $\Delta P = P_m = P_{max} \sin \delta_0$):

$$\cos \delta_0 + \delta_0 \sin \delta_0 + 1 - \pi \sin \delta_0 = 0 .$$

Rešenje ove jednačine naći će se razvojem trigonometrijskih funkcija ($\sin \delta_0$ i $\cos \delta_0$) u Taylorov red, povećavajući broj članova reda, sve dok se ne zadovolji uslov $\varepsilon \leq 1\%$.

Prvi korak: Zamenjuje se:

$$\sin \delta_0 = \delta_0 ; \quad \cos \delta_0 = 1 - \frac{\delta_0^2}{2} ,$$

pa se rešava jednačina

$$\delta_0^2 - 2\pi\delta_0 + 4 = 0 ,$$

odakle je

$$\delta_0 = \pi \pm \sqrt{\pi^2 - 4} = 3,1416 \pm 2,4227 .$$

Prihvatljivo rešenje za δ_0 mora biti manje od 90° , pa je

$$\delta_0 = 0,7189 \text{ rad} = 41,19^\circ .$$

Zamenom ovog rešenja u osnovnu jednačinu jednakosti površina A_1 i A_2 na sl. 4.12a, dobija se:

$$0,7525 + 0,7189 \cdot 0,6586 + 1 - 3,1416 \cdot 0,6586 = 0,1571 \neq 0 .$$

Uočava se da je greška rešenja (15,71 %) suviše velika u odnosu na dozvoljenu, odakle se zaključuje da se u razvoju trigonometrijskih funkcija mora ići na veći broj članova Taylorovog reda, od ovde korišćenih (jedan za $\sin \delta_0$ i dva za $\cos \delta_0$).

Drugi korak: Zamenjuje se:

$$\sin \delta_0 = \delta_0 - \frac{\delta_0^3}{6} ; \quad \cos \delta_0 = 1 - \frac{\delta_0^2}{2} + \frac{\delta_0^4}{24} ,$$

pa se rešava jednačina:

$$1 - \frac{\delta_0^2}{2} + \frac{\delta_0^4}{24} + \left(\delta_0 - \frac{\delta_0^3}{6} \right) \cdot (\delta_0 - \pi) + 1 = 0 ,$$

čije je rešenje:

$$\delta_0 = 0,8096 \text{ rad} = 46,387^\circ$$

Proverom ovog rešenja, preko osnovne jednačine jednakosti površina A_1 i A_2 na sl. 4.12a dobija se:

$$0,6896 + 0,8096 \cdot 0,724 + 1 - 3,1416 \cdot 0,724 = 0,0013 .$$

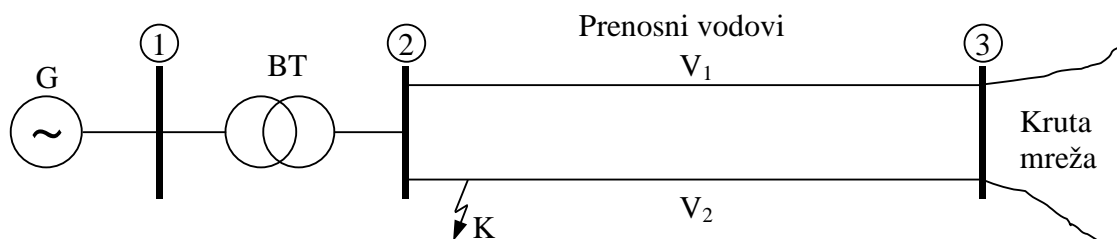
Greška je $0,13\% < \epsilon_{zad} = 1\%$, tako da se ovo rešenje problema može prihvatiti. Onda je traženo granično opterećenje generatora:

$$P_{gr} = P_{max} \sin \delta_0 = 0,724 P_{max} .$$

□

Zadatak 4.13

Za prenosni sistem, prikazan na sl. 4.13a, proračunati kritični ugao i kritično vreme isključenja kvara, za slučaj trofaznog kratkog spoja sa nultom impedansom luka na vodu V_2 , neposredno iza sabirnica višeg napona generatorskog blok-transformatora. U normalnom stanju, pre kvara, generator odaje u krutu mrežu snagu $P_\infty = 0,9$ r.j. pri naponu $U_\infty = 1,00$ r.j. i faktoru snage $\cos \varphi_\infty = 1,00$. Bazne vrednosti za proračun relativnih jedinica su $S_B = S_{nG}$ i $U_B = U_\infty$.



$$X'_d = 0,4 \text{ r.j.}$$

$$mD^2 = 243,2 \text{ tm}^2$$

$$n_n = 3000 \text{ ob/min}$$

$$S_{nG} = 1000 \text{ MW}$$

$$X_T = 0,15 \text{ r.j.}$$

$$S_{nT} = 1000 \text{ MW}$$

$$X_{v1} = 0,4 \text{ r.j.}$$

$$X_{v2} = 0,4 \text{ r.j.}$$

$$U_\infty = 1,00 \text{ r.j.}$$

$$P_\infty = 0,90 \text{ r.j.}$$

$$\cos \varphi_\infty = 1,00$$

Sl. 4.13a Jednopolna šema i osnovni podaci za prenosni sistem iz zadatka 4.13

Rešenje:

Proračun početnih uslova:

Indukovana EMS iza tranzijentne impedanse je:

$$\underline{E}' = \underline{U}_\infty + jX \underline{I} = 1,00 + j0,75 \frac{0,9 + j0}{1,00} = (1 + j0,675) \text{ r.j.} = 1,2065 \text{ r.j.} \angle 34,02^\circ.$$

Onda je:

$$E' = 1,2065 \text{ r.j.},$$

a početni ugao:

$$\delta_0 = 34,02^\circ.$$

Provera:

$$\sin \delta_0 = \frac{P_m}{P_{max}} = \frac{0,9 \cdot 0,75}{1,2065 \cdot 1} = 0,55947; \quad P_m = 0,9 \text{ r.j.}; \quad P_{max} = \frac{E'U}{X} = \frac{1,2065 \cdot 1}{0,75} = 1,609 \text{ r.j.};$$

$$\delta_0 = 34,02^\circ = 0,594 \text{ rad.}$$

Izrazi za karakteristike snaga-ugao su:

Pre kvara:

$$P = 1,609 \sin \delta.$$

Za vreme kvara:

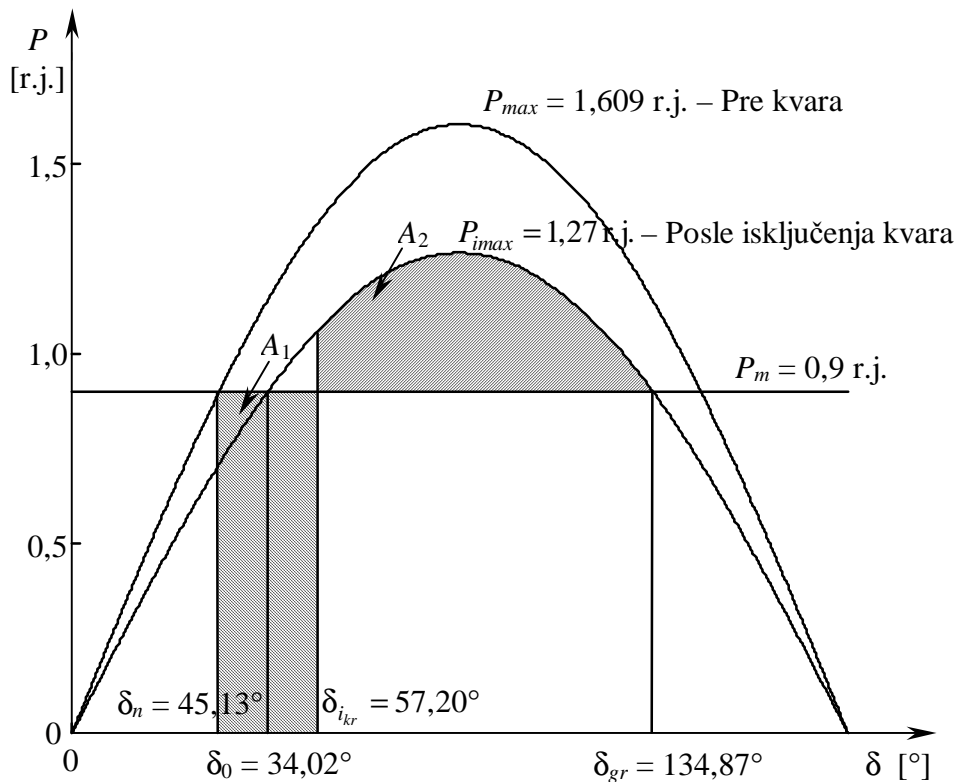
$$P_k = 0 = r_1 P_{max} \sin \delta \Rightarrow r_1 = 0.$$

Posle isključenja kvara ($X^{ekv} = 0,4 + 0,15 + 0,4 = 0,95$ r.j.)

$$P_i = \frac{1,2065 \cdot 1}{0,95} \sin \delta = 1,27 \sin \delta = r_2 P_{max} \sin \delta \Rightarrow r_2 = \frac{1,27}{1,609} = 0,789.$$

Grafični dozvoljeni radni ugao mašine je:

$$\delta_{gr} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_m}{r_2 P_{max}} = 180^\circ - \arcsin \frac{0,9}{0,789 \cdot 1,609} = 180^\circ - 45,13^\circ = 134,87^\circ = 2,3536 \text{ rad}.$$



Sl. 4.13b Ilustracija rešenja zadatka 4.13

Kritični ugao isključenja kvara je

$$\cos \delta_{i_{kr}} = \frac{P_m}{r_2 P_{max}} (\delta_{gr} - \delta_0) + \cos \delta_{gr} = \frac{0,9}{1,27} \cdot (2,3536 - 0,594) - 0,7053 = 0,5417 ;$$

$$\delta_{i_{kr}} = 57,20^\circ = 0,998 \text{ rad} .$$

e) Kritično vreme isključenja kvara za $mD^2 = 243,2 \text{ tm}^2$ i

$$T_i = 2,7414 \cdot \frac{mD^2 n_n^2}{S_n} \cdot 10^{-9} = 2,7414 \cdot \frac{243,2 \cdot 10^3 \cdot 9 \cdot 10^6}{1000} \cdot 10^{-9} = 6,0 \text{ s} ,$$

je:

$$t_{i_{kr}} = \sqrt{\frac{2T_i (\delta_{i_{kr}} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6 \cdot (0,998 - 0,594)}{314 \cdot 0,9}} = 0,131 \text{ s} \approx 6,5 \text{ perioda} .$$

Na sl. 4.13b grafički je ilustrovano rešenje problema.

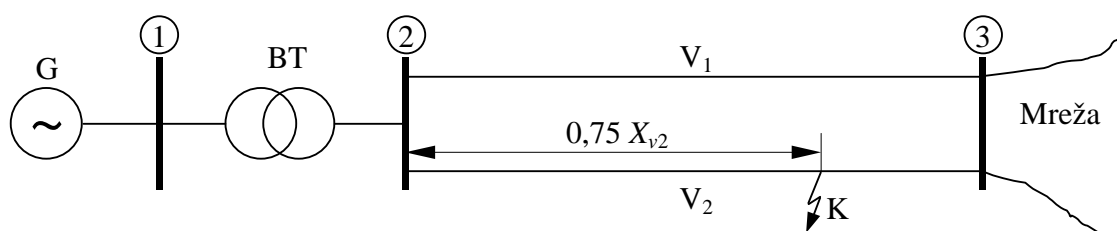


Zadatak 4.14

Elektrana predstavljena ekvivalentnim generatorom (G), vezana na krutu mrežu posredstvom generatorskog blok-transformatora (BT) i dvostrukog voda (V_1 , V_2), prikazana je na sl. 4.14a. Odaje snagu $P = 0,85$ r.j. uz $\cos \varphi = 0,85$ (ind) pri naponu krute mreže $U_\infty = 1,0$ r.j. ($f_n = 50$ Hz). Ostali podaci neophodni za proračune, dati su ispod sl. 4.14a.

Za slučaj trofaznog kratkog spoja sa nultom impedansom luka, koji se dogodio na vodu V_2 na udaljenosti od 75 % od početka voda (mereno od sabirnica 2) izračunati:

- Početni ugao δ_0 (u rad i $^\circ$) na krivoj njihanja $P(\delta)$.
- Izraze za krive $P(\delta)$ pre kvara, za vreme kvara i posle isključenja voda u kvaru.
- Granični dozvoljeni ugao oscilacija mašine δ_{gr} (u rad i $^\circ$).
- Kritični ugao isključenja kvara $\delta_{i_{kr}}$ (u rad i $^\circ$).
- Ilustrovati grafički rešenje problema.



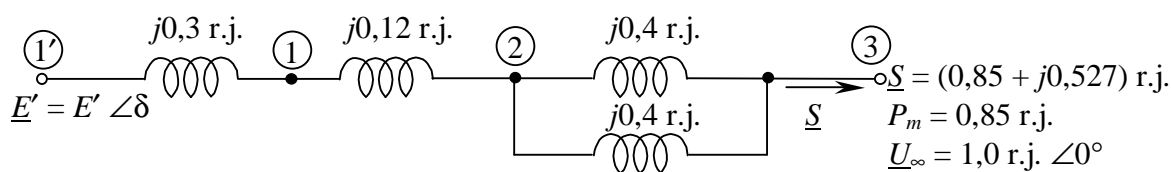
$$\begin{array}{llll}
 S_{nG} = 100 \text{ MVA}; & S_{nT} = 100 \text{ MVA}; & X_{v1} = X_{v2} = 0,4 \text{ r.j.}; & U_\infty = 1,0 \text{ r.j.} \\
 x'_{dG} = 0,3 \text{ r.j.}; & x_{BT} = 0,12 \text{ r.j.}; & & P_\infty = 0,85 \text{ r.j.} \\
 T_i = 6,0 \text{ MWs/MVA}; & & & \cos \varphi = 0,85.
 \end{array}$$

Sl. 4.14a Jednopolna šema i parametri sistema iz zadatka 4.14

Rešenje:

Proračun početnih uslova

Ekvivalentna zamenska šema sistema pre kvara sa sl. 4.14a, data je na sl. 4.14b.



Sl. 4.14b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.14a pre kvara

Sa sl. 4.14b dobija se:

$$X^{ekv} = 0,3 + 0,12 + \frac{0,4}{2} = 0,62 \text{ r.j.},$$

odnosno:

$$\underline{E}' = \underline{U}_\infty + jX^{ekv} \underline{I} = 1,0 + j0,62 \cdot \frac{0,85 - j0,527}{1} = (1,327 + j0,527) \text{ r.j.} = 1,428 \text{ r.j.} \angle 21,66^\circ,$$

odakle je:

$$\delta_0 = 21,66^\circ = 0,374 \text{ rad} .$$

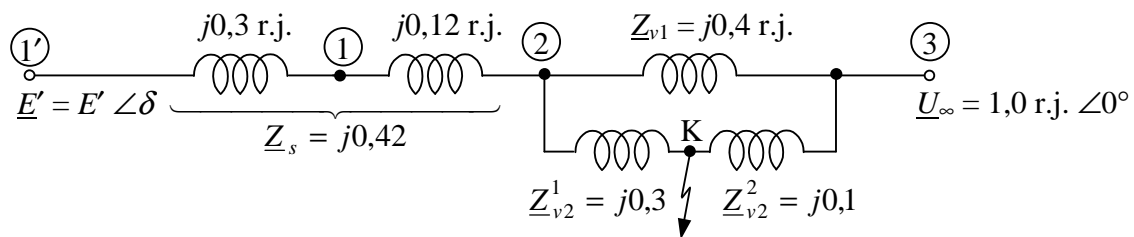
b) Izrazi za krive njihanja $P(\delta)$

Pre kvara:

$$P = \frac{E'U_\infty}{X^{ekv}} \sin \delta = \frac{1,428 \cdot 1,0}{0,62} \sin \delta = 2,303 \sin \delta ; \quad P_{max} = 2,303 \text{ r.j.}$$

Za vreme kvara:

Transfer impedansa se proračunava sa sl. 4.14c, koja prikazuje ekvivalentnu šemu sistema sa sl. 4.14a za vreme kvara.



Sl. 4.14c Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.14a, za vreme kvara

Posle transfiguracije zvezde 1'23K u trougao 1'3K proračunava se transfer impedansa

$$\underline{Z}_{1'3} = j0,42 + j0,4 + j \frac{0,42 \cdot 0,4}{0,3} = j1,38 \text{ r.j.}$$

Onda je izraz za krivu njihanja $P(\delta)$ za vreme kvara

$$P_k = \frac{E'U_\infty}{X_{1'3}} \sin \delta = \frac{1,428 \cdot 1,0}{1,38} \sin \delta = 1,035 \sin \delta .$$

Odnos amplituda krivih njihanja za vreme i pre kvara je

$$r_1 = \frac{1,035}{2,303} = 0,4494 .$$

Posle isključenja kvara (kada se isključuje vod V_2):

$$X_1^{ekv} = 0,42 + 0,4 = 0,82 \text{ r.j. ,}$$

$$P_i = \frac{E'U_\infty}{X_1^{ekv}} \sin \delta = \frac{1,428 \cdot 1,0}{0,82} \sin \delta = 1,742 \sin \delta .$$

Odnos amplituda krivih njihanja posle isključenja kvara i pre kvara je

$$r_2 = \frac{1,742}{2,303} = 0,7562 .$$

c) Određivanje graničnog dozvoljenog ugla oscilacija mašine:

$$\delta_{gr} = \pi - \arcsin \frac{P_m}{r_2 P_{max}} = \pi - \arcsin \frac{0,85}{0,7562 \cdot 2,303} = 2,632 \text{ rad} = 150,79^\circ .$$

d) Proračun kritičnog ugla isključenja kvara vrši se na osnovu jednakosti površina $A_1 + A_3$ i $A_2 + A_4$ sa sl. 4.14d. Taj uslov se ovde izražava preko jednačine:

$$\begin{aligned} P_m (\delta_n - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_n} r_1 P_{max} \sin \delta d\delta + P_m (\delta_{i_{kr}} - \pi + \delta_n) - \int_{\pi - \delta_n}^{\delta_{i_{kr}}} r_1 P_{max} \sin \delta d\delta = \\ = \int_{\delta_n}^{\pi - \delta_n} r_1 P_{max} \sin \delta d\delta - P_m (\pi - 2\delta_n) + \int_{\delta_{i_{kr}}}^{\delta_{gr}} r_2 P_{max} \sin \delta d\delta - P_m (\delta_{gr} - \delta_{i_{kr}}), \end{aligned}$$

gde je

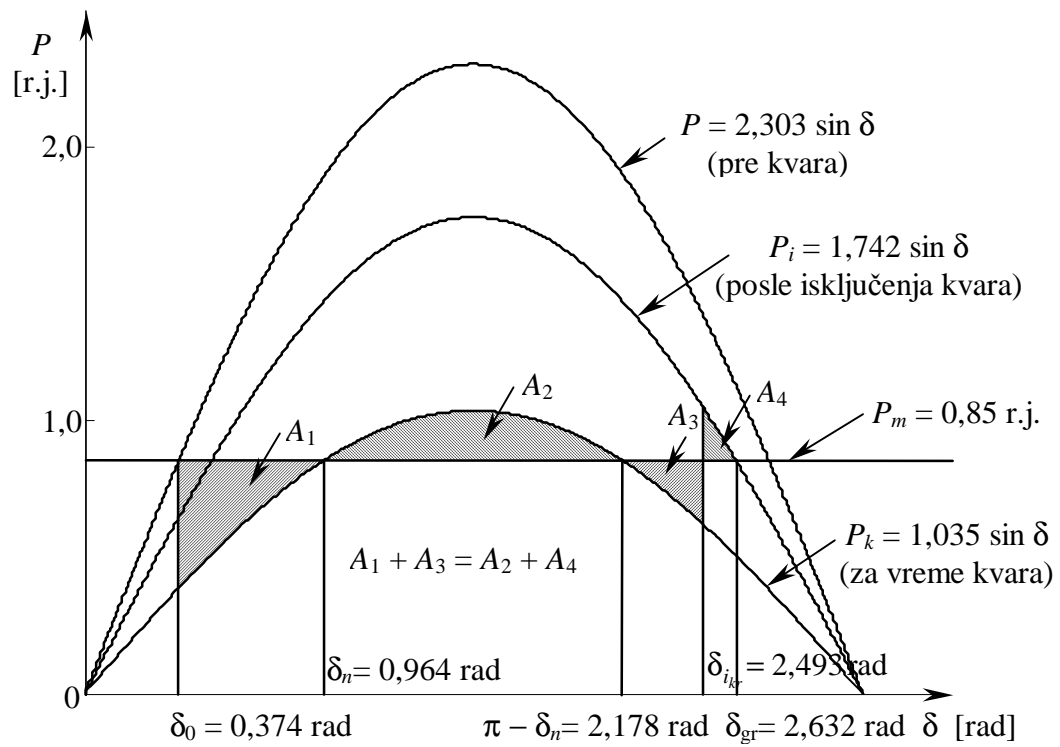
$$\delta_n = \arcsin \frac{P_m}{r_1 P_{max}} = \arcsin \frac{0,85}{1,035} = 55,21^\circ = 0,964 \text{ rad.}$$

Kritičan ugao isključenja kvara onda se nalazi preko izraza:

$$\begin{aligned} \cos \delta_{i_{kr}} &= \frac{\frac{P_m}{P_{max}} (\delta_{gr} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{gr} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} = \\ &= \frac{\frac{0,85}{2,303} \cdot (2,6317 - 0,374) + 0,7562 \cos 150,79^\circ - 0,4494 \cos 21,66^\circ}{0,7562 - 0,4494} = -0,796936 ; \end{aligned}$$

$$\delta_{i_{kr}} = 142,84^\circ = 2,493 \text{ rad} < \delta_{gr} = 2,632 \text{ rad} = 150,79^\circ .$$

e) Grafička ilustracija problema prikazana je na sl. 4.14d.



Sl. 4.14d Ilustracija rešenja zadatka 4.14



Zadatak 4.15

Elektrana predstavljena ekvivalentnim generatorom nominalne snage $S_{nG} = 500$ MVA, posredstvom generatorskog blok-transformatora i dvostrukog voda isporučuje u moćnu mrežu, čiji je napon 220 kV, snagu od 450 MW, pri faktoru snage od 0,965 cap., kako je to ilustrovano na sl. 4.15a.

Zbog trofaznog kratkog spoja na jednom od dva paralelna voda, posle trenutne eliminacije kvara, sistem nastavlja da radi samo sa jednim vodom.

a) Proračunati reaktivne gubitke prenosa i faktor snage generatora u normalnom radnom režimu (pre kvara).

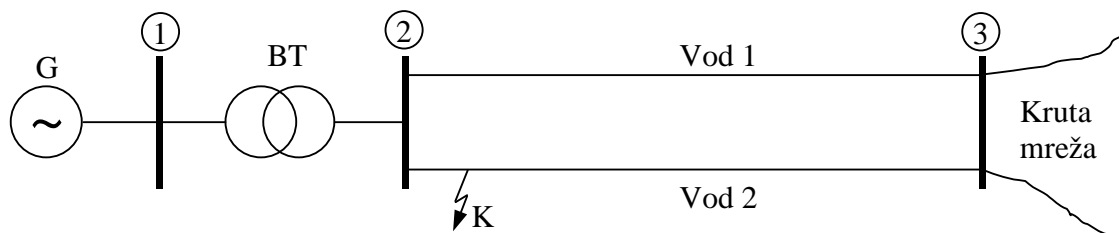
b) Odrediti izraze za krive snaga-ugao $P(\delta)$ pre kvara i posle kvara (pobuda generatora ostaje konstantna).

c) Odrediti uglove snaga pre kvara (δ_0) i posle kvara (δ_n), kao i granični ugao stabilnosti (δ_{gr}), gubitke u prenosu posle kvara i faktor snage na kraju voda.

d) Primenom metoda jednakih površina utvrditi, da li sistem u režimu rada posle kvara ostaje stabilan. Ako je odgovor potvrđan izračunati kritični ugao isključenja kvara ($\delta_{i_{kr}}$) i kritično vreme isključenja kvara.

Rezultate proračuna ilustrovati na fazorskom dijagramu napona i struja i dijagramima $P(\delta)$.

Podaci o sistemu su prikazani na slici. Za bazne vrednosti pri proračunu relativnih jedinica usvojiti $S_B = 500$ MVA i $U_B = 220$ kV.



$$S_{nG} = 500 \text{ MVA}$$

$$U_{nG} = 20 \text{ kV}$$

$$x'_{dG} = 20\%$$

$$mD^2 = 162124 \text{ kgm}^2$$

$$n_n = 3000 \text{ ob/min}$$

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

$$S_{nT} = 450 \text{ MVA}$$

$$U_{nT} = 20/220 \text{ kV/kV}$$

$$x_T = 12\%$$

$$x_v = 0,32265 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$L_v = 200 \text{ km}$$

$$U_\infty = 220 \text{ kV}$$

$$P_\infty = 450 \text{ MW}$$

$$\cos \varphi_\infty = 0,965 \text{ cap.}$$

Sl. 4.15a Jednopolna šema i parametri elemenata sistema iz zadatka 4.15

Rešenje:

Proračun parametara elemenata sistema:

$$X_G = X'_{dG} = \frac{x'_{dG}}{100} \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \left(\frac{220}{20} \right)^2 = \frac{20}{100} \cdot \frac{20^2}{500} \cdot \left(\frac{220}{20} \right)^2 = 19,36 \Omega = \frac{19,36}{96,8} = 0,20 \text{ r.j. ,}$$

gde je

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{220^2}{500} = 96,8 \Omega ;$$

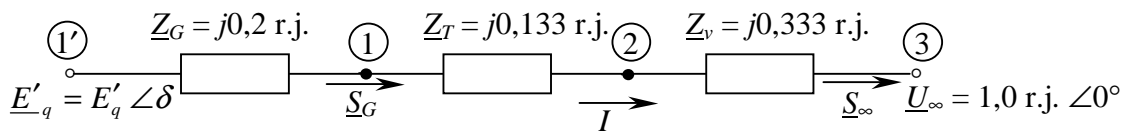
$$X_T = \frac{x_T}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{220^2}{450} = 12,907 \Omega = \frac{12,907}{96,8} = 0,133 \text{ r.j. ;}$$

$$X_v = x_v L_v = 0,32265 \cdot 200 = 64,53 \Omega = \frac{64,53}{96,8} = 0,667 \text{ r.j. ;}$$

$$T_i = 2,7414 \frac{(mD^2) n_n^2}{S_{nG}} \cdot 10^{-9} = 2,7414 \cdot \frac{162124 \cdot 3000^2}{500} \cdot 10^{-9} = 8 \frac{\text{MWs}}{\text{MVA}} .$$

a) Proračun stanja pre kvara

Ekvivalentna šema sistema pre kvara predstavljena je na sl. 4.15b.



