Nikola Rajaković *Milan Ćalović*

Predrag Stefanov **Aleksandar Savić**

100

REŠENIH ZADATAKA IZ

ANALIZE ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA

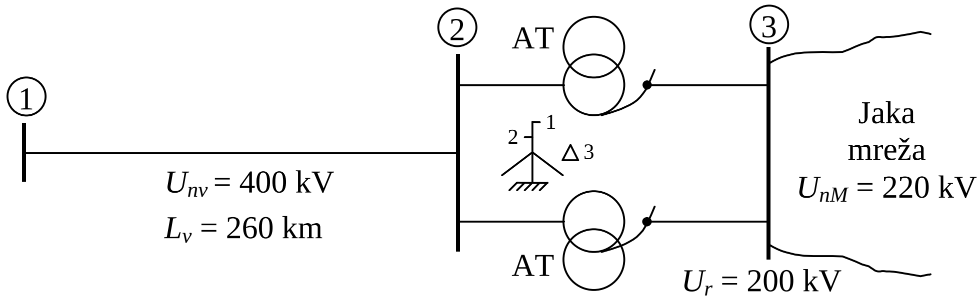
BEOGRAD, 2002

Poglavlje 1

OSNOVNI PRORAČUNI

Zadatak 1.1

Za deo elektroenergetskog sistema prikazan na sl. 1.1a izračunati parametre ekvivalentnih šema voda i transformatora.

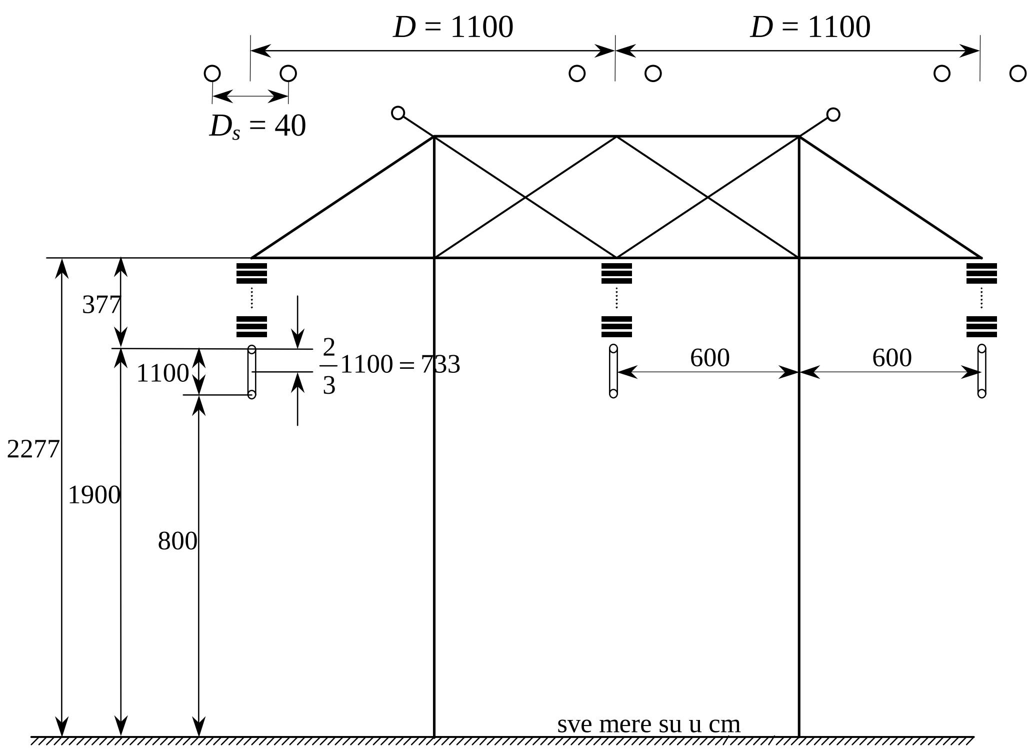


Sl. 1.1a Elektroenergetski sistem iz zadatka 1.1

Podaci za autotransformatore su sledeći:

S_{n12} = 400 MVA $\quad m$ = 400/231/36,75 kV/kV/kV
$X_{12}\%$ =12 % $\quad X_{23}\%$ = 14 % $\quad X_{13}\%$ = 17,5 %
P_{Cun}^{gub} = 727 kW $\quad P_{Fen}^{gub}$ =148 kW $\quad i_o\%$ = 0,15 % I_n

Nadzemni vod je nominalnog napona 400 kV sa provodnicima u snopu 2×(Al-Fe 490/65 mm^2). Prečnik provodnika je d = 30,6 mm, a poluprečnik kruga na kome su razmešteni provodnici u snopu R_s = 200 mm (D_s = 400 mm). Podužna aktivna otpornost voda je r_v = 0,0295 Ω/km,f. Na sl. 1.1b prikazan je raspored provodnika na stubu.



Sl. 1.1b Raspored provodnika na stubu, za vod iz zadatka 1.1

Rešenje:

S obzirom da će vod biti predstavljen monofaznom ekvivalentnom π-šemom, to se najpre nalaze konstrukcioni parametri voda (R_v, X_v, B_v). Pošto je zadata podužna aktivna otpornost voda to je ukupna aktivna otpornost:

$R_v = r_v L_v = 0{,}0295 \cdot 260 = 7{,}67\ \Omega$/f.

Aktivna otpornost jednog od provodnika snopa je dvostruko veća, pošto se u snopu nalaze dva provodnika.

Podužna pogonska induktivnost voda l_v nalazi se prema izrazu:

$$l_v = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{SG}}{r'_{es}},$$

gde je srednje geometrijsko rastojanje, (prema sl. 1.1b), s obzirom da su provodnici u horizontalnoj ravni:

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D_{12} D_{13} D_{23}} = \sqrt[3]{D \cdot 2D \cdot D} = \sqrt[3]{2} \cdot D = 1{,}2599 \cdot 11 = 13{,}859 \text{ m},$$

a ekvivalentni poluprečnik snopa:

$$r'_{es} = \sqrt[n]{n r_e R_s^{n-1}} = \sqrt{2 \cdot (0{,}95 \cdot \frac{30{,}6}{2}) \cdot 200} = 76{,}25 \text{mm}.$$

U gornjoj formuli za proračun ekvivalentnog poluprečnika snopa sa r_e je označen ekvivalentni poluprečnik provodnika koji uvažava činjenicu da se kod proračuna induktivnosti uticaj unutrašnje induktivnosti iskazuje preko uvođenja odgovarajućeg prstena (u kome je koncentrisana sva struja) na rastojanju r_e od ose provodnika. Za Al-Fe užad obično se uzima da je $r_e \cong 0{,}95 r$, gde je sa r označen stvarni poluprečnik užeta.

Prema tome podužna induktivnost voda je:

$$l_v = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1385{,}9}{7{,}625} = 10{,}4 \cdot 10^{-4} \text{ H/km,f},$$

a podužna reaktansa:

$$x_v = \omega l_v = 314 \cdot 10{,}4 \cdot 10^{-4} = 0{,}327\ \Omega\text{/km,f}.$$

Oznaka 'f ' ukazuje da su parametri izračunati po fazi trofaznog voda.

Podužna pogonska kapacitivnost nalazi se prema formuli:

$$c_v = \frac{55{,}55 \cdot 10^{-9}}{\ln\left(\frac{D_{SG}}{r_{es}} \frac{2h_{SG}}{\sqrt{4h_{SG}^2 + D_{SG}^2}} \right)},$$

gde je sa r_{es} označen ekvivalentni poluprečnik snopa sa stanovišta kapacitivnosti (zato što provodnik poluprečnika r_{es} ima istu kapacitivnost kao i odgovarajući snop provodnika po fazi):

$$r_{es} = \sqrt[n]{nrR_s^{n-1}} = \sqrt[2]{2 \cdot 15{,}3 \cdot 200} = 78{,}23\,\mathrm{mm}\,.$$

Ovaj ekvivalentni poluprečnik snopa (r_{es}) razlikuje se od odgovarajućeg ekvivalentnog poluprečnika snopa merodavnog za proračun induktivnosti (r'_{es}), pošto u formuli za njegovo izračunavanje figuriše stvarni, a ne ekvivalentni poluprečnik provodnika.

Prema sl. 1.1b srednja geometrijska visina faznih provodnika je

$$h_{SG} = H - \frac{2}{3}f = 19 - \frac{2}{3}\cdot 11 = 11{,}67\,\mathrm{m}\,,$$

odnosno, jednaka je srednjoj težišnoj visini faznih provodnika nad zemljom (s obzirom da su provodnici u horizontalnoj ravni), gde je f=11 m maksimalni ugib provodnika.

Posle zamene brojčanih vrednosti nalazi se:

$$c_v = \frac{55{,}55 \cdot 10^{-9}}{\ln\left(\dfrac{1385{,}9}{7{,}823}\cdot\dfrac{2\cdot 11{,}67}{\sqrt{4\cdot 11{,}67^2 + 13{,}859^2}}\right)} = 11{,}05\cdot 10^{-9}\ \mathrm{F/km,f}\,,$$

pa je odgovarajuća pogonska podužna susceptansa:

$$b_v = \omega c_v = 314\cdot 11{,}05\cdot 10^{-9} = 3{,}47\cdot 10^{-6}\ \mathrm{S/km,f}.$$

Sada su ukupna reaktansa, odnosno susceptansa:

$$X_v = x_v L_v = 0{,}327\cdot 260 = 85{,}02\,\Omega\,;$$
$$B_v = b_v L_v = 3{,}47\cdot 10^{-6}\cdot 260 = 0{,}9022\cdot 10^{-3}\ \mathrm{S}.$$

Treba primetiti da je u ovom konkretnom primeru odnos $r : x$=1 : 11, što je i tipično za nadzemne vodove 400 kV sa konstrukcijom u snopu.

S obzirom na činjenicu da će vod biti predstavljen ekvivalentnom π-šemom, dakle tretiran sa koncentrisanim parametrima i s obzirom na to da je vod dužine L_v=260 km to se, radi što vernijeg modelovanja voda, uvode skalarni koeficijenti popravke. Skalarni koeficijent popravke po aktivnoj otpornosti iznosi:

$$k_R = 1 - \frac{b_v x_v L_v^2}{3} = 1 - \frac{3{,}47\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}327\cdot 260^2}{3} = 0{,}947\,,$$

tako da je korigovana vrednost aktivne otpornosti:

$$R'_v = k_R R_v = 0{,}947\cdot 7{,}67 = 7{,}47\,\Omega/\mathrm{faza}\,.$$

Analogno se postupa i pri proračunu reaktanse i susceptanse ekvivalentne π-šeme:

$$k_X = 1 - \frac{b_v x_v L_v^2}{6}\left[1-\left(\frac{r_v}{x_v}\right)^2\right] = 1 - \frac{3{,}47\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}327\cdot 260^2}{6}\left[1-\left(\frac{0{,}0295}{0{,}327}\right)^2\right] = 0{,}987\,;$$

$$X_v' = k_X X_v = 0{,}987\cdot 85{,}02 = 83{,}945\ \Omega/\text{faza}\,;$$

$$k_B = 1 + \frac{b_v x_v L_v^2}{12} = 1 + \frac{3{,}47\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}327\cdot 260^2}{12} = 1{,}0064\,;$$

$$B_v' = k_B B_v = 1{,}0064\cdot 0{,}9022\cdot 10^{-3} = 0{,}908\cdot 10^{-3}\ \text{S/faza}\,;$$

ili

$$\frac{B_v'}{2} = 0{,}454\cdot 10^{-3}\ \text{S/faza}\,,$$

pošto se u ekvivalentnoj π-šemi ukupna susceptansa deli na dve polovine.

Autotransformatori će biti zamenjeni "Γ"-ekvivalentnom šemom (pošto se tada otočne grane voda i autotransformatora mogu objediniti, kako je to pokazano na sl. 1.1c), pri čemu tercijerni namotaj spregnut u trougao, neće u stacionarnom režimu biti opterećen pa prema tome neće ni učestvovati u ekvivalentnoj šemi. Parametri monofazne ekvivalentne šeme autotransformatora po fazi su onda:

$$X_{12e} = \frac{1}{2}\frac{X_{12}\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{n12}} = \frac{1}{2}\cdot\frac{12}{100}\cdot\frac{400^2}{400} = 24\ \Omega\,;$$

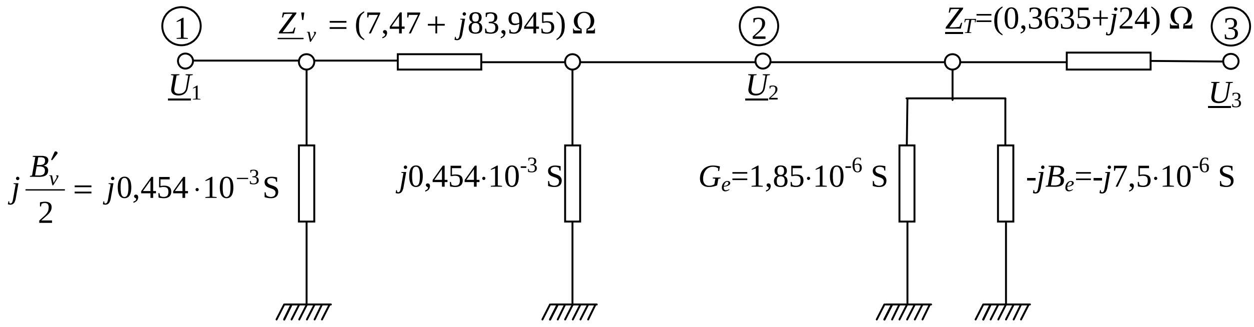
$$R_e = \frac{1}{2}\frac{P_{Cun}U_n^2}{S_{12n}^2} = \frac{1}{2}\cdot\frac{0{,}727\cdot 400^2}{400^2} = 0{,}3635\ \Omega\,;$$

$$G_e = 2\frac{P_{Fen}}{U_n^2} = 2\cdot\frac{0{,}148}{400^2} = 1{,}85\cdot 10^{-6}\ \text{S}\,;$$

$$B_e = 2\frac{i_o\%}{100}\frac{S_{n12}}{U_n^2} = 2\cdot\frac{0{,}15}{100}\cdot\frac{400}{400^2} = 7{,}5\cdot 10^{-6}\ \text{S}\,.$$

Kod proračuna parametara ekvivalentne šeme za dva paralelna autotransformatora, treba voditi računa da se parametri redne grane polove, a parametri otočne grane udvostručuju.

Ekvivalentna šema sistema data je na sl. 1.1c.



Sl. 1.1c Ekvivalentna šema sistema iz zadatka 1.1

❑

Zadatak 1.2

Vod nominalnog napona 400 kV ima sledeće parametre:
r_v = 0,035 Ω/km; x_v/r_v = 10; q_c = 0,5 MVAr/km; g_v = 0.
a) Naći podužnu kapacitetivnost voda c_v, karakterističnu impedansu $\underline{Z}_c$; talasni otpor Z_v i prirodnu snagu P_{nat}.
b) Proračunati gubitke aktivne i reaktivne snage u vodu dužine L_v = 200 km, aktivnu i reaktivnu snagu i napon na početku voda, ako se na kraju voda isporučuje snaga $P = P_{nat}$ pri nominalnom naponu (U_n = 400 kV) i faktoru snage cosφ = 0,98 (cap).

Rešenje:

a) Podužna kapacitivnost voda (po fazi) nalazi se iz reaktivne snage punjenja voda q_c, kao:

$$c_v = \frac{q_c}{\omega_n U_n^2} = \frac{0{,}5}{2\pi \cdot 50 \cdot 400^2} = 9{,}947 \cdot 10^{-9}\ \text{F/km}\,.$$

Podužna susceptansa je:

$$b_v = \omega c_v = 2\pi \cdot 50 \cdot 9{,}947 \cdot 10^{-9} = 3{,}125 \cdot 10^{-6}\ \text{S/km}\,.$$

Podužna impedansa i admitansa su onda:

$$\underline{z}_v = (0{,}035 + j0{,}35)\ \Omega/\text{km} = 0{,}352\ \Omega/\text{km}\ \underline{/84{,}29°}\,;$$
$$\underline{y}_v = j3{,}125 \cdot 10^{-6}\ \text{S/km} = 3{,}125 \cdot 10^{-6}\ \text{S/km}\ \underline{/90°}\,.$$

Karakteristična impedansa voda je onda:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{z}_v}{\underline{y}_v}} = \sqrt{\frac{0{,}352\ \underline{/84{,}29°}}{3{,}125 \cdot 10^{-6}\ \underline{/90°}}} = 335{,}62\ \Omega\ \underline{/-2{,}86°}\,,$$

a talasni otpor (karakteristična impedansa idealizovanog voda):

$$Z_v = \sqrt{\frac{x_v}{b_v}} = \sqrt{\frac{0{,}35}{3{,}125 \cdot 10^{-6}}} = 334{,}67\ \Omega\,,$$

dok je prirodna snaga:

$$P_{nat} = \frac{U_n^2}{Z_v} = \frac{400^2}{334{,}67} = 478{,}1\ \text{MW}\,.$$

b) Kompleksna snaga voda koja se na kraju voda predaje je:

$$\underline{S}_2 = P_{nat}(1 - j\text{tg}\arccos 0{,}98) = (478{,}1 - j97{,}1)\ \text{MW} = 487{,}96\ \text{MW}\ \underline{/\ \text{-}11{,}48°}\,.$$

Gubici u vodu, kada se on predstavi sa π-ekvivalentom (za $\underline{U}_2 = U_2 \underline{/0°}$) su:

$$\Delta \underline{S}^{gub} = \underline{Z}_v \frac{P_2^2 + \left(Q_2 - \dfrac{Q_c}{2}\right)^2}{U_2^2} = (7 + j70)\frac{478{,}1^2 + (97{,}1 + 50)^2}{400^2} = (10{,}95 + j109{,}5)\ \text{MVA} .$$

Pad napona u vodu je:

$$\Delta \underline{U} = \frac{R_v P_2 + X_v\left(Q_2 - \dfrac{Q_c}{2}\right)}{U_2} + j\frac{X_v P_2 - R_v\left(Q_2 - \dfrac{Q_c}{2}\right)}{U_2}$$
$$= \frac{7 \cdot 478{,}1 - 70 \cdot 147{,}1}{400} + j\frac{70 \cdot 478{,}1 + 7 \cdot 147{,}1}{400} = (-17{,}38 + j86{,}24)\ \text{kV}$$

Napon na početku voda je onda:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U} = 400 - 17{,}38 + j86{,}24 = (382{,}62 + j86{,}24)\ \text{kV} = 392{,}22\ \text{kV}\ \underline{/12{,}71°} .$$

Kompleksna snaga na početku voda je:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \Delta \underline{S}^{gub} - j\frac{B_v}{2}U_1^2$$
$$= (478{,}1 - j97{,}1) + (10{,}95 + j109{,}5) - j100 \cdot 3{,}125 \cdot 10^{-6} \cdot 392{,}22^2$$
$$= (489{,}05 - j39{,}3)\ \text{MVA} .$$

Provera vrednosti toka aktivne snage na početku i kraju voda može se izvršiti preko formule za snage injektiranja:

$$P_1 = \frac{U_1^2}{Z_L}\sin\mu + \frac{U_1 U_2}{Z_L}\sin(\theta_{12} - \mu) = \frac{392{,}22^2}{70{,}35}\sin 5{,}71° - \frac{392{,}22 \cdot 400}{70{,}35}\sin(12{,}71° - 5{,}71°)$$
$$= 217{,}56 - 271{,}4 = 488{,}96\ \text{MW}$$ (umesto ranije proračunatih 489,05 MW),

gde je $\mu = 90° - \text{arctg}\dfrac{X_L}{R_L} = 90° - 84{,}29° = 5{,}71°$.

$$P_2 = -\frac{U_2^2}{Z_L}\sin\mu - \frac{U_1 U_2}{Z_L}\sin(\theta_{21} + \mu) = -\frac{400^2}{70{,}35}\sin 5{,}71 + \frac{392{,}22 \cdot 400}{70{,}35}\sin(12{,}71 + 5{,}71)$$
$$= -226{,}28 + 704{,}3 = 478{,}02\ \text{MW}$$ (umesto ranije proračunatih 478,1 MW).

Sve razlike u rezultataima su posledica zaokruživanja.

❑

Zadatak 1.3

Konzumno područje dvostrano se napaja trofaznim vodovima 400 kV. U slučaju ispada jednog od njih, drugim vodom dužine 200 km konzumnom području priticaće celokupna njegova snaga jednaka dvostrukoj prirodnoj snazi voda.

Kolika će biti približna vrednost ugla voda (faznog pomeraja između napona na krajevima), a kolika reaktivna induktivna snaga koju troši vod pod pretpostavkom da se naponi bitno ne menjaju i da je podužna kapacitivna snaga otočnih kapacitivnosti voda približno 0,5 MVAr/km?

Rešenje:

Radi se o dužini voda (deonice) kod koje još ne nastupaju efekti karakteristični za prenos naizmeničnom strujom na velike udaljenosti (dužina nešto veća od desetine četvrttalasne dužine).

Kod prenosa prirodne snage (idealizovanim) vodom ima se na svakih 100 km ugaoni pomeraj napona od 6°, tj na 200 km 2·6 = 12°. S obzirom da je, naročito kod umerenih dužina, ovaj ugaoni pomeraj za vodove najviših napona praktično srazmeran sa aktivnom snagom (što se pored ostalog vidi i iz poprečne komponente fazorske razlike napona $(PX - QR)/U$, gde je QR za red veličine manje od PX, a pogotovo ako se u osnovi kompenzuje reaktivna snaga potrošačkog područja, kako i odgovara uslovima prirodne snage (za jedan ili više vodova)).

Prema tome kod prenosa dvostruke prirodne snage imaće se praktično i dvostruki ugaoni pomeraj:

$$\theta_v = \theta_{U_1} - \theta_{U_2} = 2 \cdot 12° = 24°.$$

Za približno nalaženje reaktivne induktivne snage koju “troši” vod u specifikovanim uslovima moguće je sledeće rezonovanje:

Ukupna kapacitivna snaga koju proizvode otočne kapacitivnosti voda 400 kV dužine 200 km iznosi (približno):

$$Q_{cv} = q_{cv} L_v = 0{,}5 \text{ MVAr/km} \cdot 200 \text{ km} = 100 \text{ MVAr}.$$

Kod prenosa prirodne snage (idealizovanim) vodom, vod sam sebe kompenzuje, tj. koliki su gubici reaktivne induktivne snage u rasipnim reaktansama, toliko proizvode kapacitivnosti voda (uzimaju kapacitivnu, odnosno daju induktivnu reaktivnu snagu).

Otuda se pri prenosu prirodne snage imaju gubici reaktivne induktivne snage u rednim rasipnim reaktansama, takođe jednaki 100 MVAr i u celini su kompenzovani reaktivnom snagom otočnih kapacitivnosti. Kako su gubici reaktivne induktivne snage u rednim reaktansama srazmerni sa kvadratom struje, a time pri približno konstantnom naponu i kvadratu snage, oni će pri dvostrukoj prirodnoj snazi biti $2^2 = 4$ puta veći nego pri jednostrukoj, tj. iznosiće približno 4·100 = 400 MVAr. S obzirom da je kapacitivnostima kompenzovano samo 100 MVAr, ima se na kraju:

$$Q_{\Sigma v} = Q \;\; - Q_{cv} = 400 - 100 = 300 \text{ MVAr},$$

tj. vod približno troši ukupno 300 MVAr.

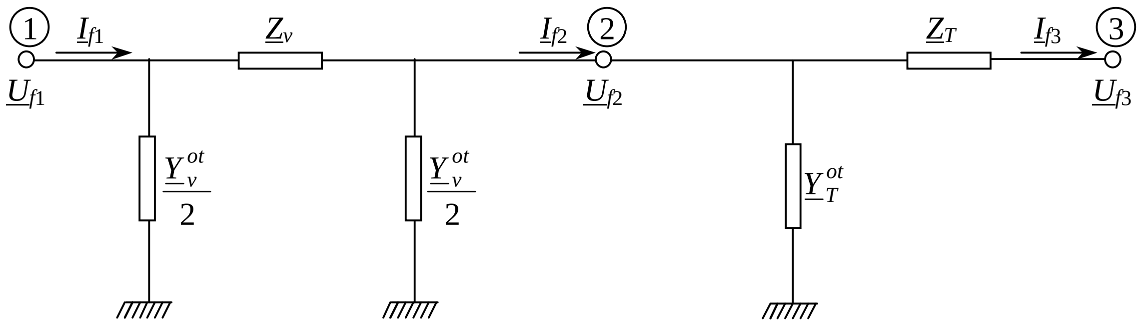
❑

Zadatak 1.4

Za deo elektroenergetskog sistema iz zadataka 1.1:
a) Izračunati koeficijente ekvivalentnog četvorokrajnika;
b) Nacrtati kružne dijagrame snaga koje protiču preko sabirnica 1 i 3.
c) Nacrtati spiralne dijagrame za napon (i struju) za režim prenosa prirodne snage i za režim praznog hoda.

Rešenje:

a) Ekvivalentna šema zadatog dela sistema data je na sl. 1.4a.



Sl. 1.4a Deo elektroenergetskog sistema iz zadatka 1.4

Matrična relacija koja povezuje fazne veličine napona i struja na ulazu i izlazu prvog četvorokrajnika (ekvivalentne π-šeme voda) je:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{f1} \\ \underline{I}_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{B}_1 \\ \underline{C}_1 & \underline{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{f2} \\ \underline{I}_{f2} \end{bmatrix}.$$

Množenjem prethodne matrične relacije sa $\sqrt{3}$ prelazi se sa faznih na takozvane računske veličine napona i struja. Ovako uvedeni fazori napona i struja zadržavaju fazni stav, a moduli im se povećavaju $\sqrt{3}$ puta. Umesto termina računski za napone se može koristiti i termin linijski, odnosno međufazni. Termin međufazni za struje nije primeren. Prema tome prethodna jednačina postaje:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{B}_1 \\ \underline{C}_1 & \underline{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}. \qquad (1)$$

S obzirom da je prema ekvivalentnoj šemi:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \left(\underline{I}_2 + \frac{\underline{Y}_v^{ot}}{2} \underline{U}_2 \right) \underline{Z}_v = \underline{U}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_v \underline{Y}_v^{ot}}{2} \right) + \underline{Z}_v \underline{I}_2,$$

a takođe:

$$\underline{I}_1 = \underline{U}_2 \left(\underline{Y}_v^{ot} + \frac{\underline{Z}_v \underline{Y}_v^{ot\,2}}{4} \right) + \underline{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_v \underline{Y}_v^{ot}}{2} \right), \tag{2}$$

to se poređenjem relacija (1) i (2) određuju koeficijenti prvog četvorokrajnika:

$$\underline{A}_1 = 1 + \frac{\underline{Z}_v \underline{Y}_v^{ot}}{2};\ \underline{B}_1 = \underline{Z}_v;\ \underline{C}_1 = \underline{Y}_v^{ot} + \frac{\underline{Z}_v \underline{Y}_v^{ot\,2}}{4};\ \underline{D}_1 = 1 + \frac{\underline{Z}_v \underline{Y}_v^{ot}}{2}.$$

Očigledno je, s obzirom da se radi o pasivnom, simetričnom četvorokrajniku da je:

$\underline{A}_1 = \underline{D}_1$ i $\underline{A}_1 \underline{D}_1 - \underline{B}_1 \underline{C}_1 = 1.$

Na sličan način se ima:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_2 & \underline{B}_2 \\ \underline{C}_2 & \underline{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_3 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Prema ekvivalentnoj šemi sa sl. 1.4a je:

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 &= \underline{U}_3 + \underline{Z}_T \underline{I}_3; \\ \underline{I}_2 &= \underline{Y}_T^{ot} \underline{U}_3 + \left(1 + \underline{Z}_T \underline{Y}_T^{ot}\right) \underline{I}_3, \end{aligned} \tag{4}$$

tako da se poređenjem (3) i (4) nalaze koeficijenti drugog četvorokrajnika (ekvivalentna Γ-šema transformatora):

$$\underline{A}_2 = 1;\ \underline{B}_2 = \underline{Z}_T;\ \underline{C}_2 = \underline{Y}_T^{ot};\ \underline{D}_2 = 1 + \underline{Z}_T \underline{Y}_T^{ot}.$$

Pošto taj četvorokrajnik nije simetričan to je:

$\underline{A}_2 \neq \underline{D}_2,$

ali pošto je pasivan to je zadovoljen uslov:

$\underline{A}_2 \underline{D}_2 - \underline{B}_2 \underline{C}_2 = 1.$

Ako se iz (3) smeni matrica-kolona radnih veličina na ulazu u drugi četvorokrajnik u (1), dobija se:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_e & \underline{B}_e \\ \underline{C}_e & \underline{D}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_3 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

U relacijama (5) su uvedeni koeficijenti ekvivalentnog četvorokrajnika koji se nalaze prema pravilima matričnog množenja:

$$\underline{A}_e = \underline{A}_1\underline{A}_2 + \underline{B}_1\underline{C}_2 = \left(1+\frac{\underline{Z}_v\underline{Y}_v^{ot}}{2}\right)+\underline{Z}_v\underline{Y}_T^{ot};$$

$$\underline{B}_e = \underline{A}_1\underline{B}_2 + \underline{B}_1\underline{D}_2 = \left(1+\frac{\underline{Z}_v\underline{Y}_v^{ot}}{2}\right)\underline{Z}_T+\underline{Z}_v\left(1+\underline{Z}_T\underline{Y}_T^{ot}\right);$$

$$\underline{C}_e = \underline{C}_1\underline{A}_2 + \underline{D}_1\underline{C}_2 = \left(\underline{Y}_v^{ot}+\frac{\underline{Z}_v\underline{Y}_v^{ot\,2}}{4}\right)+\left(1+\frac{\underline{Z}_v\underline{Y}_v^{ot}}{2}\right)\underline{Y}_T^{ot};$$

$$\underline{D}_e = \underline{C}_1\underline{B}_2 + \underline{D}_1\underline{D}_2 = \left(\underline{Y}_v^{ot}+\frac{\underline{Z}_v\underline{Y}_v^{ot\,2}}{4}\right)\underline{Z}_T+\left(1+\frac{\underline{Z}_v\underline{Y}_v^{ot}}{2}\right)\left(1+\underline{Z}_T\underline{Y}_T^{ot}\right). \qquad (6)$$

Posle zamene numeričkih vrednosti zadatih veličina, dobija se:

$$\underline{Z}_v = (7{,}47 + j83{,}945)\Omega = 84{,}277\ \Omega\ \underline{/84{,}912°};$$
$$\underline{Y}_v^{ot} = j0{,}454\cdot10^{-3} S = 0{,}454\cdot10^{-3}\ \mathrm{S}\ \underline{/90°};$$
$$\underline{Z}_T = (0{,}3635 + j24)\Omega = 24{,}00275\ \Omega\ \underline{/89{,}13°};$$
$$\underline{Y}_T^{ot} = (1{,}85 - j7{,}5)\cdot10^{-6} S = 7{,}72\cdot10^{-6}\ \Omega\ \underline{/-76{,}144°},$$

a zamenom tih veličina u relacije (6) dobijaju se koeficijenti ekvivalentnog četvorokrajnika:

$$\underline{A}_e = 0{,}962\ \underline{/0{,}2025°} = A_e\underline{/\alpha};$$
$$\underline{B}_e = 107{,}28\ \underline{/85{,}86°}\ \Omega = B_e\underline{/\beta};$$
$$\underline{C}_e = 0{,}883\cdot10^{-3}\ \underline{/89{,}8°}\ \mathrm{S} = C_e\underline{/\gamma};$$
$$\underline{D}_e = 0{,}94\ \underline{/0{,}225°} = D_e\ \underline{/\delta}.$$

b) Kompleksni izrazi za snage koje protiču preko sabirnica 1 i 3 su:

$$\underline{S}_1 = U_1^2\frac{D_e}{B_e}\underline{/\beta-\delta} - \frac{U_1U_3}{B_e}\underline{/\beta+\theta};$$
$$\underline{S}_3 = -U_3^2\frac{A_e}{B_e}\underline{/\beta-\alpha} + \frac{U_1U_3}{B_e}\underline{/\beta-\theta},$$

gde je sa θ označen ugao između fazora napona $\underline{U}_1$ i $\underline{U}_3$.

Posle zamene poznatih numeričkih vrednosti u gornje relacije, izrazi za kompleksne snage postaju:

$$\underline{S}_1 = U_1^2\cdot8{,}76\cdot10^{-3}\ \underline{/85{,}635°} - U_1U_3\cdot9{,}32\cdot10^{-3}\ \underline{/\theta+85{,}86°};$$
$$\underline{S}_3 = -U_3^2\cdot8{,}967\cdot10^{-3}\ \underline{/85{,}658°} + U_1U_3\cdot9{,}32\cdot10^{-3}\ \underline{/85{,}86°-\theta} \qquad (7)$$

Relacije (7) u polarnim kordinatama predstavljaju jednačinu familije krugova čiji je centar određen prvim sabirkom u relacijama (7), a poluprečnici krugova drugim sabirkom (pošto je samo drugi sabirak funkcija ugla θ). Naponi u relacijama (7) su međufazne veličine tako da su snage trofazne.

Da bi se mogli analizirati različiti režimi rada proučiće se tri karakteristična slučaja:

1. slučaj

$$U_3 = U_{nv} = 400 \text{ kV} = const.$$

Drugim rečima, napon na sabirnica 3 se održava konstantnim dok će se napon U_1 menjati u dijapazonu ±10 % (tab. 1.4a).

Prvi sabirak u izrazu za $\underline{S}_3$ (relacije (7)) ne zavisi od U_1 i iznosi:

$$8{,}967 \cdot 10^{-3} U_3^2 = 8{,}967 \cdot 10^{-3} \cdot 400^2 = 1434{,}72 \text{ MVA} .$$

Tab. 1.4a Prvi karakteristični slučaj

U_1 (kV)	$8{,}76 \cdot 10^{-3} U_1^2$ (MVA)	$9{,}32 \cdot 10^{-3} U_1 U_3$ (MVA)
$0{,}9U_{nv} = 360$	1135,29	1342,08
$0{,}95U_{nv} = 380$	1264,94	1416,64
$U_{nv} = 400$	1401,6	1491,2
$1{,}05U_{nv} = 420$	1545,26	1565,76
$1{,}1U_{nv} = 440$	1695,94	1640,32

Kružni dijagrami snaga koji odgovaraju tab. 1.4a nacrtani su na sl. 1.4b. Krugovi snaga na sabirnicama 3 su koncentrični krugovi pošto im je centar fiksan (prvi sabirak u $\underline{S}_3$ ne zavisi od U_1) dok se centri krugova na sabirnicama 1 udaljavaju od koordinatnog početka sa rastom napona pri čemu raste i njihov poluprečnik (treća kolona u tab. 1.4a).

Ako se na sl. 1.4b uoči prava stalne aktivne snage (P = 500 MW = *const*) to se vidi da će sa rastom napona U_1 rasti i reaktivna snaga Q_1 koja se preko sabirnica 1 predaje u sistem (za niže vrednosti napona ona je negativna - tačke 1 i 3 na sl. 1.4b), zatim da će se rastom napona U_1 reaktivna snaga Q_3 (krugovi snaga na sabirnicama 3, III i IV kvadrant), koja je negativna, (tačke 1' i 3'), po modulu da se smanjuje i da će pri dovoljno velikoj vrednosti napona U_1 snaga Q_3 promeniti smer (tačka 5'), odnosno da i snaga Q_3 raste sa rastom napona U_1 (za Q_3>0, tj. reaktivna snaga se preko sabirnica 3 predaje jakoj mreži).

Isto tako se uočava da sa rastom napona opada ugao θ između $\underline{U}_1$ i $\underline{U}_3$ ($\theta_{5'} < \theta_{1'}$) odnosno, pošto je problem stabilnosti u osnovi problem uglova, a za manje uglove sistem je stabilniji, to se zaključuje da će viši naponi u sistemu imati povoljan uticaj na stabilnost sistema.

Iz ove pojednostavljene analize se primećuje da promena napona u osnovi utiče na promenu tokova reaktivnih snaga dok znatno manje utiče na tokove aktivnih snaga.

2. slučaj

$U_1 = 410\ \text{kV} = const.$

Napon sabirnica 1 se održava konstantnim dok se napon U_3 menja (tab. 1.4b).

Tab. 1.4b Drugi karakteristični slučaj

U_3 (kV)	$8{,}967 \cdot 10^{-3} U_3^2$ (MVA)	$U_1 U_3 \cdot 9{,}32 \cdot 10^{-3}$ (MVA)
$0{,}9U_{nMs} = 342{,}85$	1054,36	1310,1
$0{,}95U_{nMs} = 361{,}9$	1174,4	1382,9
$U_{nMs} = 380{,}95$	1301,3	1455,7
$1{,}05U_{nMs} = 399{,}99$	1434,7	1528,5
$1{,}1U_{nMs} = 419{,}05$	1574,6	1601,3

Prvi sabirak u izrazu za $\underline{S}_1$ (relacije (7)) ne zavisi od U_3 i iznosi:

$$8{,}76 \cdot 10^{-3} U_1^2 = 8{,}76 \cdot 10^{-3} \cdot 410^2 = 1472{,}56\ \text{MVA}$$

Kružni dijagrami snaga koji odgovaraju tab. 1.4b nacrtani su na sl. 1.4c. Krugovi snaga na sabirnicama 1 (I i II kvadrant) su koncentrični krugovi sa centrom u tački C, a snage $\underline{S}_3$ su predstavljene krugovima čiji se centri pomeraju duž pravca $-8{,}967 \cdot 10^{-3} \cdot U_3^2 \underline{/85{,}658°}$. Slična analiza koja je urađena za sl. 1.4b može se uraditi i za sl. 1.4c. (Napomena: Na sl. 1.4b i sl. 1.4c nacrtana su radi bolje preglednosti samo tri od pet krugova iz tab. 1.4a i tab. 1.4b).

