

**Poglavlje 3**

**PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA**

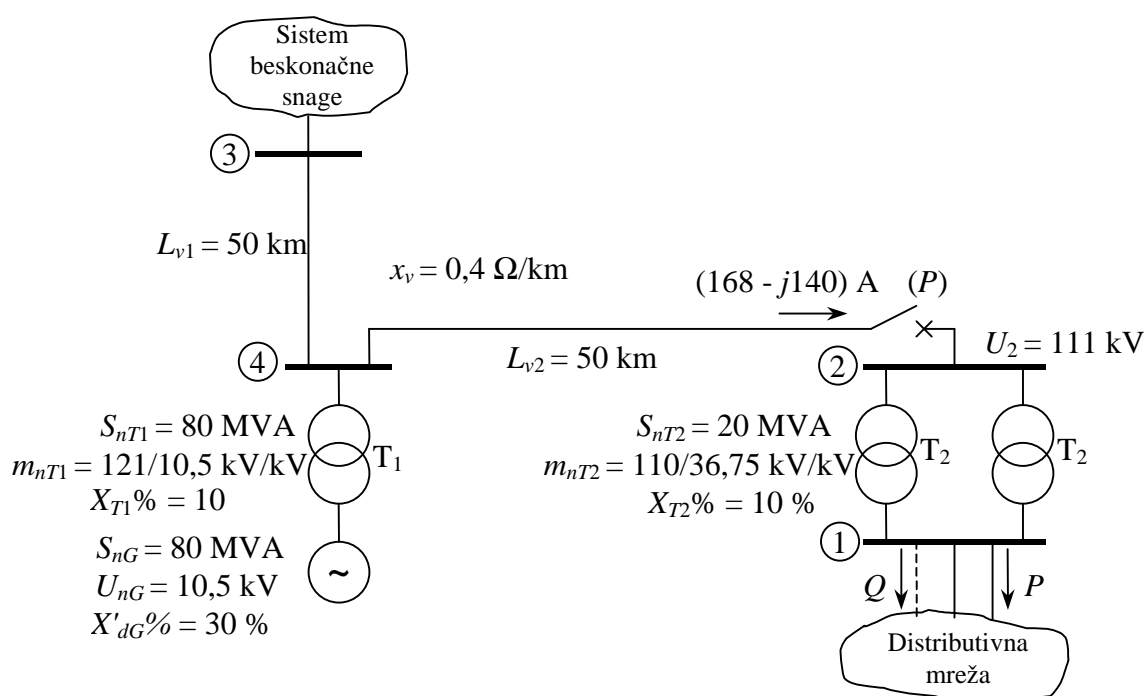
**Zadatak 3.1**

Na sl. 3.1a monofazno je prikazan trofazni elektroenergetski sistem sa parametrima elemenata sistema. U nekom režimu rada sistema kroz prekidač ( $P$ ) protiče fazna struja od  $I_{P2} = (168 - j140)$  A u naznačenom smeru. Fazni stav naznačene struje je određen u odnosu na fazni napon na sabirnicama 2, koji u tom slučaju iznosi  $111/\sqrt{3}$  kV.

Odrediti naizmeničnu komponentu tranzijentne struje trofaznog kratkog spoja koja protiče kroz prekidač ( $P$ ) u slučaju da se kvar dogodio na sabirnicama 2. Koliko iznosi snaga isključenja prekidača ( $P$ ) u tom slučaju?

Zadatak rešiti metodom superpozicije. Nacrtati smerove struje u pojedinim delovima sistema, u stvarnoj i u fiktivnim ekvivalentnim šemama.

*Napomena:* Trofazna snaga isključenja prekidača ( $S_i$ ) je definisana kao  $\sqrt{3}U_2I'_p$  (gde je  $U_2$  međufazni napon, a  $I'_p$  fazna struja).



**Sl. 3.1a** Monofazna šema i osnovni podaci o sistemu iz zadatka 3.1

**Rešenje:**

Na sl. 3.1b prikazane su ekvivalentne šeme datog sistema za režim trofaznog kratkog spoja (režim 1), koji se na osnovu principa superpozicije može ekvivalentovati preko dva režima (režimi 2 i 3). Režim 2 odgovara normalnom režimu neposredno pre nastanka kvara, dok režim 3 predstavlja režim za vreme kvara, gde se pretpostavlja da se kvar desio iz praznog hoda, odnosno ne tretira se radno stanje koje je prethodilo kvaru.

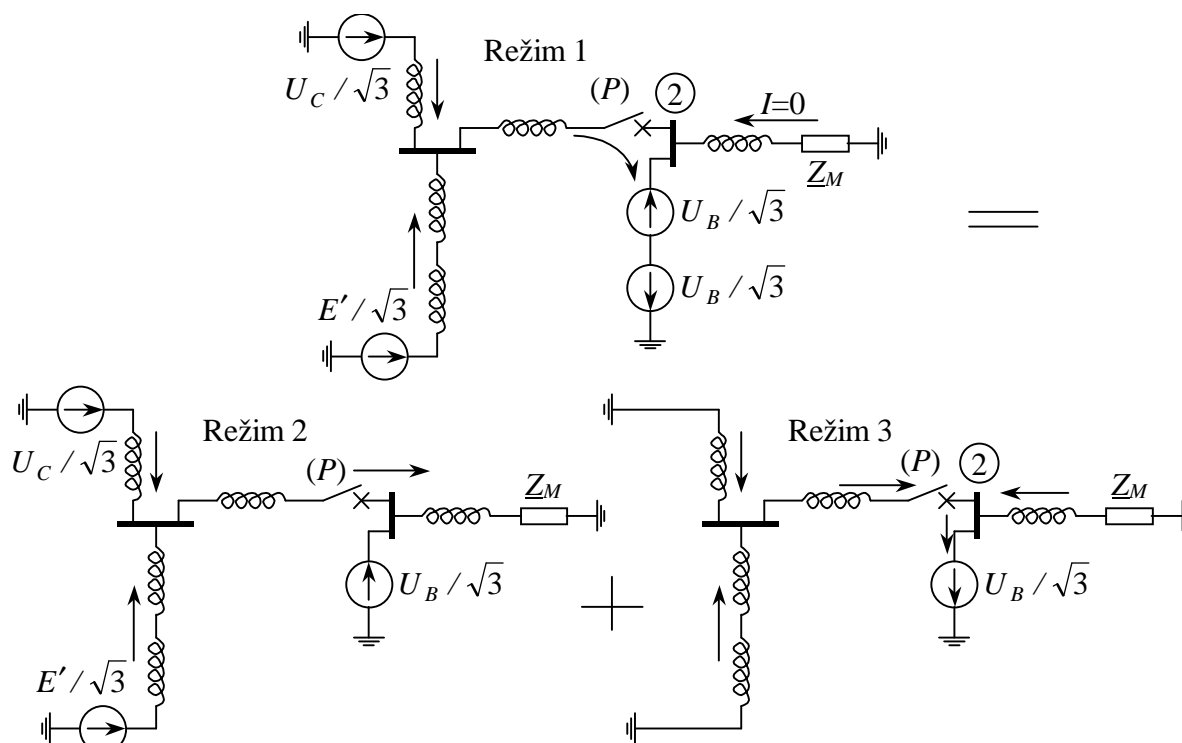
U režimu 2 poznata je struja koja protiče kroz prekidač ( $P$ ):  $I_{P2} = (0,168 - j0,140)$  kA. Prema tome, potrebno je samo odrediti struju kroz prekidač ( $P$ ) u režimu 3. Sabirajući struje kroz prekidač ( $P$ ) u režimu 2 i 3 dobiće se tražena struja u režimu 1. Preostaje da se odredi struja kroz prekidač  $P$  za režim 3.

Vrednosti impedansi pojedinih elemenata datog sistema svedeni na naponski nivo na kome se desio kvar jednaki su:

$$X_{v1} = X_{v2} = 50 \cdot 0,4 = 20 \Omega ;$$

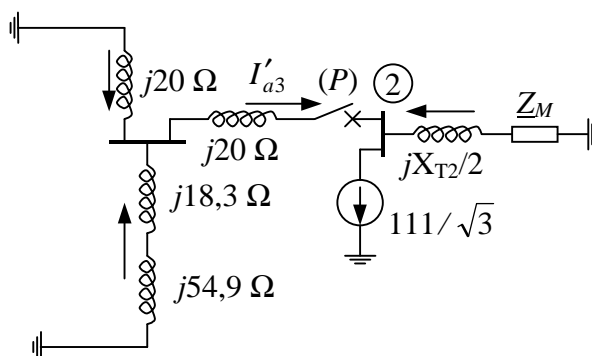
$$X_{T1} = \frac{10}{100} \frac{121^2}{80} = 18,3 \Omega ;$$

$$X'_{aG} = \frac{30}{100} \frac{121^2}{80} = 54,9 \Omega .$$



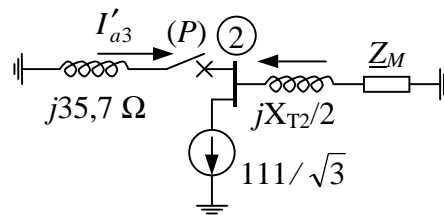
**Sl. 3.1b** Ekvivalentna šema sistema iz zadatka 3.1, za proračun ukupne tranzijentne struje trofaznog kratkog spoja (režim 1), dobijene superpozicijom struje pre kvara (režim 2) i struje kvara (režim 3)

Izračunati podaci o impedansama elemenata sistema mogu se uneti u ekvivalentnu šemu koja odgovara režimu 3, prikazanu na sl. 3.1c.



**Sl. 3.1c** Ekvivalentna šema sistema, za proračun struje kvara, koja odgovara Režimu 3 sa sl. 3.1b

Ekvivalentovanjem paralelnih i rednih grana dobija se zamenska šema na sl. 3.1d.



**Sl. 3.1d** Ekvivalentna šema sistema iz režima 3 sa sl. 3.1b, posle ekvivalentovanja paralelnih i rednih grana sa sl. 3.1c

Na osnovu ekvivalentne šeme sa sl. 3.1d može se izračunati struja kvara kroz prekidač  $P$  za režim 3, kao

$$\underline{I}'_{P3} = \frac{111/\sqrt{3}}{j35,7} = -j1,8 \text{ kA}.$$

Ukupna struja kroz prekidač ( $P$ ) dobija se kao zbir

$$\underline{I}'_P = \underline{I}_{P2} + \underline{I}'_{P3} = (0,168 - j0,140) - j1,8 = (0,168 - j1,94) \text{ kA} = 1,947 \text{ kA} / -85,05^\circ$$

Snaga isključenja prekidača ( $P$ ) je onda:

$$S_i = \sqrt{3}U_2 I'_P = 1,73 \cdot 111 \cdot 1,947 = 374 \text{ MVA}.$$

□

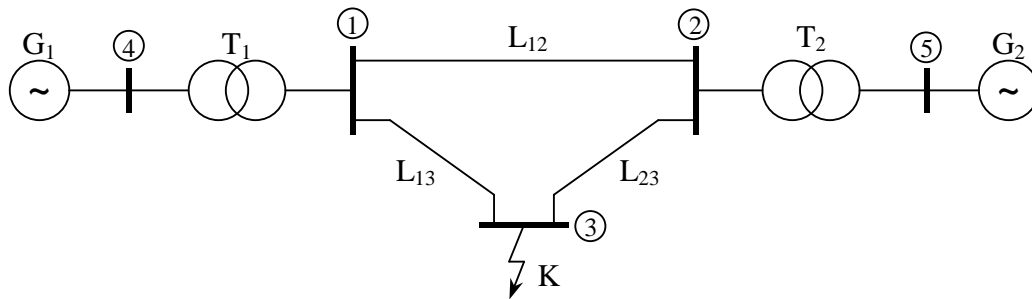
**Zadatak 3.2**

Dat je elektroenergetski sistem prikazan na sl. 3.2a. Parametri elemenata sistema izraženi u r.j. za baznu snagu  $S_B = 100$  MVA dati su u tab. 3.2a ispod slike, za bazne napone navedene u drugoj koloni iste tabele.

a) Proračunati bazne struje i impedanse svih elemenata, za bazne vrednosti napona iz druge kolone tab. 3.2a.

b) Nacrtati mreže impedansi direktnog, inverznog i nultog redosleda sistema.

c) Mreže iz tačke b redukovati na odgovarajuće Theveninove ekvivalente, gledano sa mesta kvara (na sabirnicama 3).



Sl. 3.2a Monofazna šema i osnovni parametri sistema iz zadatka 3.2

Tab. 3.2a Osnovni parametri sistema

Element	Naponski nivo (bazni napon) (kV)	Reaktanse elemenata		
		$X_d$ (r.j.)	$X_i$ (r.j.)	$X_0$ (r.j.)
$G_1^*$	25	0,2	0,2	0,05
$G_2^*$	13,8	0,2	0,2	0,05
$T_1^{**}$	25/230	0,05	0,05	0,05
$T_2^{***}$	13,8/230	0,05	0,05	0,05
$L_{12}$	230	0,1	0,1	0,3
$L_{13}$	230	0,1	0,1	0,3
$L_{23}$	230	0,1	0,1	0,3

\* - Oba generatora uzemljena su preko induktivne reaktanse 0,03 r.j.

\*\* - Sprega Y/y (oba zvezdišta su direktno uzemljena)

\*\*\* - Sprega Y/d (zvezdište na strani višeg napona je direktno uzemljeno)

**Rešenje:**

a) Za  $S_B = 100$  MVA, bazne vrednosti struja i impedansi na pojedinim naponskim nivoima su:

- Mreža 25 kV:

$$G_1 \text{ i } T_1: I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 25} = 2310 \text{ A}; \quad Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{25^2}{100} = 6,25 \Omega.$$

- Mreža 230 kV:

$$T_1, T_2, L_{12}, L_{13} \text{ i } L_{23}: I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230} = 251 \text{ A}; \quad Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{230^2}{100} = 529 \Omega.$$

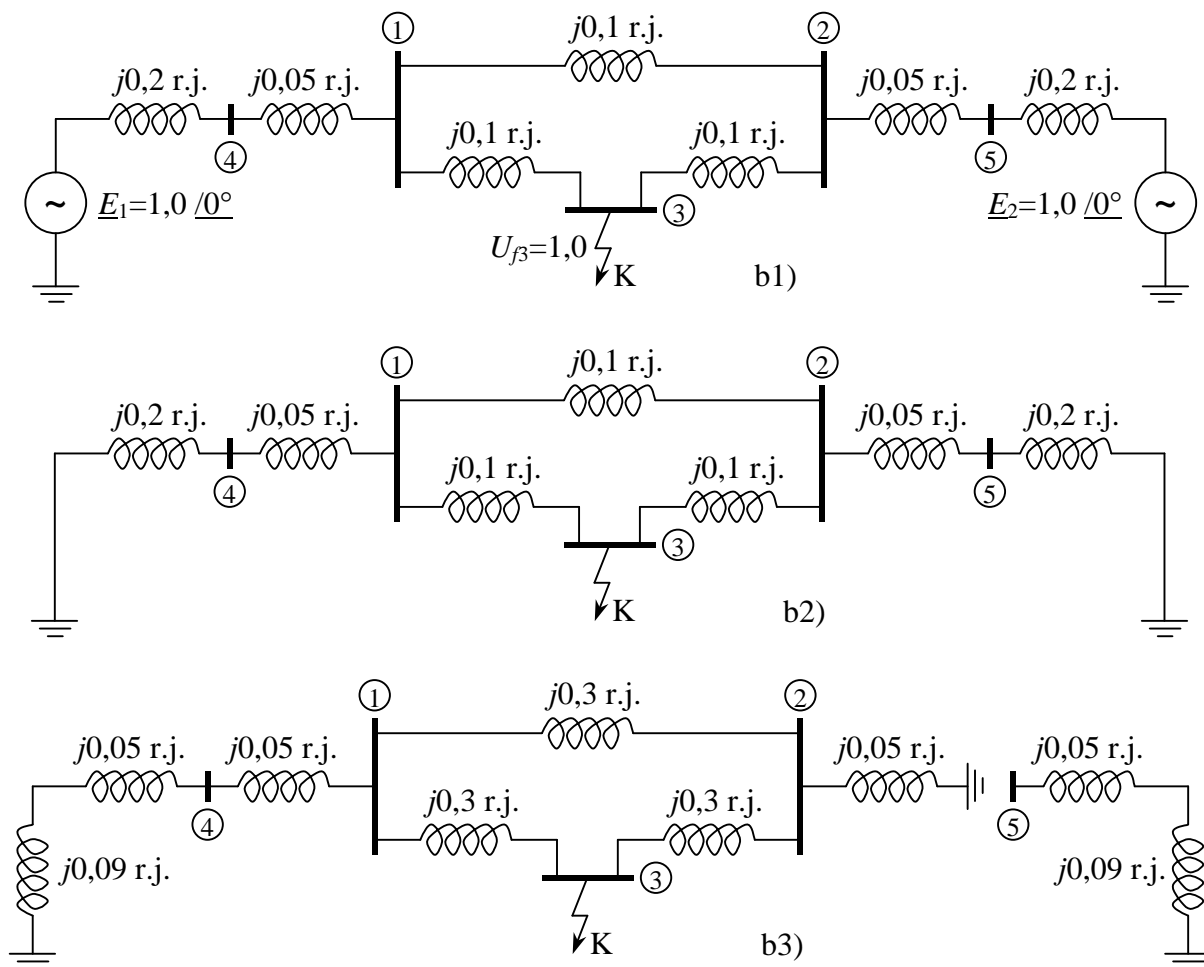
- Mreža 13,8 kV:

$$G_2: I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 4184 \text{ A}.$$

$$T_2: I_B = \frac{S_B}{U_B} = \frac{100 \cdot 10^3}{13,8} = 7246 \text{ A (Zbog sprege } \Delta \text{ na strani 13,8 kV).}$$

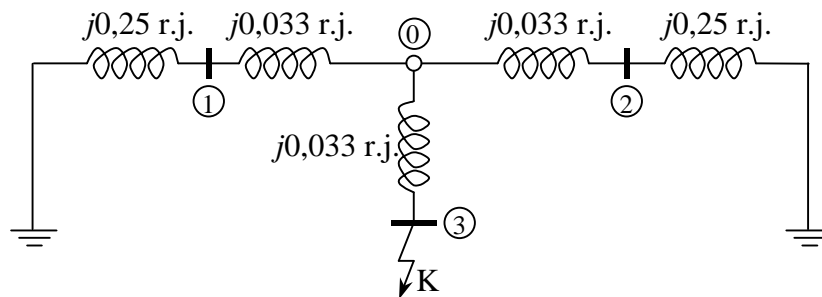
$$G_2 \text{ i } T_2: Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{13,8^2}{100} = 1,905 \Omega.$$

b) Mreže impedansi sistema direktnog, inverznog i nultog redosleda (sa upisanim vrednostima napona i impedansi) prikazane su na sl. 3.2b.



Sl. 3.2b Mreže direktnih (b1), inverznih (b2) i nultih (b3) impedansi sistema

Za proračune ekvivalentnih impedansi sva tri redosleda (impedanse direktnog i inverznog redosleda su iste) treba prvo izvršiti transfiguraciju trougla 1-2-3 sa prethodnih slika, a potom sprovesti ekvivalentovanje paralelnih i rednih grana, shodno sl. 3.2c i sl. 3.2d.



**Sl. 3.2c** Ekvivalentna mreža direktnih (inverznih) impedansi, posle transfiguracije trougla 1-2-3 sa sl. 3.2b1 i sl. 3.2b2

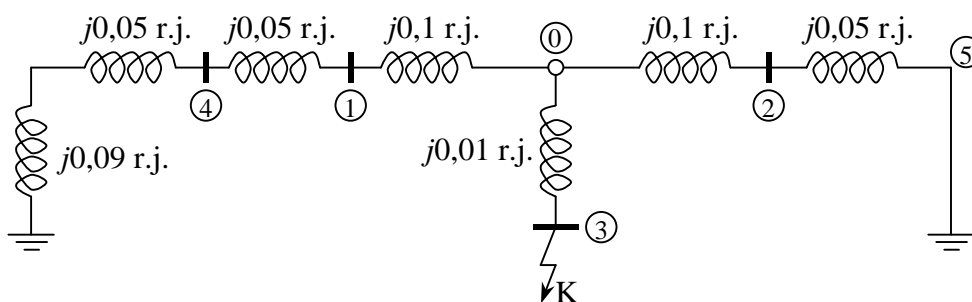
Sa sl. 3.2c dobija se:

$$\underline{Z}_d^{ekv} = \frac{j0,25 + j0,033}{2} + j0,033 = j0,175 \text{ r.j.}$$

Ekvivalentna inverzna impedansa jednaka je ekvivalentnoj direktnoj impedansi:

$$\underline{Z}_i^{ekv} = \underline{Z}_d^{ekv} = j0,175 \text{ r.j.}$$

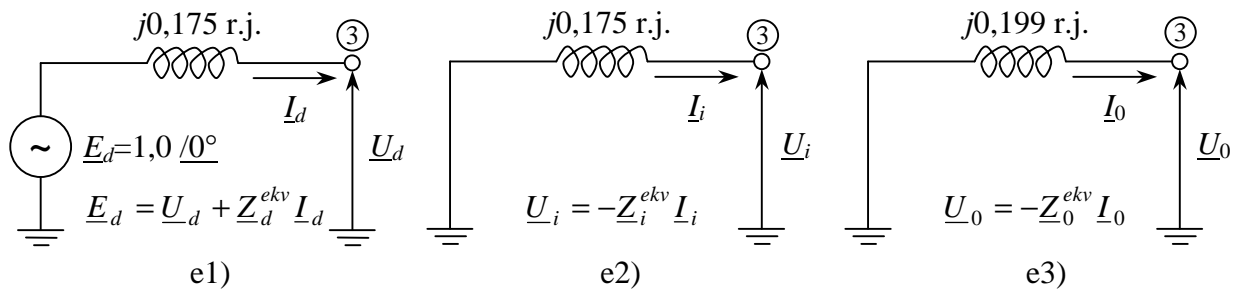
Ekvivalentna nulta impedansa dobija se na analogan način kao i direktna impedansa, i ona je posle transfiguracije trougla 1-2-3 sa sl. 3.2b3 u zvezdu prikazana na sl. 3.2d.



**Sl. 3.2d** Ekvivalentna mreža nultih impedansi posle transfiguracije trougla 1-2-3 sa sl. 3.2b3 u zvezdu

$$\underline{Z}_0^{ekv} = \frac{(j0,29) \cdot (j0,15)}{j(0,29 + 0,15)} + j0,1 = j0,199 \text{ r.j.}$$

Theveninovi ekvivalenti mreža direktnog, inverznog i nultog redosleda, za kvar na sabirnicama 3, prikazani su na sl. 3.2e.



**Sl. 3.2e** Theveninovi ekvivalenti mreža direktnog (e1), inverznog (e2) i nultog redosleda sistema (e3), pri kvaru na sabirnicama 3





**Zadatak 3.3**

Pod pretpostavkom da su ekvivalentne impedanse sistema direktnog i inverznog redosleda (gledano sa mesta kvara) jednake ( $\underline{Z}_d^{ekv} = \underline{Z}_i^{ekv}$ ) i da se otpori u impedansama elemenata mogu zanemariti ( $R^{ekv} \approx 0$ ):

a) Naći izraze za odnose struja jednofaznog ( $I_{k1Z}$ ) i dvofaznog kratkog spoja sa zemljom ( $I_{k2Z}$ ) i struje trofaznog kratkog spoja ( $I_{k3}$ ) u funkciji modula odnosa ekvivalentnih impedansi nultog i direktnog redosleda ( $k = \left| \frac{\underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv}} \right|$ ), kao i izraz za odnos  $3|I_{02Z}/I_{k3}| = f(k)$  ( $3I_{02Z}$  je struja, koja pri dvofaznom kratkom spoju sa zemljom teče kroz zemlju).

b) Naći vrednosti odnosa  $k_m$  pri kojima se struje jednofaznog i dvofaznog kratkog spoja sa zemljom izjednačuju.

c) Nacrtati dijagrame  $|I_{k1Z}/I_{k3}| = f_1(k)$ ;  $|I_{k2Z}/I_{k3}| = f_2(k)$  i  $3 \cdot |I_{02Z}/I_{k3}| = f_3(k)$  i dati odgovarajuće komentare.

**Rešenje:**

a) Izrazi za pojedine struje kvara (po fazi) za uprošćenja definisana u zadatku su:

$$I_{k3} = \frac{U_{fr}}{X_d^{ekv}};$$

$$I_{k1Z} = \frac{3U_{fr}}{\left| \underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv} \right|} = \frac{U_{fr}}{X_d^{ekv}} \frac{3}{2+k} = I_{k3} \frac{3}{2+k};$$

$$I_{k2Z} = \sqrt{3} U_{fr} \frac{\left| (1+a^2) \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv} \right|}{\left| \underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv} \right|} =$$

$$= \sqrt{3} \frac{U_{fr}}{\left| \underline{Z}_d^{ekv} \right|} \frac{|k-a|}{1+2k} = \sqrt{3} I_{k3} \frac{\left| k + \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right|}{1+2k} = \sqrt{3} I_{k3} \frac{\sqrt{k^2+k+1}}{1+2k},$$

ili:

$$I_{k2Z} = \sqrt{3} \frac{U_{fr}}{\left| \underline{Z}_d^{ekv} \right|} \frac{|k-a^2|}{1+2k} = \sqrt{3} I_{k3} \frac{\left| k + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right|}{1+2k} = \sqrt{3} I_{k3} \frac{\sqrt{k^2+k+1}}{1+2k};$$

$$I_{02Z} = U_{fr} \frac{\left| \underline{Z}_i^{ekv} \right|}{\left| \underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv} \right|} = \frac{U_{fr}}{\left| \underline{Z}_d^{ekv} \right|} \frac{1}{1+2k} = I_{k3} \frac{1}{1+2k}.$$

U gornjim relacijama sa  $U_{fr}$  obeležena je fazna vrednost radnog napona na mestu kvara pre nastanka kvara.

Sada su izrazi za tražene odnose struja kvara:

$$\frac{I_{k1Z}}{I_{k3}} = \frac{3}{2+k};$$

$$\frac{I_{k2Z}}{I_{k3}} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{k^2+k+1}}{2+k};$$

$$3 \frac{I_{o2Z}}{I_{k3}} = \frac{3}{1+2k},$$

dok je

$$3 \frac{I_{o1Z}}{I_{k3}} = \frac{I_{k1Z}}{I_{k3}} = \frac{3}{2+k}.$$

b) Vrednost odnosa  $k_m = \left| \frac{\underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv}} \right|$  pri kojima su struje dvofaznog i jednofaznog kratkog spoja sa zemljom (struje zemljospoja) jednake nalaze se iz jednačine:

$$\frac{3}{2+k_m} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{k_m^2+k_m+1}}{1+2k_m}.$$

Ona se, posle sređivanja svodi na algebarsku jednačinu četvrtog stepena po  $k_m$ :

$$k_m^4 + 5k_m^3 - 3k_m^2 - 4k_m + 1 = 0,$$

koja ima dva realna rešenja:

$$k_{m1} = 1,00 \text{ i } k_{m2} = 0,227.$$

S druge strane, struje koje teku kroz zemlju ( $3I_0$ ) pri jednostrukom i dvostrukom zemljospoju, izjednačavaju se samo pri vrednosti  $k_{m1} = 1,00$ .

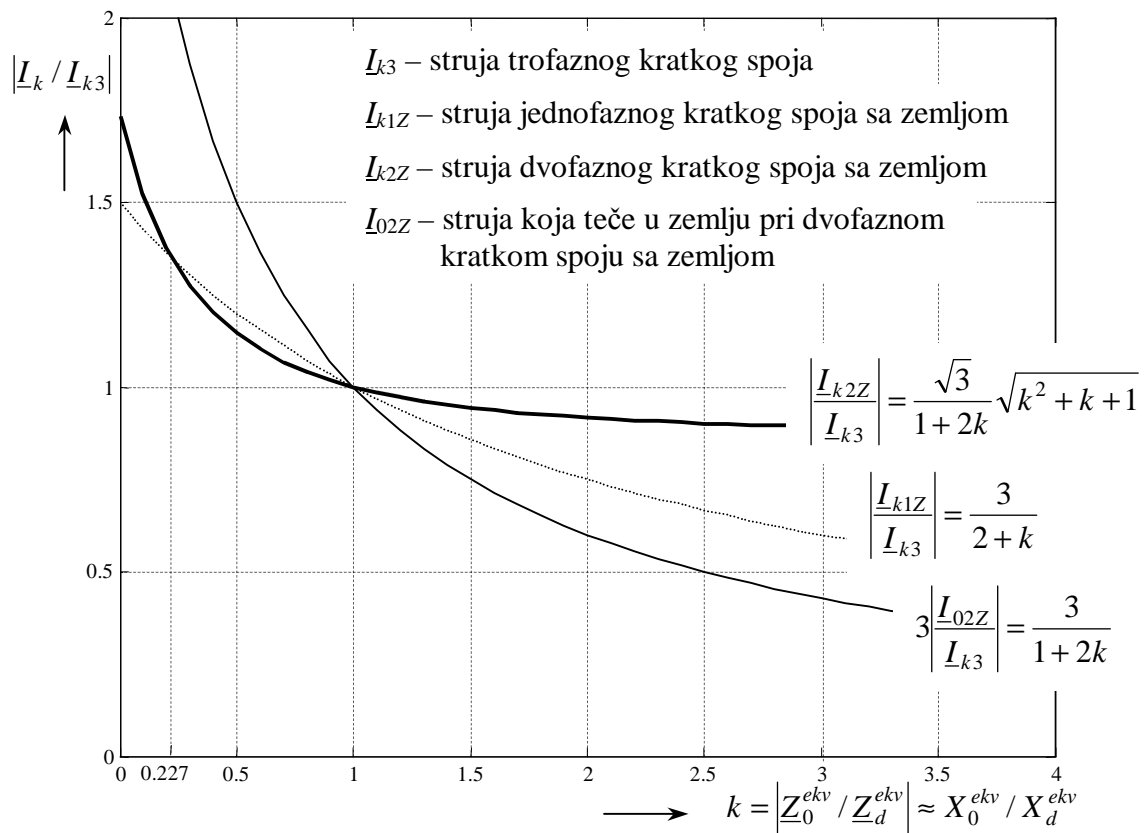
c) Dijagrami  $I_{k1Z}/I_{k3}$ ,  $I_{k2Z}/I_{k3}$  i  $3I_{o2Z}/I_{k3}$  u funkciji od  $k = \left| \frac{\underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv}} \right| = X_0^{ekv}/X_d^{ekv}$  nacrtani su na sl. 3.3a. Vidi se da postoje tri oblasti, koje karakterišu najveću vrednost struje kvara u mreži, zavisno od veličine odnosa  $k$ :

1.  $0 \leq k \leq 0,227$ , najveća je struja dvofaznog kratkog spoja sa zemljom  $I_{k2Z}$ ,
2.  $0,227 \leq k \leq 1,000$ , najveća je struja jednofaznog kratkog spoja sa zemljom  $I_{k1Z}$ ,
3.  $1,000 \leq k \leq \infty$ , najveća je struja trofaznog kratkog spoja  $I_{k3}$ .