Sl. 4.15b Ekvivalentna šema sistema sa slike 4.15a, pre kvara

$$P_G = 0,9 \text{ r.j.}$$

$$\underline{S}_\infty = (0,9 - j0,2445) \text{ r.j.}$$

$$\underline{I} = (0,9 + j0,2445) \text{ r.j.} = 0,9326 \text{ r.j.} \angle 15,2^\circ$$

$$\varphi_\infty = -15,2^\circ$$

$$X = 0,2 + 0,133 + 0,333 = 0,666 \text{ r.j.}$$

$$Q_\infty = P_\infty \operatorname{tg} \varphi_\infty = 0,9 \cdot 0,2171 = -0,2445 \text{ r.j.}$$

Reaktivni gubici u prenosu su:

$$Q_{\text{pren}}^{\text{sub}} = (X_T + X_v) I^2 = (0,133 + 0,333) \cdot (0,9^2 + 0,2445^2) = 0,466 \cdot 0,8698 = 0,4053 \text{ r.j.}$$

Kompleksna snaga na krajevima generatora je:

$$\underline{S}_G = \underline{S}_\infty + jQ_{\text{pren}}^{\text{sub}} = (0,9 - j0,2445) + j0,4053 = (0,9 + j0,1608) \text{ r.j.} = 0,9143 \text{ r.j.} \angle 10,13^\circ .$$

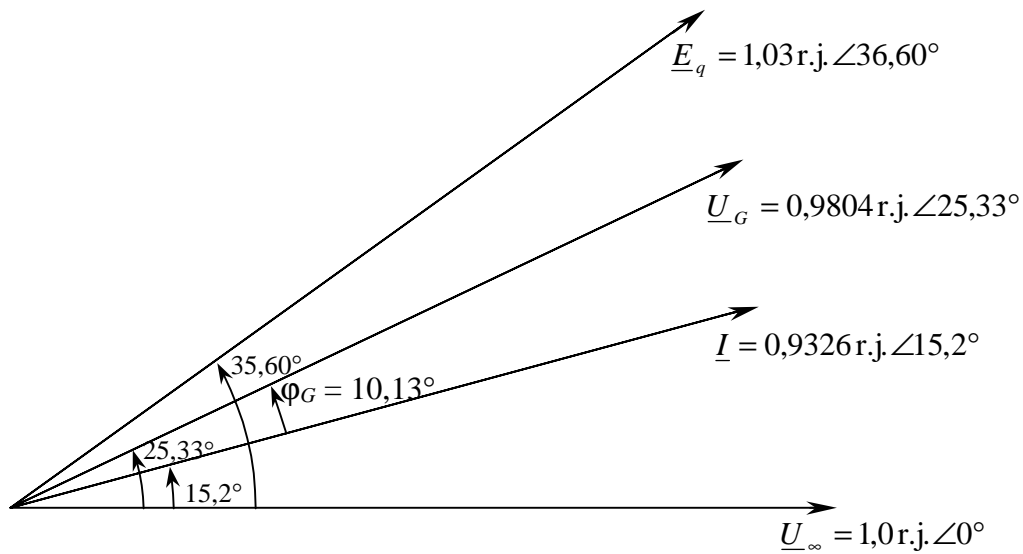
Napon na krajevima generatora, kada se napon \underline{U}_∞ postavi u realnu osu, je:

$$\begin{aligned} \underline{U}_G &= \underline{U}_\infty + j(X_T + X_v) \underline{I} = 1,0 + j(0,133 + 0,333) \cdot (0,9 + j0,2445) = \\ &= (0,8861 + j0,4194) \text{ r.j.} = 0,9804 \text{ r.j.} \angle 25,33^\circ . \end{aligned}$$

Fazni pomeraj računске struje \underline{I} (koja je u relativnim jedinicama jednaka faznoj struji generatora) u odnosu na napon generatora je:

$$\varphi_G = \arg \underline{U}_g - \arg \underline{I} = 25,33^\circ - 15,2^\circ = 10,13^\circ$$

(videti fazorski dijagram napona i struje sistema na sl. 4.15c).



Sl. 4.15c Fazorski dijagram napona i struje iz zadatka 4.15

Faktor snage generatora je onda:

$$\cos \varphi_G = \cos 10,13^\circ = 0,9844 \text{ ind.}$$

Indukovana EMS E_q , koja određuje položaj q-ose generatora je:

$$\begin{aligned} \underline{E}_q &= \underline{U}_\infty + X \frac{Q_\infty}{U_\infty} + jX \frac{P_\infty}{U_\infty} = 1,0 - \frac{0,666 \cdot 0,2445}{1,0} + j \frac{0,666 \cdot 0,9}{1,0} = \\ &= (0,8372 + j0,5994) \text{ r.j.} = 1,03 \text{ r.j. } \angle 35,60^\circ, \end{aligned}$$

odakle je:

$$\begin{aligned} E_q &= 1,03 \text{ r.j.}; \\ \delta_0 &= 35,60^\circ = 0,621 \text{ rad.} \end{aligned}$$

b) Izrazi za krive snaga-ugao:

Pre kvara:

$$P = \frac{E U_\infty}{X} \sin \delta = \frac{1,03 \cdot 1}{0,666} \sin \delta = 1,546 \sin \delta.$$

Provera vrednosti aktivne snage koja se isporučuje u krutu mrežu:

$$P_\infty = 1,546 \sin 35,60^\circ = 1,546 \cdot 0,582 = 0,9 \text{ r.j.}$$

Posle isključenja kvara ($X' = 0,2 + 0,133 + 0,667 = 1,0$ r.j.), vrednost prenete snage je:

$$P_i = \frac{EU_\infty}{X'} \sin \delta = \frac{1,03 \cdot 1}{1,0} \sin \delta = 1,03 \sin \delta.$$

c) Ugao snage posle kvara je:

$$\delta_n = \arcsin \frac{0,9}{1,03} = \arcsin 0,8738 = 60,9^\circ = 1,0629 \text{ rad}.$$

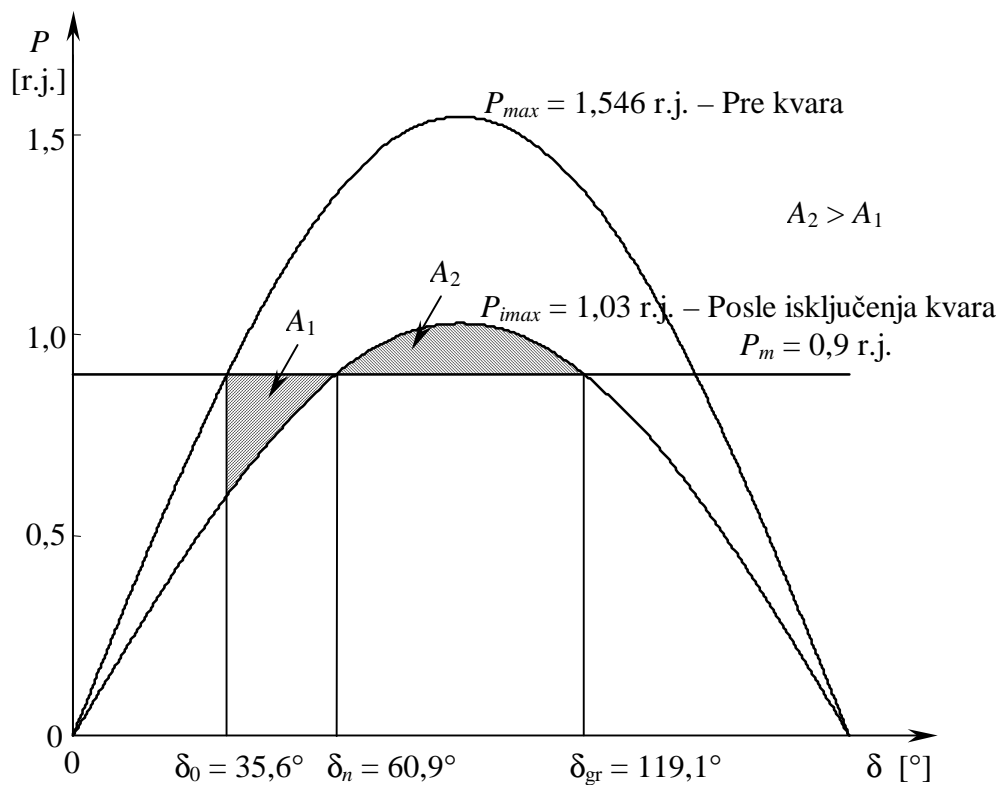
Ugao snage pre kvara (ranije pronađen u tač. a) bio je:

$$\delta_0 = 35,60^\circ = 0,621 \text{ rad}.$$

Granični ugao stabilnosti je:

$$\delta_{gr} = 180^\circ - \delta_n = 119,1^\circ = 2,079 \text{ rad}.$$

Krive snaga-ugao, pre kvara i posle isključenja kvara prikazane su na sl. 4.15d.



Sl. 4.15d Krive snaga – ugao sistema pre kvara i posle isključenja kvara iz tač. c i ilustracija metoda poređenja površina ubrzanja i usporenja iz tač. d

d) Provera stabilnosti sistema u režimu posle kvara

Uvidom u dijagrame snaga-ugao sa sl. 4.15d, uočava se da su vrednosti površina ubrzanja (A_1) i usporenja (A_2) sledeće:

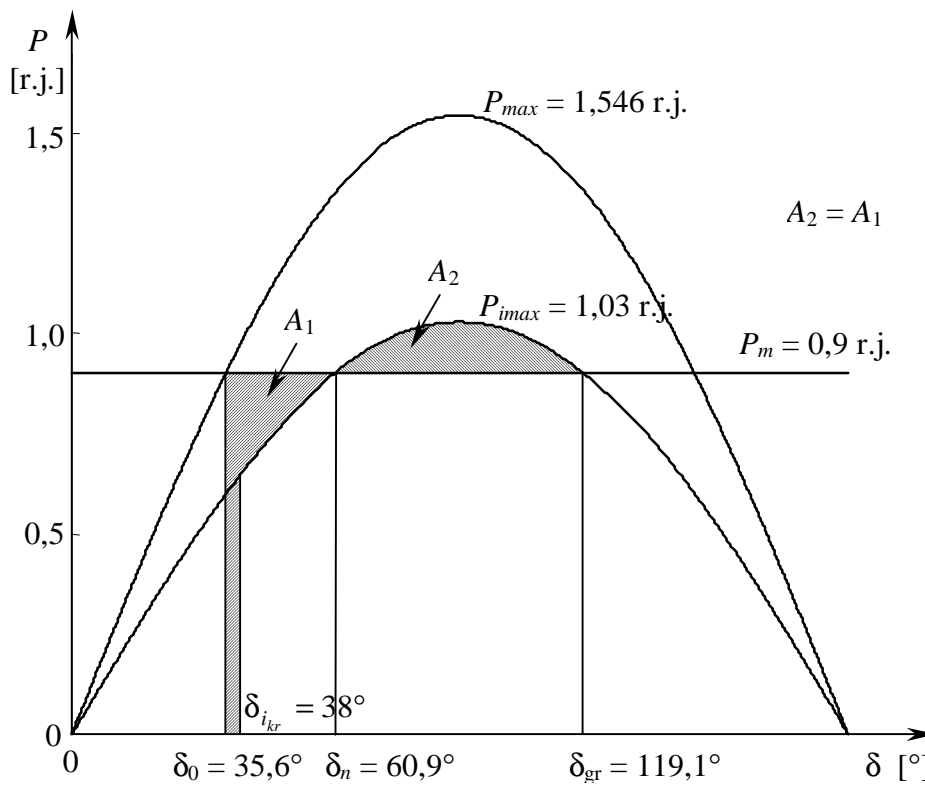
$$A_1 = 0,9(\delta_n - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_n} (1,03 \sin \delta) d\delta = 0,9(\delta_n - \delta_0) + 1,03(\cos \delta_n - \cos \delta_0) = \\ = 0,9 \cdot (1,0629 - 0,621) + 1,03(\cos 1,0629 - \cos 0,621) = 0,0611;$$

$$A_2 = \int_{\delta_n}^{\delta_{gr}} (1,03 \sin \delta) d\delta - 0,9(\delta_{gr} - \delta_n) = 1,03(\cos \delta_n - \cos \delta_{gr}) - 0,9(\delta_{gr} - \delta_n) = \\ = 1,03(\cos 1,0629 - \cos 2,079) - 0,9 \cdot (2,079 - 1,0629) = 0,0874.$$

Pošto je $A_2 > A_1$, sistem je u režimu posle isključenja kvara ostao stabilan.

Kritični ugao isključenja kvara dobija se iz uslova jednakosti površina A_1 i A_2 na sl.4.15e i dat je preko izraza:

$$\delta_{i_{kr}} = \arccos \left[\frac{P_m}{P_{imax}} (\delta_{gr} - \delta_0) + \cos \delta_{gr} \right] = \arccos \left[\frac{0,9}{1,03} \cdot (2,079 - 0,621) - 0,486 \right] = \\ = \arccos 0,788 = 38^\circ = 0,633 \text{ rad.}$$



Sl. 4.15e Ilustracija određivanja kritičnog ugla isključenja kvara $\delta_{i_{kr}}$ iz tač. d

Kritično vreme isključenja kvara je onda:

$$t_{i_{kr}} = \sqrt{\frac{2T_i(\delta_{i_{kr}} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8 \cdot (0,663 - 0,621)}{314 \cdot 0,9}} = 0,049\text{s} \approx 2,5 \text{ periode} .$$



Zadatak 4.16

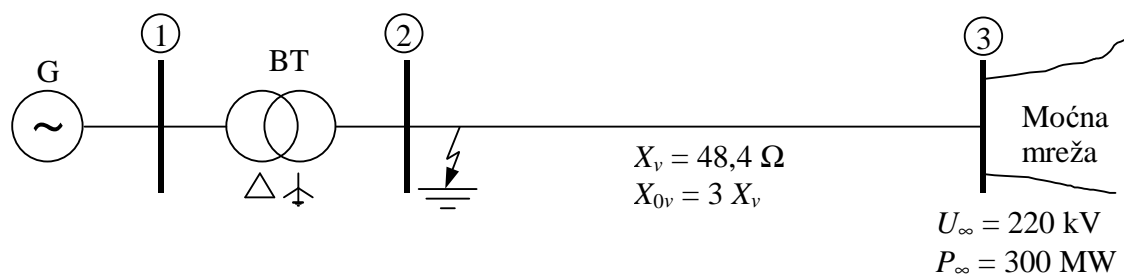
Elektrana predstavljena ekvivalentnim generatorom, vezana je na moćnu mrežu posredstvom generatorskog blok-transformatora i prenosnog voda, kako je to prikazano na sl. 4.16a (na kojoj su takođe dati i svi podaci o elementima sistema).

a) Naći izraz za karakteristiku snaga-ugao sistema u normalnom pogonu (pre kvara) i početni ugao δ_{10} , ako se u moćnu mrežu isporučuje snaga $P_\infty = 300$ MW, pri faktoru snage $\cos \varphi_\infty = 1,0$.

b) Ako se na početku voda (neposredno iza sabirnica visokog napona blok-transformatora) dogodi jednofazni kratki spoj sa zemljom, naći izraz za karakteristiku snaga-ugao posle pojave kvara i početni ugao snage δ_{20} .

c) Primenom metoda jednakih površina utvrditi da li sistem posle pojave kvara ostaje stabilan. Rešenje ilustrovati grafički.

U proračunima koristiti relativne jedinice sa $S_B = 400$ MVA i $U_B = 220$ kV.



$$S_{nG} = 400 \text{ MVA}$$

$$U_{nG} = 15 \text{ kV}$$

$$x'_d = 24\%$$

$$x_i = x'_d$$

$$S_{nT} = 400 \text{ MVA}$$

$$U_{nT} = 15/220 \text{ kV/kV}$$

$$x_T = 12\%$$

$$\text{Sprega: } Y_0d$$

Sl. 4.16a Jednopolna šema i parametri elemenata sistema iz zadatka 4.16

Rešenje:

a) Proračun stanja pre kvara:

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{220^2}{400} = 121 \Omega;$$

$$X_G = X'_d = 0,24 \text{ r.j.};$$

$$X_T = 0,12 \text{ r.j.};$$

$$X_v = \frac{48,4}{121} = 0,4 \text{ r.j.}; \quad X_{0v} = 3 X_v = 1,2 \text{ r.j.};$$

$$P = \frac{P}{S_B} = \frac{300}{400} = 0,75 \text{ r.j.};$$

$$X_1^{ekv} = X^{ekv} = X_G + X_T + X_v = 0,24 + 0,12 + 0,4 = 0,76 \text{ r.j.}$$

Indukovana EMS pre kvara je:

$$\underline{E}' = \underline{U}_\infty + jX^{ekv} \frac{P}{U_\infty} = 1,0 + j0,76 \cdot \frac{0,75}{1,0} = (1 + j0,57) \text{ r.j.} = 1,151 \text{ r.j.} \angle 29,683^\circ .$$

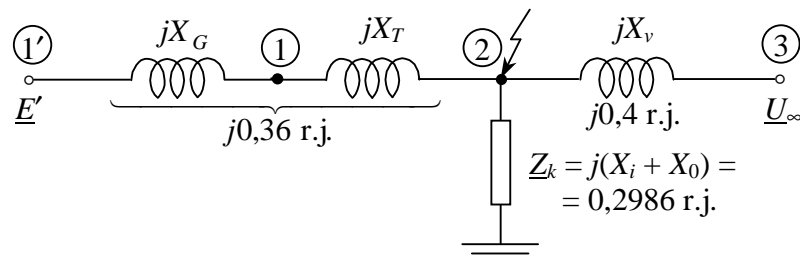
Kriva snaga-ugao pre kvara data je izrazom:

$$P = \frac{E'U_\infty}{X^{ekv}} \sin \delta = \frac{1,151 \cdot 1,0}{0,76} \sin \delta = 1,5145 \sin \delta .$$

Početni ugao snage u normalnom režimu je:

$$\delta_{10} = \arcsin \frac{PX^{ekv}}{E'U_\infty} = \arcsin \frac{0,75}{1,5145} = 29,683^\circ = 0,518 \text{ rad} .$$

b) Stanje za vreme kvara (ekvivalentna šema prikazana je na sl. 4.16b)



Sl. 4.16b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.16a za vreme kvara

U zamenskoj šemi sistema za vreme kvara figuriše otočno priključena impedansa kvara $\underline{Z}_k = j(X_i + X_0)$, koja se sastoji od redno povezanih ekvivalentnih impedansi sistema inverznog i nultog redosleda (gledano sa mesta kvara), čije su vrednosti:

$$X_i = \frac{X_{iv}(X_{iG} + X_{iT})}{X_{iv} + X_{iG} + X_{iT}} = \frac{0,4 \cdot (0,24 + 0,12)}{0,76} = 0,1895 \text{ r.j.};$$

$$X_0 = \frac{X_{0T}X_{0v}}{X_{0T} + X_{0v}} = \frac{0,12 \cdot 1,2}{0,12 + 1,2} = 0,1091 \text{ r.j.}$$

Impedansa kvara je onda:

$$\underline{Z}_k = j(X_i + X_0) = j(0,1895 + 0,1091) = j0,2986 \text{ r.j.}$$

Proračun transfer impedanse za sistem sa sl. 4.16b, vrši se transfiguracijom zvezde, čije su impedanse $\underline{Z}_{1'2} = j(X_G + X_T) = j0,36 \text{ r.j.}$; $\underline{Z}_{23} = jX_v = j0,4 \text{ r.j.}$ i $\underline{Z}_k = j0,2986 \text{ r.j.}$, tako da je:

$$\underline{Z}_{1'3}^\Delta = j\left(0,36 + 0,4 + \frac{0,4 \cdot 0,36}{0,2986}\right) = j1,242 \text{ r.j.}$$

Kriva snaga-ugao za vreme kvara data je preko izraza:

$$P = \frac{1,151 \cdot 1,0}{1,242} \sin \delta = 0,92673 \sin \delta.$$

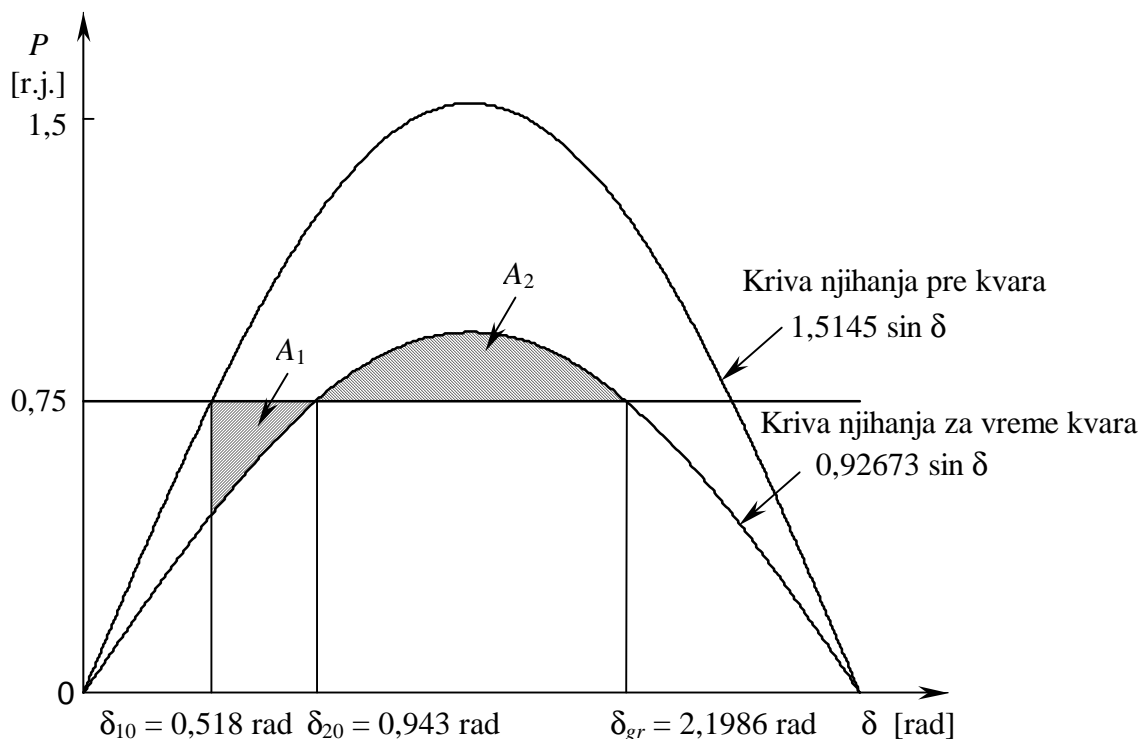
Početni ugao snage na krivoj njihanja za vreme kvara je ($P_m = \frac{300}{400} = 0,75$ r.j.):

$$\delta_{20} = \arcsin \frac{0,75}{0,92673} = 54,03^\circ = 0,943 \text{ rad}.$$

Granični ugao stabilnosti je onda:

$$\delta_{gr} = 180^\circ - \delta_{20} = 180^\circ - 54,03^\circ = 125,97^\circ = 2,1986 \text{ rad}.$$

Karakteristične krive snaga-ugao pre i posle nastanka kvara prikazane su na sl. 4.16c.



Sl. 4.16c Karakteristike snaga – ugao sistema iz zadatka 4.16, pre nastanka kvara i za vreme kvara

c) Provera stabilnosti metodom jednakih površina: Uslov je da na sl. 4.16c bude $A_2 > A_1$

$$A_1 = \int_{\delta_{10}=0,518}^{\delta_{20}=0,943} (0,75 - 0,92673 \sin \delta) d\delta = 0,75 \cdot (0,943 - 0,518) + 0,92673 (0,5874 - 0,8688) = 0,058;$$

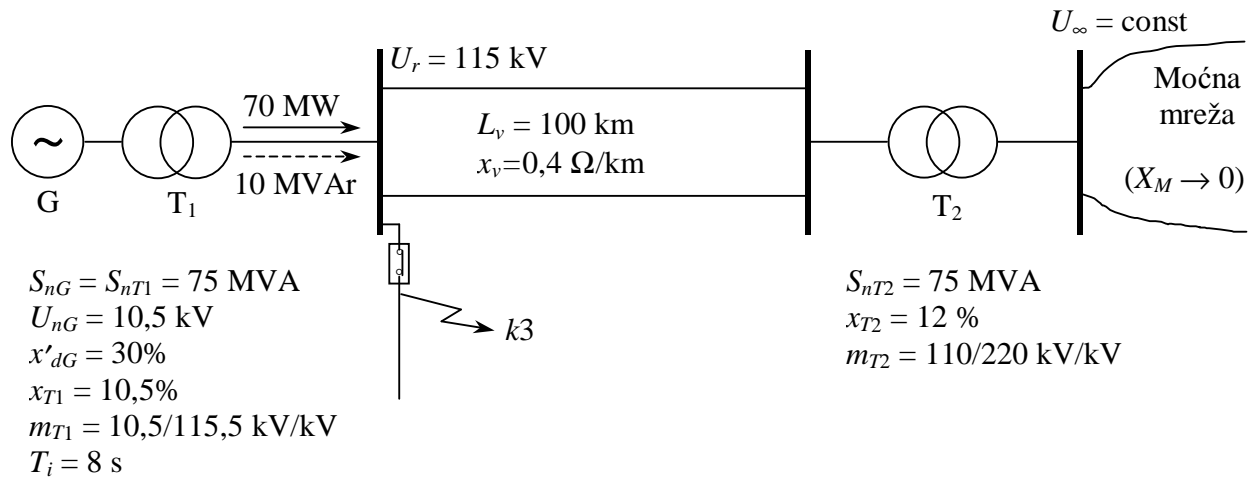
$$A_2 = \int_{\delta_{20}=0,943}^{\delta_{gr}=2,1986} (0,92673 \sin \delta - 0,75) d\delta = 0,92673 (0,5874 + 0,5874) - 0,75 \cdot (2,1986 - 0,943) = 0,1469.$$

Kako je $A_2 > A_1$ sistem ostaje stabilan i posle pojave kvara.

□

Zadatak 4.17

Za dati trofazni jednopolno prikazani elektroenergetski sistem sa sl. 4.17a ispitati tranzijentnu stabilnost generatora za slučaj trolnog kratkog spoja na početku voda-ogranka neopterećenog pre kvara, ako su ems generatora E' iza podužne tranzijentne reaktanse, kao i napon moćne mreže, konstantni. Trofazni kratki spoj se isključuje posle $t_i = 0,15$ s. Ostali podaci o sistemu su dati na sl. 4.17a.