3. slučaj

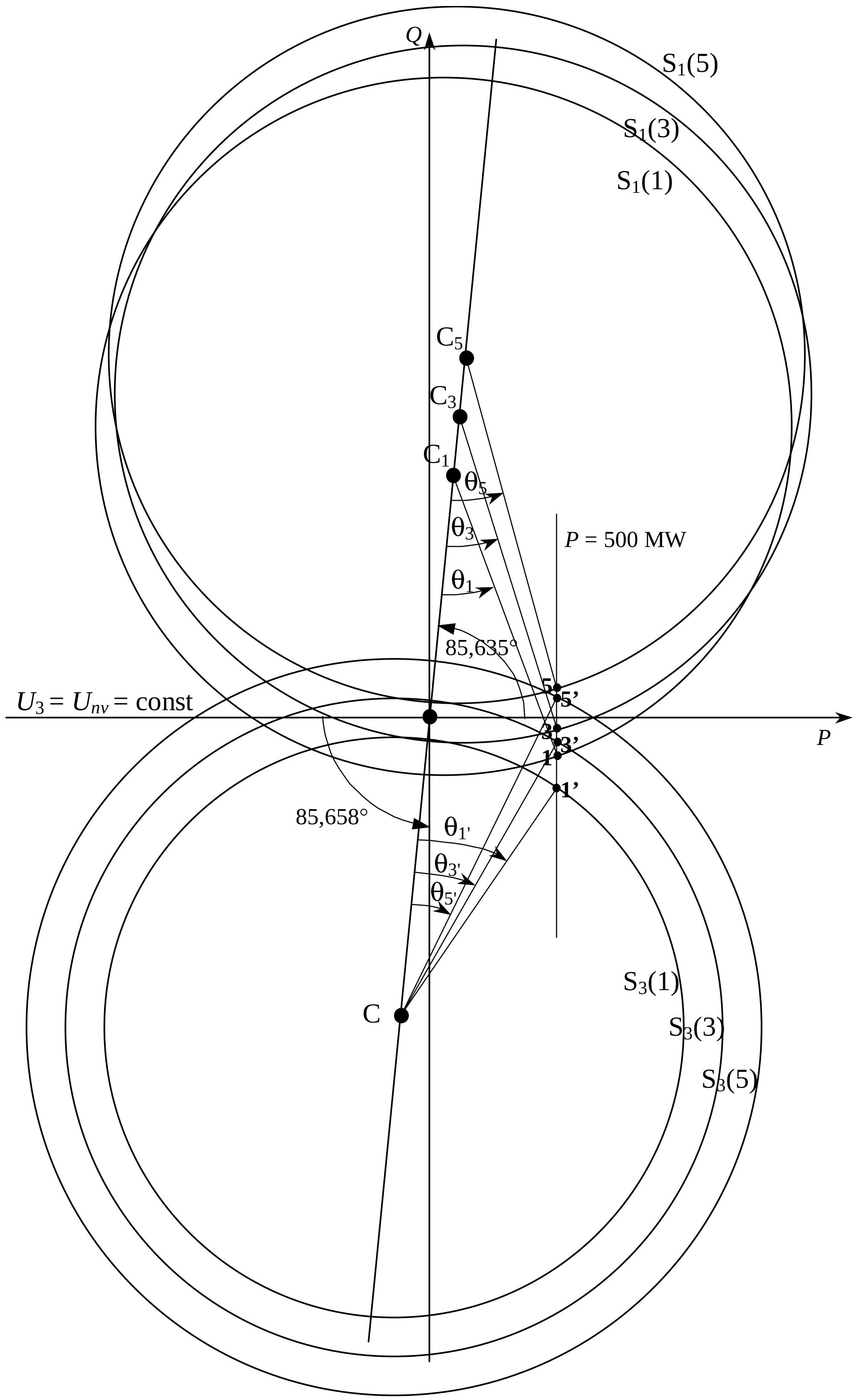
$U_1 = 410\ \text{kV} = const.;$
$U_3 = U_{nMs} = 380{,}95\ \text{kV} = const.$

U ovom slučaju ispituje se zavisnost snaga od faznog ugla θ pošto su oba napona konstantna.

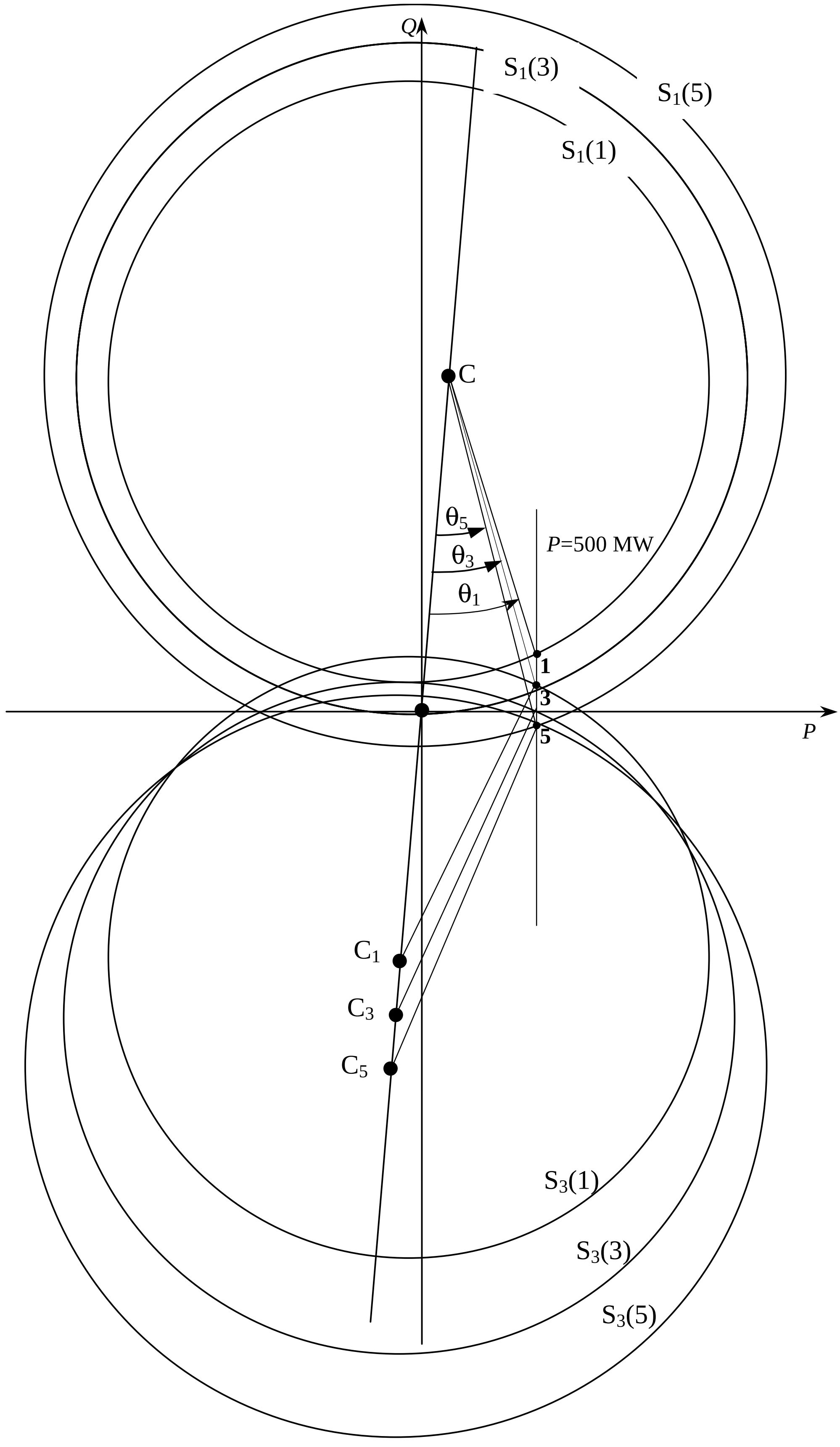
Posle zamene numeričkih vrednosti dobija se:

$$\underline{S}_1 = 112{,}08 - 1455{,}69\cos(\theta + 85{,}86) + j[1468{,}3 - 1455{,}69\sin(85{,}86° + \theta)] = P_1 + Q_1;$$
$$\underline{S}_3 = 98{,}53 + 1455{,}7\cos(85{,}86 - \theta) + j[1297{,}6 + 1455{,}7\sin(85{,}86° - \theta)] = P_3 + Q_3.$$

Iz ovih izraza zaključije se da su snage P_1, P_3, Q_1 i Q_3 sinusne (odnosno kosinusne) funkcije ugla θ.



Sl. 1.4b Kružni dijagram snaga voda koji odgovara tab. 1.4a



Sl. 1.4c Kružni dijagram snaga voda koji odgovara tab. 1.4b

c) Na osnovu podužnih pogonskih parametara voda:

$$\underline{z}_v = (0{,}0295 + j0{,}327)\ \Omega/\text{km} = 0{,}328\ \Omega/\text{km}\ \underline{/84{,}845^\circ};$$
$$\underline{y}_v = j3{,}47 \cdot 10^{-6}\ \text{S/km} = 3{,}47 \cdot 10^{-6}\ \text{S/km}\ \underline{/90^\circ},$$

nalaze se tzv. sekundarni parametri voda:

karakteristična impedansa $\underline{Z}_c$

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{z}_v}{\underline{y}_v}} = \sqrt{\frac{0{,}328}{3{,}47 \cdot 10^{-6}}}\ \underline{/-2{,}58^\circ} = 307{,}4\ \underline{/-2{,}58^\circ}\ \Omega = Z_c\ \underline{/\xi}$$

i koeficijent prostiranja $\underline{\gamma}$:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z}_v \underline{y}_v} = 1{,}0668 \cdot 10^{-3}\ \underline{/87{,}42^\circ}.$$

Pošto je:

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta,$$

to je koeficijent slabljenja α:

$$\alpha = 0{,}048 \cdot 10^{-3}\ 1/\text{km},$$

a fazni koeficijent β:

$$\beta = 1{,}066 \cdot 10^{-3}\ \text{rad/km}.$$

Talasna dužina je:

$$\lambda_t = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{1{,}066 \cdot 10^{-3}} = 5894{,}17\ \text{km},$$

a brzina prostiranja:

$$v = \lambda_t f = 5894{,}17 \cdot 50 = 294\,708{,}5\ \text{km/s}.$$

Jednačine voda koje povezuju fazni napon i faznu struju na bilo kojem mestu na vodu (x) sa faznim naponom i faznom strujom na kraju voda su:

$$\underline{U}_{fx} = U_{f2} \text{ch}\underline{\gamma}x + \underline{I}_{f2} \underline{Z}_c \text{sh}\underline{\gamma}x;$$
$$\underline{I}_{fx} = \frac{U_{f2}}{\underline{Z}_c} \text{sh}\underline{\gamma}x + \underline{I}_{f2} \text{ch}\underline{\gamma}x. \tag{8}$$

U jednačini (8) je uzeto:

$\underline{U}_{f2} = U_{f2} \underline{/0}.$

Za režim prenosa prirodne snage ima se:

$$U_{f2} = \underline{Z}_c \underline{I}_{f2}. \tag{9}$$

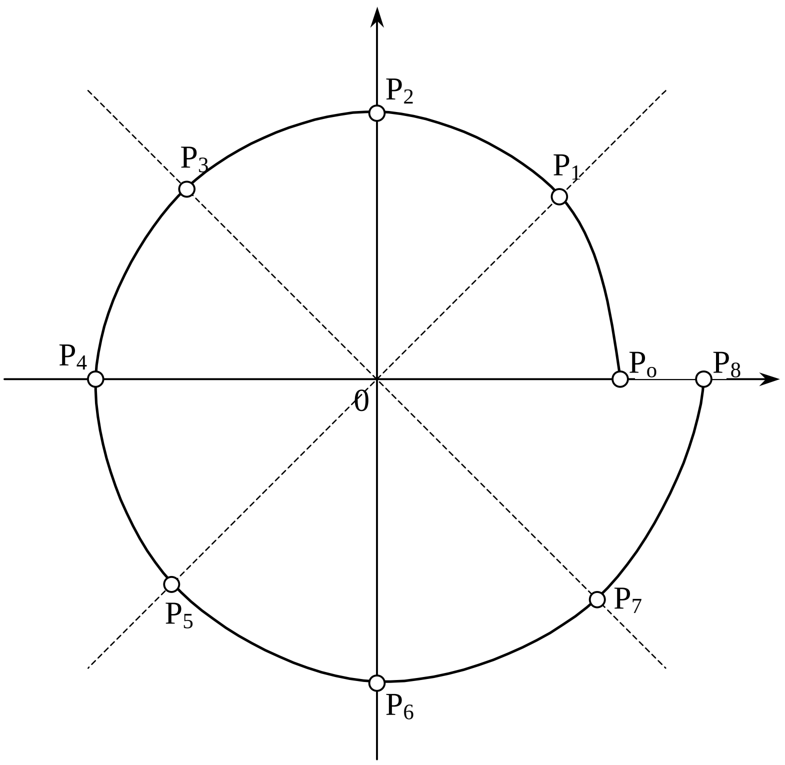
Posle smenjivanja (9) u (8) dobijaju se jednačine:

$$\underline{U}_{fx} = U_{f2}\left(\mathrm{ch}\underline{\gamma}x + \mathrm{sh}\underline{\gamma}x\right) = U_{f2}e^{\underline{\gamma}x} = U_{f2}e^{\alpha x}e^{\mathrm{j}\beta x};$$
$$\underline{I}_{fx} = \frac{U_{f2}}{\underline{Z}_c}e^{\underline{\gamma}x} = \frac{U_{f2}}{Z_c}e^{\alpha x}e^{\mathrm{j}\beta x}e^{-\mathrm{j}\xi}. \tag{10}$$

Prva od jednačina (10) u polarnim koordinatama predstavlja logaritamsku spiralu koja se sa rastom dužine voda x (αx raste pa raste i $e^{\alpha x}$) odmotava, što važi i za drugu relaciju u (10), s tim što su argumenti ovog kompleksnog izraza nešto manji (za argument kompleksne karakteristične impedanse $\underline{Z}_c$). Prva od jednačina (10) grafički je predstavljena na sl. 1.4d.

Za režim praznog hoda ($\underline{I}_{f2}$ = 0) relacije (8) postaju:

$$\underline{U}_{fx} = U_{f2}\mathrm{ch}\underline{\gamma}x = \frac{U_{f2}}{2}\left(e^{\underline{\gamma}x} + e^{-\underline{\gamma}x}\right) = \frac{U_{f2}}{2}\left(e^{\alpha x}e^{\mathrm{j}\beta x} + e^{-\alpha x}e^{-\mathrm{j}\beta x}\right);$$
$$\underline{I}_{fx} = \frac{U_{f2}}{2Z_c}\left(e^{\alpha x}e^{\mathrm{j}\beta x}e^{-\mathrm{j}\xi} - e^{-\alpha x}e^{-\mathrm{j}\beta x}e^{-\mathrm{j}\xi}\right). \tag{11}$$



Sl. 1.4d Grafička predstava prve od jednačina 10

Prvi sabirak u relacijama (11) predstavlja u polarnim koordinatama logaritamsku spiralu koja se odmotava, a drugi ($e^{-\alpha x}$ opada kada x raste) logaritamsku spiralu koja se zamotava oko koordinatnog početka. Karakteristične vrednosti dužine voda x odabraće se tako da proizvod βx (argument kompleksnih izraza) ima vrednosti $\pi/4$, $\pi/2$, itd. (tab. 1.4c).

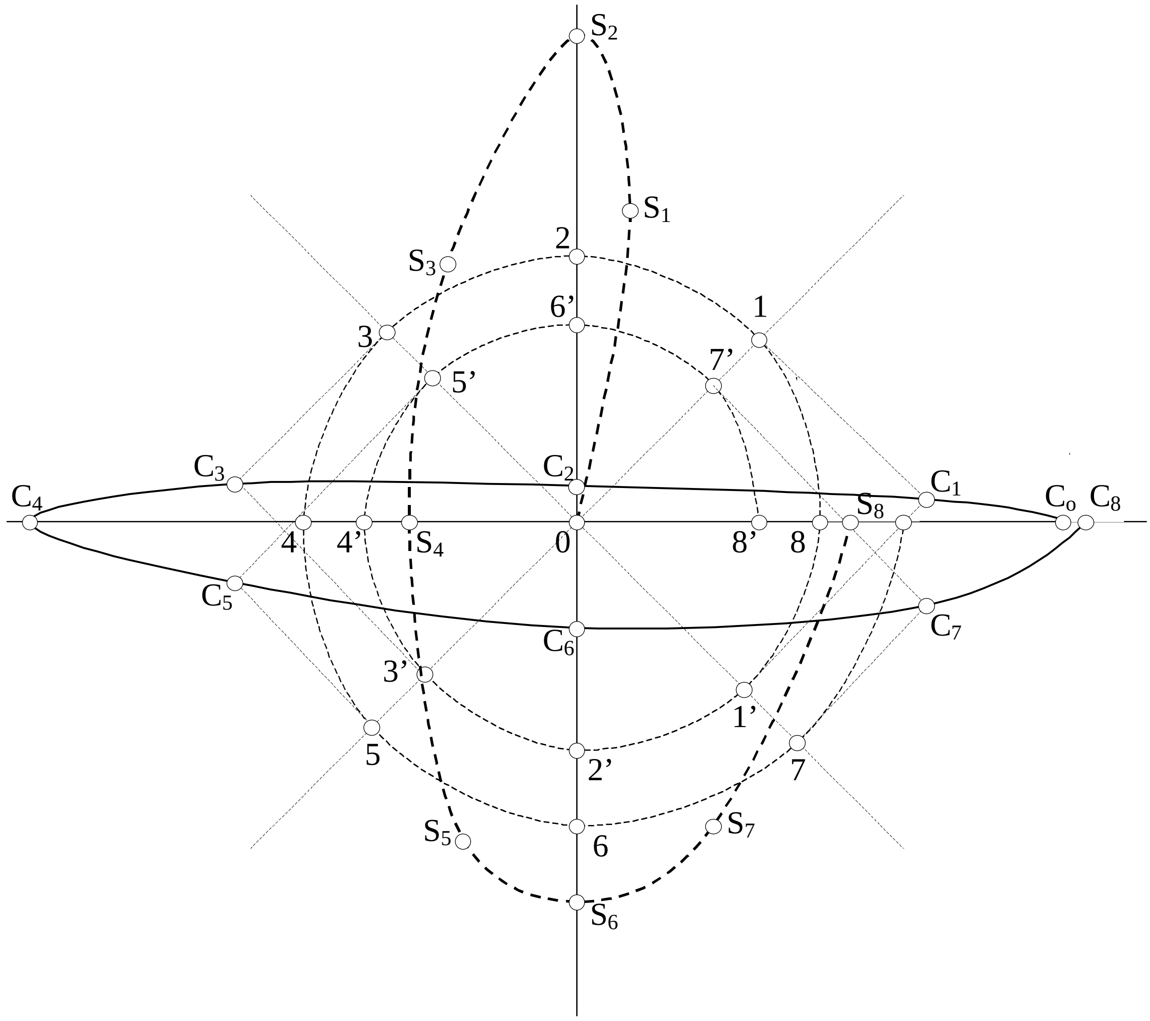
Tab. 1.4c Karakteristične vrednosti za crtanje logaritamske spirale sa sl. 1.4e

Tačka na dijagramu	Ugao βx (rad)	Dužina voda x (km)	$e^{\alpha x}$	$e^{-\alpha x}$
$C_o(P_o)$	0	0	1	1
$C_1(P_1)$	$\pi/4$	736,77	1,036	0,965
$C_2(P_2)$	$\pi/2$	1473,54	1,073	0,932
$C_3(P_3)$	$3\pi/4$	2210,3	1,112	0,899
$C_4(P_4)$	π	2947,08	1,152	0,868
$C_5(P_5)$	$5\pi/4$	3683,86	1,193	0,838
$C_6(P_6)$	$3\pi/2$	4420,63	1,236	0,809
$C_7(P_7)$	$7\pi/4$	5157,4	1,280	0,780
$C_8(P_8)$	2π	5894,17	1,327	0,754

Sl. 1.4d predstavlja logaritamsku spiralu za napon u režimu prenosa prirodne snage vodom na kome se imaju gubici aktivne snage (za idealizovani vod $\alpha = 0$ pa se zaključuje da logaritamska spirala degeneriše u krug). Na primer tačka P_1 predstavlja vektor napona na početku voda dugačkog 736,77 km kad se tim vodom prenosi prirodna snaga. Tačka P_o, u razmeri za napon određuje vektor napona na kraju tog voda pošto se tekuća koordinata x u relacijama (8) meri od kraja ka početku voda tako da se za $x = 0$ dobija napon na kraju voda. Tačka P_1 se crta prema koloni 4 u tab. 1.4c, odnosno poteg te tačke je za 1,036 puta veći od potega tačke P_o (a argument je $\pi/4$). Ako se izabere pogodna razmera za struju tada se vrlo sličan spiralni dijagram dobija i za struju samo s tom razlikom što argument potega $\overrightarrow{OP_1}$ ne bi bio 45° već $45° - \xi = 45° - 2{,}58° = 42{,}42°$.

Na sl. 1.4e nacrtane su logaritamske spirale za napon i struju za režim praznog hoda (relacije (11) i tab. 1.4c). Tačke C_1, C_2, …, C_8 predstavljaju krajeve fazora napona na rastojanju $\lambda_t/8$, $2\lambda_t/8$, … od kraja voda, a tačka C_o predstavlja napon na kraju voda. (Tačke 1, 2, ..., 8 spirale odgovaraju pozitivnim, a tačke 1', 2', ..., 8' negativnim vrednostima za x tako da se tačka C_3 nalazi kao $\overrightarrow{OC_3} = \overrightarrow{03} + \overrightarrow{03'}$). Poteg $\overrightarrow{OC_2}$ određuje napon na početku dalekovoda dugačkog 1473,54 km pri čemu je napon na njegovom otvorenom kraju $\overrightarrow{OC_o}$ (za idealizovani vod tačka C_2 bi pala u koordinatni početak i time se ima poznati teorijski slučaj Ferantijevog efekta pri kome se za napon jednak nuli na početku dalekovoda ima konačna vrednost napona na otvorenom kraju dalekovoda, odnosno beskonačno veliko povećanje napona).

Tačke S_1, S_2, ..., S_8 odgovaraju logaritamskoj spirali za struju koja se konstruiše na analogan način.



Sl. 1.4e Logaritamske spirale za napon i struju za režim praznog hoda (relacije (11) i tab. 1.4c)

❑

Zadatak 1.5

a) Ilustrovati fenomen Feranti-efekta, na primeru otvorenog vazdušnog voda 50 Hz, čiji je napon na početku U_{1o} = 400 kV, a njegova dužina L_v = 400 km, koristeći približnu relaciju $c_o^2 = 1/l_v c_v$, gde je $c_o \approx 300\,000$ km/s brzina prostiranja svetlosti u praznom prostoru, a l_v u H/km i c_v u F/km podužna induktivnost i kapacitivnost vazdušnog voda, respektivno.

b) Proračunati parametre simetrične ekvivalentne π-šeme vazdušnog voda dužine L_v = 400 km, čiji su podužni parametri r_v = 0,035 Ω/km; l_v = 1,1 mH/km; $g_v \approx 0$ i $c_v = 9{,}5 \cdot 10^{-9}$ F/km. Nacrtati šemu i u nju uneti numeričke vrednosti parametara.

c) Proračunati parametre nesimetrične ekvivalentne π-šeme regulacionog transformatora, čiji su osnovni podaci S_n = 100 MVA; m_T = 220 kV±10×1,5 %/10,5 kV; $u_{k(n=0)}$ = 12,5 %; $r_T \approx 0$; sprega Yd5, za položaje regulacionog prekidača n = +10; 0; -10, uz zanemarenje promene reaktanse namotaja pri promeni položaja regulacionog prekidača. Numeričke vrednosti izračunatih parametara svesti na napon 220 kV.

Rešenje:

Jednačina napona prenosnog voda u praznom hodu je:

$$\underline{U}_{f1o} = \underline{U}_{f2} \mathrm{ch} \underline{\gamma} L_v = \underline{U}_{f2} \mathrm{ch}(\alpha_o + j\beta_o) L_v = \underline{U}_{f2} (\mathrm{ch}\alpha \cos\beta + j \mathrm{sh}\alpha \sin\beta),$$

gde je: $\alpha = \alpha_o L_v$;

$$\beta = \beta_o L_v = \omega\sqrt{l_v c_v} L_v = \frac{\omega}{c} L_v = \frac{2\pi \cdot 50}{300\,000} \cdot 400\,[\mathrm{rad}] = \frac{2\pi \cdot 50}{300\,000} \cdot 400 \cdot \frac{180}{\pi}\,[°] = 24°.$$

Za $\alpha_o L_v \approx 0$ linijski napon na kraju voda $\underline{U}_2 = \sqrt{3}\underline{U}_{f2}$ je:

$$U_2 = \frac{U_{1o}}{\cos\beta_o L_v} = \frac{U_{1o}}{\cos 24°} = 1{,}095 \cdot 400 = 438 \text{ kV}.$$

Kako se ovde radi o 400 kV vodu, čiji je najviši dozvoljeni pogonski napon (određen stepenom izolacije) U_{max} = 420 kV (1,05U_n), jasno je da je stacionarno povišenje napona na kraju voda od 9,5 %, sa gledišta izolacije voda nedozvoljeno.

b) Pošto dužina voda premašuje 250 km, pri proračunu parametara šeme moraju se uzeti u obzir koeficijenti popravke k_R, k_X, k_B, sa kojima se množe osnovne vrednosti otpornosti ($R_v = r_v L_v$), reaktanse ($X_v = x_v L_v = l_v \omega L_v$) i susceptanse ($B_v = b_v L_v = c_v \omega L_v$) voda, koje iznose:

$$R_v = 0{,}035 \cdot 400 = 14\ \Omega;$$
$$X_v = 1{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot 400 = 138{,}16\ \Omega;$$
$$B_v^{ot} = 9{,}5 \cdot 10^{-9} \cdot 314 \cdot 400 = 1{,}1932 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{S};$$

S druge strane, koeficijenti popravke za gornje parametre ovde su:

$$k_R = 1 - \frac{B_v^{ot} X_v}{3} = 1 - \frac{1{,}1932 \cdot 10^{-3} \cdot 138{,}16}{3} = 0{,}945\,;$$

$$k_X = 1 - \frac{B_v^{ot} X_v}{6}\left(1 - \frac{R_v^2}{X_v^2}\right) = 1 - \frac{1{,}1932 \cdot 10^{-3} \cdot 138{,}16}{6}\left(1 - \frac{14^2}{138{,}16^2}\right) = 0{,}973\,;$$

$$k_B = 1 + \frac{B_v^{ot} X_v}{12} = 1 + \frac{1{,}1932 \cdot 10^{-3} \cdot 138{,}16}{12} = 1{,}0137\,,$$

tako da su vrednosti odgovarajućih parametara π-šeme:

$$R'_v = k_R R_v = 0{,}945 \cdot 14 = 13{,}23\,\Omega\,;$$

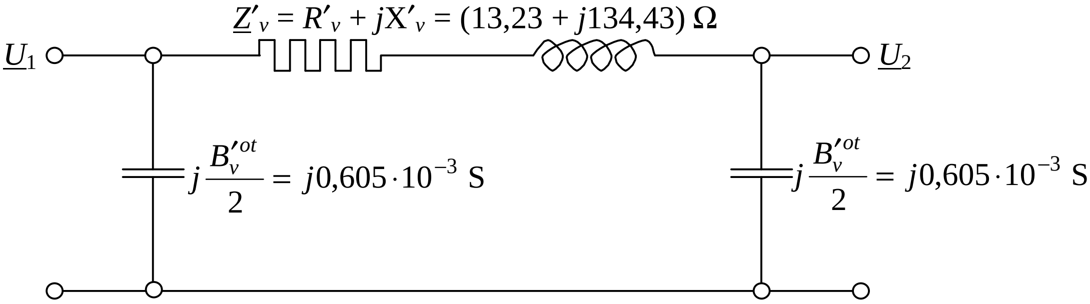
$$X'_v = k_X X_v = 0{,}973 \cdot 138{,}16 = 134{,}43\,\Omega\,;$$

$$B_v'^{ot} = k_B B_v^{ot} = 1{,}0137 \cdot 1{,}1932 \cdot 10^{-3} = 1{,}21 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{S}\,.$$

Takođe je:

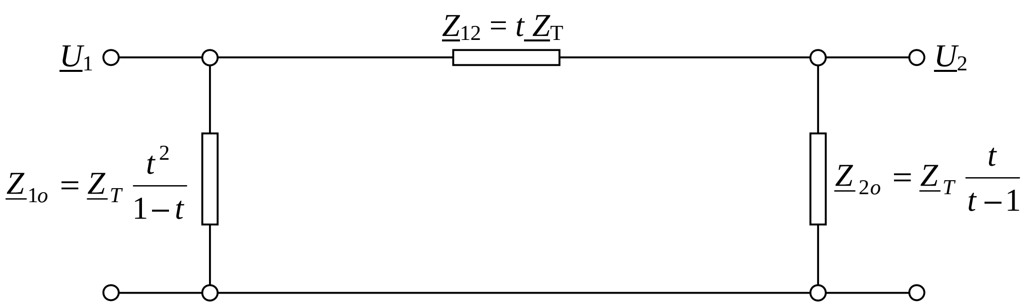
$$Q_{co} = B_v'^{ot} U_n^2 = 1{,}21 \cdot 10^{-3} \cdot 400^2 = 193{,}6\ \mathrm{MVAr}.$$

Ekvivalentna π-šema voda sa unetim vrednostima parametara data je na sl. 1.5a.



Sl. 1.5a Ekvivalentna π-šema voda iz zadatka 1.5b

c) Na sl. 1.5b prikazana je nesimetrična π-ekvivalentna šema regulacionog transformatora:



Sl. 1.5b Nesimetrična π-ekvivalentna šema regulacionog transformatora iz zadatka 1.5c

Vrednost impedanse transformatora za nominalni prenosni odnos je:

$$\underline{Z}_T = j\frac{u_k\,\%}{100}\frac{U_n^2}{S_n} = j\frac{12{,}5}{100}\frac{220^2}{100} = j60{,}5\,\Omega\,.$$

Vrednosti parametara šeme sa prethodne slike zavise od položaja regulacionog prekidača *n*.

Za n = 0 dobija se:

$$t = 1 + n\Delta t = 1\,;$$
$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_T = j60{,}5\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{1o} = \infty\,;$$
$$\underline{Z}_{2o} = \infty\,.$$

Za n = +10 dobija se:

$$t = 1 + n\Delta t = 1 + 10\cdot 0{,}015 = 1{,}15\,;$$
$$\underline{Z}_{12} = t\underline{Z}_T = 1{,}15\cdot \mathrm{j}60{,}5 = j69{,}575\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{1o} = \frac{t^2}{1-t}\underline{Z}_T = \frac{1{,}15^2}{1-1{,}15}\,j60{,}5 = -j533{,}43\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{2o} = \frac{t}{t-1}\underline{Z}_T = \frac{1{,}15}{1{,}15-1}\,j60{,}5 = j463{,}83\,\Omega\,.$$

Za n = -10 dobija se:

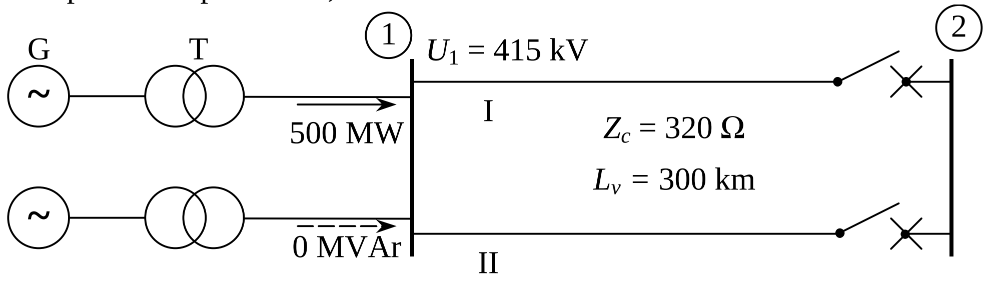
$$t = 1 + n\Delta t = 1 - 10\cdot 0{,}015 = 0{,}85:$$
$$\underline{Z}_{12} = t\underline{Z}_T = 0{,}85\cdot j60{,}5 = j51{,}425\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{1o} = \frac{t^2}{1-t}\underline{Z}_T = \frac{0{,}85^2}{1-0{,}85}\,j60{,}5 = j291{,}41{,}43\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{2o} = \frac{t}{t-1}\underline{Z}_T = \frac{0{,}85}{0{,}85-1}\,j60{,}5 = -j343{,}83\,\Omega\,.$$

❑

Zadatak 1.6

U normalnom pogonu dela elektroenergetskog sistema prikazanog na sl. 1.6a, generatorsko-transformatorski blokovi odaju 500 MW na sabirnice 1 pri radnom naponu $U_1 = 415$ kV. Ako se sabirnice 2 usled kvara isključe i ako se ems *E'* iza podužne tranzijentne reaktanse održava konstantnom u tranzijentnom periodu, izračunati koliki će se kvazistacionarni napon uspostaviti na otvorenom kraju dalekovoda I i II (dalekovode I i II uzeti kao idealizovane, sa raspodeljenim parametrima).

Podaci neophodni za proračune, dati su takođe na sl. 1.6a.



$S_{nG} = S_{nT} = 2\times300$ MVA $\quad U_{nG} = 15{,}75$ kV

$m_T = 400/15{,}75$ kV/kV $\quad X'_d\% = 30\ \%$ $\quad X_T\% = 14\ \%$

Sl. 1.6a Elektroenergetski sistem iz zadatka 1.6

Rešenje:

Parametri sistema svedeni na stranu voda su:

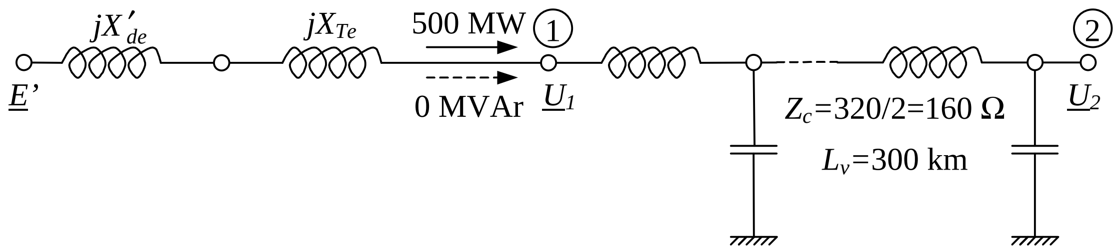
$$X'_d = \frac{X'_d\,\%}{100}\frac{U_{nG}^2}{S_{nG}}m_T^2 = \frac{30}{100}\cdot\frac{15{,}75^2}{300}\cdot\left(\frac{400}{15{,}75}\right)^2 = 160\ \Omega\,;$$

$$X_T = \frac{X_T\,\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{14}{100}\cdot\frac{400^2}{300} = 74{,}66\ \Omega\,;$$

$$X'_{de} = \frac{1}{2}X'_d = 80\ \Omega\,;$$

$$X_{Te} = \frac{1}{2}X_T = 37{,}33\ \Omega\,.$$

Ekvivalentna šema sistema data je na sl. 1.6b.



Sl. 1.6b Ekvivalentna šema sistema iz zadatka 1.6

Ems $\underline{E}'$ iza tranzijentne reaktanse biće sračunata iz podataka o stacionarnom režimu (uzimajući da je fazor linijskog napona na sabirnicama 1 $\underline{U}_{10} = U_{10}\ \underline{/0°}$):

$$\underline{E}' = U_{10} + \frac{PR+QX}{U_{10}} + j\frac{PX-QR}{U_{10}} = U_{10} + j\frac{PX}{U_{10}} = 415 + j\frac{500\cdot(80+37{,}3)}{415}$$
$$= (415 + j141{,}37)\,\text{kV} = 438{,}41\,\text{kV}\ \underline{/18{,}81°}$$

gde je $X = X'_{de} + X_{Te}$.

Ova ems ostaje konstantna i u delu zadatka u kome su krajevi 2 u praznom hodu.
Jednačine za idealizovani prenosni vod u praznom hodu ($\underline{I}_2 = 0$) su:

$$\underline{U}_1 = U_2\cos\lambda; \qquad \underline{U}_2 = U_2\ \underline{/0°};$$
$$\underline{I}_1 = j\frac{U_2}{Z_{ce}}\sin\lambda,$$

gde je $\lambda = \beta L_v$ električna ugaona dužina voda.

Veza između ems $\underline{E}'$ i napona $\underline{U}_1$ (u kvazistacionarnom stanju) je:

$$\underline{E}' = \underline{U}_1 + j(X_{Te} + X'_{de})\underline{I}_1 = \underline{U}_1 + j(X_{Te} + X'_{de})\cdot j\frac{U_2}{Z_{ce}}\sin\lambda$$
$$= U_2\cos\lambda - \frac{U_2}{Z_{ce}}(X_{Te} + X'_{de})\sin\lambda; \qquad \lambda = 0{,}06(°/km)\cdot 300(km) = 18°,$$

tako da je

$$|\underline{U}_2| = \frac{|\underline{E}'|}{\cos\lambda - \frac{X_{Te} + X'_{de}}{Z_{ce}}\sin\lambda} = \frac{438{,}41}{\cos 18° - \frac{117{,}33}{160}\sin 18°} = 605{,}16\,\text{kV}.$$

❑

Zadatak 1.7

Parametri simetričnog 220 kV trofaznog voda 50 Hz, su:

$r_v = 0{,}074\ \Omega/\text{km};\ l_v = 1{,}212\cdot 10^{-3}\ \text{H/km};\ c_v = 9{,}577\cdot 10^{-9}\ \text{F/km};\ L_v = 150\ \text{km}.$

a) Naći parametre simetričnog π-ekvivalenta voda.

b) Ako je vod otvoren i na predajnom kraju se održava napon U_1 = 220 kV, naći napon U_2 na prijemnom kraju.

c) Ako se otvoreni vod napaja iz generatora, prividne nominalne snage S_{nG} = 500 MVA, nominalnog napona U_{nG} = 20 kV, posredstvom generatorskog blok-transformatora prenosnog odnosa 20/220 kV/kV, iste prividne snage i ako se na strani višeg napona transformatora održava napon U_1 = 220 kV, proračunati taj napon, posle iznenadnog isključenja prekidača transformatora na strani 220 kV. Sinhrona reaktansa generatora je X_G% = 180 %, a reaktansa rasipanja transformatora X_T% = 14 %. U proračunu blok-transformator posmatrati kao idealni transformator (zanemariti otpornost voda, gubitke u bakru i gvožđu i struju praznog hoda transformatora).