Pri tome je najveća struja dvofaznog kratkog spoja (bez spoja sa zemljom):

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}U_{fr}}{\left| \underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} \right|} = \frac{U_{fr}}{\left| \underline{Z}_d^{ekv} \right|} \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{X_d^{ekv}}{X_i^{ekv}}} = I_{k3} \frac{\sqrt{3}}{1+1} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3} = 0,866 I_{k3}.$$

S druge strane struja  $3I_0$ , merodavna za dimenzionisanje uzemljenja, koja pri zemljospoju teče kroz zemlju za vrednosti  $0 \leq k \leq 1,000$ , veća je pri dvofaznom kratkom spoju sa zemljom, a za  $1,000 \leq k \leq \infty$ , pri jednofaznom kratkom spoju sa zemljom.



**Sl. 3.3a** Dijagram zavisnosti struja pri zemljospojevima, od odnosa ekvivalentnih impedansi nultog i direktnog redosleda na mestu kvara  $k = \left| \frac{Z_0^{ekv}}{Z_d^{ekv}} \right|$



**Zadatak 3.4**

Pod istim pretpostavkama kao u zadatku 3.3, proračunati napone zdravih faza na mestu kvara pri svim nesimetričnim kratkim spojevima u funkciji odnosa ekvivalentnih impedansi (gledano sa mesta kvara)  $k = \left| \frac{\underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv}} \right|$ . Dati fazorsku interpretaciju dobijenih rezultata za  $k \rightarrow \infty$  (izolovano zvezdište), i nacrtati dijagrame napona zdravih faza i zvezdišta za dva razmatrana tipa kratkih spojeva sa zemljom, u funkciji od odnosa  $k$ .

**Rešenje:**

a) Dvofazni kratak spoj (bez istovremenog spoja sa zemljom) faza B i C:

Simetrične komponente struja i napona su:

$$\begin{aligned} \underline{I}_d &= \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}}, & \underline{U}_d &= \frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr}, \\ \underline{I}_i &= -\underline{I}_d, & \underline{U}_d &= \underline{U}_i, \\ \underline{I}_0 &= 0, & \underline{U}_0 &= 0, \end{aligned}$$

tako da je napon faze A:

$$\underline{U}_{fA} = \left| \underline{U}_d + \underline{U}_i + \underline{U}_0 \right| = \frac{2 \left| \underline{Z}_i^{ekv} \right|}{\left| \underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} \right|} U_{fr} = U_{fr},$$

odnosno, on je jednak faznom radnom naponu sistema na mestu kvara pre nastanka kvara.

b) Jednofazni kratak spoj sa zemljom (faza A):

Simetrične komponente struja i napona su:

$$\begin{aligned} \underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 &= \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}}; \\ \underline{U}_d &= \underline{U}_{fr} - \underline{Z}_d^{ekv} \underline{I}_d = \underline{U}_{fr} - \frac{\underline{U}_{fr} \cdot \underline{Z}_d^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} \underline{U}_{fr} = \\ &= \frac{X_i^{ekv} + X_0^{ekv}}{2X_d^{ekv} + X_0^{ekv}} \underline{U}_{fr} = \frac{1+k}{2+k} \underline{U}_{fr}; \\ \underline{U}_i &= -\underline{Z}_i^{ekv} \underline{I}_d = -\frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} \underline{U}_{fr} = -\frac{X_i^{ekv}}{2X_d^{ekv} + X_0^{ekv}} \underline{U}_{fr} = -\frac{1}{2+k} \underline{U}_{fr}; \\ \underline{U}_0 &= -\underline{Z}_0^{ekv} \underline{I}_d = -\frac{\underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} \underline{U}_{fr} = -\frac{X_0^{ekv}}{2X_d^{ekv} + X_0^{ekv}} \underline{U}_{fr} = -\frac{k}{2+k} \underline{U}_{fr}. \end{aligned}$$

Naponi zdravih faza (*B* i *C*) su onda:

$$\begin{aligned} U_{fB} &= \left| \underline{a}^2 \underline{U}_d + \underline{a} \underline{U}_i + \underline{U}_0 \right| = U_{fr} \left| \underline{a}^2 - \frac{(\underline{a}^2 + \underline{a}) + k}{2+k} \right| = U_{fr} \frac{|\underline{a}^2 + \underline{a}^2 k - \underline{a} - k|}{2+k} = \\ &= U_{fr} \frac{|(\underline{a}^2 - \underline{a}) + k(\underline{a}^2 - 1)|}{2+k} = U_{fr} \frac{\left| -\frac{3}{2}k - j\sqrt{3}\left(1 + \frac{k}{2}\right) \right|}{2+k} = \frac{U_{fr}}{2+k} \sqrt{\frac{9}{4}k^2 + 3\left(1+k + \frac{k^2}{4}\right)} \\ &= \frac{\sqrt{3}U_{fr}}{2+k} \sqrt{k^2 + k + 1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{fC} &= \left| \underline{a} \underline{U}_d + \underline{a}^2 \underline{U}_i + \underline{U}_0 \right| = U_{fr} \left| \underline{a} - \frac{(\underline{a}^2 + \underline{a}) + k}{2+k} \right| = U_{fr} \frac{|\underline{a} + \underline{a}k - \underline{a}^2 - k|}{2+k} = \\ &= U_{fr} \frac{|(\underline{a} - \underline{a}^2) + k(\underline{a} - 1)|}{2+k} = U_{fr} \frac{\left| -\frac{3}{2}k + j\sqrt{3}\left(1 + \frac{k}{2}\right) \right|}{2+k} = \frac{U_{fr}}{2+k} \sqrt{\frac{9}{4}k^2 + 3\left(1+k + \frac{k^2}{4}\right)} = \\ &= \frac{\sqrt{3}U_{fr}}{2+k} \sqrt{k^2 + k + 1}, \end{aligned}$$

tj.

$$U_{fB} = U_{fC} = \frac{\sqrt{3}U_{fr}}{2+k} \sqrt{k^2 + k + 1}.$$

Napon zvezdišta je:

$$\underline{U}_N = -\underline{Z}_0^{ekv} \underline{I}_0 = \underline{U}_0 = -\frac{k}{2+k} \underline{U}_{fr},$$

odnosno

$$U_N = \frac{k}{2+k} U_{fr}.$$

Za  $k = 1$  ima se:

$$U_{fB} = U_{fC} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{fr}}{2+1} \sqrt{1+1+1} = U_{fr};$$

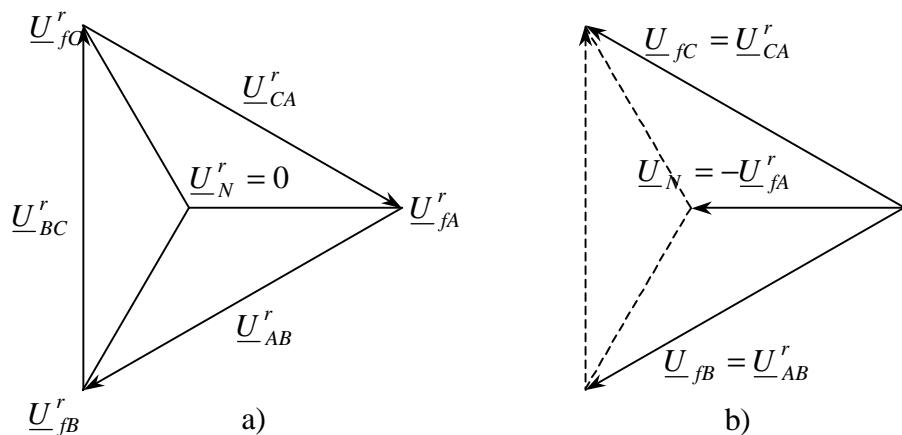
$$U_N = U_{fr} \frac{1}{2+1} = \frac{U_{fr}}{3}.$$

Kada  $k \rightarrow \infty$  ima se:

$$U_{fB} = U_{fC} = \sqrt{3}U_{fr};$$

$$U_N = U_{fr}.$$

Fazorska interpretacija napona na mestu kvara u slučaju jednofaznog kratkog spoja sa zemljom, kada je zvezdište sistema izolovano, prikazano je na sl. 3.4a.



**Sl. 3.4a** Fazorska interpretacija napona na mestu kvara za slučaj jednofaznog kratkog spoja sa zemljom, pri izolovanom zvezdištu sistema ('r' u superskriptu označava fazore napona pre kvara):  
a) fazorski dijagram napona pre kvara, b) fazorski dijagram napona posle kvara

c) Dvofazni kratak spoj sa zemljom (faze B i C)

Simetrične komponente napona su:

$$\begin{aligned} \underline{U}_d = \underline{U}_i = \underline{U}_0 &= \frac{\underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv}} \underline{U}_{fr} = \frac{X_i^{ekv} X_0^{ekv}}{X_d^{ekv} X_i^{ekv} + X_d^{ekv} X_0^{ekv} + X_i^{ekv} X_0^{ekv}} \underline{U}_{fr} \\ &= \frac{k}{2k+1} \underline{U}_{fr}. \end{aligned}$$

Napon zdrave faze je:

$$U_{fA} = \frac{3k}{2k+1} U_{fr},$$

a napon zvezdišta:

$$\underline{U}_N = -\underline{Z}_0^{ekv} \underline{I}_{02Z} = \underline{U}_0 = \frac{k}{2k+1} \underline{U}_{fr}.$$

Za  $k = 1$  dobija se:

$$U_{fA} = \frac{3U_{fr}}{3} = U_{fr};$$

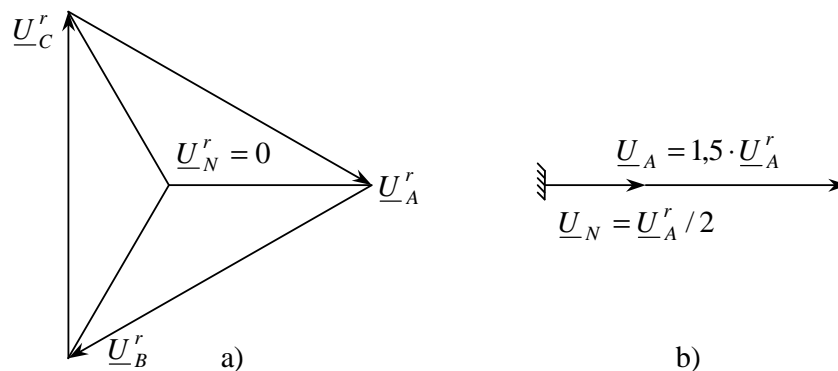
$$U_N = \frac{1}{3}U_{fr}.$$

a kada  $k \rightarrow \infty$  ima se:

$$U_{fA} = \frac{3}{2}U_{fr} = 1,5U_{fr};$$

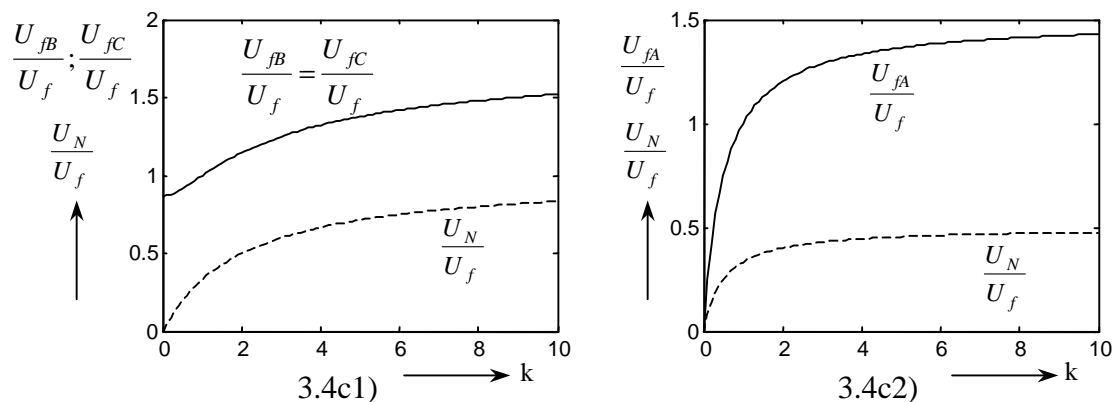
$$U_N = \frac{1}{2}U_{fr} = 0,5U_{fr}.$$

Fazorska interpretacija napona na mestu kvara u slučaju dvofaznog kratkog spoja sa zemljom, prikazana je na sl. 3.4b.



**Sl. 3.4b** Fazorska interpretacija napona na mestu kvara za slučaj dvofaznog kratkog spoja sa zemljom, pri izolovanom zvezdištu sistema ('r' u superskriptu označava fazore napona pre kvara):  
a) fazorski dijagram napona pre kvara, b) fazorski dijagram napona posle kvara

Dijagrami napona zdravih faza i zvezdišta u funkciji odnosa  $k$ , za slučaj jednofaznog kratkog spoja sa zemljom, prikazani su na sl. 3.4c1, a za slučaj dvofaznog kratkog spoja sa zemljom, na sl. 3.4c2.



**Sl. 3.4c** Dijagrami napona zdravih faza i zvezdišta, u funkciji odnosa  $k = \left| \frac{Z_0^{ekv}}{Z_d^{ekv}} \right|$  uz pretpostavku  $R^{ekv} = 0$  i  $X_d^{ekv} = X_i^{ekv}$ : 3.4c1) Jednofazni kratak spoj sa zemljom; 3.4c2) Dvofazni kratak spoj sa zemljom

□

**Zadatak 3.5**

Za sistem definisan u zadatku 3.2, proračunati fazore struja i napona, ako se pretpostavi da su se na sabirnicama 3 sistema dogodili sledeći kvarovi:

- Trofazni kratak spoj.
- Dvofazni kratak spoj.
- Dvofazni kratak spoj sa zemljom (dvofazni zemljospoj).
- Jednofazni kratak spoj sa zemljom (jednofazni zemljospoj).

U gornjim proračunima, koristiti ekvivalentne reaktanse sistema direktnog (inverznog) i nultog redosleda, sračunate u tački c zadatka 3.2, uz pretpostavku da je u momentu nastanka kvara napon na sabirnicama 3 bio 1,00 r.j..

**Rešenje:**

- a) Trofazni kratak spoj

Granični uslovi su:  $\underline{U}_d = \underline{U}_i = \underline{U}_0 = 0$ .

Simetrične komponente struja su:

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv}} = \frac{1,0}{0,175 \angle 90^\circ} = 5,71 \text{ r.j.} \angle -90^\circ = -j5,71 \text{ r.j.} = -j5,71 \cdot 251 = -j1433,2 \text{ A};$$

$$\underline{I}_i = \underline{I}_0 = 0.$$

Fazni naponi na mestu kvara su:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{fA} \\ \underline{U}_{fB} \\ \underline{U}_{fC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Fazne struje na mestu kvara su:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -j5,71 \text{ r.j.} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5,71 \angle -90^\circ \\ 5,71 \angle 150^\circ \\ 5,71 \angle 30^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1432,2 \text{ A} \angle -90^\circ \\ 1432,2 \text{ A} \angle 150^\circ \\ 1432,2 \text{ A} \angle 30^\circ \end{bmatrix}.$$

- b) Dvofazni kratak spoj (faze B i C)

Granični uslovi su:  $\underline{I}_A = 0; \underline{I}_B = -\underline{I}_C; \underline{U}_{fB} = \underline{U}_{fC}$ .

Simetrične komponente struja i napona su:

$$\underline{I}_d = -\underline{I}_i = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} = \frac{1,00}{j0,175 + j0,175} = -j2,86 \text{ r.j.} = -j2,86 \cdot 251 = -j717,9 \text{ A};$$

$$\underline{I}_0 = 0.$$



$$\underline{U}_d = \underline{U}_i = \underline{E} - \underline{Z}_d^{ekv} \cdot \underline{I}_d = -\underline{Z}_i^{ekv} \cdot \underline{I}_i = -j0,175 \cdot j2,86 = 0,5 \text{ r.j.} = 0,5 \cdot 231 = 115,5 \text{ A};$$

$$\underline{U}_0 = 0.$$

Fazni naponi na mestu kvara su (za  $U_{fB} = U_B / \sqrt{3} = 133,4 \text{ kV}$ ):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{fA} \\ \underline{U}_{fB} \\ \underline{U}_{fC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,5 \\ 0,5 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0 \text{ r.j.} \\ -0,5 \text{ r.j.} \\ -0,5 \text{ r.j.} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 133,4 \text{ kV } /0^\circ \\ -66,7 \text{ kV } /0^\circ \\ -66,7 \text{ kV } /0^\circ \end{bmatrix}.$$

Fazne struje na mestu kvara su:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -j2,86 \\ j2,86 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \text{ r.j.} \\ -4,95 \text{ r.j.} \\ 4,95 \text{ r.j.} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1242,5 \text{ A} \\ 1242,5 \text{ A} \end{bmatrix}.$$

c) Dvofazni zemljospoj (faze B i C)

Grafični uslovi su:  $\underline{I}_A = 0$ ;  $\underline{U}_{fB} = \underline{U}_{fC} = 0$ .

Simetrične komponente struja i napona su:

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \frac{\underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}}} = \frac{1,0}{j0,175 + j \frac{0,175 \cdot 0,199}{0,175 + 0,199}} = -j3,73 \text{ r.j.} = -j936,2 \text{ A};$$

$$\underline{I}_i = -\frac{\underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} \underline{I}_d = -\frac{j0,199}{j(0,175 + 0,199)} (-j3,73) = j1,99 \text{ r.j.} = j1,99 \cdot 251 = j499,5 \text{ A};$$

$$\underline{I}_0 = -\frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} \underline{I}_d = -\frac{j0,175}{j(0,175 + 0,199)} (-j3,73) = j1,75 \text{ r.j.} = j1,75 \cdot 251 = j439,25 \text{ A};$$

$$\underline{U}_d = \underline{U}_i = \underline{U}_0 = -\underline{Z}_i^{ekv} \underline{I}_i = -(j0,199)(j0,175) = 0,348 \text{ r.j.} = 0,348 \cdot 133,4 = 46,42 \text{ kV}.$$

Fazni naponi na mestu kvara su:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{fA} \\ \underline{U}_{fB} \\ \underline{U}_{fC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,348 \\ 0,348 \\ 0,348 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,044 \text{ r.j. } /0^\circ \\ 0 \text{ r.j.} \\ 0 \text{ r.j.} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 139,3 \text{ kV } /0^\circ \\ 0 \text{ kV } /0^\circ \\ 0 \text{ kV } /0^\circ \end{bmatrix}.$$

Fazne struje na mestu kvara su:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -j3,73 \\ j1,99 \\ j1,75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \text{ r.j.} \\ 5,6 \text{ r.j. } /152,1^\circ \\ 5,6 \text{ r.j. } /27,9^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1405,6 \text{ A } /152,1^\circ \\ 1405,6 \text{ A } /27,9^\circ \end{bmatrix}.$$

Za proračun modula napona i struja kvara, mogu se koristiti i uprošćene formule iz zadataka 3.3 i 3.4. Odnos modula ekvivalentnih impedansi direktnog i inverznog redosleda je:

$$k = \frac{|\underline{Z}_0^{ekv}|}{|\underline{Z}_d^{ekv}|} = \frac{0,199}{0,175} = 1,1372,$$

tako da je za  $U_{fr} = 1,00$  r.j. i  $I_k = 5,71$  r.j.:

$$U_d = U_i = U_0 = U_{fr} \frac{k}{2k+1} = 1,0 \frac{1,1372}{2 \cdot 1,1372 + 1} = 0,3473 \text{ r.j.};$$

$$U_{fA} = 3U_0 = 1,042 \text{ r.j. (umesto ranije proračunate vrednosti 1,044 r.j.)};$$

$$I_{k2Z} = |\underline{I}_B| = |\underline{I}_C| = \sqrt{3} \frac{\sqrt{k^2 + k + 1}}{2k + 1} I_k = \sqrt{3} \frac{\sqrt{1,1372^2 + 1,1372 + 1}}{2 \cdot 1,1372 + 1} 5,71 = 5,594 \text{ r.j. (umesto}$$

ranije proračunate vrednosti 5,60 r.j.; razlika je 0,11 %).

d) Jednofazni zemljospoj (faza A)

Granični uslovi su:  $\underline{U}_{fA} = 0$ ;  $\underline{I}_B = \underline{I}_C = 0$ .

Simetrične komponente struja i napona su:

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{1,0}{j(2 \cdot 0,175 + 0,199)} = -j1,82 \text{ r.j.};$$

$$\underline{U}_d = \underline{E} - \underline{Z}_d^{ekv} \underline{I}_d = 1 - j0,175 \cdot (-j1,82) = 0,681 \text{ r.j.};$$

$$\underline{U}_i = -\underline{Z}_i^{ekv} \underline{I}_i = -j0,175 \cdot (-j1,82) = -0,319 \text{ r.j.};$$

$$\underline{U}_0 = -\underline{Z}_0^{ekv} \underline{I}_0 = -j0,199 \cdot (-j1,82) = -0,362 \text{ r.j.}$$

Fazni naponi na mestu kvara su:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{fA} \\ \underline{U}_{fB} \\ \underline{U}_{fC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,681 \\ -0,319 \\ -0,362 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1,022 \text{ r.j. } /238^\circ \\ -1,022 \text{ r.j. } /122^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 136,34 \text{ kV } /238^\circ \\ -136,34 \text{ kV } /122^\circ \end{bmatrix}.$$

Fazne struje na mestu kvara su:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -j1,82 \\ -j1,82 \\ -j1,82 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j5,46 \text{ r.j.} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1370,5 \text{ A} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Provera: Za  $k = 1,1372$ , po uprošćenim formilama iz zadataka 3.3 i 3.4, struja kvara i naponi zdravih faza su:

$$I_{k1Z} = \frac{3}{2+k} I_k = \frac{3}{2+1,1372} \cdot 5,71 = 5,46 \text{ r.j. (ista vrednost kao i napred proračunata);}$$

$U_{fB} = U_{fC} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{k^2 + k + 1}}{2+k} U_{fr} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{1,1372^2 + 1,1372 + 1}}{2+1,1372} \cdot 1 = 1,0226 \text{ r.j. (umesto napred proračunate vrednosti 1,022 r.j.).}$

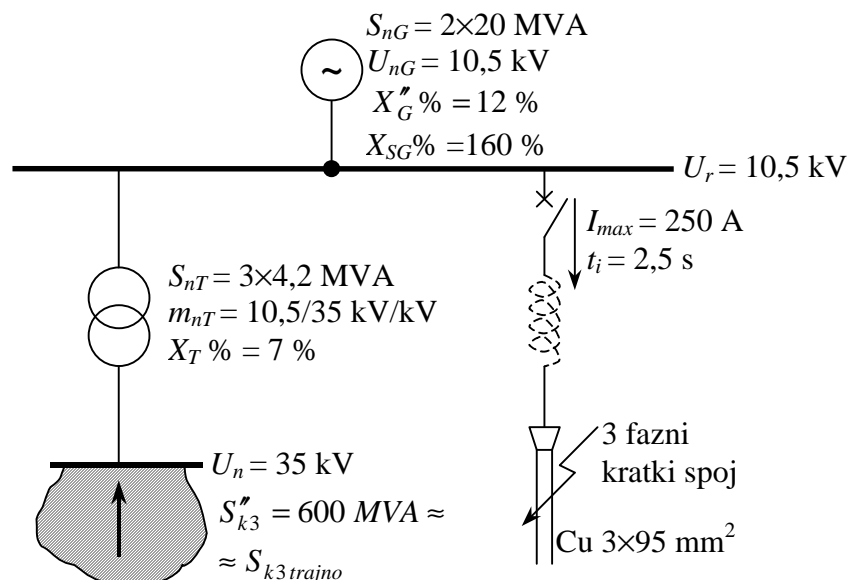
Uočava se dobro slaganje rezultata iz tačaka c i d sa rezultatima dobijenim preko uprošćenih formula iz zadataka 3.3 i 3.4.

□

**Zadatak 3.6**

Da li kabl nominalnog napona 10 kV u postrojenju šematski prikazanom na sl. 3.6a može termički da podnese trofazni kratki spoj koji se isključuje posle 2,5 s ako maksimalno dozvoljeno zagrevanje kabla za vreme kratkog spoja iznosi 115°C, a temperatura zagrevanja kabla za okrugli bakar se računa prema obrascu  $\theta (^{\circ}\text{C}) = \frac{0,0058}{s^2} \cdot I_{k3 \text{ trajno}}^2 \cdot (t_1 + \Delta t)$  gde je  $s$  – presek u  $\text{mm}^2$ ,  $I_{k3 \text{ trajno}}$  – trajna struja trofaznog kratkog spoja u A,  $t_1$  – vreme isključenja kvara u s, a  $\Delta t = T \left( \frac{I''_{k3}}{I_{k3 \text{ trajno}}} \right)^2$ , pri čemu se za  $T$  može usvojiti vrednost  $T = 0,2$  s.

U slučaju da je odgovor negativan, koju bi prigušnicu trebalo staviti na red ispred kabla da se ograniči njegovo zagrevanje, ako se prigušnice nominalnog napona  $U_{np} = 10/\sqrt{3}$  kV i nominalne struje  $I_{np} = 250$  A proizvode sa reaktansama  $X_p = 2; 4; 6; 8; 10$  %.



Sl. 3.6a Monofazna šema i osnovni podaci za postrojenje iz zadatka 3.6

**Rešenje:**

Subtranzijentna reaktansa generatora je:

$$X_G'' = \frac{X_G'' \% U_{nG}^2}{100 S_{nG}} = \frac{12}{100} \frac{10,5^2}{2 \cdot 20} = 0,33075 \Omega.$$

Sinhrona reaktansa generatora je:

$$X_{SG} = \frac{X_{SG} \% U_{nG}^2}{100 S_{nG}} = \frac{160}{100} \frac{10,5^2}{2 \cdot 20} = 4,41 \Omega.$$

Reaktansa transformatora posmatrana sa strane 10,5 kV (pošto se kvar na kablu dešava na toj strani) je:

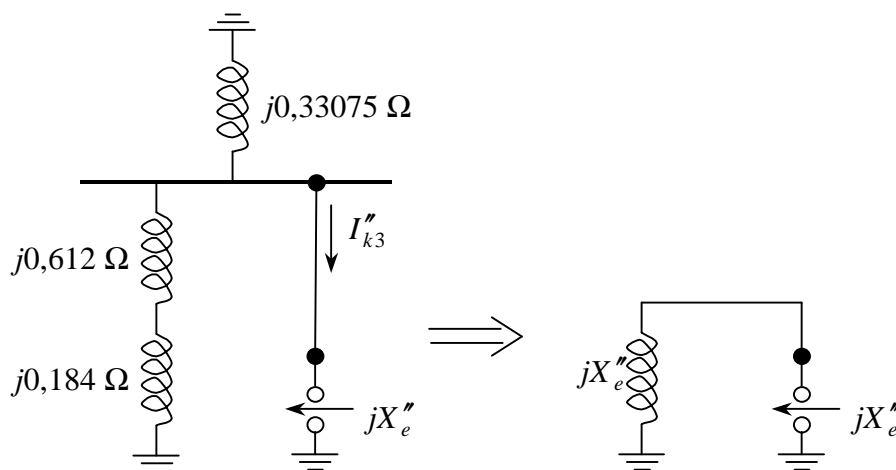
$$X_T = \frac{X_T \% U_{nT}^2}{100 S_{nG}} = \frac{7 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 3 \cdot 4,2} = 0,612 \Omega.$$

Reaktansa mreže 35 kV, svedena na stranu napona 10,5 kV je:

$$X_M = X_M'' = \frac{U_m^2}{S_{k3}} = \frac{10,5^2}{600} = 0,184 \Omega.$$

Ekvivalentna šema impedansi direktnog redosleda za subtranzijentni period, prikazana je na sl. 3.6b. Sa te slike se vidi da je ekvivalentna direktna reaktansa, gledano sa mesta kvara u subtranzijentnom periodu:

$$X_e'' = \frac{(0,612 + 0,184) \cdot 0,33075}{0,184 + 0,612 + 0,33075} = 0,2338 \Omega.$$



**Sl. 3.6b** Mreža impedansi direktnog redosleda u subtranzijentnom periodu

Struja trofaznog kratkog spoja u subtranzijentnom periodu je onda:

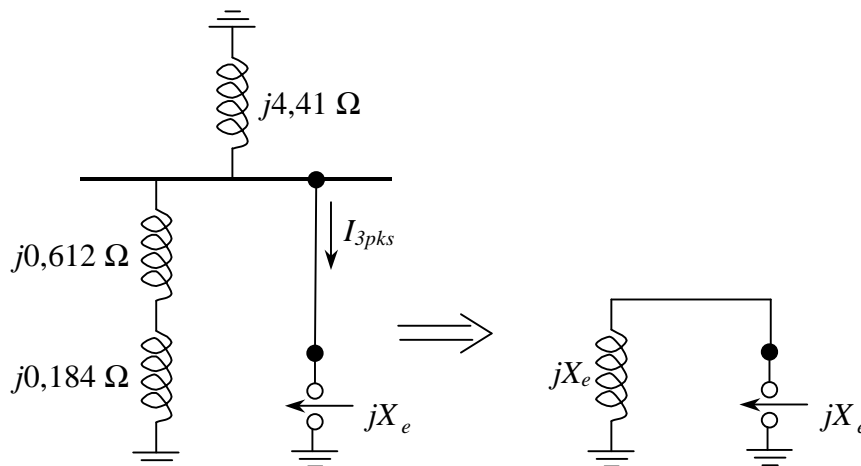
$$I''_{k3} = \frac{U_r}{\sqrt{3} X_e''} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,2338} = 25,93 \text{ kA} \approx 26 \text{ kA}.$$

Ekvivalentna reaktansa direktnog redosleda u trajnom periodu izračunava se prema sl. 3.6c i iznosi:

$$X_e = \frac{0,796 \cdot 4,41}{5,206} = 0,675 \Omega.$$

Trajna struja trajnog trofaznog kratkog spoja je onda:

$$I_{k3} = \frac{U_r}{\sqrt{3} \cdot X_e} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,675} = 8,981 \text{ kA} \cong 9 \text{ kA}.$$



Sl. 3.6c Mreža impedansi direktnog redosleda u trajnom periodu

Pošto je struja normalnog režima rada daleko manja (250 A) od struje trofaznog kratkog spoja (9 kA), ona će se zanemariti pri daljem proračunavanju.