Sl. 4.17a Jednopolna šema i parametri sistema iz zadatka 4.17

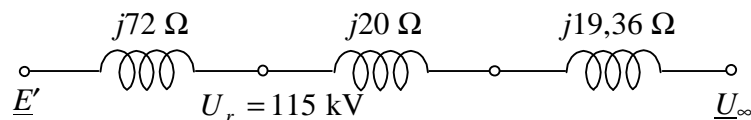
Rešenje:

Parametri ekvivalentne šeme sistema, prikazane na sl. 4.17b su:

$$X'_{dG} + X_{T1} = \frac{40,5}{100} \cdot \frac{115,5^2}{75} = 72 \Omega ;$$

$$X_{T2} = \frac{12}{100} \cdot \frac{110^2}{75} = 19,36 \Omega ;$$

$$X_v^{ekv} = \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 100 = 20 \Omega .$$



Sl. 4.17b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.17a

Dalje se nalazi:

$$\underline{E}' = 115 + \frac{72 \cdot 10}{115} + j \frac{72 \cdot 70}{115} = 128,94 \text{ kV} \angle 19^\circ 52' ;$$

$$\underline{U}_\infty = 115 - \frac{39,36 \cdot 10}{115} - j \frac{39,36 \cdot 70}{115} = 114,12 \text{ kV} \angle -12^\circ 07' .$$

Ugao koji je ems E' zatvarala prema naponu moćne mreže pre kvara je:

$$\delta_0 = 19^\circ 52' + 12^\circ 07' = 31^\circ 59' = 31,98^\circ.$$

Dinamička karakteristika radnog stanja pre, identična je sa karakteristikom posle isključenja kvara sa sl. 4.17c.

$$P = \frac{E'U_\infty}{X_\Sigma} \sin \delta = \frac{128,94 \cdot 114,12}{111,36} \sin \delta = 132,14 \sin \delta,$$

odakle je

$$70 = 132,14 \sin \delta_0,$$

odnosno:

$$\sin \delta_0 = 0,53;$$

$$\delta_0 = 31,99^\circ \approx 32^\circ;$$

$$\delta_{gr} = 180^\circ - 32^\circ = 148^\circ.$$

Prema formuli:

$$\cos \delta_{i_{kr}} = (\delta_{gr} - \delta_0) \sin \delta_0 + \cos \delta_{gr},$$

odnosno:

$$\cos \delta_{i_{kr}} = 116^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot 0,53 - 0,848 = 0,225,$$

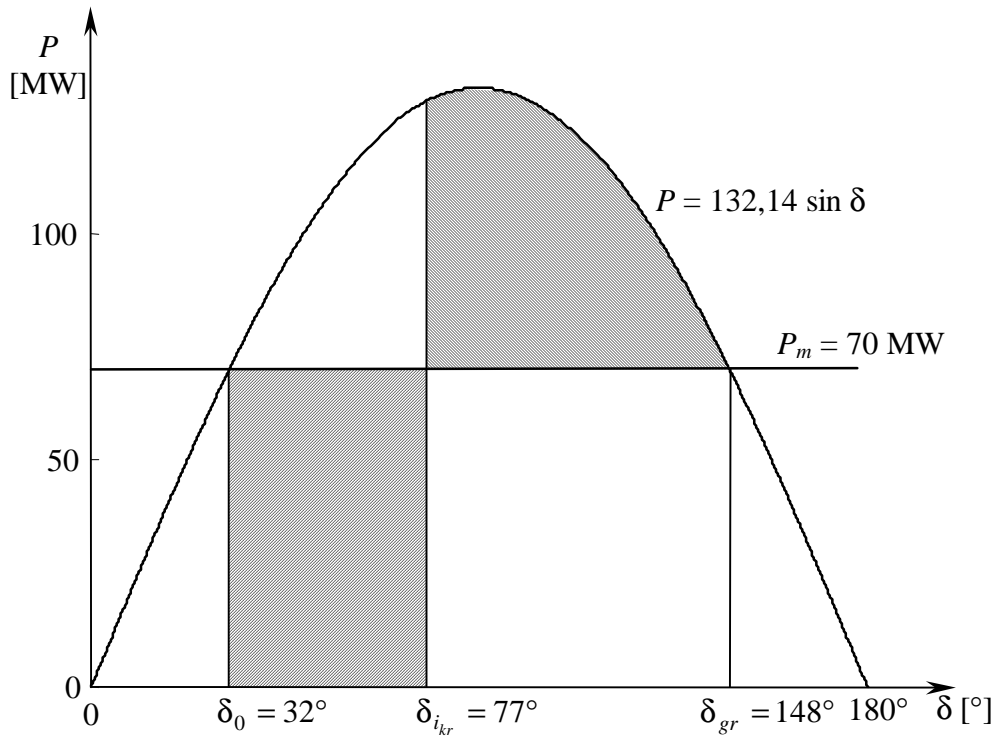
nalazi se kritični ugao isključenja kvara:

$$\delta_{i_{kr}} = 77^\circ.$$

Kako je maksimalno vreme posle koga treba isključiti kvar:

$$t_{max} = \sqrt{\frac{T_i S_{nG} (\delta_{i_{kr}} - \delta_0)}{9000 P_m}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 75 \cdot 45}{9000 \cdot 70}} = 0,207 \text{ s},$$

odnosno $t_{max} > t_i = 0,15 \text{ s}$, to se zaključuje da je generator tranzijentno stabilan.



Sl. 4.17c Dinamička karakteristika sistema iz zadatka 4.17, sa označenim karakterističnim veličinama

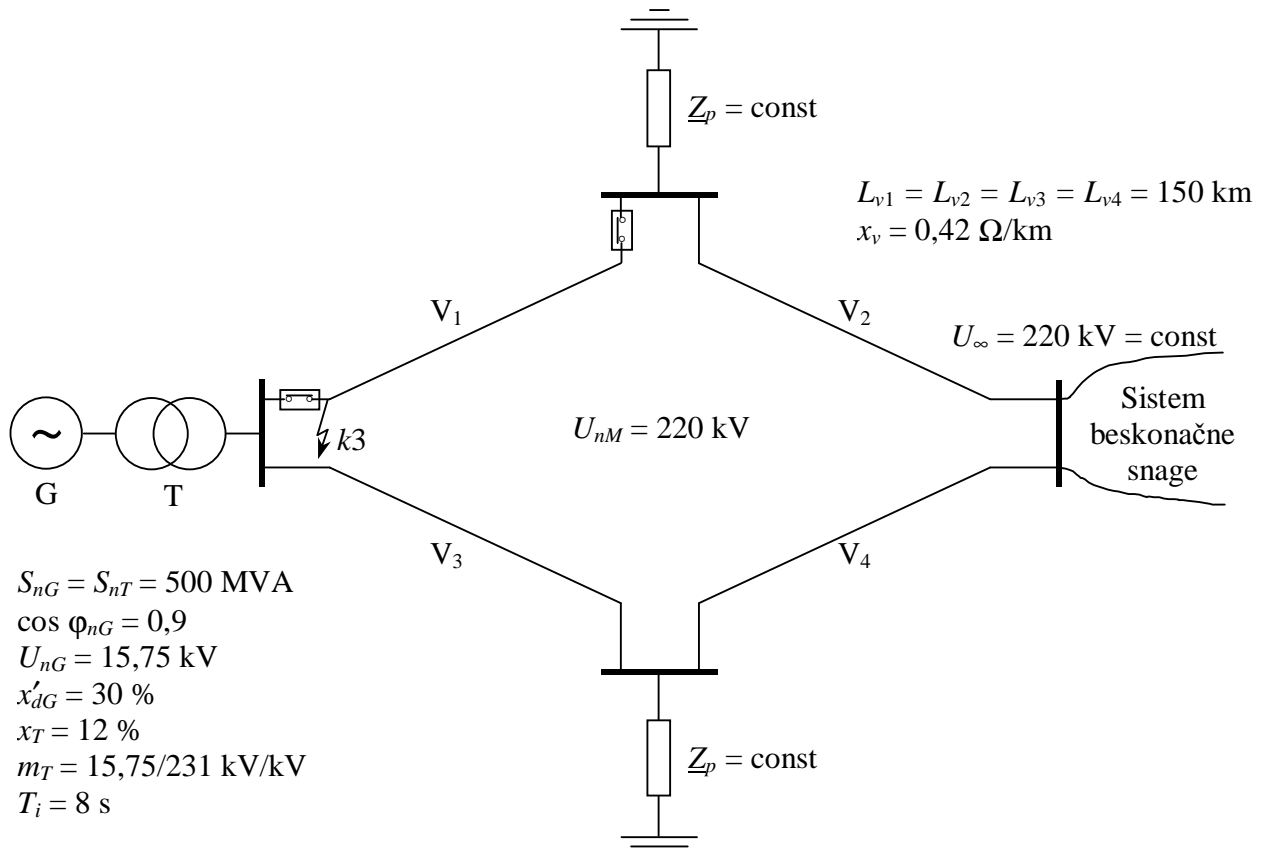
Napomena: pretpostavka da je otočni vod na kome se dešava kvar prethodno neopterećen znači u stvari i najteži slučaj sa gledišta stabilnosti jer tada udaljena elektrana predaje svu snagu moćnoj mreži pa je i početni ugao najveći. Takođe i pretpostavka trolnog kratkog spoja predstavlja najteži slučaj, a s druge strane omogućava prostu metodiku proračuna, bez uzimanja u obzir preostalog dela sistema.

□

Zadatak 4.18

U kom vremenu treba obostrano jednovremeno isključiti vod V_1 , sistema jednopolno prikazanog na sl. 4.18a, na čijem se početku dogodio trofazni kratki spoj, da bi sistem bio tranzijentno stabilan, ako je generator nominalno pobuđen i ako odaje u sistem aktivnu snagu od 300 MW.

Potrošački centri su jednaki i pri naponu na njihovim sabirnicama od 220 kV, svaki uzima po 150 MW pri $\cos \varphi = 0,95$ (induktivni). Ostali podaci o sistemu dati su na sl. 4.18a.



Sl. 4.18a Jednopolna šema i parametri sistema za zadatak 4.18

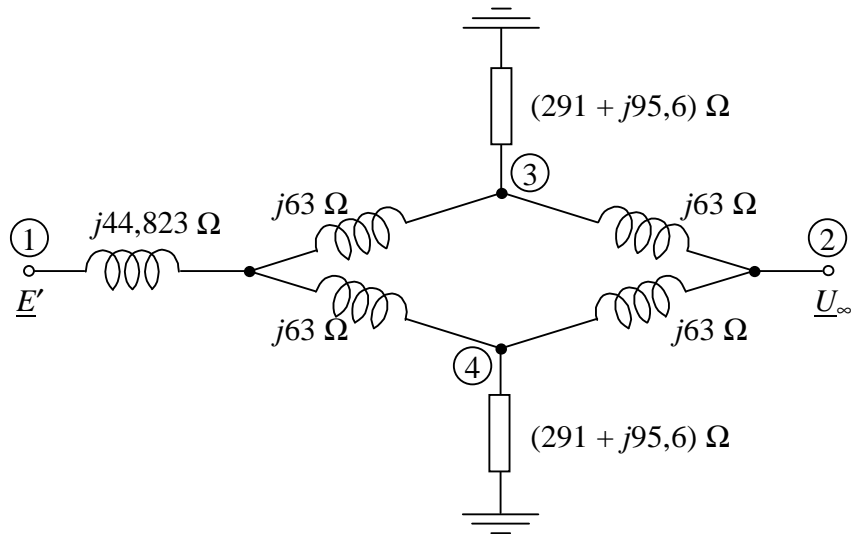
Rešenje:

Parametri zamenske šeme sistema sa slike 4.18a, prikazane na slici 4.18b, su:

$$X'_{dG} + X_T = 0,42 \cdot \frac{231^2}{500} = 44,823 \Omega ;$$

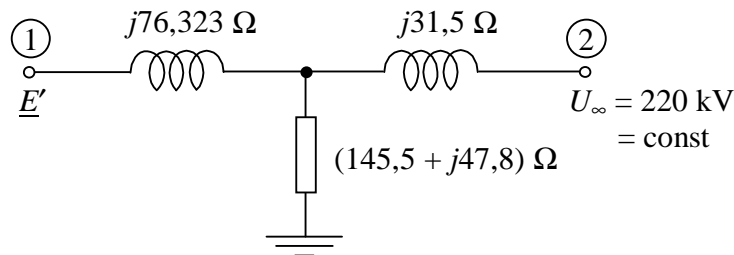
$$X_{v1} = X_{v2} = X_{v3} = X_{v4} = 63 \Omega ;$$

$$\underline{Z}_p = \frac{220^2}{\frac{150}{0,95}} \cdot (0,95 + j0,312) = (291 + j95,6) \Omega .$$



Slika 4.18b Ekvivalentna šema sistema sa slike 4.18a.

Kako su tačke 3 i 4 na istom potencijalu, to se zamenska šema razmatranog sistema sa sl. 4.18b može uprostiti kao što je to pokazano na sl. 4.18c.



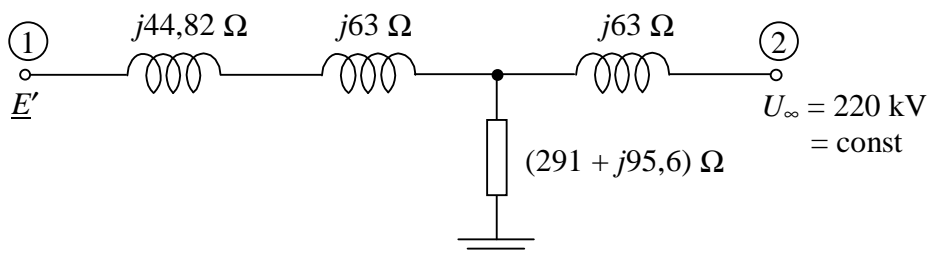
Sl. 4.18c Uprošćena šema sistema sa sl. 4.18b.

Sa šeme sa sl. 4.18c dobija se:

$$\underline{Z}_{11} = j76,323 + \frac{j31,5 \cdot (145,5 + j47,8)}{j31,5 + 145,5 + j47,8} = 105,07 \Omega \angle 87^{\circ}07' ;$$

$$\underline{Z}_{12} = j76,323 + j31,5 + \frac{j76,323 \cdot j31,5}{145,5 + j47,8} = 113,69 \Omega \angle 97^{\circ}33' .$$

Zamenska šema sistema posle isključenja voda V_1 predstavljena je na sl. 4.18d.



Sl. 4.18d Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.18a, posle isključenja voda V_1

$$\underline{Z}_{11_i} = j107,823 + \frac{j63 \cdot (291 + j95,6)}{j63 + 291 + j95,6} = 165,53 \Omega \angle 86^\circ 21';$$

$$\underline{Z}_{12_i} = j107,823 + j63 + \frac{j107,823 \cdot j63}{291 + j95,6} = 178,97 \Omega \angle 96^\circ 46'.$$

Napomena: indeks 'i' ispred oznake za sopstvenu i međusobnu impedansu označava da su to vrednosti odgovarajućih impedansi posle isključenja voda V_1 .

$$\begin{aligned} E' &= U_{nG} \sqrt{\left(1 + \frac{x'_d \%}{100} \sin \varphi_{nG}\right)^2 + \left(\frac{x'_d \%}{100} \cos \varphi_{nG}\right)^2} = U_{nG} \sqrt{1 + \left(\frac{x'_d \%}{100}\right)^2 + 2 \frac{x'_d \%}{100} \sin \varphi_{nG}} = \\ &= 15,75 \cdot \sqrt{1 + 0,3^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,436} = 18,31 \text{ kV}, \end{aligned}$$

ili svedeno na stranu mreže nominalnog napona 220 kV:

$$E'_{sv} = 15,75 \cdot 1,1626 \cdot \frac{231}{15,75} = 268,8 \text{ kV}.$$

Karakteristika električne odate snage generatora u funkciji E'_{sv} , U_∞ i δ (δ je ugao između E'_{sv} i U_∞) neposredno pre nastanka kvara je:

$$P = \frac{E'^2_{sv}}{Z_{11}} \sin \mu_{11} + \frac{E'_{sv} U_\infty}{Z_{12}} \sin(\delta - \mu_{12}),$$

gde je

$$\mu_{11} = 90^\circ - 87^\circ 07' = 2^\circ 53';$$

$$\mu_{12} = 90^\circ - 97^\circ 33' = -7^\circ 33'.$$

Ugao između E'_{sv} i U_∞ u stacionarnom režimu neposredno pre kvara δ_0 može se izračunati iz jednačine:

$$300 = \frac{268,8^2}{105,07} \sin 2^\circ 53' + \frac{268,8 \cdot 220}{113,69} \sin(\delta_0 + 7^\circ 33'),$$

odakle je:

$$\delta_0 = 23^\circ 07'.$$

Za vreme trajanja trofaznog kratkog spoja na početku voda V_1 , odata električna aktivna snaga generatora je jednaka nuli, a karakteristika odate električne aktivne snage u funkciji E'_{sv} , U_∞ i δ posle isključenja voda V_1 je:

$$P_i = \frac{E'^2_{sv}}{Z_{11_i}} \sin \mu_{11_i} + \frac{E'_{sv} U_\infty}{Z_{12_i}} \sin(\delta - \mu_{12_i}),$$

gde je:

$$\mu_{11_i} = 90^\circ - 86^\circ 21' = 3^\circ 39';$$

$$\mu_{12_i} = 90^\circ - 96^\circ 46' = -6^\circ 46';$$

$$P_i = \frac{268,8^2}{165,53} \sin 3^\circ 39' + \frac{268,8 \cdot 220}{178,97} \sin(\delta + 6^\circ 46') = 27,8 + 331 \sin(\delta + 6^\circ 46').$$

Granični ugao δ_{gr} određuje se iz jednačine:

$$P_m = P_i,$$

odnosno:

$$300 = 27,8 + 331 \sin(\delta_{gr} + 6^\circ 46'),$$

Iz poslednje jednačine je:

$$\delta_{gr} + 6^\circ 46' = 180^\circ - 55^\circ 35',$$

tako da je:

$$\delta_{gr} = 180^\circ - 55^\circ 35' - 6^\circ 46' = 117^\circ 39'.$$

Kritični ugao isključenja voda V_1 ($\delta_{i_{kr}}$), određuje se iz jednačine:

$$P_m(\delta_{i_{kr}} - \delta_0) = \int_{\delta_{i_{kr}}}^{\delta_{gr}} (P_i - P_m) d\delta,$$

odnosno:

$$300 \cdot (\delta_{i_{kr}} - 0,40346) = \int_{\delta_{i_{kr}}}^{117^\circ 39'} [27,8 + 331 \sin(\delta + 6^\circ 46') - 300] d\delta,$$

gde je 0,403462 ugao δ_0 izražen u radijanima. Dalje je:

$$300 \delta_{i_{kr}} - 121,0386 = 272,2 \cdot (\delta_{i_{kr}} - 2,05338) + 331 \cos(\delta_{i_{kr}} + 6^\circ 46') - 331 \cos(117^\circ 39' + 6^\circ 46'),$$

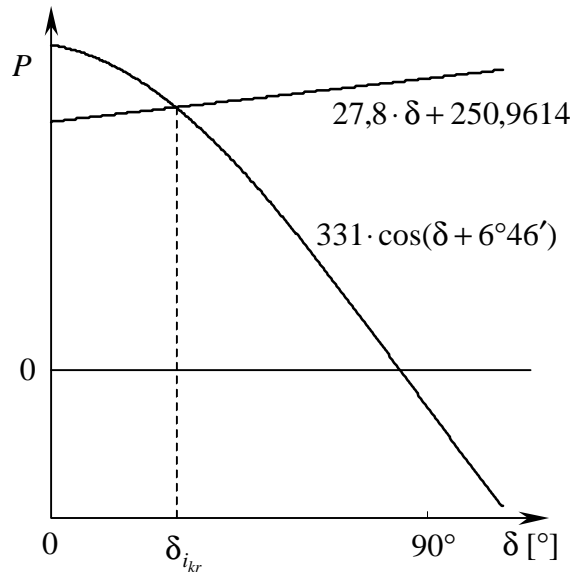
gde je 2,05338 ugao δ_{gr} izražen u radijanima;

$$331 \cos(\delta_{i_{kr}} + 6^\circ 46') = 27,8 \delta_{i_{kr}} + 250,9614.$$

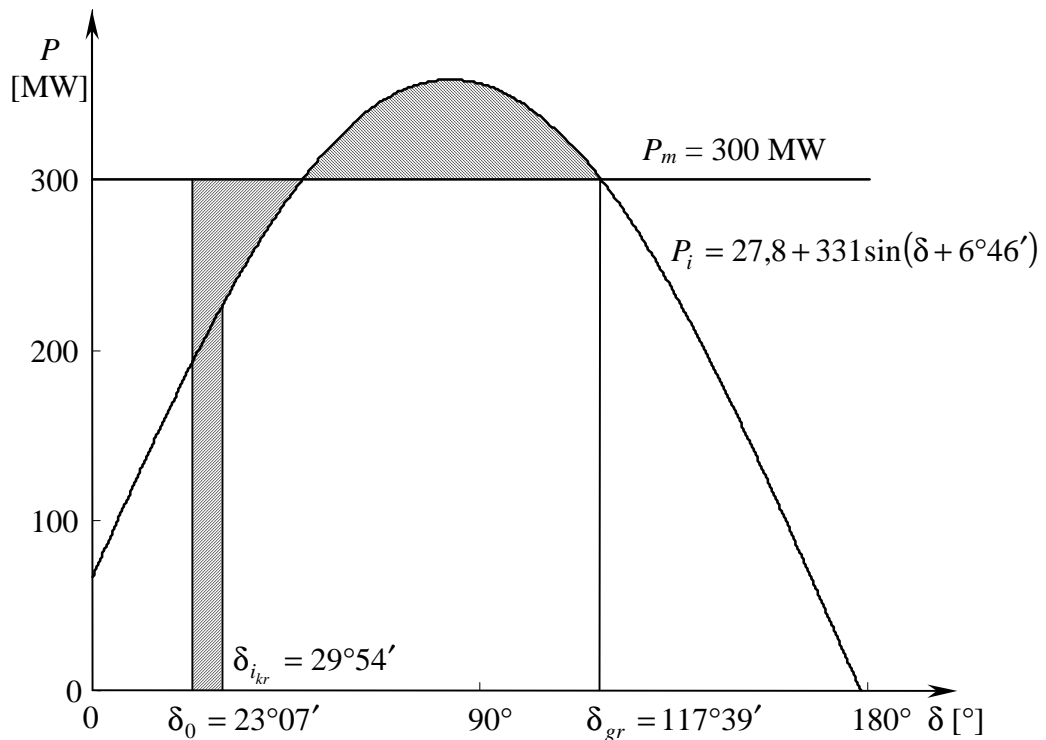
Rešavanjem ove poslednje transcendentne jednačine dobiće se $\delta_{i_{kr}}$, koji iznosi:

$$\delta_{i_{kr}} \approx 29^\circ 54'.$$

Na sl. 4.18e dat je grafički prikaz rešenja transcendentne jednačine iz zadatka 4.18.



Sl. 4.18e Grafički prikaz rešenja transcendentne jednačine iz zadatka 4.18



Sl. 4.18f Dinamička karakteristika sistema iz zadatka 4.18 sa označenim karakterističnim veličinama.

Kritično vreme jednovremenog obostranog isključenja voda V_1 biće:

$$t_{ikr} = \sqrt{\frac{T_i S_{nG} (\delta_{ikr} - \delta_0)}{9000 P_m}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 500 \cdot (29^\circ 54' - 23^\circ 07')}{9000 \cdot 300}} = 0,101s \approx 5 \text{ perioda.}$$

Na sl. 4.18f ilustrovana je dinamička karakteristika sistema, sa označenim karakterističnim veličinama.

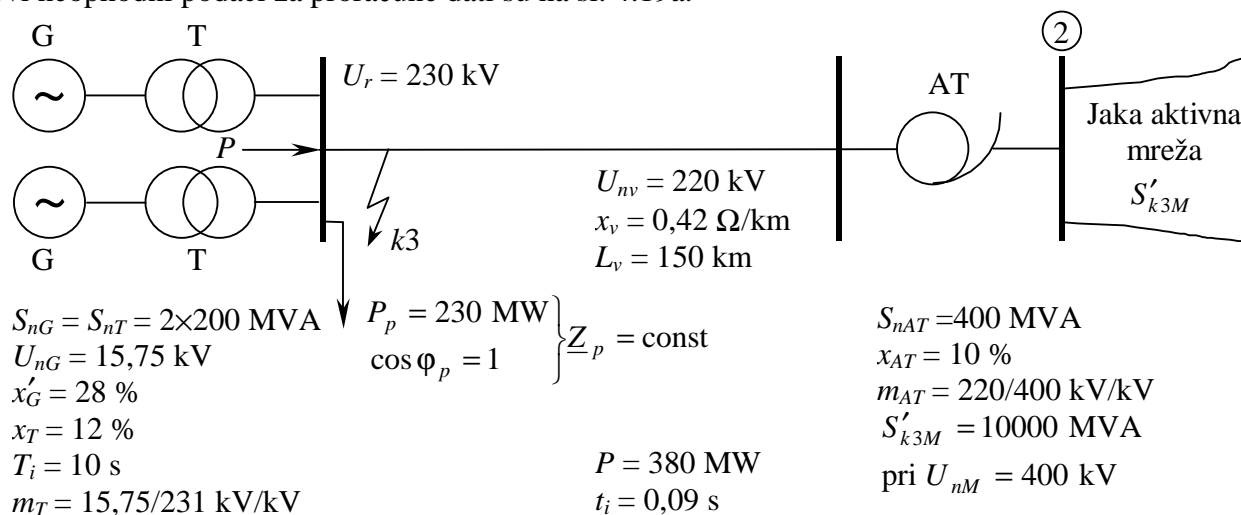


Zadatak 4.19

Za dati trofazni, na sl. 4.19a jednopolno prikazani elektroenergetski sistem nominalne učestanosti 50 Hz, podjednako opterećeni generatorsko-transformatorski blokovi istih karakteristika odaju na sabirnice višeg napona ukupnu (trofaznu) aktivnu snagu P uz $\cos\varphi=1$ pri (linijskom) naponu U_r .

Sa istih sabirnica odvodi se u lokalno potrošačko područje pod navedenim naponom aktivna snaga P_p uz $\cos\varphi_p=1$, pri čemu se ekvivalentna impedansa (rezistansa) potrošača može smatrati konstantnom.

Izračunati kritično vreme beznaponske pauze T_{bpkr} sa gledišta tranzijentne stabilnosti (tj. trajanje tropskog isključenja do ponovnog uključjenja) voda na čijem se početku desio čist trofazni kratki spoj, koji se isključuje u vremenu t_i , ako se jaka aktivna mreža na kraju može zameniti reaktansom $Z'_M \approx jX'_M$ izračunatom iz udela te mreže u tranzijentnoj tropskoj snazi kratkog spoja S'_{k3} na sabirnicama 2 sa nominalnim naponom mreže U_{nM} , i konstantnim naponom U_M iza te reaktanse. Svi neophodni podaci za proračune dati su na sl. 4.19a.



Sl. 4.19a Jednopolna šema i parametri sistema iz zadatka 4.19

Rešenje:

Proračun osnovnih parametara: sve veličine u proračunima biće svedene na stranu voda:

$$X'_{GT_{sv}} = \frac{(28+12) \cdot 231^2}{100 \cdot 2 \cdot 200} = 53,36 \Omega;$$

$$X_v = x_v L_v = 0,42 \cdot 150 = 63 \Omega;$$

$$X_{AT} = \frac{10}{100} \cdot \frac{220^2}{400} = 12,1 \Omega;$$

$$X'_{M_{sv}} = \frac{U_{nM}^2}{S'_{k3M}} m_{AT}^2 = \frac{400^2}{10000} \cdot \left(\frac{220}{400}\right)^2 = 4,84 \Omega.$$

Svedena ems E' iza podužne tranzijentne reaktanse generatora X'_G , koja se prećutno pretpostavlja da je po modulu konstantna u vremenu u kome se odlučuje o tranzijentnoj stabilnosti,

izračunava se iz radnog napona (pre kvara) na sabirnicama višeg napona elektrane i snaga koje se predaju tim sabirnicama P i $Q = 0$ ($\cos \varphi = 1$):

$$E'_{sv} = \sqrt{U_r^2 + \left(\frac{PX'_{GT_{sv}}}{U_r} \right)^2} = \sqrt{230^2 + \left(\frac{380 \cdot 53,36}{230} \right)^2} = 246,32 \text{ kV}.$$

Pošto se sa istih sabirnica konzumnom području takođe predaje čisto aktivna snaga P_p , to se vodu predaje aktivna snaga P_v kao razlika $P - P_p$, uz nultu reaktivnu snagu:

$$P_v = P - P_p = 380 - 230 = 150 \text{ MW};$$

$$(Q_v = Q - Q_p = 0 - 0 = 0).$$

Sa tim snagama i radnim naponom U_r pre kvara, može se izračunati ekvivalentni napon jake mreže U_M , koji je po pretpostavci konstantan, ako se prethodno izračuna zbirna reaktansa voda, autotransformatora i mreže:

$$X'_{v,AT,M} = X_v + X_{AT} + X'_{M_{sv}} = 63 + 12,1 + 4,84 = 79,94 \Omega.$$

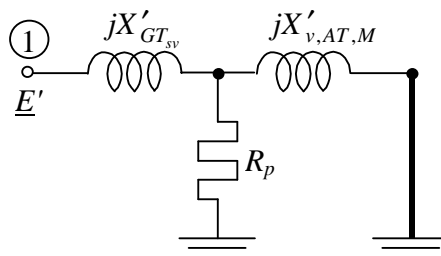
Tada je

$$U_{M_{sv}} = \sqrt{U_r^2 + \left(\frac{P_v X'_{v,AT,M}}{U_r} \right)^2} = \sqrt{230^2 + \left(\frac{150 \cdot 79,94}{230} \right)^2} = 235,835 \text{ kV}.$$

Da bi se našla dinamička karakteristika posle (uspešnog) trolejnog ponovnog uključivanja voda, koja je identična (pod usvojenim pretpostavkama) sa onom pre kvara, izračunava se prvo impedansa (rezistansa) potrošačkog područja, koja je takođe po pretpostavci konstantna:

$$\underline{Z}_p = R_p = \frac{U_r^2}{P_p} = \frac{230^2}{230} = 230 \Omega,$$

a zatim sopstvena (ulazna) impedansa punog sistema u tački 1 gde deluje ems E' , shodno ekvivalentnoj šemi sa slike 4.19b:



Sl. 4.19b Ekvivalentna šema za proračun ulazne impedanse sistema iz zadatka 4.19

$$\underline{Z}_{11} = jX'_{GT_{sv}} + \frac{R_p jX'_{v,AT,M}}{R_p + jX'_{v,AT,M}} = j53,36 + \frac{230 \cdot j79,94}{230 + j79,94} = 127,125 \angle 78,756^\circ = Z_{11} \angle \psi_{11},$$

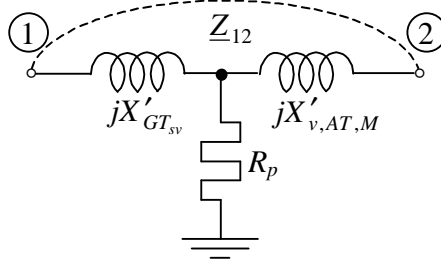
tj.

$$Z_{11} = 127,125 \Omega,$$

a

$$\mu_{11} = 90^\circ - \psi_{11} = 90^\circ - 78,756^\circ = 11,244^\circ .$$

Međusobna impedansa punog sistema između tačaka 1 i 2 (u kojoj deluje ekvivalentni napon mreže), nalazi se shodno šemi sa slike 4.19c:



Sl. 4.19c Ekvivalentna šema za proračun međusobne impedanse sa sl. 4.19a

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{12} &= jX'_{GT,sv} + jX'_{v,AT,M} + \frac{jX'_{GT,sv} jX'_{v,AT,M}}{R_p} = j53,36 + j79,94 - \frac{53,36 \cdot 79,94}{230} = \\ &= -18,55 + j133,3 = 134,5845 \angle 97,92^\circ, \end{aligned}$$

tj.

$$Z_{12} = 134,5845 \Omega$$

$$\psi_{12} = 97,92^\circ ;$$

$$\mu_{12} = 90^\circ - \psi_{12} = 90^\circ - 97,92^\circ = -7,92^\circ ,$$

što je u sličnim slučajevima tipično.