***Rešenje*:**

a) Proračun elemenata ekvivalentne π-šeme voda (prikazane na sl. 1.7a):

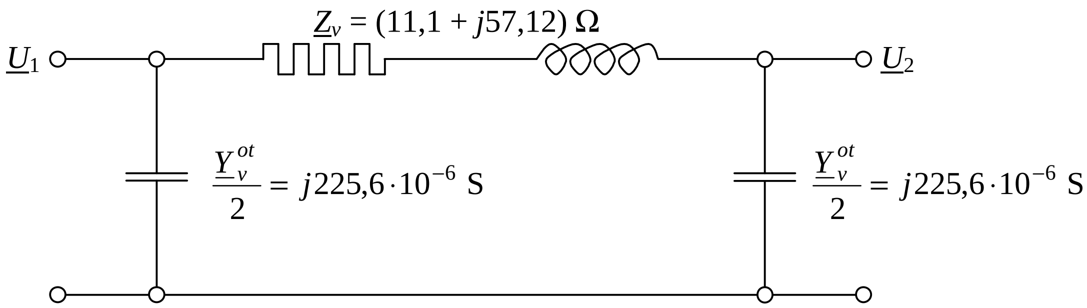
$$R_v = r_v L_v = 0{,}074\cdot 150 = 11{,}1\ \Omega;$$

$$X_v = l_v \omega_n L_v = 1{,}212\cdot 10^{-3}\cdot 2\pi\cdot 50\cdot 150 = 57{,}12\ \Omega;$$

$$\frac{\underline{Y}_v^{ot}}{2} = c_v\omega_n\frac{L_v}{2} = 9{,}577\cdot 10^{-9}\cdot 2\pi\cdot 50\cdot\frac{150}{2} = 0{,}2256\cdot 10^{-3}\ \text{S};$$

$$\underline{Z}_v = (R_v + jX_v) = (11{,}1 + 57{,}12)\ \Omega;$$

$$\frac{\underline{Y}_v^{ot}}{2} = j225{,}6\cdot 10^{-6}\ \text{S} \ \rightarrow\ 2\underline{Z}_v^{ot} = -j4432{,}6\ \Omega.$$



Sl. 1.7a π-ekvivalent voda iz zadatka 1.7

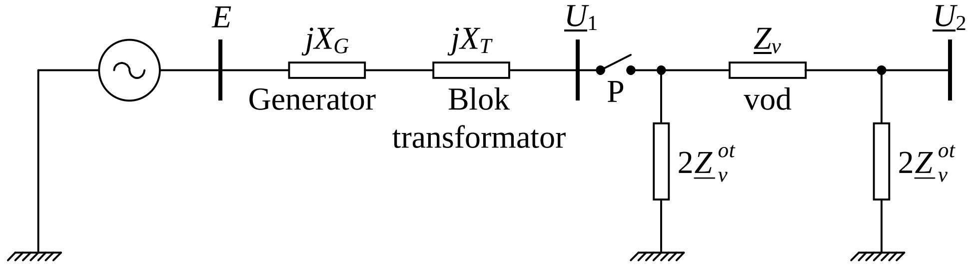
b) Pod pretpostavkom da je linijski napon na početku voda $U_1 = 220$ kV, pri otvorenom vodu na prijemnom kraju je:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1\frac{2\underline{Z}_v^{ot}}{\underline{Z}_v + 2\underline{Z}_v^{ot}} = 220\frac{-j4432{,}6}{11{,}1 + j57{,}12 - j4432{,}6} = -j\frac{220\cdot 4432{,}6}{11{,}1 - j4375{,}8} = 222{,}85\ \text{kV}\ \underline{/-0{,}14^\circ}$$

c) Ekvivalentna šema sistema, prikazana je na sl. 1.7b. Impedanse generatora i blok-transformatora svedene na nominalni napon voda su:

$$X_G = \frac{X_G\%}{100}\frac{U_{nG}^2}{S_{nG}}\left(\frac{U_{nTV}}{U_{nTN}}\right)^2 = \frac{180}{100}\cdot\frac{20^2}{500}\left(\frac{220}{20}\right)^2 = 174{,}24\,\Omega;$$

$$X_T = \frac{X_T\%}{100}\frac{U_{nTV}^2}{S_{nT}} = \frac{14}{100}\cdot\frac{220^2}{500} = 13{,}55\,\Omega.$$



Sl. 1.7b Ekvivalentna šema sistema iz zadatka 1.7

U stacionarnom stanju, pre nego što se isključi prekidač P, odnos fazora napona na početku voda ($\underline{U}_1$) i EMS generatora ($\underline{E}_{sv}$) svedene na stranu višeg napona blok-transformatora nalazi se iz relacije:

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{E}_{sv}} = \frac{\underline{Z}_v^{ekv}}{\underline{Z}_v^{eq} + j\left(X_G + X_T\right)},$$

gde je pri zanemarenju otpora voda:

$$\underline{Z}_v^{ekv} = \frac{-j\left(X_v - 2X_v^{ot}\right)\cdot 2X_v^{ot}}{X_v - 4X_v^{ot}} = -j\frac{\left(57{,}12 - 4432{,}6\right)\cdot 4432{,}6}{57{,}12 - 2\cdot 4432{,}6} = -j2201{,}93\,\Omega,$$

tako da je

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{E}_{sv}} = \frac{-j2201{,}93}{-j2201{,}93 + j\left(174{,}24 + 13{,}55\right)} = 1{,}093.$$

Primećuje se značajan porast napona (9,3 %) u smeru proticanja struje (Ferantijev efekat) zbog velike reaktanse generatora i transformatora. Na vodu je porast bio samo 2,85 kV, ili 1,3 % (zbog manje X_v). Prema tome, ako je napon na početku voda $\underline{U}_1 = 220\text{ kV}$ tada je svedena EMS generatora:

$$E_{sv} = \frac{U_1}{1{,}0933} = \frac{220}{1{,}0933} = 201{,}22\text{ kV}$$

odnosno

$$E = E_{sv}\frac{20}{220} = 201{,}22\frac{20}{220} = 18{,}29\text{ kV}$$

Posle isključenja prekidača P, napon na strani višeg napona blok-transformatora $\underline{U}_1$ i EMS $\underline{E}_{sv}$, svedena na istu stranu, jednaki su, tako da je $U_1 = E_{sv} = 201{,}22\text{ kV}$.

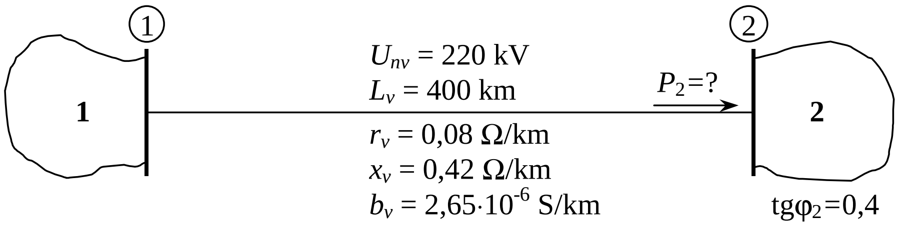
❑

Zadatak 1.8

Kolika se maksimalna (granična) aktivna snaga (ili granična prenosna snaga) može preneti iz suficitarnog proizvodno-potrošačkog područja (1) preko dalekovoda 220 kV, dužine 400 km, zadatih podužnih parametara na sl. 1.8a, u čisto pasivno potrošako područje (2) koje se sa raznim snagama može izdvojiti od ostalog aktivnog područja, ako je $tg\varphi_2 = 0,4$, a naponi ograničeni:

- na gore na kraju 1: $U_{1max} = 245$ kV i
- na dole na kraju 2: $U_{2min} = 198$ kV?

Napomena: Računati sa ekvivalentnom π-šemom i skalarnim koeficijentima popravke paramatara voda.



Sl. 1.8a Šema i parametri elektroenergetskog sistema iz zadatka 1.8

Rešenje:

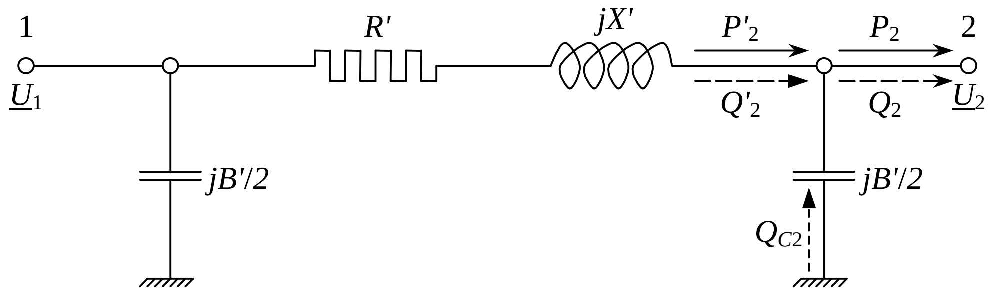
Skalarni koeficijenti popravke parametara voda ovde su:

$$k_R = 1 - \frac{b_v x_v L_v^2}{3} = 1 - \frac{2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 0,42 \cdot 400^2}{3} = 0,9406$$

$$k_X = 1 - \frac{b_v x_v L_v^2}{6} + \frac{b_v L_v (r_v L_v)^2}{6 x_v L_v} = 1 - \frac{2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 0,42 \cdot 400^2}{6} + \frac{2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot (0,8 \cdot 400)^2}{6 \cdot 0,42 \cdot 400}$$
$$= 0,9714;$$

$$k_B = 1 + \frac{b_v x_v L_v^2}{12} = 1 - \frac{2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 0,42 \cdot 400^2}{12} = 1,0148.$$

Ekvivalentna šema sistema prikazana je na sl. 1.8b.



Sl. 1.8b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 1.8a

Sa gornje šeme se nalazi veza modula napona U_1 i U_2:

$$U_1^2 = \left(U_2 + \frac{P_2' R' + Q_2' X'}{U_2} \right)^2 + \left(\frac{P_2' X' - Q_2' R'}{U_2} \right)^2 ,$$

gde je:

$$P_2 = P_2' ;$$
$$Q_2' = Q_2 - Q_{C2} = Q_2 - U_2^2 \frac{B'}{2} = P_2 \mathrm{tg}\varphi_2 - U_2^2 \frac{B'}{2} ;$$
$$R' = k_R r_v L_v = 0{,}9406 \cdot 0{,}08 \cdot 400 = 30{,}099\ \Omega ;$$
$$X' = k_X x_v L_v = 0{,}9714 \cdot 0{,}42 \cdot 400 = 163{,}195\ \Omega ;$$
$$\frac{B'}{2} = k_B b_v \frac{L_v}{2} = 1{,}0148 \cdot 2{,}65 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{400}{2} = 0{,}5378 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{S} ;$$
$$Q_{C2} = U_2^2 \frac{B'}{2} = 198^2 \cdot 0{,}5378 \cdot 10^{-3} = 21{,}084\ \mathrm{MVAr} ;$$

Naponi na krajevima π-ekvivalenta voda $\underline{U}_1$ i $\underline{U}_2$ na sl. 1.8b su međufazne veličine (fazor međufazne veličine u analizi se definiše sa istim faznim stavom kao fazor fazne veličine i sa modulom $\sqrt{3}$ puta većim). Posledica primene međufaznih napona na ekvivalentnoj šemi voda, sa parametrima po fazi, su trofazne snage koje su od primarnog interesa. Ekvivalenti su linearni modeli na kojima se korektno simuliraju prilike i sa međufaznim ili, ako se to posebno želi, sa faznim radnim veličinama.

Da bi se prenela maksimalna snaga potrebno je da naponi imaju vrednosti $U_1 = U_{1max}$ i $U_2 = U_{2min}$, pa je:

$$U_{1max}^2 = \left(U_{2min} + \frac{P_2' R' + Q_2' X'}{U_{2min}} \right)^2 + \left(\frac{P_2' X' - Q_2' R'}{U_{2min}} \right)^2 ,$$

odnosno:

$$245^2 = \left(198 + \frac{30{,}099 P_2 + (0{,}4 P_2 - 21{,}084) \cdot 163{,}195}{198} \right)^2 + \left(\frac{163{,}195 P_2 - (0{,}4 P_2 - 21{,}084) \cdot 30{,}099}{198} \right)^2 .$$

Sređivanjem gornjeg izraza dobija se kvadratna jednačina po P_2, čiji je oblik:

$$0{,}802 P_2^2 + 174{,}67 P_2 - 27391{,}1 = 0 .$$

Pozitivno rešenje gornje jednačine je fizički prihvatljivo i iznosi:

$$P_2 = 105{,}6\ \mathrm{MW} .$$

U slučaju kad se snaga Q_2 u celini kompenzuje (npr. sinhronim kompenzatorom ili baterijom kondenzatora vezanom u tački 2) ima se ($\mathrm{tg}\varphi_2 = 0$):

$$Q_2' = Q_2 - Q_{C2} = 0 - Q_{C2} = -Q_{C2} \,,$$

što daje:

$$U_{1\max}^2 = \left(U_{2\min} + \frac{P_2' R' - Q_{C2} X'}{U_{2\min}} \right)^2 + \left(\frac{P_2' X' + Q_{C2} R'}{U_{2\min}} \right)^2 ,$$

odnosno:

$$245^2 = \left(198 + \frac{30{,}099 P_2 - 21{,}084 \cdot 163{,}195}{198} \right)^2 + \left(\frac{163{,}195 P_2 + 21{,}084 \cdot 30{,}099}{198} \right)^2 .$$

Sređivanjem gornje jednačine dobija se kvadratna jednačina po P_2:

$$P_2^2 + 85{,}5 P_2 - 39422 = 0$$

Fizički prihvatljivo rešenje gornje jednačine iznosi:

$$P_2 = 160{,}35 \text{ MW} .$$

Zaključuje se da se aktivna snaga na prijemnom kraju bitno uvećava ako se izvrši potpuna kompenzacija reaktivne snage.

Granična prenosna snaga je znatno viša od granice stabilnosti koja bi se imala kad bi prijemni kraj bio aktivan (tj. sa priključenim elektranama) i kada moraju da se uvažavaju i impedanse ostalih elemenata uključivo i ekvivalentne generatore na oba kraja.

❑

Zadatak 1.9

Za deo elektroenergetskog sistema iz zadatka 1.1, na osnovu datih podataka, metodom bilansa snaga odrediti tokove aktivnih i reaktivnih snaga i gubitke, ako se u jaku mrežu prenosi snaga $\underline{S}_3 = (500 + j150)$ MVA.

Rešenje:

Radni režim je zadat na sabirnicama 3 ekvivalentne šeme sa sl. 1.1c i odgovarajuće radne veličine su:

$$U_{3sv} = U_3 \cdot m_{AT_{12}} = 200 \cdot \frac{400}{231} = 346{,}32 \text{ kV},$$

(sa U_{3sv} je označena veličina linijskog napona na sabirnicama 3 svedena na stranu 400 kV).

$$P_3 = 500 \text{ MW};$$
$$Q_3 = 150 \text{ MVAr}.$$

Proračun tokova aktivnih i reaktivnih snaga po metodu bilansa snaga (skalarni račun) vrši se tako da se postupno od elementa do elementa ekvivalentne šeme na sl. 1.1c računaju aktivna i reaktivna snaga, gubici i naponi, a zatim vrši bilansiranje po I Kirchoffovom zakonu.

Polazi se od zadatog režima na sabirnicama 3 i najpre se nailazi na rednu granu autotransformatora, čiji su gubici aktivne i reaktivne snage:

$$P_{Cu_{AT}}^{gub} = R_{ATe}\frac{P_3^2 + Q_3^3}{U_{3sv}^2} = 0{,}3635 \cdot \frac{500^2 + 150^2}{346{,}32^2} = 0{,}826 \text{ MW};$$
$$Q_{\gamma_{AT}}^{gub} = X_{ATe}\frac{P_3^2 + Q_3^3}{U_{3sv}^2} = 24 \cdot \frac{500^2 + 150^2}{346{,}32^2} = 54{,}53 \text{ MVAr}.$$

Da bi se našli gubici snage u otočnoj grani autotransformatora najpre se nalazi napon tačke 2:

$$\underline{U}_2 = U_{3sv} + \frac{P_3 R_{ATe} + Q_3 X_{ATe}}{U_{3sv}} + j\frac{P_3 X_{ATe} - Q_3 R_{ATe}}{U_{3sv}} =$$
$$= 346{,}32 + \frac{500 \cdot 0{,}3635 + 150 \cdot 24}{346{,}32} + j\frac{500 \cdot 24 - 150 \cdot 0{,}3635}{346{,}32} = (357{,}24 + j34{,}49) \text{ kV} =$$
$$= 358{,}9 \text{ kV } \underline{/5{,}5^\circ},$$

gde se pretpostavlja da je fazor napona $\underline{U}_3 = U_3\ \underline{/0^\circ}$

Sada su gubici u otočnoj grani autotransformatora:

$$P_{Fe_{AT}}^{gub} = G_{ATe} \cdot U_2^2 = 1{,}85 \cdot 10^{-6} \cdot 358{,}9^2 = 0{,}24 \text{ MW};$$
$$Q_{\gamma_{AT}}^{gub} = B_{ATe} \cdot U_2^2 = 7{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 358{,}9^2 = 0{,}97 \text{ MVAr}.$$

Postupkom bilansiranja nalaze se snage desno od tačke 2, a zatim reaktivna kapacitivna snaga (dakle, sa znakom ‘-‘) koju generišu kapacitivnosti voda. Ona iznosi:

$$\left(\frac{Q_v}{2}\right)_2 = \frac{B'_v}{2}U_2^2 = 0{,}45\cdot 10^{-3}\cdot 358{,}9^2 = 57{,}98\ \mathrm{MVAr}.$$

Zatim se ponovo bilansiranjem nalaze snage levo od tačke 2:

$$P_{2L} = 501{,}066\ MW;\ \ Q_{2L} = 205{,}5 - 57{,}98 = 147{,}52\ \mathrm{MVAr}\,,$$

i prema njima gubici aktivne i reaktivne snage na vodu:

$$P_v^{gub} = \frac{P_{2L}^2 + Q_{2L}^2}{U_2^2}R'_v = \frac{501{,}066^2 + 147{,}52^2}{358{,}9^2}\cdot 7{,}47 = 15{,}8\ \mathrm{MW}\,;$$

$$Q_v^{gub} = \frac{P_{2L}^2 + Q_{2L}^2}{U_2^2}X'_v = \frac{501{,}066^2 + 147{,}52^2}{358{,}9^2}\cdot 83{,}945 = 177{,}8\ \mathrm{MVAr}\,,$$

i napon tačke 1:

$$\underline{U}_1 = U_2 + \frac{P_{2L}R'_v + Q_{2L}X'_v}{U_2} + j\frac{P_{2L}X'_v - Q_{2L}R'_v}{U_2} = (403{,}83 + j114{,}13)\ \mathrm{kV} = 419{,}65\ \mathrm{kV}\ \underline{/15{,}8^\circ}\ .$$

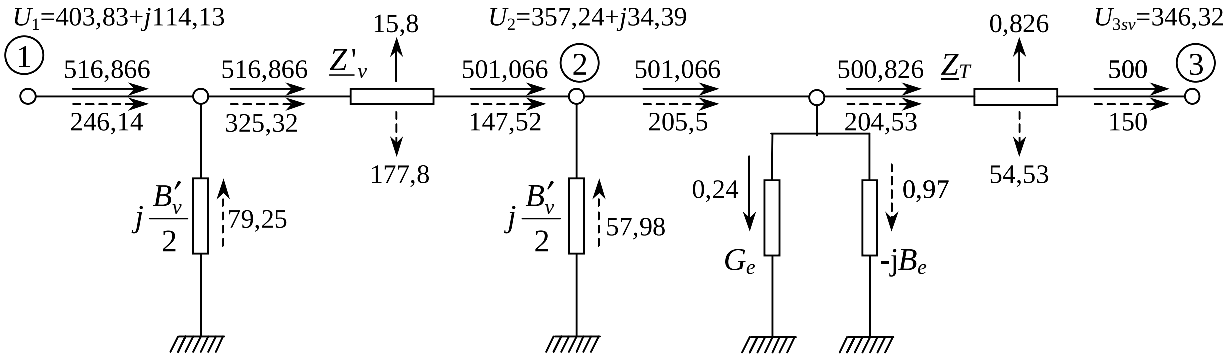
Na osnovu ovog napona se nalazi reaktivna (kapacitivna) snaga voda u tački 1:

$$\left(\frac{Q_v}{2}\right)_1 = \frac{B'_v}{2}U_1^2 = 0{,}45\cdot 10^{-3}\cdot 419{,}65^2 = 79{,}25\ \mathrm{MVAr}.$$

Ceo postupak bilansiranja daje se pregledno u tab. 1.9a, dok su tokovi snaga i naponska stanja ilustrovana na sl. 1.9a.

Tab. 1.9a Postupak bilansiranja snaga iz zadatka 1.9

Bilans snaga	Aktivna snaga (MW)	Reaktivna snaga (MW)
Zadate snage na sabirnicama 3	500	150
Gubici snage u rednoj grani autotransformatora	$+0{,}826$ 500,826	$+54{,}53$ 204,53
Gubici snage u otočnoj grani autotransformatora	$+0{,}24$ 501,066	$+0{,}97$ 205,5
Reaktivna (kapacitivna) snaga koju vod generiše u tački 2	$+0{,}0$ 501,066	$-57{,}98$ 147,52
Gubici snage u vodu	$+15{,}8$ 516,866	$+177{,}8$ 325,32
Reaktivna (kapacitivna) snaga koju vod generiše u tački 1	+0,0	$-79{,}25$
Snage koje ulaze u tačku 1	516,866	246,07



Sl. 1.9a Ilustracija tokova snaga i naponskih stanja u sistemu iz zadatka 1.9

❑

Zadatak 1.10

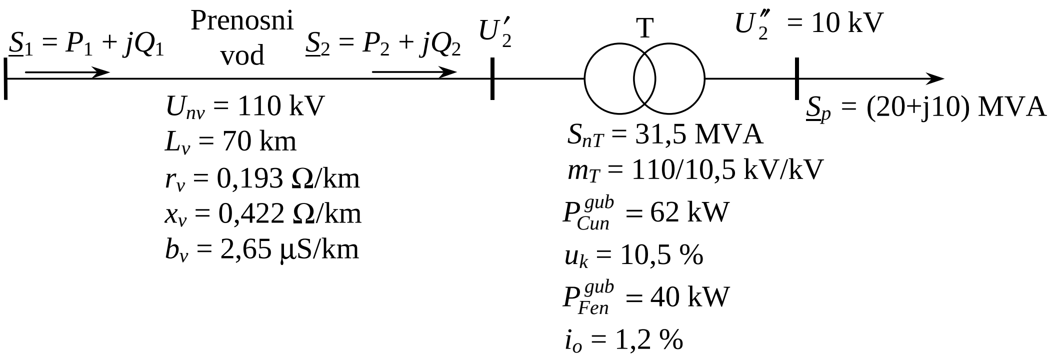
Za jednostavni radijalni prenosno-distributivni sistem sa sl. 1.10a, izračunati:

a) Parametre ekvivalentne šeme elemenata sistema (svedene na napon voda), koristeći simetrični π-ekvivalent za predstavu voda, a Γ-ekvivalent za predstavu transformatora.

b) Za poznato stanje na kraju prenosa, primenom metoda bilansa snaga, proračunati fazore napona, struja i snaga u karakterističnim tačkama, odnosno u pojedinim deonicama sistema. Proračunati i aktivne i reaktivne gubitke u elementima sistema i ukupno za ceo sistem.

c) Proizvodnje reaktivnih snaga, shodno π-ekvivalentu voda.

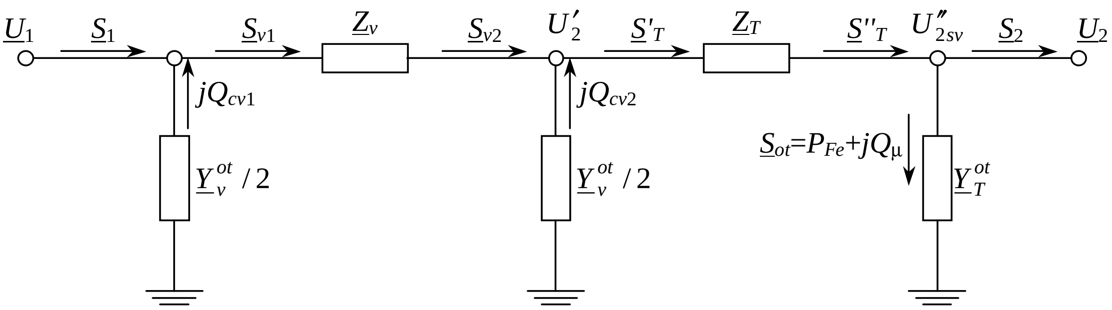
Parametri sistema neophodni za gornje proračune, dati su ispod sl. 1.10a



Sl. 1.10a Radijalni prenosni sistem i osnovni zadati podaci iz zadatka 1.10

Rešenje:

a) Ekvivalentna šema sistema prikazana je na sl. 1.10b.



Sl. 1.10b Ekvivalentna šema zadatog sistema

Proračun parametara elemenata, za ekvivalentnu šemu datu na prethodnoj slici (vod predstavljen sa π, a transformator sa obrnutim Γ-ekvivalentom):

$$R_v = L_v r_v = 70 \cdot 0{,}193 = 13{,}51\ \Omega\ ;$$

$$X_v = L_v x_v = 70 \cdot 0{,}422 = 29{,}54\ \Omega\ ;$$

$$\underline{Z}_v = (13{,}51 + j29{,}54)\ \Omega\ ;$$

$$G_v^{ot} = 0\ ;$$

$$B_v^{ot}/2 = \frac{1}{2}L_v b_v = \frac{70}{2}\cdot 2{,}65\cdot 10^{-6} = 92{,}75\cdot 10^{-6}\ \text{S} = 92{,}75\ \mu\text{S};$$

$$\underline{Y}_v^{ot}/2 = j92{,}75\cdot 10^{-6}\ \text{S};$$

$$R_T = P_{Cun}^{gub}\left(\frac{U_{nT}}{S_{nT}}\right)^2 = 62\cdot 10^{-3}\left(\frac{110}{31{,}5}\right)^2 = 0{,}75605\ \Omega;$$

$$Z_T = \frac{u_k\,\%}{100}\frac{U_{nv}^2}{S_{nT}} = \frac{10{,}5}{100}\frac{110^2}{31{,}5} = 40{,}33\ \Omega;$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{40{,}33^2 - 0{,}75605^2} = 40{,}323\ \Omega;$$

$$\underline{Z}_T = (0{,}75605 + j40{,}323)\ \Omega;$$

$$G_{Fe} = \frac{P_{Fen}^{gub}}{U_{nv}^2} = \frac{40\cdot 10^{-3}}{110^2} = 3{,}306\ \mu\text{S}; \qquad R_{Fe} = \frac{1}{G_{Fe}} = 302480\ \Omega;$$

$$B_\mu = \frac{i_o\,\%}{100}\frac{S_{nT}}{U_{nv}^2} = \frac{1{,}2}{100}\frac{31{,}5}{110^2} = 31{,}24\ \mu\text{S}; \qquad X_\mu = \frac{1}{B_\mu} = 32051\ \Omega;$$

$$\underline{Y}_T^{ot} = G_{Fe} - jB_\mu = (3{,}306 - j31{,}24)\ \mu\text{S}.$$

b) Napon na sekundarnoj strani transformatora, postavljen u realnu osu i sveden na stranu 110 kV je:

$$U''_{2sv} = U''_2\cdot m_T = 10\cdot\frac{110}{10{,}5} = 104{,}762\ \text{kV};$$

$$\underline{U}''_{2sv} = 104{,}762\ \text{kV}\ \underline{/0^\circ}.$$

Fazor fazne struje na kraju prenosa, odnosno na sekundarnoj strani transformatora je:

$$\underline{I}''_{2sv} = \left(\frac{\underline{S}_2}{\sqrt{3}\underline{U}''_{2sv}}\right)^* = \frac{(20 - j10)\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 104{,}762} = (110{,}22 - j55{,}1)\ \text{A}\ \underline{/-26{,}565^\circ}.$$

Dalje, snage P_{Fe}^{gub} i Q_μ^{gub} su:

$$P_{Fe}^{gub} = P_{Fen}^{gub}\left(\frac{U''_{2sv}}{U_{2n}}\right)^2 = 40\cdot\left(\frac{104{,}762}{110}\right)^2 = 36{,}28\ \text{kW};$$

$$Q_\mu^{gub} = \frac{i_o}{100}S_{nT}\left(\frac{U''_{2sv}}{U_{2n}}\right)^2 = 378\cdot\left(\frac{104{,}762}{110}\right)^2 = 342{,}86\ \text{kVAr},$$

ili

$$P_{Fe}^{gub} = G_{Fe}U''^2_{2sv} = 3{,}306\cdot 10^{-6}\cdot 104{,}762^2 = 0{,}03628\ \text{MW} = 36{,}28\ \text{kW};$$

$$Q_\mu^{gub} = B_\mu U''^2_{2sv} = 31{,}24\cdot 10^{-6}\cdot 104{,}762^2 = 0{,}34286\ \text{MW} = 342{,}86\ \text{kW}.$$

Snaga koja teče kroz transformator je:

$$\underline{S}''_T = (P_2 + P_{Fe}) + j(Q_2 + Q_\mu) = (20{,}03628 + j10{,}34286)\ \text{MVA}\ .$$

Napon na primarnoj strani transformatora, odnosno na kraju voda je:

$$\underline{U}'_2 = U''_{2sv} + \frac{R_T P''_T + X_T Q''_T}{U''_{2sv}} + j\frac{X_T P''_T - R_T Q''_T}{U''_{2sv}}$$
$$= 104{,}762 + \frac{0{,}75605 \cdot 20{,}03628 + 40{,}323 \cdot 10{,}34286}{104{,}762} +$$
$$+ j\frac{40{,}323 \cdot 20{,}03628 - 0{,}75605 \cdot 10{,}34286}{104{,}762} = 108{,}888 + j7{,}637 = 109{,}156\ \text{kV}\ \underline{/4{,}013^\circ}\ .$$

Gubici u rednoj grani transformatora su:

$$P_T^{gub} = R_T\left(\frac{S''_T}{U''_{2sv}}\right)^2 = 0{,}75605 \cdot \frac{20{,}03628^2 + 10{,}34286^2}{104{,}762^2} = 0{,}035\ \text{MW} = 35\ \text{kW}\ ;$$
$$Q_T^{gub} = X_T\left(\frac{S''_T}{U''_{2sv}}\right)^2 = 40{,}323 \cdot \frac{20{,}03628^2 + 10{,}34286^2}{104{,}762^2} = 1{,}867\ \text{MW} = 1867\ \text{kVAr}\ .$$

Snaga na ulazu u transformator (snaga na kraju voda) je:

$$\underline{S}'_T = \left(P''_T + P_T^{gub}\right) + j\left(Q''_T + Q_T^{gub}\right)$$
$$= (20{,}036 + 0{,}035) + j(10{,}343 + 1{,}867) = (20{,}071 + j12{,}21)\ \text{MVA}\ .$$

Proizvodnja reaktivne snage usled polovine kapacitivnosti koncetrisane na kraju voda je:

$$Q_{cv2}^{ot} = \frac{B_v^{ot}}{2} U_2'^2 = 92{,}75 \cdot 10^{-6} \cdot 109{,}156^2 = 1{,}105\ \text{MVAr}\ .$$

Snaga koja teče kroz vod i izaziva gubitke i pad napona je:

$$\underline{S}_{v2} = \underline{S}'_T - jQ_{cv2}^{ot} = 20{,}071 + j12{,}21 - j1{,}105 = (20{,}071 + j11{,}105)\ \text{MVA}\ .$$

Gubici u vodu su:

$$P_v^{gub} = R_v\left(\frac{S_{v2}}{U'_2}\right)^2 = 13{,}51 \cdot \frac{20{,}071^2 + 11{,}105^2}{109{,}156^2} = 0{,}5966\ \text{MW} = 596{,}6\ \text{kW}\ ;$$
$$Q_v^{gub} = X_v\left(\frac{S_{v2}}{U'_2}\right)^2 = 29{,}54 \cdot \frac{20{,}071^2 + 11{,}105^2}{109{,}156^2} = 1{,}3045\ \text{MW} = 1304{,}5\ \text{kVAr}\ .$$

Napon na početku voda je:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}'_2 + \frac{R_v P_{v2} + X_v Q_{v2}}{(\underline{U}'_2)^*} + j\frac{X_v P_{v2} - R_v Q_{v2}}{(\underline{U}'_2)^*} =$$

$$= 109{,}156\, e^{j4{,}013} + \frac{13{,}51 \cdot 20{,}071 + 29{,}54 \cdot 11{,}105}{109{,}156} e^{j4{,}013^\circ} +$$

$$+ j \frac{29{,}54 \cdot 20{,}071 - 13{,}51 \cdot 11{,}106}{109{,}156} e^{j4{,}013^\circ}$$

$$= (114{,}65 + j4{,}06) e^{j4{,}013^\circ} = 114{,}72 e^{j2{,}027^\circ} e^{j4{,}013^\circ}$$

$$= 114{,}72 \text{ kV } \underline{/6{,}04^\circ} = (114{,}08 + j12{,}07) \text{ kV} .$$

Proizvodnja reaktivne snage usled polovine kapacitivnosti koncetrisane na početku voda je:

$$Q_{cv1}^{ot} = \frac{B_v^{ot}}{2} U_1^2 = 92{,}75 \cdot 10^{-6} \cdot 114{,}72^2 = 1{,}22 \text{ MVAr} .$$

Kompleksna snaga koja teče kroz rednu impedansu, merena na početku voda je:

$$\underline{S}_{v1} = \underline{S}_{v2} + \underline{S}_v^{gub} = 20{,}071 + j11{,}105 + 0{,}5966 + j1{,}3045 = (20{,}668 + j12{,}41) \text{ MVA} .$$

Kompleksna snaga na ulazu u prenosni vod onda iznosi:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{v1} - \text{j}Q_{cv1}^{ot} = 20{,}668 + j12{,}41 - j1{,}22 = (20{,}668 + j11{,}19) \text{ MVA} .$$

Struja (fazna) na početku voda je:

$$\underline{I}_1 = \left(\frac{\underline{S}_1}{\sqrt{3}\underline{U}_1} \right)^* = \frac{20{,}668 - j11{,}19}{\sqrt{3} \cdot 114{,}72 \, \underline{/-6{,}04^\circ}} = \frac{23{,}5 \, \underline{/-28{,}43^\circ}}{\sqrt{3} \cdot 114{,}72 \, \underline{/-6{,}04^\circ}} = 118{,}28 \text{ A } \underline{/-22{,}39^\circ} .$$

c) Ukupna proizvodnja reaktivne snage usled otočnih kapacitivnosti voda je:

$$Q_{cv}^{ot} = Q_{cv1}^{ot} + Q_{cv2}^{ot} = 1{,}22 + 1{,}105 = 2{,}325 \text{ MVAr} ,$$

odnosno, njena prosečna vrednost po 100 km dužine voda iznosi:

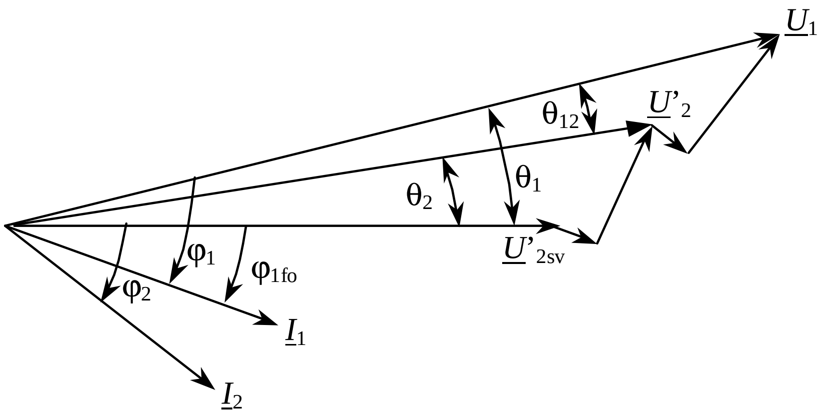
$$Q_{cv\ pod}^{ot} = \frac{2{,}3225}{0{,}7 \cdot 100} = 3{,}316 \text{ MVAr / 100 km} .$$

Dijagram fazora napona i struja voda prikazan je na sl. 1.10c.

Na sl. 1.10c vrednosti pojednih uglova iznose:

$\theta_1 = 6{,}04^\circ$; $\theta_2 = 4{,}013^\circ$; $\theta_{12} = 6{,}04^\circ - 4{,}013^\circ = 2{,}027^\circ$;

$\varphi_{1fo} = -22{,}39^\circ$; $\varphi_2 = -26{,}565^\circ$; $\varphi_1 = -22{,}39^\circ - 6{,}04^\circ = -28{,}43^\circ$.