Onda je:

$$\Delta t = T \left( \frac{I_{k3}''}{I_{k3}} \right)^2 = 0,2 \cdot \left( \frac{26}{9} \right)^2 = 1,67 \text{ s}.$$

Temperatura zagrevanja za okrugli bakar, prema navedenom obrascu u formulaciji zadatka, je:

$$\theta = \frac{0,0058}{9025} \cdot 9000^2 \cdot (2,5 + 1,67) = 217^\circ \text{C}.$$

Kako je gornja temperatura zagrevanja ( $217^\circ \text{C}$ ) veća od dozvoljene temperature zagrevanja za vreme kratkog spoja ( $115^\circ \text{C}$ ), to znači da kabl termički ne može da podnese trofazni kratki spoj koji se isključuje posle 2,5 s.

Da bi kabl izdržao trofazni kratki spoj sa vremenom isključenja od 2,5 s, na red sa kablom vezaće se prigušnica čija je reaktansa:

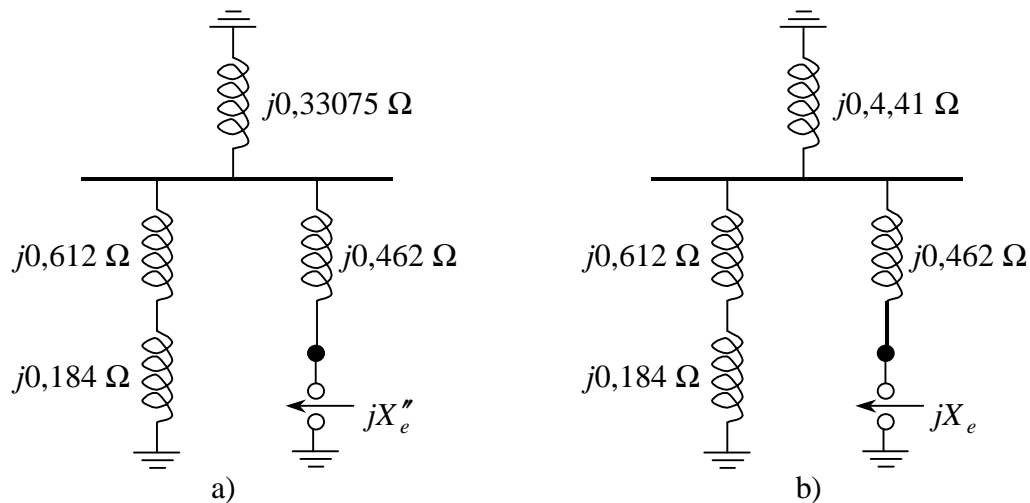
$$X_p = \frac{X_p \%}{100} \frac{U_n^2}{S_{np}} = \frac{X_p \%}{100} \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{np}} = 0,02 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 250} = 0,462 \Omega.$$

Reaktansa prigušnice sračunata je za rasipanje  $X_p \% = 2 \%$ .

Ekvivalentne šeme za subtranzijentni i trajni period kada je na red sa kablom vezana i prigušnica predstavljene su na sl. 3.6d.

Ekvivalentna subtranzijentna reaktansa je onda:

$$X_e'' = 0,2338 + 0,462 = 0,6958 \Omega.$$



**Sl. 3.6d** Ekvivalentna šema sistema direktnog redosleda posle ugradnje prigušnice čija je reaktansa  $0,462 \Omega$ , na red sa kablom; a) Subtranzijentni period; b) Trajni period

Takođe struja kvara u subtranzijentnom periodu kada je na red sa kablom vezana prigušnica je:

$$I''_{k3} = \frac{U_r}{\sqrt{3}X''_e} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,6958} = 8,73 \text{ kA.}$$

Ekvivalentna reaktansa u trajnom periodu je:

$$X_e = 0,675 + 0,462 = 1,137 \Omega,$$

pa je struja kvara u trajnom periodu, kada je na red sa kablom vezana prigušnica:

$$I_{k3} = \frac{U_r}{\sqrt{3}X_e} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,137} = 5,34 \text{ kA.}$$

Na osnovu izračunatih struja za oba perioda ima se da je:

$$\Delta t = T \left( \frac{I''_{k3}}{I_{k3}} \right)^2 = 0,2 \cdot \left( \frac{8,73}{5,34} \right)^2 = 0,5352 \text{ s.}$$

Temperatura zagrevanja za okrugli bakar kada je na red sa kablom vezana prigušnica je onda

$$\theta = \frac{0,0058}{9025} \cdot 5340^2 \cdot (2,5 + 0,5352) = 55,5^\circ \text{C.}$$

Pošto je temperatura zagrevanja ( $55,5^\circ \text{C}$ ) manja od dozvoljene za trofazni kratki spoj ( $115^\circ \text{C}$ ) to je za zaštitu kabla od termičkog pregrevanja dovoljno na red sa kablom vezati prigušnicu sa rasipanjem od 2 %.

□

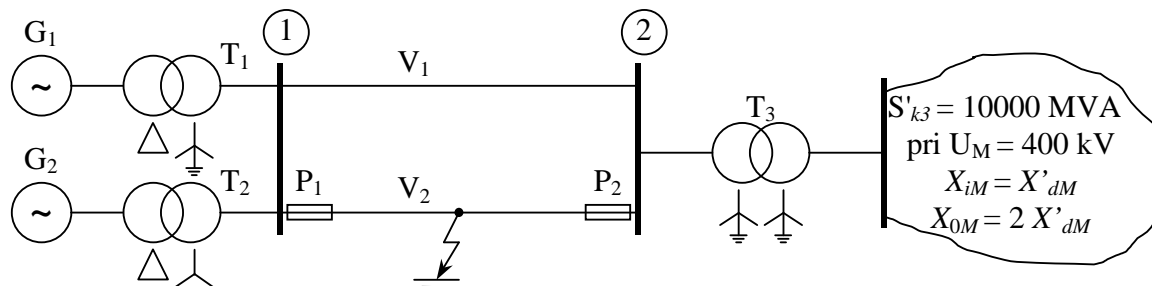
**Zadatak 3.7**

Na sl. 3.7a prikazan je jednostavan elektroenergetski sistem. Za slučaj jednofaznog kratkog spoja na sredini dalekovoda  $V_2$  odrediti:

a) Struju kvara.

b) Struje koje teku kroz prekidače  $P_1$  i  $P_2$  u fazi koja je pogođena kvarom na vodu  $V_2$ .

Napon na mestu kvara pre nastanka kvara je iznosio  $U_{fr} = 220/\sqrt{3}$  kV. Ostali podaci o sistemu dati su takođe na sl. 3.7a.



$$S_{nG1} = S_{nT1} = 200 \text{ MVA}$$

$$U_{nG1} = 15,75 \text{ kV}$$

$$m_{T1} = 15,75/231 \text{ kV/kV}$$

$$X'_{dG} \% = X_{iG} \% = 18 \%$$

$$X_{T1} \% = 12 \%$$

$$G2 \equiv G1; T2 \equiv T1$$

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

$$L_v = 100 \text{ km}$$

$$x_v = 0,4 \Omega/\text{km}$$

$$X_{0v} = 1,2 \Omega/\text{km}$$

$$S_{nT3} = 400 \text{ MVA}$$

$$m_{T3} = 220/400 \text{ kV/kV}$$

$$X_{T3} \% = 11 \%$$

**Sl. 3.7a** Monofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.7

**Rešenje:**

Vrednosti parametara mreže svedeni na naponski nivo 220 kV su:

$$X_{G1} = \frac{X_{G1} \% U_{nG1}^2}{100 S_{nG1} m_{T1}^2} = \frac{18 \cdot 15,75^2}{100 \cdot 200 \cdot 15,75^2} \cdot 231^2 = 48,02 \Omega;$$

$$X_{T1} = \frac{X_{T1} \% U_{nT1}^2}{100 S_{nT1}} = \frac{12 \cdot 231^2}{100 \cdot 200} = 32,02 \Omega;$$

$$X_v = x_v L_v = 0,4 \cdot 100 = 40 \Omega;$$

$$X_{0v} = x_{0v} L_v = 1,2 \cdot 100 = 120 \Omega;$$

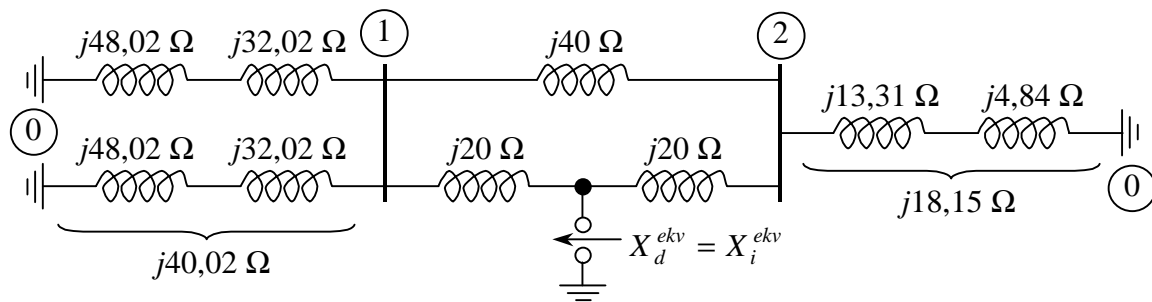
$$X_{T3} = \frac{X_{T3} \% U_{nT3}^2}{100 S_{nT3}} = \frac{11 \cdot 220^2}{100 \cdot 400} = 13,31 \Omega;$$

$$X'_{dM} = \frac{U_M^2}{S'_{k3} m_{T3}^2} = \frac{400^2}{10000 \cdot 400^2} \cdot 220^2 = 4,84 \Omega;$$

$$X_{0M} = 2 \cdot X'_{dM} = 2 \cdot 4,84 = 9,68 \Omega.$$

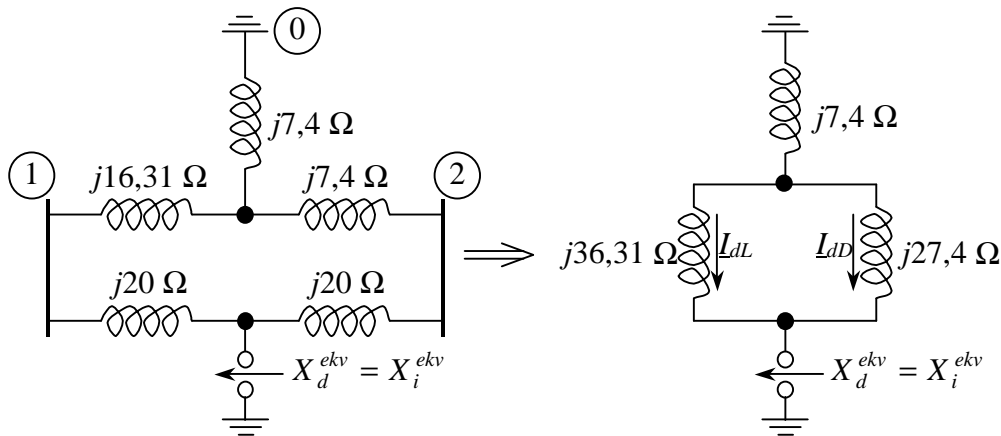
Ekvivalentna šema impedansi sistema za direktni i inverzni redosled data je na sl. 3.7b.





**Sl. 3.7b** Ekvivalentna šema impedansi direktnog (inverznog) redosleda sistema sa sl. 3.7a

Daljim pojednostavljenjem šeme sa sl. 3.7b (sažimanjem paralelnih grana i transfiguracijom trougla 1-2-0 u zvezdu) dobijaju se ekvivalentne šeme sistema direktnih (inverznih) impedansi, prikazane na sl. 3.7c.

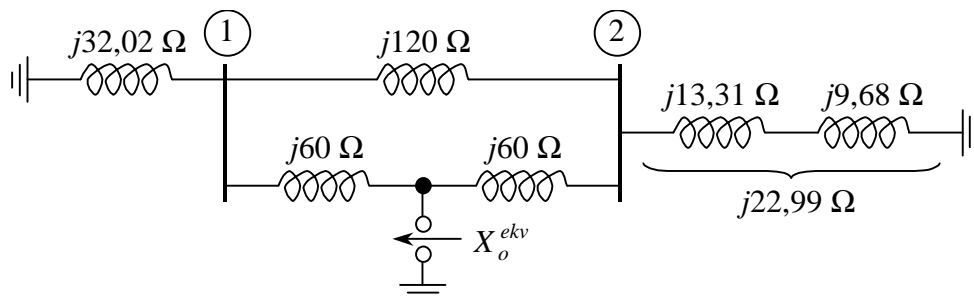


**Sl. 3.7c** Ekvivalentne šeme direktnih (inverznih) impedansi, posle sažimanja šeme sa sl. 3.7b

Konačno, sa poslednje šeme sa sl. 3.7c, dobija se da su ekvivalentne impedanse direktnog i inverznog redosleda za pretpostavljeno mesto kvara:

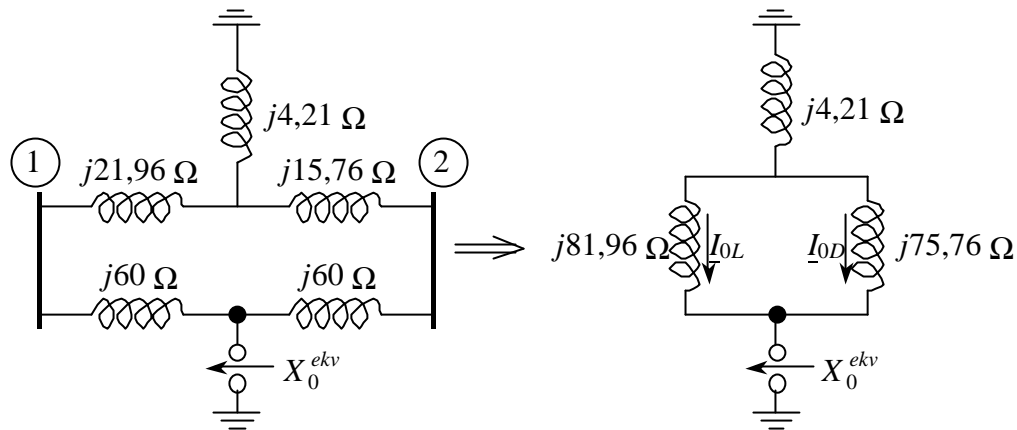
$$X_d^{ekv} = X_i^{ekv} = 23,02 \Omega \approx 23 \Omega.$$

Ekvivalentna šema impedansi sistema nultog redosleda data je na sl. 3.7d.



**Sl. 3.7d** Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda sistema sa sl. 3.7a

Sređivanjem šeme sa sl. 3.7d, na sličan način kao što je to učinjeno i kod šeme za direktni i inverzni redosled sa sl. 3.7b, dobijaju se šeme na sl. 3.7e.



Sl. 3.7e Ekvivalentne šeme impedansi nultog redosleda, posle sažimanja šeme sa sl. 3.7d

Sa poslednje šeme sa sl. 3.7e, dobija se da je ekvivalentna impedansa nultog redosleda za pretpostavljeno mesto kvara:

$$X_0^{ekv} = 43,58 \Omega.$$

a) Na osnovu izračunatih podataka proračunava se tražena struja kvara:

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{220/\sqrt{3}}{j(2 \cdot 23 + 43,58)} = -j1,418 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_K = \underline{I}_A = \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_0 = 3 \cdot (-j1,418) = -j4,254 \text{ kA}.$$

b) Radi određivanja struje kroz prekidače  $P_1$  i  $P_2$  potrebno je izračunati simetrične komponente struja koje u mesto kvara utiču sa leve (L) i desne strane (D). One se računaju na osnovu konačnih ekvivalentnih šema impedansi za direktni, inverzni i nulti redosled sa sl. 3.7c i sl. 3.7e koristeći pravilo strujnog razdelnika:

$$\underline{I}_{dL} = \frac{27,4}{36,31 + 27,4} \underline{I}_d = 0,43 \cdot (-j1,418) = -j0,61 \text{ kA} = \underline{I}_{iL};$$

$$\underline{I}_{dD} = \frac{36,31}{36,31 + 27,4} \underline{I}_d = 0,57 \cdot (-j1,418) = -j0,808 \text{ kA} = \underline{I}_{iD};$$

$$\underline{I}_{0L} = \frac{75,76}{81,96 + 75,76} \underline{I}_0 = 0,48 \cdot (-j1,418) = -j0,681 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{0D} = \frac{81,96}{81,96 + 75,76} \underline{I}_0 = 0,52 \cdot (-j1,418) = -j0,737 \text{ kA}.$$

Na kraju mogu se izračunati struje koje teku kroz prekidače  $P_1$  i  $P_2$  u fazi pogođenoj kvarom:

$$\underline{I}_{AP_1} = \underline{I}_{dL} + \underline{I}_{iL} + \underline{I}_{0L} = -j0,61 - j0,61 - j0,681 = -j1,901 \text{ kA} ;$$

$$\underline{I}_{AP_2} = \underline{I}_{dD} + \underline{I}_{iD} + \underline{I}_{0D} = -j0,808 - j0,808 - j0,737 = -j2,353 \text{ kA}$$

Provera: Mora biti  $\underline{I}_{AP_1} + \underline{I}_{AP_2} = \underline{I}_K = -j4,254 \text{ kA}$ .

□

**Zadatak 3.8**

Jednostavan radijalni elektroenergetski sistem sa sl. 3.8a, izložen je dvofaznom kratkom spoju sa zemljom na sabirnicama 3.

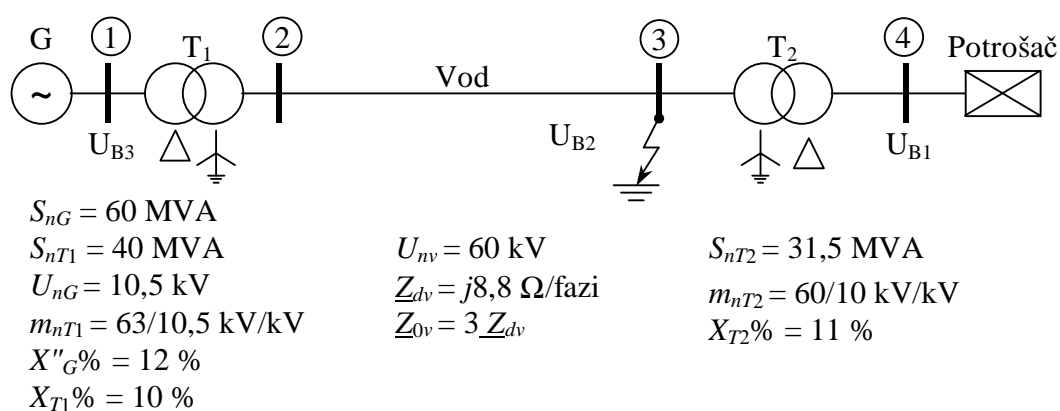
a) Nacrtati mreže simetričnih komponenta i izračunati ekvivalentne impedanse direktnog (inverznog) i nultog redosleda.

b) Izračunati struje i napone direktnog, inverznog i nultog redosleda pri kvaru na sabirnicama 3.

c) Izračunati ukupne struje kvara pojedinih faza (A, B, C) kao i struje koje dotiču u mesto kvara (sabirnice 3) iz napojne mreže i preko direktno uzemljenog zvezdišta transformatora T<sub>2</sub>.

d) Naći fazne ( $U_{fA}$ ,  $U_{fB}$ ,  $U_{fC}$ ) i linijske napone ( $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ) na mestu kvara.

Uticaj potrošača priključenih na sabirnice 4 zanemariti. Proračun sprovesti korišćenjem relativnih jedinica za  $S_B = 60$  MVA i  $U_{B1} = 10$  kV, pri naponu na mestu kvara  $U_3 = 63$  kV. Ostali podaci o parametrima elemenata sistema dati su na sl. 3.8a.



Sl. 3.8a Monofazna šema i parametri sistema iz zadatka 3.8

**Rešenje:**

a) Bazni naponi i struje za pojedine delove sistema (1-potrošačka strana; 2-vod, 3-generatorna strana) su:

$$U_{B1} = 10 \text{ kV}; \quad U_{B2} = 10 \frac{60}{10} = 60 \text{ kV}; \quad U_{B3} = 10 \frac{60}{10} \frac{10,5}{63} = 10 \text{ kV};$$

$$I_{B1} = 3,464 \text{ kA}; \quad I_{B2} = 577,4 \text{ A}; \quad I_{B3} = 3,464 \text{ kA}.$$

Impedanse (u r.j.) su:

$$X_G = \frac{X''_G\% U_{nG}^2 S_B}{100 S_{nG} U_{B3}^2} = \frac{12}{100} \frac{10,5^2}{60} \frac{60}{10^2} = 0,132 \text{ r.j.};$$

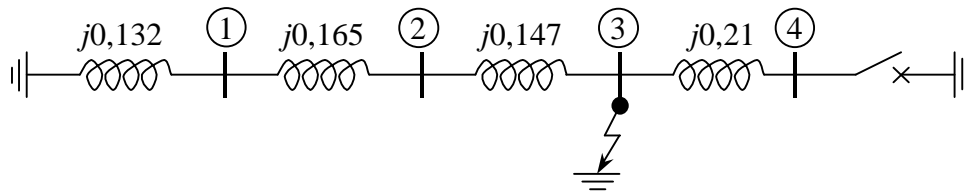
$$X_{T1} = \frac{X_{T1}\% U_{nT1}^2 S_B}{100 S_{nT1} U_{B2}^2} = \frac{10}{100} \frac{63^2}{40} \frac{60}{60^2} = 0,165 \text{ r.j.};$$

$$X_{dv} = x_{dv} \frac{S_B}{U_{B2}^2} = 8,8 \frac{60}{60^2} = 0,147 \text{ r.j.};$$

$$X_{0v} = 3X_{dv} = 0,441 \text{ r.j.}$$

$$X_{T2} = \frac{X_{T2} \% U_{nT2}^2 S_B}{100 S_{nT2} U_{B2}^2} = \frac{11 \cdot 60^2 \cdot 60}{100 \cdot 31,5 \cdot 60^2} = 0,21 \text{ r.j.}$$

Mreža direktnih (inverznih) impedansi prikazana je na sl. 3.8b.

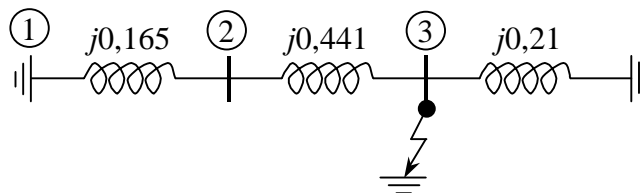


**Sl. 3.8b** Mreža direktnih (inverznih) impedansi sistema sa sl. 3.8a

Ekvivalentne impedanse direktnog i inverznog redosleda, gledano sa mesta kvara su:

$$X_d^{ekv} = X_i^{ekv} = 0,132 + 0,165 + 0,147 = 0,444 \text{ r.j.}$$

Mreža nultih impedansi prikazana je na sl. 3.8c.



**Sl. 3.8c** Mreža nultih impedansi sistema sa sl. 3.8a

Ekvivalentna impedansa nultog redosleda, gledano sa mesta kvara je:

$$X_0^{ekv} = \frac{(0,165 + 0,441) \cdot 0,21}{0,606 + 0,21} = 0,156 \text{ r.j.}$$

b) Simetrične komponente struje dvofaznog kratkog spoja sa zemljom na sabirnicama 3 su onda:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{d3} &= \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \frac{\underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}}} = \frac{63/60}{j0,444 + j \frac{0,444 \cdot 0,156}{0,444 + 0,156}} = \frac{1,05}{j(0,444 + 0,116)} = \\ &= -j1,875 \text{ r.j.} = -j1,875 \cdot 577,4 = -j1083 \text{ A;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{i3} &= -\frac{\underline{U}_{fr} \underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{1,05 \cdot (j0,156)}{0,444^2 + 2 \cdot 0,444 \cdot 0,156} = \\ &= j0,488 \text{ r.j.} = j0,488 \cdot 577,4 = j281,8 \text{ A;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{03} &= -\frac{U_{fr} \underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_0^{ekv}} \underline{I}_{i3} = j \frac{0,444}{0,156} 0,488 = \\ &= j1,388 \text{ r.j.} = j1,388 \cdot 577,4 = j801,4 \text{ A.} \end{aligned}$$

Naponi simetričnih komponenta na mestu kvara ( $U_{fB2} = U_{B2} / \sqrt{3} = 34,64 \text{ kV}$ ) su:

$$\underline{U}_{d3} = \underline{U}_{fr} - \underline{Z}_d^{ekv} \underline{I}_d = 1,05 - j0,444 \cdot (-j1,875) = 0,2175 \text{ r.j.} \cong 7,5 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{i3} = -\underline{Z}_i^{ekv} \underline{I}_i = -j0,444 \cdot (j0,488) = 0,2167 \text{ r.j.} \cong 7,5 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{03} = -\underline{Z}_0^{ekv} \underline{I}_0 = -j0,156 \cdot (j1,388) = 0,2165 \text{ r.j.} \cong 7,5 \text{ kV}.$$

Približno je  $\underline{U}_{d3} = \underline{U}_{i3} = \underline{U}_{03} = 7,5 \text{ kV}$ .

c) Fazne struje kvara na sabirnicama 3 su:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \underline{I}_{A3} \\ \underline{I}_{B3} \\ \underline{I}_{C3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -j1,875 \text{ r.j.} \\ j0,488 \text{ r.j.} \\ j1,388 \text{ r.j.} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (-2,037 + j2,084) \text{ r.j.} \\ (2,037 + j2,084) \text{ r.j.} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ (-1176 + j1203) \text{ A} \\ (1176 + j1203) \text{ A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1682 \text{ A} / 134,35^\circ \\ 1682 \text{ A} / 45,65^\circ \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Ukupna struja dvofaznog zemljospoja ( $I_{k2Z} = 1682 \text{ A}$ ) može se proračunati i korišćenjem uprošćenog izraza iz zadatka 3.3:

$$\begin{aligned} I_{k2Z} &= I_{k3} \cdot \sqrt{3} \frac{\sqrt{k^2 + k + 1}}{1 + 2k} = 2,365 \cdot \sqrt{3} \frac{\sqrt{0,3514^2 + 0,3514 + 1}}{1 + 2 \cdot 0,3514} = \\ &= 2,922 \text{ r.j.} = 2,922 \cdot 577,4 = 1687 \text{ A} \end{aligned}$$

gde je:

$$I_{k3} = \frac{U_{fr}}{X_{d3}^{ekv}} = \frac{1,05}{0,444} = 2,365 \text{ r.j.} = 2,365 \cdot 577,4 = 1365,5 \text{ A};$$

$$k = \frac{X_{03}^{ekv}}{X_{d3}^{ekv}} = \frac{0,156}{0,444} = 0,3514.$$

Razlika u dobijenim rezultatima za struju dvofaznog zemljospoja, kada se koristi približna formula i precizniji proračun je samo 5 A (cca 0,3 %).