Dinamička karakteristika pre kvara odnosno posle (uspešnog) ponovnog uključanja, tj. za pun sistem na mestu 1 (unutrašnjost generatora) ima oblik

$$P_1 \equiv P_{1_{pu}} = \frac{E'_{sv}{}^2}{Z_{11}} \sin \mu_{11} + \frac{E'_{sv} U_{M_{sv}}}{Z_{12}} \sin(\delta - \mu_{12}) = 93,057 + 431,631 \sin(\delta + 7,92^\circ) .$$

Presek ove karakteristike sa pravom mehaničke snage P_m , koja se prećutno pretpostavlja da je konstantna, daje početni ugao δ_0 , koji se dobija preko izraza:

$$P_m \equiv P_{10} = P = 380 = 93,057 + 431,63 \sin(\delta_0 + 7,92^\circ),$$

gde je sa P_{10} označena početna (radna) snaga u tački 1 (unutrašnjost generatora), koja je zbog zanemarenja otpornosti (gubitaka) jednaka snazi P . Otuda je:

$$\sin(\delta_0 + 7,92^\circ) = \frac{380 - 93,057}{431,631} = 0,6647877 \Rightarrow \delta_0 + 7,92^\circ = 41,667^\circ ,$$

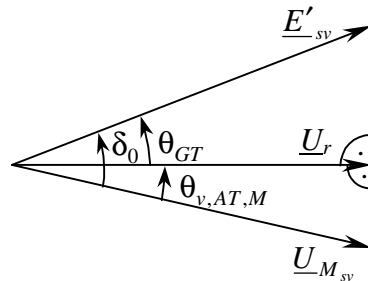
odakle je ugao:

$$\delta_0 = 41,667^\circ - 7,92^\circ = 33,747^\circ .$$

Kontrola se može izvršiti na primer sabiranjem uglova bloka G-T i onoga za vod, AT i M:

$$\operatorname{tg} \theta_{GT} = \frac{PX'_{GT,sv}/U_r}{U_r} = \frac{380 \cdot 53,36/230}{230} = 0,3833 \Rightarrow \theta_{GT} = 20,973^\circ;$$

$$\operatorname{tg} \theta_{v,AT,M} = \frac{P_v X'_{v,AT,M}/U_r}{U_r} = \frac{150 \cdot 79,94/230}{230} = 0,2266739 \Rightarrow \theta_{v,AT,M} = 12,771^\circ,$$



Sl. 4.19d Fazorski dijagram napona iz zadatka 4.19

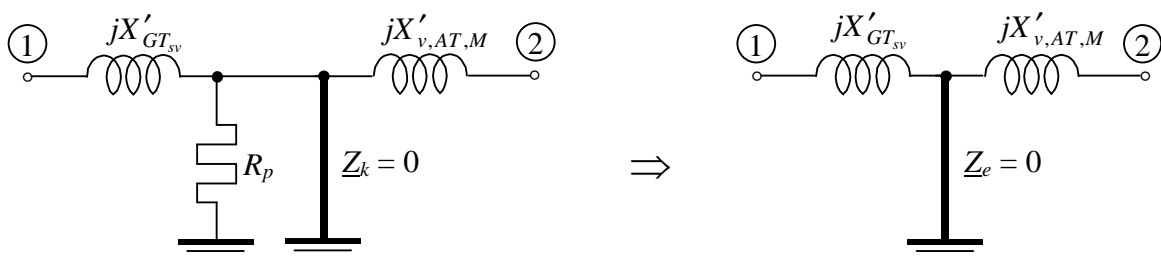
pa je:

$$\delta_0 = \theta_{GT} + \theta_{v,AT,M} = 20,973^\circ + 12,771^\circ = 33,744^\circ,$$

što pokazuje da je prethodni proračun ugla δ_0 bio korektan.

Dinamička karakteristika za vreme kvara (čist trofazni kratak spoj na početku voda, što je isto kao da se dogodio na sabirnicama, s tom razlikom što će reagovati zaštita voda) dobije se kada se kvar zameni sa impedansom kvara $\underline{Z}_k = 0$, kako je to ilustrovano na sl. 4.19e, gde je ekvivalentna otočna impedansa:

$$\underline{Z}_e = \frac{R_p \underline{Z}_k}{R_p + \underline{Z}_k} = \frac{R_p \cdot 0}{R_p + 0} = 0,$$



Sl. 4.19e Ekvivalentne šeme za proračun impedansi sistema sa sl. 4.19a za vreme kvara

pa je sopstvena impedansa u 1 za vreme kvara:

$$\underline{Z}_{11_k} = jX'_{GT,sv} = X'_{GT,sv} \angle 90^\circ = 53,36 \angle 90^\circ = Z_{11_k} \angle \psi_{11_k},$$

dok je:

$$\mu_{11_k} = 90^\circ - \psi_{11_k} = 90^\circ - 90^\circ = 0^\circ.$$

Moduo međusobne impedanse za vreme kvara teži beskonačnosti, jer je sa sl. 4.19e

$$\underline{Z}_{12_k} = jX'_{GT_{sv}} + jX'_{v,AT,M} + \frac{jX'_{GT_{sv}} jX'_{v,AT,M}}{\underline{Z}_e},$$

pa zbog $\underline{Z}_e = 0$ cela impedansa teži beskonačnosti.

Prema tome generatori za vreme kvara odaju nultu snagu, tj. dinamička karakteristika degeneriše u apscisu pravouglog koordinatnog sistema $P - \delta$:

$$P_k = \frac{E'_{sv}{}^2}{Z_{11_k}} \sin \mu_{11_k} + \frac{E'_{sv} U_{M_{sv}}}{Z_{12_k}} \sin(\delta - \mu_{12_k}) = \frac{246,32^2}{53,36} \sin 0^\circ = 0.$$

Dinamička karakteristika za vreme (trofaznog) isključenja voda, dobija se na bazi zamenske šeme, sa sl. 4.19f, u kojoj isključenje voda odgovara potpunom prekidu, odnosno beskonačnoj rednoj impedansi na mestu isključenja, pa moduo međusobne impedanse $Z_{12_i} \rightarrow \infty$ dok je sopstvena impedansa:

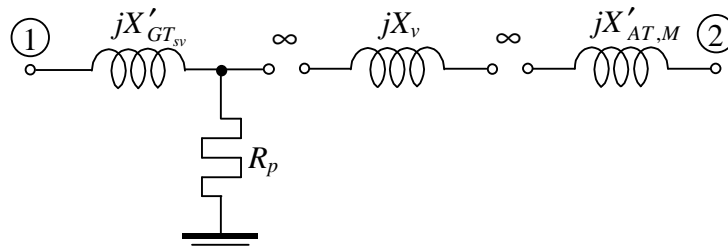
$$\underline{Z}_{11_i} = R_p + jX'_{GT_{sv}} = 230 + j53,36 = 236,10886 \angle 13,062^\circ,$$

tj.

$$Z_{11_i} = 236,10886 \Omega;$$

$$\psi_{11_i} = 13,062^\circ;$$

$$\mu_{11_i} = 90^\circ - \psi_{11_i} = 90^\circ - 13,062^\circ = 76,938^\circ.$$



Sl. 4.19f Ekvivalentna šema za proračun impedansi sistema

Prema tome dinamička karakteristika za vreme dok je vod isključen daće samo sopstveni član odnosno konstantnu aktivnu snagu:

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{E'_{sv}{}^2}{Z_{11_i}} \sin \mu_{11_i} + \frac{E'_{sv} U_{M_{sv}}}{Z_{12_i}} \sin(\delta - \mu_{12_i}) = \frac{246,32^2}{236,10886} \sin 76,938^\circ = \\ &= 256,968 \cdot 0,97412 = 250,3176 \text{ MW}. \end{aligned}$$

Ugao pri kome se isključuje vod može se izračunati na osnovu zadatog vremena isključenja voda t_i :

$$t_i = 0,09 \text{ s} = \sqrt{\frac{(\delta_i - \delta_0) \cdot 2T_i S_n}{360^\circ \cdot 50 \cdot P_a}},$$

tj. iz jednačine:

$$0,09^2 = \frac{(\delta_i - 33,747^\circ) \cdot 2 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 200}{18000 \cdot 380},$$

odakle se dobija da je:

$$\delta_i = 40,6725^\circ.$$

Grafični ugao δ_{gr} izračunava se iz preseka prave mehaničke snage P_m sa opadajućim delom dinamičke karakteristike punog sistema, što se prevodi u jednačinu:

$$P_m = 93,057 + 431,631 \sin(\delta_{gr} + 7,92^\circ) = 380,$$

odakle je:

$$\sin(\delta_{gr} + 7,92^\circ) = 0,6647877,$$

odnosno:

$$\delta_{gr} + 7,92^\circ = 180^\circ - 41,667^\circ,$$

odakle se konačno dobija:

$$\delta_{gr} = 180^\circ - 49,587^\circ = 130,413^\circ.$$

Sada je moguće po metodi jednakih površina, tj. izjednačavanjem površine ubrzanja A_1 sa maksimalno mogućom površinom usporenja A_{2max} , izračunati kritični ugao ponovnog uključanja $\delta_{pu_{kr}}$:

$$\underbrace{P_m(\delta_i - \delta_0) + (P_m - P_i)(\delta_{pu_{kr}} - \delta_i)}_{A_1} = \underbrace{\int_{\delta_{pu_{kr}}}^{\delta_{gr}} P_1(\delta) d\delta - P_m(\delta_{gr} - \delta_{pu_{kr}})}_{A_{2max}},$$

ili kraće, posle poništavanja pozitivne i negativne vrednosti za $P_m \delta_i$ i $P_m \delta_{pu_{kr}}$:

$$P_m(\delta_{gr} - \delta_0) - P_i(\delta_{pu_{kr}} - \delta_i) = \int_{\delta_{pu_{kr}}}^{\delta_{gr}} \left[\frac{E'_{sv}{}^2}{Z_{11}} \sin \mu_{11} + \frac{E'_{sv} U_{M_{sv}}}{Z_{12}} \sin(\delta - \mu_{12}) \right] d\delta.$$

Ova jednakost mogla se i neposredno iskazati, jer ako je površina $A_1 = A_{2max}$, onda je i površina pravougaonika sa stranicama $(\delta_{gr} - \delta_0)$ i P_m jednaka sumarnoj površini ispod odgovarajućih dinamičkih karakteristika: kvara (površina jednaka nuli pa otpada), isključenog voda i punog sistema posle uspešnog ponovnog uključanja.

(mereni od nastanka kvara) može se izračunati iz poznatog obrasca za slučaj konstantne snage akceleracije (ovde $P_a = P_m - P_i$), vodeći računa da je za vreme kvara do trenutka isključenja rotor agregata dobio nadsinhronu električnu ugaonu brzinu:

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{t=t_i} = \frac{\omega_s}{T_i S_n} P_a t_i + \left(\frac{d\delta}{dt}\right)_0,$$

gde drugi sabirak zbog $\omega - \omega_s = \omega_0 - \omega_s = \omega_s - \omega_s = 0$ otpada, tj.

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{t_i=0,09s} = \frac{360 \cdot 50}{10 \cdot 2 \cdot 200} \cdot 380 \cdot 0,09 = 153,9^\circ/s,$$

pri čemu su svi proračuni sprovedeni za oba agregata zajedno, kao za jedan ekvivalentan, ali se očigledno isto dobija i za svaki agregat pojedinačno ($P_{a_G} = P_{m_G} = P_a/2$, pa su i P_a i S_n upola manji u gornjem obrascu za jedan umesto oba agregata).

Treba takođe podvući da u gornjem obrascu vremenski trenutak t_i znači vremenski interval od nastanka do isključenja kvara, tj. vreme kvara $T_k = t_i - t_0 \equiv t_i$.

Izračunavanje promene ugla pri konstantnoj akceleraciji obavlja se po poznatom obrascu, vodeći računa da se primena ne odnosi na početno stanje, nego od trenutka isključenja kvara (odnosno voda) do ponovnog uključenja, tj. kao početni ugao ima se δ_i a ne δ_0 , početna ugaona

brzina $\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{t_i}$ a ne $\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_0 = 0$ i akceleracija $P_a = P_m - P_i$ a ne $P_a = P_m$, pa je:

$$\delta_{pu_{kr}} = \delta_i + \frac{\omega_s}{2T_i S_n} P_a T_{bp_{kr}}^2 + \left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{t_i} T_{bp_{kr}},$$

pri čemu je vreme 't' kao što je već rečeno identično sa trajanjem beznaponske pauze, kritičnim sa gledišta stabilnosti, što je i jedina nepoznata.

Sa zadatim brojčanim vrednostima iskazujući uglove u stepenima a ne u radijanima, biće

$$69,55^\circ = 40,6725^\circ + \frac{360 \cdot 50 \cdot (380 - 250,318)}{2 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 200} T_{bp_{kr}}^2 + 153,9 T_{bp_{kr}},$$

odakle se dobije kvadratna jednačina po $T_{bp_{kr}}$:

$$291,78 T_{bp_{kr}}^2 + 153,9 T_{bp_{kr}} - 28,88 = 0,$$

sa rešenjima

$$T_{bp_{kr},1,2} = \frac{-153,9 \pm \sqrt{153,9^2 - 4 \cdot 291,78 \cdot (-28,88)}}{2 \cdot 291,78},$$

od kojih je samo pozitivno rešenje fizički moguće, pa je:

$$T_{bp_{kr}} = \frac{-153,9 + 239,5655}{583,56} = 0,146798s \approx 0,15s.$$

Tranzijentna stabilnost ne dopušta duže vreme beznaponske pauze, kakvo je potrebno za uspešno ponovno uključenje kod prolaznog kvara sa gledišta dejonizacije prostora na mestu kvara (minimalno vreme dejonizacije oko 0,2 s, a poželjno i 0,3 do 0,4 s). Treba, znači, pokušati sa još kraćim vremenom isključenja kvara (jednoperiodna relejna zaštita i dvoperiodni prekidači, plus pola periode za gašenje luka, tj. sa $t_i = 0,02 + 2 \cdot 0,02 + 0,01 = 0,07$ s), ili proveriti da li se dobija dovoljno vreme beznaponske pauze za blaže a češće kvarove, pa se time zadovoljiti (interesantno je na kraju izračunati maksimalno klizanje pod pretpostavkom da je uključenje ipak uspešno). Za vreme kvara rotor dostigne klizanje:

$$s_{t_i} = \frac{1}{\omega_s} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)_{t_i} = \frac{\omega_s P_a t_i}{\omega_s T_i S_n} = \frac{380 \cdot 0,09}{10 \cdot 2 \cdot 200} = 0,00855,$$

pa je:

$$\begin{aligned} s_{max} &= \frac{1}{\omega_s} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)_{t_{pukr}} = \frac{\omega_s P_a T_{bpkr}}{\omega_s T_i S_n} + \frac{1}{\omega_s} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)_{t_i} = \frac{(380 - 250,32) \cdot 0,15}{10 \cdot 2 \cdot 200} + 0,00855 = \\ &= 0,00486 + 0,00855 = 0,01341 \text{ (tj. 1,341\%)}. \end{aligned}$$

□

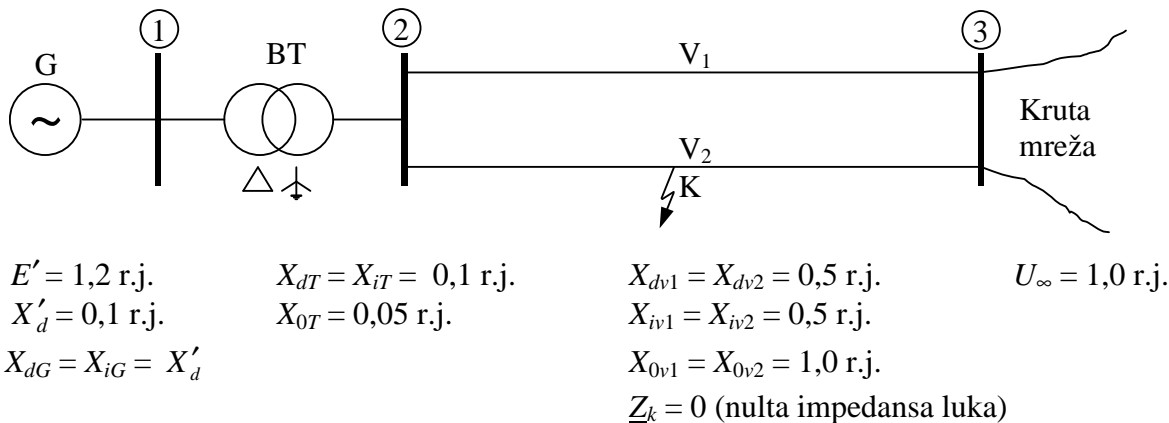
Zadatak 4.20

Za jednomašinski prenosni sistem, čija je jednopolna šema prikazana na sl. 4.20a, naći maksimalne prenosne snage, s obzirom na granice tranzijentne stabilnosti, u sledećim slučajevima:

- Normalno stanje (pre kvara);
- Trofazni kratki spoj na sredini jednog od dva paralelna voda;
- Dvofazni kratki spoj u istoj tački kao u b);
- Jednofazni kratki spoj u istoj tački kao u b);
- Dvofazni kratki spoj sa zemljom u istoj tački kao u b);
- Stanje posle isključenja voda u kvaru.

Numeričke vrednosti parametara elemenata sistema, takođe su date na sl. 4.20a.

U rekapitulaciji proračuna rangirati slučajeve a – f, po kriterijumu maksimalne prenosne snage.



Sl. 4.20a Jednopolna šema i osnovni parametri sistema iz zadatka 4.20

Rešenje:

Za proračun maksimalne prenosne snage, za različite slučajeve definisane u formulaciji zadatka, neophodno je da se prvo proračunaju odgovarajuće transfer impedanse.

1. Proračun transfer impedanse \underline{Z}_{13}

1.a. Normalno stanje

Transfer impedansa za normalno stanje jednostavno se nalazi uvidom u jednopolnu čemu sistema sa sl. 4.20a. Ona iznosi:

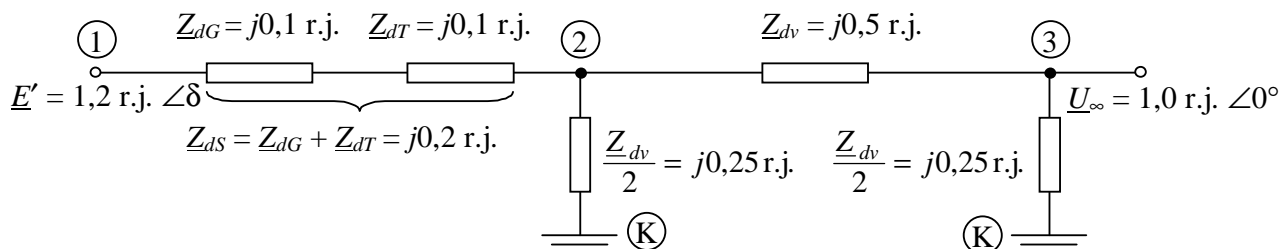
$$\underline{Z}_{13} = jX_{dG} + jX_{dT} + j\frac{1}{2}X_{dv} = j\left(0,1 + 0,1 + \frac{0,5}{2}\right) = j0,45 \text{ r.j.}$$

1b. Trofazni kratki spoj

Za proračun transfer impedanse pri trofaznom kratkom spoju na sredini jednog od dva paralelna voda, koristi se ekvivalentna šema impedansi direktnog redosleda, prikazana na sl. 4.20b,

odakle se, posle transfiguracije zvezde 1-2-3-K u trougao 13K, za vrednost transfer impedanse dobija:

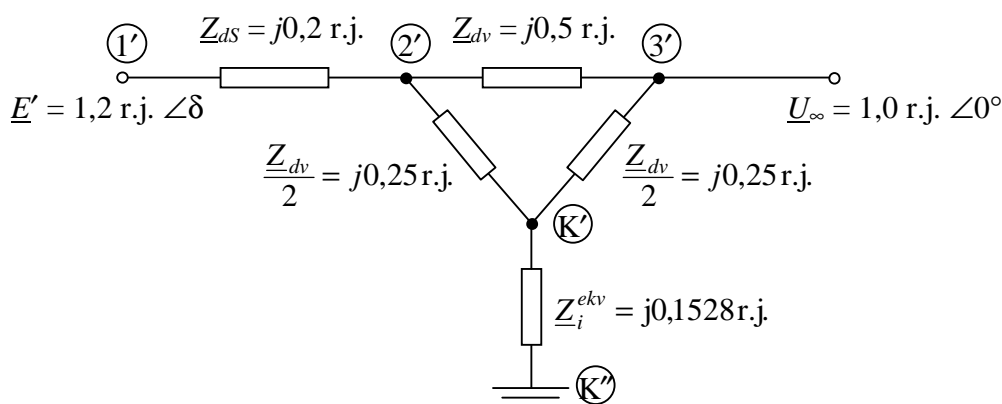
$$\underline{Z}_{d13} = \underline{Z}_{dS} + \underline{Z}_{dv} + \frac{\underline{Z}_{dS}\underline{Z}_{dv}}{\frac{\underline{Z}_{dv}}{2}} = j0,2 + j0,5 + j\frac{0,2 \cdot 0,5}{0,25} = j1,1 \text{ r.j.}$$



Sl. 4.20b Ekvivalentna mreža direktnog redosleda sistema iz zadatka 4.20

1c. Dvofazni kratki spoj

Impedansa kvara, koja se redno spaja sa ekvivalentnom impedansom direktnog redosleda (gledano sa mesta kvara) je ekvivalentna impedansa inverznog redosleda, pa je ekvivalentna šema sistema za ovaj slučaj prikazana na sl. 4.20c.

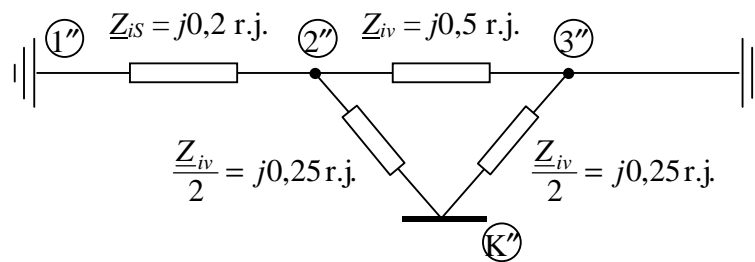


Sl. 4.20c Ekvivalentna mreža za proračun transfer impedanse pri dvofaznom kratkom spoju sistema iz zadatka 4.20

Za proračun ekvivalentne impedanse inverznog redosleda koristi se šema sa sl. 4.20d, odakle je:

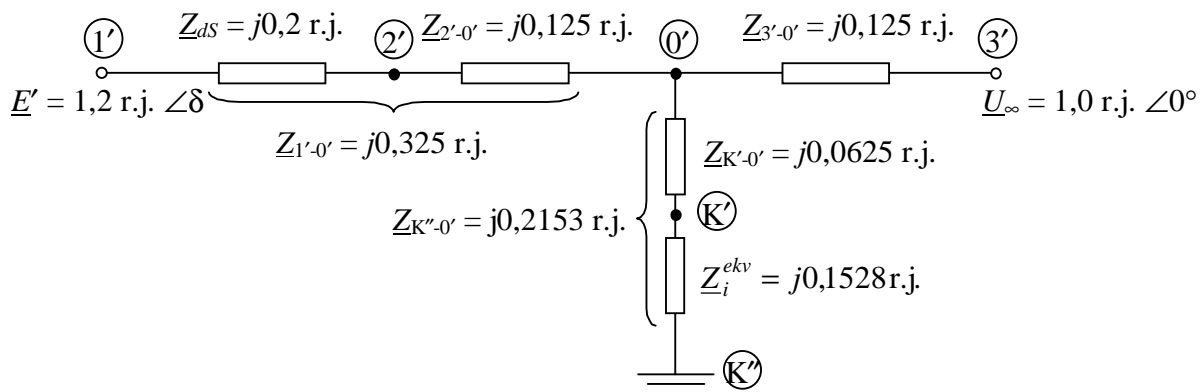
$$\underline{Z}_i^1 = \frac{\underline{Z}_{iS}\underline{Z}_{iv}}{\underline{Z}_{iS} + \underline{Z}_{iv}} = j\frac{0,2 \cdot 0,5}{0,2 + 0,5} = j0,14286 \text{ r.j.};$$

$$\underline{Z}_i^{ekv} = \frac{\left(\underline{Z}_i^1 + \frac{\underline{Z}_{iv}}{2}\right) \frac{\underline{Z}_{iv}}{2}}{\underline{Z}_i^1 + \frac{\underline{Z}_{iv}}{2} + \frac{\underline{Z}_{iv}}{2}} = j\frac{(0,14286 + 0,25) \cdot 0,25}{0,14286 + 0,25 + 0,25} = j0,1528 \text{ r.j.}$$



Sl. 4.20d Ekvivalentna šema mreže inverznih impedansi sistema iz zadatka 4.20

Za proračun transfer impedanse u ekvivalentnoj šemi sa sl. 4.20c, treba prvo izvršiti transfiguraciju trougla 2'3'K' u zvezdu 0'-2'-3'-K', a potom sprovesti ekvivalentovanje rednih i paralelnih grana shodno sl. 4.20e.