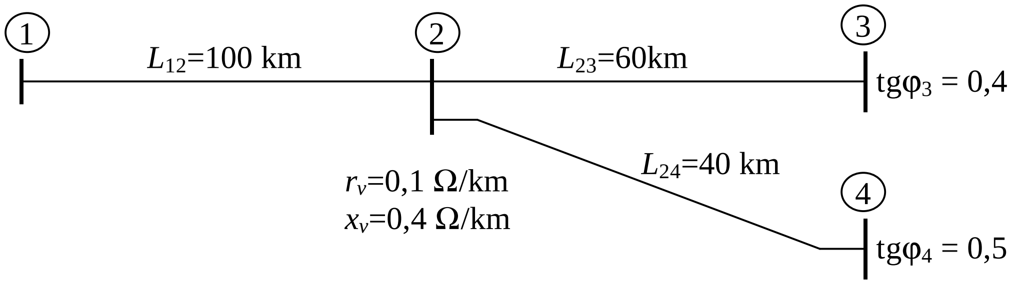


Sl. 1.10c Dijagram fazora napona i struja voda, iz zadatka 1.10

❑

Zadatak 1.11

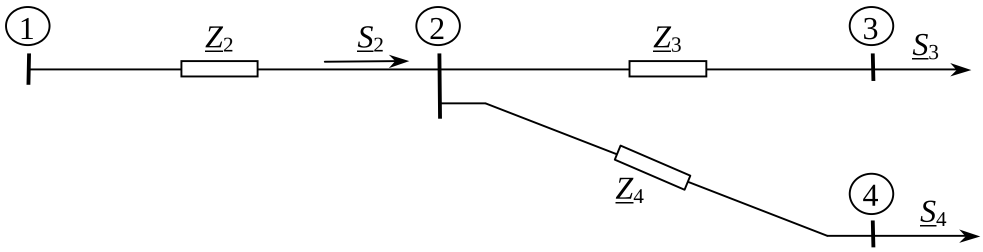
Dat je jednostavan elektroenergetski sistem, prikazan na sl. 1.11a. Odrediti maksimalne snage koje se mogu isporučiti potrošačkim područjima priključenim na sabirnice 3 i 4 ako naponi na vodovima ne smeju da izađu iz opsega (200÷240) kV. Kolika je u tom slučaju snaga na početku voda 1-2. U proračunu zanemariti poprečnu komponentu pada napona, a vodove predstaviti samo sa rednim impedansama. Podaci neophodni za proračune su dati na sl. 1.11a.



Sl. 1.11a Elektroenergetski sistem iz zadatka 1.11

Rešenje:

Ekvivalentna šema zadatog sistema data je na sl. 1.11b.



Sl. 1.11b Ekvivalentna šema sistema iz zadatka 1.11

Impedanse pojedinih grana sistema imaju vrednosti:

$$\underline{Z}_2 = (0{,}1 + j0{,}4)\cdot 100 = (10 + j40)\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_3 = (0{,}1 + j0{,}4)\cdot 60 = (6 + j24)\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_3 = (0{,}1 + j0{,}4)\cdot 40 = (4 + j16)\,\Omega\,.$$

U datom sistemu maksimalna snaga će se preneti u slučaju kada se na sabirnicama 3 i 4 ima minimalni napon (200 kV), a na sabirnicama 1 maksimalni napon (240 kV).

Na osnovu jednačine za pad napona u grani 2-3 može se odrediti zavisnost napona U_2 od snage P_3:

$$U_2 = U_3 + \frac{P_3R_3 + Q_3X_3}{U_3} = U_3 + \frac{P_3R_3 + 0{,}4P_3X_3}{U_3} = 200 + \frac{6 + 0{,}4\cdot 24}{200}P_3\,,$$

odakle je:

$$U_2 = 0{,}078P_3 + 200\,. \tag{1}$$

Na sličan način može se naći i zavisnost napona U_2 od snage P_4:

$$U_2 = U_4 + \frac{P_4R_4 + Q_4X_4}{U_4} = U_4 + \frac{P_4R_4 + 0{,}5P_4X_4}{U_4} = 200 + \frac{4 + 0{,}5\cdot 16}{200}P_4$$
$$= 0{,}06P_4 + 200\,. \tag{2}$$

Izjednačavanjem izraza (1) i (2) za napon U_2, dobija se za odnos snaga P_3 i P_4:

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{1}{1{,}3}, \text{ odnosno } P_4 = 1{,}3P_3\,.$$

Preko bilansa snaga i na osnovu poznatih odnosa između snaga P_3 i P_4 može se odrediti zavisnost snage P_2 od snage P_3:

$$P_2 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_3^2}R_3 + P_3 + \frac{P_4^2 + Q_4^2}{U_4^2}R_4 + P_4$$
$$= \frac{P_3^2 + (0{,}4P_3)^2}{U_3^2}R_3 + P_3 + \frac{(1{,}3P_3)^2 + (0{,}5\cdot 1{,}3P_3)^2}{U_4^2}R_4 + 1{,}3P_3$$
$$= \frac{P_3^2 + (0{,}4P_3)^2}{200^2}\cdot 6 + P_3 + \frac{(1{,}3P_3)^2 + (0{,}5\cdot 1{,}3P_3)^2}{200^2}\cdot 4 + 1{,}3P_3$$
$$= 385{,}25\cdot 10^{-6}P_3^2 + 2{,}3P_3\,. \tag{3}$$

Na analogan način dobija se zavisnost snage Q_2 od snage P_3:

$$Q_2 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_3^2}X_3 + Q_3 + \frac{P_4^2 + Q_4^2}{U_4^2}X_4 + Q_4$$
$$= \frac{P_3^2 + (0{,}4P_3)^2}{U_3^2}X_3 + 0{,}4P_3 + \frac{(1{,}3P_3)^2 + (0{,}5\cdot 1{,}3P_3)^2}{U_4^2}X_4 + 0{,}5\cdot 1{,}3P_3$$
$$= \frac{P_3^2 + (0{,}4P_3)^2}{200^2}\cdot 24 + 0{,}4P_3 + \frac{(1{,}3P_3)^2 + (0{,}5\cdot 1{,}3P_3)^2}{200^2}\cdot 16 + 0{,}5\cdot 1{,}3P_3$$
$$= 1541\cdot 10^{-6}P_3^2 + 1{,}05P_3 \tag{4}$$

Ako se sada jednačine (1), (3) i (4) uvrste u izraz za podužnu komponentu pada napona na grani 1-2, dobija se kvadratna jednačina u kojoj je jedina nepoznata veličina snaga P_3:

$$U_1 = U_2 + \left.\frac{P_2R_2 + Q_2X_2}{U_2}\right/\cdot U_2\,,$$

odakle je:

$$U_1U_2 = U_2^2 + P_2R_2 + Q_2X_2\,,$$

odnosno, posle odgovarajućih numeričkih manipulacija:

$$240\cdot(0{,}078P_3+200)=$$
$$=(0{,}078P_3+200)^2+\left(385{,}25\cdot10^{-6}P_3^2+2{,}3P_3\right)\cdot10+\left(1541\cdot10^{-6}P_3^2+1{,}05P_3\right)\cdot40,$$

odakle se dobija kvadratna jednačina po P_3:

$$P_3^2+1082{,}4782P_3-111768{,}53=0\,.$$

Fizički ostvarljivo rešenje gornje jednačine je:

$$P_3=94{,}93\ \text{MW}\,.$$

Na osnovu gornje vrednosti za snagu P_3, mogu se odrediti i ostale snage u datom sistemu:

$$Q_3=P_3\text{tg}\varphi_3=94{,}93\cdot0{,}4=37{,}97\ \text{MVAr}\,;$$
$$P_4=1{,}3P_3=1{,}3\cdot94{,}93=123{,}41\ \text{MW}\,;$$
$$Q_4=P_4\text{tg}\varphi_4=123{,}41\cdot0{,}5=61{,}7\ \text{MVAr}\,;$$
$$P_2=385{,}25\cdot10^{-6}P_3^2+2{,}3P_3=385{,}25\cdot10^{-6}\cdot94{,}93^2+2{,}3\cdot94{,}93=221{,}81\ \text{MW}\,;$$
$$Q_2=1541\cdot10^{-6}P_3^2+1{,}05P_3=1541\cdot10^{-6}\cdot94{,}93^2+1{,}05\cdot94{,}93=113{,}56\ \text{MVAr}\,.$$

Vrednost napona na sabirnicama 2 dobija se zamenom vrednosti snage P_3 u jednačinu (1), odakle je:

$$U_2=0{,}078\cdot94{,}93+200=207{,}4\ \text{kV}\,.$$

Radi određivanja snage na početku voda 1-2 potrebno je još odrediti aktivne i reaktivne gubitke u vodu 1-2. Njihove vrednosti dobijaju se iz izraza:

$$\underline{S}_{12}^{gub}=\frac{P_2^2+Q_2^2}{U_2^2}(R_2+jX_2)=\frac{221{,}81^2+113{,}56^2}{207{,}4^2}(10+j40)=(14{,}44+j57{,}74)\ \text{MVA}\,,$$

odakle je:

$$P_{12}^{gub}=14{,}44\ \text{MW}\,;\qquad Q_{12}^{gub}=57{,}74\ \text{MVAr}\,.$$

Konačno, vrednost kompleksne snage na početku voda 1-2 je:

$$\underline{S}_1=\underline{S}_2+\underline{S}_{12}^{gub}=221{,}81+j113{,}56+14{,}44+j57{,}74=(236{,}25+j171{,}3)\ \text{MVA}\,.$$

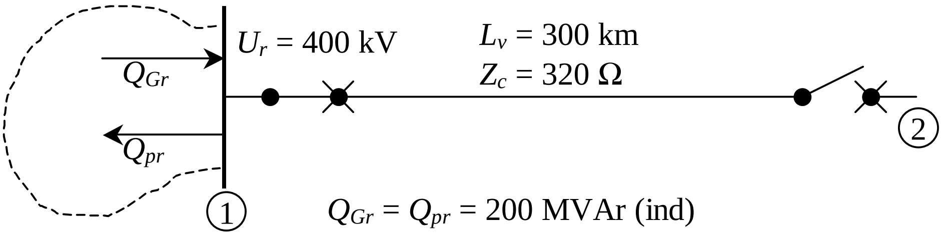
❑

Zadatak 1.12

Koliki će biti napon u novom stacionarnom stanju na sabirnicama 1, a koliki na kraju 2 dalekovoda 400 kV u praznom hodu koji se posle remonta priključuje prvo s jedne strane i to na proizvodno-potrošačko područje sa nagibom praktično linearne reaktivno-naponske statičke karakteristike od strane proizvodnje

$$-\frac{dQ_G/Q_{Gr}}{dU/U_r}=8\,,$$

dok se promena reaktivne snage potrošnje može zanemariti zahvaljujući delovanju lokalne regulacije napona pod opterećenjem. Posmatrati vod sa raspodeljenim parametrima, bez gubitaka.



Sl. 1.12a Šema dalekovoda iz zadatka 1.12

Rešenje:

U novom stacionarnom stanju pored generatorske reaktivne (induktivne) snage ima se i reaktivna snaga priključenog voda kao induktivna proizvodnja (što odgovara kapacitivnoj potrošnji) pa je bilans reaktivnih snaga na sabirnicama 1:

$$Q_G+Q_v=Q_p\,. \tag{1}$$

Zbog novog bilansa reaktivnih snaga usled priključenja voda promeniće se i napon na sabirnicama 1 za neku vrednost ΔU. Prema tome relacija (1) posle promene napona ima sledeći oblik:

$$Q_{Gr}=\frac{\partial Q_G}{\partial U}\Delta U+\frac{(U_r+\Delta U)^2}{Z_c}\mathrm{tg}\lambda=Q_{pr}+\frac{\partial Q_p}{\partial U}\Delta U. \tag{2}$$

U relaciji (2) ne mora da stoji parcijalni izvod s obzirom na pretpostavku da se učestanost kod promene reaktivnih snaga ne menja, a takođe je prema uslovu zadatka i izvod

$$\frac{\partial Q_p}{\partial U}=\frac{dQ_p}{dU}=0.$$

Pošto je pre priključenja voda bilo Q_{Gr} = Q_{pr} to relacija (2) postaje:

$$\frac{\partial Q_G}{\partial U}\Delta U+\frac{U_r^2}{Z_c}\mathrm{tg}\lambda+\frac{2U_r\Delta U}{Z_c}\mathrm{tg}\lambda+\frac{(\Delta U)^2}{Z_c}\mathrm{tg}\lambda=0. \tag{3}$$

Iz (3) se dalje dobija kvadratna jednačina po jedinoj nepoznatoj (*ΔU*):

$$\frac{\mathrm{tg}\lambda}{Z_c}(\Delta U)^2+\left(\frac{2U_r}{Z_c}\mathrm{tg}\lambda+\frac{dQ_G}{dU}\right)(\Delta U)+\frac{U_r^2}{Z_c}\mathrm{tg}\lambda=0.$$

Smenjujući u poslednju jednačinu zadate veličine kao i električnu ugaonu dužinu voda, koja za $\beta=0{,}06\ ^\circ/\mathrm{km}$ iznosi:

$$\lambda=\beta L=0{,}06\cdot 300=18^\circ,$$

dobija se:

$$1{,}015\cdot 10^{-3}\cdot(\Delta U)^2-3{,}19\cdot(\Delta U)+162{,}46=0\,, \qquad (4)$$

Kao fizički realno rešenje jednačine (4) uzima se:

$$\Delta U\cong 51{,}78\ \mathrm{kV},$$

tako da je napon na sabirnicama 1 po priključenju voda u praznom hodu:

$$U_1=U_r+\Delta U=400+51{,}78=451{,}78\ \mathrm{kV}.$$

S obzirom na međusobne odnose koeficijenata u jednačini (4) može se sasvim opravdano u prvoj približnosti raditi i samo sa linearnom jednačinom (zanemarenjem kvadratnog člana), tako da je:

$$3{,}19\Delta U=162{,}46\ \Rightarrow\ \Delta U=50{,}928\ \mathrm{kV}.$$

Ako je napon na sabirnicama 1, U_1 = 451,78 kV (što je nedopustivo visoka stacionarna vrednost), tada će se usled Ferantijevog efekta (proticanje kapacitivne struje punjenja voda kroz redne induktivnosti voda) imati porast napona na otvorenom kraju 2, tako da se na kraju 2 dobija vrednost:

$$U_2=\frac{U_1}{\cos\lambda}=\frac{451{,}78}{\cos 18^\circ}=475{,}03\ \mathrm{kV}\,,$$

koji je iznad dozvoljene vrednosti (određene stepenom izolacije) za vodove 400 kV, (iznosi 420 kV).

❑

Zadatak 1.13

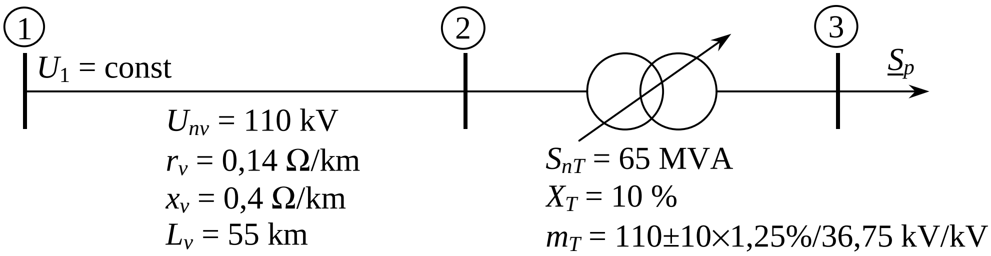
Radijalni sistem, prikazan na sl. 1.13a, napaja potrošačko područje, kod kojeg termički aparati, čiji je statički naponski koeficijent k_{PU} = 1,9 učestvuju u ukupnoj aktivnoj snazi sa 70 %, asinhroni motori, čiji su k_{PU} = 0,15 i k_{QU} = 1,7 učestvuju sa 25 % u ukupnoj aktivnoj snazi i sa 80 % u ukupnoj reaktivnoj snazi, dok ostali heterogeni potrošači imaju prosečne naponske koeficijente osetljivosti k_{PU} = 1,2 i k_{QU} = 1.

Pri položaju regulacionog prekidača transformatora n = +5, napon na sabirnicama 3 je U_3 = 35 kV, a snaga potrošačkog područja $\underline{S}_p$ = (35+j15) MVA.

a) Kolika je snaga potrošnje na sabirnicama 3 pri nominalnom odnosu transformacije transformatora ako se napon na sabirnicama 1 održava na konstantnoj vrednosti.

b) Odrediti snagu otočne kondenzatorske baterije koju je potrebno vezati na sabirnice 3 da bi se pri nepromenjenom naponu na sabirnicama 1 i položaju regulacionog prekidača transformatora n = +5 održavao napon na sabirnicama 3 dobijen iz prethodne tačke.

Napomena: U proračunu zanemariti poprečnu komponentu pada napona.



Sl. 1.13a Radijalni sistem prenosa i osnovni podaci iz zadatka 1.13

Rešenje:

a) Na osnovu zadatih podataka ukupni statički koeficijenti osetljivosti k_{PU}^{uk} i k_{QU}^{uk} mešovitog potrošačkog područja su:

$$k_{PU}^{uk} = 0{,}7 \cdot 1{,}9 + 0{,}25 \cdot 0{,}15 + 0{,}05 \cdot 1{,}2 = 1{,}4275\,;$$

$$k_{QU}^{uk} = 0{,}8 \cdot 1{,}7 + 0{,}2 \cdot 1 = 1{,}56\,.$$

Impedanse voda i transformatora svedene na naponski nivo 35 kV su:

$$\underline{Z}_T = j\frac{X_T\,\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = j\frac{10}{100}\frac{36{,}75^2}{65} = j2{,}078\,\Omega\,;$$

$$\underline{Z}_v = \underline{z}_v L_v = (0{,}14 + j0{,}4)\cdot 55 \cdot \left(\frac{36{,}75}{110}\right)^2 = (0{,}859 + j2{,}455)\,\Omega\,.$$

Na osnovu položaja otcepa regulacionog transformatora n = +5 dobijaju se sledeće vrednosti za nenominalni prenosni odnos i parametre ekvivalentne π-šeme regulacionog transformatora:

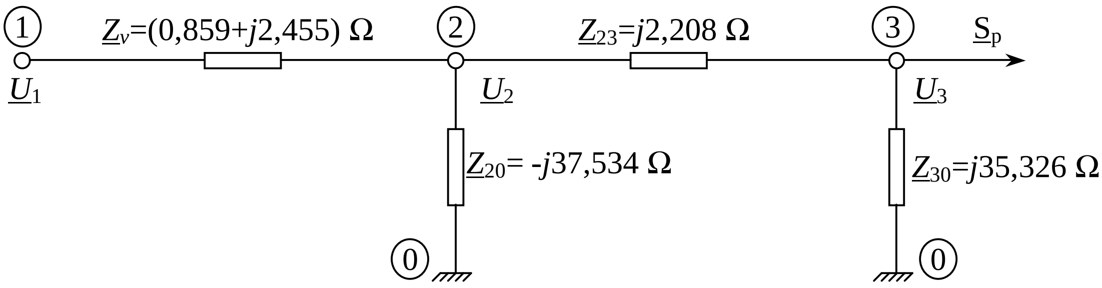
$$t = 1 + n\Delta t = 1 + 5 \cdot 0{,}0125 = 1{,}0625\,;$$

$$\underline{Z}_{20} = \frac{t^2}{1-t}\underline{Z}_T = -j37{,}534\,\Omega\,;$$

$$\underline{Z}_{23} = t\underline{Z}_T = j2{,}208\,\Omega\,;$$

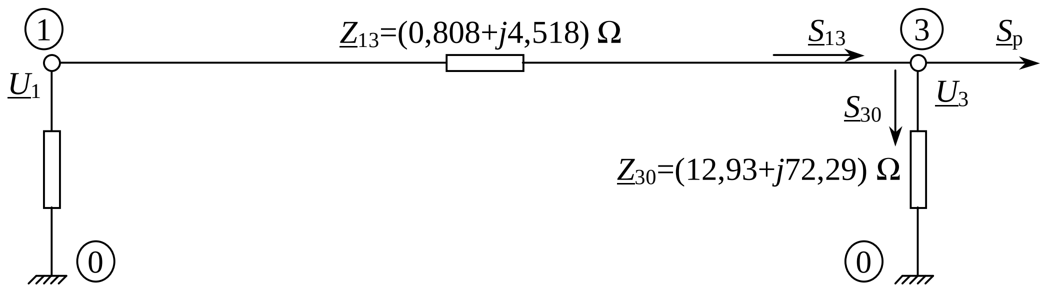
$$\underline{Z}_{30} = \frac{t}{t-1}\underline{Z}_T = j35{,}326\,\Omega\,.$$

Ekvivalentna šema sistema za dati radni režim prikazana je na sl. 1.13b.



Sl. 1.13b Ekvivalentna šema sistema

Transfiguracijom zvezde koju čine grane između čvorova 1-2, 2-3 i 2-0 u trougao 1-3-0 i ekvivalentovanjem dve paralelne grane 3-0 dobija se ekvivalentna šema na sl. 1.13c.



Sl. 1.13c Transfigurisana ekvivalentna šema sa sl. 1.13b

Bilansom snaga, za dati radni režim, može se odrediti napon na sabirnicama 1 čiji se moduo u datoj mreži održava na konstantnoj vrednosti.

Najpre se određuje snaga $\underline{S}_{30}$:

$$\underline{S}_{30} = \frac{U_3^2}{\underline{Z}_{30}^*} = \frac{35^2}{12{,}93 - j72{,}29} = (2{,}94 + j16{,}42)\,\text{MVA}\,,$$

a zatim, iz bilansa snaga u čvoru 3, izračunava se i snaga $\underline{S}_{13}$:

$$\underline{S}_{13} = \underline{S}_p + \underline{S}_{30} = 35 + j15 + 2{,}94 + j16{,}42 = (37{,}94 + j31{,}42)\,\text{MVA}\,.$$

Konačno napon na sabirnicama 1 iznosi:

$$U_1 = U_3 + \frac{P_{13}R_{13} + Q_{13}X_{13}}{U_3} = 35 + \frac{37{,}94 \cdot 0{,}808 + 31{,}42 \cdot 4{,}518}{35} = 39{,}93 \text{ kV} .$$

Po uslovu zadatka iz tačke a) ekvivalentna šema sistema za nominalni prenosni odnos transformacije regulacionog transformatora (kada su impedanse otočnih grana u π-ekvivalentu transforamtora beskonačne) data je na sl. 1.13d.

Sl. 1.13d Ekvivalentna šema sistema za nominalni prenosni odnos transformacije regulacionog transformatora

Zbog promene prenosnog odnosa regulacionog transformatora menja se i napon na sabirnicama 3, a takođe i snage potrošačkog područja. Zavisnosti aktivne i reaktivne snage potrošačkog područja od napona date su sledećim jednačinama:

$$P_3' = P_{3o} + P_{3o}k_{PU}^{uk}\frac{\Delta U}{U_{3o}} = 35 + 35 \cdot 1{,}4275\frac{U_3' - 35}{35} = 1{,}4275 \cdot U_3' - 14{,}9625 ; \tag{1}$$

$$Q_3' = Q_{3o} + Q_{3o}k_{QU}^{uk}\frac{\Delta U}{U_{3o}} = 15 + 15 \cdot 1{,}56\frac{U_3' - 35}{35} = 0{,}668 \cdot U_3' - 8{,}4 , \tag{2}$$

gde je U_3' napon na sabirnicama 3, za čiji se fazor pretpostavlja da se poklapa sa realnom osom.

Ako se prethodni izrazi uvrste u jednačinu za izračunavanje napona U_1 preko napona U_3' i pada napona između tačaka 1 i 3, dobija se kvadratna jednačina u kojoj je jedina nepoznata veličina napon na sabirnicama 3 U_3':

$$U_1 = U_3' + \frac{P_3'R_{13} + Q_3'X_{13}}{U_3'} , \tag{3}$$

odakle se dalje dobija jednačina

$$39{,}93 = U_3' + \frac{(1{,}4275U_3' - 14{,}9625) \cdot 0{,}859 + (0{,}668U_3' - 8{,}4) \cdot 4{,}533}{U_3'} ,$$

koja posle preuređenja postaje:

$$U_3'^2 - 35{,}6754U_3' - 50{,}915 = 0 .$$

Fizički ostvarljivo rešenje gornje jednačine je:

$$U_3' = 37{,}05 \text{ kV} .$$

Uvrštavanjem dobijene vrednosti za napon u izraze (1) i (2) dobijaju se tražene vrednosti za aktivnu i reaktivnu snagu potrošačkog područja:

$$P_3' = 1{,}4275 U_3' - 14{,}9625 = 37{,}93 \text{ MW}$$
$$Q_3' = 0{,}668 U_3' - 8{,}4 = 16{,}35 \text{ MVAr}$$

b) Ekvivalentna šema za režim definisan u tački b) je ista kao ekvivalentna šema koja je služila za određivanje napona na sabirnicama 1 (sl. 1.13c), s tom razlikom što se na sabirnicama 3 ima otočno vezana baterija kondenzatora. Vrednost snage $\underline{S}_{30}$ za ovaj radni režim je:

$$\underline{S}_{30} = \frac{U_3'^2}{\underline{Z}_{30}^*} = \frac{37{,}05^2}{12{,}93 - j72{,}29} = \left(3{,}29 + j18{,}4\right) \text{MVA} .$$

Kompleksna snaga koja teče po grani 1-3 je onda:

$$\underline{S}_{13} = \underline{S}_p + \underline{S}_{30} - jQ_{BK} = 41{,}22 + j\left(34{,}75 - Q_{BK}\right) \text{MVA} ,$$

odakle je:

$$P_3' = 41{,}22 \text{ MW} ; \qquad Q_3' = \left(34{,}75 - Q_{BK}\right) \text{MVAr} .$$

Uvrštavanjem gornjih izraza u jednačinu za pad napona (3) dobija se izraz u kome je jedina nepoznata veličina snaga baterije kondenzatora u izrazu za Q_3'. Zamena poznatih numeričkih vrednosti u jednačinu (3) daje linearnu jednačinu po Q_c:

$$39{,}93 = 37{,}05 + \frac{41{,}22 \cdot 0{,}808 + \left(34{,}75 - Q_{BK}\right) \cdot 4{,}518}{37{,}05} .$$

Iz gornje jednačine za snagu baterije kondenzatora dobija se vrednost:

$$Q_{BK} = 18{,}5 \text{ MVAr} .$$

❑

Zadatak 1.14

a) Odrediti statičke karakteristike osetljivosti potrošačkog područja na promene napona priključenog na sabirnice 4, sistema prikazanog na sl. 1.14a, na osnovu merenja napona i snage na tim sabirnicama za dva različita radna režima:

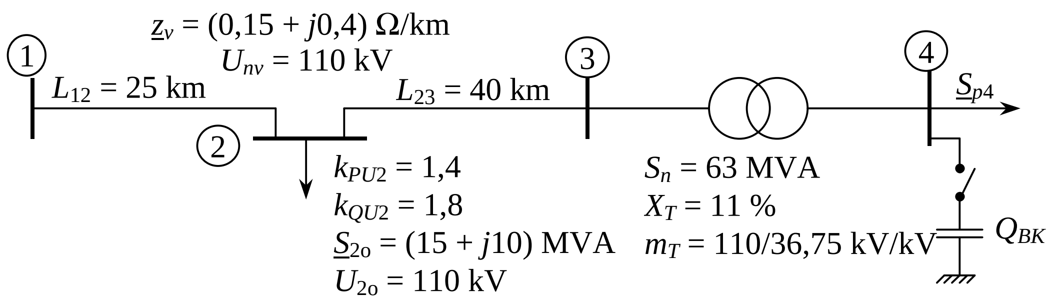
I merenje: $S'_{p4} = (42{,}6 + j21{,}5)\,\text{MVA}$ $\quad U'_4 = 35{,}2\ \text{kV}$,

II merenje: $S''_{p4} = (43{,}4 + j21{,}8)\,\text{MVA}$ $\quad U''_4 = 35{,}6\ \text{kV}$.

Pri određivanju statičkih koeficijenata regulacije, koristiti nelinearizovane modele potrošača:

$P = C_{PU} U^{k_{PU}}$, odnosno $Q = C_{QU} U^{k_{QU}}$.

b) Ako je pri otočnoj kompenzaciji (Q_{BK} = 10 MVAr) na sabirnicama 4, napon na njima iznosio U_4 = 36 kV, odrediti napon na sabirnicama 1 i snagu potrošačkog područja priključenog na sabirice 2. Statičke karakteristike potrošnje na sabirnicama 2 posmatrati kao linearizovane. U proračunu zanemariti poprečnu komponentu pada napona.



Sl. 1.14a Šema i osnovni podaci za elektroenergetski sistem iz zadatka 1.14

Rešenje:

a) Na osnovu izmerenih vrednosti, korišćenjem nelinearizovanih obrazaca koji povezuju aktivnu snagu i napon, dobijaju se naponski faktori osetljivosti preko jednačina:

$$42{,}6 = C_{PU} \cdot 35{,}2^{k_{PU}} \ ;$$
$$43{,}4 = C_{PU} \cdot 35{,}6^{k_{PU}} \ .$$

Deljenjem gornje dve jednačine dobija se izraz:

$$\frac{43{,}4}{42{,}6} = \left(\frac{35{,}6}{35{,}2}\right)^{k_{PU}} ,$$

iz poslednje jednačine se dobija vrednost za statički koeficijent promene aktivne snage sa naponom k_{PU}, dok iz jedne od prethodnih jednačina i vrednost za C_{PU}:

$$k_{PU} = 1{,}647\ ; \quad C_{PU} = 0{,}121\,\text{MW/kV} \ .$$

Na osnovu izračunatih vrednosti faktora k_{PU} i C_{PU} dobija se jednačina koja povezuje aktivnu snagu i napon:

$$P_{p4} = 0{,}121 \cdot U^{1{,}647} \qquad (1)$$

Na potpuno analogan način dobijaju se i vrednosti faktora k_{QU} i C_{QU} za reaktivnu snagu, odnosno jednačina koja povezuje reaktivnu snagu i napon:

$$21{,}5 = C_{QU} \cdot 35{,}2^{k_{QU}};$$
$$21{,}8 = C_{QU} \cdot 35{,}6^{k_{QU}};$$
$$\frac{21{,}8}{21{,}5} = \left(\frac{35{,}6}{35{,}2}\right)^{k_{QU}};$$

odakle je:

$$k_{QU} = 1{,}226; \quad C_{QU} = 0{,}273 \text{ MVAr/kV};$$
$$Q_{p4} = 0{,}273 \cdot U^{1{,}226}. \qquad (2)$$

b) Vrednosti impedansi pojednih grana svedene na naponski nivo 110 kV iznose:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{z}_v L_{12} = (3{,}75 + j10)\,\Omega;$$
$$\underline{Z}_{23} = \underline{z}_v L_{23} = (6 + j16)\,\Omega;$$
$$\underline{Z}_T = j\frac{X_T\,\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = j\frac{11}{100}\frac{110^2}{63} = j21{,}13\,\Omega.$$

Na osnovu vrednosti napona na sabirnicama 4: U_4 = 36 kV, korišćenjem jednačina (1) i (2), dobijaju se snage potrošačkog područja:

$$P_{p4} = 44{,}26 \text{ MW}; \qquad Q_{p4} = 22{,}09 \text{ MVAr}.$$

Radi određivanja vrednosti napona na sabirnicama 1 potrebno je uraditi bilans snaga u zadatoj mreži.

Pre svega svedena vrednost napona na sabirnicama 4 je:

$$U_{4sv} = U_4 m_T^2 = 36 \cdot \left(\frac{110}{36{,}75}\right)^2 = 107{,}76 \text{ kV}.$$

Aktivna i reaktivna snaga koje teku po grani 3-4 kod sabirnica 4 su:

$$P_4 = 44{,}26 \text{ MW}; \qquad Q_4 = 22{,}09 - Q_{BK} = 12{,}09 \text{ MVAr}.$$

Sa poznatim vrednostima snaga P_4 i Q_4, korišćenjem jednačine za napon U_2 preko napona U_4 i pada napona između tačaka 2 i 4, dobija se:

$$U_2 = U_4^{sv} + \frac{P_4 R_{24} + Q_4 X_{24}}{U_4^{sv}} = 107{,}76 + \frac{44{,}26 \cdot 6 + 12{,}09 \cdot 37{,}13}{107{,}76} = 114{,}39 \text{ kV}.$$

Na osnovu izračunate vrednosti napona U_2, preko linearizovanih statičkih karakteristika mogu se odrediti snage potrošačkog područja vezanog na sabirnice 2:

$$P_2 = P_{2o} + P_{2o} k_{PU2} \frac{\Delta U_2}{U_{2o}} = 15 + 15 \cdot 1{,}4 \cdot \frac{4{,}39}{110} = 15{,}84 \text{ MW};$$

$$Q_2 = Q_{2o} + Q_{2o} k_{QU2} \frac{\Delta U_2}{U_{2o}} = 10 + 10 \cdot 1{,}8 \cdot \frac{4{,}39}{110} = 10{,}72 \text{ MVAr}.$$

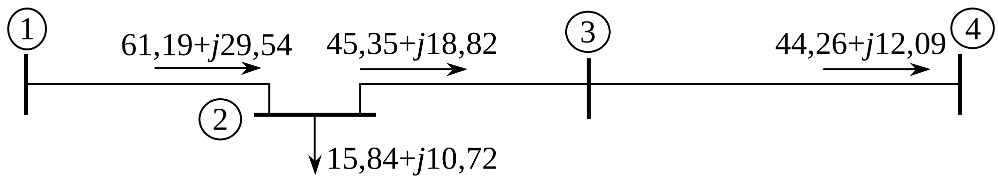
Dalje, kompleksni gubici snage u vodu između čvorova 2-4 su:

$$\underline{S}_{24}^{gub} = \frac{P_4^2 + Q_4^2}{U_4^2}\left(R_{24} + jX_{24}\right) = \frac{44{,}26^2 + 12{,}09^2}{107{,}76^2}\left(6 + j37{,}13\right) = \left(1{,}09 + j6{,}73\right) \text{MVA}.$$

Snaga koja teče po grani 1-2 kod čvora 2 je:

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_4 + \underline{S}_{24}^{gub} + \underline{S}_2;$$
$$= 44{,}26 + j12{,}09 + 1{,}09 + j6{,}73 + 15{,}84 + j10{,}72 = \left(61{,}19 + j29{,}54\right) \text{MVA}.$$

Bilans snaga u datoj mreži ilustrovan je na sl. 1.14b.



Sl. 1.14b Ilustracija bilansa snaga

Konačno napon na sabirnicama 1 dobija se preko vrednosti napona U_2 i pada napona između tačaka 1 i 2:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_{12}R_{12} + Q_{12}X_{12}}{U_2} = 114{,}39 + \frac{61{,}19 \cdot 3{,}75 + 29{,}54 \cdot 10}{114{,}39} = 118{,}98 \text{ kV}.$$

❑

Zadatak 1.15

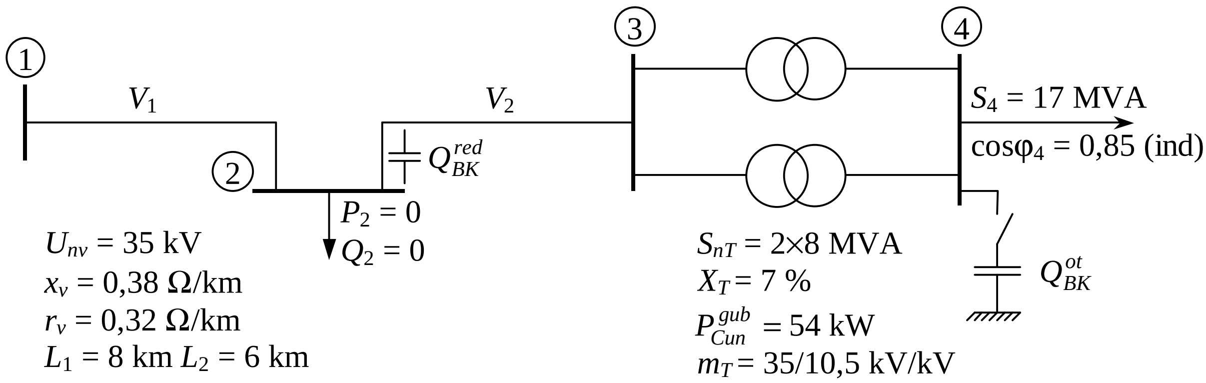
Za distributivnu mrežu prikazanu na sl. 1.15a (na kojoj su dati i svi osnovni podaci):

a) Odrediti snagu otočne kondenzatorske baterije koju treba ugraditi na sabirnice 4 da bi se napon na njima podigao sa 9,5 kV na 10,3 kV, pri čemu se napon U_1 održava na konstantnoj vrednosti.

b) Odrediti snagu redne baterije kondenzatora na deonici 2-3 kod sabirnica 2, koja bi proizvela isti efekat, za vrednost napona U_1 proračunatu u tač. a.

c) Koliki se potrošač u oba slučaja u novim radnim stanjima sa kompenzacijom može priključiti na sabirnice 2 pod pretpostavkom da je njegov faktor snage $\cos\varphi_2 = 1$ i da uključivanje tog potrošača neće promeniti napon na sabirnicama 2, tako da ne dođe do preopterećenja voda 1-2, ako je trajno dozvoljena struja (po fazi) svih vodova $I_{td} = 290$ A.

Napomena: U proračunu zanemariti poprečnu komponentu pada napona.



Sl. 1.15a Distributivna mreža iz zadatka 1.15

Rešenje:

Impedansa jednog transformatora svedena na naponski nivo 35 kV je:

$$\underline{Z}_T = \left(\frac{P_{Cun}^{gub}}{S_{nT}} \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} + j \frac{X_T\,\%}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \right) = \left(\frac{0{,}054}{8} \frac{35^2}{8} + j \frac{7}{100} \frac{35^2}{8} \right) = (1{,}034 + j10{,}72)\,\Omega\,.$$

Ekvivalentna vrednost impedanse dva paralelna transformatora je:

$$\underline{Z}_{Te} = \underline{Z}_T / 2 = (0{,}517 + j5{,}36)\,\Omega\,.$$

Vrednosti impedansi pojedinih vodova na naponskom nivou 35 kV su:

$$\underline{Z}_{v1} = (r_v + jx_v)L_{v1} = (0{,}32 + j0{,}38)\cdot 8 = (2{,}56 + j3{,}04)\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{v2} = (r_v + jx_v)L_{v2} = (0{,}32 + j0{,}38)\cdot 6 = (1{,}92 + j2{,}28)\,\Omega\,.$$

Ukupna impedansa između čvorova 1 i 4, imajući u vidu da su sabirnice 2 neopterećene, je:

$$\underline{Z}_{14} = \underline{Z}_{v1} + \underline{Z}_{v2} + \underline{Z}_{Te} = (5 + j10{,}68)\,\Omega\,.$$

a) U cilju određivanja snage otočne kondenzatorske baterije potrebno je najpre odrediti vrednost napona na sabirnicama 1 koji se u posmatranom sistemu održava konstantnim.