Raspodela struja simetričnih komponenta dobija se posmatranjem ekvivalentnih šema iz tačke a, odakle se vidi da ukupne struje direktnog i inverznog redosleda kompletno dotiču od strane mreže. Znači:

$$\underline{I}_d^{23} = \underline{I}_{d3} = -j1,875 \text{ r.j.} = -j1083 \text{ A};$$

$$\underline{I}_d^{43} = 0;$$

$$\underline{I}_i^{23} = \underline{I}_{i3} = j0,488 \text{ r.j.} = j281,8 \text{ A};$$

$$\underline{I}_i^{43} = 0;$$

$$\underline{I}_0^{23} \cdot (j0,606) = \underline{I}_0^{43} \cdot (j0,21) = \underline{I}_{03} \cdot (j0,156), \text{ odakle je}$$

$$\underline{I}_0^{23} = \frac{0,156}{0,606} \underline{I}_{03} = 0,2574 \cdot (j1,388) = j0,3573 \text{ r.j.} = j0,3573 \cdot 577,4 = j206,3 \text{ A};$$

$$\underline{I}_0^{43} = \frac{0,156}{0,21} \underline{I}_{03} = 0,7426 \cdot (j1,388) = j1,0307 \text{ r.j.} = j1,0307 \cdot 577,4 = j595,1 \text{ A}.$$

Onda su raspodele struja pojedinih faza (A, B i C), koje dotiču iz mreže (indeks 23) i potrošača (indeks 43):

$$\underline{I}_A^{23} = \underline{I}_d^{23} + \underline{I}_i^{23} + \underline{I}_0^{23} = -j1,875 + j0,488 + j0,357 = -j1,03 \text{ r.j.} = -j594,7 \text{ A};$$

$$\underline{I}_A^{43} = \underline{I}_d^{43} + \underline{I}_i^{43} + \underline{I}_0^{43} = 0 + 0 + j1,0315 = j1,0315 \text{ r.j.} = j595,6 \text{ A}.$$

Provera:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_A^{23} + \underline{I}_A^{43} = -j594,7 + j595,6 = j0,9 \text{ A (treba da bude } \underline{I}_A = 0).$$

Uočava se mala greška (od 0,9 A) koja je posledica zaokruživanja rezultata.

$$\begin{aligned} \underline{I}_B^{23} &= \underline{a}^2 \underline{I}_d^{23} + \underline{a} \underline{I}_i^{23} + \underline{I}_0^{23} = \\ &= (-0,5 - j0,866)(-j1,875) + (-0,5 + j0,866)(j0,488) + j0,357 = (-2,044 + j1,052) \text{ r.j.}; \end{aligned}$$

$$\underline{I}_B^{43} = \underline{a}^2 \underline{I}_d^{43} + \underline{a} \underline{I}_i^{43} + \underline{I}_0^{43} = 0 + 0 + j1,031 = j1,031 \text{ r.j.}$$

Provera:

$$\underline{I}_{B3} = \underline{I}_B^{23} + \underline{I}_B^{43} = (-2,044 + j2,083) \text{ r.j. (treba da bude } \underline{I}_{B3} = (-2,037 + j2,084) \text{ r.j.)};$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_C^{23} &= \underline{a} \underline{I}_d^{23} + \underline{a}^2 \underline{I}_i^{23} + \underline{I}_0^{23} = \\ &= (-0,5 + j0,866)(-j1,875) + (-0,5 - j0,866)(j0,488) + j0,357 = (2,044 + j1,051) \text{ r.j.}; \end{aligned}$$

$$\underline{I}_C^{43} = \underline{a} \underline{I}_d^{43} + \underline{a}^2 \underline{I}_i^{43} + \underline{I}_0^{43} = 0 + 0 + j1,031 = j1,031 \text{ r.j.}$$

Provera:

$$\underline{I}_{C3} = \underline{I}_C^{23} - \underline{I}_C^{43} = (2,044 + j2,082) \text{ r.j. (treba da bude } \underline{I}_{C3} = (2,037 + j2,084) \text{ r.j.)}.$$

d) Fazni naponi na mestu kvara su:

$$\underline{U}_{fA3} = \underline{U}_d + \underline{U}_i + \underline{U}_0 = 3 \cdot 0,2165 = 0,65 \text{ r.j.} = 0,65 \cdot 34,64 = 22,5 \text{ kV} ;$$

$$\underline{U}_{fB3} = a^2 \underline{U}_d + a \underline{U}_i + \underline{U}_0 = 0 ;$$

$$\underline{U}_{fC3} = a \underline{U}_d + a^2 \underline{U}_i + \underline{U}_0 = 0 .$$

Napon neutralne tačke sistema je:

$$\underline{U}_N = -\underline{U}_0 = -0,2165 \text{ r.j.} = -7,5 \text{ kV} = 7,5 \text{ kV} /180^\circ .$$

Provera se može izvršiti primenom uprošćenih obrazaca iz zadatka 3.4:

$$U_{fA3} = U_{fr} \frac{3k}{2k+1} = 34,64 \frac{3 \cdot 0,3514}{2 \cdot 0,3514 + 1} = 21,45 \text{ kV (treba da bude 22,5 kV).}$$

$$U_N = -U_{fr} \frac{k}{2k+1} = -34,64 \frac{0,3514}{2 \cdot 0,3514 + 1} = -7,15 \text{ kV (treba da bude -7,5 kV).}$$

Uočavaju se nešto veće relativne razlike proračunatih vrednosti napona zdrave faze na mestu kvara, ako se primene uprošćeni obrasci, nego što je to slučaj kod proračuna struja kvara.





**Zadatak 3.9**

Trofazna transformatorska grupa, formirana od tri monofazna tronamotajna transformatora, snage 16,67/16,67/5,56 MVA ima sledeće karakteristike:

$$S_n = 50/50/16,67 \text{ MVA};$$

$$U_n = 150/50/16,8 \text{ kV/kV/kV};$$

Sprega  $Y_0/y_0/d_1$ ; Zvezdišta primara (150 kV) i sekundara (50 kV) transformatorske grupe direktno su uzemljena, ali su zvezdišta ostatka mreže 50 kV izolovana.

$$I_n = 192,5/577,5/573 \text{ A/faza};$$

$$u_{k12} = 13 \% ; u_{k13} = 20 \% ; u_{k23} = 6 \% \text{ (sve vrednosti su svedene na snagu 50 MVA)};$$

Otpornosti namotaja se zanemaruju.

Trofazna tronamotajna transformatorska grupa povezana je na mreže, čije su subtranzijentne snage trofaznog kratkog spoja:

$$\text{Mreža 150 kV: 6000 MVA};$$

$$\text{Mreža 50 kV: 1000 MVA};$$

$$\text{Mreža 16,8 kV: 500 MVA}.$$

Ekvivalentna nulta reaktansa mreže 150 kV je  $X_{0M}^p = 2 \%$  (svedena na snagu od 50 MVA), dok je ekvivalentna nulta reaktansa mreže 50 kV (koja radi sa izolovanim zvezdištem)  $X_{0M}^s = \infty$ .

Koristeći sistem relativnih jedinica za  $S_B = 50 \text{ MVA}$ ;  $U_{B1} = 150 \text{ kV}$ , odrediti:

a) Bazne vrednosti napona sekundara i tercijera i bazne vrednosti svih struja i impedansi.

b) Vrednosti impedansi (reaktansi) transformatora i uticaja mreža na koje je priključena (u r.j.) i nacrtati ekvivalentne šeme mreža direktnog (inverznog) i nultog redosleda, za slučaj kvara na krajevima sekundara transformatorske grupe.

c) Proračunati struju zemljospoja (u r.j. i A) za kvar na sabirnicama sekundara faze A pri  $U = U_n = 1,00 \text{ r.j.}$ , izračunavajući je kao umnožak nominalne struje transformatorske grupe.

d) Izračunati raspodelu struje kvara iz tač. c, odnosno udeo pojedinih namotaja i spoljne mreže, kao i struje koje pri kvaru teku kroz pojedine faze (A, B, C) sva tri namotaja transformatorske grupe.

**Rešenje:**

a) Za  $S_B = 50 \text{ MVA}$  i obeležavajući primar indeksom 1, sekundar indeksom 2 i tercijer indeksom 3, uz zadatu baznu vrednost napona primara  $U_{1B} = U_n^p = 150 \text{ kV}$  je  $U_{2B} = U_n^s = 50 \text{ kV}$  i  $U_{3B} = U_n^t = 16,8 \text{ kV}$ , bazne struje i impedanse za primarnu, sekundarnu i tercijernu stranu transformatora su:

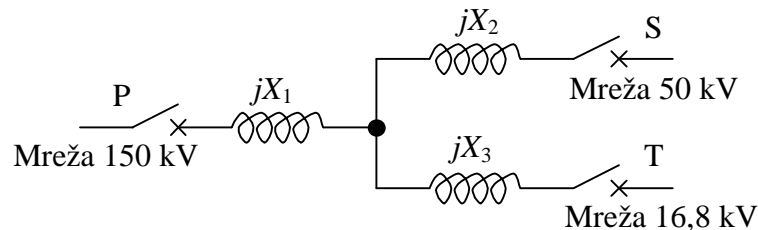
$$I_{1B} = I_n^p = \frac{S_n^p}{\sqrt{3}U_n^p} = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 150} = 192,5 \text{ A}; \quad Z_{1B} = \frac{U_{1B}^2}{S_B} = \frac{150^2}{50} = 450 \Omega;$$

$$I_{2B} = I_n^s = \frac{S_n^s}{\sqrt{3}U_n^s} = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 50} = 577,5 \text{ A}; \quad Z_{2B} = \frac{U_{2B}^2}{S_B} = \frac{50^2}{50} = 50 \Omega;$$

$$I_{3B} = I_n^t = 3 \frac{S_n^t}{\sqrt{3}U_n^t} = 3 \frac{16670}{\sqrt{3} \cdot 16,8} = 1719 \text{ A}; \quad Z_{3B} = \frac{U_{3B}^2}{S_B} = \frac{16,8^2}{50} = 5,645 \Omega.$$

U prethodnoj jednačini za  $I_{3B}$  broj 3 ispred razlomka je zbog trostruko manje nominalne snage tercijera od snage primara i sekundara.

b) Monofazna ekvivalentna šema tronamotajne trofazne transformatorske grupe, prikazana je na sl. 3.9a.



**Sl. 3.9a** Monofazna ekvivalentna šema trofazne transformatorske grupe (zanemarena impedanse praznog hoda) iz zadatka 3.9

Reaktanse transformatora (izražene u r.j.), koje figurišu na sl. 3.9a su:

$$X_1 = \frac{1}{2}(u_{k12} + u_{k13} - u_{k23}) = \frac{1}{2}(0,13 + 0,2 - 0,06) = 0,135 \text{ r.j.};$$

$$X_2 = \frac{1}{2}(u_{k12} + u_{k23} - u_{k13}) = \frac{1}{2}(0,13 + 0,06 - 0,2) = -0,005 \text{ r.j.};$$

$$X_3 = \frac{1}{2}(u_{k13} + u_{k23} - u_{k12}) = \frac{1}{2}(0,2 + 0,06 - 0,13) = 0,065 \text{ r.j.}$$

Ekvivalentne impedanse (reaktanse) mreža direktnog (inverznog) redosleda, na koje je priključena transformatorska grupa su:

$$X_{dM1} = \frac{U_{1n}^2}{S_{k1}''} \frac{1}{Z_{1B}} = \frac{150^2}{6000} \frac{1}{450} = 0,00833 \text{ r.j.};$$

$$X_{dM2} = \frac{U_{2n}^2}{S_{k2}''} \frac{1}{Z_{2B}} = \frac{50^2}{1000} \frac{1}{50} = 0,05 \text{ r.j.};$$

$$X_{dM3} = \frac{U_{3n}^2}{S_{k3}''} \frac{1}{Z_{3B}} = \frac{16,8^2}{500} \frac{1}{5,645} = 0,10 \text{ r.j.}$$

Ekvivalentne impedanse mreža nultog redosleda, na koje je priključena transformatorska grupa su:

$$X_{0M1} = X_{0M}^p = 0,02 \text{ r.j.};$$

$$X_{0M2} = \infty;$$

$$X_{0M3} = 0.$$

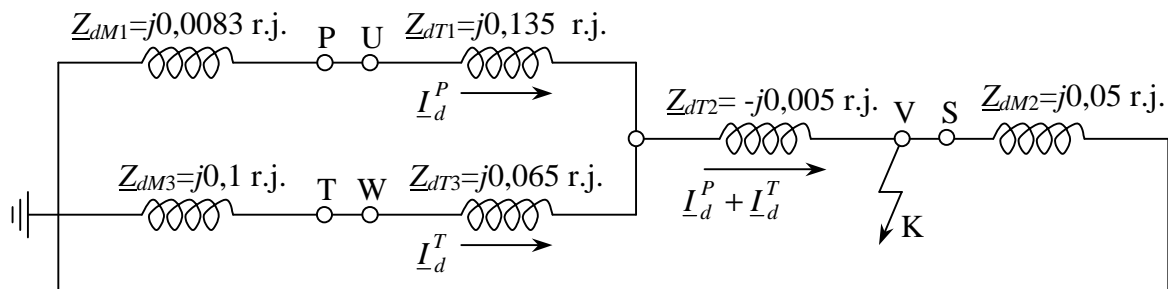
Ekvivalentne šeme mreža simetričnih komponenta sistema direktnog (inverznog) i nultog redosleda, sa upisanim vrednostima impedansi, prikazane su na sl. 3.9b i sl. 3.9c:

Ekvivalentne impedanse mreža simetričnih komponenta sistema, gledano sa mesta kvara su:

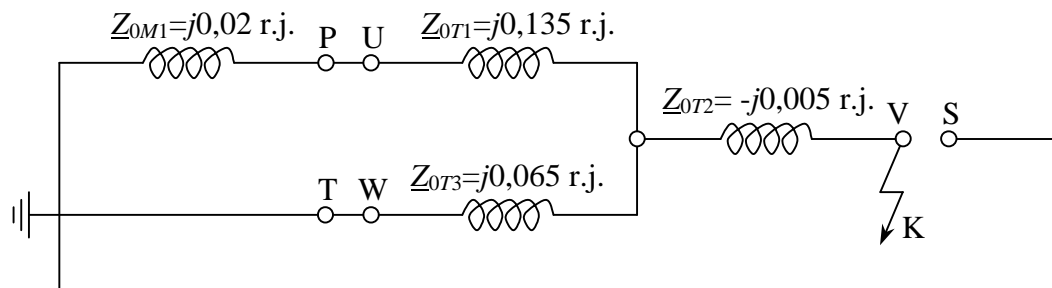
$$X_d^{ekv} = X_i^{ekv} = 0,05 \parallel (-0,005 + 0,1433 \parallel 0,165) = 0,0295 \text{ r.j.};$$

$$X_0^{ekv} = -0,005 + 0,155 \parallel 0,065 = 0,0408 \text{ r.j.},$$

gde simbol  $\parallel$  označava da se vrednosti paralelnih reaktansi sa jedne i druge strane ekvivalentuju.



**Sl. 3.9b** Ekvivalentna šema mreže direktnih (inverznih) impedansi sistema, sa sl. 3.9a



**Sl. 3.9c** Ekvivalentna šema mreže nultih impedansi sistema, sa sl. 3.9a

c) Simetrične komponente i ukupna struja zemljospoja faze A na sabirnicama sekundara transformatorske grupe su:

$$I_{dA} = I_{iA} = I_{0A} = \frac{U_{fr}}{2X_d^{ekv} + X_0^{ekv}} = \frac{1,00}{2 \cdot 0,0295 + 0,0408} = 10,02 \approx 10 \text{ r.j.} = 10 \cdot 577 = 5770 \text{ A};$$

$$I_A = 3I_{dA} = 3I_{iA} = 3I_{0A} = 30,06 \approx 30 \text{ r.j.} = 30 \cdot 577 = 17309 \text{ A};$$

$$I_B = I_C = 0.$$

d1) Raspodela struja direktnog (inverznog) redosleda (sve apsolutne vrednosti struja su stvarne, a ne svedene) sa sl. 3.9b je:

$$I_d = I_d^P + I_d^T + I_d^{SM} = 10I_n = 5770 \text{ A} = I_i.$$

Udeo mreže se izračunava preko jednačina:

$$0,0295I_d = 0,05I_d^{SM} \Rightarrow I_d^{SM} = 0,59I_d = 0,59 \cdot 10 \cdot I_n = 5,9I_n,$$

odakle je:

$$I_d^{SM} = I_i^{SM} = 3404,3 \text{ A}.$$

Udeo transformatora se izračunava preko jednačina:

$$I_d^S = I_d^P + I_d^T = I_d - I_d^{SM} = (10 - 5,9)I_n = 4,1I_n = 2367,5 \text{ A};$$

$$I_d^P \cdot 0,1433 = I_d^T \cdot 0,165 \Rightarrow I_d^T = 0,8687I_d^P,$$

odakle je:

$$I_d^P + I_d^T = I_d^P(1 + 0,8687) = 4,1I_n \Rightarrow \begin{aligned} I_d^P &= 2,19I_n = I_i^P = 1263,6 \text{ A} \\ I_d^T &= 1,91I_n = I_i^T = 1102,1 \text{ A} \end{aligned}$$

d2) Raspodela struje nultog redosleda na mestu kvara izračunava se na sličan način kao i raspodela struje direktnog (inverznog) redosleda.

Udeo mreže:

$$I_0^{SM} = 0$$

Udeo transformatora:

$$I_0^P + I_0^T = I_0^S = I_0 = 10I_n^S;$$

$$I_0^P \cdot 0,155 = I_0^T \cdot 0,065;$$

$$I_0^P = 2,955I_n^S = 1705 \text{ A}; \quad I_0^T = 7,045I_n^S = 4065 \text{ A}.$$

d3) Struje pojedinih faza namotaja transformatora:

Primar:

Zbog Y-sprege namotaja primara, fazne i linijske struje su iste:

$$I_A^P = I_d^P + I_i^P + I_0^P = (2,19 + 2,19 + 2,955)I_n^P = 7,33I_n^P = 7,33 \cdot 192,5 = 1411 \text{ A};$$

$$I_B^P = \underline{a}^2 I_d^P + \underline{a} I_i^P + I_0^P = \left[ \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 2,19 + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 2,19 + 2,95 \right] I_n^P =$$

$$= 0,76I_n^P = 0,76 \cdot 192,5 = 146,3 \text{ A};$$

$$I_C^P = \underline{a}I_d^P + \underline{a}^2I_i^P + I_0^P = \left[ \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 2,19 + \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 2,19 + 2,95 \right] I_n^P =$$

$$= 0,76I_n^P = 0,76 \cdot 192,5 = 146,3 \text{ A.}$$

Sekundar:

Pošto je i sekundar transformatora spregnut u zvezdu, fazne i linijske struje i ovde su jednake:

$$I_A^S = I_d^S + I_i^S + I_0^S = (4,1 + 4,1 + 10)I_n^S = 18,2I_n^S = 18,2 \cdot 577 = 10501 \text{ A ;}$$

$$I_B^S = \underline{a}^2I_d^S + \underline{a}I_i^S + I_0^S = \left[ \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 4,1 + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 4,1 + 10 \right] I_n^S =$$

$$= 5,9I_n^S = 5,9 \cdot 577 = 3404 \text{ A;}$$

$$I_C^S = \underline{a}I_d^S + \underline{a}^2I_i^S + I_0^S = \left[ \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 4,1 + \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 4,1 + 10 \right] I_n^S =$$

$$= 5,9I_n^S = 5,9 \cdot 577 = 3404 \text{ A.}$$

Udeo sekundarne mreže:

$$I_A^{SM} = I_d^{SM} + I_i^{SM} + I_0^{SM} = (5,9 + 5,9 + 0)I_n^S = 11,8I_n^S = 11,8 \cdot 577 = 6808 \text{ A ;}$$

$$I_B^{SM} = \underline{a}^2I_d^{SM} + \underline{a}I_i^{SM} + I_0^{SM} = \left[ \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 5,9 + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 5,9 + 0 \right] I_n^S =$$

$$= -5,9I_n^S = 5,9 \cdot 577 = -3404 \text{ A;}$$

$$I_C^{SM} = \underline{a}I_d^{SM} + \underline{a}^2I_i^{SM} + I_0^{SM} = \left[ \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 5,9 + \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 5,9 + 0 \right] I_n^S =$$

$$= -5,9I_n^S = 5,9 \cdot 577 = -3404 \text{ A.}$$

Tercijer:

Struje su u tercijeru fazno pomerene u odnosu na struje primara i sekundara, i to  $\underline{I}_d^T$  kasni, a  $\underline{I}_i^T$  prednjači za  $30^\circ$  čisto induktivnim strujama  $\underline{I}_d^P(\underline{I}_i^P)$  i  $\underline{I}_d^S(\underline{I}_i^S)$ . Kao i u prethodnim slučajevima, u proračunima će se dati samo vrednosti modula struja.

Fazne struje (struje u namotajima tercijera spregnutim u trougao):

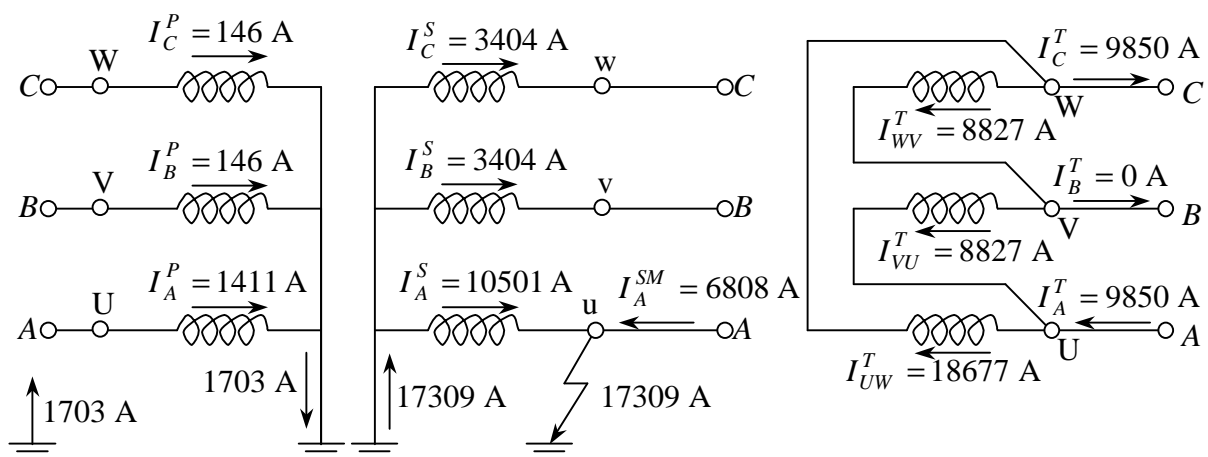
$$I_{AC}^T = I_d^T + I_i^T + I_0^T = (1,91 + 1,91 + 7,045)I_n^T = 10,865I_n^T = 10,865 \cdot 1719 = 18677 \text{ A ;}$$

$$\begin{aligned}
 I_{BA}^T &= \underline{a}^2 I_d^T + \underline{a} I_i^T + I_0^T = \left[ \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 1,91 + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 1,91 + 7,045 \right] I_n^T = \\
 &= 5,135 I_n^T = 5,135 \cdot 1719 = 8827 \text{ A}; \\
 I_{CB}^T &= \underline{a} I_d^T + \underline{a}^2 I_i^T + I_0^T = \left[ \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 1,91 + \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 1,91 + 7,045 \right] I_n^T = \\
 &= 5,135 I_n^T = 5,135 \cdot 1719 = 8827 \text{ A}.
 \end{aligned}$$

Linijske struje:

$$\begin{aligned}
 I_A^T &= I_{AC}^T - I_{BA}^T = I_d^T (1 - \underline{a}^2) + I_i^T (1 - \underline{a}) = 3I_d^T = 3 \cdot 1,91 I_n^T = 5,73 \cdot 1719 = 9850 \text{ A}; \\
 I_B^T &= I_{BA}^T - I_{CB}^T = I_d^T (\underline{a}^2 - \underline{a}) + I_i^T (\underline{a} - \underline{a}^2) = 0 \text{ A}; \\
 I_C^T &= I_{CB}^T - I_{AC}^T = I_d^T (\underline{a} - 1) + I_i^T (\underline{a}^2 - 1) = -3I_d^T = -3 \cdot 1,91 I_n^T = -5,73 \cdot 1719 = -9850 \text{ A}.
 \end{aligned}$$

Raspodela struja kvara grafički je prikazana na sl. 3.9d.



**Sl. 3.9d** Ilustracija raspodele struje kvara pri zemljospoju na sabirnicama sekundara faze A transformatorske grupe (sve upisane veličine struja su stvarne, a ne svedene vrednosti)



**Zadatak 3.10**

Elektroenergetski sistem, prikazan na sl. 3.10a izložen je jednofaznom kratkom spoju sa zemljom (zemljospoju) na sabirnicama 3 (faza A).

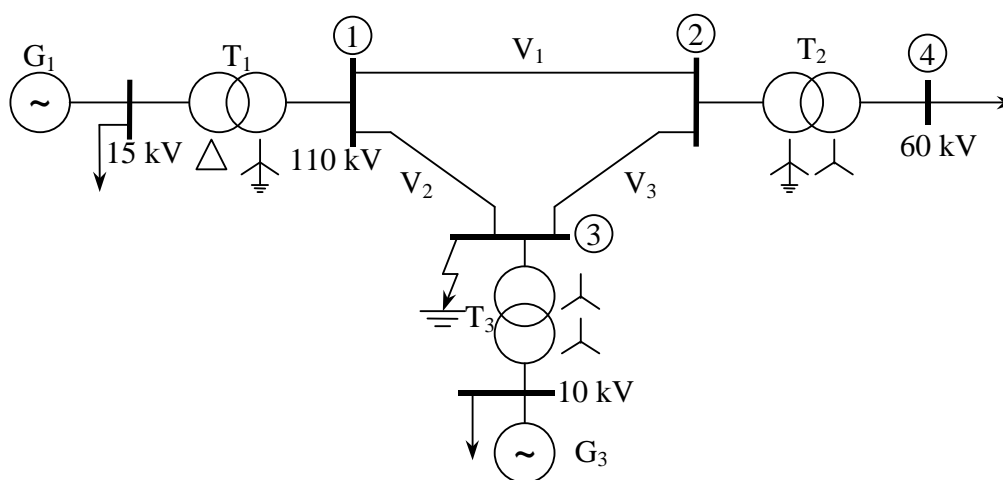
a) Pod pretpostavkom da su impedanse direktnog i inverznog redosleda elementa sistema jednake, nacrtati mreže direktnog (inverznog) i nultog redosleda i upisati njihove vrednosti.

b) Proračunati ekvivalentne impedanse direktnog (inverznog) i nultog redosleda, pri kvaru na sabirnicama 3, kada se zanemare otpornosti vodova.

c) Proračunati subtranzijentnu struju i snagu kvara pri naponu  $U_3 = 110$  kV, kao i napone zdravih faza.

d) Izvršiti proračune iz tačke c, korišćenjem uprošćenih formula iz zadataka 3.3 i 3.4 i uporediti rezultate.

e) Naći udele u struji kvara iz tačke c) i to generatora  $G_3$  i zbirnog udela generatora  $G_1$  i mreže priključene na sabirnice 4.



**Sl. 3.10a** Monofazna šema sistema iz zadatka 3.10

Osnovni podaci o sistemu su:

Generator 1:	$S_n = 75$ MVA;	$U_n = 15$ kV;
	$X_d'' \% = X_i \% = 11,2$ %;	$r \approx 0$ .
Generator 3:	$S_n = 100$ MVA;	$U_n = 10,5$ kV;
	$X_d'' \% = X_i \% = 10,5$ %;	$r \approx 0$ .
Transformator 1:	$S_n = 50$ MVA;	$m = 123/15$ kV;
	$X_T \% = 10$ %;	$X_{0T} \% = 1,2X_{dT} \%;$ $r \approx 0$ .
Transformator 2:	$S_n = 60$ MVA;	$m = 110/60$ kV;
	$X_T \% = 10$ %;	$X_{0T} \% = 2,4X_{dT} \%;$ $r \approx 0$ .
Transformator 3:	$S_n = 90$ MVA;	$m = 115/10,5$ kV;
	$X_T \% = 10,5$ %;	$X_{0T} \% = 2,4X_{dT} \%;$ $r \approx 0$ .
Vod V1:	$L_1 = 38$ km;	$\underline{z}_{dV1} = (0,15 + j0,4) \Omega/\text{km};$ $\underline{z}_{0V1} = (0,3 + j1,6) \Omega/\text{km}$ . (vazd. vod)
Vod V2:	$L_2 = 12,1$ km;	$\underline{z}_{dV2} = (0,17 + j0,2) \Omega/\text{km};$ $\underline{z}_{0V2} = (0,79 + j0,3) \Omega/\text{km}$ . (podz. kabl)
Vod V2:	$L_3 = 30$ km;	$\underline{z}_{dV3} = (0,19 + j0,4) \Omega/\text{km};$ $\underline{z}_{0V3} = (0,34 + j1,6) \Omega/\text{km}$ . (vazd. vod)
Uticaj spoljne mreže 60 kV:	$S_4'' = 1000$ MVA;	$(R_4 \approx 0)$

Uticaj spoljnih mreža 15 kV i 10 kV se zanemaruje. U proračunima pod tač. b i c, zanemariti i otpornosti vodova 1, 2 i 3.

**Rešenje:**

a) Proračun impedansi elemenata sistema, svedenih na napon čvora 3 (110 kV):

$$X_{G1}'' = \frac{X_{d1}'' \% U_{nG1}^2}{100 S_{nG1}} m_{T1} = \frac{11,2 \cdot 15^2}{100 \cdot 75} \left( \frac{123}{15} \right)^2 = 22,59 \Omega;$$

$$X_{T1} = \frac{X_{T1} \% U_{nT1}^2}{100 S_{nT1}} = \frac{10 \cdot 123^2}{100 \cdot 50} = 30,26 \Omega; \quad X_{oT1} = 1,2 \cdot 30,26 = 36,31 \Omega;$$

$$X_{T2} = \frac{X_{T2} \% U_{nT2}^2}{100 S_{nT2}} = \frac{10 \cdot 110^2}{100 \cdot 60} = 20,17 \Omega; \quad X_{oT2} = 2,4 \cdot 20,17 = 48,4 \Omega;$$

$$X_{T3} = \frac{X_{T3} \% U_{nT3}^2}{100 S_{nT3}} = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 90} = 15,43 \Omega; \quad X_{oT3} = \infty;$$

$$X_{G3}'' = \frac{X_{d3}'' U_{nG3}^2}{100 S_{nG3}} m_{T3} = \frac{10,5 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 100} \left( \frac{115}{10,5} \right)^2 = 13,89 \Omega;$$

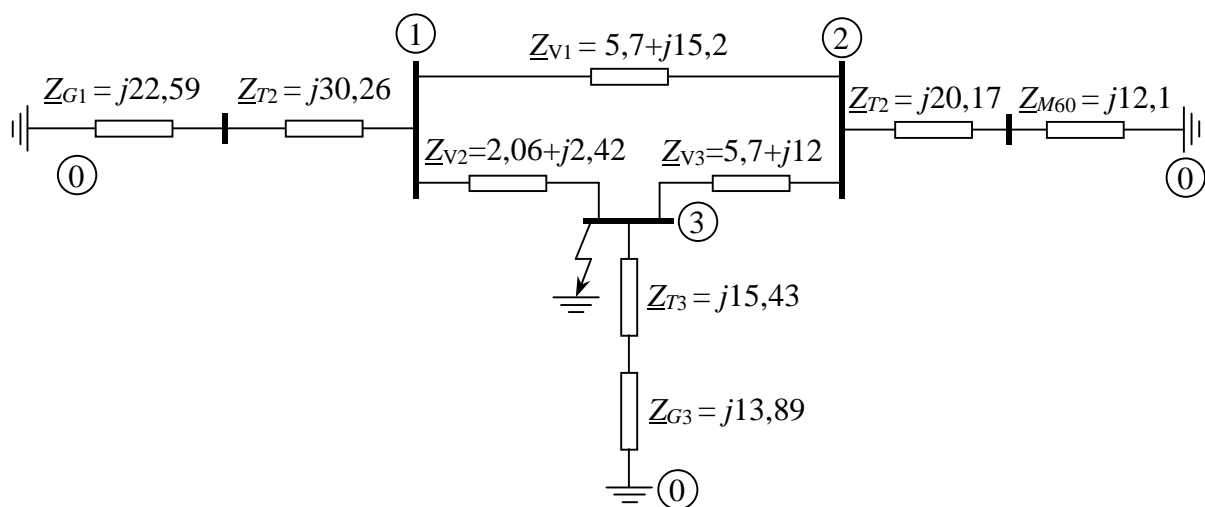
$$X_{M60} = \frac{U_{n4}^2}{S_{N4}} m_{T2} = \frac{60^2}{1000} \left( \frac{110}{60} \right)^2 = 12,1 \Omega;$$

$$\underline{Z}_{dV1} = (5,7 + j15,2) \Omega; \quad \underline{Z}_{oV1} = (11,4 + j60,8) \Omega;$$

$$\underline{Z}_{dV2} = (2,06 + j2,42) \Omega; \quad \underline{Z}_{oV2} = (9,56 + j3,63) \Omega;$$

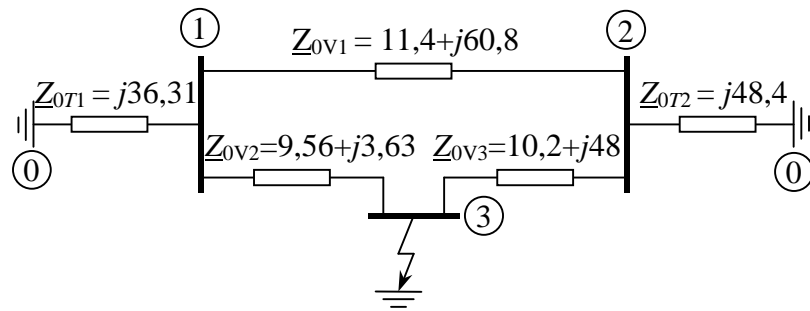
$$\underline{Z}_{dV3} = (5,7 + j12) \Omega; \quad \underline{Z}_{oV3} = (10,2 + j48) \Omega.$$

Mreža sistema direktnih (inverznih) impedansi sistema, prikazana je na sl. 3.10b, a mreža nultih impedansi, na sl. 3.10c. Na sl. 3.10b i sl. 3.10c veličine impedansi su u omima.