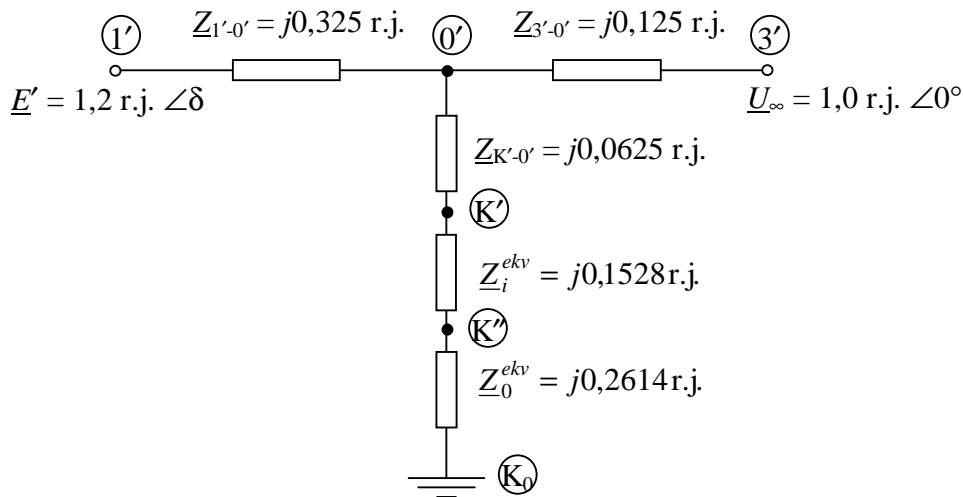
Sl. 4.20e Ekvivalentna mreža sa sl. 4.20c, posle transfiguracije trougla 2'3'K' u zvezdu 0'-2'-3'-K'

Transfer impedansa pri dvofaznom kratkom spoju dobija se posle transfiguracije zvezde 0'-1'-3'-K' u trougao 1'3'K'', odakle je:

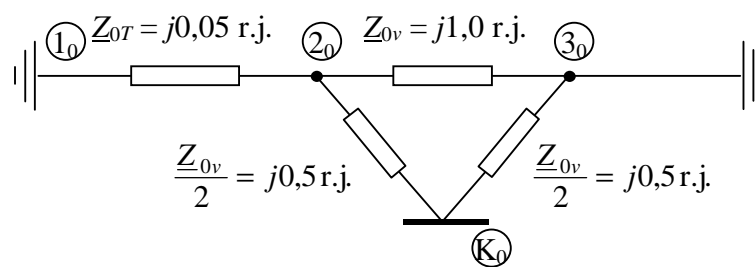
$$\underline{Z}_{1'3'}^{\Delta} = j0,325 + j0,125 + j \frac{0,325 \cdot 0,125}{0,2153} = j0,6387 \text{ r.j.}$$

1d. Jednofazni kratki spoj

Impedansa kvara u ovom slučaju je zbir $\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}$, koja se na mestu kvara (sabirnice K) vezuje na red sa ekvivalentnom mrežom direktnog redosleda, shodno sl. 4.20f (na kojoj se koristi prethodno ekvivalentovana mreža direktnih impedansi sa sl. 4.20e i vrednost ekvivalentne impedanse inverznog redosleda sa sl. 4.20d). Prethodno treba sračunati ekvivalentnu impedansu nultog redosleda (gledano sa mesta kvara) shodno sl. 4.20g.

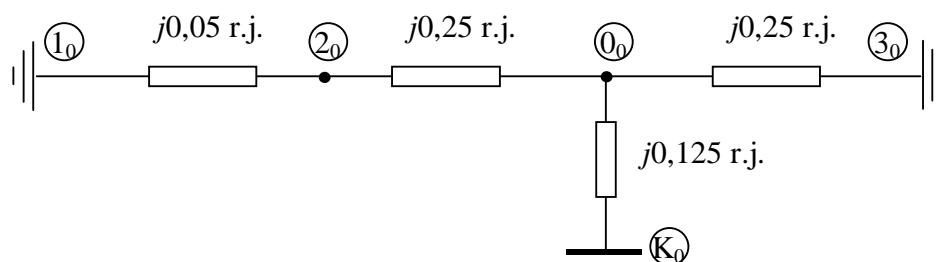


Sl. 4.20f Ekvivalentna mreža za proračun transfer impedanse pri jednostrukom zemljospoju u sistemu iz zadatka 4.20



Sl. 4.20g Ekvivalentna šema mreže nultih impedansi sistema iz zadatka 4.20

Posle transfiguracije trougla $2_03_0K_0$ u zvezdu $0_0-2_0-3_0-K_0$, dobija se ekvivalentna šema nultih impedansi na sl. 4.20h.



Sl. 4.20h Ekvivalentna šema sistema nultih impedansi, posle transfiguracije trougla $2_03_0K_0$ sa sl. 4.20g u zvezdu $0_0-2_0-3_0-K_0$

Ekvivalentna nulta impedansa sistema sa sl. 4.20h je:

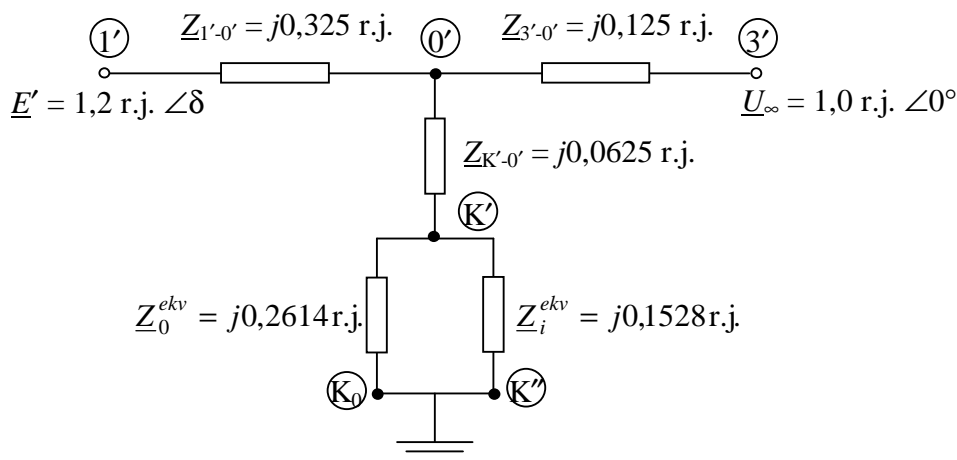
$$\underline{Z}_0^{ekv} = j \frac{(0,05 + 0,25) \cdot 0,25}{0,05 + 0,25 + 0,25} + j0,125 = j0,2614 \text{ r.j.}$$

Transfer impedansa za slučaj jednostrukog zemljospoja, dobija se sa sl. 4.20f posle transfiguracije zvezde $0'-1'-3'-K_0$ u trougao, odakle je:

$$\underline{Z}_{1'3'}^{\Delta} = j0,325 + j0,125 + j \frac{0,325 \cdot 0,125}{0,0625 + 0,1528 + 0,2614} = j0,5352 \text{ r.j.}$$

1e. Dvofazni kratki spoj sa zemljom

Impedansa kvara u ovom slučaju dobija se kao ekvivalentna impedansa paralelnih impedansi \underline{Z}_i^{ekv} i \underline{Z}_0^{ekv} , kako je to prikazano na sl. 4.20i (gde su iskorišćene ranije proračunate vrednosti direktnih impedansi sa sl. 4.20e i ekvivalentne vrednosti inverzne i nulte impedanse sa sl. 4.20d i 4.20h).



Sl. 4.20i Ekvivalentna mreža za proračun transfer impedanse pri dvostrukom zemljospoju u sistemu iz zadatka 4.20

Sa sl. 4.20i je:

$$\underline{Z}_{i0}^{ekv} = j \frac{0,2614 \cdot 0,1528}{0,2614 + 0,1528} = j0,0964 \text{ r.j.}$$

Onda je transfer impedansa za slučaj dvostrukog zemljospoja:

$$\underline{Z}_{1'3'}^{\Delta} = j0,325 + j0,125 + j \frac{0,325 \cdot 0,125}{0,0625 + 0,0964} = j0,7057 \text{ r.j.}$$

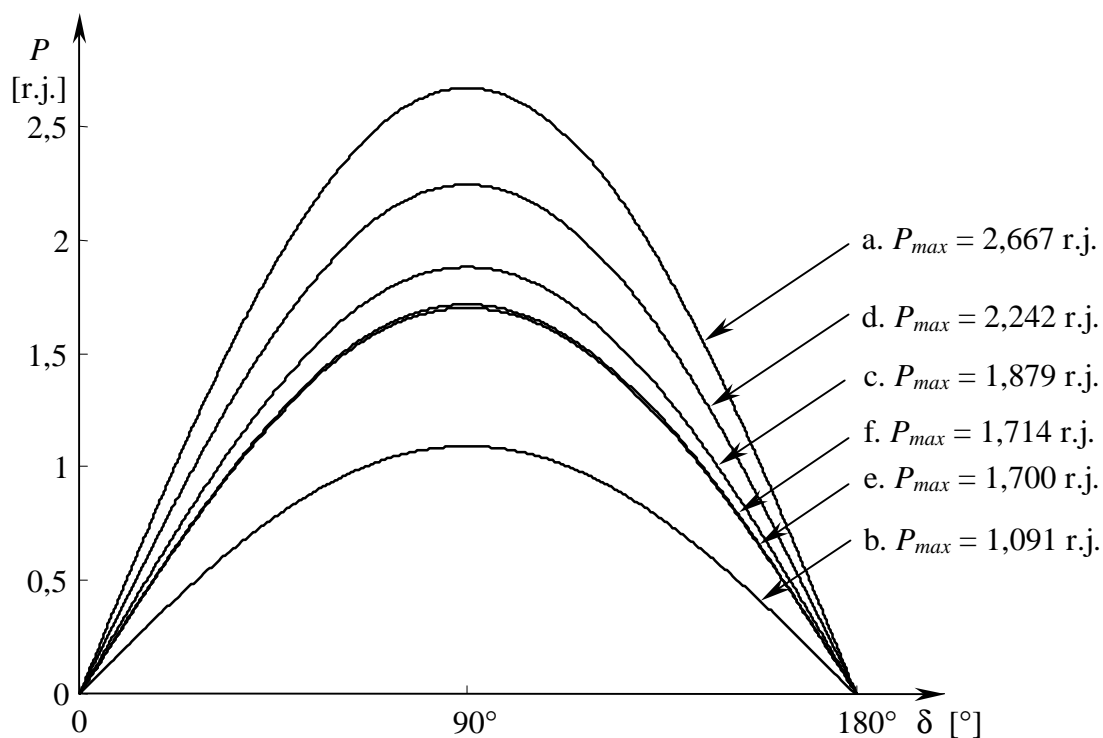
1f. Stanje posle isključenja voda u kvaru

Sa slike 4.20b, transfer impedansa u ovom slučaju je:

$$\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{dG} + \underline{Z}_{dT} + \underline{Z}_{dv} = j0,1 + j0,1 + j0,5 = j0,7 \text{ r.j.}$$

2. Proračun maksimalnih prenosnih snaga

	Transfer impedansa	Maks. prenosna snaga
a. Normalno stanje	$j0,45$ r.j.	2,667 r.j.
b. Trofazni kratki na sredini jednog od dva paralelna voda	$j1,10$ r.j.	1,091 r.j.
c. Dvofazni kratak spoj na istom mestu	$j0,6387$ r.j.	1,879 r.j.
d. Jednofazni kratki spoj	$j0,5352$ r.j.	2,242 r.j.
e. Dvofazni kratki spoj sa zemljom	$j0,7057$ r.j.	1,700 r.j.
f. Posle isključenja voda u kvaru	$j0,7$ r.j.	1,714 r.j.



Sl. 4.20j Krive snaga – ugao za slučajeve razmatrane u zadatku 4.20

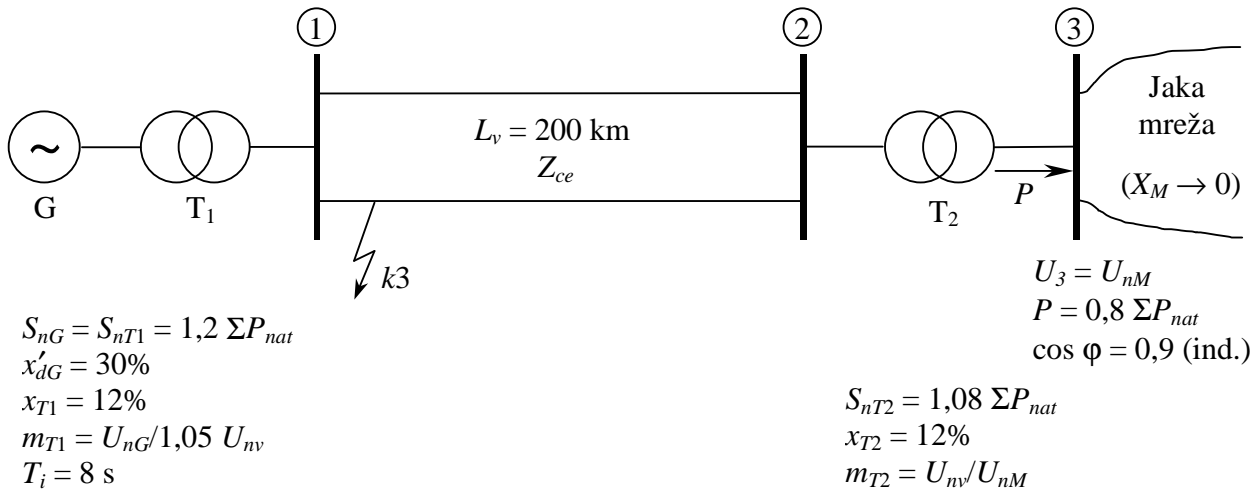
3. Ako se po kriterijumu veličine prenosne snage načini redosled posmatranih slučajeva, on ima sledeći izgled

1. Normalno stanje	$P_{max} = 2,667$ r.j.
2. Jednofazni kratki spoj	$P_{max} = 2,242$ r.j.
3. Dvofazni kratak spoj	$P_{max} = 1,879$ r.j.
4. Stanje posle isključenja voda u kvaru	$P_{max} = 1,714$ r.j.
5. Dvofazni kratki spoj sa zemljom	$P_{max} = 1,700$ r.j.
6. Trofazni kratki spoj	$P_{max} = 1,091$ r.j.

□

Zadatak 4.21

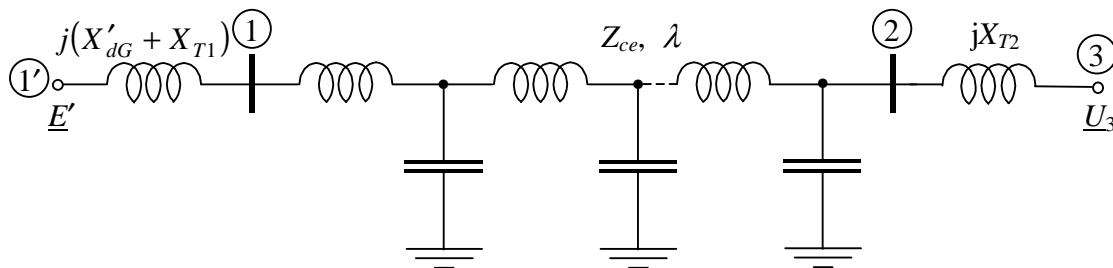
Za elektroenergetski sistem na sl. 4.21a, proveriti tranzijentnu stabilnost generatora za slučaj trofaznog kratkog spoja na početku jednog od dva paralelna voda i isključenja voda u kvaru za $t_i = 0,20$ s. Pretpostaviti da je šema idealizovana, a vod tretirati preko modela sa raspodeljenim parametrima. Radne veličine zadate su na sabirnicama 3 i date na sl. 4.21a. Na istoj slici su dati i ostali parametri sistema, neophodni za proračun.



Sl. 4.21a Jednopolna šema i parametri sistema iz zadatka 4.21

Rešenje:

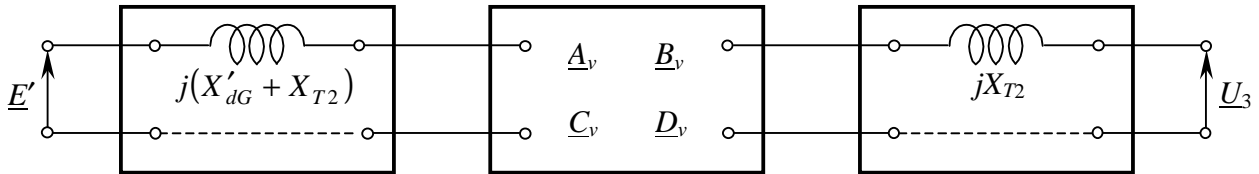
Jednopolna zamenska šema sistema direktnih impedansi prikazana je na sl. 4.21b.



Sl. 4.21b Jednopolna zamenska šema sistema sa slike 4.21a

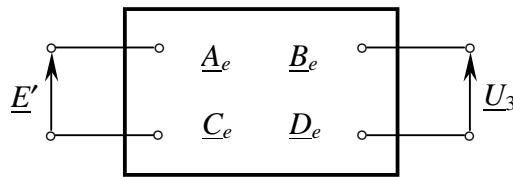
U zamenskoj šemi na sl. 4.21b generator je predstavljen tranzijentnom reaktansom i EMS E' iza tranzijentne reaktanse, transformatori T_1 i T_2 preko reaktansi rasipanja X_{T1} i X_{T2} , dva identična paralelna voda preko karakteristične impedanse Z_{ce} ($Z_{ce} = Z_c/2$, gde je Z_c karakteristična impedansa jednog od dva voda) i električne ugaone dužine λ , dok je jaka mreža, s obzirom da je pretpostavljeno da je neograničeno jaka, zamenjena preko krutog napona U_3 (odnosno, ne postoji uticaj mreže na razmatrani sistem).

Ako se pojedini elementi ekvivalentne šeme (blok generator-transformator, vod i transformator T_2) predstave preko odgovarajućih četvorokrajnika, dobija se ekvivalentna šema na sl. 4.21c.



Sl. 4.21c Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.21b, pri predstavljanju elemenata odgovarajućim četvorokrajnicima

Lanac četvorokrajnika na sl. 4.21c može se uprostiti tretmanom preko odgovarajućeg ekvivalentnog četvorokrajnika sa sl. 4.21d, čiji se parametri nalaze primenom matičnog računa:



Sl. 4.21d Ekvivalentni četvorokrajnik sistema sa sl. 4.21c

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \underline{A}_e & \underline{B}_e \\ \underline{C}_e & \underline{D}_e \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & j(X'_{dG} + X_{T1}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\lambda & jZ_{ce} \sin\lambda \\ j\frac{1}{Z_{ce}} \sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jX_{T2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\lambda - \frac{X'_{dG} + X_{T1}}{Z_{ce}} \sin\lambda & j \left[X_{T2} \cos\lambda - \frac{X_{T2}}{Z_{ce}} (X'_{dG} + X_{T1}) \sin\lambda + Z_{ce} \sin\lambda + (X'_{dG} + X_{T1}) \cos\lambda \right] \\ j\frac{1}{Z_{ce}} \sin\lambda & \cos\lambda - \frac{X_{T2}}{Z_{ce}} \sin\lambda \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Parametri zamenske šeme su:

$$X'_{dG} + X_{T1} = \frac{x'_{dG} \% + x_{T1} \%}{100} \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \left(\frac{1,05 U_{nv}}{U_{nG}} \right)^2 = \frac{0,42}{1,2 \Sigma P_{nat}} \cdot (1,05 U_{nv})^2 = 0,3859 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}};$$

$$X_{T2} = \frac{x_{T2} \%}{100} \frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}} = 0,12 \frac{U_{nv}^2}{1,08 \Sigma P_{nat}} = 0,111 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}}.$$

Radne veličine koje odgovaraju zadatom radnom stanju sistema na sabirnicama 3 su:

$$P = 0,8 \Sigma P_{nat};$$

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi = 0,8 \Sigma P_{nat} \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = 0,8 \Sigma P_{nat} \cdot 0,484 = 0,3875 \Sigma P_{nat},$$

gde je sa ΣP_{nat} označena prirodna snaga dva paralelna voda.

Ugao između ems \underline{E}' i napona na sabirnicama 3 (\underline{U}_3), koji će biti označen sa δ_0 i koji, ako se napon \underline{U}_3 stavi u faznu osu ($\underline{U}_3 = U_3 \angle 0 = U_{nM} \cdot (U_{nv}/U_{nM}) \angle 0 = U_{nv} \angle 0$), predstavlja fazni

stav ems \underline{E}' , tj. $\underline{E}' = E' \angle \delta_0$, nalazi se iz prve od jednačina, koja važi za ekvivalentni četvorokrajnik:

$$\underline{E}' = \underline{A}_e \underline{U}_3 + \underline{B}_e \underline{I}. \quad (1)$$

Na osnovu prethodnog nalazi se da je

$$\underline{A}_e = \cos \lambda - \frac{X'_{dG} + X_{T1}}{Z_{ce}} \sin \lambda = \cos 12^\circ - \frac{0,3859 U_{nv}^2 \Sigma P_{nat}}{\Sigma P_{nat} U_{nv}^2} \sin 12^\circ = 0,89791,$$

pošto je električna ugaona dužina svakog od vodova:

$$\lambda = 0,06 \cdot 200 = 12^\circ,$$

i pošto je

$$Z_{ce} = \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}},$$

a takođe i

$$\begin{aligned} \underline{B}_e &= j \left[X_{T2} \cos \lambda - \frac{X_{T2}}{Z_{ce}} (X'_{dG} + X_{T1}) \sin \lambda + Z_{ce} \sin \lambda + (X'_{dG} + X_{T1}) \cos \lambda \right] = \\ &= j \cos \lambda \left[(X'_{dG} + X_{T1}) \left(1 - \frac{X_{T2}}{Z_{ce}} \operatorname{tg} \lambda \right) + Z_{ce} \operatorname{tg} \lambda + X_{T2} \right] = \\ &= j \cos 12^\circ \left[0,3859 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}} \left(1 - \frac{0,111 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}}}{\frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}}} \operatorname{tg} 12^\circ \right) + \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}} \operatorname{tg} 12^\circ + 0,111 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}} \right] = \\ &= j 0,685 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}}. \end{aligned}$$

U jednačini (1) struja \underline{I} predstavlja računsku struju ($\underline{I} = \sqrt{3} \underline{I}_f$), ako su ems \underline{E}' i napon \underline{U}_3 linijske veličine, tako da je:

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}^*}{\underline{U}_3} = \frac{S e^{-j\varphi}}{U_{nv}};$$

$$\underline{I} = \frac{P / \cos \varphi}{U_{nv}} e^{-j\varphi} = \frac{0,8 \Sigma P_{nat}}{\cos \varphi U_{nv}} e^{-j\varphi} = 0,889 \frac{\Sigma P_{nat}}{U_{nv}} e^{-j25,84^\circ}.$$

Posle zamene nađenih veličina u (1) dobija se:

$$\underline{E}' = 0,89791U_{nv} + j0,685 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}} \cdot 0,889 \frac{\Sigma P_{nat}}{U_{nv}} e^{-j25,84^\circ} = 1,2858U_{nv} e^{-j25^\circ 13'} = E' \angle \delta_0;$$

odakle je:

$$E' = 1,2858U_{nv} \text{ r.j. ,}$$

a

$$\delta_0 = 25^\circ 13' = 25,23^\circ .$$

Kontrola ovog rezultata lako se vrši preko dinamičke karakteristike ustaljenog stanja na kojoj se ugao δ_0 ima u tački u kojoj je električna odata snaga jednaka mehaničkoj snazi (pošto su gubici zanemareni), tj.:

$$\frac{E'U_3}{Z'_{13}} = \frac{E'U_3}{B_e} \sin \delta_0 = P_m = 0,8 \Sigma P_{nat} \Rightarrow \sin \delta_0 = \frac{0,8 \Sigma P_{nat} B_e}{E'U_3} .$$

Dinamička karakteristika posle isključenja voda u kvaru nalazi se preko koeficijenta ekvivalentnog četvorokrajnika B_{e_i} , gde indeks 'i' ukazuje da je jedan od dva paralelna voda isključen:

$$\begin{aligned} \underline{B}_{e_i} &= j \cos \lambda \left[(X'_{dG} + X_{T1}) \left(1 - \frac{X_{T2}}{Z_c} \operatorname{tg} \lambda \right) + Z_c \operatorname{tg} \lambda + X_{T2} \right] = \\ &= j \cos 12^\circ \left[0,3859 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}} \left(1 - \frac{0,111 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}}}{2 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}}} \operatorname{tg} 12^\circ \right) + 2 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}} \operatorname{tg} 12^\circ + 0,111 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}} \right] = \\ &= j0,897 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}}, \end{aligned}$$

jer je:

$$Z_c = 2Z_{ce} = 2 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}} .$$

Dinamička karakteristika sa isključenim vodom u kvaru ima oblik:

$$P_i = \frac{E'U_3}{B_{e_i}} \sin \delta = \frac{1,2858U_{nv}U_{nv}}{0,897U_{nv}^2/\Sigma P_{nat}} \sin \delta = 1,433 \Sigma P_{nat} \sin \delta ,$$

i prikazana je na sl. 4.21e.

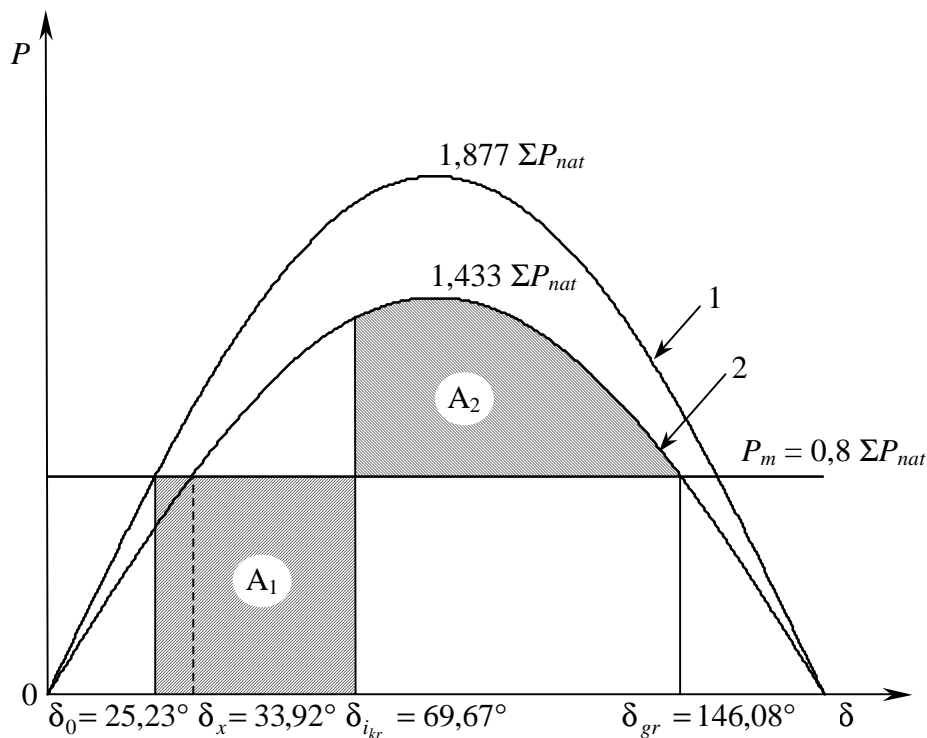
Za crtanje krivih njihanja na sl. 4.21e, nalazi se najpre ugao δ_x , preko izraza

$$P_m = P_i(\delta_x) \Rightarrow \sin \delta_x = \frac{0,8 \Sigma P_{nat}}{1,433 \Sigma P_{nat}} = 0,5581 ,$$

odakle je:

$$\delta_x = 33^\circ 55' = 33,92^\circ ;$$

$$\delta_{gr} = 180^\circ - 33^\circ 55' = 146^\circ 05' = 146,08^\circ .$$



Sl. 4.21e Krive njihanja sistema iz zadatka 4.21, 1- pre kvara; 2-posle isključenja kvara

Kritični ugao isključenja voda u kvaru dobija se iz izraza:

$$\cos \delta_{ikr} = \frac{(\delta_{gr} - \delta_0) \sin \delta_0 + r_i \cos \delta_{gr}}{r_i} ,$$

gde je:

$$r_i = \frac{X'_{13}}{X'_{13i}} = \frac{B_e}{B_{e_i}} = \frac{j0,685 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}}}{j0,897 \frac{U_{nv}^2}{\Sigma P_{nat}}} = 0,7637 .$$

Dalje se ima:

$$\cos \delta_{i_{kr}} = \frac{(146,08^\circ - 25,23^\circ) \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot 0,426 + 0,7637 \cdot (-0,83)}{0,7637} = 0,347,$$

odnosno

$$\delta_{i_{kr}} = 69^\circ 40' = 69,67^\circ,$$

tako da je kritično vreme isključenja voda u kvaru:

$$t_{i_{kr}} = \sqrt{\frac{T_i S_n (\delta_{i_{kr}} - \delta_0)}{9000 P_m}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 1,2 \Sigma P_{nat} (69,67 - 25,23)}{9000 \cdot 0,8 \Sigma P_{nat}}} = 0,243 \text{ s} \approx 2,5 \text{ periode}.$$

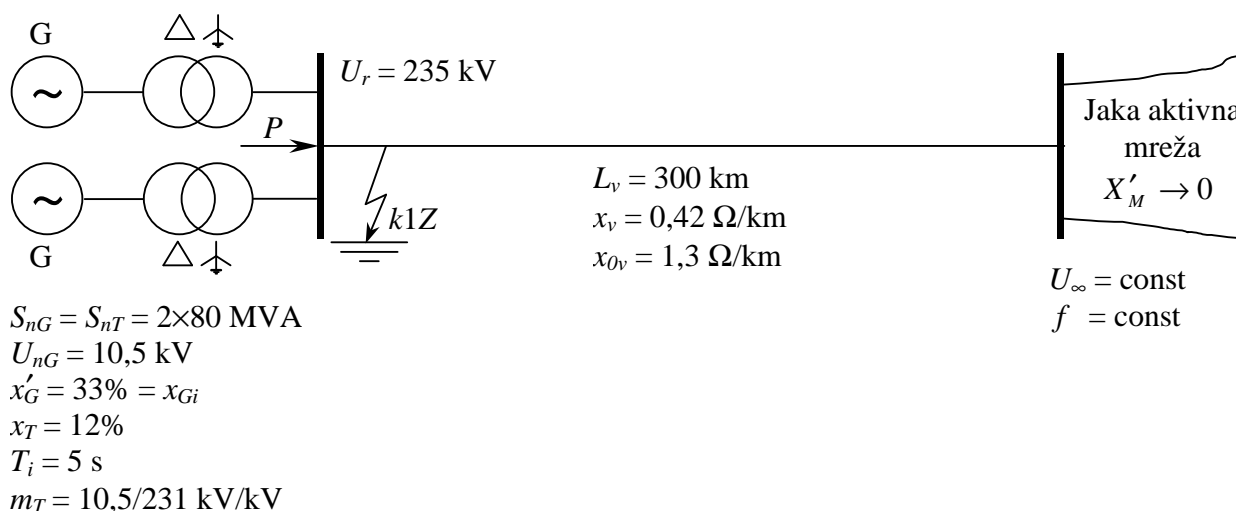
Pošto se troljni kratak spoj isključuje za $t_i = 0,20 \text{ s}$, to se zaključuje da je za pretpostavljeni kvar $t_i < t_{i_{kr}}$, pa je generator tranzijentno stabilan.