Vrednosti aktivne i reaktivne snage potrošačkog područja vezanog na sabirnice 4 su:

$$P_4 = S_4 \cos\varphi_4 = 17 \cdot 0{,}85 = 14{,}45 \text{ MW};$$
$$Q_4 = \sqrt{S_4^2 - P_4^2} = \sqrt{17^2 - 14{,}45^2} = 8{,}96 \text{ MVAr}.$$

Svedena vrednost napona na sabirnicama 4, na nivo napona vodova je:

$$U_{4sv} = U_4 m_T = 9{,}5 \frac{35}{10{,}5} = 31{,}67 \text{ kV}.$$

Konačno, vrednost napona na sabirnicama 1 se dobija iz jednačine:

$$U_1 = U_{4sv} + \frac{P_4 R_{14} + Q_4 X_{14}}{U_{4sv}} = 31{,}67 + \frac{14{,}45 \cdot 5 + 8{,}96 \cdot 10{,}68}{31{,}67} = 36{,}97 \text{ kV}.$$

Usled otočne kompenzacije na sabirnicama 4, napon se prema uslovu zadatka podiže na vrednost 10,3 kV, odnosno vrednost tog napona svedena na napon vodova je:

$$U'_{4sv} = U'_4 m_T = 10{,}3 \frac{35}{10{,}5} = 34{,}33 \text{ kV}.$$

Zamenom brojčanih vrednosti poznatih veličina u izrazu za napon U_1, za režim otočne kompenzacije, dobija se jednačina u kojoj je jedina nepoznata veličina snaga baterije kondenzatora:

$$U_1 = U'_{4sv} + \frac{P_4 R_{14} + \left(Q_4 - Q_{BK}^{ot}\right) X_{14}}{U'_{4sv}},$$

odnosno:

$$36{,}97 = 34{,}33 + \frac{14{,}45 \cdot 5 + \left(8{,}96 - Q_{BK}^{ot}\right) \cdot 10{,}68}{34{,}33}.$$

Iz poslednje jednačine dobija se tražena snaga otočne kondenzatorske baterije:

$$Q_{BK}^{ot} = 7{,}24 \text{ MVAr}.$$

b) Za režim sa rednom kompenzacijom zamenom brojčanih vrednosti u jednačinu za napon U_1 dobija se vrednost kapacitivne reaktanse redne baterije kondenzatora:

$$U_1 = U'_{4sv} + \frac{P_4 R_{14} + Q_4 \left(X_{14} - X_{BK}^{red}\right)}{U'_{4sv}},$$

odnosno:

$$36{,}97 = 34{,}33 + \frac{14{,}45 \cdot 5 + 8{,}96 \cdot \left(10{,}68 - X_{BK}^{red}\right)}{34{,}33},$$

odakle je:

$$X_{BK}^{red} = 8{,}63\,\Omega .$$

Snaga baterije rednih kondenzatora je onda:

$$Q_{BK}^{red} = X_{BK}^{red} \frac{P_4^2 + Q_4^2}{U_4^2} = 8{,}63 \frac{14{,}45^2 + 8{,}96^2}{34{,}33^2} = 2{,}12\ \mathrm{MVAr}.$$

Vidi se da je za isti efekat podizanja napona u otočne baterije kondenzatora potrebno ugraditi 7,24/2,12 = 3,42 puta veću snagu.

Za određivanje naponskog profila potrebno je odrediti napone pojedinih sabirnica. Napon na sabirnicama 1 već je ranije izračunat i iznosi 36,97 kV. Napon na sabirnicama 2 ispred baterije rednih kondenzatora je:

$$U_{2a} = U'_{4sv} + \frac{P_4\left(R_T + R_{v2}\right) + Q_4\left(X_T + X_{v2} - X_{BK}^{red}\right)}{U'_{4sv}}$$
$$= 34{,}33 + \frac{14{,}54 \cdot (0{,}517 + 1{,}92) + 8{,}96 \cdot (5{,}36 + 2{,}28 - 8{,}63)}{34{,}33} = 35{,}1\ \mathrm{kV}.$$

Napon kod sabirnica 2, iza baterije rednih kondenzatora je:

$$U_{2b} = U'_{4sv} + \frac{P_4\left(R_T + R_{v2}\right) + Q_4\left(X_T + X_{v2}\right)}{U'_{4sv}}$$
$$= 34{,}33 + \frac{14{,}54 \cdot (0{,}517 + 1{,}92) + 8{,}96 \cdot (5{,}36 + 2{,}28)}{34{,}33} = 37{,}35\ \mathrm{kV}.$$

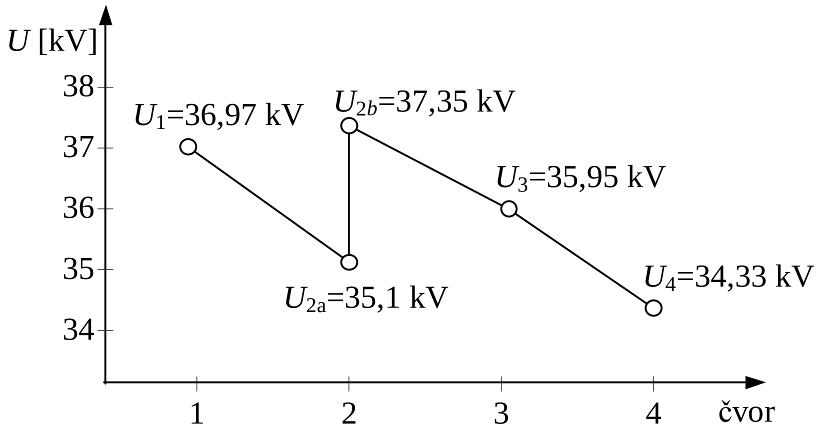
Napon na sabirnicama 3 je:

$$U_3 = U'_{4sv} + \frac{P_4 R_T + Q_4 X_T}{U'_{4sv}}$$
$$= 34{,}33 + \frac{14{,}54 \cdot 0{,}517 + 8{,}96 \cdot 5{,}36}{34{,}33} = 35{,}95\ \mathrm{kV}$$

Na sl. 1.15b nacrtan je naponski profil u sistemu.

c) Da bi se odredila dozvoljena vrednost snage potrošača koji se može priključiti na sabirnice 2 potrebno je uraditi bilans snaga od sabirnica 4 do sabirnica 2. Najpre će se proračun uraditi za slučaj otočne kompenzacije. Vrednost napona na sabirnicama 2 za taj režim je:

$$U_2 = U'_{4sv} + \frac{P_4\left(R_T + R_{v2}\right) + \left(Q_4 - Q_{BK}^{ot}\right)\left(X_T + X_{v2}\right)}{U'_{4sv}}$$
$$= 34{,}33 + \frac{14{,}54 \cdot \left(0{,}517 + 1{,}92\right) + \left(8{,}96 - 7{,}24\right) \cdot \left(5{,}36 + 2{,}28\right)}{34{,}33} = 35{,}74 \text{ kV} .$$



Sl. 1.15b Naponski profil u sistemu sa baterijom rednih kondenzatora

Kompleksni gubici snage u delu mreže od sabirnica 2 do sabirnica 4 su:

$$\underline{S}_{24}^{gub} = \left[R_T + R_{v2} + j\left(X_T + X_{v2}\right)\right] \frac{P_4^2 + \left(Q_4 - Q_{BK}^{ot}\right)^2}{U'^2_{4sv}}$$
$$= \left[0{,}517 + 1{,}92 + j\left(5{,}36 + 2{,}28\right)\right] \frac{14{,}45^2 + \left(8{,}96 - 7{,}24\right)^2}{34{,}33^2} = \left(0{,}438 + j1{,}373\right) \text{MVA} .$$

Imajući u vidu da je faktor snage potrošača vezanog na sabirnice 2: $\cos\varphi_2 = 1$, to je snaga koja teče po vodu 1-2 kod sabirnica 2:

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_4 - jQ_{BK}^{ot} + \underline{S}_{24}^{gub} + P_2$$
$$= \left(14{,}45 + j8{,}96\right) - j7{,}24 + 0{,}438 + j1{,}373 + P_2 = \left(14{,}89 + P_2 + j3{,}09\right) \text{MVA} .$$

Kako je dozvoljena vrednost struje po vodu 1-2, I_{td} data kao fazna vrednost to se može pisati jednačina:

$$\sqrt{\frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{U_2^2} \frac{1}{3}} = I_{td}$$

Zamenom brojčanih vrednosti pojedinih veličina u gornji izraz, dobija se dozvoljena snaga potrošača vezanog na sabirnice 2 (P_{2d}) iz jednačine:

$$\sqrt{\frac{\left(14{,}89 + P_{2d}\right)^2 + 3{,}09^2}{35{,}74^2} \frac{1}{3}} = 0{,}29 \text{ kA} ,$$

odakle je:

$$P_{2d} = 2{,}79 \text{ MW} .$$

Za slučaj redne kompenzacije potrebno je uraditi slične proračune kao i za slučaj otočne kompenzacije. Napon na sabirnicama 2 već je ranije izračunat i njegova vrednost iznosi:

$$U_2 = U_{2a} = 35{,}1 \text{ kV} .$$

Vrednost kompleksnih gubitaka snage na delu mreže od sabirnica 2 do sabirnica 4 je:

$$\underline{S}_{24}^{gub} = \left[R_T + R_{v2} + j\left(X_T + X_{v2} - X_{BK}^{red}\right)\right]\frac{P_4^2 + Q_4^2}{U_{4sv}'^2}$$

$$= \left[0{,}517 + 1{,}92 + j\left(5{,}36 + 2{,}28 - 8{,}63\right)\right]\frac{14{,}45^2 + 8{,}96^2}{34{,}33^2} = \left(0{,}598 - j0{,}243\right) \text{MVA}$$

Snaga koja teče po vodu 1-2 kod sabirnica 2 je onda:

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_4 + \underline{S}_{24}^{gub} + P_2 = \left(14{,}45 + j8{,}96\right) + 0{,}598 - j0{,}243 + P_2 = \left(15{,}05 + P_2 + j8{,}72\right) \text{MVA} .$$

Kao i kod otočne kompenzacije važi relacija:

$$\sqrt{\frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{U_2^2}\frac{1}{3}} = I_{td} .$$

Zamenom odgovarajućih brojčanih vrednosti dobija se dozvoljena snaga potrošača koja se može vezati na sabirnice 2, a da ne dođe do preopterećenja voda 1-2, iz jednačine:

$$\sqrt{\frac{\left(15{,}05 + P_{2d}\right)^2 + 8{,}72^2}{35{,}1^2}\frac{1}{3}} = 0{,}29 \text{ kA} ,$$

odakle je:

$$P_{2d} = 0{,}273 \text{ MW} .$$

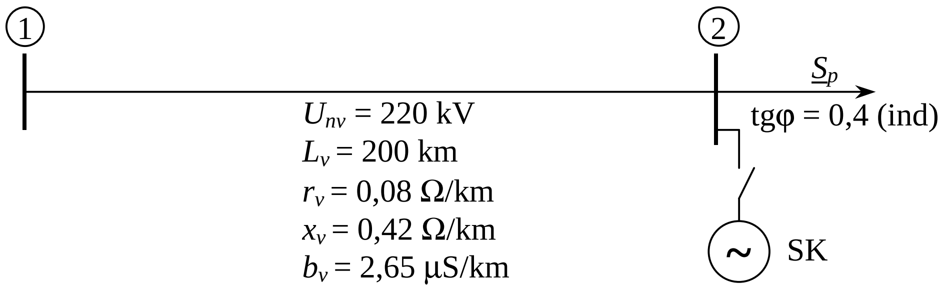
❑

Zadatak 1.16

Za deo elektroenergetskog sistema sa sl. 1.16a odrediti:

a) Maksimalnu aktivnu snagu koja se može isporučiti potrošačkom području (prema kriterijumu dozvoljenog pada napona), čiji je tgφ = 0,4 (ind), ako naponi na vodu ne smeju da izađu iz opsega $U_{nv} \pm 10$ %.

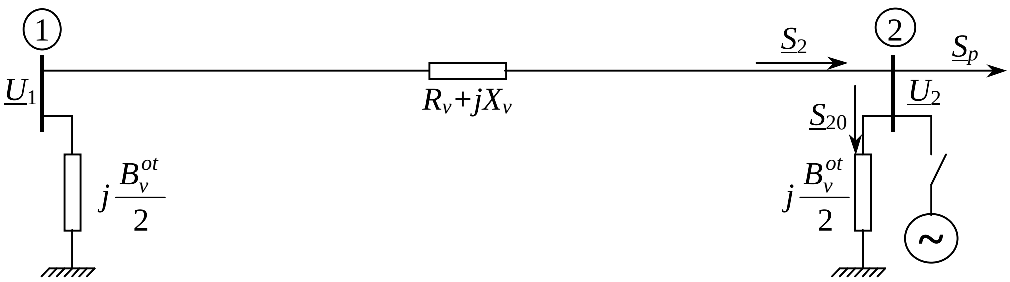
b) Koliku reaktivnu snagu treba da proizvodi sinhroni kompenzator priključen na sabirnice 2 da bi se do tog čvora mogla preneti dvostruka prirodna snaga voda, ako je $U_1 = U_{max}$, a $U_2 = 210$ kV.



Sl. 1.16a Šema i osnovni podaci za elektroenergetski sistem iz zadatka 1.16

Rešenje:

Ekvivalentna šema sistema sa sl. 1.16a prikazana je na sl. 1.16b.



Sl. 1.16b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 1.16a

a) Parametri ekvivalentne π-šeme voda su:

$$R_v = 16\,\Omega; \quad X_v = 84\,\Omega; \quad B_v^{ot}/2 = 2{,}65 \cdot 10^{-4}\ \text{S}.$$

Potrošačkom području se isporučuje maksimalna snaga ako se na sabirnicama 1 ima maksimalni napon, a na sabirnicama 2 minimalni napon, jer se tada ima najveći dozvoljeni pad napona koji pravi najveća preneta snaga. Vrednosti napona na sabirnicama 1 i 2 za takav radni režim su:

$$U_1 = U_{max} = 1{,}1 \cdot 220 = 242\ \text{kV}; \qquad U_2 = U_{min} = 0{,}9 \cdot 220 = 198\ \text{kV}.$$

Najpre će se uraditi bilans snaga za čvor 2. Pošto je dat tgφ potrošačkog područja to se njegova reaktivna snaga može predstaviti u funkciji aktivne snage kao:

$$\underline{S}_p = P_p + jQ_p = P_p + jP_p \mathrm{tg}\varphi = P_p + j0{,}4P_p \,.$$

Kompleksna snaga koja teče otočnom granom $\underline{S}_{20}$ je:

$$\underline{S}_{20} = U_2^2 \underline{Y}_{20}^* = U_2^2 \left(-jB_v^{ot}/2\right) = 198^2 \cdot \left(-j2{,}65 \cdot 10^{-4}\right) = -j10{,}4 \text{ MVA} \,,$$

tako da je ukupna snaga koja teče duž grane 1-2:

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_p + \underline{S}_{20} = P_p + j\left(0{,}4P_p - 10{,}4\right).$$

Izraz za kompleksni napon u čvoru 1 je:

$$\underline{U}_1 = U_2 + \frac{P_2 R_v + Q_2 X_v}{U_2} + j\frac{P_2 X_v - Q_2 R_v}{U_2} \,.$$

Po uslovu zadatka za $U_1 = U_{max}$ i $U_2 = U_{min}$ ima se da je $P_2 = P_p = P_{max}$. Ako se te vrednosti napona zamene u jednačinu za napon U_1, dobija se:

$$\underline{U}_{\max} = U_{\min} + \frac{P_{\max} R_v + \left(0{,}4P_{\max} - 10{,}4\right) X_v}{U_{\min}} + j\frac{P_{\max} X_v - \left(0{,}4P_{\max} - 10{,}4\right) R_v}{U_{\min}} \,.$$

Zamenom brojčanih vrednosti pojedinih veličina i nalaženjem modula leve i desne strane gornje jednačine dobija se kvadratna jednačina po nepoznatoj promenljivoj P_{max}:

$$242^2 = \left[198 + \frac{16P_{\max} + 84 \cdot \left(0{,}4P_{\max} - 10{,}4\right)}{198}\right]^2 + \left[\frac{84P_{\max} - 16 \cdot \left(0{,}4P_{\max} - 10{,}4\right)}{198}\right]^2$$

$$= \left[0{,}25P_{max} + 193{,}6\right]^2 + \left[0{,}392P_{max} + 0{,}84\right]^2 \,,$$

čija je konačna forma:

$$P_{max}^2 + 450{,}77P_{max} - 97512{,}95 = 0 \,.$$

Fizički realno rešenje gornje kvadratne jednačine je:

$$P_{max} = 159{,}73 \text{ MW} \,.$$

b) Prirodna snaga voda se računa preko jednačine:

$$P_{nat} = \frac{U_n^2}{Z_c} = \frac{U_n^2}{\sqrt{x_v / b_v}} = \frac{220^2}{\sqrt{0{,}42/2{,}65 \cdot 10^{-6}}} = 121{,}57 \text{ MW} \,.$$

Po uslovu zadatka aktivna snaga potrošačkog područja je:

$$P_p = 2P_{nat} = 243{,}14 \text{ MW}.$$

Reaktivna snaga potrošačkog područja je tada:

$$Q_p = P_p \text{tg}\varphi = 243{,}14 \cdot 0{,}4 = 97{,}256 \text{ MVAr}.$$

Reaktivna snaga koja teče otočnom granom $\underline{S}_{20}$ je:

$$\underline{S}_{20} = U_2^2 \underline{Y}_{20}^* = U_2^2 \left(-jB_v^{ot}/2\right) = 210^2 \cdot \left(-j2{,}65 \cdot 10^{-4}\right) = -j11{,}7 \text{ MVA}.$$

Kompleksna snaga koja teče granom 1-2 je sada:

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_p + \underline{S}_{20} - jQ_{sk} = 243{,}14 + j97{,}256 - j11{,}7 - \text{j}Q_{sk} = \left(243{,}14 + j\left(85{,}556 - Q_{sk}\right)\right) \text{MVA}.$$

Zamenom brojčanih vrednosti u jednačinu za pad napona u grani 1-2 i nalaženjem modula leve i desne strane dobija se kvadratna jednačina po nepoznatoj snazi sinhronog kompenzatora Q_{sk}:

$$242^2 = \left[210 + \frac{16 \cdot 243{,}14 + 84 \cdot \left(85{,}556 - Q_{sk}\right)}{210}\right]^2 + \left[\frac{84 \cdot 243{,}14 - 16 \cdot \left(85{,}556 - Q_{sk}\right)}{210}\right]^2$$
$$= \left[262{,}75 - 0{,}4Q_{sk}\right]^2 + \left[90{,}74 + 0{,}076Q_{sk}\right]^2,$$

čija je konačna forma:

$$Q_{sk}^2 - 1184{,}56Q_{sk} + 112830{,}58 = 0.$$

Fizički realno rešenje gornje kvadratne jednačine je:

$$Q_{sk} = 104{,}46 \text{ MVAr}.$$

❑

Zadatak 1.17

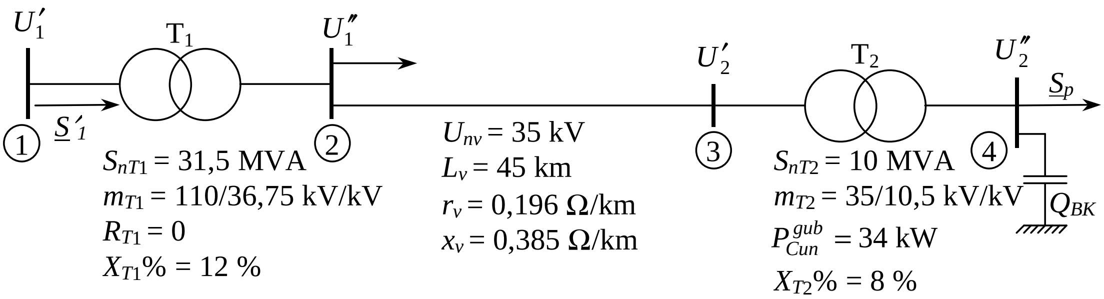
Na sl. 1.17a je dat deo radijalnog distributivnog sistema koji napaja potrošačko područje snage $\underline{S}_p$ = (4+*j*7) MVA vezano na sabirnice 4.

a) Naći snagu otočne kondenzatorske baterije priključene na sabirnicama potrošača 4, ako je napon na primaru transformatora T_1 $U_1' = 111{,}1\ \mathrm{kV} = \mathrm{const}$, transformator opterećen snagom od $\underline{S}_1' = (20 + j15)\ \mathrm{MVA}$, a zahteva se da se na sabirnicama 4 obezbedi napon $U_2'' = 10{,}5\ \mathrm{kV}$.

b) Naći napone U_1'', U_2' za definisane pogonske režime pre i posle kompenzacije.

c) Naći gubitke aktivne snage na vodu i transformatoru T_2 pre i posle kompenzacije i snage koje teku vodom, merene na njegovom početku.

Sve parametre sistema svesti na napon voda. Računati samo sa podužnim padovima napona.



Sl. 1.17a Šema i osnovni podaci za radijalni distributivni sistem iz zadatka 1.17

Rešenje:

a) Vrednosti impedansi pojedinih elemenata sistema svedene na naponski nivo voda su:

$$X_{T1} = \frac{X_{T1}\%}{100}\frac{U_{nT1}^2}{S_{nT1}} = \frac{12}{100}\frac{36{,}75^2}{31{,}5} = 5{,}145\ \Omega; \qquad R_{T1} = 0\ \Omega;$$

$$R_v = r_v L_v = 0{,}196 \cdot 45 = 8{,}82\ \Omega;$$

$$X_v = x_v L_v = 0{,}385 \cdot 45 = 17{,}325\ \Omega;$$

$$R_{T2} = P_{Cun}^{gub}\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}^2} = 0{,}034\frac{35^2}{10^2} = 0{,}42\ \Omega;$$

$$X_{T2} = \frac{X_{T2}\%}{100}\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}} = \frac{8}{100}\frac{35^2}{10} = 9{,}8\ \Omega.$$

Svedena vrednost napona primara transformatora T_1 je:

$$U_{1sv}' = U_1'\frac{1}{m_{T1}} = 111{,}1\frac{36{,}75}{110} = 37{,}12\ \mathrm{kV}.$$

Na osnovu datih podataka može se odrediti napon U_1'' preko formule:

$$U_1''=U_1'-\frac{P_1'R_{T1}+Q_1'X_{T1}}{U_1'}=37{,}12-\frac{20\cdot 0+15\cdot 5{,}145}{37{,}12}=35{,}04\ \text{kV}\ .$$

Za režim kompenzacije napon na sekundaru transformatora T_2 jednak je 10,5 kV, odnosno njegova svedena vrednost je:

$$U_{2sv}''=U_2''m_{T2}=10{,}5\frac{35}{10{,}5}=35\ \text{kV}\ .$$

Zamenjivanjem poznatih vrednosti napona u jednačinu pada napona na vodu i transformatoru T_2 posle kompenzacije, dobija se jednačina u kojoj je jedina nepoznata veličina snaga baterije kondenzatora:

$$U_1''=U_{2sv}''+\frac{P_p\left(R_v+R_{T2}\right)+\left(Q_p-Q_{BK}\right)\left(X_v+X_{T2}\right)}{U_{2sv}''}\ ,$$

odnosno, posle zamene raspoloživih numeričkih podataka, ona postaje:

$$35{,}04=35+\frac{4\cdot\left(8{,}82+0{,}42\right)+\left(7-Q_{BK}\right)\left(17{,}325+9{,}8\right)}{35}\ .$$

Iz poslednje jednačine dobija se zahtevana snaga otočne kondenzatorske baterije:

$$Q_{BK}=8{,}31\ \text{MVAr}\ .$$

b) Što se tiče vrednosti napona U_1'' njegova vrednost je ista i za režim pre i posle kompenzacije jer je vrednost tog napona diktirana radnim režimom transformatora T_1.

U cilju određivanja napona U_2' za režim pre kompenzacije potrebno je najpre odrediti napon U_{2sv}''. Njegova vrednost će se odrediti iz jednačine napona na početku voda kada je poznato stanje na sabirnicama sekundara transformatora T_2:

$$U_1''=U_{2sv}''+\frac{P_p\left(R_v+R_{T2}\right)+Q_p\left(X_v+X_{T2}\right)}{U_{2sv}''}\ .$$

Zamenom odgovarajućih numeričkih vrednosti u gornju jednačinu i sređivanjem te jednačine dobija se kvadratna jednačina po nepoznatom naponu U_{2sv}'':

$$35{,}04=U_{2sv}''+\frac{4\cdot\left(8{,}82+0{,}42\right)+7\cdot\left(17{,}325+9{,}8\right)}{U_{2sv}''}\ ,$$

odakle je njena konačna forma:

$$U_{2sv}''^{2}-35{,}04U_{2sv}''+226{,}835=0\ .$$

Fizički prihvatljivo rešenje gornje kvadratne jednačine je:

$U''_{2sv} = 26{,}47 \text{ kV}$.

Napon U'_2 sada se dobija preko formule za pad napona na transformatoru T_2:

$$U'_2 = U''_{2sv} + \frac{P_p R_{T2} + Q_p X_{T2}}{U''_{2sv}} = 26{,}47 + \frac{4 \cdot 0{,}42 + 7 \cdot 9{,}8}{26{,}47} = 29{,}125 \text{ kV}.$$

Napon U'_2 posle kompenzacije može se odrediti i znatno jednostavnije, pošto je poznat napon U''_{2sv} za režim kompenzacije ($U''_{2sv} = 35 \text{ kV}$). Preko formule za pad napona na transformatoru T_2 dobija se tražena vrednost napona:

$$U'_2 = U''_{2sv} + \frac{P_p R_{T2} + (Q_p - Q_{BK}) X_{T2}}{U''_{2sv}} = 35 + \frac{4 \cdot 0{,}42 + (7 - 8{,}31) \cdot 9{,}8}{35} = 34{,}68 \text{ kV}.$$

c) Gubici snage na vodu i trasformatoru T_2 pre kompenzacije su:

$$\underline{S}^{gub} = \left[R_v + R_{T2} + j(X_v + X_{T2})\right] \frac{P_p^2 + Q_p^2}{U''^2_{2sv}}$$

$$= \left[8{,}82 + 0{,}42 + j(17{,}325 + 9{,}8)\right] \frac{4^2 + 7^2}{26{,}47^2} = (0{,}857 + j2{,}516) \text{ MVA}.$$

Snaga na početku voda pre kompenzacije je:

$$\underline{S}_v = \underline{S}_p + \underline{S}^{gub} = (4{,}857 + j9{,}516) \text{ MVA}.$$

Gubici na vodu i transformatoru T_2 posle kompenzacije su:

$$\underline{S}_{BK}^{gub} = \left[R_v + R_{T2} + j(X_v + X_{T2})\right] \frac{P_p^2 + (Q_p - Q_{BK})^2}{U''^2_{2sv}}$$

$$= \left[8{,}82 + 0{,}42 + j(17{,}325 + 9{,}8)\right] \frac{4^2 + (7 - 8{,}31)^2}{35^2} = (0{,}134 + j0{,}392) \text{ MVA}.$$

Snaga na početku voda za radni režim posle kompenzacije je:

$$\underline{S}_{vBK} = \underline{S}_p - jQ_{BK} + \underline{S}_{BK}^{gub} = (4{,}134 - j0{,}918) \text{ MVA}.$$

❑

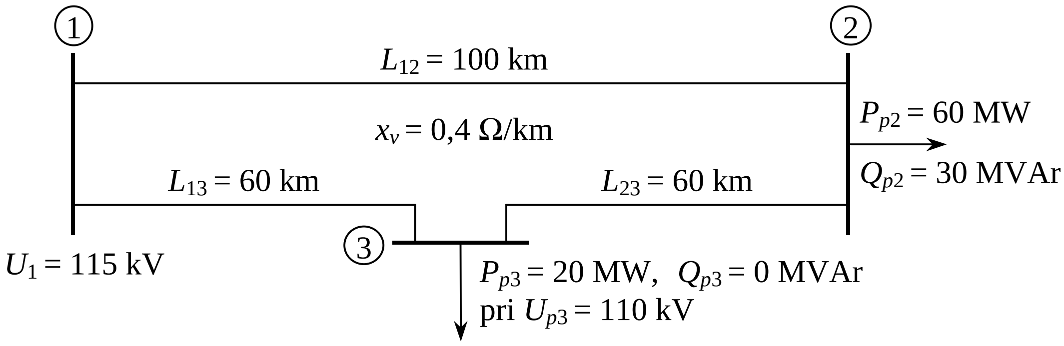
Zadatak 1.18

U elektroenergetskom sistemu predstavljenom na sl. 1.18a potrošač u čvoru 2 ima konstantnu snagu, a potrošač u čvoru 3 ima konstantu impedansu. Uz pretpostavku da je napon na sabirnicama 1 konstantan, odrediti:

a) Napon U_2.

b) Potrebnu snagu sinhronog kompenzatora kojeg je potrebno priključiti otočno na sabirnice 2 da bi se napon na njima povećao na 113 kV. Kolika je u ovom režimu snaga koja se sa sabirnica 1 odaje u mrežu?

Napomena: U proračunu zanemariti poprečnu komponentu pada napona.



Sl. 1.18a Šema i osnovni podaci za elektroenergetski sistem iz zadatka 1.18

Rešenje:

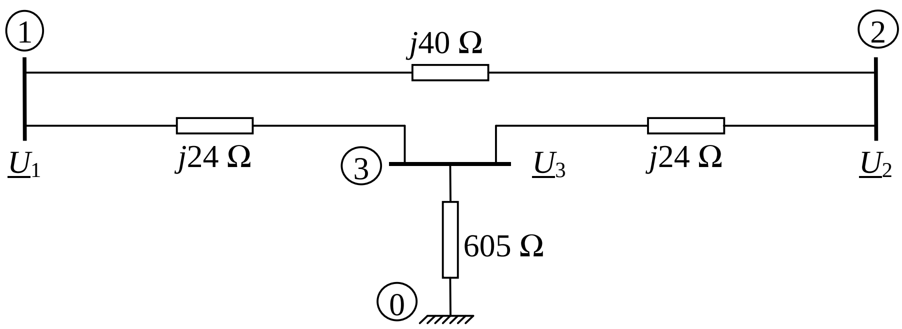
Vrednosti impedansi pojedinih vodova su:

$$\underline{Z}_{12} = jX_{12} = j40\,\Omega\,;\;\; \underline{Z}_{13} = jX_{13} = j24\,\Omega\,;\;\; \underline{Z}_{23} = jX_{23} = j24\,\Omega\,.$$

Potrošač u čvoru 3 modelovaće se preko konstantne impedanse koja se izračunava iz zadatih podataka:

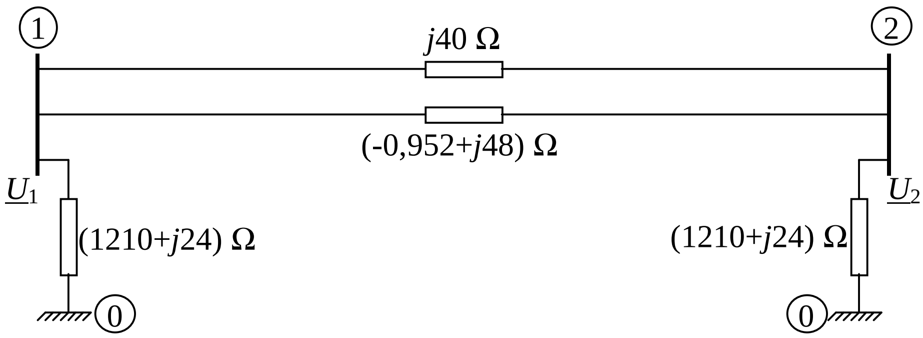
$$\underline{Z}_{p3} = R_{p3} = \frac{U_{p3}^2}{P_{p3}} = 605\,\Omega\,.$$

Ekvivalentna šema datog sistema sa zamenjenim brojčanim vrednostima impedansi predstavljena je na sl. 1.18b.



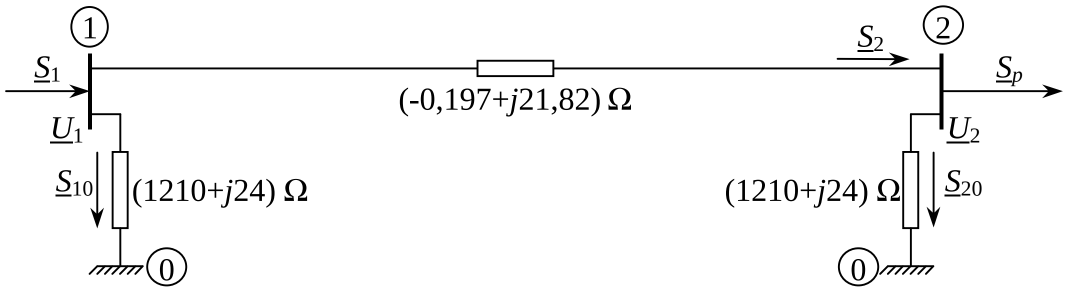
Sl. 1.18b Ekvivalentna šema sistema

Transfiguracijom zvezde koju čine grane 1-3, 2-3 i 0-3 u trougao dobija se ekvivalentna šema prikazana na sl. 1.18c.



Sl. 1.18c Šema dobijena transfiguracijom šeme sa sl. 1.18b

Ekvivalentovanjem dve paralelne grane dobija se konačno zamenska šema prikazana na sl. 1.18d na kojoj će se izvršiti potrebni proračuni.



Sl. 1.18d Šema dobijena ekvivalentovanjem paralelnih grana 1-2 šeme sa sl. 1.18c

a) U cilju određivanja napona U_2 potrebno je najpre odrediti snagu $\underline{S}_{2o}$ u funkciji napona U_2, prema formuli:

$$\underline{S}_{20} = \frac{U_2^2}{\underline{Z}_{20}^*} = \frac{R_{20}}{Z_{20}^2} U_2^2 + j\frac{X_{20}}{Z_{20}^2} U_2^2 .$$

Kompleksna snaga koja teče po grani 1-2 ($\underline{S}_2$) može se takođe izraziti u funkciji nepoznatog napona U_2:

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_p + \underline{S}_{2o} = \left(P_p + \frac{R_{20}}{Z_{20}^2} U_2^2 \right) + j\left(Q_p + \frac{X_{20}}{Z_{20}^2} U_2^2 \right).$$

Prethodni izrazi za snage zameniće se u izraz za pad napona između tačaka 1 i 2, u formuli za napon U_1:

$$U_1 = U_2 + \frac{\left(P_p + \frac{R_{20}}{Z_{20}^2}U_2^2\right)R_{12} + \left(Q_p + \frac{X_{20}}{Z_{20}^2}U_2^2\right)X_{12}}{U_2}.$$

U gornjem izrazu jedina nepoznata veličina je traženi napon U_2. Grupisanjem članova uz napon U_2 dobija se kvadratna jednačina po naponu U_2:

$$\left(1 + \frac{R_{20}R_{12}}{Z_{20}^2} + \frac{X_{20}X_{12}}{Z_{20}^2}\right)U_2^2 - U_1U_2 + P_pR_{12} + Q_pX_{12} = 0.$$

Posle zamene zadatih vrednosti gornja jednačina postaje:

$$\left(1 + \frac{1210\cdot(-0{,}197)}{1210^2+24^2} + \frac{24\cdot 21{,}82}{1210^2+24^2}\right)U_2^2 - 115\cdot U_2 + 60\cdot(-0{,}197) + 30\cdot 21{,}82 = 0,$$

odnosno

$$1{,}0002U_2^2 - 115U_2 + 642{,}78 = 0.$$

Rešenje prethodne kvadratne jednačine koje ima fizički smisao je:

$$U_2 = 109{,}1\ \mathrm{kV}.$$

b) Za radni režim u ovoj tački, ekvivalentna šema razlikuje se u od ekvivalentne šeme u pethodnoj tački samo u tome što je otočno na sabirnice 2 dodat sinhroni kompenzator snage Q_{SK}. Pošto je po uslovu zadatka poznat napon U_2 može se odrediti vrednost snage $\underline{S}_{20}$ iz formule:

$$\underline{S}_{20} = \frac{U_2^2}{\underline{Z}_{20}^*} = \frac{113^2}{1210 - j24} = (10{,}55 + j0{,}21)\ \mathrm{MVA}.$$

Kompleksna snaga koja teče po grani 1-2 ($\underline{S}_2$) za ovaj radni režim je:

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_p + \underline{S}_{20} - jQ_{SK} = 60 + j30 + 10{,}55 + j0{,}21 - jQ_{SK} = (70{,}55 + j(30{,}21 - Q_{SK}))\ \mathrm{MVA}.$$

Gornji izrazi za snage zameniće se u izraz za napon U_1:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_2R_{12} + Q_2X_{12}}{U_2},$$

gde je jedina nepoznata veličina tražena snaga sinhronog kompenzatora. Zamenom poznatih vrednosti u gornji izraz dobija se:

$$115 = 113 + \frac{70{,}55\cdot(-0{,}197) + (30{,}21 - Q_{SK})\cdot 21{,}82}{113},$$

odakle je snaga sinhronog kompenzatora potrebna da bi se ostvario zadati režim u tački b):

$$Q_{SK} = 19{,}21\,\mathrm{MVAr}\,.$$

Radi određivanja snage koja se sa sabirnica 1 odaje u mrežu potrebno je koristiti relacije bilansa snaga. Najpre će se izračunati kompleksna snaga $\underline{S}_2$:

$$\underline{S}_2 = 70{,}55 + j(30{,}21 - Q_{SK}) = 70{,}55 + j(30{,}21 - 19{,}21) = (70{,}55 + j10{,}99)\,\mathrm{MVA}\,.$$

Kompleksni gubici snage u grani 1-2 su:

$$\underline{S}_{12}^{gub} = (R_{12} + jX_{12})\frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} = (-0{,}197 + j21{,}82)\frac{70{,}55^2 + 10{,}99^2}{113^2} = (-0{,}08 + j8{,}71)\,\mathrm{MVA}\,.$$

Vrednost snage $\underline{S}_{10}$ je onda:

$$\underline{S}_{10} = \frac{U_1^2}{\underline{Z}_{10}^*} = \frac{115^2}{1210 - j24} = (10{,}93 + j0{,}22)\,\mathrm{MVA}\,.$$

Konačno, vrednost kompleksne snage $\underline{S}_1$ koja se odaje u mrežu sa sabirnica 1 je:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \underline{S}_{12}^{gub} + \underline{S}_{10} = 70{,}55 + j10{,}99 - 0{,}08 + j8{,}71 + 10{,}93 + j0{,}22 = (81{,}4 + j19{,}92)\,\mathrm{MVA}\,.$$

❑

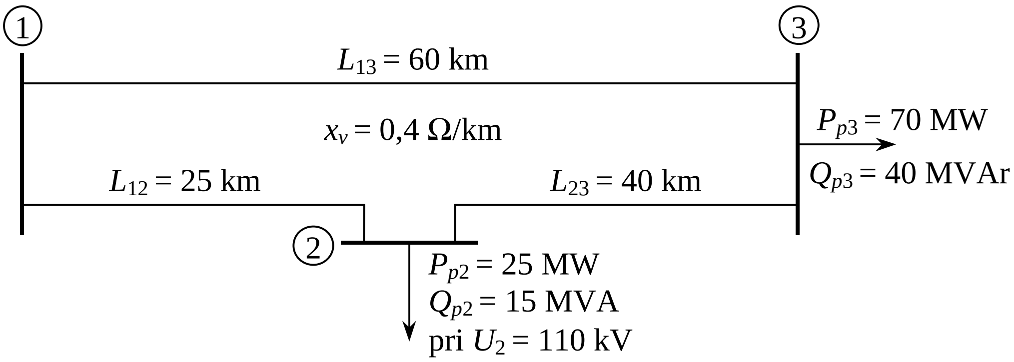
Zadatak 1.19

U elektroenergetskom sistemu, čija je monofazna šema data na sl. 1.19a, potrošač u čvoru 2 ima konstantnu impedansu, a potrošač u čvoru 3 ima konstantnu snagu potrošnje. Moduo napona u čvoru 1 u posmatranom sistemu održava se na konstantnoj vrednosti.

a) Odrediti napon $\underline{U}_1$ ako je napon na sabirnicama 3: U_3 = 110 kV.

b) Kolika treba da bude snaga baterije kondenzatora koju treba otočno vezati na sabirnice 3 da bi pri povećanju P_{p3} i Q_{p3} za 20 % napon na njima ostao isti.

c) Koliki su faktori snage gledani sa sabirnica 1, 2, 3 za radne režime definisane u tačkama a) i b).