**Sl. 3.10b** Osnovna mreža impedansi sistema direktnog (inverznog) redosleda sistema sa sl. 3.10a





Sl. 3.10c Osnovna mreža impedansi sistema nultog redosleda sistema sa sl. 3.10a

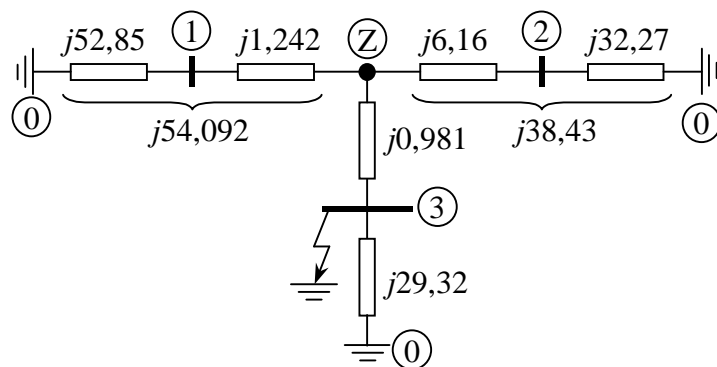
b1) Proračun ekvivalentne impedanse direktnog (inverznog) redosleda.

Transfiguracija trougla 123 u zvezdu (otpori vodova se zanemaruju) svodi šemu impedansi direktnog (inverznog) redosleda na šemu prikazanu na sl. 3.10d, a sažimanjem paralelnih grana Z10 i Z20 na šemu datu na sl. 3.10e. Vrednosti impedansi pojedinih grana zvezde dobijene transfiguracijom trougla 123 su:

$$X_{Z1} = \frac{15,2 \cdot 2,42}{15,2 + 2,42 + 12} = \frac{15,2 \cdot 2,42}{29,62} = 1,242 \Omega;$$

$$X_{Z2} = \frac{15,2 \cdot 12}{29,62} = 6,16 \Omega;$$

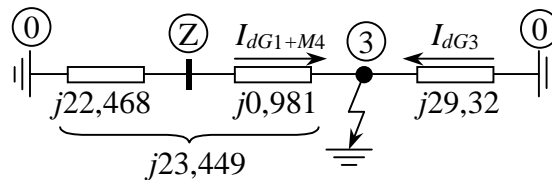
$$X_{Z3} = \frac{2,42 \cdot 12}{29,62} = 0,981 \Omega.$$



Sl. 3.10d Mreža sistema impedansi direktnog (inverznog) redosleda posle transfiguracije trougla 123 na sl. 3.10b u zvezdu 123Z, pri zanemarenju otpora vodova

Ekvivalentovanjem dveju paralelnih grana Z0 dobija se reaktansa

$$X_{Z0} = \frac{54,092 \cdot 38,43}{54,092 + 38,43} = 22,468 \Omega.$$



**Sl. 3.10e** Mreža sistema impedansi direktnog (inverznog) redosleda posle ekvivalentovanja paralelnih grana na sl. 3.10d

Ekvivalentovanjem paralelnih grana 30 i 3Z0 dobija se konačna vrednost ekvivalentne direktne (inverzne) reaktanse pri kvaru na sabirnicama 3:

$$X_d^{ekv} = X_i^{ekv} = \frac{23,449 \cdot 29,32}{23,449 + 29,32} = 13,03 \Omega.$$

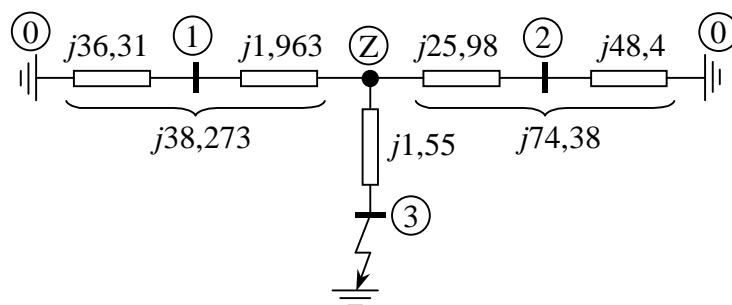
b2) Proračun ekvivalentne impedanse nultog redosleda (sl. 3.10f i 3.10g):

Transfiguracija trougla 123 sa sl. 3.10c u zvezdu daje:

$$X_{0Z1} = \frac{60,8 \cdot 3,63}{60,8 + 3,63 + 48} = \frac{60,8 \cdot 3,63}{112,43} = 1,963 \Omega;$$

$$X_{0Z2} = \frac{60,8 \cdot 48}{112,43} = 25,958 \Omega;$$

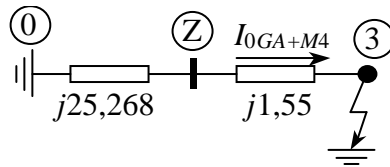
$$X_{0Z3} = \frac{3,63 \cdot 48}{112,43} = 1,55 \Omega.$$



**Sl. 3.10f** Mreža sistema impedansi nultog redosleda, posle transfiguracije trougla 123 na sl. 3.10c u zvezdu 123Z, pri zanemarenju otpora vodova

Ekvivalentovanje paralelnih grana Z10 i Z20 daje zamensku reaktansu grane Z0 na sl. 3.10g:

$$X_{0Z0} = \frac{38,273 \cdot 74,358}{38,273 + 74,358} = 25,268 \Omega.$$



Sl. 3.10g Mreža sistema impedansi nultog redosleda, posle ekvivalentovanja paralelnih grana na sl. 3.10f

Ekvivalentovanje rednih grana 0Z i Z3 sa sl. 3.10g daje konačnu vrednost ekvivalentne nulte impedanse pri kvaru na sabirnicama 3:

$$X_0^{ekv} = 25,268 + 1,55 = 26,82 \Omega.$$

c) Struja i snaga jednofaznog zemljospoja na sabirnicama 3 su:

$$\underline{I}_{d3} = \underline{I}_{i3} = \underline{I}_{03} = \frac{\underline{U}_{fr3}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{110/\sqrt{3}}{2 \cdot j13,03 + j26,82} = -j1,201 \text{ kA} = 1,201 \text{ kA} \angle -90^\circ;$$

$$\underline{I}_{k1Z} = 3\underline{I}_{d3} = 3,603 \text{ kA} \angle -90^\circ;$$

$$\underline{S}_{k1Z} = \sqrt{3} \underline{U}_3 \underline{I}_{k1Z}^* = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 3,603 \text{ kA} \angle -90^\circ = 686,44 \text{ MVA} \angle 90^\circ.$$

Naponi zdravih faza (B i C) na mestu kvara su:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{fB3} &= \underline{a}^2 \underline{U}_{fr3} - (\underline{a}^2 \underline{Z}_d^{ekv} + \underline{a} \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}) \underline{I}_{d3} = \underline{U}_{fr3} \angle 240^\circ - (-\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}) \underline{I}_{d3} = \\ &= 63,51 \angle 240^\circ + (j13,03 - j26,82) \cdot (-j1,201) = -31,755 - j55,001 - 16,56 = \\ &= -48,31 - j55,001 = 73,2 \text{ kV} \angle 248,7^\circ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{fC3} &= \underline{a} \underline{U}_{fr3} - (\underline{a} \underline{Z}_d^{ekv} + \underline{a}^2 \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}) \underline{I}_{d3} = \underline{U}_{fr3} \angle 120^\circ - (-\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}) \underline{I}_{d3} = \\ &= 63,51 \angle 120^\circ + (j13,03 - j26,82) \cdot (-j1,201) = -31,755 + j55,001 - 16,56 = \\ &= -48,31 + j55,001 = 73,2 \text{ kV} \angle 131,3^\circ. \end{aligned}$$

d) Za potrebe približnog proračuna potrebno je najpre izračunati struju trofaznog kratkog spoja:

$$\underline{I}_{k3} = \frac{\underline{U}_{fr3}}{\underline{Z}_d^{ekv}} = \frac{110/\sqrt{3}}{j13,03} = -j4,874 \text{ kA}.$$

Za  $k = X_0^{ekv} / X_d^{ekv} = 26,82/13,03 = 2,0582$ , po približnim formulama iz zadataka 3.3 i 3.4 dobija se:

$$\underline{I}_{k1Z} = \underline{I}_{k3} \frac{3}{2+k} = 4,874 \frac{3}{2+2,0582} = 3,603 \text{ kA} \text{ (isti rezultat kao i napred);}$$

$$U_{fB3} = \sqrt{3}U_{fr3} \frac{\sqrt{k^2 + k + 1}}{2 + k} = \sqrt{3} \cdot 63,51 \frac{\sqrt{2,0582^2 + 2,0582 + 1}}{2 + 2,0582} = 110 \frac{2,701}{4,0582} = 73,21 \text{ kV},$$

(takođe isti rezultat kao u prethodnom proračunu).

e) Raspodela struje kvara

Sa sl. 3.10e dobija se raspodela struja direktnog i inverznog redosleda:

$$\underline{I}_{dG_3} = \underline{I}_{iG_3} = \frac{23,449}{23,449 + 29,32} \underline{I}_{d3} = \frac{23,449}{23,449 + 29,32} (-j1,201) = -j0,533 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{dG_1+M_4} = \underline{I}_{iG_1+M_4} = \frac{29,32}{23,449 + 29,32} \underline{I}_{d3} = \frac{29,32}{23,449 + 29,32} (-j1,201) = -j0,668 \text{ kA}.$$

Sa sl. 3.10g dobija se raspodela struja nultog redosleda:

$$\underline{I}_{0G_3} = 0;$$

$$\underline{I}_{0G_1+M_4} = \underline{I}_{03} = -j1,201 \text{ kA}.$$

Prema tome odgovarajući udeli u ukupnoj struji jednofaznog zemljospoja u tački 3 su:

$$\underline{I}_{k1Z}^{G_3} = \underline{I}_{dG_3} + \underline{I}_{iG_3} + \underline{I}_{0G_3} = -j0,533 - j0,533 + 0 = -j1,066 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{k1Z}^{G_1+M_4} = \underline{I}_{dG_1+M_4} + \underline{I}_{iG_1+M_4} + \underline{I}_{0G_1+M_4} = -j0,668 - j0,668 + -j1,201 = -j2,537 \text{ kA}.$$

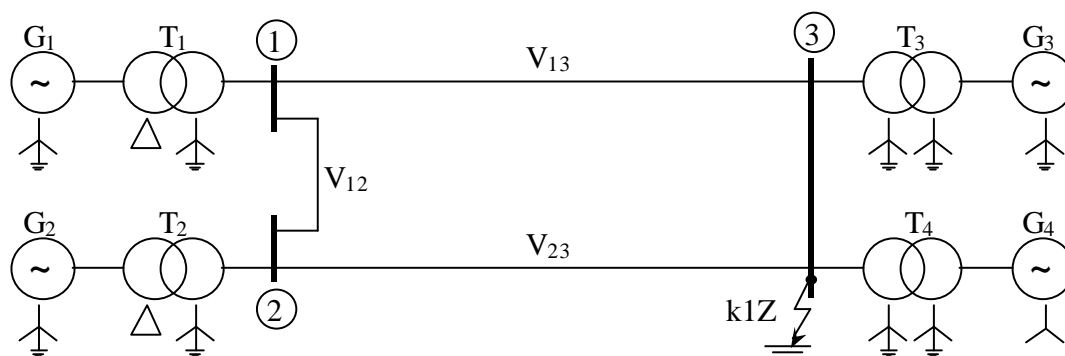
$$(\text{Provera: } \underline{I}_{k1Z}^{G_3} + \underline{I}_{k1Z}^{G_1+M_4} = -j1,066 - j2,537 = -j3,603 \text{ kA} = \underline{I}_{k1Z}).$$

□

**Zadatak 3.11**

Za mrežu prikazanu na sl. 3.11a izračunati struju direktno uzemljenog zvezdišta generatora  $G_3$  pri jednofaznom kratkom spoju sa zemljom (k1Z) na sabirnicama 3. Kolika je ova struja ako se zvezdište generatora  $G_3$  uzemlji preko prigušnice čija je induktivni otpor sveden na naponski nivo 500 kV,  $X_p = 10 \Omega$ .

Napomena: Fazni napon na mestu kvara pre kvara je  $U_{fr} = 500/\sqrt{3}$ . Ostali podaci o elementima sistema, neophodni za proračune, dati su ispod sl. 3.11a.



$G_1$ :	$S_n = 1000 \text{ MVA}$ ,	$U_n = 15 \text{ kV}$ ,	$X_d''\% = X_i\% = 15\%$ ,	$X_0\% = 7\%$ .
$G_2$ :	$S_n = 1000 \text{ MVA}$ ,	$U_n = 15 \text{ kV}$ ,	$X_d''\% = X_i\% = 25\%$ ,	$X_0\% = 10\%$ .
$G_3$ :	$S_n = 500 \text{ MVA}$ ,	$U_n = 13,8 \text{ kV}$ ,	$X_d''\% = X_i\% = 20\%$ ,	$X_0\% = 12\%$ .
$G_4$ :	$S_n = 750 \text{ MVA}$ ,	$U_n = 13,8 \text{ kV}$ ,	$X_d''\% = X_i\% = 30\%$ ,	$X_0\% = 10\%$ .
$T_1$ :	$S_n = 1000 \text{ MVA}$ ,	$m_T = 15/500 \text{ kV/kV}$ ,	$X_T\% = 10\%$ .	
$T_2$ :	$S_n = 1000 \text{ MVA}$ ,	$m_T = 15/500 \text{ kV/kV}$ ,	$X_T\% = 10\%$ .	
$T_3$ :	$S_n = 500 \text{ MVA}$ ,	$m_T = 13,8/500 \text{ kV/kV}$ ,	$X_T\% = 11\%$ .	
$T_4$ :	$S_n = 750 \text{ MVA}$ ,	$m_T = 13,8/500 \text{ kV/kV}$ ,	$X_T\% = 12\%$ ,	$X_{0\mu}\% = 100\%$ , $X_{dq}\% = \infty$ .
$V_{12}$ :	$U_{nv} = 500 \text{ kV}$ ,	$X_{dv} = 50 \Omega$ ,	$X_{0v} = 150 \Omega$ .	
$V_{13}$ :	$U_{nv} = 500 \text{ kV}$ ,	$X_{dv} = 40 \Omega$ ,	$X_{0v} = 100 \Omega$ .	
$V_{23}$ :	$U_{nv} = 500 \text{ kV}$ ,	$X_{dv} = 40 \Omega$ ,	$X_{0v} = 100 \Omega$ .	

Sl. 3.11a Jednopolna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.11

Rešenje:

Vrednosti parametara mreže svedeni na naponski nivo 500 kV su:

$$X_{dG1}'' = \frac{X_{dG1}''\%}{100} \frac{U_{nG1}^2}{S_{nG1}} \frac{1}{m_{T1}^2} = \frac{15}{100} \frac{15^2}{1000} \frac{500^2}{15^2} = 37,5 \Omega;$$

$$X_{dG2}'' = \frac{X_{dG2}''\%}{100} \frac{U_{nG2}^2}{S_{nG2}} \frac{1}{m_{T2}^2} = \frac{25}{100} \frac{15^2}{1000} \frac{500^2}{15^2} = 62,5 \Omega;$$

$$X_{dG3}'' = \frac{X_{dG3}''\%}{100} \frac{U_{nG3}^2}{S_{nG3}} \frac{1}{m_{T3}^2} = \frac{20}{100} \frac{13,8^2}{500} \frac{500^2}{13,8^2} = 100 \Omega;$$

$$X_{oG3} = \frac{X_{oG3} \% U_{nG3}^2}{100 S_{nG3}} \frac{1}{m_{T3}^2} = \frac{12}{100} \frac{13,8^2}{500} \frac{500^2}{13,8^2} = 60 \Omega;$$

$$X_{dG4}'' = \frac{X_{dG4}'' \% U_{nG4}^2}{100 S_{nG4}} \frac{1}{m_{T4}^2} = \frac{30}{100} \frac{13,8^2}{750} \frac{500^2}{13,8^2} = 100 \Omega;$$

$$X_{T1} = \frac{X_{T1} \% U_{nT1}^2}{100 S_{nT1}} = \frac{10}{100} \frac{500^2}{1000} = 25 \Omega;$$

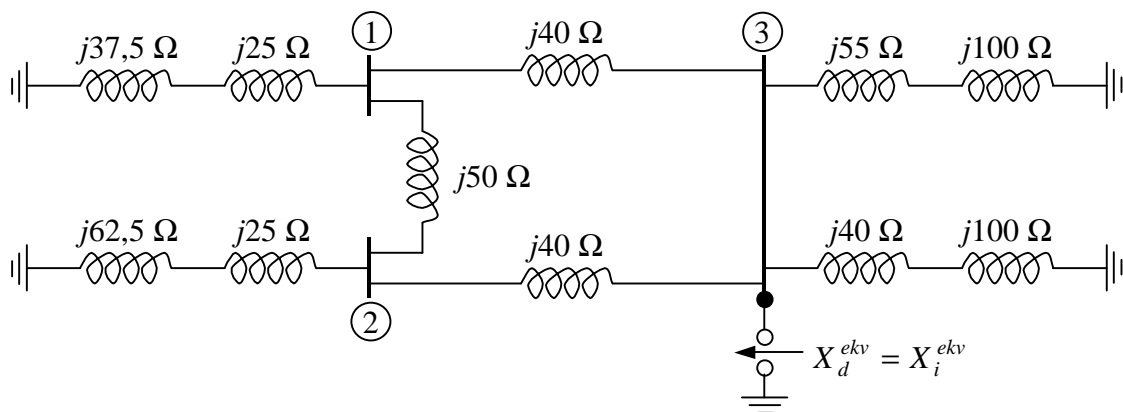
$$X_{T2} = \frac{X_{T2} \% U_{nT2}^2}{100 S_{nT2}} = \frac{10}{100} \frac{500^2}{1000} = 25 \Omega;$$

$$X_{T3} = \frac{X_{T3} \% U_{nT3}^2}{100 S_{nT3}} = \frac{11}{100} \frac{500^2}{500} = 55 \Omega;$$

$$X_{T4} = \frac{X_{T4} \% U_{nT4}^2}{100 S_{nT4}} = \frac{12}{100} \frac{500^2}{750} = 40 \Omega;$$

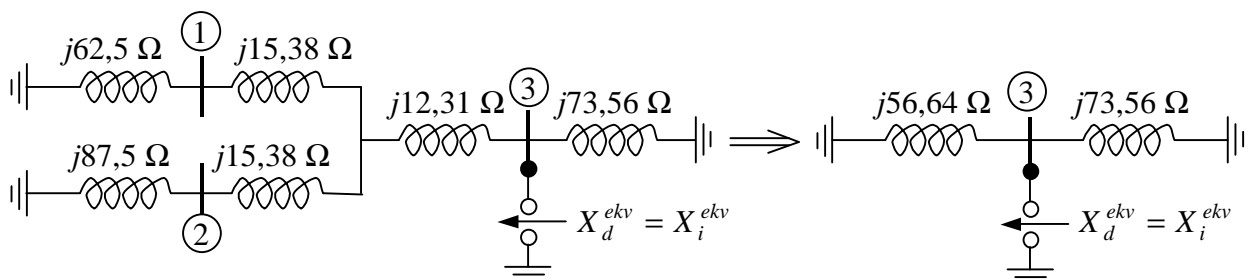
$$X_{0\mu T4} = \frac{X_{0\mu T4} \% U_{nT4}^2}{100 S_{nT4}} = \frac{100}{100} \frac{500^2}{750} = 333,33 \Omega.$$

Ekvivalentna šema impedansi direktnog i inverznog redosleda, data je na sl. 3.11b.



Sl. 3.11b Ekvivalentna šema impedansi direktnog (inverznog) redosleda sistema sa sl. 3.11a

Daljim sređivanjem gornje šeme sa sl. 3.11b dobijaju se šeme prikazane na sl. 3.11c.

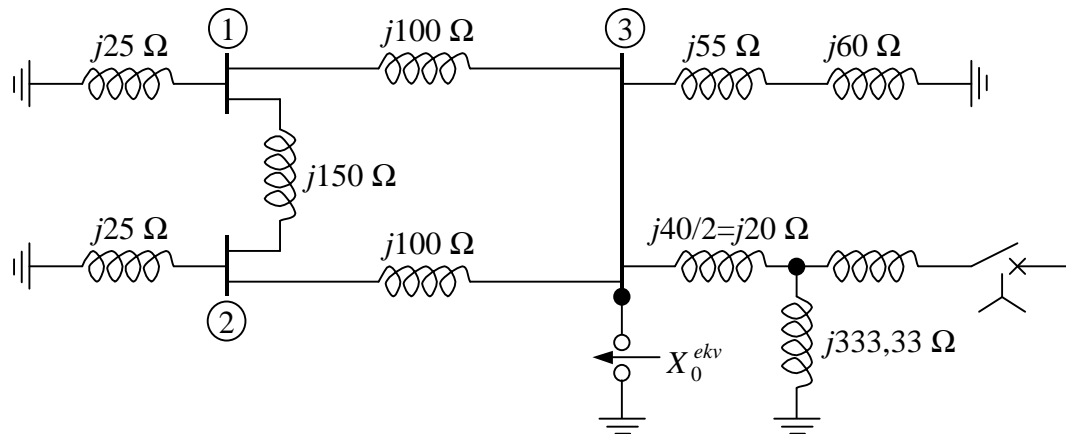


Sl. 3.11c Ekvivalentne šeme impedansi direktnog (inverznog) redosleda posle sažimanja sistema sa sl. 3.11b

Sa poslednje šeme sa sl. 3.11c dobijaju se ekvivalentne reaktanse direktnog i inverznog redosleda gledano otkočno sa mesta kvara:

$$X_d^{ekv} = X_i^{ekv} = 32 \Omega.$$

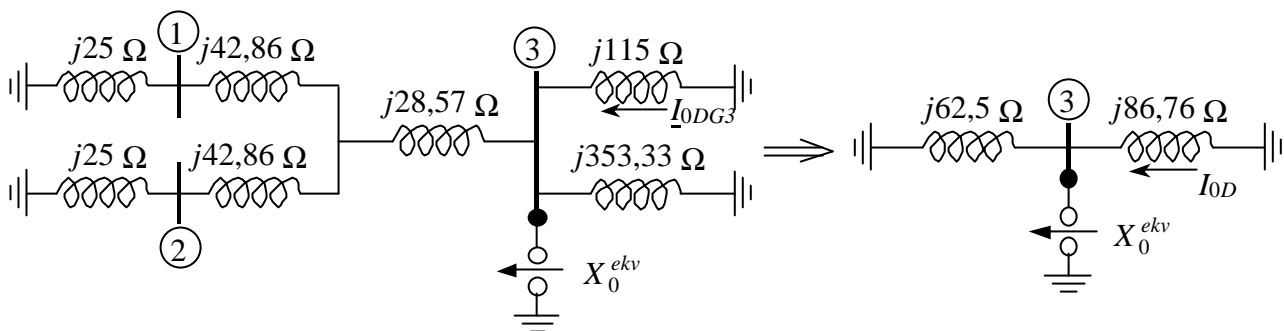
Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda data je na sl. 3.11d.



Sl. 3.11d Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda sistema sa sl. 3.11a

U prethodnoj šemi pretpostavljeno je da su impedanse rasipanja primarnog i sekundarnog namotaja transformatora  $T_4$  jednake polovini ukupne impedanse rasipanja transformatora.

Sređivanjem šeme sa sl. 3.11d dobijaju se šeme na sl. 3.11e.



Sl. 3.11e Ekvivalentne šeme impedansi nultog redosleda posle sažimanja šeme sa sl. 3.11d

Konačno se sa sl. 3.11e dobija da je ekvivalentna reaktansa nultog redosleda, gledano sa mesta kvara:

$$X_0^{ekv} = 36,33 \Omega.$$

Na osnovu izračunatih ekvivalentnih impedansi direktnog, inverznog i nultog redosleda mogu se izračunati simetrične komponente struje kvara:

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{500/\sqrt{3}}{j(2 \cdot 32 + 36,33)} = -j2,877 \text{ kA.}$$

Za struju zvezdišta generatora  $G_3$  merodavna je struja nultog redosleda kroz granu sa tim generatorom. Koristeći pravilo strujnog razdelnika može se odrediti ta struja, kao:

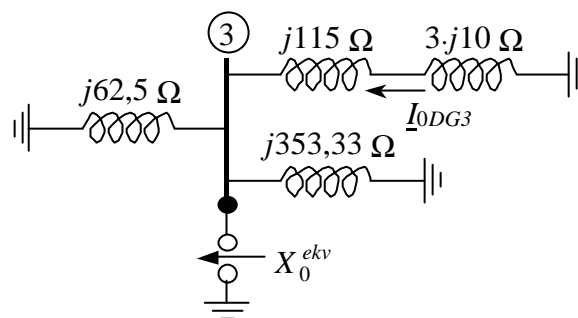
$$\underline{I}_{0D} = \frac{62,5}{62,5 + 86,76} \underline{I}_0 = 0,419 \cdot (-j2,877) = -j1,205 \text{ kA ;}$$

$$\underline{I}_{0DG_3} = \frac{353,33}{353,33 + 115} \underline{I}_{0D} = 0,754 \cdot (-j1,205) = -j0,909 \text{ kA.}$$

Struja koja teče kroz zvezdište je onda:

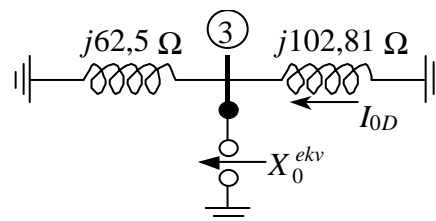
$$\underline{I}_{NG_3} = 3 \underline{I}_{0DG_3} = 3 \cdot (-j0,909) = -j2,727 \text{ kA.}$$

Dodavanjem prigušnice u zvezdište generatora  $G_3$  menja se samo deo šeme mreže nultih impedansi sa sl. 3.11e desno od kvara, kako je to pokazano na sl. 3.11f.



Sl. 3.11f Ekvivalentna šema sistema nultih impedansi kada se zvezdište generatora  $G_3$  sa sl. 3.11a, uzemlji preko prigušnice, čija je reaktansa  $10 \Omega$

Sređivanjem šeme sa sl. 3.11f dobija se šema na sl. 3.11g.



Sl. 3.11g Konačna ekvivalentna šema sistema nultih impedansi, posle sažimanja osnovne šeme sa sl. 3.11f

Sa prethodne šeme na sl. 3.11g dobija se da je, posle priključenja prigušnice, reaktanse od  $10 \Omega$ , ekvivalentna nulta reaktansa sistema:



$$X_0^{ekv} = 38,87 \, \Omega .$$

Struja zvezdišta generatora  $G_3$  dobija se na isti način kao i za slučaj direktnog uzemljenja zvezdišta generatora  $G_3$ :

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{500/\sqrt{3}}{j(2 \cdot 32 + 38,87)} = -j2,806 \, \text{kA} ;$$

$$\underline{I}_{0D} = \frac{62,5}{62,5 + 102,81} \underline{I}_0 = 0,378 \cdot (-j2,806) = -j1,061 \, \text{kA} ;$$

$$\underline{I}_{0DG_3} = \frac{353,33}{353,33 + 145} \underline{I}_{0D} = 0,709 \cdot (-j1,061) = -j0,752 \, \text{kA} ;$$

$$\underline{I}_{NG_3} = 3\underline{I}_{0DG_3} = 3 \cdot (-j0,752) = -j2,257 \, \text{kA} .$$

Na osnovu proračunatih vrednosti uočava se da se posle uzemljenja zvezdišta generatora  $G_3$  preko prigušnice reaktanse

$$X_p = 10 \cdot \frac{13,8}{500} = 0,276 \, \Omega ,$$

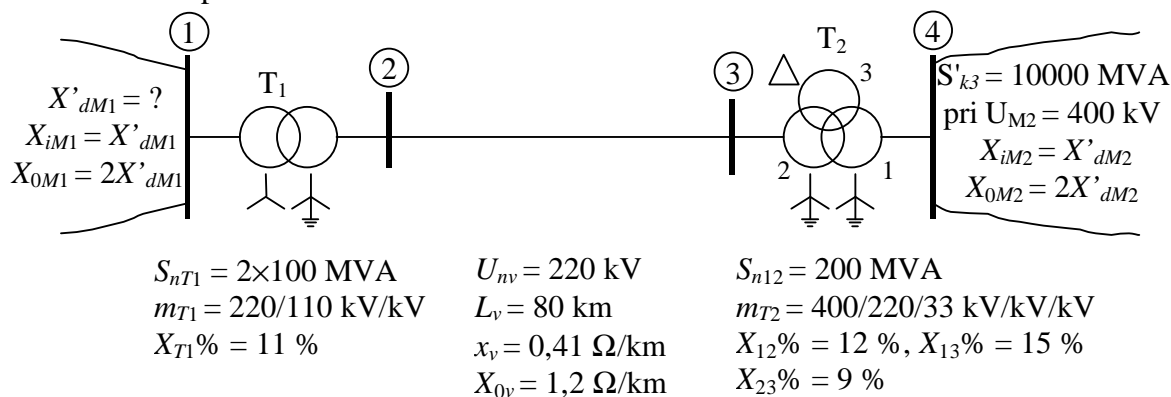
struja njegovog zvezdišta, u odnosu na slučaj kada je zvezdište direktno uzemljeno, smanjuje za 17,24 %.