□

Zadatak 4.22

Za dati trofazni, jednopolno prikazani jednomašinski sistem sa na sl. 4.22a, izračunati kritično vreme ponovnog uključanja (tzv. vreme beznaponske pauze) faze u kvaru, sa gledišta tranzijentne stabilnosti za slučaj prolaznog jednopolnog kratkog spoja na početku voda 220 kV. Faza u kvaru se monofazno isključuje u vremenu od 0,15 s. Pretpostavlja se da su identične generatorsko-transformatorske grupe bile jednako opterećene i da su odavale pre kvara na sabirnice ukupnu aktivnu snagu $P = 120$ MW uz $\cos\varphi = 1$. Pretpostaviti da su u kritičnom vremenu po tranzijentnu stabilnost ems E' i mehanička snaga turbine P_m , kao i napon (i učestanost) jake mreže konstantni.

Podaci o sistemu, neophodni za proračune, takođe su dati na sl. 4.22a.



Sl. 4.22a Jednopolna šema i parametri sistema iz zadatka 4.22

Rešenje:

Sve veličine se svode na nominalni napon voda. Obe paralelne generatorsko-transformatorske grupe mogu se posmatrati kao jedna ekvivalentna grupa, čija je tranzijentna reaktansa, svedena na stranu voda:

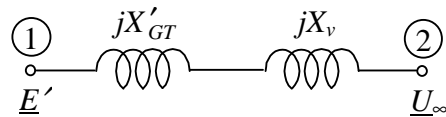
$$X'_{GT} = \frac{33+12}{100} \cdot \frac{10,5^2}{2 \cdot 80} \cdot \left(\frac{231}{10,5} \right)^2 = 150 \Omega.$$

Ukupna reaktansa (direktna, inverzna) voda (kod proračuna stabilnosti obično računata bez faktora popravke):

$$X_v = x_v L_v = 0,42 \cdot 300 = 126 \Omega.$$

Celokupna reaktansa sistema, koja je istovremeno i međusobna reaktansa između krajeva generatora i krute mreže, shodno zamenskoj šemi sa sl. 4.22b je

$$\Sigma X = X_{12} = X'_{GT} + X_v = 150 + 126 = 276 \Omega.$$



Sl. 4.22b Ekvivalentna šema impedansi direktnog i inverznog sistema

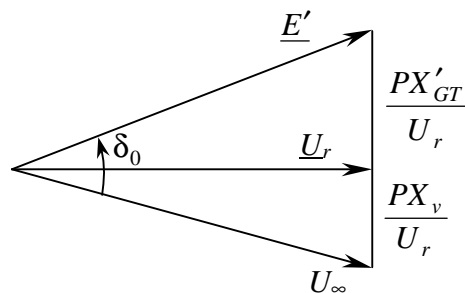
Moduo svedene ems E' generatora je:

$$E' = \sqrt{U_r^2 + \left(\frac{PX'_{GT}}{U_r}\right)^2} = \sqrt{235^2 + \left(\frac{120 \cdot 150}{235}\right)^2} = 247,17 \text{ kV},$$

pri čemu su zanemarene otpornosti elemenata mreže i pretpostavljeno da je faktor snage na krajevima generatorsko-transformatorskih blokova $\cos \varphi = 1$.

Na sličan način nalazi se i napon U_{∞} jake mreže, shodno fazorskom dijagramu napona sa sl. 4.22c:

$$U_{\infty} = \sqrt{U_r^2 + \left(\frac{PX_v}{U_r}\right)^2} = \sqrt{235^2 + \left(\frac{120 \cdot 126}{235}\right)^2} = 243,65 \text{ kV}.$$



Sl. 4.22c Fazorski dijagram napona sistema sa sl. 4.22a

Početni ugao δ_0 može se naći iz izraza za prenosnu snagu:

$$P_m = P_0 = \frac{E'U_{\infty}}{X_{12}} \sin \delta_0 = P_{max} \sin \delta_0,$$

koji posle zamene brojčanih vrednosti poznatih veličina postaje:

$$120 = \frac{247,17 \cdot 243,65}{276} \sin \delta_0 = 218,2 \sin \delta_0,$$

odakle je:

$$\sin \delta_0 = \frac{120}{218,2} = 0,549954,$$

odnosno:

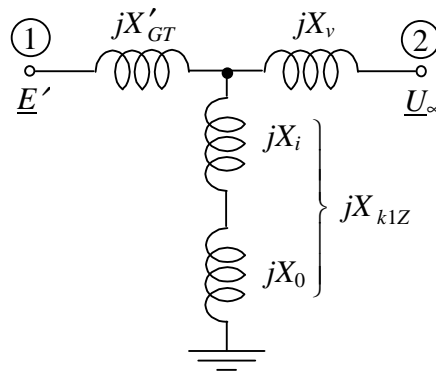
$$\delta_0 = 33,364^\circ.$$

Pored radne tačke usput je nađena i dinamička karakteristika normalnog (punog) sistema, koja je istovetna sa onom posle (uspešnog) ponovnog uključanja (ovde faze prolaznog kvara), čija je forma:

$$P = P_{pu} = 218,2 \sin \delta.$$

Razume se da kod zanemarenja otpornosti, sopstvene i međusobne impedanse degenerišu u odgovarajuće reaktanse, a komplementarni uglovi njihovih argumenata μ_{11} i μ_{12} iščezavaju, pa sinusoida prenosne snage prolazi kroz koordinatni početak, sa apscisom kao osom simetrije.

Da bi se našla dinamička karakteristika za vreme jednopolnog kratkog spoja treba na mesto kvara u direktnom sistemu otopno staviti rednu vezu ekvivalentne inverzne i nulte reaktanse sistema (tj. reaktansu jednopolnog kratkog spoja), kako je to ilustrovano na sl. 4.22d.



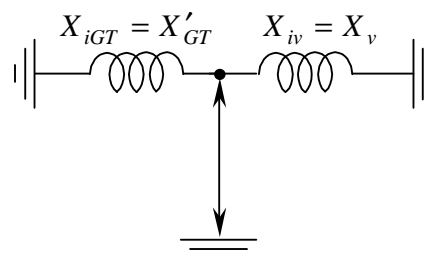
Sl. 4.22d Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.22a za vreme kvara

Može se uvesti smena:

$$X_{k1Z} = X_i + X_0.$$

Inverzna komponenta ekvivalentne reaktanse sistema gledane otopno sa mesta kvara, lako se nalazi iz šeme sa sl. 4.22e:

$$X_i = \frac{X_{iGT} X_{iv}}{X_{iGT} + X_{iv}} = \frac{150 \cdot 126}{150 + 126} = 68,5 \Omega.$$



Sl. 4.22e Ekvivalentna šema za proračun direktne i inverzne impedanse sistema, gledano sa mesta kvara

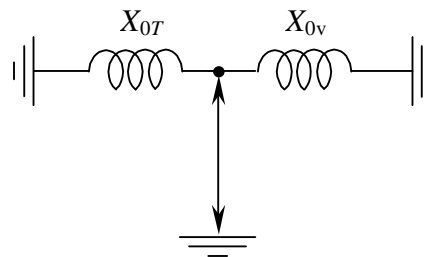
Analogno se nalazi i ekvivalentna otočno računata (između faze na mestu kvara i tačke nultog potencijala) nulta reaktansa sistema, shodno zamenskoj šemi sa sl. 4.22f, pri čemu treba voditi računa da su generatorski transformatori zbog sprege Yd zaprečni za nulti sistem i da su na strani višeg napona oba zvezdišta transformatora direktno uzemljena (nulta reaktansa magnećenja transformatora, u paraleli sa rasipnom, može da se zanemari, pa nije ni zadata). Onda je:

$$X_0 = \frac{X_{0T} X_{0v}}{X_{0T} + X_{0v}} = \frac{40 \cdot 390}{40 + 390} = 36,28 \Omega ,$$

pri čemu je

$$X_{0T} = X_T = \frac{12}{100} \cdot \frac{231^2}{160} = 40 \Omega ;$$

$$X_{0v} = x_{0v} L_v = 1,3 \cdot 300 = 390 \Omega .$$



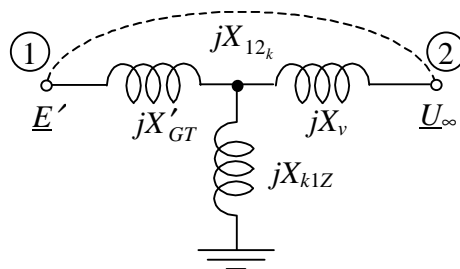
Sl. 4.22f Ekvivalentna šema za proračun nulte impedanse sistema, gledano sa mesta kvara

Prema tome za reaktansu kvara, pri jednopolnom kratkom spoju ima se vrednost:

$$X_{k1Z} = X_i + X_0 = 68,5 + 36,28 = 104,78 \Omega ,$$

dok se ukupna transfer reaktansa (međusobna reaktansa) sistema za vreme kvara X_{12_k} računa na osnovu šeme sa sl. 4.22g i iznosi:

$$X_{12_k} = X'_{GT} + X_v + \frac{X_{GT} X_v}{X_{k1Z}} = 150 + 126 + \frac{150 \cdot 126}{104,78} = 456,4 \Omega .$$

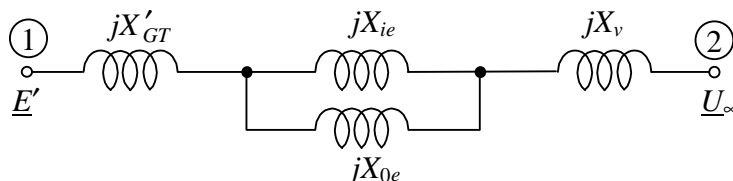


Sl. 4.22g Ekvivalentna šema sistema za vreme kvara, posle zamene $X_i + X_0$ na sl. 4.22d, sa X_{k1Z} .

Sada se konačno nalazi dinamička karakteristika sistema pri jednofaznom kratkom spoju):

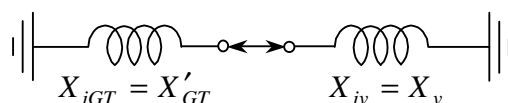
$$P_k = \frac{E'U_\infty}{X_{12_k}} \sin \delta = \frac{247,17 \cdot 243,65}{456,4} \sin \delta = P_{max_k} \sin \delta = 131,95 \sin \delta.$$

Da bi se našla dinamička karakteristika za vreme isključene faze u kvaru potrebno je u jednopolnu zamensku šemu direktnog sistema na mesto prekida ubaciti paralelnu vezu ekvivalentne inverzne i nulte reaktanse redno računane (merene) na mestu prekida, tj. između polova prekidača, shodno šemi sa sl. 4.22h.



Sl. 4.22h Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.22a, posle isključenja faze u kvaru

Redno merena ekvivalentna inverzna reaktansa na mestu prekida X_{ie} se nalazi iz šeme pasivnog inverznog sistema sa sl. 4.22i,



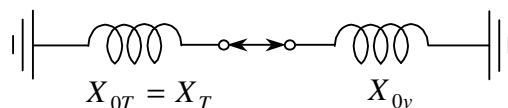
Sl. 4.22i Ekvivalentna mreža inverznih impedansi posle isključenja faze u kvaru

tj. kao zbir inverznih reaktansi elemenata sistema:

$$X_{ie} = X_{iGT} + X_{iv} = 150 + 126 = 276 \Omega.$$

Analogno se nalazi ekvivalentna nulta reaktansa X_{0e} redno spojena na mestu prekida (isključenja faze kvara), shodno šemi sa sl. 4.22j:

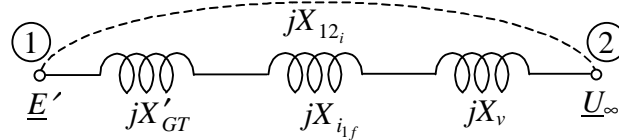
$$X_{0e} = X_{0T} + X_{0v} = 40 + 390 = 430 \Omega.$$



Sl. 4.22j Ekvivalentna mreža nultih impedansi posle isključenja faze u kvaru

Paralelna veza reaktansi X_{ie} i X_{0e} daje reaktansu isključenja jedne faze X_{i_f} (indeks i ovde znači isključenje, a ne inverzno), koja se stavlja redno na mesto prekida u direktan sistem shodno sl. 4.22k:

$$X_{i_f} = \frac{X_{ie}X_{0e}}{X_{ie} + X_{0e}} = \frac{276 \cdot 430}{276 + 430} = 168,1 \Omega.$$



Sl. 4.22k Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.22h, posle paralelnog spreznja reaktansi X_{ie} i X_{oe}

Zbir svih reaktansi na sl. 4.22k daje transfer reaktansu između krajeva sistema za vreme isključenja jedne faze X_{12_i} :

$$X_{12_i} = X'_{GT} + X_{i_f} + X_v = 150 + 168,1 + 126 = 444,1 \Omega.$$

Konačno se nalazi dinamička karakteristika za vreme isključenja jedne faze čija je forma:

$$P_i = \frac{E'U_\infty}{X_{12_i}} \sin \delta = \frac{247,17 \cdot 243,65}{444,1} \sin \delta = P_{max_i} \sin \delta = 135,61 \sin \delta.$$

Jednačina obrtnih masa agregata:

$$\ddot{\delta}(t) = \frac{\omega_s}{T_i S_n} (P_m - P(\delta(t))),$$

kojom se opisuju elektromehanički prelazni procesi, prikazuje se u formi modela sistema u prostoru stanja:

$$\dot{\delta}(t) = \omega_s (\omega(t) - 1);$$

$$\dot{\omega}(t) = \frac{1}{T_i S_n} (P_m - P(\delta(t))),$$

gde su promenljive stanja ugao rotora $\delta(t)$ i relativna ugaona brzina rotora $\omega(t)$ u odnosu na sinhronu brzinu ω_s .

Vremenska zavisnost ugla, odnosno ugaone brzine agregata dobija se numeričkim rešavanjem ovog sistema diferencijalnih jednačina, uz uvažavanje da se u svakom od razmatranih perioda odata snaga agregata modeluje odgovarajućom dinamičkom karakteristikom.

Usvajanjem da je u početnom ravnotežnom stanju ugaona brzina sistema bila jednaka sinhronoj, a ugao jednak $\delta_0 = 33,364^\circ$ i rešavanjem sistema diferencijalnih jednačina:

$$\dot{\delta}(t) = 314 (\omega(t) - 1);$$

$$\dot{\omega}(t) = \frac{1}{5 \cdot 2 \cdot 80} (120 - 131,95 \sin \delta),$$

gde je dinamička karakteristika zamenjena karakteristikom za vreme kvara P_k , do trenutka isključenja faze kvara $t_i = 0,15$ s, proračunava se ugao δ_i . Rezultati numeričke integracije Runge-Kutta metodom četvrtog reda, sa korakom integracije 0,01 s, dati su u tab. 4.22a.

Tab. 4.22a Rezultati numeričke integracije do trenutka isključenja faze u kvaru t_i

t [s]	ω [rad/s]	δ [°]
0,00	314,16	33,36
0,01	314,35	33,42
0,02	314,53	33,58
0,03	314,71	33,84
0,04	314,90	34,21
0,05	315,07	34,69
0,06	315,25	35,26
0,07	315,42	35,93
0,08	315,58	36,70
0,09	315,74	37,56
0,10	315,89	38,51
0,11	316,08	39,58
0,12	316,18	40,66
0,13	316,30	41,86
0,14	316,43	43,12
0,15	316,54	44,45

Vremenu isključenja $t_i = 0,15$ s odgovara nađeni ugao $\delta_i = 44,45^\circ$, posle čega se prelazi na dinamičku karakteristiku sa isključenom fazom u kvaru.

Sada je moguće po metodi jednakih površina izračunati kritični ugao ponovnog uključenja faze prolaznog kvara $\delta_{pu_{kr}}$.

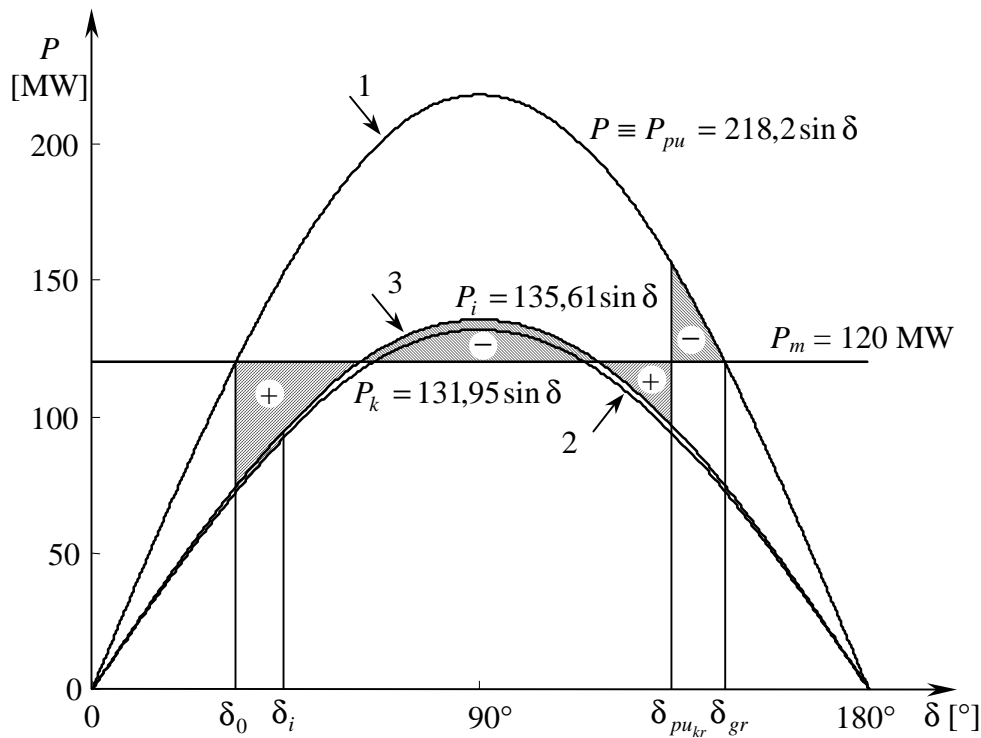
Analitički se dalje može naći $\cos \delta_{pu_{kr}}$ u obliku obrasca, tj. tačno, ako, kao u zadatku sve sinusoide prolaze kroz koordinatni početak.

Ako su površine + i maksimalno moguća – jednake, onda se ima i jednakost pravougaonika osnove $(\delta_{gr} - \delta_0)$ i visine P_m sa površinom ispod odgovarajućih sinusoida:

$$P_m (\delta_{gr} - \delta_0) = \int_{\delta_0}^{\delta_i} P_{\max_k} \sin \delta d\delta + \int_{\delta_i}^{\delta_{pu_{kr}}} P_{\max_i} \sin \delta d\delta + \int_{\delta_{pu_{kr}}}^{\delta_{gr}} P_{\max} \sin \delta d\delta,$$

ili ako se amplitude snaga zamene proizvodom $E'U_\infty$ podeljenim odgovarajućom međusobnom reaktansom, a slično i $P_m = P_{\max} \sin \delta_0$, dobiće se ugao $\delta_{pu_{kr}}$ iz jednakosti:

$$\frac{E'U_\infty}{X_{12}} \sin \delta_0 (\delta_{gr} - \delta_0) = \frac{E'U_\infty}{X_{12_k}} \int_{\delta_0}^{\delta_i} P_{\max_k} \sin \delta d\delta + \frac{E'U_\infty}{X_{12_i}} \int_{\delta_i}^{\delta_{pu_{kr}}} P_{\max_i} \sin \delta d\delta + \frac{E'U_\infty}{X_{12}} \int_{\delta_{pu_{kr}}}^{\delta_{gr}} P_{\max} \sin \delta d\delta,$$



Sl. 4.22I Krive njihanja sistema sa sl. 4.22a: 1-pre kvara; 2-za vreme kvara; 3-posle isključenja faze u kvaru

koja posle deljenja sa $E'U_\infty$ i množenja sa X_{12} i integracije postaje:

$$\sin \delta_0 (\delta_{gr} - \delta_0) = \frac{X_{12}}{X_{12k}} (\cos \delta_0 - \cos \delta_i) + \frac{X_{12}}{X_{12i}} (\cos \delta_i - \cos \delta_{pukr}) + \frac{X_{12}}{X_{12}} (\cos \delta_{pukr} - \cos \delta_{gr}).$$

Rešenje gornje jednačine po $\cos \delta_{pukr}$ je:

$$\cos \delta_{pukr} = \frac{\sin \delta_0 (\delta_{gr} - \delta_0) - r_k (\cos \delta_0 - \cos \delta_i) - r_i \cos \delta_i + \cos \delta_{gr}}{1 - r_i},$$

gde je

$$r_k = \frac{X_{12}}{X_{12k}} \quad \text{i} \quad r_i = \frac{X_{12}}{X_{12i}}.$$

Posle izračunavanja ugla

$$\delta_{gr} = 180^\circ - \delta_0 = 180^\circ - 33,364^\circ = 146,636^\circ$$

i parametara:

$$r_k = \frac{X_{12}}{X_{12_k}} = \frac{276}{456,4} = 0,6047;$$

$$r_i = \frac{X_{12}}{X_{12_i}} = \frac{276}{444,1} = 0,6215,$$

dobija se da je:

$$\begin{aligned} \cos \delta_{pu_{kr}} &= \frac{(146,636^\circ - 33,364^\circ) \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \sin 33,364^\circ - 0,6047 \cdot (\cos 33,364^\circ - \cos 44,45^\circ)}{1 - 0,6215} - \\ &\quad - \frac{0,6216 \cdot \cos 44,45^\circ + \cos 146,636^\circ}{1 - 0,6215} = -0,7005, \end{aligned}$$

odakle je:

$$\delta_{pu_{kr}} = 134,464^\circ.$$

Numeričkom integracijom može se sada izračunati i kritično vreme uključenja faze u kvaru, koje odgovara ovom uglu, sa sl. 4.22l. Odgovarajući sistem diferencijalnih jednačina za period isključene jedne faze, sa zamenjenom dinamičkom karakteristikom

$$P_i = 135,61 \sin \delta$$

je:

$$\dot{\delta}(t) = 314(\omega(t) - 1);$$

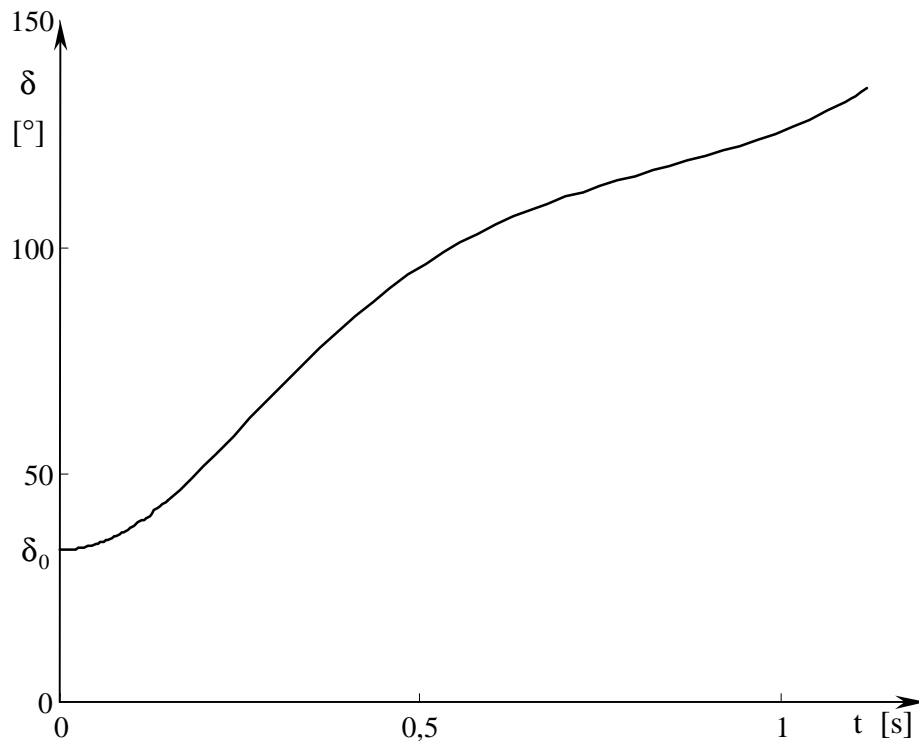
$$\dot{\omega}(t) = \frac{1}{5 \cdot 2 \cdot 80} (120 - 135,61 \sin \delta),$$

Početne vrednosti promenljivih stanja su krajnje vrednosti ovih promenljivih iz prethodnog perioda, odnosno:

$$\delta(0,15) = 44,45^\circ;$$

$$\omega(0,15) = 1,0076 \text{ r.j.}$$

Rezultati numeričke integracije do dostizanja vrednosti kritičnog ugla ponovnog uključenja $\delta_{pu_{kr}} = 134,464^\circ$, pri čemu su do vremena 1,1 s prikazane vrednosti sa korakom 0,05 s, dati su u tab. 4.22b.