Sl. 1.19a Šema i osnovni podaci za elektroenergetski sistem iz zadatka 1.19

Rešenje:

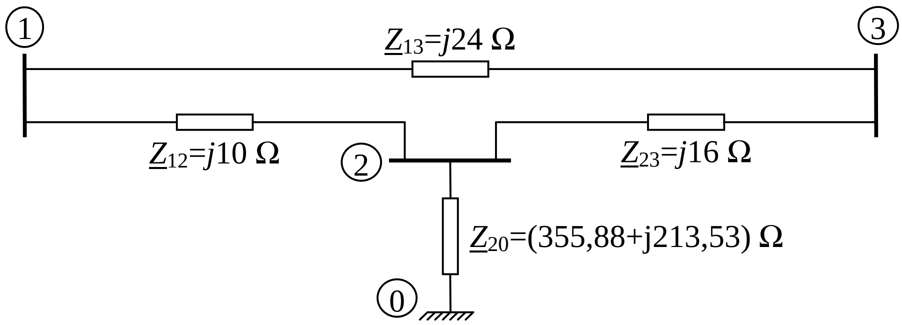
Vrednosti impedansi pojedinih vodova sistema su:

$$\underline{Z}_{12} = jX_{12} = j10\,\Omega\,;\quad \underline{Z}_{13} = jX_{13} = j24\,\Omega\,;\quad \underline{Z}_{23} = jX_{23} = j16\,\Omega\,.$$

Potrošač u čvoru 2 modelovaće se preko konstantne impedanse koja se izračunava iz datih podataka:

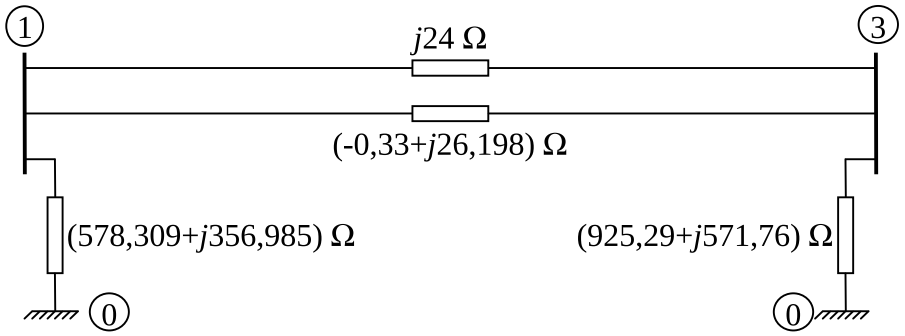
$$\underline{Z}_{p2} = \frac{U_2^2}{\underline{S}_{p2}^*} = \frac{U_2^2}{P_{p2} - jQ_{p2}} = (355{,}88 + j213{,}53)\,\Omega\,.$$

Ekvivalentna šema datog sistema sa upisanim brojčanim vrednostima impedansi data je na sl. 1.19b.



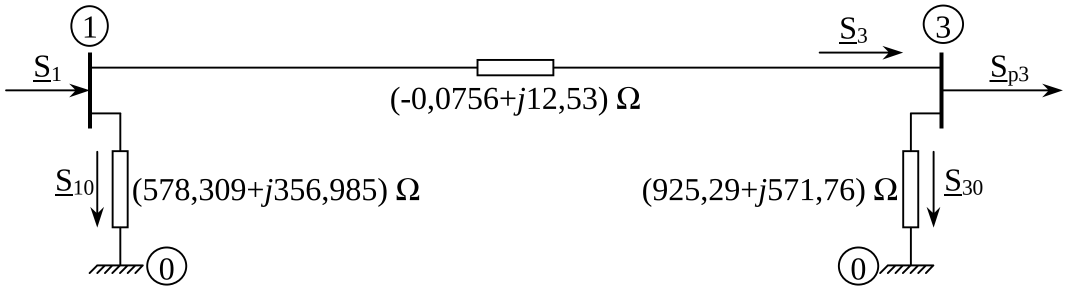
Sl. 1.19b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 1.19a

Transfiguracijom zvezde koju čine grane 1-2, 3-2 i 0-2 u trougao dobija se ekvivalentna šema prikazana na sl. 1.19c.



Sl. 1.19c Šema dobijena transfiguracijom šeme sa sl. 1.19b

Ekvivalentovanjem dve paralelne grane 1-3 dobija se konačno zamenska šema prikazana na sl. 1.19d na kojoj će se izvršiti potrebni proračuni.



Sl. 1.19d Šema dobijena ekvivalentovanjem paralelnih grana 1-3 šeme sa sl. 1.19c

a) Da bi se odredio napon $\underline{U}_1$, koristi se jednačina bilansa snaga. Najpre će se izračunati kompleksna snaga $\underline{S}_{30}$:

$$\underline{S}_{30} = \frac{U_3^2}{\underline{Z}_{30}^*} = \frac{110^2}{925{,}29 - j571{,}76} = (9{,}46 + j5{,}85)\,\text{MVA}\,,$$

a zatim snaga na kraju grane 1-3, kao:

$$\underline{S}_3 = \underline{S}_{p3} + \underline{S}_{30} = (79{,}46 + j45{,}85)\,\text{MVA}\,.$$

Izraz za proračun kompleksnog napona $\underline{U}_1$ daje:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= U_3 + \frac{P_3 R_{13} + Q_3 X_{13}}{U_3} + j\frac{P_3 X_{13} - Q_3 R_{13}}{U_3}\\ &= 110 + \frac{79{,}46\cdot(-0{,}0756) + 45{,}85\cdot 12{,}53}{110} + j\frac{79{,}46\cdot 12{,}53 - 45{,}85\cdot(-0{,}0756)}{110}\\ &= 115{,}168 + j9{,}08 = 115{,}52\ \underline{/4{,}51^\circ}\end{aligned}$$

b) Kada se snage potrošačkog područja povećaju za 20 %, njihove nove vrednosti su:

$P'_{p3} = 1{,}2 \cdot 70 = 84\ \mathrm{MW}$;
$Q'_{p3} = 1{,}2 \cdot 40 = 48\ \mathrm{MW}$.

Nova kompleksna snaga na kraju grane 1-3 je funkcija nepoznate snage baterije kondenzatora i data je izrazom:

$$\underline{S}'_3 = \underline{S}'_{p3} + \underline{S}_{30} - jQ_{BK} = 93{,}46 + j(53{,}85 - Q_{BK}).$$

Zamenom gornjeg izraza i ostalih brojčanih vrednosti u izraz za napon na sabirnicama 1, i imajući u vidu da je moduo napona na sabirnicama 1 konstantan dobija se:

$$115{,}52^2 = \left[110 + \frac{93{,}46 \cdot (-0{,}0756) + (53{,}85 - Q_{BK}) \cdot 12{,}53}{110}\right]^2 + \left[\frac{93{,}46 \cdot 12{,}53 - (53{,}85 - Q_{BK}) \cdot (-0{,}0756)}{110}\right]^2.$$

Sređivanjem gornjeg izraza dobija se kvadratna jednačina po nepoznatoj Q_{BK}.

$$Q_{BK}^2 - 2038{,}74 Q_{BK} + 18609{,}98 = 0,$$

čije rešenje daje za vrednost snage baterije otočnih kondezatora:

$$Q_{BK} = 9{,}169\ \mathrm{MVAr}.$$

c) Za režim definisan u tački a) zadatka, gubici u grani 1-3 su:

$$\underline{S}_{13}^{gub} = (R_{13} + jX_{13})\frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_3^2} = (-0{,}0756 + j12{,}53)\frac{79{,}46^2 + 45{,}85^2}{110^2} = (-0{,}05 + j8{,}72)\ \mathrm{MVA}.$$

Kompleksna snaga koja teče po grani 1-0 je:

$$\underline{S}_{10} = \frac{U_1^2}{R_{10} - jX_{10}} = \frac{115{,}52^2}{578{,}31 - j356{,}98} = (16{,}71 + j10{,}31)\ \mathrm{MVA}.$$

Ukupna kompleksna snaga koja utiče u sistem, preko sabirnica 1 je:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_3 + \underline{S}_{13}^{gub} + \underline{S}_{10} = 79{,}46 + j45{,}85 - 0{,}05 + j8{,}72 + 16{,}71 + j10{,}31 = (96{,}12 + j64{,}61)\ \mathrm{MVA}$$

Konačno, faktor snage gledan sa sabirnica 1 je:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} = \frac{96{,}12}{\sqrt{96{,}12^2 + 64{,}61^2}} = 0{,}83\,.$$

Za režim u tački b) kompleksna snaga na kraju grane 1-3 je:

$$\underline{S}'_3 = \underline{S}'_{p3} + \underline{S}_{30} - jQ_{BK} = (93{,}46 + j44{,}68)\ \mathrm{MVA}\,,$$

pa su kompleksni gubici snage u vodu 1-3:

$$\underline{S}_{13}^{gub} = (R_{13} + jX_{13})\frac{P_3'^2 + Q_3'^2}{U_3^2} = (-0{,}0756 + j12{,}53)\frac{93{,}46^2 + 44{,}68^2}{110^2} = (-0{,}07 + j11{,}11)\ \mathrm{MVA}$$

Kompleksna snaga koja teče po grani 1-0 je ista kao i za režim zadat u tački a) i iznosi:

$$\underline{S}_{10} = (16{,}71 + \mathrm{j}10{,}31)\ \mathrm{MVA}\,.$$

Ukupna kompleksna snaga koja utiče u sistem, preko sabirnica 1 je onda:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}'_3 + \underline{S}_{13}^{gub} + \underline{S}_{10} = 93{,}46 + j44{,}68 - 0{,}07 + j11{,}11 + 16{,}71 + j10{,}31 = (110{,}1 + j66{,}1)\ \mathrm{MVA}\,,$$

pa je faktor snage gledan sa sabirnica 1:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} = \frac{110{,}1}{\sqrt{110{,}1^2 + 66{,}1^2}} = 0{,}857\,.$$

Faktor snage gledan sa sabirnica 2 je isti za oba režima jer je potrošač modelovan preko modela konstantne impedanse i iznosi:

$$\cos\varphi_2 = \frac{P_{p2}}{\sqrt{P_{p2}^2 + Q_{p2}^2}} = \frac{25}{\sqrt{25^2 + 15^2}} = 0{,}857\,.$$

Faktor snage gledan sa sabirnica 3 za radni režim zadat u tački a) zadatka je:

$$\cos\varphi_3 = \frac{P_{p3}}{\sqrt{P_{p3}^2 + Q_{p3}^2}} = \frac{70}{\sqrt{70^2 + 40^2}} = 0{,}868\,.$$

Za radni režim zadat u tački b) zadatka, faktor snage je jednak:

$$\cos\varphi_3 = \frac{P'_{p3}}{\sqrt{P'^2_{p3} + (Q'_{p3} - Q_{BK})^2}} = \frac{84}{\sqrt{84^2 + (48 - 9{,}169)^2}} = 0{,}9077\,.$$

❑

Zadatak 1.20

Transformatorska stanica u kojoj se nalaze dva regulaciona transformatora, napaja se preko dalekovoda 110 kV (sl. 1.20a). Regulacioni transformatori u transformatorskoj stanici su identični. Nominalna snaga svakog od njih je 31,5 MVA, pri čemu je prenosni odnos transformatora 110±4×2,5 % / 11 kV/kV. Moduo napona na sabirnicama 1 održava se konstantnim i iznosi $U_1 = 110$ kV. Početna snaga potrošačkog područja vezanog na sabirnice 3 je $P_{po} = 30$ MW i $Q_{po} = 15$ MVAr, i raste po godišnjoj stopi od $p = 7$ %. Odrediti:

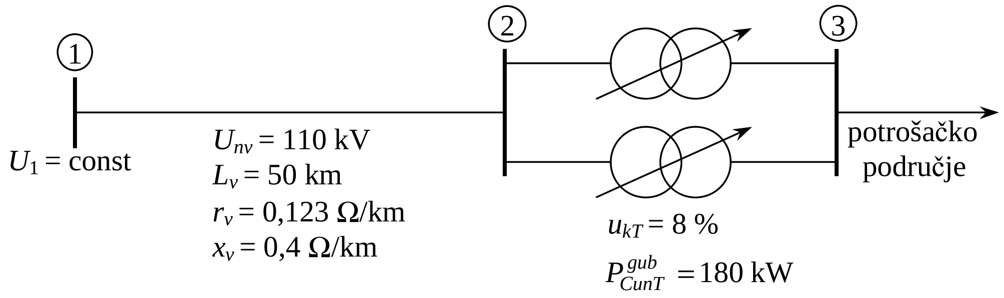
a) U kojoj godini je potrebno izvršiti otočnu kompenzaciju na sabirnicama 3 imajući u vidu da se ne smeju narušiti kriterijumi:

1) Napon na sabirnicama 3 ne sme biti manji od 10 kV;

2) Ne sme se dozvoliti preopterećenje transformatorske stanice.

b) Isto kao i pod a) ali pretpostaviti da transformatori nisu regulacioni.

Napomena: U proračunima zanemariti poprečnu komponentu pada napona.



Sl. 1.20a Elektroenergetski sistem i podaci za proračune iz zadatka 1.20

Rešenje:

Impedansa voda 1-2 na naponskom nivou 110 kV iznosi:

$$\underline{Z}_v = (6{,}15 + j20)\,\Omega .$$

Moduo impedanse jednog transformatora sveden na naponski nivo 110 kV iznosi:

$$Z_T = \frac{u_{kT}\,\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{8}{100}\frac{110^2}{31{,}5} = 30{,}73\,\Omega .$$

Aktivna otpornost transformatora svedena na naponski nivo 110 kV iznosi:

$$R_T = \frac{P_{CunT}^{gub}}{S_{nT}}\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{0{,}18 \cdot 110^2}{31{,}5^2} = 2{,}195\,\Omega .$$

Na osnovu prethodna dva podatka može se izračunati i induktivna reaktansa transformatora:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 30{,}65\,\Omega .$$

Pošto dva transformatora rade paralelno ekvivalentne vrednosti aktivne otpornosti i reaktanse su:

$$R_{Te} = 1{,}1\,\Omega\,; \qquad X_{Te} = 15{,}33\,\Omega\,.$$

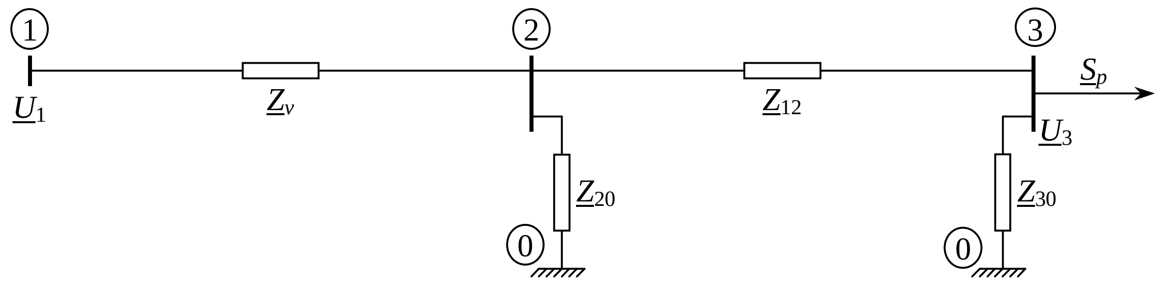
Sa stanovišta naponskih prilika potrebno je izabrati prenosni odnos regulacionog transformatora takav da obezbeđuje najveći napon na sabirnicama 3. Taj prenosni odnos se dobije ako je položaj otcepa $n = -4$. Tada je nenominalni prenosni odnos transformatora:

$$t = 1 + n\Delta t = 0{,}9\,.$$

Deo zadatka pod a) rešiće se na dva načina. Prvi način je preko ekvivalentne π-šeme regulacionog transformatora, a drugi preko stvarnog prenosnog odnosa transformatora.

a) *I način*

Ekvivalentna šema datog sistema prikazana je na sl. 1.20b.



Sl. 1.20b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 1.20a

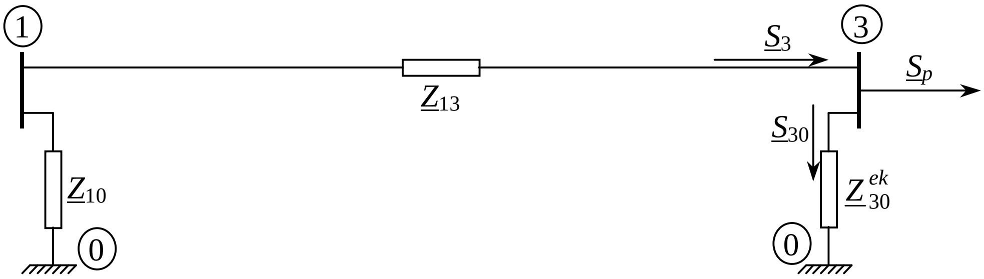
Elementi ekvivalentne π-šeme regulacionog transformatora su:

$$\underline{Z}_{20} = \frac{t^2}{1-t}\underline{Z}_{Te} = \frac{0{,}9^2}{1-0{,}9}(1{,}1 + j15{,}33) = (8{,}91 + j124{,}17)\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{12} = t\underline{Z}_{Te} = 0{,}9 \cdot (1{,}1 + j15{,}33) = (0{,}99 + j13{,}797)\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{30} = \frac{t}{t-1}\underline{Z}_{Te} = \frac{0{,}9}{0{,}9-1}(1{,}1 + j15{,}33) = (-9{,}9 + j137{,}97)\,\Omega\,.$$

Transfiguracijom zvezde koju čine grane 1-2, 3-2 i 2-0 u trougao i ekvivalentovanjem dve paralelne grane između referentnog čvora i zemlje dobija se zamenska šema sistema prikazana na sl. 1.20c. Vrednosti impedansi sa ekvivalentne šeme sa sl. 1.20c iznose:

$$\underline{Z}_{13} = (7{,}82 + j36{,}02)\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{30}^{ek} = (-78{,}237 - j360{,}2)\,\Omega\,.$$

Impedansa $\underline{Z}_{10}$ nije od interesa za tražene proračune, pa nema potrebe da se izračunava njena vrednost.



Sl. 1.20c Ekvivalentna šema sistema dobijena transfiguracijom šeme sa sl. 1.20b

Sada je potrebno uraditi bilans snaga u ovoj mreži. Imajući u vidu da se snaga potrošačkog područja menja po određenoj godišnjoj stopi porasta, aktivna i reaktivna snaga potrošačkog područja u godini *n* mogu se predstaviti izrazima:

$$P_{pn} = (1+p)^{n_1} P_{po} = K_1 P_{po}\,; \qquad Q_{pn} = (1+p)^{n_1} Q_{po} = K_1 Q_{po}\,.$$

Pretpostaviće se da je napon na sabirnicama 3 jednak $U_3 = 10$ kV, jer je cilj da se nađe godina u kojoj napon pada na vrednost od 10 kV. Svedena vrednost ovog napona na naponski nivo 110 kV je:

$$U_{3sv} = m_{nT} U_3 = \frac{110}{11} \cdot 10 = 100 \text{ kV}\,.$$

Dalje se može izračunati snaga $\underline{S}_{30}$ kao:

$$\underline{S}_{30} = \frac{U_{3sv}^2}{\underline{Z}_{30}^*} = \frac{100^2}{-78{,}237 + j360{,}2} = (-5{,}76 - j26{,}51)\,\text{MVA}\,.$$

Kada se uradi bilans snaga na sabirnicama 3 za kompleksnu snagu $\underline{S}_3$ se dobija:

$$\underline{S}_3 = (K_1 P_{po} + P_{30}) + j(K_1 Q_{po} + Q_{30}) = ((30K_1 - 5{,}76) + j(15K_1 - 26{,}51))\,\text{MVA}\,.$$

Ako se gornji izraz uvrsti u izraz za napon U_1 dobija se jednačina u kojoj je jedina nepoznata veličina K_1:

$$U_1 = U_3 + \frac{P_3 R_{13} + Q_3 X_{13}}{U_3}\,,$$

odnosno:

$$110 = 100 + \frac{(30K_1 - 5{,}76)\cdot 7{,}82 + (15K_1 - 26{,}51)\cdot 36{,}02}{100}\,.$$

Iz poslednje jednačine dobija se vrednost za K_1:

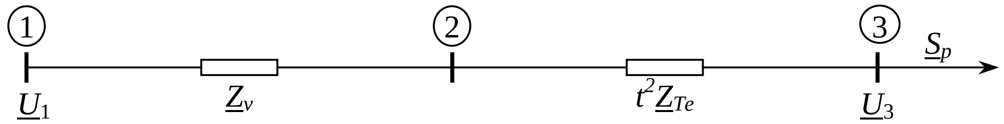
$$K_1 = (1+p)^{n_1} = 2{,}58\,,$$

odnosno godina u kojoj je potrebno izvršiti kompenzaciju je:

$$n_1 = \frac{\log K_1}{\log(1+p)} = \frac{\log 2{,}58}{\log 1{,}07} = 14 \text{ godina}.$$

a) *II način*

Kao što je ranije rečeno deo zadatka pod a) može se rešiti i proračunom preko stvarnog prenosnog odnosa transformatora. Ekvivalentna šema za taj slučaj prikazana je na sl. 1.20d.



Sl. 1.20d Ekvivalentna šema zadatog sistema iz tač. a

Impedansa između tačaka 2 i 3 na sl. 1.20d je svedena preko stvarnog prenosnog odnosa transformatora i njena vrednost zavisi od nenominalnog prenosnog odnosa *t*. Ukupna vrednost impedanse između tačaka 1 i 3 je onda:

$$\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_v + t^2 \underline{Z}_{Te} = (6{,}15 + j20) + 0{,}9^2 \cdot (1{,}1 + j15{,}33) = (7{,}041 + j32{,}4173)\,\Omega.$$

Takođe svedena vrednost napona na sabirnicama 3 zavisi od nenominlanog prenosnog odnosa *a* pa je taj napon:

$$U_{3sv} = t m_{nT} U_3 = 0{,}9 \cdot \frac{110}{11} \cdot 10 = 90 \text{ kV}.$$

Ako se usvoje isti izrazi za promenu aktivne i reaktivne snage potrošačkog područja sa vremenom kao kod prvog načina, odnosno

$$P_{pn} = (1+p)^{n_1} P_{po} = K_1 P_{po}; \qquad Q_{pn} = (1+p)^{n_1} Q_{po} = K_1 Q_{po},$$

i ako se ti izrazi uvrste u jednačinu za napon U_1, dobija se ponovo jednačina u kojoj je jedina nepoznata K_1:

$$U_1 = U_3 + \frac{P_{pn} R_{13} + Q_{pn} X_{13}}{U_3},$$

odnosno:

$$110 = 90 + \frac{30 \cdot K_1 \cdot 7{,}041 + 15 \cdot K_1 \cdot 32{,}4173}{90}.$$

Iz prethodne jednačine za K_1, odnosno za n_1, dobijaju se iste vrednosti kao i kod korišćenja prvog načina:

$$K_1 = (1+p)^{n_1} = 2{,}58; \qquad n_1 = 14 \text{ godina}.$$

Što se tiče kriterijuma preopterećenja može se napisati da je granični uslov:

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = S_{doz}.$$

Ako se u razmatranje uzme snaga transformatora na sekundarnoj strani onda je ta snaga ujedno i snaga potrošačkog područja pa se ima:

$$P_T = P_{pn} = (1+p)^{n_2} P_{po} = K_2 P_{po}; \qquad Q_T = Q_{pn} = (1+p)^{n_2} Q_{po} = K_2 Q_{po}.$$

Zamenom poslednjih jednačina u izraz koji definiše kriterijum preopterećenja, dobija se:

$$\sqrt{(K_2 P_{po})^2 + (K_2 Q_{po})^2} = S_{doz}.$$

Iz poslednje jednačine može se izračunati vrednost za K_2:

$$K_2 = \frac{S_{doz}}{\sqrt{P_{po}^2 + Q_{po}^2}} = \frac{63}{\sqrt{30^2 + 15^2}} = 1{,}878,$$

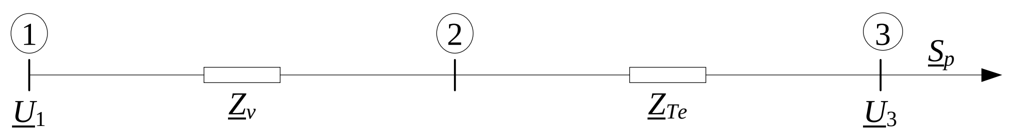
odnosno vrednost za godinu u kojoj je potrebno izvršiti kompenzaciju:

$$n_2 = \frac{\log K_2}{\log(1+p)} = \frac{\log 1{,}878}{\log 1{,}07} = 9{,}32 \text{ godina}.$$

Konačno godina u kojoj je potrebno izvršiti kompenzaciju dobija se kao:

$$n_{kom} = \operatorname{int}\{\min\{n_1, n_2\}\} = 9 \text{ godina}.$$

b) Za slučaj kada transformator nije regulacioni proračun je znatno jednostavniji. Ekvivalentna šema u tom slučaju predstavljena je na sl. 1.20e.



Sl. 1.20e Ekvivalentna šema zadatog sistema iz tač. b

Ekvivalentna impedansa između tačaka 1 i 3 je:

$$\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_v + \underline{Z}_{Te} = (6{,}15 + j20) + (1{,}1 + j15{,}33) = (7{,}25 + j35{,}33)\,\Omega.$$

Svedena vrednost napona u čvoru 3 je $U_{3sv} = 100$ kV.

Analogno prethodnoj tački, izrazi za snage potrošačkog područja mogu se napisati u formi:

$$P_{pn} = (1+p)^{n_3} P_{po} = K_3 P_{po}; \qquad Q_{pn} = (1+p)^{n_3} Q_{po} = K_3 Q_{po}.$$

Ako se ovi izrazi uvrste u jednačinu za napon u čvoru 1 dobija se jednačina iz koje se može izračunati veličina K_3, odnosno godina u kojoj je potrebno izvršiti kompenzaciju:

$$U_1 = U_3 + \frac{P_{pn} R_{13} + Q_{pn} X_{13}}{U_3}.$$

Posle zamene raspoloživih numeričkih vrednosti, dobija se linearna jednačina po K_3:

$$110 = 100 + \frac{30 \cdot K_3 \cdot 7{,}25 + 15 \cdot K_3 \cdot 35{,}33}{100}.$$

Iz poslednje jednačine dobija se da je rešenje $K_3 = 1{,}338$, odnosno $n_3 = 4{,}3$ godine.

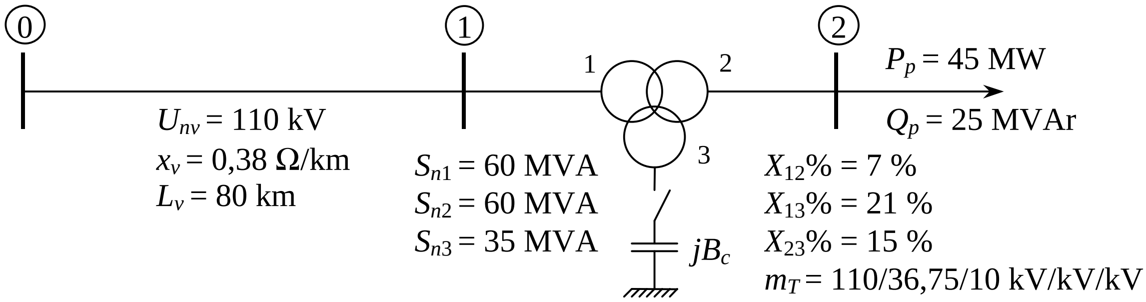
Uslov preopterećenja transformatora je identičan kao i u prethodnoj tački pa je godina u kojoj je potrebo izvršiti kompenzaciju:

$$n_{kom} = \mathrm{int}\{\min\{n_2, n_3\}\} = 4 \text{ godine}.$$

❑

Zadatak 1.21

U elektroenergetskom sistemu prikazanom na sl. 1.21a, kompenzacija reaktivne snage vrši se priključivanjem baterije otočnih kondenzatora na tercijer tronamotajnog transformatora. Ako je u režimu pre kompenzacije (tercijer neopterećen) napon na sabirnicama 2: $U_2 = 33$ kV, odrediti potrebnu susceptansu, odnosno snagu baterije kondenzatora koju treba priključiti na tercijer transformatora da bi se napon na sabirnicama 2 podigao na željenu vrednost od 36,75 kV, pod pretpostavkom da se napon na sabirnicama 0 održava na konstantnoj vrednosti.
Napomena: Reaktanse transformatora su date prema odgovarajućim prolaznim snagama. U proračunima zanemariti poprečnu komponentu pada napona.



Sl. 1.21a Šema i osnovni podaci za elektroenergetski sistem iz zadatka 1.21

Rešenje:

Impedansa voda na naponskom nivou 110 kV iznosi:

$$\underline{Z}_v = jx_v L_v = j30{,}4\,\Omega.$$

Impedanse tronamotajnog transformatora između pojedinih krajeva proračunate za prolazne snage i svedene na naponski nivo 110 kV su:

$$\underline{Z}_{12} = jX_{12} = j\frac{X_{12}\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{n1}} = j\frac{7}{100}\frac{110^2}{60} = j14{,}117\,\Omega;$$

$$\underline{Z}_{13} = jX_{13} = j\frac{X_{13}\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{n3}} = j\frac{21}{100}\frac{110^2}{35} = j72{,}6\,\Omega;$$

$$\underline{Z}_{23} = jX_{23} = j\frac{X_{23}\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{n3}} = j\frac{15}{100}\frac{110^2}{35} = j51{,}857\,\Omega.$$

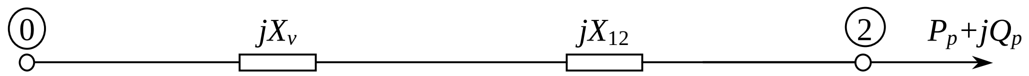
Impedanse grana Y-ekvivalenta tronamotajnog transformatora svedene na naponski nivo 110 kV su:

$$\underline{Z}_1 = jX_1 = j\frac{1}{2}\left(X_{12} + X_{13} - X_{23}\right) = j17{,}43\,\Omega;$$

$$\underline{Z}_2 = jX_2 = j\frac{1}{2}\left(X_{12} + X_{23} - X_{13}\right) = -j3{,}313\,\Omega;$$

$$\underline{Z}_3 = jX_3 = j\frac{1}{2}\left(X_{13} + X_{23} - X_{12}\right) = j55{,}17\,\Omega.$$

Na sl. 1.21b predstavljena je ekvivalentna šema sistema za slučaj pre kompenzacije.



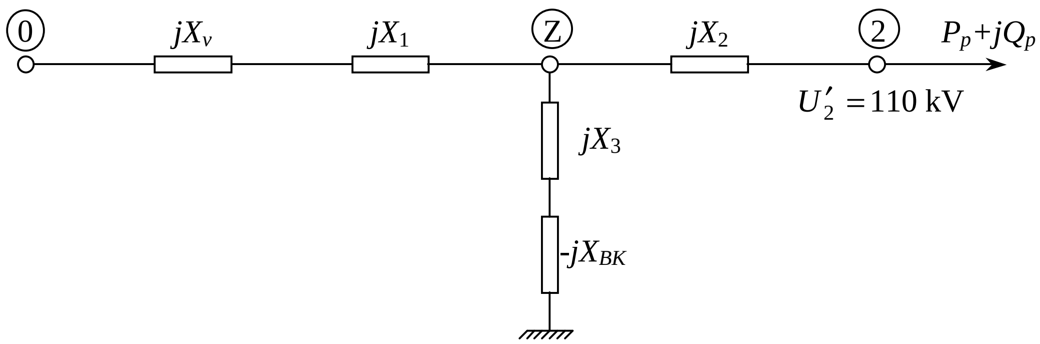
Sl. 1.21b Ekvivalentna šema za slučaj pre kompenzacije

Za pretpostavljeni radni režim napon na sabirnicama 3 je prema uslovu zadatka iznosio 33 kV, odnosno njegova svedena vrednost na naponski nivo 110 kV je $U_2' = 98{,}776\ \text{kV}$.

Napon na sabirnicama 0 može se odrediti preko sledeće formule:

$$U_o = U_2' + \frac{Q_p\left(X_v + X_{12}\right)}{U_2'} = 98{,}776 + \frac{25\cdot\left(30{,}4 + 14{,}117\right)}{98{,}776} = 110{,}043\ \text{kV}.$$

Za režim sa uključenom baterijom kondenzatora ekvivalentna šema sistema prikazana je na sl. 1.21c.



Sl. 1.21c Ekvivalentna šema sa uključenom baterijom kondenzatora

Za ovaj režim vrednost napona na sabirnicama 2 je 36,75 kV odnosno njegova svedena vrednost je $U_2' = 110\ \text{kV}$.

Da bi mogla da se odredi vrednost susceptanse baterije otočnih kondenzatora, potrebno je da se zadovolji jednačina bilansa snaga do sabirnica 0.

Napon u tački Z dobija se preko jednačine:

$$U_Z = U_2' + \frac{Q_p X_2}{U_2'} = 110 + \frac{25\cdot\left(-3{,}313\right)}{110} = 109{,}247\ \text{kV}.$$

Reaktivni gubici u grani Z-2 su:

$$Q_{Z2}^{gub} = X_2\frac{P_p^2 + Q_p^2}{U_2'^2} = -3{,}313\frac{45^2 + 25^2}{110^2} = -0{,}726\ \text{MVAr},$$

pa je kompleksna snaga na početku grane Z-2:

$$\underline{S}_Z = P_Z + jQ_Z = P_p + j\left(Q_p + Q_{Z2}^{gub}\right) = \left(45 + j24{,}274\right)\,\text{MVA}\,.$$

Reaktivna snaga otočne grane može se izraziti u funkciji nepoznate kapacitivne reaktanse baterije X_{BK}, kao:

$$Q_{3BK} = \frac{U_Z^2}{X_3 - X_{BK}}\,,$$

pa je kompleksna snaga na kraju grane 0-Z:

$$\underline{S}_{0Z} = P_{0Z} + jQ_{0Z} = P_Z + j\left(Q_Z + \frac{U_Z^2}{X_3 - X_{BK}}\right).$$

Jednačina za proračun napona u tački 0 u opštem slučaju ima formu:

$$U_0 = U_Z + \frac{\left(Q_Z + \dfrac{U_Z^2}{X_3 - X_{BK}}\right)\left(X_v + X_1\right)}{U_Z}\,,$$

u kojoj je jedina nepoznata reaktansa baterije kondenzatroa X_{BK}. Eksplicitni izraz za tu reaktansu je:

$$X_{BK} = X_3 - \frac{U_Z^2}{\dfrac{U_0 U_Z - U_Z^2}{X_v + X_1} - Q_Z}\,,$$

odakle se, posle zamene brojčanih vrednosti pojedinih veličina dobija:

$$X_{BK} = 55{,}17 - \frac{109{,}247^2}{\dfrac{110{,}043 \cdot 109{,}247 - 109{,}247^2}{30{,}4 + 17{,}43} - 24{,}274} = 586{,}65\,\Omega\,.$$

Tražena susceptansa baterije kondenzatora svedena na naponski nivo 110 kV je:

$$B_{BK} = \frac{1}{X_{BK}} = 1{,}7\ \text{mS}\,.$$

Napon na bateriji kondenzatora (sveden na naponski nivo voda) je onda:

$$U'_{BK} = U_Z \frac{-X_{BK}}{X_3 - X_{BK}} = 120{,}58\ \text{kV}\,,$$

pa je konačno, snaga baterije kondezatora:

$$Q_{BK} = U'^2_{BK} \cdot B_{BK} = 24{,}787\ \text{MVAr}\,.$$

❑

Zadatak 1.22

U radijalnom delu distributivnog sistema prikazanom na sl. 1.22a napon na sabirnicama 1 se održava na konstantnoj vrednosti, nezavisnoj od promene potrošnje na sabirnicama 3. Pri naponu na sabirnicama 3 od 10 kV snaga potrošnje je $\underline{S}_p = (3 + j5)$ MVA, dok se sa promenom napona menja sa statičkim koeficijentima osetljivosti $k_{PU} = 1{,}6$ i $k_{QU} = 1{,}8$.