□

**Zadatak 3.12**

Za dati elektroenergetski sistem prikazan monofazno na sl. 3.12a moduo struje po vodu 2-3, u fazi pogođenoj kvarom pri jednofaznom kratkom spoju na sabirnicama 3 je  $I_{23} = 1,4$  kA. Izračunati struju kvara i struju po pojedinim fazama voda 2-3 u slučaju dvofaznog kratkog spoja bez zemljospoja na sabirnicama 3.

Napon na mestu kvara pre kvara je jednak nominalnom naponu voda. Zanemariti prethodni radni režim. Ostali podaci o sistemu dati su na sl. 3.12a.



Sl. 3.12a Monofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.12

Rešenje:

Vrednosti parametara mreže svedeni na naponski nivo 220 kV su:

$$X_{T1} = \frac{X_{T1}\%}{100} \frac{U_{nT1}^2}{S_{nT1}} = \frac{11}{100} \frac{220^2}{200} = 26,62 \Omega;$$

$$X_v = x_v L_v = 0,41 \cdot 80 = 32,8 \Omega;$$

$$X_{0v} = x_{0v} L_v = 1,2 \cdot 80 = 96 \Omega;$$

$$X_{12} = \frac{X_{12}\%}{100} \frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}} = \frac{12}{100} \frac{220^2}{200} = 29,04 \Omega;$$

$$X_{13} = \frac{X_{13}\%}{100} \frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}} = \frac{15}{100} \frac{220^2}{200} = 36,3 \Omega;$$

$$X_{23} = \frac{X_{23}\%}{100} \frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}} = \frac{9}{100} \frac{220^2}{200} = 21,78 \Omega;$$

$$X_1 = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{13} - X_{12}) = 21,78 \Omega;$$

$$X_2 = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{23} - X_{13}) = 7,26 \Omega;$$

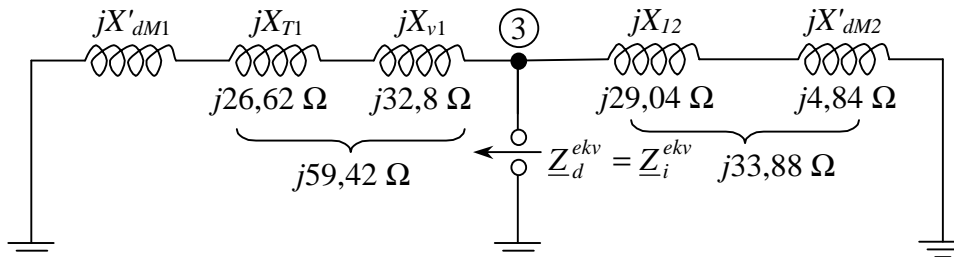
$$X_3 = \frac{1}{2} (X_{13} + X_{23} - X_{12}) = 14,52 \Omega;$$

$$X'_{dM2} = \frac{U_{M2}^2}{S'_{k3}} \frac{1}{m_{nT}^2} = \frac{400^2}{10000} \frac{220^2}{400^2} = 4,84 \Omega;$$

$$X_{0M2} = 2 \cdot X'_{dM2} = 9,68 \Omega.$$

U cilju određivanja struja kvara kod dvofaznog kratkog spoja potrebno je na osnovu struje povodu 2-3 za slučaj jednofaznog kratkog spoja izračunati nepoznate parametre mreže vezane na transformator  $T_1$ .

Ekvivalentna šema tog sistema za direktni i inverzni redosled data je na sl. 3.12b.

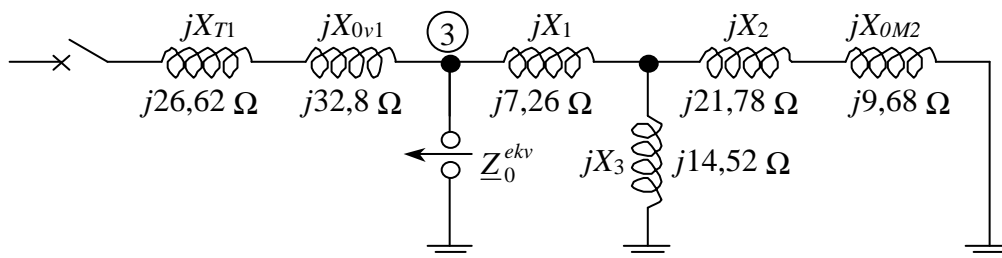


Sl. 3.12b Ekvivalentna šema impedansi direktnog (inverznog) redosleda sistema sa sl. 3.12a

Uvođenjem smene  $X_{dL} = 59,42 + X_{dM1}$  za ekvivalentnu impedansu direktnog i inverznog redosleda dobija se izraz:

$$\underline{Z}_d^{ekv} = jX_d^{ekv} = j \frac{33,88 X_{dL}}{33,88 + X_{dL}} = jX_i.$$

Ekvivalentna šema impedansi sistema za nulti redosled je data na sl. 3.12c.



Sl. 3.12c Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda sistema sa sl. 3.12a

Na osnovu gornje šeme dobija se ekvivalentna impedansa nultog redosleda za kvar na sabirnicama 3, čija je vrednost:

$$\underline{Z}_0^{ekv} = jX_0^{ekv} = j17,19 \Omega.$$

Simetrične komponente struje kvara za slučaj jednofaznog kratkog spoja na sabirnicama 3 su:

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{220/\sqrt{3}}{2 \cdot j \frac{33,88 X_{dL}}{33,88 + X_{dL}} + j17,19}.$$

Direktna i inverzna komponenta struje kvara koje sa leve strane utiču u mesto kvara su jednake i date su izrazom.

$$\underline{I}_{dL} = \frac{X_{dD}}{X_{dL} + X_{dD}} \underline{I}_d = \frac{33,88}{33,88 + X_{dL}} \frac{220/\sqrt{3}}{2 \cdot j \frac{33,88 X_{dL}}{33,88 + X_{dL}} + j17,19} = \underline{I}_{iL}$$

Ovo su ujedno izrazi za direktnu i inverznu komponentu struje po vodu 2-3. Nulta komponenta struje kvara koja sa leve strane utiče u mesto kvara, odnosno nulta komponenta struje voda 2-3, jednaka je nuli pa se prema tome za struju faze pogođene kvarom (faza A) voda 2-3 dobija vrednost:

$$\underline{I}_{A23} = \underline{I}_{dL} + \underline{I}_{iL} + \underline{I}_{0L} = 2\underline{I}_{dL}$$

Po uslovu zadatka vrednost modula struje  $I_{A23}$  je 1,4 kA pa se dalje dobija jednakost

$$|\underline{I}_{A23}| = 2 \cdot \left| \frac{33,88}{33,88 + X_{dL}} \frac{220/\sqrt{3}}{2 \cdot j \frac{33,88 X_{dL}}{33,88 + X_{dL}} + j17,19} \right| = 1,4 \text{ kA},$$

odnosno:

$$|\underline{I}_{A23}| = 2 \cdot \frac{33,88 \cdot 220/\sqrt{3}}{2 \cdot 33,88 \cdot X_{dL} + 17,19 \cdot (33,88 + X_{dL})} = 1,4 \text{ kA}.$$

U gornjoj jednačini jedina nepoznata veličina je  $X_{dL}$  pa se sređivanjem izraza u imeniocu dobija njeno rešenje, koje za  $X_{dL}$  daje vrednost:

$$X_{dL} = 65,51 \Omega.$$

Konačno, dobija se i vrednost za  $X'_{dM1}$ , kao:

$$X'_{dM1} = X_{dL} - 59,42 = 6,09 \Omega.$$

Sada se može izračunati i vrednost ekvivalentne impedanse direktnog i inverznog redosleda, gledano sa mesta kvara:

$$\underline{Z}_d^{ekv} = jX_d^{ekv} = j \frac{33,88 \cdot 65,51}{33,88 + 65,51} = j22,33 = jX_i^{ekv}.$$

Za slučaj dvofaznog kratkog spoja bez zemljospoja, mogu se dalje izračunati simetrične komponente struje kvara:

$$\underline{I}_d = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} = \frac{220/\sqrt{3}}{2 \cdot j22,33} = -j2,844 \text{ kA} = -\underline{I}_i; \quad \underline{I}_0 = 0.$$

Direktna komponenta struje koja u mesto kvara utiče sa leve strane (direktna komponenta struje voda) je:

$$\underline{I}_{dL} = \frac{X_{dD}}{X_{dL} + X_{dD}} \underline{I}_d = \frac{33,88}{65,51 + 33,88} (-j2,844) = -j0,969 \text{ kA} = -\underline{I}_{iL}.$$

Konačno, struje pojedinih faza voda 2-3 pri dvofaznom kratkom spoju na sabirnicama 3 su:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{A23} \\ \underline{I}_{B23} \\ \underline{I}_{C23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{dL} \\ \underline{I}_{iL} \\ \underline{I}_{0L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} -0,969 \\ 0,969 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1,678 \\ 1,678 \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

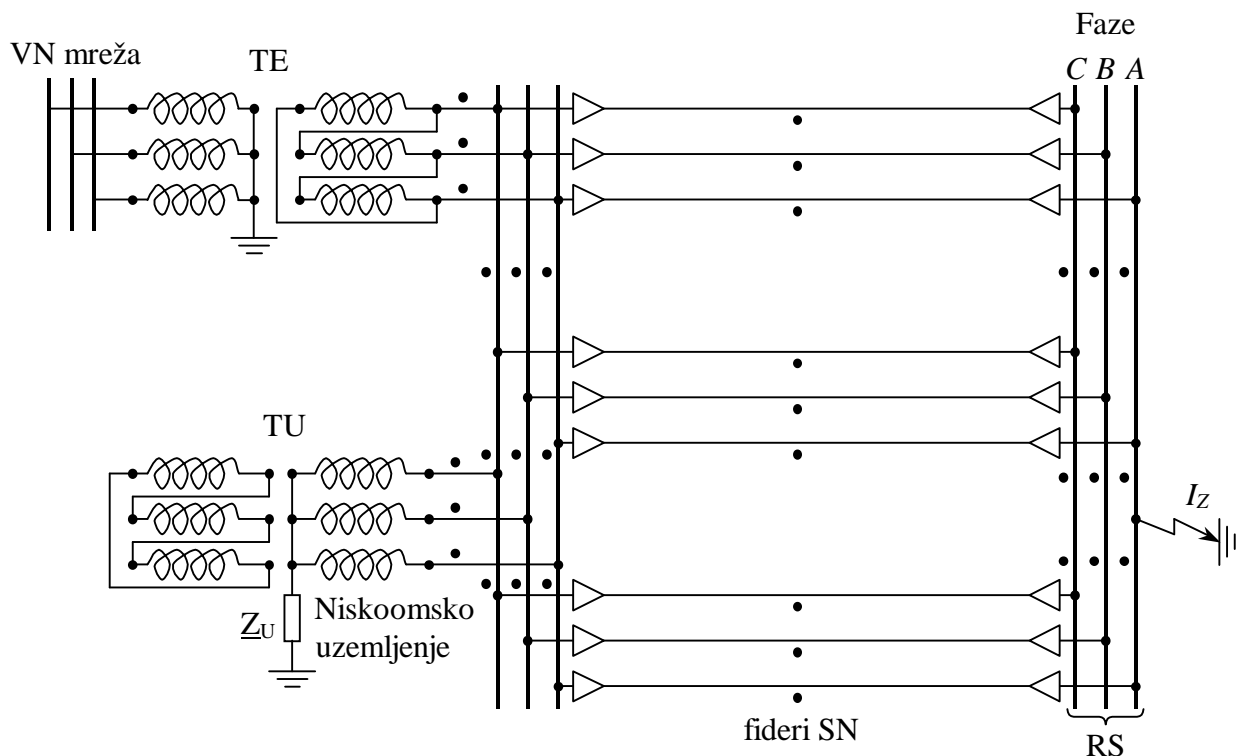
□

**Zadatak 3.13**

Struja zemljospoja  $I_z$  na sabirnicama srednjeg napona (SN) razvodne stanice RS, napajane iz TS VN/SN preko tri trofazna identična kabla povećanog preseka (tzv. “fidera”) sa sl. 3.13a, ograničena je po intenzitetu (modulu) na 750 A putem takozvanog “niskoomskog uzemljenja”. Na osnovu poznatog izraza za vezu između ukupne struje zemljospoja i njenih simetričnih komponenata za istu fazu (A), skicirati vektorske dijagrame simetričnih komponenata struja kroz mesto kvara za sve tri faze, a zatim na osnovu raspodele tih komponenata naći i uneti intenzitete i smerove struja za sve tri faze u svim sa tačkom (•) naznačenim delovima kola SN, uvažavajući činjenicu, da je direktna impedansa malog transformatora za uzemljenje TU neuporedivo veća od odgovarajuće impedanse moćnog energetskog transformatora TE, zajedno sa napojnom mrežom visokog napona.

Napomena: Impedanse sabirnica prema impedansama ostalih elemenata su zanemarljive.

Primedba: Moguće je raditi sa modulima i smerovima, jer se pokazuje da su sve fazne struje ili u fazi ili “protivfazne”. Uticaj predopterećenja lako se po potrebi nadodaje metodom superpozicije.



Sl. 3.13a Trofazna šema razvodne stanice iz zadatka 3.13

Rešenje:

Na mestu kvara važe jednačine:

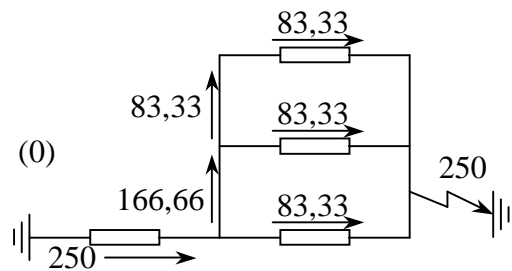
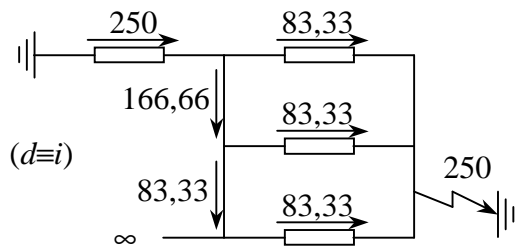
$$\underline{I}_{ZA} = \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_0 = 750 \text{ A, odnosno } \underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 = 250 \text{ A};$$

$$\underline{I}_B = \underline{a}^2 \underline{I}_d + \underline{a} \underline{I}_i + \underline{I}_0 = (\underline{a}^2 + \underline{a} + 1) \underline{I}_d = 0;$$

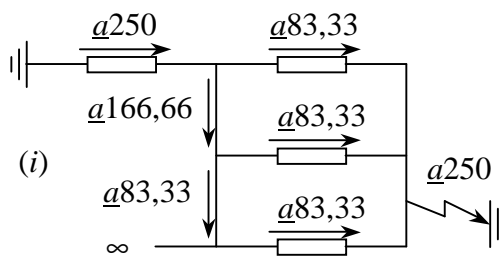
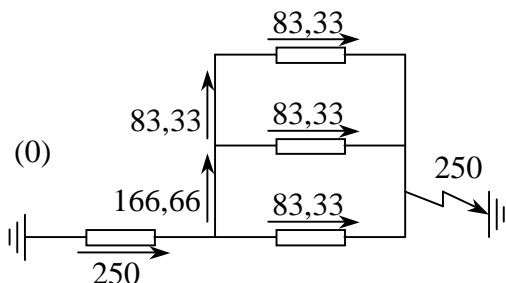
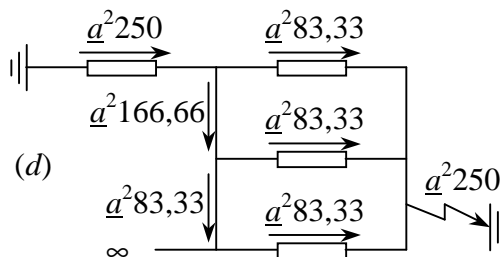
$$\underline{I}_C = \underline{a} \underline{I}_d + \underline{a}^2 \underline{I}_i + \underline{I}_0 = (\underline{a} + \underline{a}^2 + 1) \underline{I}_d = 0.$$

Ekvivalentne šeme sistema po fazama i simetričnim komponentama (d, i, 0) prikazane su na sl. 3.13b.

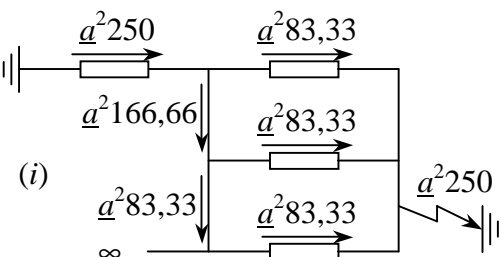
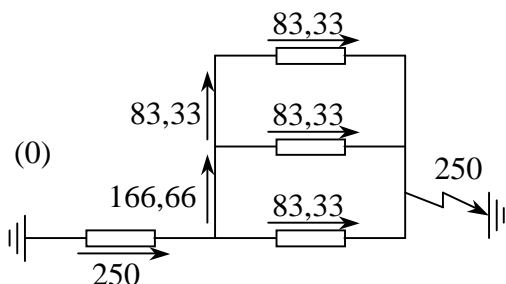
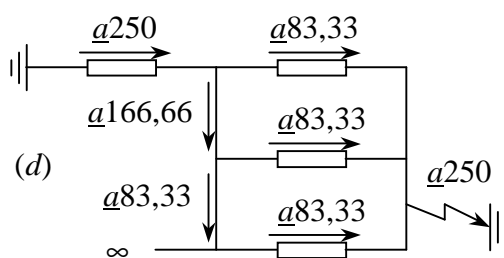
- faza (A)



- faza (B)

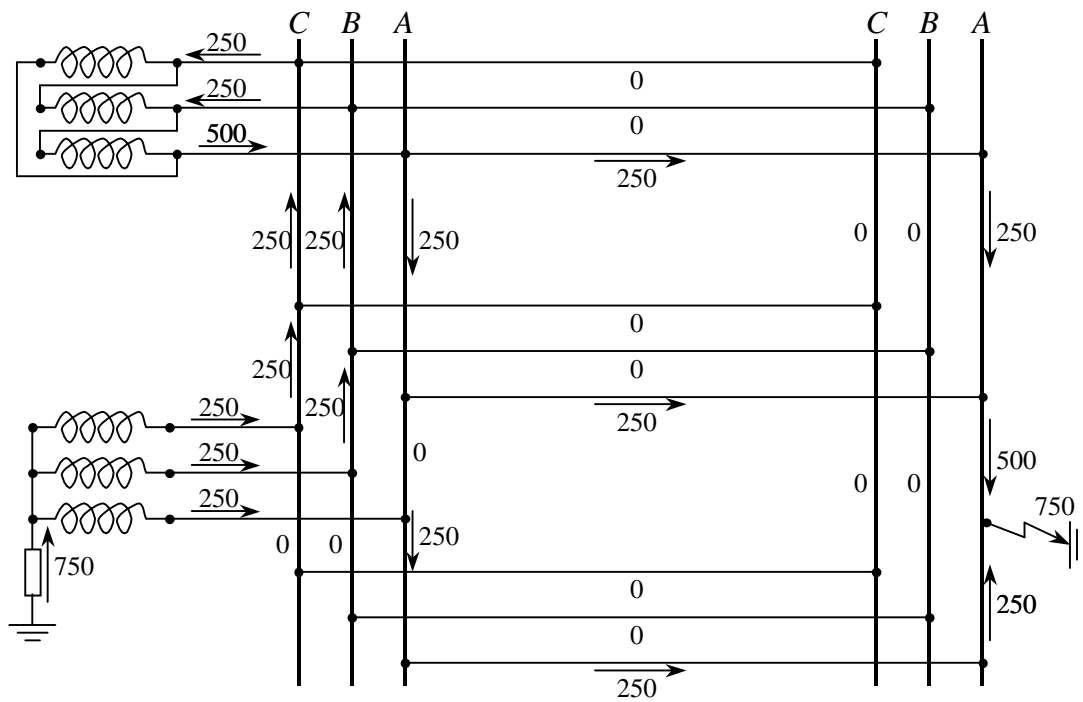


- faza (C)



Sl. 3.13b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 3.13a po fazama (A, B, C) i simetričnim komponentama (d, i, 0)

Direktnim sabiranjem pojedinih komponenata struja za svaku fazu i svako mesto u sistemu sa prethodnih slika, lako se nalaze ukupne fizičke struje. Raspodela struja predstavljena je na sl. 3.13c.



Sl. 3.13c Raspodela struja po fazama elemenata razvodne stanice sa sl. 3.13a

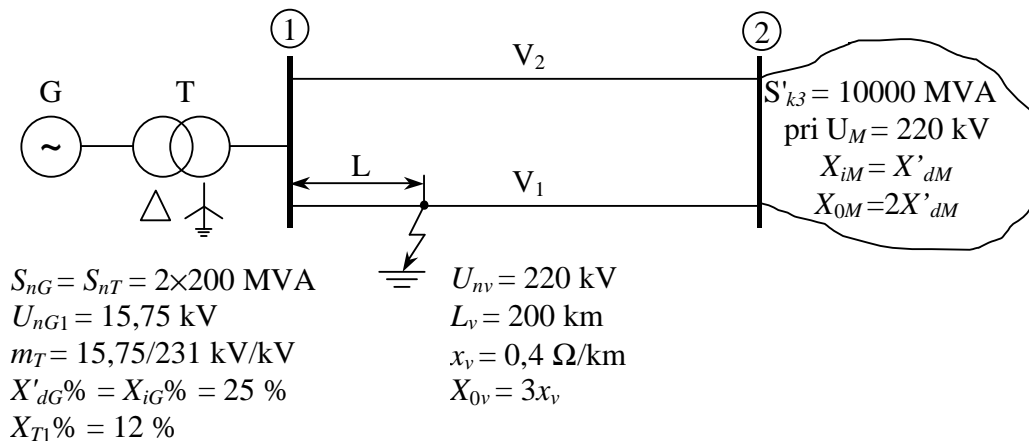




**Zadatak 3.14**

Na kom rastojanju  $L$  od sabirnica 1 na vodu  $V_1$  sistema sa sl. 3.14a bi trebalo da se desi jednofazni kratki spoj da bi intenzitet tranzijentne struje kvara dostigao ekstremnu vrednost. O kom ekstremumu se radi?

Napomena: Za vrednost napona na mestu kvara, pre kvara, uzeti nominalni napon voda.



Sl. 3.14a Monofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.14

Rešenje:

Impedanse sistema svedene na naponski nivo 220 kV su:

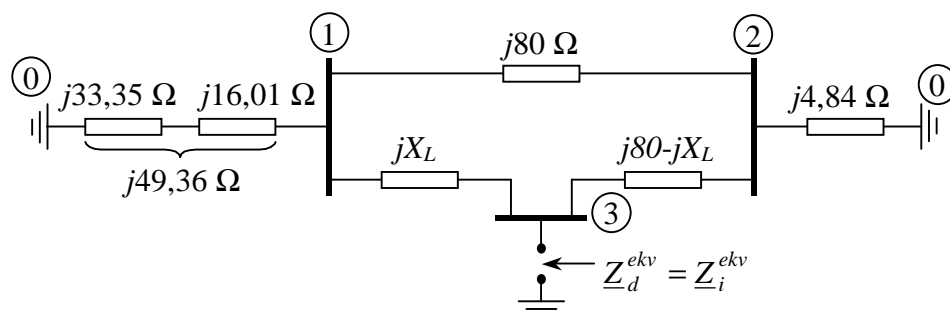
$$X'_G = \frac{X'_G\% U_{nG}^2}{100 S_{nG} m_T^2} = \frac{25 \cdot 15,75^2 \cdot 231^2}{100 \cdot 2 \cdot 200 \cdot 15,75^2} = 33,35 \text{ } \Omega;$$

$$X_T = \frac{X_T\% U_{nT}^2}{100 S_{nT}} = \frac{12 \cdot 231^2}{100 \cdot 2 \cdot 200} = 16,01 \text{ } \Omega;$$

$$X_v = x_v L_v = 0,4 \cdot 200 = 80 \text{ } \Omega; \quad X_{0v} = 3X_v = 240 \text{ } \Omega;$$

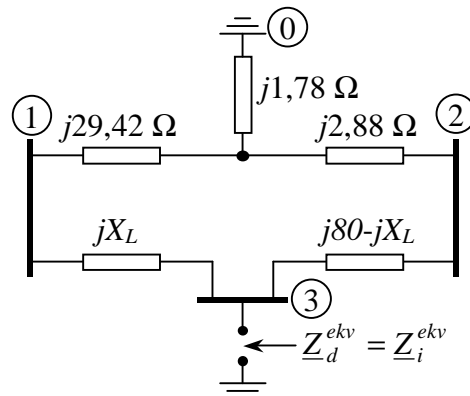
$$X_M = \frac{U_M^2}{S'_{k3}} = \frac{220^2}{10000} = 4,84 \text{ } \Omega; \quad X_{0M} = X_M = 9,68 \text{ } \Omega.$$

Ekvivalentna šema sistema direktnog i inverznog redosleda data je na sl. 3.14b.



Sl. 3.14b Ekvivalentna šema direktnih (inverznih) impedansi sistema sa sl. 3.14a

Transfiguracijom trougla 0-1-2 sa sl. 3.14b u zvezdu dobija se šema sa sl. 3.14c.

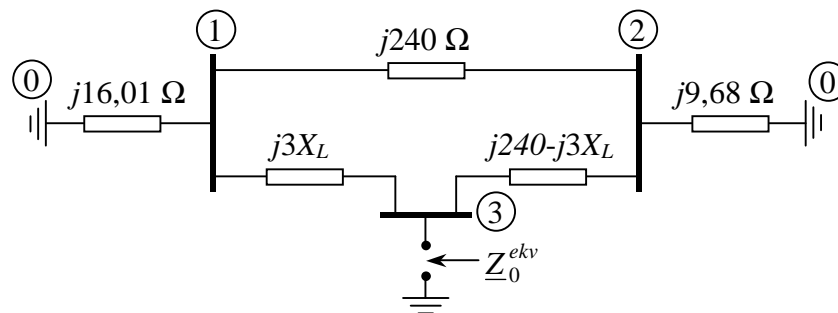


Sl. 3.14c Ekvivalentna šema sistema direktnih impedansi posle transfiguracije trougla 0-1-2 na sl. 3.14b u zvezdu

Ekvivalentna impedansa direktnog i inverznog redosleda u funkciji od induktivnog otpora dela voda nepoznate dužine  $L$  sa sl. 3.14c je:

$$\underline{Z}_d^{ekv} = j \frac{(29,42 + X_L) \cdot (82,88 - X_L)}{29,42 + X_L + 82,88 - X_L} + j1,78 = j(-0,0089X_L^2 + 0,476X_L + 23,49) = \underline{Z}_i^{ekv}.$$

Ekvivalentna šema sistema nultog redosleda data je na sl. 3.14d.

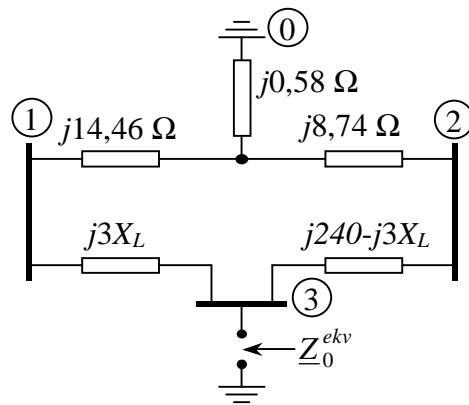


Sl. 3.14d Ekvivalentna šema nultih impedansi sistema sa sl. 3.14a

Transfiguracijom trougla 0-1-2 sa sl. 3.14d u zvezdu dobija se šema na sl. 3.14e:

Ekvivalentna impedansa nultog redosleda u funkciji od reaktanse dela voda nepoznate dužine  $L$  je:

$$\underline{Z}_0^{ekv} = j \frac{(14,46 + 3X_L) \cdot (248,74 - 3X_L)}{14,46 + 3X_L + 248,74 - 3X_L} + j0,58 = j(-0,0342X_L^2 + 2,67X_L + 14,25).$$



Sl. 3.14e Ekvivalentna šema nulnih impedansi posle transfiguracije trougla 0-1-2 sa sl. 3.14d u zvezdu

Struja jednofaznog kratkog spoja je onda:

$$\underline{I}_{k1Z} = 3 \cdot \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}},$$

odnosno posle zamene prethodnih izraza za  $\underline{Z}_d^{ekv}$ ,  $\underline{Z}_i^{ekv}$  i  $\underline{Z}_0^{ekv}$  dobija se izraz, koji je funkcija od veličine  $X_L$ .

$$\begin{aligned} \underline{I}_{k1Z} &= 3 \cdot \frac{U_{fr}}{2 \cdot j(-0,0089X_L^2 + 0,476X_L + 23,49) + j(-0,0342X_L^2 + 2,67X_L + 14,25)} = \\ &= 3 \cdot \frac{U_{fr}}{j(-0,052X_L^2 + 3,622X_L + 61,23)}, \end{aligned}$$

Nalaženje ekstremne vrednosti modula struje  $I_{k1Z}$  svodi se na nalaženje ekstremne vrednosti modula imenioca u izrazu za struju  $I_{k1Z}$ , izjednačavanjem sa nulom njegovog prvog izvoda po  $X_L$ :

$$\frac{\partial(-0,052X_L^2 + 3,622X_L + 61,23)}{\partial X_L} = 0,$$

odakle je:

$$-2 \cdot 0,052X_L + 3,622 = 0,$$

odnosno:

$$X_L = \frac{3,622}{2 \cdot 0,052} = 34,827 \Omega.$$

Pošto se ekstremna vrednost modula imenioca dobija za  $X_L = 34,827 \Omega$ , to je tražena dužina voda:

$$L = \frac{X_L}{x_v} = \frac{34,827}{0,4} = 87,067 \text{ km.}$$

Imajući u vidu znak člana uz  $X_L^2$  u imeniocu izraza za  $I_{k1Z}$ , za kvar koji se desio na rastojanju  $L = 87,067$  km od sabirnica 1 ima se maksimalna vrednost modula imenioca u izrazu za struju kvara, odnosno minimalna vrednost modula struje kvara.