Sl. 4.22m Promena električnog ugla δ sa vremenom posle poremećaja u sistemu iz zadatka 4.22

Tab. 4.22b Rezultati numeričke integracije od trenutka isključenja faze u kvaru t_i do trenutka dostizanja vrednosti kritičnog ugla ponovnog uključanja $\delta_{pu_{kr}}$

t [s]	ω [rad/s]	δ [°]
0,15	316,53	44,45
0,20	316,91	51,86
0,25	317,07	60,03
0,30	317,03	68,35
0,35	316,85	76,34
0,40	316,58	83,67
0,45	316,28	90,19
0,50	315,98	95,83
0,55	315,70	100,64
0,60	315,46	104,71
0,65	315,26	108,14
0,70	315,11	111,08
0,75	315,01	113,64
0,80	314,95	115,97
0,85	314,93	118,19
0,90	314,96	120,43
0,95	315,05	122,85
1,00	315,21	125,61
1,05	315,44	128,93
1,10	315,79	133,07
1,11	315,87	134,02
1,12	315,96	135,03

Izračunatom kritičnom uglu ponovnog uključanja isključene faze (prolaznog jednopolnog kratkog spoja $\delta_{pukr} = 134,464^\circ$ odgovara vreme računato od nastanka kvara od 1,115 sekundi. Otuda je maksimalno (kritično) vreme beznaponske pauze, tj. vreme od isključenja do ponovnog uključanja odgovarajuće faze, sa gledišta tranzijentne stabilnosti:

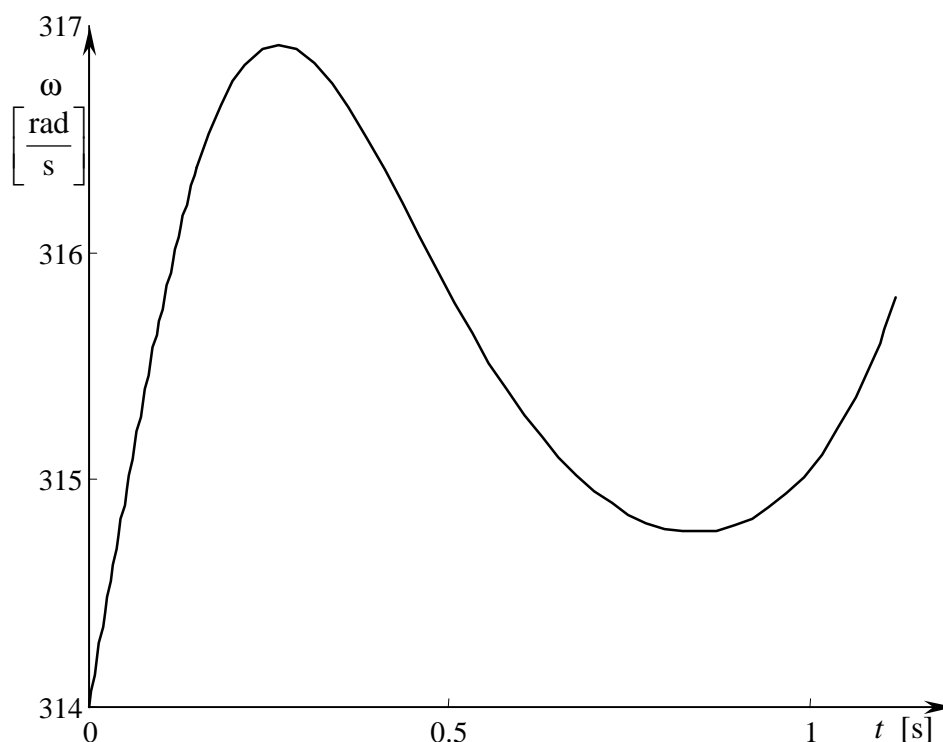
$$t_{pauze} = 1,115 - 0,15 = 0,965 \text{ s} \approx 1 \text{ s}.$$

Minimalno vreme beznaponske pauze određuje se vremenom potrebnim za dejonizaciju vazduha na mestu jednopolnog kratkog spoja, što je preduslov uspešnog ponovnog uključanja za slučaj prolaznog kvara (inače je moguće da normalni napon ponovo upali luk, ako vazduh nije dovoljno dejonizovan). Za najviše napone, pa i za napon 220 kV, to minimalno vreme iznosi oko 0,3 do 0,4 s. Prema tome može se odabrati vreme pauze negde između 0,4 i 1 s, koje zadovoljava oba uslova: i minimalno vreme sa gledišta potrebne dejonizacije i maksimalno sa gledišta tranzijentne stabilnosti.

Ugaona brzina odnosno klizanje rotora generatora rastu u toku odabranog vremenskog intervala, sve dok je snaga akceleracije pozitivna, tj. u konkretnom slučaju zaključno sa trenutkom $t = 0,25$ s, kada se postiže i najveće klizanje (kod generatora pozitivno za nadsinhronu brzinu):

$$s \approx \omega - 1 = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s} = \frac{317,07 - 314}{314} = 0,00927,$$

odnosno 0,927 %, tj. ispod 1 %, što opravdava učinjenu aproksimaciju $\omega \approx \omega_s$ kod izvođenja diferencijalne jednačine kretanja rotora. Zapaziti pozitivne priraštaje uglova i kod negativne akceleracije, koji se smanjuju (rotor usporava kod $\omega > \omega_s$).



Sl. 4.22n Promena ugaone brzine agregata posle poremećaja u sistemu iz zadatka 4.22

Na sl. 4.22n nacrtana je zavisnost ugaone brzine ω u funkciji vremena sve do trenutka koji odgovara kritičnom vremenu ponovnog uključenja. Zapaža se izvesno usporavanje brzine u vremenskom intervalu koji odgovara površini – na sl. 4.22n, a zatim sve do kritičnog vremena ponovo brži rast usled + površina akceleracije. Dalji tok bi značio kasnije usporavanje, jer sledi negativna površina sve do izvesne granične vrednosti, s obzirom da se radi o granici stabilnosti.



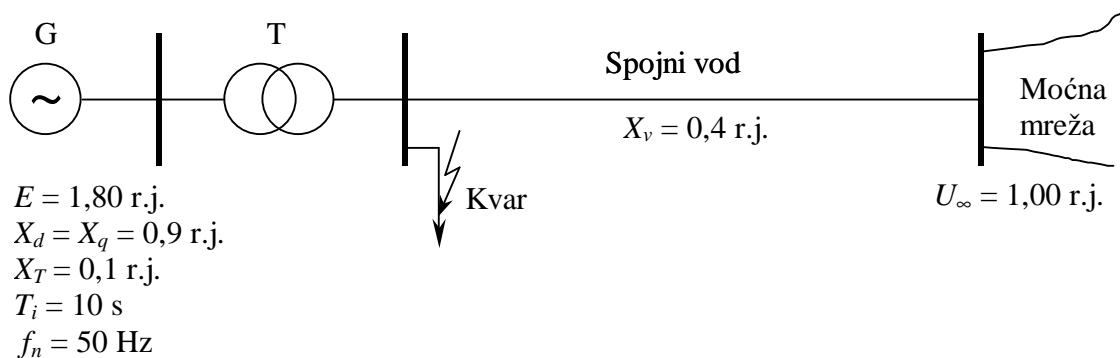
Zadatak 4.23

Turbogenerator je vezan na moćnu mrežu, posredstvom blok-generatorskog transformatora rasipne reaktanse $X_T = 0,1$ r.j. i prenosnog voda reaktanse $X_v = 0,4$ r.j. Napon jake mreže je $U_\infty = 1,00$ r.j., elektromotorna sila turbogeneratora pri stalnoj pobudi $E = 1,80$ r.j., sinhrona reaktansa $X_d = X_q = 0,90$ r.j., učestanost sistema 50 Hz, a vremenska konstanta inercije $T_i = 10$ s, kako je to prikazano na jednopolnoj šemi na sl. 4.23a.

a) Naći učestanost oscilacija ugla snage δ , pri malom impulsnom poremećaju, ako se zanemari prigušenje u sistemu, pri vrednostima odate snage generatora $P_0 = 0,05; 0,5$ i $1,2$ r.j.

b) Naći kritično vreme isključenja krofaznog kratkog spoja na neopterećenom odvodu, neposredno iza sabirnica VN transformatora T, pri $P_0 = 0,5$ r.j.

c) Ako je vreme isključenja kvara $t_i = 0,9 t_{kr}$, naći maksimalni ugao njihanja generatora δ_{max} i rezervu stabilnosti koja se tada ima u odnosu na slučaj b.



Sl. 4.23a Jednopolna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 4.16

Rešenje:

a) Izraz za krivu njihanja je:

$$P = \frac{EU_\infty}{X} \sin \delta ,$$

koji za $E = 1,80$ r.j.; $U_\infty = 1,00$ r.j. i $X = X_d + X_T + X_v = 1,40$ r.j. postaje:

$$P = \frac{1,80 \cdot 1,00}{1,40} \sin \delta = 1,286 \sin \delta \text{ [r.j.] .}$$

Izraz za koeficijent sinhronizacione snage je:

$$P_s = \frac{dP}{d\delta} = 1,286 \cos \delta \text{ [r.j./rad] .}$$

Učestanost oscilacija ugla snage nalazi se preko formule:

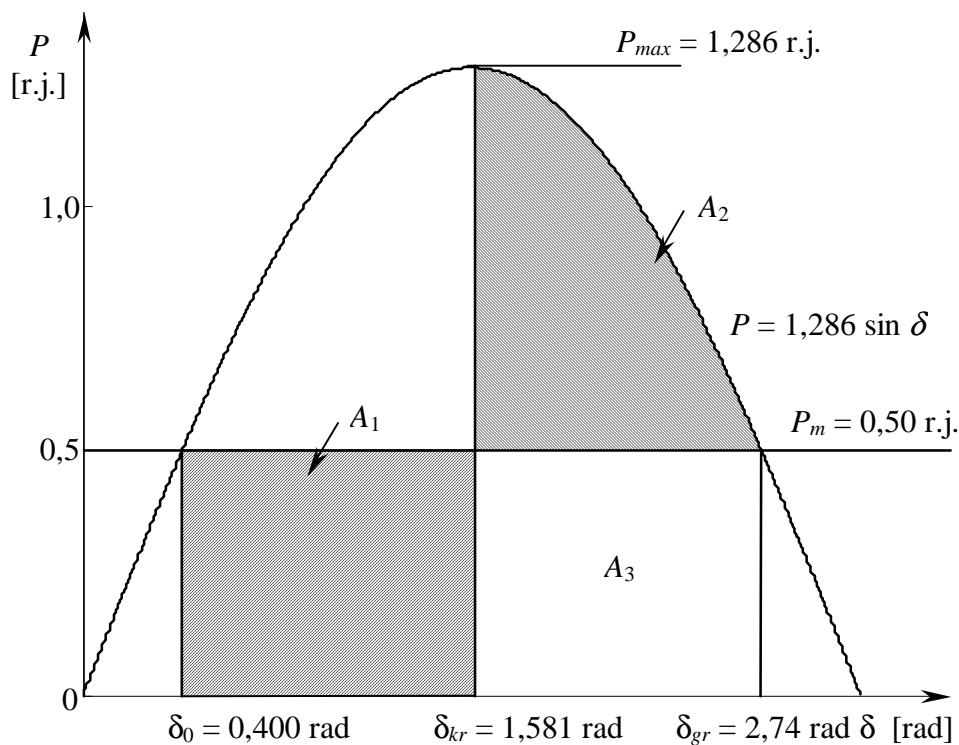
$$\omega_{osc} = \left(\frac{P_s 2\pi f_0}{T_i} \right)^{1/2} \text{ [rad/s]} .$$

Rezultati proračuna koeficijenta sinhronizacione snage i učestanosti oscilacija za tri zadate vrednosti početne snage dati su u tab. 4.23a.

Tab. 4.23a Proračun učestanosti oscilacija ugla snage δ iz zadatka 4.23a

P_0	δ_0		P_s	ω_{osc}	$f_{osc} = \omega_{osc}/2\pi$
[r.j.]	[°]	[rad]	[r.j./rad]	[rad/s]	[Hz]
0,05	2,23	0,040	1,285	6,35	1,01
0,50	22,89	0,400	1,184	6,10	0,97
2,00	68,96	1,204	0,462	3,81	0,61

b) Kriva njihanja sistema $P(\delta)$ i ilustracija metoda jednakih površina za proračun kritičnog vremena isključenja kvara, za $P_m = P_0 = 0,5 \text{ r.j.}$, prikazana je na sl. 4.23b.



Sl. 4.23b Kriva njihanja sistema i ilustracija primene metode jednakih površina pri proračunu kritičnog vremena isključenja kvara

Iz uslova jednakosti površina:

$$A_1 = A_2 ,$$

odnosno

$$A_1 + A_3 = A_2 + A_3 ,$$

sledi:

$$0,5 \cdot (\pi - 2\delta_0) = \int_{\delta_{kr}}^{\delta_{gr}=\pi-\delta_0=2,74 \text{ rad}} (1,286 \sin \delta) d\delta ,$$

odakle se dobija jednačina po $\cos \delta_{kr}$:

$$1,1708 = 1,286(\cos \delta_{kr} + 0,9213) ,$$

čije je rešenje:

$$\cos \delta_{kr} = -0,9213 + 0,9104 = -0,0109 ,$$

što znači da je kritični ugao isključenja kvara:

$$\delta_{kr} = 90,624^\circ = 1,582 \text{ rad} .$$

Kritično vreme isključenja kvara je onda:

$$t_{kr} = \left[\frac{T_i (\delta_{kr} - \delta_0)}{P_0 \pi f_0} \right]^{1/2} = \left[\frac{10 \cdot (1,582 - 0,400)}{0,5 \pi \cdot 50} \right]^{1/2} = 0,388 \text{ s} .$$

c) Ako je $t_i = 0,9 t_{kr} = 0,349 \text{ s}$, ugao isključenja kvara je:

$$\delta_i = \frac{\pi f_0 P_0}{T_i} t_i^2 + \delta_0 = \frac{\pi \cdot 50 \cdot 0,5}{2 \cdot 5} 0,349^2 + 0,400 = 1,357 \text{ rad} = 77,75^\circ .$$

Onda je površina A_1 sa slike 4.23b, kada se t_{kr} zameni sa t_i :

$$A_1 = P_0 (\delta_i - \delta_0) = 0,5 \cdot (1,357 - 0,400) = 0,479 \text{ r.j.} ,$$

a izraz za jednakost površina A_1 i A_2 (kada se ugao $\delta_{gr} = \pi - \delta_0$ zameni sa δ_{max}), daje:

$$\begin{aligned} A_2 = 0,479 &= \int_{\delta_i}^{\delta_{max}} (1,286 \sin \delta - 0,5) d\delta = 1,286(\cos \delta_i - \cos \delta_{max}) - 0,5(\delta_{max} - \delta_i) = \\ &= 1,286(0,2112 - \cos \delta_{max}) - 0,5(\delta_{max} - 1,357) , \end{aligned}$$

odakle se dobija jednačina:

$$1,286 \cos \delta_{max} + 0,5 \delta_{max} = 0,4711 .$$

Rešenje gornje nelinearne transcendentne jednačine je:

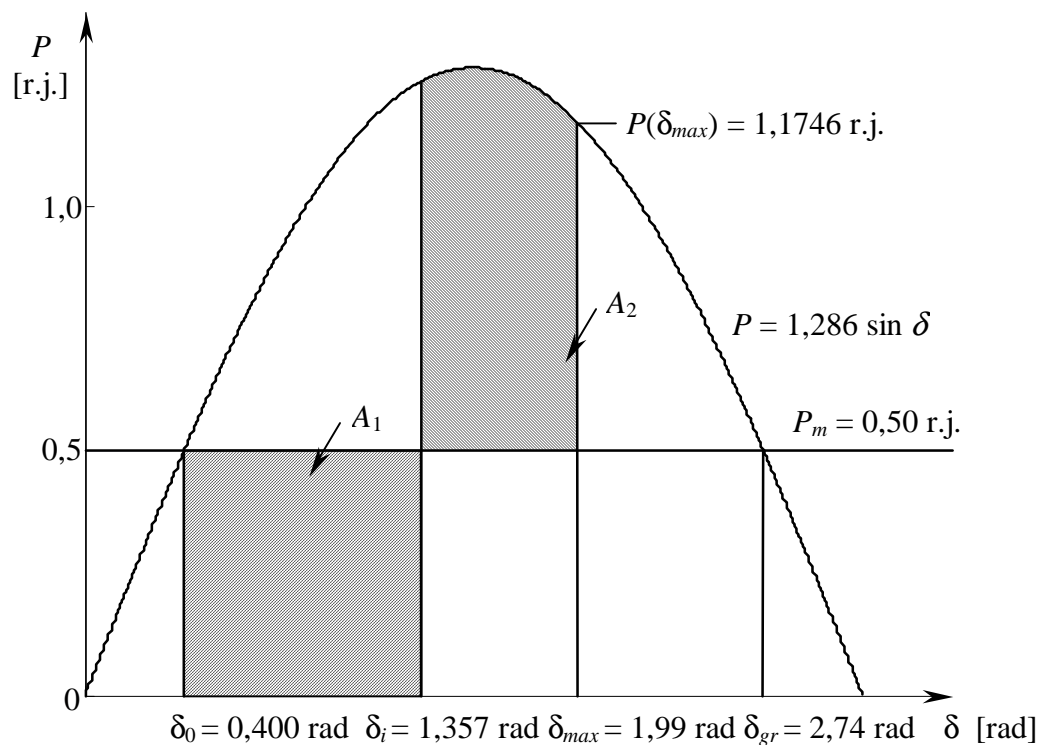
$$\delta_{max} \approx 1,99 \text{ rad} = 114^\circ .$$

Rezerva stabilnosti (RS) za slučaj kada se kvar isključuje posle trajanja od $t_i = 0,9 t_{kr} = 0,349$ s, u odnosu na slučaj $t_i = t_{kr} = 0,388$ s je:

$$RS = \frac{P_{(t_i=0,9t_{kr})} - P_{(t_i=t_{kr})}}{P_{(t_i=t_{kr})}} = \frac{1,286 \sin \delta_{max} - 0,5}{0,5} = \frac{1,286 \sin 114^\circ - 0,5}{0,5} = 1,3493 ,$$

odnosno 34,93%.

Ilustracija proračuna δ_{max} i RS , pri $t_i = 0,9 t_{kr}$ data je na sl. 4.23c.



Sl. 4.23c Ilustracija proračuna maksimalnog ugla njihanja i rezerve stabilnosti sistema iz zadatka 4.23c



Zadatak 4.24

Za uprošćeni elektroenergetski sistem EPS-a, čiji su podaci dati u zadacima 2.15 i 3.30, izvršiti procenu dinamičke stabilnosti (stabilnosti pri malim poremećajima), usvajajući za početni radni režim onaj koji je obrađivan u zadatku 2.15. Procenu stabilnosti izvršiti usvajajući da su sve mašine u sistemu neregulisane (sa konstantnom mehaničkom snagom agregata i konstantnim naponom pobude), i da je elektromotorna sila E' iza tranzijentne reaktanse kod svih generatora konstantna. Pri tome zanemariti prigušenja generatora D . Podaci za zamensku šemu generatora sa konstantnom elektromotornom silom dati su u zadatku 3.30. Vremenske konstante T_i ekvivalentnih agregata ovog pojednostavljenog sistema sa šest ekvivalentnih agregata, proračunate na bazi nominalnih prividnih snaga elektrana date su na osnovu stvarnih podataka za generatore EPS-a u tab. 4.24a.

Tab. 4.24a Podaci za vremenske konstante inercije agregata iz zadatka 4.24

Broj čvora	Naziv čvora	T_i [MWS/MVA]
1	Obrenovac 400	4,15
5	Đerdap	6,7
6	Kostolac	3,72
15	Obrenovac 220	8,4
17	Bajina Bašta	8,2
21	Kosovo	6,6

Ispitati dinamičku stabilnost ovog sistema i u slučaju da je sistem oslabljen ispadom dalekovoda između čvorova 5 i 6 sistema.

Rešenje:

Kompletan model za procenu dinamičke stabilnosti višemašinskog sistema sastoji se iz skupa diferencijalnih jednačina tipa:

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_i(t) &= \omega_s (\omega_i(t) - 1); & i = 1, 2, \dots, N_G; \\ \dot{\omega}_i(t) &= \frac{1}{T_i} (P_m - P_i(\delta_i(t))); & i = 1, 2, \dots, N_G,\end{aligned}$$

pridruženih svakom agregatu u sistemu, gde je ω_s sinhrona ugaona brzina, $\omega_i(t)$ relativna ugaona brzina u odnosu na sinhronu brzinu a $\delta_i(t)$ ugao fazora elektromotorne sile E_i' iza tranzijentne reaktanse, kao i sistema algebarskih jednačina tipa jednakosti, koje predstavljaju jednačine tokova snaga, odnosno model mreže:

$$\begin{aligned}P_i &= G_{ii} U_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N+N_G} U_i U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)]; & i = 1, 2, \dots, N+N_G; \\ Q_i &= -B_{ii} U_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N+N_G} U_i U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)]; & i = 1, 2, \dots, N+N_G,\end{aligned}$$

gde su G_{ij} i B_{ij} konduktanse, odnosno susceptanse elemenata kompleksne matrice admitansi nezavisnih čvorova sistema $\underline{Y}_{\check{C}V}$ date u zadatku 2.15, proširene sa N_G "unutrašnjih" generatorskih

čvorova koji odgovaraju elektromotornim silama \underline{E}_i' . Modelovanje potrošača konstantnim impedansama, kao i premeštanje injeckiranja generatora u "unutrašnje" generatorske čvorove, dozvoljava da se sprovede Kronova redukcija, odnosno eliminacija svih pasivnih čvorova (tj. čvorova sa nulnim injeckiranjem), tako da u modelu mreže figurišu samo unutrašnji generatorski čvorovi, što je prikazano relacijama:

$$P_i = G_{Gii} E_i'^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_G} E_i' E_j' [G_{Gij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{Gij} \sin(\delta_i - \delta_j)]; \quad i = 1, 2, \dots, N_G;$$

$$Q_i = -B_{Gii} E_i'^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_G} E_i' E_j' [G_{Gij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{Gij} \cos(\delta_i - \delta_j)]; \quad i = 1, 2, \dots, N_G,$$

gde su G_{Gij} i B_{Gij} elementi konduktansi i susceptansi kompleksne matrice \underline{Y}_G , u poziciji 'ij', pri čemu je:

$$\underline{Y}_G = \underline{Y}_{GG} - \underline{Y}_{GP} \underline{Y}_{PP}^{-1} \underline{Y}_{PG}.$$

Matrice \underline{Y}_{GG} , \underline{Y}_{PP} , \underline{Y}_{GP} i \underline{Y}_{PG} su submatrice kompleksne matrice \underline{Y}_{CV} sistema, koje odgovaraju unutrašnjim generatorskim čvorovima 'G' i negeneratorskim čvorovima 'P'.

Ovakav model mreže ne dozvoljava detaljna razmatranja pojava vezanih za kvarove u mreži ili promenu njene konfiguracije, ali predstavlja osnov za analizu dinamičke stabilnosti jer se zamenom izraza za P_i u odgovarajuću diferencijalnu jednačinu dobija sistem običnih diferencijalnih jednačina tipa:

$$\dot{\delta}_i(t) = \omega_s (\omega_i(t) - 1); \quad i = 1, 2, \dots, N_G;$$

$$\dot{\omega}_i(t) = \frac{1}{T_i} \left(P_m - G_{Gii} E_i'^2 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_G} E_i' E_j' [G_{Gij} \cos(\delta_i(t) - \delta_j(t)) + B_{Gij} \sin(\delta_i(t) - \delta_j(t))] \right);$$

$$i = 1, 2, \dots, N_G,$$

koji se linearizacijom u okolini date ravnoteže radne tačke prevodi u sistem običnih nelinearnih diferencijalnih jednačina oblika:

$$\Delta \dot{\delta}_i(t) = \omega_s \Delta \omega_i(t); \quad i = 1, 2, \dots, N_G;$$

$$\Delta \dot{\omega}_i(t) = \frac{1}{T_i} \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_G} E_i' E_j' [G_{Gij} \sin(\delta_{i0} - \delta_{j0}) - B_{Gij} \cos(\delta_{i0} - \delta_{j0})] (\Delta \delta_i(t) - \Delta \delta_j(t)) \right);$$

$$i = 1, 2, \dots, N_G,$$

sa konstantnim koeficijentima definisanim početnim radnim stanjem, čija se analiza stabilnosti svodi na analizu linearizovanog sistema tipa

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x,$$

odnosno analizu svojstva matrice stanja sistema A , gde vektor x predstavlja vektor stanja, dimenzije $2N_G$, čije su komponente uglovi δ_i i ugaone brzine ω_i .

Na osnovu rešenja zadatog radnog režima, odnosno proračuna tokova snaga iz zadatka 2.15, uz usvojene vrednosti nominalnih snaga agregata priključenih u sistemu i odgovarajućih reaktansi generatora u tranzijentnom režimu po d osi x'_d i blok-generatorskih transformatora x_{BT} datih u zadatku 3.30, a ovde ponovljenih u tab. 4.24b.

Tab. 4.24b Reaktanse generatora i blok-transformatora sistema iz zadatka 4.24

Redni broj	Naziv čvora	S_n [MVA]	x'_d [r.j.]	x_{BT} [r.j.]
1	Obrenovac 400	1461	0,015	0,009
2	Đerdap	760	0,050	0,0154
3	Kostolac	527	0,042	0,023
4	Obrenovac 220	732	0,030	0,018
5	Bajina Bašta	1308	0,020	0,010
6	Kosovo	509	0,065	0,023

Takođe su proračunate i elektromotorne sile iza tranzijentne reaktanse svakog od šest ekvivalentnih generatora, prikazane u tab. 4.24c.

Tab. 4.24c Rezultati proračuna EMS generatora iz zadatka 4.24

Redni broj	Naziv čvora	E'_i [r.j.]	δ_{i0} [rad]
1	Obrenovac 400	1,1540	0,2474
2	Đerdap	1,2379	0,4123
3	Kostolac	1,0949	0,2069
4	Obrenovac 220	1,1033	0,2116
5	Bajina Bašta	1,0568	0,4127
6	Kosovo	1,1275	0,2926

Matrice G_G i B_G sistema ovde imaju elemente, koji su izraženi u relativnim jedinicama za $S_B = 100$ MVA i $U_B = 400$ kV:

$$G_G = \begin{bmatrix} 3,6167 & 0,9503 & 1,1798 & 1,8924 & 1,7027 & 0,7936 \\ 0,9503 & 0,7245 & 0,4534 & 0,4778 & 0,5273 & 0,4601 \\ 1,1798 & 0,4534 & 0,6479 & 0,6145 & 0,5992 & 0,3122 \\ 1,8924 & 0,4778 & 0,6145 & 1,2753 & 0,9853 & 0,3681 \\ 1,7027 & 0,5273 & 0,5992 & 0,9853 & 3,2978 & 0,5384 \\ 0,7936 & 0,4601 & 0,3122 & 0,3681 & 0,5384 & 1,0599 \end{bmatrix};$$

$$B_G = \begin{bmatrix} -24,7952 & 2,9417 & 3,9840 & 5,5781 & 4,6901 & 1,6318 \\ 2,9417 & -10,2612 & 1,9591 & 1,1342 & 1,2760 & 1,1607 \\ 3,9840 & 1,9591 & -11,9328 & 1,5922 & 1,5250 & 0,6367 \\ 5,5781 & 1,1342 & 1,5922 & -15,8179 & 3,3371 & 0,6305 \\ 4,6901 & 1,2760 & 1,5250 & 3,3371 & -16,4428 & 1,1733 \\ 1,6318 & 1,1607 & 0,6367 & 0,6305 & 1,1733 & -7,440 \end{bmatrix}.$$

Vremenske konstante inercije agregata date u postavci zadatka, preračunate na baznu snagu $S_B = 100$ MVA, date su u tab. 4.24d.