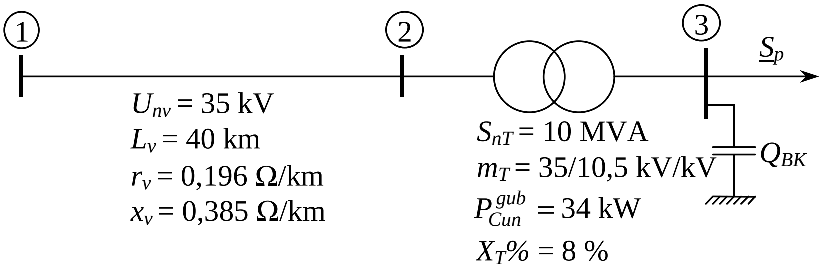
a) Odrediti snagu kondenzatorske baterije koju treba priključiti otočno na sabirnice 3 da bi napon na tim sabirnicama bio 10,5 kV, pri

a1) uvažavanju poprečne komponente pada napona,

a2) zanemarenju poprečne komponente pada napona.

Kolika se greška čini pri zanemarenju poprečne komponente pada napona u proračunu kondenzatorske baterije?

b) Odrediti snagu potrošačkog područja i napon na sabirnicama 3 ako se na njih priključi otočna kondenzatorska baterija nominalne snage $Q_{BK} = 3$ MVAr (pri $U_n = 10$ kV). U ovom proračunu zanemariti poprečnu komponentu pada napona.



Sl. 1.22a Šema i osnovni podaci za sistem iz zadatka 1.22

Rešenje:

Impedansa voda svedena na naponski nivo 35 kV je:

$$\underline{Z}_v = (r_v + jx_v)L_v = (0{,}196 + j0{,}385)\cdot 40 = (7{,}84 + j15{,}4)\,\Omega\,.$$

Impedansa transformatora svedena na naponski nivo 35 kV je:

$$\underline{Z}_T = \left(\frac{P_{Cun}^{gub}}{S_{nT}}\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} + j\frac{X_T\,\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}}\right) = \left(\frac{0{,}034}{10}\frac{35^2}{10} + j\frac{8}{100}\frac{35^2}{10}\right) = (0{,}42 + j9{,}8)\,\Omega\,.$$

Ukupna impedansa između tačaka 1 i 3 je:

$$\underline{Z} = R + jX = \underline{Z}_v + \underline{Z}_T = (8{,}26 + j25{,}2)\,\Omega\,.$$

Na osnovu zadatih vrednosti napona i snage ($U_3 = 10$ kV, $P_p = 3$ MW i $Q_p = 5$ MVAr) koje karakterišu radni režim bez kompenzacije, može se odrediti napon na sabirnicama 1 čiji se moduo u posmatranom sistemu održava na konstantnoj vrednosti. Najpre treba odrediti vrednost napona na sabirnicama 3, svedenu na naponski nivo 35 kV:

$$U_{3sv} = U_3 m_T = 10\frac{35}{10{,}5} = 33{,}33\ \text{kV}\,.$$

Napon na sabirnicama 1 dobija se iz izraza:

$$\underline{U}_1 = U_{3sv} + \frac{P_p R + Q_p X}{U_{3sv}} + j\frac{P_p X - Q_p R}{U_{3sv}}$$
$$= 33{,}33 + \frac{3\cdot 8{,}26 + 5\cdot 25{,}2}{33{,}33} + j\frac{3\cdot 25{,}2 - 5\cdot 8{,}26}{33{,}33} = (37{,}85 + j1{,}03)\ \text{kV} = 37{,}86\ \text{kV} = const\ .$$

a) U slučaju priključenja baterije otočnih kondenzatora na sabirnice 3, napon na sabirnicama 3 iznosi 10,5 kV, odnosno njegova vrednost svedena na nivo 35 kV je:

$$U_{3sv} = U_3 m_T = 10{,}5\frac{35}{10{,}5} = 35\ \text{kV}\ .$$

Usled promene napona na sabirnicama 3 menjaju se i snage potrošačkog područja prema statičkim karakteristikama i iznose:

$$P_p = P_{po} + P_{po}k_{PU}\frac{\Delta U_3}{U_{3o}} = 3 + 3\cdot 1{,}6\frac{10{,}5-10}{10} = 3{,}24\ \text{MW}\ ;$$
$$Q_p = Q_{po} + Q_{po}k_{QU}\frac{\Delta U_3}{U_{3o}} = 5 + 5\cdot 1{,}8\frac{10{,}5-10}{10} = 5{,}45\ \text{MVAr}\ .$$

a1) Pri uvažavanju poprečne komponente pada napona, napon U_1 se proračunava prema formuli:

$$\underline{U}_1 = U_{3sv} + \frac{P_p R + (Q_p - Q_{BK})X}{U_{3sv}} + j\frac{P_p X - (Q_p - Q_{BK})R}{U_{3sv}}\ .$$

Uvrštavanjem odgovarajućih vrednosti za napon i snage dobija se kvadratna jednačina u kojoj je jedina nepoznata veličina tražena vrednost snage baterije kondenzatora:

$$37{,}86^2 = \left[35 + \frac{3{,}24\cdot 8{,}26 + (5{,}45 - Q_{BK})\cdot 25{,}2}{35}\right]^2 + \left[\frac{3{,}24\cdot 25{,}2 - (5{,}45 - Q_{BK})\cdot 8{,}26}{35}\right]^2,$$

odnosno, posle sređivanja:

$$37{,}86^2 = [39{,}69 - 0{,}72Q_{BK}]^2 + [1{,}047 + 0{,}236Q_{BK}]^2\ ,$$

odakle je njena konačna forma:

$$Q_{BK}^2 - 98{,}69Q_{BK} + 249{,}11 = 0\ .$$

Fizički ostvarivo rešenje gornje kvadratne jednačine je:

$$Q_{BK} = 2{,}59\ \mathrm{MVAr}\,.$$

a2) Pri zanemarenju poprečne komponente pada napona, izraz za napon U_1 se svodi na:

$$U_1 = U_{3sv} + \frac{P_p R + (Q_p - Q_{BK})X}{U_{3sv}}\,.$$

Zamenom brojčanih vrednosti u prethodnu jednačinu dobija se linearna jednačina po nepoznatoj snazi baterije kondenzatora:

$$37{,}86 = 35 + \frac{3{,}24 \cdot 8{,}26 + (5{,}45 - Q_{BK}) \cdot 25{,}2}{35}\,,$$

odakle je:

$$Q_{BK} = 2{,}54\ \mathrm{MVAr}\,.$$

Greška koja se čini zanemarenjem poprečne komponente pada napona u proračunu vrednosti snage baterije kondenzatora je:

$$\Gamma\,\% = \frac{Q_{BK}^{a1} - Q_{BK}^{a2}}{Q_{BK}^{a1}} \cdot 100 = \frac{2{,}59 - 2{,}54}{2{,}59} \cdot 100 = 1{,}93\,\%\,.$$

b) Pošto je zadata snaga baterije kondenzatora od 3 MVAr definisana za nominalnu vrednost napona (U_n = 10 kV, odnosno U_{nsv} = 33,33 kV), vrednost snage baterije kondenzatora za neku proizvoljnu vrednost napona na sabirnicama 3 je:

$$Q_{BK} = Q_{BKn} \frac{U_{3sv}^2}{U_n^2} = 3\frac{U_{3sv}^2}{33{,}33^2} = 0{,}0027 U_{3sv}^2\,. \qquad (1)$$

Zavisnosti snaga potrošačkog područja u funkciji od napona na sabirnicama 3 date su sledećim izrazima:

$$P_p = P_{po} + P_{po} k_{PU} \frac{\Delta U_{3sv}}{U_{3osv}} = 3 + 3 \cdot 1{,}6 \frac{U_{3sv} - 33{,}33}{33{,}33} = 0{,}144 U_{3sv} - 1{,}8\,; \qquad (2)$$

$$Q_p = Q_{po} + Q_{po} k_{QU} \frac{\Delta U_{3sv}}{U_{3osv}} = 5 + 5 \cdot 1{,}8 \frac{U_{3sv} - 33{,}33}{33{,}33} = 0{,}27 U_{3sv} - 4 \qquad (3)$$

Ako se tri prethodna izraza za Q_{BK}, P_p i Q_p uvrste u jednačinu za pad napona između čvorova 1 i 3, posle sređivanja dobija se kvadratna jednačina po nepoznatom naponu $U_{3\mathrm{sv}}$:

$$U_1 = U_{3sv} + \frac{P_p R + (Q_p - Q_{BK})X}{U_{3sv}}\,,$$

odnosno

$$37{,}86 = U_{3sv} + \frac{(0{,}144U_{3sv} - 1{,}8)\cdot 8{,}26 + \left[(0{,}27U_{3sv} - 4) - 0{,}0027U_{3sv}^2\right]\cdot 25{,}2}{U_{3sv}},$$

odakle se posle sređivanja dobija jednačina:

$$U_{3sv}^2 - 32{,}05U_{3sv} - 124{,}11 = 0 .$$

Fizički prihvatljivo rešenje gornje kvadratne jednačine je:

$$U_{3sv} = 35{,}54 \text{ kV} .$$

Ako se izračunata vrednost napona na sabirnicama 3 uvrsti u jednačine (2) i (3) dobijaju se tražene vrednosti snaga potrošačkog područja:

$$P_p = 3{,}32 \text{ MW} \qquad \text{i} \qquad Q_p = 5{,}6 \text{ MVAr} .$$

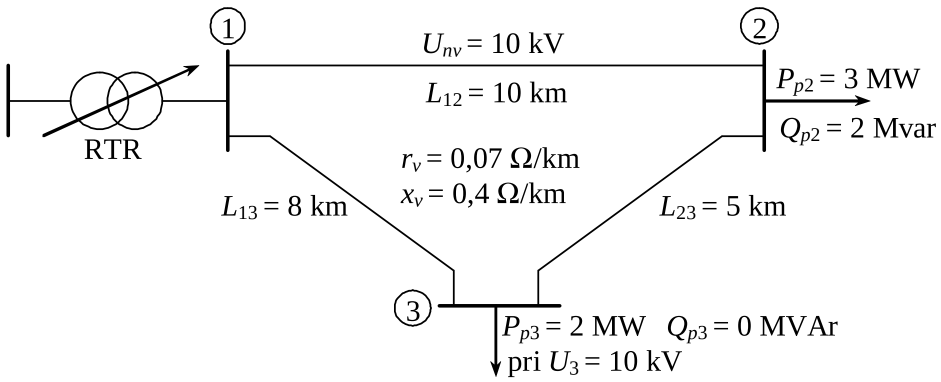
❑

Zadatak 1.23

Na sl. 1.23a prikazana je jednostavna distributivna mreža. Napon na sabirnicama 1 održava se konstantnim pomoću regulacionog transformatora. Linijski napon na sabirnicama 2 iznosi U_2 = 9,8 kV pri snagama potrošnje P_{p2} = 3 MW i Q_{p2} = 2 MVAr i konstantnoj, odnosno nezavisnoj od napona, impedansi potrošnje na sabirnicama 3 koja se može izračunati pri nominalnom naponu U_3 = 10 kV i snazi P_{p3} = 2 MW, uz cosφ_3 = 1,0.

Koliku snagu trofazne baterije kondenzatora treba priključiti otočno na sabirnice 2 da bi se napon U_2 podigao na 10,1 kV ako se snaga potrošnje na tim sabirnicama menja po statičkim naponskim karakteristikama čiji su koeficijenti osetljivosti k_{PU2} = 1,7 i k_{QU2} = 1,3. Kolika je u tom slučaju snaga koju regulacioni transformator RTR daje u mrežu.

Napomena: U proračunima zanemariti poprečnu komponentu pada napona.



Sl. 1.23a Šema distributivne mreže iz zadatka 1.23

Rešenje:

Vrednosti impedansi pojedinih vodova su:

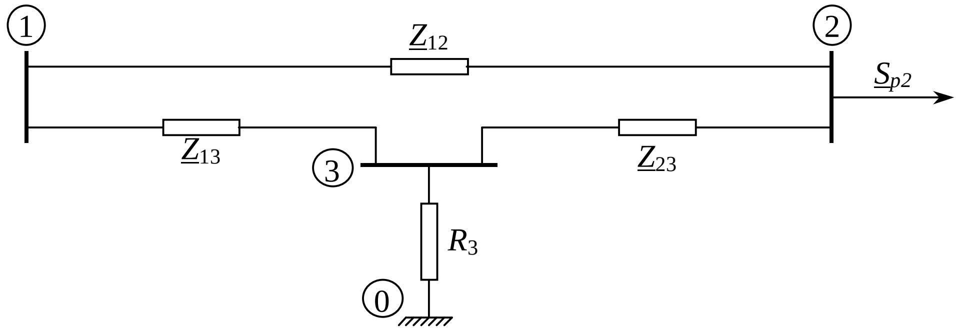
$$\underline{Z}_{12} = (0{,}7 + j4)\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{13} = (0{,}56 + j3{,}2)\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{23} = (0{,}35 + j2)\,\Omega\,.$$

Na osnovu podataka o čvoru 3 konstatuje se da se troši samo aktivna snaga pa se potrošnja u čvoru 3 može modelovati preko aktivne otpornosti:

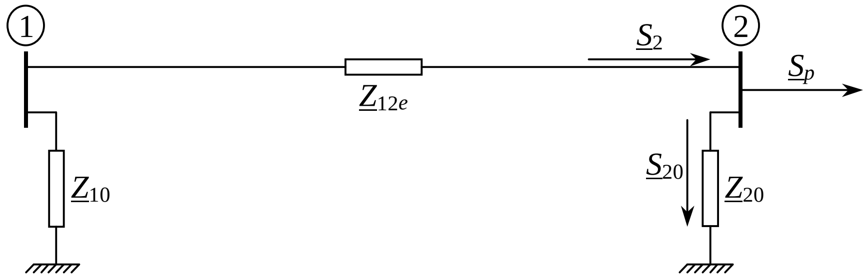
$$R = \frac{U_3^2}{P_3} = \frac{10^2}{2} = 50\,\Omega\,.$$

Ekvivalentna šema za dati sistem prikazana je na sl. 1.23b.

Transfiguracijom zvezde koju čine grane između čvorova 1-3, 2-3 i 3-0 u trougao i sažimanjem paralelnih grana između čvorova 1 i 2, dobija se ekvivalentna šema prikazana na sl. 1.23c.



Sl. 1.23b Ekvivalentna šema sistema, sa sl. 1.23a



Sl. 1.23c Šema dobijena transfiguracijom zvezde sa sl. 1.23b

Vrednosti elemenata ekvivalentne šeme sa sl. 1.23c su:

$$\underline{Z}_{12e} = (0{,}3724 + j2{,}2697)\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{10} = (130{,}56 + j3{,}2)\,\Omega\,;$$
$$\underline{Z}_{2o} = (81{,}6 + j2)\,\Omega\,.$$

Radi određivanja napona na sabirnicama 1 uradiće se bilans snaga. Najpre će se odrediti snaga $\underline{S}_{20}$:

$$\underline{S}_{20} = \frac{U_2^2}{\underline{Z}_{20}^*} = \frac{9{,}8^2}{81{,}6 - j2} = (1{,}176 + j0{,}029)\,\mathrm{MVA}\,.$$

Snaga koja utiče u čvor 2, preko grane 1-2 ($\underline{S}_2$) je onda:

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{p2} + \underline{S}_{20} = (3 + j2) + (1{,}176 + j0{,}029) = (4{,}176 + j2{,}029)\,\mathrm{MVA}\,.$$

Napon u čvoru 1, proračunava se preko izraza:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_2 R_{12e} + Q_2 X_{12e}}{U_2} = 9{,}8 + \frac{4{,}176 \cdot 0{,}3724 + 2{,}029 \cdot 2{,}269}{9{,}8} = 10{,}43\,\mathrm{kV}\,.$$

Posle kompenzacije napon U_2 na sabirnicama 2 podiže se na vrednost 10,1 kV, odnosno promena napona na sabirnicama 2 je ΔU_2 = 0,3 kV. Usled promene napona dolazi do promene vrednosti snaga potrošačkog područja vezanog na sabirnice 2:

$$P_{p2}^{k} = P_{p2} + P_{p2} k_{PU2} \frac{\Delta U_2}{U_2} = 3 + 3 \cdot 1{,}7 \frac{0{,}3}{9{,}8} = 3{,}156 \text{ MW};$$

$$Q_{p2}^{k} = Q_{p2} + Q_{p2} k_{QU2} \frac{\Delta U_2}{U_2} = 2 + 2 \cdot 1{,}3 \frac{0{,}3}{9{,}8} = 2{,}079 \text{ MVAr}.$$

Nova vrednost snage $\underline{S}_{20}$, za slučaj kompenzacije, je onda:

$$\underline{S}_{20} = \frac{U_2^2}{\underline{Z}_{20}^{*}} = \frac{10{,}1^2}{81{,}6 - j2} = (1{,}249 + j0{,}031) \text{ MVA}.$$

Vrednost snage $\underline{S}_2$ za slučaj otočne kompenzacije na sabirnicama 2 sada je:

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{p2} + \underline{S}_{20} - jQ_{BK} = (3{,}156 + j2{,}079) + (1{,}249 + j0{,}031) = 4{,}405 + j(2{,}11 - Q_{BK}).$$

Uvrštavanjem prethodnog izraza u jednačinu za napon u čvoru 1, dobija se izraz u kojem je jedina nepoznata veličina tražena vrednost snage otočne baterije kondenzatora:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_2 R_{12e} + Q_2 X_{12e}}{U_2},$$

gde je $Q_2 = (2{,}11 - Q_{BK}) \text{ MVAr}$

Posle zamene poznatih numeričkih vrednosti, dobija se jednačina:

$$10{,}43 = 10{,}1 + \frac{4{,}405 \cdot 0{,}3724 + (2{,}11 - Q_{BK}) \cdot 2{,}2697}{10{,}1}.$$

Iz gornje jednačine nalazi se snaga kondenzatorske baterije:

$$Q_{BK} = 1{,}36 \text{ MVAr}.$$

Radi određivanja snage regulacionog transformatora potrebno je odrediti bilans snaga u mreži. Na osnovu izračunate vrednosti snage otočne baterije kondenzatora, kompleksna snaga $\underline{S}_2$ je:

$$\underline{S}_2 = 4{,}405 + j(2{,}11 - Q_{BK}) = 4{,}405 + j(2{,}11 - 1{,}36) = (4{,}405 + j0{,}7457) \text{ MVA}.$$

Kompleksni gubici snage na grani između čvorova 1 i 2 su:

$$\underline{S}_{12}^{gub} = (R_{12e} + jX_{12e}) \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2}$$

$$= (0{,}3724 + j2{,}2697) \frac{4{,}405^2 + 0{,}7457^2}{10{,}1^2} = (0{,}073 + j0{,}444) \text{ MVA}.$$

Vrednost kompleksne snage $\underline{S}_{10}$ koja teče kroz impedansu $\underline{Z}_{10}$ je:

$$\underline{S}_{10} = \frac{U_1^2}{\underline{Z}_{10}^*} = \frac{10{,}43^2}{130{,}56 - j3{,}2} = (0{,}833 + j0{,}02)\,\text{MVA}\,.$$

Konačno snaga na izlazu iz regulacionog transformatora RTR je:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{RTR} &= \underline{S}_2 + \underline{S}_{12}^{gub} + \underline{S}_{10} \\ &= (4{,}405 + j0{,}7457) + (0{,}073 + j0{,}444) + (0{,}833 + j0{,}02) = (5{,}311 + j1{,}2097)\,\text{MVA}\,.\end{aligned}$$

❑

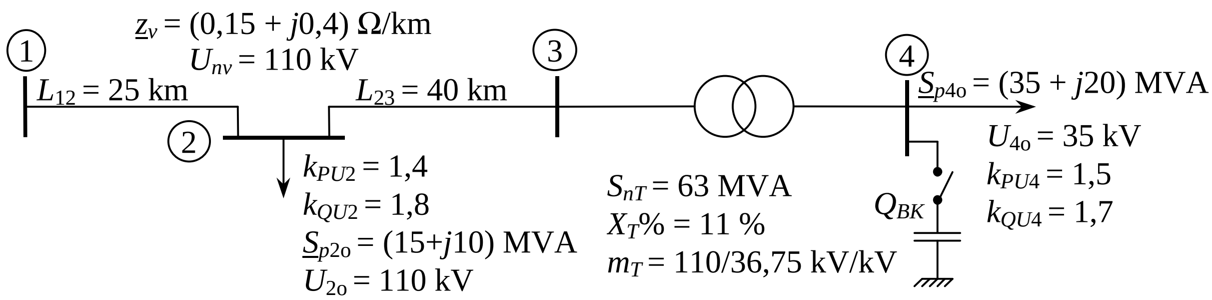
Zadatak 1.24

Za elektroenergetski sistem prikazan na sl. 1.24a, odrediti:

a) Napon na sabirnicama 1 i snagu potrošačkog područja 2, ako je napon na sabirnicama 4 U_4 = 35 kV.

b) Snagu potrošačkog područja 4 ako je posle uključenja otočne kondenzatorske baterije snage Q_{BK} = 15 MVAr na sabirnice 4, izmeren napon na sabirnicama 2 za 5 % veći nego u radnom režimu definisanom u tački a.

Napomena: Zanemariti poprečnu komponentu pada napona.



Sl. 1.24a Elektroenergetski sistem i osnovni podaci iz zadataka 1.24

Rešenje:

a) Impedansa transformatora u grani 3-4 svedena na naponski nivo 110 kV je:

$$\underline{Z}_T = j\frac{X_T\,\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = j\frac{11}{100}\frac{110^2}{63} = j21{,}127\ \Omega\,.$$

Impedanse pojednih vodova na naponskom nivou 110 kV su:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{z}_v L_{12} = (0{,}15 + j0{,}4)\cdot 25 = (3{,}75 + j10)\,\Omega\,,$$
$$\underline{Z}_{23} = \underline{z}_v L_{23} = (0{,}15 + j0{,}4)\cdot 40 = (6 + j16)\,\Omega\,.$$

Prema tome ukupna impedansa izmedju čvorova 2 i 4 je:

$$\underline{Z}_{24} = \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_T = (6 + j37{,}127)\,\Omega\,.$$

Svedena vrednost napona na sabirnicama 4 je:

$$U_{4sv} = m_T U_4 = \frac{110}{36{,}75}\cdot 35 = 104{,}76\ \text{kV}\,.$$

Pošto se zadata vrednost napona na sabirnicama 4 (U_4 = 35 kV) poklapa sa vrednošću napona u polaznoj radnoj tački (U_{4o} = 35 kV), to je snaga potrošačkog područja jednaka zadatoj snazi:

$$\underline{S}_{p4} = \underline{S}_{p4\text{o}} = (35 + \text{j}20)\ \text{MVA}.$$

Na osnovu napred izračunatih i zadatih vrednosti pojedinih veličina može se odrediti vrednost napona na sabirnicama 2, koja iznosi:

$$U_2 = U_{4sv} + \frac{P_{p4}R_{24} + Q_{p4}X_{24}}{U_{4sv}} = 104{,}76 + \frac{35 \cdot 6 + 20 \cdot 37{,}127}{104{,}76} = 113{,}85\ \text{kV}.$$

Za napred izračunatu vrednost napona na sabirnicama 2 mogu se odrediti vrednosti aktivne i reaktivne snage potrošačkog područja vezanog na sabirnice 2 za ovaj radni režim, kao:

$$P_{p2} = P_{p2\text{o}} + P_{p2\text{o}}k_{PU2}\frac{\Delta U_2}{U_{2\text{o}}} = 15 + 15 \cdot 1{,}4 \cdot \frac{113{,}85 - 110}{110} = 15{,}735\ \text{MW};$$

$$Q_{p2} = Q_{p2\text{o}} + Q_{p2\text{o}}k_{QU2}\frac{\Delta U_2}{U_{2\text{o}}} = 10 + 10 \cdot 1{,}8 \cdot \frac{113{,}85 - 110}{110} = 10{,}63\ \text{MVAr}.$$

Dalje, kompleksni gubici snage u grani između čvorova 2 i 4 su:

$$\underline{S}_{24}^{gub} = (R_{24} + jX_{24})\frac{P_{p4}^2 + Q_{p4}^2}{\left(U_4^{sv}\right)^2} = (6 + j37{,}127) \cdot \frac{35^2 + 20^2}{104{,}76^2} = (0{,}888 + j5{,}497)\ \text{MVA}.$$

Kompleksna snaga koja teče po vodu 1-2 kod sabirnica 2 dobija se iz jednačine bilansa snaga:

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_{p4} + \underline{S}_{24}^{gub} + \underline{S}_{p2}$$
$$= 35 + j20 + 0{,}888 + j5{,}497 + 15{,}735 + j10{,}63 = (51{,}623 + j36{,}127)\ \text{MVA}.$$

Sada se konačno može odrediti napon na sabirnicama 1, preko formule:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_{12}R_{12} + Q_{12}X_{12}}{U_2} = 113{,}85 + \frac{51{,}623 \cdot 3{,}75 + 36{,}127 \cdot 10}{113{,}85} = 118{,}724\ \text{kV}.$$

b) Pošto se dodavanjem baterije kondenzatora otočno na sabirnice 4 napon na sabirnicama 2 povećava za 5 % nova vrednost tog napona je:

$$U_2 = 1{,}05 \cdot 113{,}85 = 119{,}54\ \text{kV}.$$

Dodavanjem baterije kondenzatora menja se i napon na sabirnicama 4, a samim tim i snage potrošačkog područja vezanog na sabirnice 4. Zavisnost aktivne i reaktivne snage potrošačkog područja vezanog na sabirnice 4 od napona na tim sabirnicama, data je narednim jednačinama:

$$P_{p4} = P_{p4\text{o}} + P_{p4\text{o}}k_{PU4}\frac{\Delta U_{4sv}}{U_{4osv}} = 35 + 35 \cdot 1{,}5 \cdot \frac{U_{4sv} - 104{,}76}{104{,}76} = (0{,}501U_{4sv} - 17{,}5)\ \text{MW};$$

$$Q_{p4} = Q_{p4\text{o}} + Q_{p4\text{o}}k_{QU4}\frac{\Delta U_{4sv}}{U_{4osv}} = 20 + 20 \cdot 1{,}7 \cdot \frac{U_{4sv} - 104{,}76}{104{,}76} = (0{,}326U_{4sv} - 14)\ \text{MVAr}.$$

Zamenom gornjih izraza u jednačinu za pad napona između tačaka 2 i 4 dobija se kvadratna jednačina u kojoj je jedina nepoznata veličina svedena vrednost napona na sabirnicama 4:

$$U_2 = U_{4sv} + \frac{P_{24}R_{24} + (Q_{24} - Q_{BK})X_{24}}{U_{4sv}},$$

odakle je:

$$119{,}54 = U_{4sv} + \frac{(0{,}501U_{4sv} - 17{,}5)\cdot 6 + (0{,}326U_{4sv} - 29)\cdot 37{,}127}{U_{4sv}},$$

odnosno, posle sređivanja:

$$U_4^2 - 104{,}434U_4 - 1181{,}683 = 0 .$$

Fizički ostvarljivo rešenje gornje jednačine je:

$$U_{4sv} = 114{,}73\ \text{kV} .$$

Na osnovu ove vrednosti napona dobijaju se i vrednosti snaga potrošačkog područja vezanog na sabirnice 4:

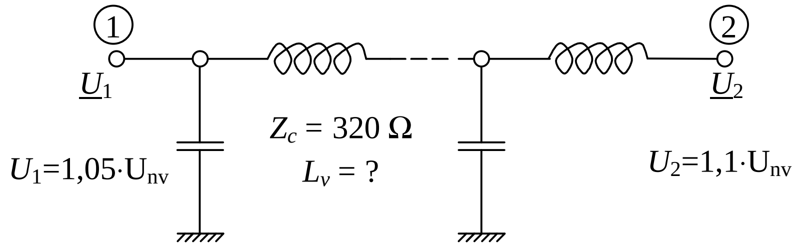
$$P_4 = 0{,}501U_{4sv} - 17{,}5 = 0{,}501\cdot 114{,}73 - 17{,}5 = 40\ \text{MW};$$
$$Q_4 = 0{,}326U_{4sv} - 14 = 0{,}326\cdot 114{,}73 - 14 = 23{,}24\ \text{MVAr} .$$

❑

Zadatak 1.25

a) Do koje dužine visokonaponski vod učestanosti 50 Hz, prikazan na sl. 1.25a, može da bude nekompenzovan u praznom hodu, ako mu se na napojnom kraju održava napon 5 % viši od nominalnog, a maksimalni napon na vodu u stacionarnom stanju ne sme da bude veći od $1{,}1U_{nv}$. Računati sa idealizovanom šemom voda sa raspodeljenim parametrima.

b) Koju snagu treba da ima trofazna otočna prigušnica na kraju trofaznog voda 400 kV računajući njenu snagu pri nominalnom naponu 400 kV, ako se mora zadovoljiti uslov pod a) pri L_v = 500 km (Z_c = 320 Ω).



Sl. 1.25a Idealizovana šema voda sa raspodeljenim parametrima, iz zadatka 1.25

Rešenje:

a) Veza između računskih veličina napona i struja na ulazu i izlazu idealizovanog voda data preko parametara ekvivalentnog četvorokrajnika je:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\lambda & jZ_c \sin\lambda \\ j\dfrac{1}{Z_c}\sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

Iz sistema jednačina (1) za $\underline{I}_2 = 0$ prva jednačina postaje:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 = \underline{U}_2 \cos\lambda \;\Rightarrow\; \frac{U_1}{U_2} = \cos\lambda\,.$$

Prema uslovu zadatka dalje je:

$$\frac{1{,}05U_{nv}}{1{,}1U_{nv}} = \cos\lambda \;\Rightarrow\; \cos\lambda = \frac{1{,}05}{1{,}1} \;\Rightarrow\; \lambda = 17{,}34^\circ\,;$$

$$\lambda = \beta L_v = 0{,}06(^\circ/km)L_v(km) \;\Rightarrow\; L_v = \frac{17{,}34^\circ}{0{,}06\,^\circ/km} = 289\ \text{km}\,.$$

b) U delu zadatka pod b) ponovo se koristi prva iz sistema jednačina (1):

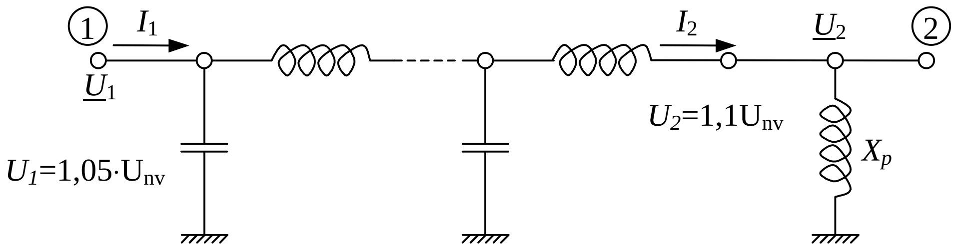
$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2\,.$$

Ako se u ovu jednačinu smeni:

$$\underline{A} = \cos\lambda,\ \ \underline{B} = jZ_c \sin\lambda\ \ i\ \ \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{jX_p} = \frac{1{,}1U_{nv}}{jX_p},$$

dobija se:

$$1{,}05U_{nv} = \cos\lambda \cdot 1{,}1 \cdot U_{nv} + jZ_c \sin\lambda \frac{1{,}1U_{nv}}{jX_p}.$$



Sl. 1.25b Šema idealizovanog voda pri uslovima iz tač. b zadatka 1.25

Iz poslednje relacije nalazi se reaktansa prigušnice (po fazi):

$$X_p = \frac{Z_c \sin\lambda}{\frac{1{,}05}{1{,}1} - \cos\lambda},$$

pri čemu je električna ugaona dužina voda:

$$\lambda = \beta L_v = 0{,}06 \cdot 500 = 30°,$$

tako da je veličina reaktanse prigušnice:

$$X_p = \frac{320 \cdot \sin 30°}{\frac{1{,}05}{1{,}1} - \cos 30°} = 1807{,}5\ \Omega.$$

Snaga trofazne prigušnice na kraju voda (računata za nominalni napon od 400 kV) je onda:

$$Q_p = \frac{U_n^2}{X_p} = \frac{400^2}{1807{,}5} = 88{,}5\ \text{MVAr}.$$

Primedba: S obzirom da u petljastoj mreži, bilo koji kraj može da ostane u praznom hodu, bilo bi potrebno staviti ovakvu prigušnicu na oba kraja voda.

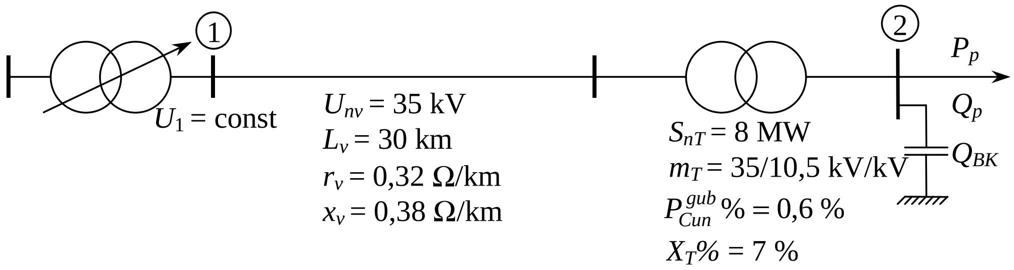
❑

Zadatak 1.26

Napon U_1 na sabirnicama 1 nižeg napona regulacionog transformatora održava se konstantan (sl. 1.26a). Napon na sabirnicama 2 iznosi U_2 = 9,7 kV pri godišnjim vršnim snagama potrošnje P_p = 7 MW i Q_p = 4 MVAr, koje se za ovo pretežno industrijsko potrošačko područje godinama praktično ne menjaju. Koliku snagu baterije kondenzatora Q_{BK} treba otočno priključiti na sabirnice 2 da se podigne napon U_2 na 10,3 kV, ako se snage potrošnje menjaju po statičkim naponskim karakteristikama, pri čemu je k_{PU} = 1,1 i k_{QU} = 1,6.

Za koje vreme bi se otplatila baterija uštedama na gubicima aktivne energije, ako se može približno uzeti da je ekvivalentno godišnje trajanje maksimalnih gubitaka pri isključivanju baterije u noćnom pogonu τ_e = 2500 h/god., i ako je prosečna cena gubitaka na ovom nivou 0,05 NJ/kWh, a cena baterije $C_{BK}[\mathrm{NJ}] = 15000 + 10Q_{BKn}$, gde je Q_{BKn} nominalna snaga baterije u [kVAr]?

Napomena: U proračunima zanemariti poprečnu komponentu pada napona.