Struja jednofaznog kratkog spoja za kvar na rastojanju  $L = 87,067$  km od sabirnica 1 je onda:

$$\underline{I}_{k1Z}^{min} = 3 \cdot \frac{220/\sqrt{3}}{j(-0,052 \cdot 34,827^2 + 3,622 \cdot 34,827 + 61,23)} = -j3,0655 \text{ kA.}$$

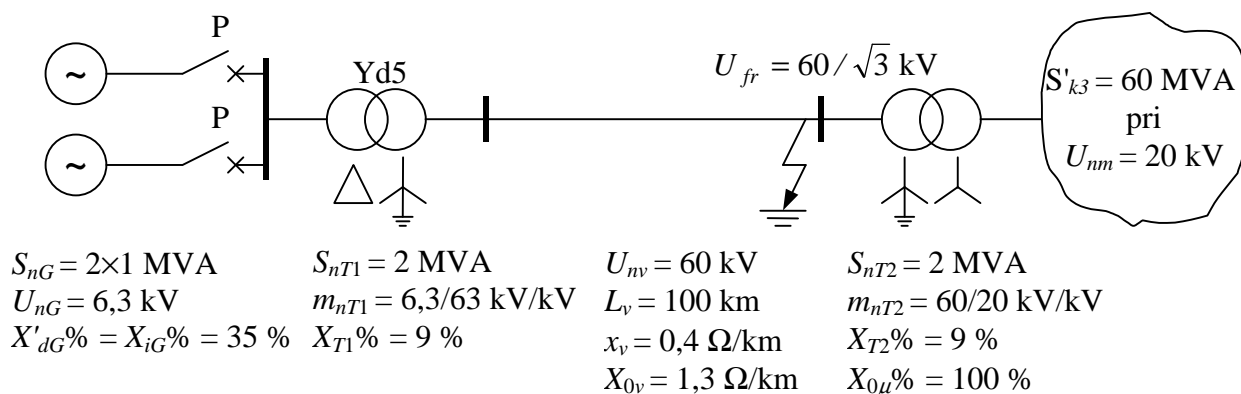
□

**Zadatak 3.15**

Za dati trofazni, monofazno prikazani sistem na sl. 3.15a ispitati da li će u slučaju jednofaznog kratkog spoja na kraju voda doći do isključenja generatorskih prekidača P (kao jedinih sa te strane kvara) ako su prekostrujni releji, priključeni na sekundare strujnih transformatora (100/5 A/A) u sve tri faze podešeni da reaguju tek na struje koje odgovaraju primarnim strujama većim za 20 % od nominalnih struja generatora.

Radi dobijanja najmanjih struja pri kratkom spoju, pretpostaviti praktično neopterećene mašine (tranzijentnu direktnu, a time i približno i inverznu reaktansu mreže naći iz zadatog udela u tranzijentnoj trofaznoj snazi kratkog spoja na sabirnicama i nominalnog napona na njima).

Svi podaci o elementima sistema, neophodni za proračune, dati su ispod sl. 3.15a.



Sl. 3.15a Monofazna šema i parametri elemenata sistema iz zadatka 3.15

Rešenje:

Direktna (inverzna) reaktansa jednog generatora svedena na stranu voda gde se dogodio kvar je:

$$X'_{G1} = \frac{X'_{dG}\%}{100} \frac{U_{nG1}^2}{S_{nG1}} \left( \frac{1}{m_{T1}} \right)^2 = \frac{35}{100} \frac{6,3^2}{1} \left( \frac{63}{6,3} \right)^2 = 1389,15 \Omega.$$

Reaktansa transformatora T<sub>1</sub> posmatrana sa strane višeg napona je:

$$X_{T1} = \frac{X_{T1}\%}{100} \frac{U_{nT1}^2}{S_{nT1}} = \frac{9}{100} \frac{63^2}{2} = 178,605 \Omega.$$

Direktna reaktansa voda je:

$$X_v = Lx_v = 100 \cdot 0,4 = 40 \Omega.$$

Nulta reaktansa voda je:

$$X_{0v} = Lx_{0v} = 100 \cdot 1,3 = 130 \Omega.$$

Reaktansa transformatora T<sub>2</sub> posmatrana sa mesta kvara (sa strane višeg napona) je:

$$X_{T2} = \frac{X_{T2} \%}{100} \frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}} = \frac{9}{100} \frac{60^2}{2} = 162 \Omega.$$

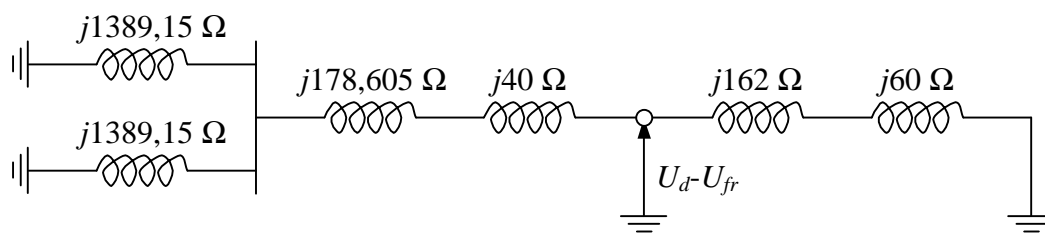
Reaktansa magnećenja transformatora  $T_2$  je:

$$X_{0\mu} = \frac{X_{0\mu} \%}{100} \frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}} = \frac{100}{100} \frac{60^2}{2} = 1800 \Omega.$$

Reaktansa mreže svedena na stranu kvara je:

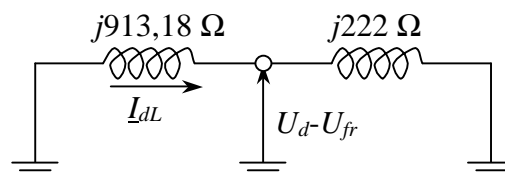
$$X_m = \frac{U_{nm}^2}{S'_{k3}} m_{T2}^2 = \frac{20^2}{60} \left( \frac{60}{20} \right)^2 = 60 \Omega.$$

Na osnovu sračunatih podataka mogu se nacrtati ekvivalentne šeme simetričnih komponenta za direktni, inverzni i nulti sistem. Ekvivalentna šema inverznog sistema identična je sa ekvivalentnom šemom direktnog sistema pošto su im reaktanse elemenata iste. Ekvivalentna šema direktnog (inverznog) sistema prikazana je na sl. 3.15b.



Sl. 3.15b Ekvivalentna šema impedansi direktnog (inverznog) redosleda sistema sa sl. 3.15a

Sažimanjem reaktansi dobija se ekvivalentna jednostavnija šema prikazana na sl. 3.15c, odakle se lako nalaze direktna (inverzna) reaktansa sistema posmatrana odočno sa mesta kvara.

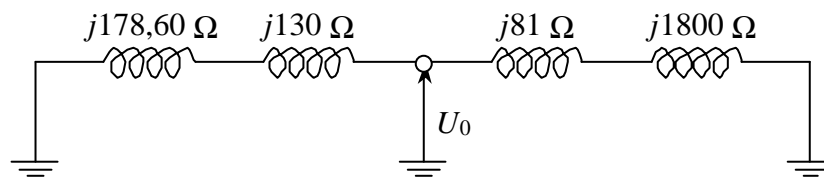


Sl. 3.15c Ekvivalentna šema sistema direktnih (inverznih) impedansi posle ekvivalentovanja paralelnih i rednih elemenata na sl. 3.15b

Ona iznosi:

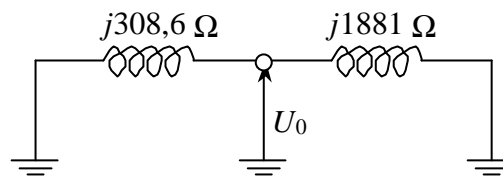
$$\underline{Z}_d^{ekv} = \underline{Z}_i^{ekv} = \frac{j913,18 \cdot j222}{j913,18 + j222} = j178,8 \Omega.$$

Homopolarna (nulta) ekvivalentna šema sistema ima izgled kao na sl. 3.15d.



Sl. 3.15d Ekvivalentna šema nultih impedansi za sistem sa sl. 3.15a

Prostija šema sistema nultih impedansi, dobijena ekvivalentovanjem impedansi rednih elemenata sa sl. 3.15d, prikazana je na sl. 3.15e, odakle je:



Sl. 3.15e Ekvivalentna šema nultih impedansi, posle ekvivalentovanja rednih elemenata sa sl. 3.15d

$$\underline{Z}_0^{ekv} = \frac{j308,60 \cdot j1881}{j308,60 + j1881} = j265 \Omega.$$

Nulta, direktna i inverzna struja jednofaznog kratkog spoja na mestu kvara su jednake i iznose:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_d = \underline{I}_i = \frac{U / \sqrt{3}}{\underline{Z}_0^{ekv} + \underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} = \frac{60/1,73}{j265 + 2 \cdot j178,8} = -j55,7 \text{ A}.$$

Direktna komponenta struje kratkog spoja koja teče od strane generatora nalazi se iz jednačine:

$$\underline{Z}_d^{ekv} \cdot \underline{I}_d = \underline{Z}_{dL} \cdot \underline{I}_{dL},$$

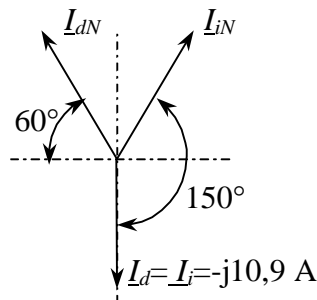
odakle je

$$\underline{I}_{dL} = \frac{\underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d}{\underline{Z}_{dL}} = \frac{j178,8 \cdot (-j55,7)}{j913,18} = -j10,9 \text{ A}.$$

Preračunavanjem prethodno izračunate vrednosti struje na stranu nižeg napona dobija se da je njen moduo jednak:

$$I_{dN} = I_{iN} = \frac{1}{6,3/63} \cdot 10,9 = 109 \text{ A}.$$

Sprega transformatora  $T_1$  je Yd5. Znači, fazna struja (napon) na strani nižeg napona kasni za  $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$  u odnosu na faznu struju (napon) višenaponske strane. Na strani višeg napona fazni stavovi direktne i inverzne struje poklapaju se. Na niskonaponskoj strani njihov međusobni položaj biće kao na sl. 3.15f, ( $I_{dN}$  kasni za  $I_d$  za  $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$ , a  $I_{iN}$  prednjači ispred  $I_i$  za  $150^\circ$ ).



Sl. 3.15f Fazni stavovi direktne i inverzne struje na niženaponskoj strani

Direktna komponenta struje sa strane nižeg napona je:

$$\underline{I}_{dN} = -I_{dN} \cos 60^\circ + jI_{dN} \sin 60^\circ = (-54,5 + j94,5) \text{ A}.$$

Inverzna komponenta struje sa strane nižeg napona je:

$$\underline{I}_{iN} = I_{iN} \cos 60^\circ + jI_{iN} \sin 60^\circ = (54,5 + j94,5) \text{ A}.$$

Namotaj nižeg napona transformatora  $T_1$  spregnut je u trougao pa se nulte komponente struje zatvaraju u njemu samom.

Struja koja će teći kroz fazu A na niženaponskoj strani kada se na strani višeg napona dogodio jednofazni kratki spoj je:

$$\underline{I}_{AN} = \underline{I}_{dN} + \underline{I}_{iN} = j189 \text{ A}.$$

Struja u fazi B na strani nižeg napona je:

$$\underline{I}_{BN} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{dN} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{iN} = 0 \text{ A}.$$

Struja u fazi C na strani nižeg napona je:

$$\underline{I}_{CN} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{dN} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{iN} = -j189 \text{ A}.$$

Nominalna struja generatora uvećana za 20 % je:

$$1,2 \cdot I_{nG} = 1,2 \cdot \frac{1000}{3 \cdot (6,3/\sqrt{3})} = 110 \text{ A}.$$

Kako je  $189/2 = 94,5 \text{ A} < 110 \text{ A}$  to neće doći do isključenja generatorskih prekidača.

□



**Zadatak 3.16**

a) Izračunati procentualnu vrednost reaktanse  $X_{12}\%$  tronamotajnog transformatora sa sl. 3.16a tako da snaga trofaznog tranzijentnog kratkog spoja na strani 10 kV pri radnom naponu 10,5 kV ne pređe 200 MVA, koliko izdržava izabrana oprema 10 kV.

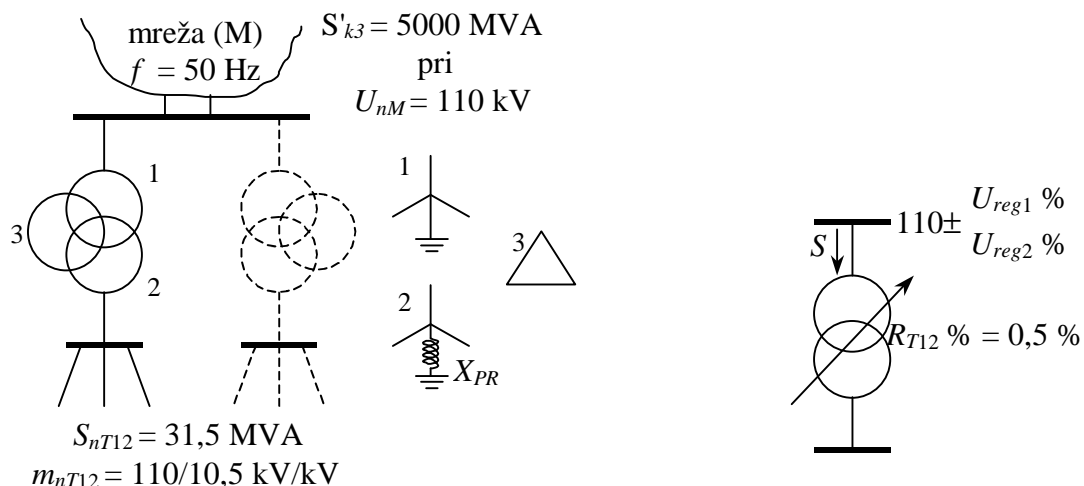
b) Izračunati niskoomsku reaktansu prigušnice priključene u zvezdište sekundara transformatora, tako da tranzijentna struja jednofaznog kratkog spoja na sabirnicama 10 kV ne pređe 300 A, ako su rasipne reaktanse  $X_{13}\% = 18\%$  i  $X_{23}\% = 9\%$  računate za snagu 31,5 MVA (tercijer je manje snage), i ako je  $X_{iM} = X'_M$ , a  $X_{0M} = 2X'_M$ .

c) Kolika je struja zemljospoja na dalekovodu 10 kV, jednostrano napajanom iz naznačenog postrojenja, na udaljenosti 3 km, ako je  $x_v = 0,37 \Omega/\text{km}$ , a  $x_{0v} = 3x_v$ . Računati sa nominalnim naponom na mestu kvara, pre nastanka kvara. U obzir uzeti prigušnicu izračunatu u tač. b.

d) Proveriti da li je za slučaj zemljospoja na stubu udaljenom kao pod c) zadovoljen uslov po kome napon dodira za maksimalno vreme isključenja kvara ne sme da pređe 130 V, ako se radi o betonskim stubovima čiji otpor uzemljenja, odnosno rasprostiranja, zajedno sa prstenastim trakastim uzemljivačem na udaljenosti 1 m od temelja i dubini 0,5 m iznosi  $\rho_z (\Omega\text{m})/7 (\Omega)$  i ako je, zahvaljujući oblikovanju potencijala usled prstenastog uzemljivača, pad potencijala na prvom metru 28 % od napona stuba.

Dalekovod ima zaštitno uže Fe 50 mm<sup>2</sup> čiji je podužni otpor  $r_{ZU} = 3,5 \Omega/\text{km}$ , dok su rasponi  $a = 200 \text{ m}$ , a specifični i podužni otpor zemlje  $\rho_z = 100 \Omega\text{m}$  i  $r_z = \pi^2 f (\text{Hz}) \cdot 10^{-4} (\Omega/\text{km})$ .

e) Izračunati minimalni potreban opseg regulacije  $110 \pm \frac{U_{reg1}\%}{U_{reg2}\%}$ , ako se radi o regulacionom transformatoru, čiji primarni napon varira od 123 kV pri minimalnom opterećenju  $S = 5 \text{ MVA}$  uz  $\cos\phi = 0,9$ , do 100 kV pri maksimalnom opterećenju jednakom nominalnoj snazi uz  $\cos\phi = 0,93$ , i ako sekundarno treba postići pri maksimalnom opterećenju napon 10,5 kV, a pri minimalnom 10 kV. Otpor namotaja transformatora, shodno sl. 3.16b je 0,5 %.



Sl. 3.16a Monofazna šema postrojenja i osnovni podaci transformatora iz zadatka 3.16

Sl. 3.16b Osnovni podaci za proračun iz tačke e, zadatka 3.16

Rešenje:

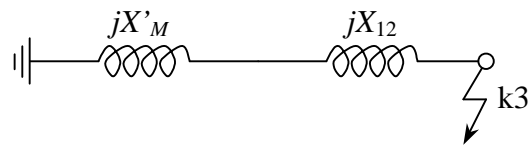
a) Kako snaga trofaznog tranzijentnog kratkog spoja ne sme da pređe 200 MVA na strani 10 kV pri radnom naponu 10,5 kV, to mora biti ispunjen uslov:

$$S'_{k3} = 200 \text{ MVA} \geq \sqrt{3}U_r I'_{k3} \rightarrow I'_{k3} \leq \frac{S'_{k3}}{\sqrt{3}U_r},$$

ili:

$$\frac{S'_{k3}}{\sqrt{3}U_r} \geq I'_{k3} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(X'_M + X_{12})}.$$

Ekvivalentna šema sistema impedansi direktnog redosleda onda ima izgled kao na sl. 3.16c.



Sl. 3.16c Ekvivalentna šema impedansi sistema direktnog redosleda iz zadatka 3.16

Dalje se dobija:

$$X_{12} \geq \frac{U_r^2}{S'_{k3}} - X'_M,$$

gde je tranzijentna reaktansa mreže, svedena na napon 10,5 kV:

$$X'_M = \frac{U_M^2}{S'_{k3(M)}} \left( \frac{1}{m_{T12}} \right)^2 = \frac{110^2}{5000} \frac{10,5^2}{110^2} = 0,022 \Omega,$$

tako da je reaktansa primar-sekundar, takođe svedena na napon 10,5 kV:

$$X_{12} \geq \frac{10,5^2}{200} - 0,022 = 0,529 \Omega,$$

odnosno, u %:

$$X_{12} \% = \frac{100 X_{12}}{U_n^2} S_{nT} = \frac{100 \cdot 0,529}{10,5^2} \cdot 31,5 = 15,12 \%.$$

b) Pošto su reaktanse rasipanja između tri namotaja transformatora, svedene na napon 10,5 kV:

$$X_{12} = 0,529 \Omega \text{ (sračunato pod a)};$$

$$X_{13} = \frac{X_{13} \% U_n^2}{100 S_{nT}} = \frac{18}{100} \frac{10,5^2}{31,5} = 0,63 \Omega ;$$

$$X_{23} = \frac{X_{23} \% U_n^2}{100 S_{nT}} = \frac{9}{100} \frac{10,5^2}{31,5} = 0,315 \Omega ,$$

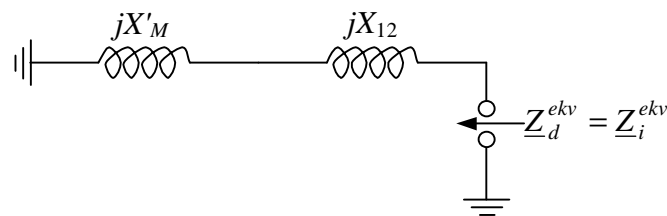
to su reaktanse ekvivalentne zvezde 3-namotajnog transformatora:

$$X_1 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{13} - X_{23}) = \frac{1}{2}(0,529 + 0,63 - 0,315) = 0,42 \Omega ;$$

$$X_2 = \frac{1}{2}(X_{12} - X_{13} + X_{23}) = \frac{1}{2}(0,529 - 0,63 + 0,315) = 0,107 \Omega ;$$

$$X_3 = \frac{1}{2}(-X_{12} + X_{13} + X_{23}) = \frac{1}{2}(-0,529 + 0,63 + 0,315) = 0,208 \Omega .$$

Ekvivalentna šema za sračunavanje direktne i inverzne ekvivalentne impedanse posmatrane sa mesta kvara, shodno sl. 3.16c data je na sl. 3.16d.

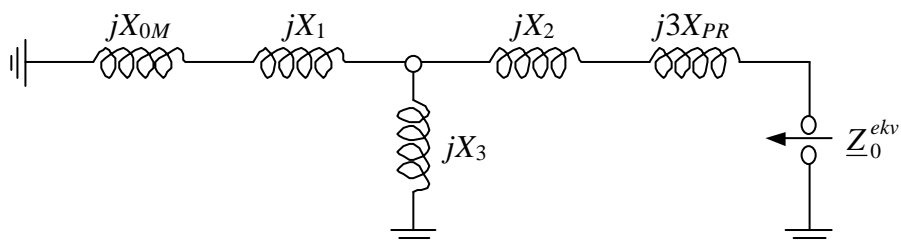


Sl. 3.16d Ekvivalentna šema za proračun ekvivalentne impedanse (direktne i inverzne) kvara iz zadatka 3.16

Sa poslednje šeme na sl. 3.16 dobija se:

$$\underline{Z}_d^{ekv} = \underline{Z}_i^{ekv} = j(X'_M + X_{12}) = j0,551 \Omega .$$

Ekvivalentna šema za sračunavanje nulte ekvivalentne impedanse posmatrane sa mesta kvara prikazana je na sl. 3.16e.



Sl. 3.16e Ekvivalentna šema za proračun ekvivalentne nulte impedanse kvara iz zadatka 3.16.

Sa šeme na sl. 3.16 dobija se:

$$\underline{Z}_0^{ekv} = j(3X_{PR} + X_2) + X_3 \| j(X_{Mo} + X_1).$$

Kako je  $X_{0M} = 2X'_M = 2 \cdot 0,022 = 0,044 \Omega$ , to je:

$$\underline{Z}_0^{ekv} = j(3X_{PR} + 0,107) + j0,208 \| j(0,044 + 0,42) = j(3X_{PR} + 0,251) \Omega.$$

Pošto struja zemljospoja na sabirnicama 10 kV ne sme da bude veća od 300 A, uslov je:

$$|\underline{I}_{k1Z}| = \left| \frac{3U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} \right| \leq 300 \text{ A},$$

odnosno:

$$\left| \frac{3 \cdot 10500}{j\sqrt{3}(2 \cdot 0,55 + 0,251 + 3X_{PR})} \right| \leq 300 \text{ A},$$

odakle se dobija vrednost reaktanse prigušnice za uzemljenje:

$$X_{PR} \geq 19,76 \Omega.$$

c) Zamenske šeme za sračunavanje ekvivalentnih impedansi posmatranih sa mesta kvara ostaju iste kao u tač. b, s tim što se na red sa sračunatim ekvivalentnim reaktansama vezuju direktna, odnosno nulta reaktansa deonice dalekovoda 10 kV dugačke 3 km, tako da je:

$$\underline{Z}_{d(c)}^{ekv} = \underline{Z}_{i(c)}^{ekv} = \underline{Z}_{d(b)}^{ekv} + jX_v = j(0,551 + 1,11) = j1,661 \Omega;$$

$$\underline{Z}_{0(c)}^{ekv} = \underline{Z}_{0(b)}^{ekv} + jX_{0v} = j(3X_{PR} + 0,251 + 3,33) = j62,86 \Omega,$$

gde je:

$$X_v = x_v L = 0,37 \cdot 3 = 1,11 \Omega;$$

$$X_{0v} = 3X_v = 3 \cdot 1,11 = 3,33 \Omega;$$

$$X_{PR} = 19,73 \Omega.$$

Struja zemljospoja na dalekovodu 10 kV, na udaljenosti 3 km od datog postrojenja je onda:

$$\underline{I}_{k1Z} = \frac{3U_{fr}}{\underline{Z}_{d(c)}^{ekv} + \underline{Z}_{i(c)}^{ekv} + \underline{Z}_{0(c)}^{ekv}} = \frac{3 \cdot 10000}{j\sqrt{3}(2 \cdot 1,661 + 62,86)} = -j261,71 \text{ A}, \text{ odnosno:}$$

$$|\underline{I}_{k1Z}| = 261,71 \text{ A}.$$

d) Otpor rasprostiranja stuba iznosi:

$$R_S = \frac{\rho_z}{7} = \frac{100}{7} = 14,286 \Omega .$$

Ako se sa oznakom “prim” označe veličine po rasponu, to je otpor zaštitnog užeta po rasponu

$$r'_{ZU} = 3,5 (\Omega/\text{km}) \cdot 0,2 (\text{km}/\text{rasponu}) = 0,7 \Omega/\text{rasponu} .$$

Podužni otpor zemlje ( $r_z$ ) je:

$$r_z = \pi^2 \cdot f (\text{Hz}) \cdot 10^{-4} (\Omega/\text{km}) = \pi^2 \cdot 50 \cdot 10^{-4} = 0,04935 \Omega/\text{km} ,$$

tako da je otpor zemlje po rasponu:

$$r'_z = 0,04935 (\Omega/\text{km}) \cdot 0,2 (\text{km}/\text{rasponu}) = 0,00987 \Omega/\text{rasponu} .$$

Koeficijent  $\alpha$  je onda:

$$\alpha = \sqrt{\frac{r'_{ZU} + r'_z}{R_S}} = \sqrt{\frac{0,7 + 0,00987}{14,286}} = 0,223 .$$

Napon stuba u kvaru ( $U_S$ ) može se izračunati kao:

$$U_S = I_Z Z_{ekv} ,$$

gde je  $I_Z$  ukupna struja zemljospoja za kvar na posmatranom mestu, a  $Z_{ekv}$  je ekvivalentni otpor lanca: zaštitno uže, stubovi, zemlja:

$$Z_{ekv} = \frac{r'_{ZU}}{2(1 - e^{-\alpha}) + \frac{r'_{ZU} + r'_z}{R_S}} ,$$

tako da je:

$$U_S = I_Z Z_{ekv} = 261,71 \cdot \frac{0,7}{2(1 - e^{-0,223}) + \frac{0,7 + 0,00987}{14,286}} = 408,27 \text{ V} .$$

Sada je konačno:

$$\Delta U = 0,28 \cdot U_S = 0,28 \cdot 408,27 = 114,3 \text{ V} < 130 \text{ V} = U_{\text{dod}}^{\text{dozv}} ,$$

pa se zaključuje da je napon dodira, odnosno kriterijum napona dodira na posmatranom stubu zadovoljen.

e) Prema uslovu zadatka važi relacija:

$$U_{z \max_{NN}} = \left( U_{VN} - \frac{P_{\max} R + Q_{\max} X}{U_{VN}} \right) \frac{10,5}{110 + U_{reg1}}$$

Kako je željena vrednost napona na niženaponskoj strani pri maksimalnom opterećenju,  $U_{z \max_{NN}} = 10,5 \text{ kV}$  (napon treba da je maksimalan kako bi i najudaljeniji potrošač imao kvalitetan napon), onda je na višenaponskoj strani napon  $U_{VN} = 100 \text{ kV}$ , tako da važi:

$$10,5 = \left( 100 - \frac{29,295 \cdot 1,92 + 11,578 \cdot 58,08}{100} \right) \frac{10,5}{110 + U_{reg1}},$$

gde je:

$$P_{\max} = S_n \cos \varphi = 31,5 \cdot 0,93 = 29,295 \text{ MW};$$

$$Q_{\max} = S_n \sin \varphi = 31,5 \cdot \sqrt{1 - 0,93^2} = 11,578 \text{ MVar};$$

$$R = \frac{R_{T12} \%}{100} \frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{0,5}{100} \frac{110^2}{31,5} = 1,92 \Omega;$$

$$X = \frac{X_{12} \%}{100} \frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{15,12}{100} \frac{110^2}{31,5} = 58,08 \Omega.$$

Kada se gornja jednačina reši po  $U_{reg1}$  dobija se:

$$U_{reg1} = -17,287 \text{ kV},$$

odnosno

$$U_{reg1} \% = \frac{U_{reg1}}{U_n} 100 = \frac{-17,287}{110} 100 = -15,715 \%,$$

Slično, iz uslova:

$$U_{z \min_{NN}} = \left( U_{VN \min} - \frac{P_{\min} R + Q_{\min} X}{U_{VN \min}} \right) \frac{10,5}{110 + U_{reg2}},$$

gde je:

$$U_{z \min_{NN}} = 10 \text{ kV},$$

željena vrednost napona na niženaponskoj strani pri minimalnom opterećenju iznosi:

$$U_{VN \min} = 123 \text{ kV}.$$

Takođe je:

$$P_{\min} = S_{\min} \cos \varphi_{\min} = 5 \cdot 0,9 = 4,5 \text{ MW};$$

$$\sin \varphi_{\min} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\min}} = 0,43588;$$
$$Q_{\min} = S_{\min} \sin \varphi_{\min} = 5 \cdot 0,43588 = 2,179 \text{ MVar},$$

pa se za vrednost napona  $U_{\text{reg2}}$  nalazi da je  $U_{\text{reg2}} = 17,996 \text{ kV}$ .

Tada je:

$$U_{\text{reg2}} \% = \frac{U_{\text{reg2}}}{U_n} 100 = \frac{U_{\text{reg2}}}{110} 100 = \frac{17,996}{110} 100 = 16,36 \%$$

Odavde se sagledava potreban nominalni opseg regulacije, pa se on može usvojiti da bude  $110 \pm 18 \%$ .