Tab. 4.24d Preračunate vrednosti konstanti T_i iz tab. 4.24a, na $S_B = 100$ MVA

Redni broj	Naziv čvora	T_i [MVs/MVA]
1	Obrenovac 400	60,6
5	Đerdap	50,92
6	Kostolac	19,6
15	Obrenovac 220	61,5
17	Bajina Bašta	107,26
21	Kosovo	33,6

Zamenom datih vrednosti u sistem linearizovanih diferencijalnih jednačina $\Delta\dot{x} = A\Delta x$, uz usvajanje da je sistem u početnom stanju bio u sinhronizmu ($\omega_{i0} = 0$), dobija se matrica stanja sistema dvanaestog reda:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -0,404 & 0 & 0,072 & 0 & 0,082 & 0 & 0,116 & 0 & 0,099 & 0 & 0,036 \\ 314,16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,077 & 0 & -0,216 & 0 & 0,049 & 0 & 0,027 & 0 & 0,033 & 0 & 0,030 \\ 0 & 0 & 314,16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,260 & 0 & 0,139 & 0 & -0,634 & 0 & 0,098 & 0 & 0,095 & 0 & 0,041 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 314,16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,117 & 0 & 0,027 & 0 & 0,031 & 0 & -0,254 & 0 & 0,066 & 0 & 0,013 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 314,16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,049 & 0 & 0,016 & 0 & 0,015 & 0 & 0,033 & 0 & -0,125 & 0 & 0,012 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 314,16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,062 & 0 & 0,050 & 0 & 0,022 & 0 & 0,022 & 0 & 0,043 & 0 & -0,200 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 314,16 & 0 \end{bmatrix}$$

Sopstvene vrednosti ove matrice, koja modeluje sistem pri zanemarenim prigušenjima su:

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} &= 0; \\ \lambda_{3,4} &= \pm j14,9206; \\ \lambda_{5,6} &= \pm j11,9604; \\ \lambda_{7,8} &= \pm j7,4064; \\ \lambda_{9,10} &= \pm j9,1127; \\ \lambda_{11,12} &= \pm j8,5079. \end{aligned}$$

Jedan par ovih vrednosti je jednak nuli, dok su ostali parovi sopstvenih vrednosti na imaginarnoj osi. Par koji je jednak nuli se javlja zbog linearne zavisnosti promenljivih, tj. u svim izrazima se uglovi javljaju kao razlika, te se može tražiti relativna vrednost u odnosu na jedan ugao koji se proizvoljno može usvojiti kao referentni (obično je to ugao prvog generatora). Uslovljenost da se svi koreni javljaju u paru ima za posledicu da su dve sopstvene vrednosti matrice stanja jednake nuli. Ostale sopstvene vrednosti, koje se nalaze na imaginarnoj osi, odnosno na samoj granici stabilnosti pokazuju da je ovaj sistem, uz uvažavanje sigurnog postojanja prigušenja,

stabilan. Frekvencije elektromehaničkih modova se kreću između 1,2 i 2,37 Hz što je i karakteristično za generatorske modove elektromehaničkih oscilacija.

Slučaj kada je pri istoj početnoj raspodeli snaga aktivnog generisanja u sistemu, sistem oslabljen ispadom voda između čvorova 5 i 6 (400 kV vod između HE Đerdap i TE Kostolac) ima sledeće sopstvene vrednosti sistema:

$$\lambda_{1,2} = 0;$$

$$\lambda_{3,4} = \pm j15,0976;$$

$$\lambda_{5,6} = \pm j11,5638;$$

$$\lambda_{7,8} = \pm j6,3953;$$

$$\lambda_{9,10} = \pm j8,3262;$$

$$\lambda_{11,12} = \pm j8,5038.$$

Pokazuje se da je sistem i u ovom slučaju dinamički stabilan i da se opseg kritičnih frekvencija menja ka nižim vrednostima (1,02 Hz), koje se približavaju vrednostima kritičnim za oscilacije između pojedinih grupa agregata (grupe se formiraju delimičnim razdvajanjem sistema usled znatno oslabljenih veza među generatorima).



Zadatak 4.25

Za sistem iz zadatka 4.24 ispitati tranzijentu stabilnost generatora u sistemu ako se desio trofazni kratki spoj na vodu 5-6 kod sabirnica 5, i to za sledeća dva slučaja:

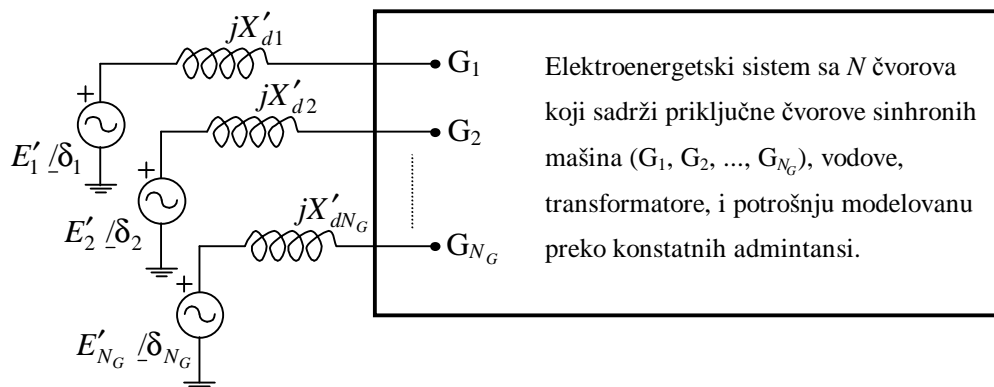
- Ako je vreme isključenja voda u kvaru 0,15 s.
- Ako je vreme isključenja voda u kvaru 0,2 s.

Za oba slučaja usvojiti da je vreme beznaponske pauze, pre ponovnog uključenja voda u kvaru 0,2 s.

Rešenje:

Pre rešavanja samog zadatka biće predstavljen metod koji je odabran za rešavanje ovog problema tranzijentne stabilnosti.

Na sl. 4.25a je predstavljen jedan uopšteni elektroenergetski sistem sa N čvorova i N_G sinhronih mašina. Svaka sinhrona mašina predstavljena je svojom unutrašnjom elektromotornom silom E'_i i reaktansom za tranzijentni period X'_d .



Sl. 4.25a Uopšteni prikaz elektroenergetskog sistema sa N čvorova i N_G sinhronih mašina

Sinhronne mašine su povezane na sistem preko čvorova označenih sa G_1 , G_2 i G_{N_G} . Potrošnje u pojedinim čvorovima modelovane su preko modela konstantnih impedansi. Imajući sve ovo u vidu može se napisati sledeća jednačina:

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{12}^T & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{0} \\ \underline{I} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gde je:

$$\underline{U} = [\underline{U}_1 \quad \underline{U}_2 \quad \dots \quad \underline{U}_N]^T, \text{ vektor napona čvorova,} \quad (2)$$

$$\underline{E} = [\underline{E}'_1 \quad \underline{E}'_2 \quad \dots \quad \underline{E}'_{N_G}]^T, \text{ vektor unutrašnjih elektromotornih sila generatora,} \quad (3)$$

$$\underline{I} = [\underline{I}_1 \quad \underline{I}_2 \quad \dots \quad \underline{I}_{N_G}]^T, \text{ vektor struja generatora,} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{12}^T & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix}, (N+N_G) \times (N+N_G) \text{ kompleksna matrica admitansi nezavisnih čvorova.} \quad (5)$$

Matrica admitansi u jednačini 5 je podeljena na submatrice u skladu sa brojem čvorova u mreži (N) i brojem generatora u sistemu (N_G), tako da su dimenzije pojedinih njenih submatrica sledeće:

- \underline{Y}_{11} je dimenzija $N \times N$;
- \underline{Y}_{12} je dimenzija $N \times N_G$;
- \underline{Y}_{22} je dimenzija $N_G \times N_G$.

Matrica \underline{Y}_{11} je slična matrici admitansi koja se koristi u proračunim tokova snaga, s tom razlikom što su u nju uključene admitanse kojima je modelovana potrošnja kao i recipročne vrednosti impedansi generatora. Prema tome, ako npr. u čvoru n imamo potrošnju onda se admitansa kojom se modeluje potrošnja dodaje dijagonalnom elementu \underline{Y}_{11nn} . Takođe, $(1/jX'_{dn})$ se dodaje dijagonalnom elementu $\underline{Y}_{11G_nG_n}$.

Matrica \underline{Y}_{22} je dijagonalna matrica recipročnih vrednosti tranzijentnih impedansi generatora, odnosno:

$$\underline{Y}_{22} = \begin{bmatrix} \frac{1}{jX'_{d1}} & & & 0 \\ & \frac{1}{jX'_{d2}} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{1}{jX'_{dN_G}} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Matrica \underline{Y}_{12} , odnosno element u poziciji ' km ' dobija se prema jednačini:

$$\underline{Y}_{12km} = \begin{cases} \frac{-1}{jX'_{dn}} & \text{ako je } k = G_n \text{ i } m = n \\ 0 & \text{u protivnom} \end{cases}. \quad (7)$$

Kada se jednačina (1) razdvoji na dve jednačine, dobija se sistem:

$$\underline{Y}_{11}\underline{U} + \underline{Y}_{12}\underline{E} = \underline{0}, \quad (8)$$

$$\underline{Y}_{12}^T \underline{U} + \underline{Y}_{22}\underline{E} = \underline{I}. \quad (9)$$

Ako se pretpostavi da je vektor \underline{E} poznat, tada je jednačina (8) linearna jednačina po nepoznatoj \underline{U} koja se može odrediti ili iterativno ili Gaussovom eliminacijom. Koristeći Gauss-Seidelov metod k -ta komponenta vektora \underline{U} u $(i+1)$ -iteraciji je:

$$\underline{U}_k^{(i+1)} = \frac{1}{\underline{Y}_{11kk}} \left[-\sum_{n=1}^{N_G} \underline{Y}_{12kn} \underline{E}_n - \sum_{n=1}^{k-1} \underline{Y}_{11kn} \underline{U}_n^{(i+1)} - \sum_{n=k+1}^N \underline{Y}_{11kn} \underline{U}_n^i \right]; \quad i = 1, 2, \dots \quad (10)$$

Posle izračunavanja vektora \underline{U} , vektor struja generatora može da se izračuna iz jednačine (9):

$$\underline{I} = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & \dots & I_{N_G} \end{bmatrix}^T = \underline{Y}_{12}^T \underline{U} + \underline{Y}_{22} \underline{E}. \quad (11)$$

Aktivne snage na izlaznim krajevima mašina se onda dobijaju preko jednačine:

$$P_{en} = \operatorname{Re}\{\underline{E}_n \underline{I}_n^*\}, \quad n = 1, 2, \dots, N_G. \quad (12)$$

Na osnovu gore navedenog može se dati algoritam za rešavanje problema tranzijentne stabilnosti. U algoritmu se naizmenično rešavaju jednačine njihanja za pojedine generatore i jednačine tokova snaga koje predstavljaju mrežu. Za rešavanje jednačina njihanja korišćen je modifikovani Eulerov metod za numeričku integraciju, dok je za rešavanje jednačina tokova snaga korišćen Gauss-Seidelov iterativni postupak. Pre predstavljanja algoritma za rešavanje problema tranzijentne stabilnosti biće izložen Eulerov metod za numeričku integraciju.

Kriterijum jednakih površina je primenljiv za jednomašinski sistem. Za višemašinske sisteme, međutim, potrebno je primeniti tehnike numeričke integracije za rešavanje jednačine njihanja za svaku mašinu.

Jedna relativno jednostavna tehnika numeričke integracije je Eulerov metod. Metod će biti primenjen na diferencijalnu jednačinu prvog reda:

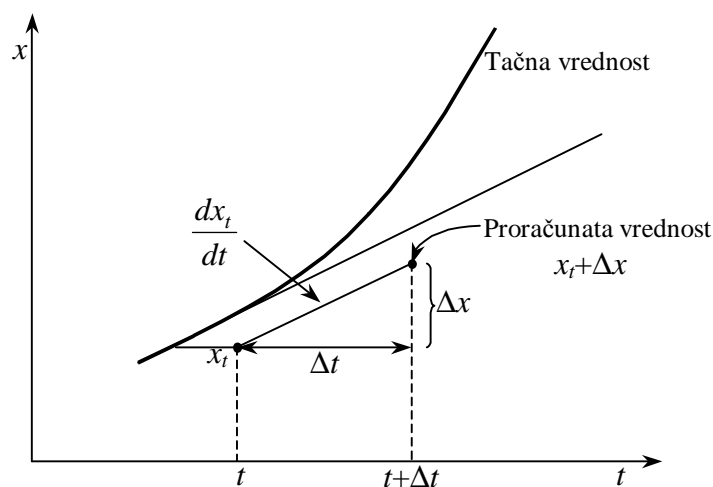
$$\frac{dx}{dt} = f(x), \quad (13)$$

i ilustrovan je na sl. 4.25b. Korak integracije je označen sa Δt . Tangenta (nagib krive) na početku intervala integracije je:

$$\frac{dx_t}{dt} = f(x_t). \quad (14)$$

Nova vrednost argumentu $x_{t+\Delta t}$ se računa na osnovu prethodne vrednosti argumenta x_t i priraštaja Δx , preko izraza:

$$x_{t+\Delta t} = x_t + \Delta x = x_t + \left(\frac{dx_t}{dt}\right)\Delta t. \quad (15)$$



Sl. 4.25b Ilustracija Eulerove metode

Kao što je pokazano na sl. 4.25b, Eulerov metod pretpostavlja da je tangenta, odnosno nagib krive konstantna u toku posmatranog intervala Δt . Unapređenje metode može se dobiti proračunom tangente (nagiba krive) i na početku i na kraju intervala, a zatim nalaženjem njihove srednje vrednosti. Modifikovan Eulerov metod ilustrovan je na sl. 4.25c. Najpre se izračuna tangenta na početku intervala po jednačini (13), a zatim se ta vrednost koristi za proračun preliminarne vrednosti argumenta \tilde{x} po jednačini:

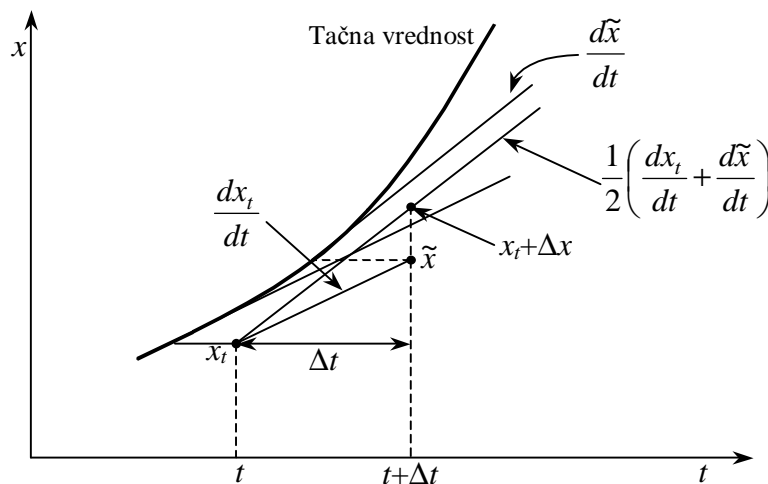
$$\tilde{x} = x_t + \left(\frac{dx_t}{dt} \right) \Delta t \quad (16)$$

Posle toga se računa tangenta u tački \tilde{x} :

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = f(\tilde{x}). \quad (17)$$

Sada se nova vrednost argumenta $x_{t+\Delta t}$ računa na osnovu srednjeg nagiba:

$$x_{t+\Delta t} = x_t + \frac{1}{2} \left(\frac{dx_t}{dt} + \frac{d\tilde{x}}{dt} \right) \Delta t. \quad (18)$$



Sl. 4.25c Ilustracija modifikovane Eulerove metode

Gore izložena metoda može da se primeni za proračun ugaone brzine ω i ugla snage generatora δ , pri čemu su vrednosti na početku intervala označene sa ω_t i δ_t . Za slučaj jednačina njihovih koji su oblika kao jednačina (13), tangente (nagibi krivih) na početku intervala su:

$$\frac{d\delta_t}{dt} = \omega_t - \omega_s; \quad (19)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{P_{at(r.j.)} \cdot \omega_s}{T_i \cdot \omega_{i(r.j.)}}, \quad (20)$$

gde je $P_{at(r.j.)}$ snaga akceleracije u relativnim jedinicama, računata za $\delta = \delta_t$ i $\omega_{i(r.j.)} = \omega_t / \omega_s$.

Primenjujući jednačinu (16) preliminarne vrednosti nepoznatih su:

$$\tilde{\delta} = \delta_t + \left(\frac{d\delta_t}{dt} \right) \Delta t; \quad (21)$$

$$\tilde{\omega} = \omega_t + \left(\frac{d\omega_t}{dt} \right) \Delta t. \quad (22)$$

Dalje, tangente (nagibi) za $\tilde{\delta}$ i $\tilde{\omega}$ su:

$$\frac{d\tilde{\delta}}{dt} = \tilde{\omega} - \omega_s; \quad (23)$$

$$\frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \frac{\tilde{P}_{a(r.j.)} \cdot \omega_s}{T_i \cdot \tilde{\omega}_{(r.j.)}}, \quad (24)$$

gde je $\tilde{P}_{a(r.j.)}$ snaga akceleracije u relativnim jedinicama, računata za $\delta = \tilde{\delta}$ i $\tilde{\omega}_{(r.j.)} = \tilde{\omega}_t / \omega_s$.

Primenjujući jednačinu (18) dobijaju se nove vrednosti za δ i ω na kraju intervala:

$$\delta_{t+\Delta t} = \delta_t + \frac{1}{2} \left(\frac{d\delta_t}{dt} + \frac{d\tilde{\delta}}{dt} \right) \Delta t; \quad (25)$$

$$\omega_{t+\Delta t} = \omega_t + \frac{1}{2} \left(\frac{d\omega_t}{dt} + \frac{d\tilde{\omega}}{dt} \right) \Delta t. \quad (26)$$

Procedura data jednačinama (19)-(26) počinje u $t=0$ sa specifikovanim početnim vrednostima δ_0 i ω_0 i nastavlja se iterativno do vremena $t=T$, gde je T definisano konačno vreme proračuna.

Sada se može izložiti algoritam za rešavanje problema tranzijentne stabilnosti za višemašinski sistem. On se sastoji od 11 koraka:

1. Izvršiti proračun tokova snaga u cilju dobijanja napona čvorova \underline{U}_k ($k = 1, \dots, N$), struja generatora \underline{I}_n ($n = 1, 2, \dots, N_G$) i električne snage generatora P_{en} ($n = 1, 2, \dots, N_G$). Postaviti mehaničku snagu generatora na vrednost P_{en} , tj. $P_{mn} = P_{en}$. Takođe vrednost ugaone brzine postaviti na vrednost sinhrona brzine tj. $\omega_n = \omega_s$. U ovom koraku potrebno je izračunati i admitanse potrošnje tj. zameniti potrošnju modelom sa konstantnim admitansama.

2. Izračunati unutrašnju elektromotornu silu generatora $\underline{E}_n = E_n \angle \delta_n = \underline{U}_{Gn} + jX'_{dn} \cdot \underline{I}_n$, ($n = 1, 2, \dots, N_G$), gde su \underline{U}_{Gn} i \underline{I}_n veličine izračunate u koraku 1. Veličinu \underline{E}_n držati na konstantnoj vrednosti. Ugao δ_n je početni ugao snage.

3. Izračunati matricu \underline{Y}_{11} , modifikovanjem $\underline{Y}_{\check{C}V}$ matrice iz proračuna tokova snaga uključivanjem admitansi potrošnje i recipročnih impedansi generatora.

4. Izračunati matricu \underline{Y}_{22} prema jednačini (6) i matricu \underline{Y}_{12} prema jednačini (7).

5. Inicijalizovati vreme, tj. staviti $t = 0$.

6. Ako postoji operacija uključanja, promene opterećenja, kratkog spoja ili promene podataka uraditi sledeće:

- Za slučaj operacija uključanja ili promene opterećenja modifikovati matricu admitansi.
- Za slučaj trofaznog kratkog spoja postaviti napon sabirnice pogođene kvarom na 0.

7. Koristeći vrednosti za elektromotorne sile generatora $\underline{E}_n = E_n \angle \delta_n$, ($n = 1, 2, \dots, N_G$), za vrednost δ_n u vremenu t , izračunati električnu snagu generatora (P_{en}) u vremenu t preko jednačina (10)-(12).

8. Koristeći vrednosti za električnu snagu generatora (P_{en}) koja je izračunata u prethodnoj tački i vrednosti za δ_n i ω_n u vremenu t , izračunati preliminarne vrednosti ugla snage $\tilde{\delta}_n$ i ugaone brzine $\tilde{\omega}_n$ u vremenu $t + \Delta t$ preko jednačina (19)-(22).

9. Koristeći vrednosti za elektromotorne sile generatora $\underline{E}_n = E_n \angle \tilde{\delta}_n$, ($n = 1, 2, \dots, N_G$), izračunati preliminarnu vrednost električne snage generatora (\tilde{P}_{en}) u vremenu $t + \Delta t$ iz jednačina (10)-(12).

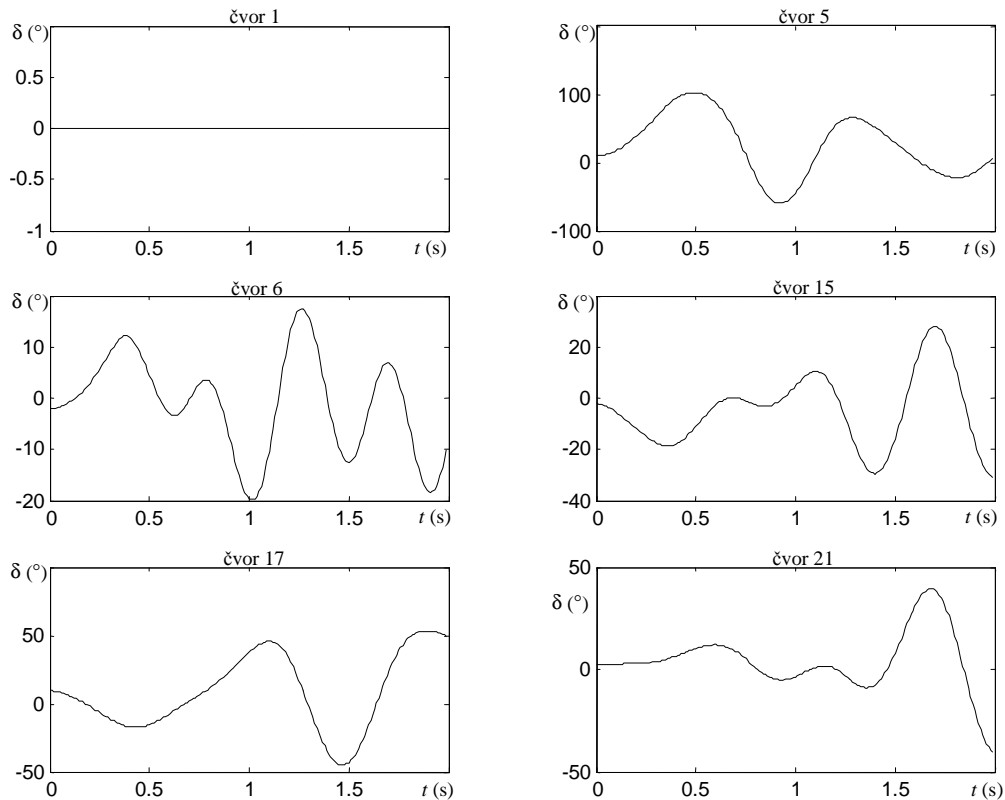
10. Koristeći veličinu \tilde{P}_{en} izračunatu u koraku 9, a takođe i veličine $\tilde{\delta}_n$ i $\tilde{\omega}_n$ izračunate u koraku 8, izračunati konačne vrednosti ugla snage δ_n i ugaone brzine ω_n u vremenu $t + \Delta t$ iz jednačina (23)-(26).

11. Postaviti vreme na vrednost $t = t + \Delta t$. Zaustaviti algoritam ako je $t \geq T$. U protivnom vratiti se na korak 6.

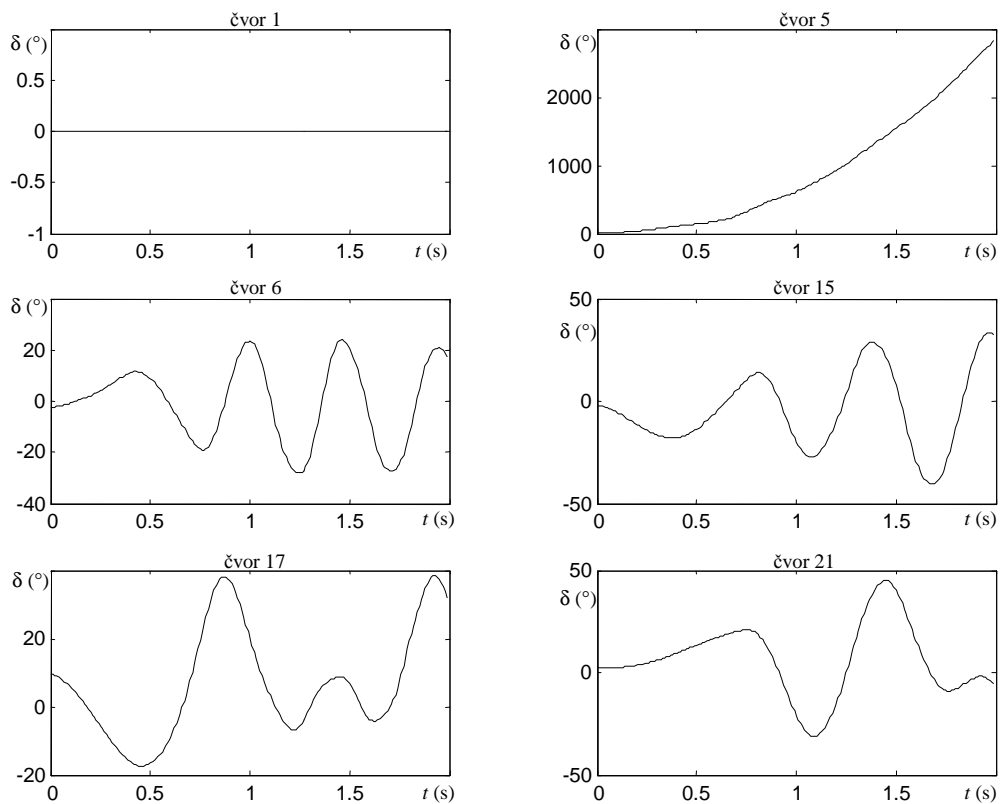
Jedina modifikacija koja je u ovom zadatku urađena u odnosu na izloženi metod je ta, da su impedansama generatora pridružene i impedanse blok-transformatora preko kojih su generatori priključeni na mrežu. Ta modifikacija suštinski ne menja izloženi metod.

Svi potrebni proračuni izvršeni su u programskom paketu MATLAB 6. Kao izlazni rezultati dobijaju se promene uglova snaga generatora u sistemu.

Dijagrami promena uglova snaga generatora sa vremenom za slučaj kada se kvar isključuje za vreme 0,15 s, dati su na sl. 4.25d. Za slučaj kada se kvar isključuje za 0,2 s dijagrami promene uglova snage generatora sa vremenom dati su na sl. 4.25e. Sa dijagrama se može uočiti da su u prvom slučaju svi generatori stabilni, dok je u drugom slučaju generator u čvoru 5 nestabilan jer ugao snage ovog generatora raste u beskonačnost.



Sl. 4.25d Dijagrami promena uglova snaga generatora u vremenu za prvi slučaj (stabilan sistem)



Sl. 4.25e Dijagrami promena uglova snaga generatora u vremenu za drugi slučaj (nestabilan sistem)