Sl. 1.26a Šema elektroenergetskog sistema iz zadatka 1.26

Rešenje:

Sve veličine će biti svedene na stranu mreže 10 kV. Onda je:

$$R_v = r_v L_v m_T^2 = 0{,}32 \cdot 30 \cdot \left(\frac{10{,}5}{35}\right)^2 = 0{,}864\ \Omega\,;$$

$$R_T = \frac{P_{Cun}^{gub}\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{0{,}6}{100}\frac{10{,}5^2}{8} = 0{,}08268\ \Omega\,,$$

jer je $P_{Cun}^{gub}\% \equiv R_T\%$.

$$R = R_v + R_T = 0{,}864 + 0{,}08268 = 0{,}9467\ \Omega\,;$$

$$X_v = x_v L_v m_T^2 = 0{,}38 \cdot 30 \cdot \left(\frac{10{,}5}{35}\right)^2 = 1{,}026\ \Omega\,;$$

$$X_T = \frac{X_T\%}{100}\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{7}{100}\frac{10{,}5^2}{8} = 0{,}9646\ \Omega\,;$$

$$X = X_v + X_T = 1{,}026 + 0{,}9646 = 1{,}9906\ \Omega\,.$$

Pre priključenja baterije kondenzatora može se iz zadatih uslova na kraju 2 izračunati (svedeni) napon na početku voda, prema formuli:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_p R + Q_p X}{U_2}\,. \tag{1}$$

Analogni postupak važi i posle priključenja baterije kondenzatora uz uvažavanje promene snaga potrošnje sa promenom napona:

$$U_1 = U_2 + \Delta U_2 + \frac{\left(P_p + \Delta P_p\right)R + \left(Q_p + \Delta Q_p - Q_{BK}\right)X}{U_2 + \Delta U_2}\,. \tag{2}$$

Kako se prema uslovima zadatka napon U_1 održava konstantan pri svim režimima rada, U_1 biće konstantan u oba slučaja, pa pošto nije od interesa (mogao bi se izračunati iz (1)), biće eliminisan, npr. oduzimanjem (2) od (1) ili izjednačavanjem levih strana (1) i (2):

$$\frac{P_p R + Q_p X}{U_2} = \Delta U_2 + \frac{\left(P_p + k_{PU} P_p \dfrac{\Delta U_2}{U_2}\right)R + \left(Q_p + k_{QU} Q_p \dfrac{\Delta U_2}{U_2} - Q_{BK}\right)X}{U_2 + \Delta U_2}\,.$$

Posle uvrštenja brojčanih vrednosti pojedinih veličina, gornji izraz za pad napona postaje:

$$\frac{7 \cdot 0{,}9467 + 4 \cdot 1{,}9906}{9{,}7} = 0{,}6 + \frac{\left(7 + 1{,}1 \cdot 7 \cdot \dfrac{0{,}6}{9{,}7}\right) \cdot 0{,}9467 + \left(4 + 1{,}6 \cdot 4 \cdot \dfrac{0{,}6}{9{,}7} - Q_{BK}\right) \cdot 1{,}9906}{10{,}3}\,,$$

odakle se dobija linearna jednačina po nepoznatoj Q_{BK}, čije je rešenje:

$$Q_{BK} = 3{,}2738\ \mathrm{MVAr}\,.$$

Snaga baterije, za jednu te istu kapacitivnost, srazmerna je sa kvadratom napona ($Q_{BK}=U^2\omega C$), pa za nominalni napon U_n iznosi:

$$Q_{BKn} = Q_{BK}\left(\frac{U_n}{U}\right)^2 = 3{,}2738 \cdot \left(\frac{10}{10{,}3}\right)^2 = 3{,}086\ \mathrm{MVAr}\,.$$

U opštem slučaju nominalna snaga baterije bira se kao najbliža standardna vrednost iz niza Q_{BKn}. Kako nisu date standardne vrednosti za nominalnu vrednost baterije uzeće se proračunata vrednost $Q_{BKn} = 3{,}086\ \mathrm{MVAr}$. Pomoću ove vrednosti dobije se za cenu baterije (na 10 kV zajedno sa opremom):

$$C_{BKn}\,[\mathrm{NJ}] = 15000 + 10 Q_{BKn}\,[\mathrm{kVAr}] = 15000 + 10 \cdot 3086 = 45860\ \mathrm{NJ}\,.$$

Razlika maksimalnih (snaga) gubitaka, koji se imaju pri vršnim snagama potrošnje bez baterije i sa njom je:

$$\Delta P_{max}^{gub} = P_{max}^{gub} - P_{max\ sa\ BK}^{gub} = R\left|\frac{P_p^2 + Q_p^2}{U_2^2} - \frac{\left(P_p + \Delta P_p\right)^2 + \left(Q_p + \Delta Q_p - Q_{BK}\right)^2}{\left(U_2 + \Delta U_2\right)^2}\right|$$

$$= 0{,}9467 \cdot \left|\frac{7^2 + 4^2}{9{,}7^2} - \frac{\left(7 + 1{,}1 \cdot 7 \cdot \dfrac{0{,}6}{9{,}7}\right)^2 + \left(4 + 1{,}6 \cdot 4 \cdot \dfrac{0{,}6}{9{,}7} - 3{,}2738\right)^2}{10{,}3^2}\right| = 143{,}964\ \text{kW}\ .$$

Prema tome gubici električne energije koji odgovaraju ovoj razlici snaga gubitaka, tj. ušteda u godišnjim gubicima aktivne energije biće:

$$\Delta W^{gub}\left[\text{kWh/god}\right] = \Delta P_{\text{max}}^{\text{gub}}\left[\text{kW}\right]\tau_e\left[\text{h/god}\right] = 143{,}964 \cdot 2500 = 399910\ \text{kWh/god.}$$

Vreme u kome bi se isplatila baterija iz ušteda na gubicima električne energije je:

$$T = \frac{C_{BKn}\left[\text{NJ}\right]}{\Delta C_g\left[\text{NJ/god}\right]} = \frac{C_{BKn}\left[\text{NJ}\right]}{\Delta W^{gub}\left[\text{kWh/god}\right] \cdot C_e\left[\text{NJ/kWh}\right]} = \frac{45860}{399910 \cdot 0{,}05} = 2{,}29\ \text{god}\ .$$

❑

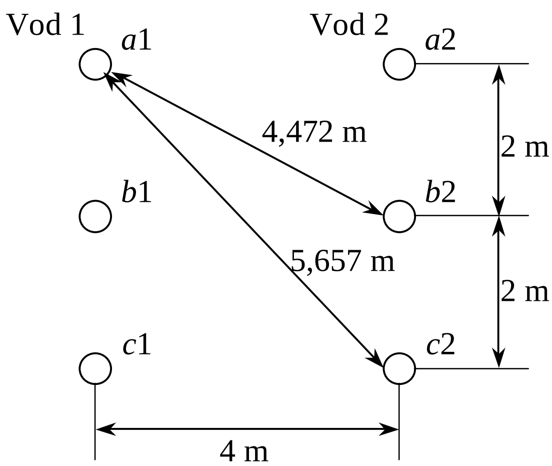
Zadatak 1.27

Dva identična trofazna prenosna voda izgrađena su na zajedničkim stubovima. Provodnici svakog od vodova su postavljeni u vertikalnim ravnima na međusobnom rastojanju od 4 m, sa redosledom faza a, b, c, od vrha, prema podnožju stuba. Vertikalno rastojanje između provodnika pojedinih faza je 2 m, kako je to pokazano na sl. 1.27a. Oba voda su bez transpozicije faza. Na njih je priključen simetričan trofazni napon, i svaki provodnik je opterećen efektivnom strujom od 500 A. Vodovi se tako paralelno vode 30 km. Nominalna učestanost je 50 Hz.

Izračunati vrednosti napona koji se indukuju u svakoj od faza oba paralelna voda, usled njihove geometrijske nesimetrije. Šta će se dogoditi ako se sprovede transpozicija faza na svakih 10 km?

Rešenje:

Međusobni položaj provodnika oba paralelna voda prikazan je na sl. 1.27a.



Sl. 1.27a Međusobni položaj provodnika oba paralelna voda, iz zadatka 1.27

Fazori faznih struja tri faze svakog od vodova su:

$\underline{I}_a = 500 \, \underline{/0°}$;
$\underline{I}_b = 500 \, \underline{/-120°}$;
$\underline{I}_c = 500 \, \underline{/120°}$.

Indukovani napon po dužnom metru faze *a* voda 1, sa tri struje voda 2, izračunava se po formuli:

$$\underline{U}_{a1} = j\frac{\mu_o}{2\pi}\omega_n\left(\underline{I}_a \ln\frac{1}{4} + \underline{I}_b \ln\frac{1}{4,472} + \underline{I}_c \ln\frac{1}{5,657}\right),$$

tako da je:

$$\underline{U}_{a1} = j\frac{4\pi\cdot 10^{-7}}{2\pi}\cdot 2\pi\cdot 50\left(500\ln\frac{1}{4}+500\ln\frac{1}{4{,}472}\underline{/-120^\circ}+500\ln\frac{1}{5{,}657}\underline{/120^\circ}\right)[\mathrm{V/m}],$$

odnosno

$$\underline{U}_{a1} = -j4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 50(693{,}14+748{,}92(-0{,}5-j0{,}866)+866{,}45(-0{,}5+j0{,}866))[\mathrm{V/m}]$$
$$= -j628{,}32\cdot 10^{-7}\cdot(-114{,}55+j101{,}78)[\mathrm{V/m}],$$

odakle je

$$U_{a1} = 628{,}32\cdot 10^{-7}\cdot 153{,}24 = 0{,}963\cdot 10^{-2}\ [\mathrm{V/m}].$$

Na dužini od 30 km, taj indukovani napon je:

$$U_a = 0{,}963\cdot 10^{-2}\cdot 30\cdot 10^3 = 288{,}9\ \mathrm{V}.$$

Na sličan način se proračunavaju i indukovani naponi u preostale dve faze:

$$\underline{U}_{b1} = j4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 50\left(500\ln\frac{1}{4}+500\ln\frac{1}{4{,}472}\underline{/-120^\circ}+500\ln\frac{1}{4{,}472}\underline{/120^\circ}\right)[\mathrm{V/m}]$$
$$= -j628{,}32\cdot 10^{-7}(693{,}14+748{,}92(-0{,}5-j0{,}866)+748{,}92(-0{,}5+j0{,}866))[\mathrm{V/m}]$$
$$= -j628{,}32\cdot 10^{-7}(693{,}14-748{,}92) = j628{,}32\cdot 10^{-7}\cdot 55{,}78\,[\mathrm{V/m}],$$

tako da je

$$U_{b1} = 0{,}351\cdot 10^{-2}\ [\mathrm{V/m}];$$
$$U_b = 0{,}351\cdot 10^{-2}\cdot 30\cdot 10^3 = 105{,}3\ \mathrm{V}.$$

Indukovani napon u fazi *c*, zbog geometrijske simetrije isti je kao indukovani napon u fazi *a* tj.:

$$U_c = U_a = 288{,}9\ \mathrm{V}.$$

Indukovani naponi u istoimenim fazama, oba paralelna voda su takođe isti.

Ako se sprovede striktna transpozicija oba voda, na svakih 10 km, neće postojati ovi indukovani naponi.

❑

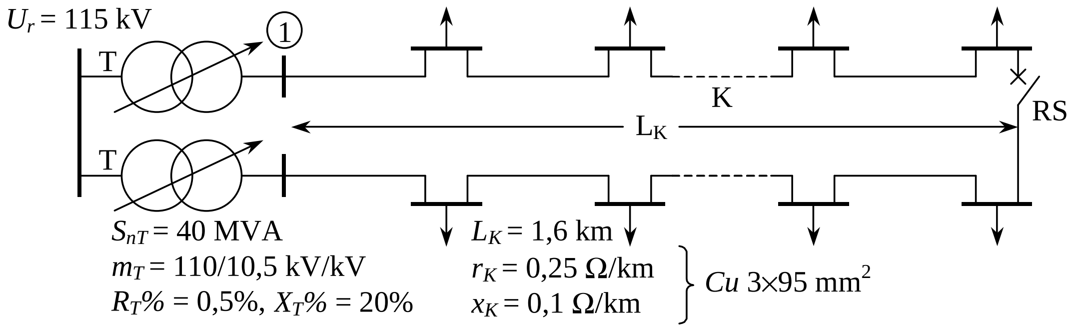
Zadatak 1.28

U napojnoj transformatorskoj stanici 110/10 kV/kV (sl. 1.28a) ugrađena su dva fizički ista regulaciona transformatora, identičnih parametara. Jedan je opterećen sa $P_r = 36$ MW i $Q_r = 12$ MVAr (ind), a drugi sa 80 % opterećenja prvog kako aktivnom, tako i reaktivnom snagom.

Napon na sabirnicama 10 kV održava se konstantan i jednak na obe razdvojene sekcije sabirnica 10 kV. Radni napon na zajedničkim sabirnicama 110 kV je $U_r = 115$ kV. Od radijalno napajane kablovske mreže 10 kV dva naznačena kabla (K) su identična po parametrima i dozvoljenom opterećenju.

Izračunati metodom superpozicije stacionarnu fiktivnu struju izjednačenja (po modulu), usled poprečne komponente pada napona na strani 10 kV, ako se zatvori rastavljač snage RS.

Napomena: Računati približno sa nominalnim odnosom transformacije $m_T = m_{Tn}$, na oba transformatora.



Sl. 1.28a Šema i osnovni podaci za mrežu iz zadatka 1.28

Rešenje:

Linijska vrednost poprečne komponente pada napona na transformatoru na strani 10 kV, usled koje se ima fiktivna struja izjednačenja (superponirana na radnu struju) po zatvaranju rastavljača snage RS je:

$$\delta U = \delta U_1 - \delta U_2 = \frac{PX_T - QR_T}{U_r} - \frac{0{,}8PX_T - 0{,}8QR_T}{U_r}$$

$$= 0{,}2\frac{PX_T - QR_T}{U_r}\,,$$

gde je:

$$X_T = \frac{X_T\%}{100}\frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{20}{100}\frac{10{,}5^2}{40} = 0{,}55\,\Omega\,;$$

$$R_T = \frac{R_T\%}{100}\frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{0{,}5}{100}\frac{10{,}5^2}{40} = 0{,}0138\,\Omega\,;$$

$$U_r = 115\frac{10{,}5}{110} = 10{,}997\text{ kV}\,.$$

Dalje je:

$$\delta U = 0{,}2\frac{|36\cdot 0{,}55 - 12\cdot 0{,}0138|}{10{,}997}\cdot 10^3 = 331{,}4\ \mathrm{V}\ .$$

Impedansa kola cirkulacije je:

$$\underline{Z} = 2\underline{Z}_T + 2\underline{Z}_K\ ,$$

odnosno:

$$|\underline{Z}| = \sqrt{[2(R_T + R_K)]^2 + [2(X_T + X_K)]^2}\ ,$$

gde je:

$$X_K = x_K L_K = 0{,}1\cdot 1{,}6 = 0{,}16\ \Omega\ ;$$
$$R_K = r_K L_K = 0{,}25\cdot 1{,}6 = 0{,}4\ \Omega\ .$$

Moduo impedanse petlje, po kojoj se zatvara fiktivna struja izjednačenja je:

$$|\underline{Z}| = \sqrt{[2(0{,}0138 + 0{,}4)]^2 + [2(0{,}55 + 0{,}16)]^2} = 1{,}645\ \Omega\ .$$

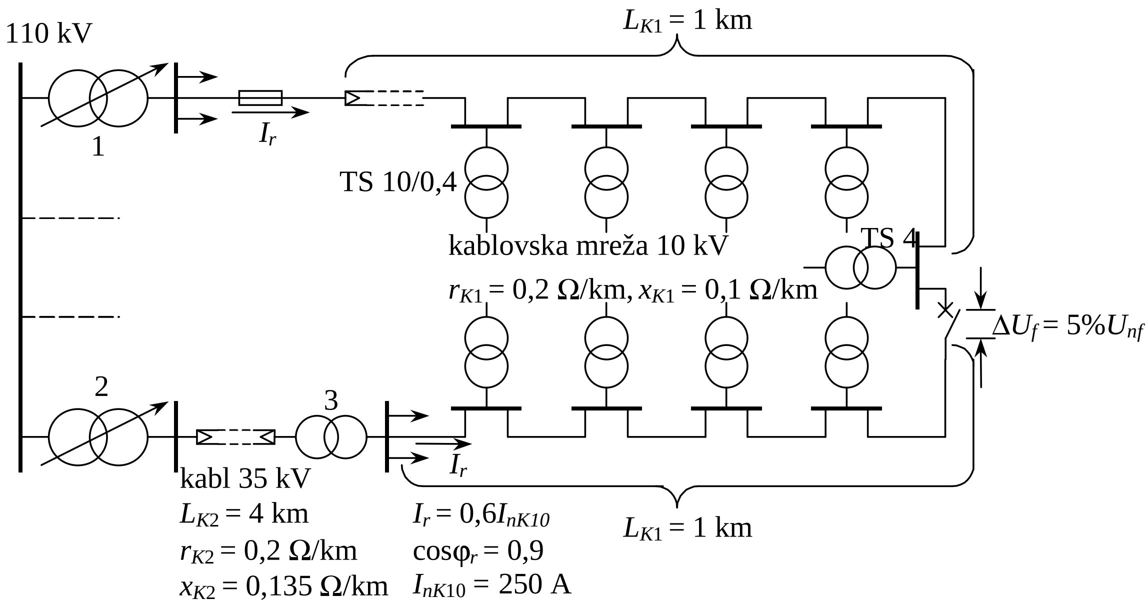
Konačno, fiktivna struja izjednačenja (po fazi) je:

$$|\underline{I}_C| = \frac{\delta U}{\sqrt{3}|\underline{Z}|} = \frac{331{,}4}{\sqrt{3}\cdot 1{,}645} = 148{,}5\ \mathrm{A}\ .$$

❑

Zadatak 1.29

Da li zatvaranje rastavljača snage 10 kV u TS 4, odnosa transformacije 10/0,4 kV/kV (sl. 1.29a), gde se pre toga imala razlika faznih napona $\Delta U_f = 5\ \%\ U_{nf}$ može dovesti do reagovanja zaštite od preopterećenja, podešene na $I_{reag} \geq 1{,}2 I_{nK10}$ sa trajanjem $t \geq 1$ s, na ulazu kablovske mreže 10 kV i isključenja prekidača, ako je fiktivna struja izjednačenja jednaka količniku fazne razlike napona na otvorenom rastavljaču snage i zbirne svedene impedanse (kao vektora) kola cirkulacije, dok jednosmerna komponenta opada sa vremenskom konstantnom *LR*-kola cirkulacije.
Napomena: Svi naponi mreže 10 kV su praktično istofazni.

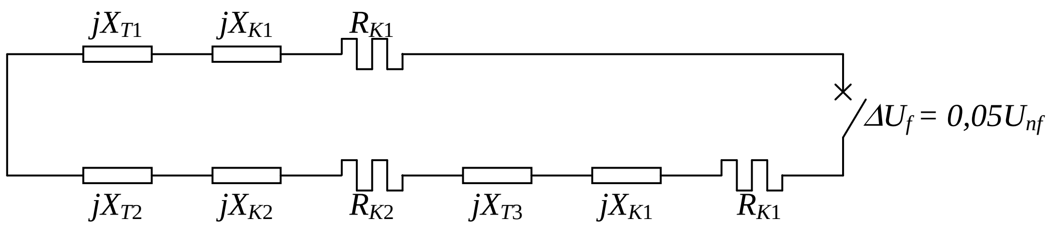


S_{nT1} = 40 MVA	S_{nT2} = 63 MVA	S_{nT3} = 12,5 MVA
m_{T1} = 110/10,5 kV/kV	m_{T2} = 110/36,75 kV/kV	m_{T3} = 35/10,5 kV/kV
$X_{T1}\%$ = 20%	$X_{T2}\%$ = 11%	$X_{T3}\%$ = 7,5%

Sl. 1.29a Šema mreže i osnovni podaci iz zadataka 1.29

Rešenje:

Ekvivalentna šema za sračunavanje sumarne svedene impedanse kola cirkulacije predstavljena je na sl. 1.29b.



Sl. 1.29b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 1.29a

Reaktanse svedene na naponski nivo 10 kV su:

$$X_{T1} = \frac{X_{T1}\%}{100}\frac{U_{nT1}^2}{S_{nT1}} = \frac{20}{100}\frac{10{,}5^2}{40} = 0{,}55\ \Omega\,;$$
$$X_{K1} = x_{K1}L_{K1} = 0{,}1\cdot 1 = 0{,}1\ \Omega\,;$$
$$R_{K1} = r_{K1}L_{K1} = 0{,}2\cdot 1 = 0{,}2\ \Omega\,;$$
$$X_{T2} = \frac{X_{T2}\%}{100}\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}}\frac{1}{m_{T3}^2} = \frac{11}{100}\frac{36{,}75^2}{63}\left(\frac{10{,}5}{35}\right)^2 = 0{,}21\ \Omega\,;$$
$$X_{T3} = \frac{X_{T3}\ \%}{100}\frac{U_{nT3}^2}{S_{nT3}} = \frac{7{,}5}{100}\frac{10{,}5^2}{12{,}5} = 0{,}66\ \Omega\,;$$
$$X_{K2} = x_{K2}L_{K2}\frac{1}{m_{T3}^2} = 0{,}135\cdot 4\cdot\left(\frac{10{,}5}{35}\right)^2 = 0{,}0486 \cong 0{,}05\ \Omega\,;$$
$$R_{K2} = r_{K2}L_{K2}\frac{1}{m_{T3}^2} = 0{,}2\cdot 4\cdot\left(\frac{10{,}5}{35}\right)^2 = 0{,}072 \cong 0{,}07\ \Omega\,.$$

Ekvivalentna reaktansa kola cirkulacije je:

$$X_\Sigma = X_{T1} + X_{K1} + X_{K1} + X_{T3} + X_{K2} + X_{T2} = 0{,}55 + 0{,}1 + 0{,}1 + 0{,}66 + 0{,}05 + 0{,}21 = 1{,}67\ \Omega\,.$$

Ekvivalentna otpornost istog kola je:

$$R_\Sigma = R_{K1} + R_{K1} + R_{K2} = 0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}07 = 0{,}47\ \Omega\,.$$

Prema tome, ekvivalentna impedansa kola cirkulacije je:

$$\underline{Z}_\Sigma = (0{,}47 + j1{,}67)\ \Omega\,.$$

Ako se usvoji da je:

$$\underline{U}_f = U_f\ \underline{/0^\circ} \ \rightarrow\ \underline{\Delta U}_f = \Delta U_f\ \underline{/0^\circ}\,,$$

to će fiktivna struja izjednačenja biti:

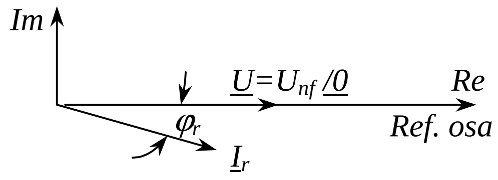
$$\underline{I}_{iz} = \frac{\Delta U_f}{\underline{Z}_\Sigma} = \frac{0{,}05\cdot 10000/\sqrt{3}}{0{,}47 + j1{,}67} = (45{,}13 - j160{,}4)\ \mathrm{A}\,.$$

Pre zatvaranja rastavljača snage, kroz pojedine grane je tekla struja:

$$\left|\underline{I}_r\right| = 0{,}6 I_{nK10} = 0{,}6\cdot 250 = 150\ \mathrm{A}\,;$$
$$\underline{I}_r = 0{,}6 I_{nK10}(\cos\varphi_r - j\sin\varphi_r) = 0{,}6\cdot 250\cdot(0{,}9 - j0{,}436) = (135 - j65{,}4)\ \mathrm{A}\,.$$

Pošto je struja $\underline{I}_r$ po prirodi induktivna, kako je to ilustrovano na fazorskom dijagramu prikaznom na sl. 1.29c, to po zatvaranju rastavljača snage kroz jednu od grana kola cirkulacije teče struja:

$$\underline{I}_{\Sigma} = \underline{I}_{\mathrm{r}} + \underline{I}_{\mathrm{iz}} = 135 - j65{,}4 + 45{,}13 - j160{,}4 = (180{,}13 - j225{,}8)\ \mathrm{A}$$
$$\left|\underline{I}_{\Sigma}\right| = 288{,}84\ \mathrm{A}$$



Sl. 1.29c Fazorski dijagram struja kola sa sl. 1.29b

Kroz drugu granu teče razlika struja:

$$\underline{I}_{razl} = \underline{I}_{\mathrm{r}} - \underline{I}_{\mathrm{iz}} = 135 - j65{,}4 - 45{,}13 + j160{,}4 = (89{,}87 + j95)\ \mathrm{A}\,.$$

Kako je:

$$\left|\underline{I}_{razl}\right| = 130{,}8\ \mathrm{A}\ <\ \left|\underline{I}_{\Sigma}\right| = 288{,}84\ \mathrm{A}\,,$$

to je sa stanovišta reagovanja zaštite od preopterećenja merodavan moduo struje $\left|\underline{I}_{\Sigma}\right|$.

Vremenska konstanta jednosmerne komponente je:

$$T = \frac{X_{\Sigma}}{\omega R_{\Sigma}} = \frac{1{,}67}{314 \cdot 0{,}47} = 0{,}013\ \mathrm{s}\,,$$

pa se zaključuje da se jednosmerna komponenta u celosti priguši u toku 1 s i ne utiče na reagovanje zaštite podešene na vrednost:

$$I_{reag} = 1{,}2 I_{nK10} = 1{,}2 \cdot 250 = 300\ \mathrm{A}\,.$$

Prema tome, pošto je

$$\left|\underline{I}_{\Sigma}\right| = 288{,}84\ \mathrm{A}\ <\ \mathrm{I}_{\mathrm{reag}} = 300\ \mathrm{A}\,,$$

neće doći do reagovanja zaštite.

❑

Zadatak 1.30

Za Al/Če uže poprečnog preseka 240/40 mm^2, aproksimativnim i egzaktnim proračunom odrediti dozvoljenu termičku struju kojom se može opteretiti ovo uže ako su dati sledeći podaci:

- prečnik užeta $d = 21{,}9 \cdot 10^{-3}$ m,
- poprečni presek aluminijuma $s_{Al} = 240 \cdot 10^{-6}$ m^2,
- maksimalna dozvoljena temperatura provodnika $\theta_{max} = 80$°C,
- temperatura ambijenta $\theta_a = -10$°C,
- brzina vetra $v = 2$ m/s,
- napadni ugao vetra $\varphi_v = 20°$,
- ugao između prirodne i prinudne konvekcije $\alpha_v = 90°$,
- koeficijent apsorpcije provodnika $\alpha_s = 0{,}6$,
- koeficijent emisije toplotnog zračenja $\varepsilon = 0{,}3$,
- specifična električna otpornost provodnika na temperaturi od 20°C $\rho_{20} = 2{,}63 \cdot 10^{-8}$ Ωm,
- podužna otpornost provodnika na temperaturi od 20°C $R_{20} = 0{,}0001187$ Ω/m,
- temperaturni koeficijent promene električne otpornosti $\alpha = 0{,}00403$ 1/°C.

***Rešenje*:**

Najpre će se aproksimativnim postupkom odrediti termički dozvoljena struja. Prvo će se izračunati snaga apsorpcije toplote usled sunčevog zračenja prema relaciji:

$$Q_S = \alpha_S d I_S = \alpha_S d \frac{K}{1+10^{(a+bX)}} ,$$

gde je:

I_S – površinska gustina snage zračenja usled sunčevog zračenja,
$X = (\theta_a + 20)/5$ (°C),
K, a, b - konstante korelacione zavisnosti dobijene iz ispitivanog uzorka podataka o snazi sunčevog zračenja u funkciji od temperature ambijenta.
$K = 1000$; a = 0,9334; b = -0,2111.
α_S – koeficijent apsorpcije provodnika,
d – spoljni prečnik provodnika (m).

Za prethodne numeričke vrednosti, snaga apsorpcije sunčevog zračenja se dobija u W.

Zamenom brojčanih vrednosti dobija se:

$$X = (-10+20)/5 = 2 \text{ (°C)} ;$$
$$Q_S = 0{,}6 \cdot 21{,}9 \cdot 10^{-3} \frac{1000}{1+10^{(0{,}9334-0{,}2111 \cdot 2)}} = 3{,}095486 \text{ W} .$$

Podužna specifična toplotna snaga konvekcije za brzine vetra iznad 0,4 m/s računa se prema jednačini:

$$q_{cs} = 0{,}57\pi\left(2{,}42 \cdot 10^{-2} + 7 \cdot 10^{-5} \cdot \Theta\right)\left[0{,}42 + 0{,}68(\sin\varphi_v)^{1{,}08}\right]\left(\frac{vd}{1{,}32 \cdot 10^{-5} + 9{,}5 \cdot 10^{-8} \cdot \Theta}\right)^{0{,}485} ,$$

gde je:

v – brzina vetra (m/s);

φ_v – napadni ugao vetra (°);

$\Theta = \theta_a + 0{,}5\Delta\theta = \theta_a + 0{,}5(\theta_{\max} - \theta_a)$ (°C) .

Za numeričke vrednosti navedene u prethodnoj formuli podužna specifična toplotna snaga konvekcije se dobija u W/m,°C.

Zamenom brojčanih vrednosti dobija se:

$$\Theta = -10 + 0{,}5 \cdot \Delta\theta = -10 + 0{,}5 \cdot (80 + 10) = 35\ ^\circ\mathrm{C}\ ;$$

$$q_{cs} = 0{,}57\pi\left(2{,}42 \cdot 10^{-2} + 7 \cdot 10^{-5} \cdot 35\right)\left[0{,}42 + 0{,}68(\sin 20)^{1{,}08}\right]\left(\frac{2 \cdot 21{,}9 \cdot 10^{-3}}{1{,}32 \cdot 10^{-5} + 9{,}5 \cdot 10^{-8} \cdot 35}\right)^{0{,}485} =$$

$$= 1{,}38276\ \mathrm{W/m,^\circ C}\,.$$

Podužna specifična toplotna snaga radijacije računa se prema jednačini:

$$q_{rs} = 17{,}8 \cdot 10^{-8}\varepsilon d\left(T_p^2 + T_a^2\right)\left(T_p + T_a\right),$$

gde je:

ε - koeficijent emisije toplotnog zračenja,

T_p – temperatura provodnika (K), $T_p = \theta_p + 273$;

T_a – temperatura ambijenta (K), $T_a = \theta_a + 273$.

Za numeričke vrednosti navedene u prethodnoj formuli podužna specifična toplotna snaga konvekcije se dobija u W/m,°C.

Zamenom brojčanih vrednosti dobija se:

$$T_p = 80 + 273 = 353\ \mathrm{K}\ ;$$

$$T_a = -10 + 273 = 263\ \mathrm{K}\ ;$$

$$q_{rs} = 17{,}8 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}3 \cdot 21{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot \left(353^2 + 263^2\right)\left(353 + 263\right) = 0{,}139595\ \mathrm{W/m,^\circ C}$$

Sada se konačno može izračunati termički trajno dozvoljena struja provodnika prema relaciji:

$$I_{td} = \sqrt{\frac{(q_{cs} + q_{rs})(\theta_{max} - \theta_a) - Q_S}{R_{20}\left[1 + \alpha(\theta_{max} - 20)\right]}}\ ,$$

gde je:

R_{20} – podužna električna otpornost provodnika na 20 °C,

α - temperaturni koeficijent promene električne otpornosti.

Zamenom brojčanih vrednosti dobija se:

$$I_{td} = \sqrt{\frac{(1{,}38276+0{,}139595)(80+10)-3{,}095486}{0{,}0001187\cdot[1+0{,}00403\cdot(80-20)]}} = 953{,}16 \text{ A}.$$

Kod egzaktnog proračuna najpre će biti izračunata ekvivalentna brzina vetra koja uvažava efekat prirodne konvekcije prema formuli:

$$v_{eq} = \left(\frac{A}{C}P_r^m\right)^{1/n} G_r^{m/n}\frac{\nu}{d}, \tag{1}$$

gde je:

P_r - Prandtlov broj,
G_r - Grashoffov broj,
ν - kinematska viskoznost fluida,
d - prečnik provodnika,
A,m - konstante koje se određuju na osnovu Prandtlovog i Grashoffovog broja,
C,n - konstante koje se određuju na osnovu Reynoldsovog broja.

Prandtlov broj se računa prema formuli:

$$P_r = 0{,}715 - 2{,}5\cdot 10^{-4}\theta_f,$$

gde je θ_f temperatura tankog filma na površini provodnika koja se računa prema izrazu:

$$\theta_f = \theta_{sr} = \frac{\theta_{max}+\theta_a}{2} = \frac{80+(-10)}{2} = 35°\text{C}.$$

Na osnovu prethodno izračunate vrednosti za θ_f za Prandtlov broj se dobija:

$$P_r = 0{,}715 - 2{,}5\cdot 10^{-4}\cdot 35 = 0{,}7062.$$

Grashoffov broj se računa prema izrazu:

$$G_r = \frac{g\beta\tau d^3}{\nu},$$

gde je:

g – ubrzanje zemljine teže (g = 9,81 m/s^2),
β - zapreminski koeficijent širenja fluida ($\beta = (273+\theta_{sr})^{-1}$),
τ - nadtemperatura provodnika ($\tau = \theta_{max} - \theta_a$),
ν - kinematska viskoznost fluida ($\nu = 1{,}32\cdot 10^{-5} + 9{,}5\cdot 10^{-8}\cdot\theta_f$).

Na osnovu datih podataka za prethodno definisane veličine dobijaju se sledeće vrednosti:

$$\beta = (273 + 35)^{-1} = 0{,}0032\ °C^{-1},$$
$$\tau = 80 - (-10) = 90\ °C,$$
$$\nu = 1{,}32 \cdot 10^{-5} + 9{,}5 \cdot 10^{-8} \cdot 35 = 1{,}65 \cdot 10^{-5}\ .$$

Konačno, za Grashoffov broj dobija se vrednost:

$$G_r = \frac{9{,}81 \cdot 0{,}0032 \cdot 90 \cdot 0{,}0219^3}{1{,}65 \cdot 10^{-5}} = 1{,}1026 \cdot 10^{-5}.$$

Treba ukazati da su Prandtlov, Grashoffov i Reynoldsov broj bezdimenzione veličine.

Konstante A i m određuju se na osnovu proizvoda Prandtlovog i Grashoffovog broja koji iznosi:

$$G_r P_r = 1{,}1026 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}7062 = 7{,}787 \cdot 10^4.$$

Pošto se ovaj proizvod nalazi u opsegu $G_r \cdot P_r \in (10^4 \div 10^7)$ to se za koeficijente A i m dobijaju vrednosti: A = 0,48 i m = 0,25.

Konstante C i n u izrazu (1) zavise od Reynoldsovog broja koji se računa prema izrazu:

$$R'_e = \frac{vd}{\nu} = \frac{2 \cdot 0{,}0219}{1{,}6525 \cdot 10^{-5}} = 2{,}6505 \cdot 10^3$$

Pošto se Reynoldsov broj nalazi u opsegu $R'_e \in (35 \div 5000)$ to se za koeficijente C i n dobijaju vrednosti: C = 0,583 i n = 0,188.

Sada se konačno može odrediti ekvivalentna brzina:

$$v_{eq} = \left(\frac{0{,}48}{0{,}583} \cdot 0{,}7062^{0{,}25} \right)^{1/0{,}188} \cdot (1{,}1026 \cdot 10^{-5})^{0{,}25/0{,}188} \cdot \frac{1{,}6525 \cdot 10^{-5}}{0{,}0219} = 0{,}1971\ \mathrm{m/s}.$$

Efektivna brzina je sada:

$$v_{ef} = \sqrt{v^2 + 2vv_{eq}\cos\alpha_v + v_{eq}^2} = \sqrt{2^2 + 2 \cdot 2 \cdot 0{,}1971 \cdot \cos 90° + 0{,}1971^2} = 2{,}0097\ \mathrm{m/s}.$$

Reynoldsov broj za slučaj efektivne brzine je sada jednak:

$$R_e = \frac{v_{ef}\, d}{\nu} = \frac{2{,}0097 \cdot 0{,}0219}{1{,}6525 \cdot 10^{-5}} = 2{,}6634 \cdot 10^3.$$

Na osnovu ove vrednosti za Reynoldsov broj određuju se konstante C'' i n'' koje su potrebne za proračun Nusseltovog broja. Pošto se Reynoldsov broj nalazi u opsegu $R_e \in (2650 \div 50000)$ to se za koeficijente C'' i n'' dobijaju vrednosti $C'' = 0{,}178$ i $n'' = 0{,}633$. Takođe, pošto se napadni ugao vetra nalazi u opsegu $\varphi_v \in (0° \div 24°)$ to se za konstante G, E i p, potrebne za proračun

Nusseltovog broja, dobijaju vrednosti: G = 0,42, E = 0,68 i p = 1,08. Konačno za Nusseltov broj dobija se vrednost:

$$N_u = C''(R_e)^{n''}\left[G + E(\sin\varphi_v)^p\right] =$$
$$= 0{,}178 \cdot (2{,}6634 \cdot 10^3)^{0{,}633} \cdot \left[0{,}42 + 0{,}68 \cdot (\sin 20°)^{1{,}08}\right] = 16{,}6122\,.$$

Sada se može izračunati i koeficijent odvođenja toplote konvekcijom (k_{tk}):

$$k_{tk} = N_u \frac{\lambda}{d}\,,$$

gde je λ toplotna provodljivost fluida na površini provodnika koja se sračunava iz formule:

$$\lambda = 2{,}42 \cdot 10^{-2} + 7{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_f = 2{,}42 \cdot 10^{-2} + 7{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot 35 = 0{,}0267\,.$$

Prema tome, koeficijent odvođenja toplote konvekcijom je:

$$k_{tk} = 16{,}6122 \cdot \frac{0{,}0267}{0{,}0219} = 20{,}2684.$$

Koeficijent odvođenja toplote zračenjem (k_{tz}) određuje se preko sledeće relacije:

$$k_{tz} = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \cdot \frac{(273 + \theta_{max})^4 - (273 + \theta_a)^4}{\theta_{max} - \theta_a} =$$
$$= 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}3 \cdot \frac{(273 + 80)^4 - (273 + (-10))^4}{80 - (-10)} = 2{,}0304\,.$$

Vidi se da je k_{tk} oko 10 puta veće od k_{tz}. Bez vetra k_{tk} je samo dvostruko veće od k_{tz}.

Sada se može izračunati ukupni koeficijent odvođenja toplote (k_t) koji je jednak zbiru koeficijenata odvođenja toplote zračenjem i konvekcijom:

$$k_t = k_{tz} + k_{tk} = 2{,}0304 + 20{,}2684 = 22{,}2988\,.$$

Za proračun termički dozvoljene struje potrebno je još izračunati površinsku gustinu snage zračenja usled sunčevog zračenja (I_S) prema jednačini:

$$I_S = \frac{1000}{1 + 10^{0{,}089 - 0{,}04222\theta_a}} = \frac{1000}{1 + 10^{0{,}089 - 0{,}04222 \cdot (-10)}} = 235{,}5774 \text{ W/m}^2\,.$$

Konačno termički dozvoljena struja dobija se preko izraza:

$$I_{td} = \sqrt{\frac{s_{Al}\, d\left[\pi k_t(\theta_{max} - \theta_a) - \alpha_s I_s\right]}{\rho_{20}\left[1 + \alpha(\theta_{max} - 20)\right]}} =$$

$$= \sqrt{\frac{240 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}0219 \cdot \left[\pi \cdot 22{,}2988 \cdot (80-(-10)) - 0{,}6 \cdot 235{,}5774\right]}{2{,}63 \cdot 10^{-8} \cdot \left[1 + 0{,}00403 \cdot (80-20)\right]}} = 995{,}95 \text{ A} .$$

Upoređivanjem dobijenih vrednosti za termički trajno dozvoljenu struju kod aproksimativne (953,16 A) i egzaktne metode (995,95 A), može se zaključiti da se kod aproksimativne metode dobija nešto konzervativniji rezultat (oko 4 %), pa se otuda vidi da za granične situacije, gde se zahteva maksimalno korišćenje kapaciteta, egzaktna metoda ima puni smisao.

Radi ilustracije tablična vrednost za termički dozvoljenu struju provodnika data za temperaturu ambijenta od 20°C i brzinu vetra od 0,6 m/s iznosi 645 A. Poslednji podatak je preuzet iz Končarevog priručnika. Poređenjem rezultata se uočava da ambijentni uslovi imaju izrazit uticaj na konačne rezultate. Naime, u tabličnim uslovima temperatura ambijenta je 20°C, a u zadatku je specifikovana na -10°C, a brzina vetra je u tabličnim uslovima 0,6 m/s, dok je u zadatku specifikovana na 2 m/s. Ovo je rezultiralo u povećanju trajno dozvoljene struje za oko 54 %.

❑