**Zadatak 3.17**

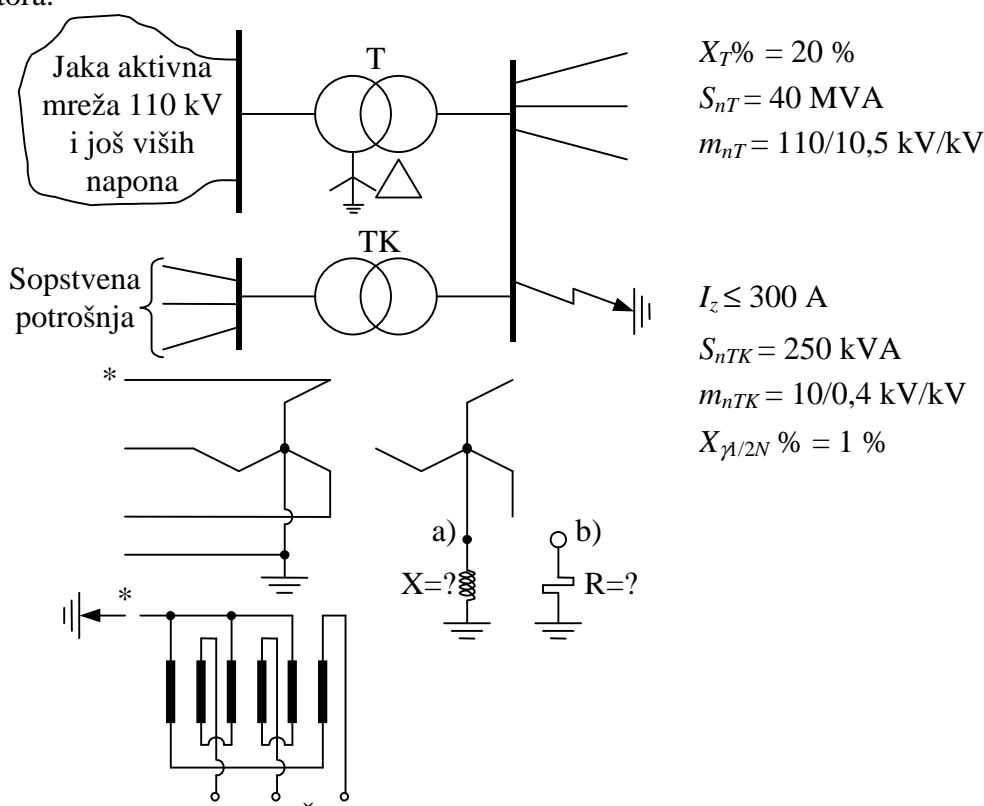
Koliku niskoomsku

- reaktansu  $X$  ili
- rezistansu  $R$

treba priključiti između zvezdišta višeg napona “kućnog transformatora” ( $T_K$ ) i uzemljenja u jednopolno prikazanoj TS 110/10 kV/kV na sl. 3.17a ako se želi ograničiti struja kvara između faze i zemlje (“struja zemljospoja”) na sabirnicama 10 kV (pa onda i u mreži 10 kV) na maksimalno 300 A. Svi neophodni podaci za proračune dati su na sl. 3.17a.

Napomene:

- Uticaj povišenog radnog napona pre kvara iznad nominalnog i jake mreže približno se kompenzuju pa se može računati sa nominalnim naponom i mrežom beskonačne snage.
- Zbog malih snaga kućnog transformatora i sopstvene potrošnje mogu se zanemariti njegova direktna i inverzna reaktansa u odnosu na odgovarajuće paralelne reaktanse (glavnog) transformatora.



Sl. 3.17a Šema i parametri sistema iz zadatka 3.17

Rešenje:

- Ekvivalentna šema sistema za direktni i inverzni redosled ima izgled kao na sl. 3.17b.

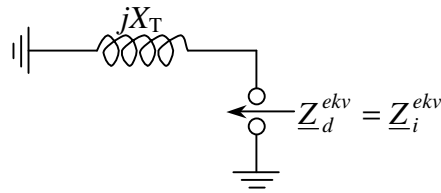
Kako je prema uslovu zadatka

$$X_{T\gamma/2} \gg X_T,$$

to je:

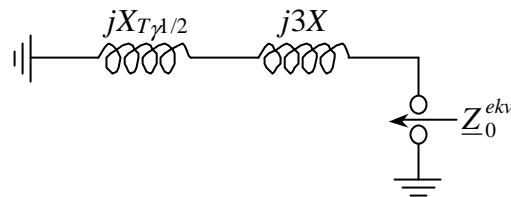
$$\underline{Z}_d^{ekv} = \underline{Z}_i^{ekv} = jX_T.$$





Sl. 3.17b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 3.17a za impedanse direktnog i inverznog redosleda

Ekvivalentna šema sistema sa sl. 3.17a za impedanse nultog redosleda, prikazana je na sl. 3.17c.



Sl. 3.17c Ekvivalentna šema sistema sa sl. 3.17a za impedanse nultog redosleda

Sa šeme ns sl. 3.17c je:

$$\underline{Z}_0^{ekv} = j(X_{T\gamma/2} + 3X),$$

gde je:

$$X_T = \frac{X_T \%}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{20}{100} \frac{10,5^2}{40} = 0,55 \Omega;$$

$$X_{T\gamma/2} = \frac{X_{T\gamma/2} \%}{100} \frac{U_{nTK}^2}{S_{nTK}} = \frac{1}{100} \frac{10^2}{0,25} = 4 \Omega.$$

Struja zemljospoja treba da je manja od 300 A, pa važi uslov:

$$|\underline{I}_Z| = \left| \frac{3U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} \right| \leq 300 \text{ A},$$

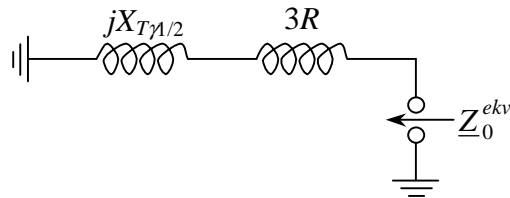
odnosno:

$$300 \geq 3 \frac{10000/\sqrt{3}}{|j0,55 \cdot 2 + j4 + j3X|} \rightarrow 3X \geq 52,64 \Omega,$$

odakle je

$$X \geq 17,55 \Omega.$$

b) Ekvivalentna šema za impedanse direktnog i inverznog redosleda ostaje ista kao u tač. a, a za impedanse nultog redosleda, prikazana je na sl. 3.17d.



Sl. 3.17d Ekvivalentna šema sistema impedansi nultog redosleda iz tač. b zadatka 3.17

Analogno, kao u proračunu reaktanse za uzemljenje u tač. a je:

$$|\underline{I}_Z| = \left| \frac{3U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} \right| = \left| \frac{3 \cdot 10000 / \sqrt{3}}{2 \cdot j0,55 + j4 + 3R} \right| \leq 300 \text{ A},$$

odakle je

$$\sqrt{(3R)^2 + 5,1^2} \geq \frac{\sqrt{3} \cdot 10000}{300} = 57,66,$$

odnosno

$$(3R)^2 \geq 57,66^2 - 5,1^2,$$

pa se konačno dobija:

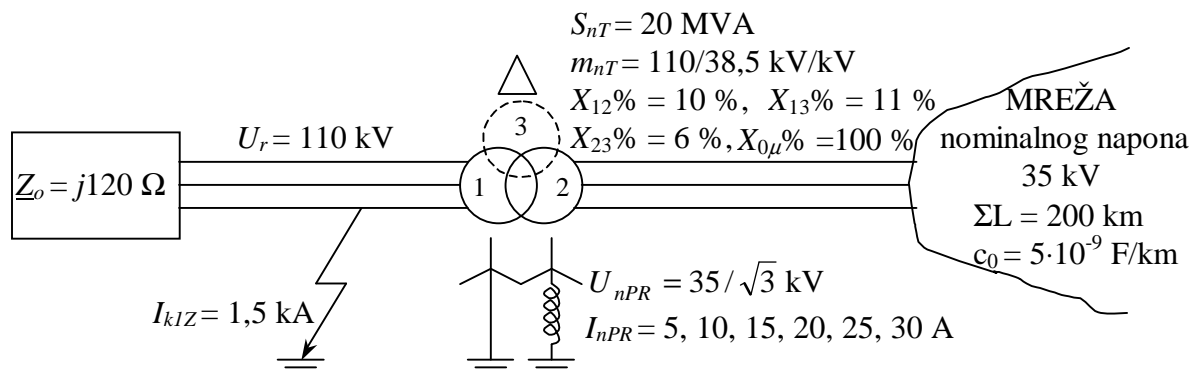
$$R \geq 19,44 \Omega.$$

□

**Zadatak 3.18**

Koliki je u sistemu prikazanom na sl. 3.18a (sa parametrima elemenata datim na toj slici) napon zvezdišta 35 kV namotaja transformatora u vreme jednofaznog kratkog spoja na vodu nominalnog napona 110 kV, ako tranzijentna struja jednofaznog kratkog spoja iznosi 1,5 kA i ako je Petersenova prigušnica, priključena na sekundarno zvezdište transformatora, podešena na prvu nižu vrednost svojih nominalnih struja u odnosu na struju zemljospoja 35 kV mreže bez Petersenovog kalema

- za slučaj da je transformator bez tercijera,
- za slučaj transformatora sa tercijerem, spregnutim u trougao.



Sl. 3.18a Trofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.18

Rešenje:

Reaktanse između pojedinih namotaja i reaktansa magnećenja transformatora svedene na napon 110 kV su:

$$X_{12} = \frac{X_{12} \% U_{nT}^2}{100 S_{nT}} = \frac{10 \cdot 110^2}{100 \cdot 20} = 60,5 \Omega ;$$

$$X_{13} = \frac{X_{13} \% U_{nT}^2}{100 S_{nT}} = \frac{11 \cdot 110^2}{100 \cdot 20} = 66,55 \Omega ;$$

$$X_{23} = \frac{X_{23} \% U_{nT}^2}{100 S_{nT}} = \frac{6 \cdot 110^2}{100 \cdot 20} = 36,30 \Omega ;$$

$$X_{0\mu} = \frac{X_{\mu} \% U_{nT}^2}{100 S_{nT}} = \frac{100 \cdot 110^2}{100 \cdot 20} = 605 \Omega .$$

Odgovarajuće reaktanse ekvivalentne zvezde tronamotajnog transformatora su:

$$X_1 = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{13} - X_{23}) = \frac{1}{2} (60,5 + 66,55 - 36,30) = 45,375 \Omega ;$$

$$X_2 = \frac{1}{2} (X_{23} + X_{12} - X_{13}) = 15,125 \Omega ;$$

$$X_3 = \frac{1}{2} (X_{13} + X_{23} - X_{12}) = 21,175 \Omega .$$

Struja zemljospoja u 35 kV-noj mreži bez Petersenove prigušnice je:

$$\underline{I}_z = +j\sqrt{3}U_n c_0 \omega \Sigma L = j1,73 \cdot 35 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 314 \cdot 200 = j19 \text{ A.}$$

Petersenova prigušnica, prema uslovu zadatka, treba da se podesi na  $I_{nPR} = 15 \text{ A}$ , pa je reaktansa prigušnice svedena na stranu 35 kV:

$$X_{PR35} = \frac{U_{nPR}}{I_{nPR}} = \frac{35/\sqrt{3}}{15} 1000 = 1350 \Omega,$$

ili, svedena na stranu 110 kV:

$$X_{PR35} = 1350 \left( \frac{110}{38,5} \right)^2 = 11020 \Omega.$$

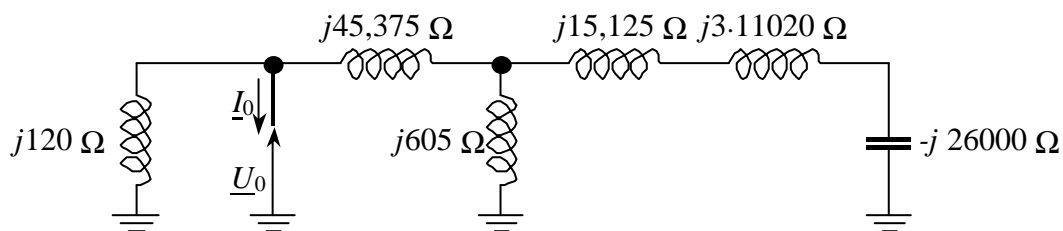
a) Za slučaj bez tercijara kapacitivna reaktansa nultog redosleda mreže 35 kV je:

$$\frac{1}{\omega c_0 \Sigma L} = \frac{1}{314 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 200} = 3183,1 \Omega,$$

ili svedena na stranu 110 kV:

$$3183,1 \left( \frac{110}{38,5} \right)^2 = 26000 \Omega.$$

Ekvivalentna šema sistema impedansi nultog redosleda ima izgled prikazan na sl. 3.18b.



Sl. 3.18b Ekvivalentna šema mreže impedansi nultog redosleda sistema sa sl. 3.18a, za slučaj da je transformator bez tercijera

Sažimanjem redno i paralelno vezanih reaktansi na šemi sa sl. 3.18b, dobijaju se ekvivalentne šeme na sl. 3.18c.

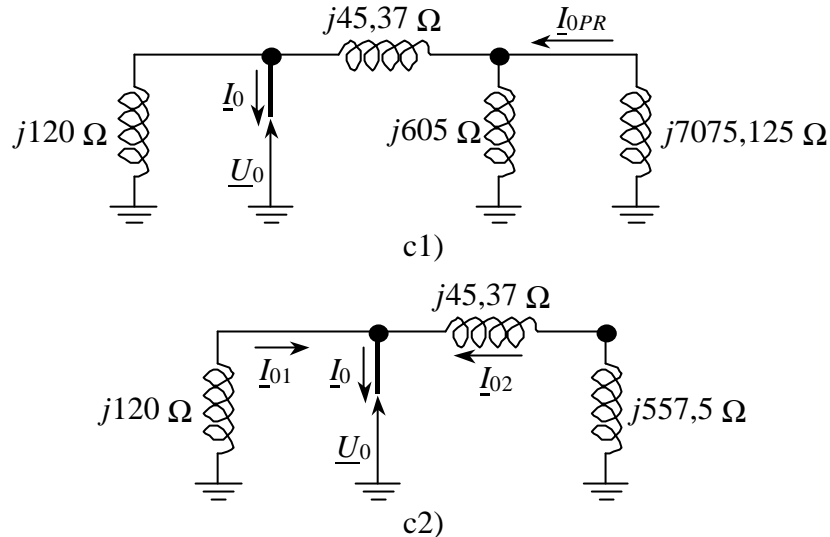
Ako se usvoji da je struja  $I_0$  uslovno u faznoj osi biće:  $I_0 = \frac{1}{3} I_{k1Z}$ , tj.  $I_0 = 500 \text{ A}$ , pa je shodno sl. 3.18c:

$$\underline{I}_{01} + \underline{I}_{02} = 500 \text{ A};$$

$$j120 \cdot \underline{I}_{01} = j(45,37 + 557,5) \cdot \underline{I}_{02}.$$

Iz gornje dve jednačine dobija se struja  $\underline{I}_{02}$ , koja iznosi:

$$\underline{I}_{02} = 83 \text{ A}.$$



Sl. 3.18c Ekvivalentne mreže nultog redosleda posle sažimanja rednih (c1) i paralelnih elemenata (c2), na sl. 3.18b

Struja  $\underline{I}_{0pr}$  se shodno šemama sa sl. 3.18c, može odrediti iz jednačine:

$$j7075,125 \cdot \underline{I}_{0PR} = j557,5 \cdot \underline{I}_{02},$$

odakle je:

$$\underline{I}_{0PR} = 6,54 \text{ A}.$$

Traženi napon zvezdišta transformatora za vreme kvara biće:

$$\underline{U} = j3 \cdot X_{PR} \cdot \underline{I}_{0PR} \left( \frac{38,5}{110} \right) = j3 \cdot 11020 \cdot 6,54 \cdot \left( \frac{38,5}{110} \right) = j75500 \text{ V} = j75,5 \text{ kV}.$$

b) Ekvivalentna šema sistema nultog redosleda za slučaj da transformator raspolaže sa tercijerom prikazana je na sl. 3.18d.

Sukcesivnim uprošćavanjem dobija se odgovarajuća pojednostavljena šema sistema, prikazana na sl. 3.18e.

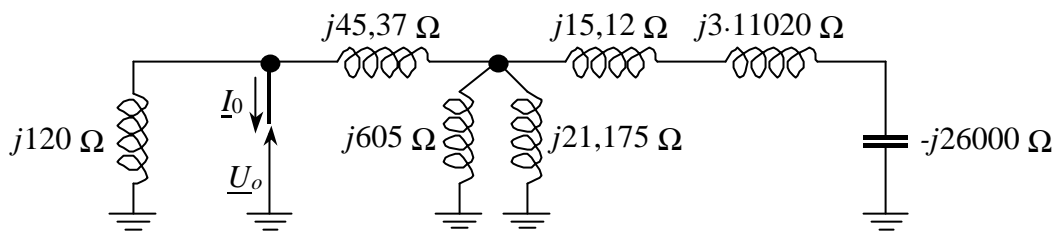
Iz jednačina:

$$\underline{I}_{01} + \underline{I}_{02} = 500 \text{ A};$$

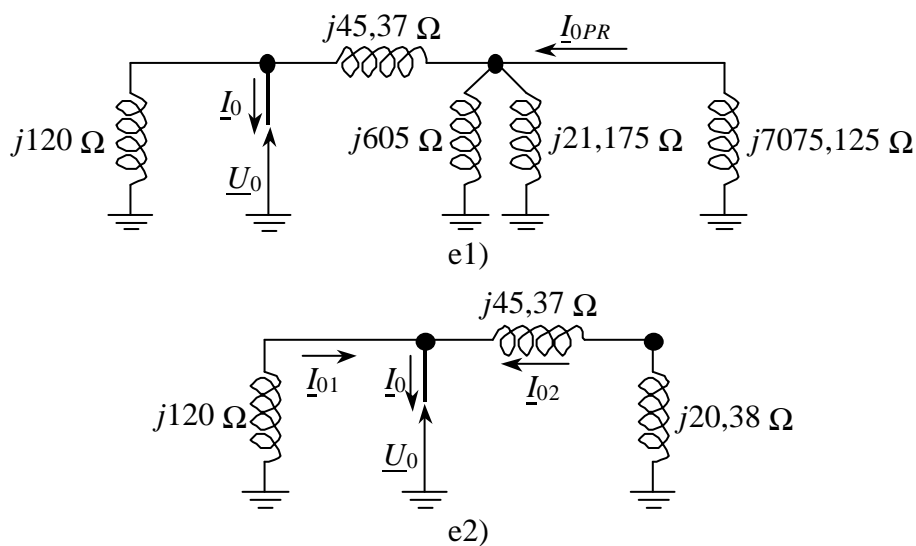
$$j120 \cdot \underline{I}_{01} = j(45,37 + 20,38) \cdot \underline{I}_{02};$$

dobija se vrednost za struju kvara:

$$\underline{I}_{02} = 324 \text{ A}.$$



Sl. 3.18d Ekvivalentna šema impedansi sistema nultog redosleda za slučaj da transformator iz zadatka 3.19 ima tercijer spregnut u trougao



Sl. 3.18e Ekvivalentne šeme sistema nultih impedansi sa sl. 3.18d pre (e1) posle sažimanja rednih i paralelnih elemenata (e2)

Struja prigušnice može se odrediti iz jednačine:

$$j7075,125 \cdot \underline{I}_{0PR} = j20,38 \cdot \underline{I}_{02} = j20,38 \cdot 324,$$

odakle je:

$$\underline{I}_{0PR} = 0,932 \text{ A}.$$

Traženi napon u zvezdištu transformatora za vreme kvara biće:

$$\underline{U}_N = j3 \cdot 11020 \cdot 0,932 \cdot \left( \frac{38,5}{110} \right) = j10780 \text{ V} = j10,78 \text{ kV}.$$

□

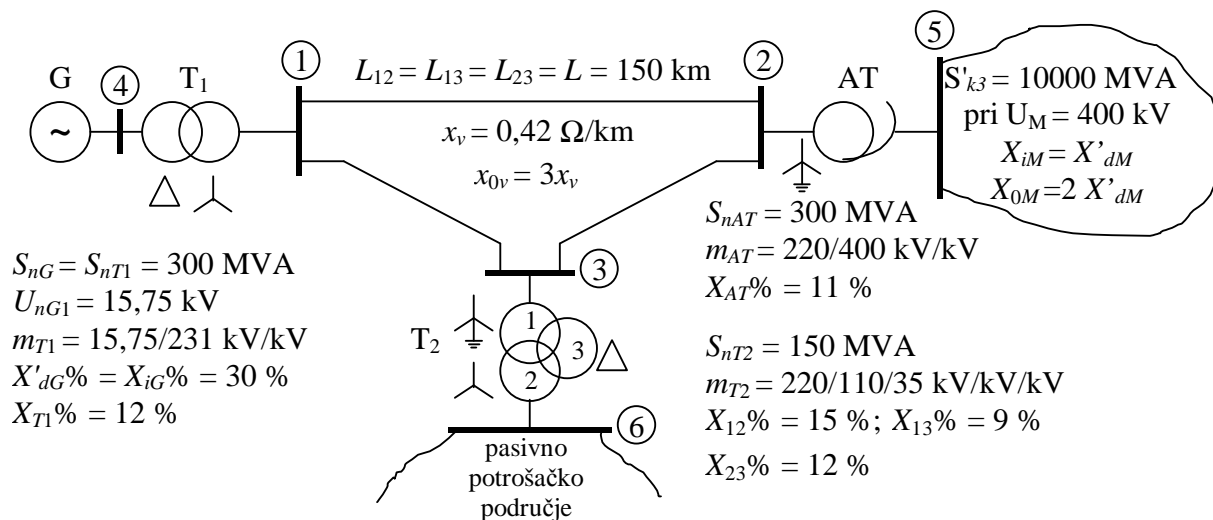
**Zadatak 3.19**

U elektroenergetskom sistemu, čiji su podaci dati na sl. 3.19a dolazi do jednofaznog kratkog spoja sa zemljom na sabirnicama 1.

a) Izračunati ukupnu struju jednofaznog kratkog spoja sa zemljom na sabirnicama 1 za slučaj izolovanog, a potom za slučaj direktno uzemljenog zvezdišta transformatora  $T_1$ .

b) Za slučaj izolovanog zvezdišta transformatora  $T_1$  izračunati napon tog zvezdišta, za vreme kvara.

c) Da li se zvezdište transformatora  $T_1$  može ostaviti izolovano? Obrazložiti odgovor.



Sl. 3.19a Monofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.19

Rešenje:

Proračun impedansi generatora, transformatora  $T_1$  i AT i vodova:

$$X'_{dG} = X_{iG} = \frac{X'_{dG} \% U_{nG}^2}{100 S_{nG}} \frac{1}{m_{T1}^2} = \frac{30}{100} \frac{15,75^2}{300} \frac{231^2}{15,75^2} = 53,36 \Omega;$$

$$X_{T1} = \frac{X_{T1} \% U_{nT}^2}{100 S_{nT}} = \frac{12}{100} \frac{231^2}{300} = 21,34 \Omega;$$

$$X_{v12} = X_{v13} = X_{v23} = X_v = x_v L = 0,42 \cdot 150 = 63 \Omega;$$

$$X_{0v12} = X_{0v13} = X_{0v23} = X_{0v} = 3X_v = 189 \Omega;$$

$$X'_{dM} = \frac{U_M^2 m_{AT}^2}{S'_{k3} 400^2} = \frac{400^2}{10000} \frac{220^2}{400^2} = 4,84 \Omega;$$

$$X_{0M} = 2X'_{dM} = 9,68 \Omega.$$

$$X_{AT} = \frac{X_{AT} \% U_{nT}^2}{100 S_{nT}} = \frac{11}{100} \frac{220^2}{300} = 17,75 \Omega$$

Proračun impedansi tronamotajnog transformatora  $T_2$ :

$$X_{12} = \frac{X_{12} \% U_{nT2}^2}{100 S_{nT2}} = \frac{15}{100} \frac{220^2}{150} = 48,4 \Omega ;$$

$$X_{13} = \frac{X_{13} \% U_{nT2}^2}{100 S_{nT2}} = \frac{9}{100} \frac{220^2}{150} = 29,04 \Omega ;$$

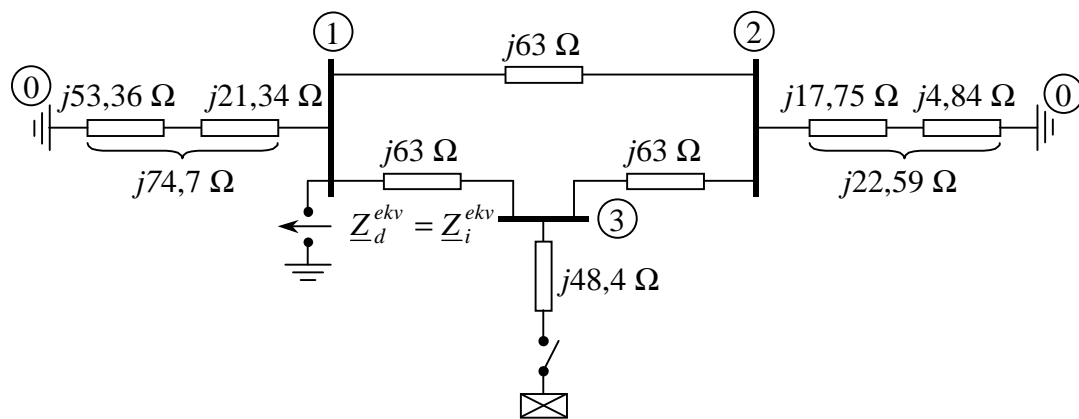
$$X_{23} = \frac{X_{23} \% U_{nT2}^2}{100 S_{nT2}} = \frac{12}{100} \frac{220^2}{150} = 38,72 \Omega ;$$

$$X_1 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{13} - X_{23}) = 19,36 \Omega ;$$

$$X_2 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{23} - X_{13}) = 29,04 \Omega ;$$

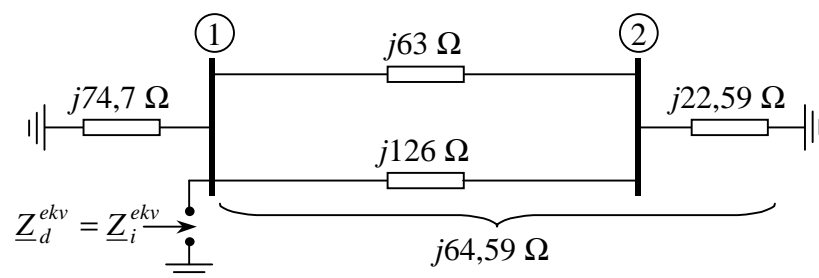
$$X_3 = \frac{1}{2}(X_{13} + X_{23} - X_{12}) = 9,68 \Omega .$$

Ekvivalentna šema sistema za direktni i inverzni redosled, data je na sl. 3.19b.



Sl. 3.19b Ekvivalentna šema impedansi direktnog (inverznog) redosleda za sistem sa sl. 3.19a

Sređivanjem prethodne šeme dobija se šema na sl. 3.19c.



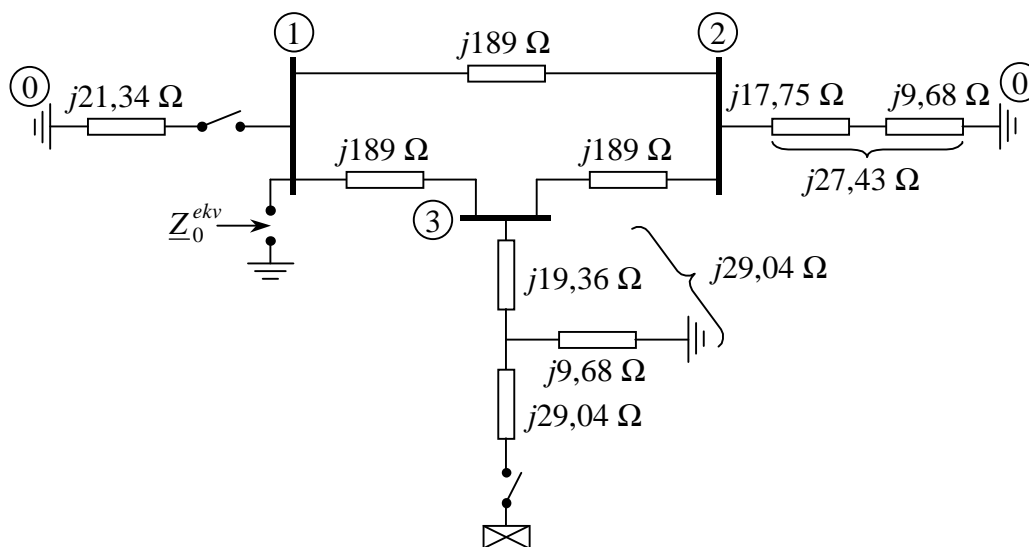
Sl. 3.19c Ekvivalentna šema impedansi direktnog (inverznog) redosleda posle sređivanja šeme sa sl. 3.19b

Konačno, ekvivalentna impedansa direktnog i inverznog redosleda je:



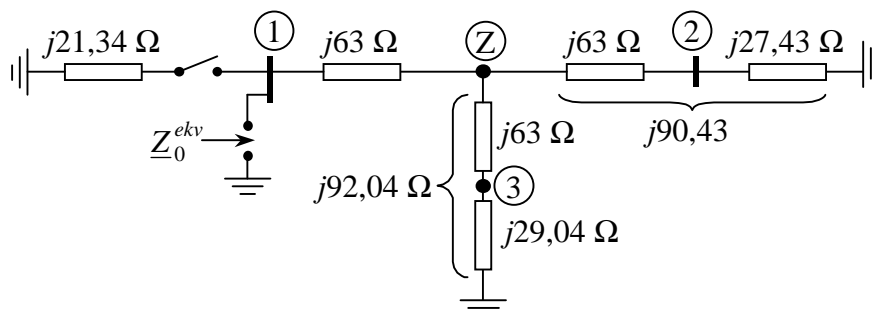
$$\underline{Z}_d^{ekv} = \underline{Z}_i^{ekv} = j \frac{74,7 \cdot 64,59}{74,7 + 64,59} = j34,64 \Omega.$$

Ekvivalentna šema za nulti redosled za slučaj izolovanog zvezdišta transformatora  $T_1$  data je na sl. 3.19d.



Sl. 3.19d Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda sistema sa sl. 3.19a, pri izolovanom zvezdištu transformatora  $T_1$

Ekvivalentovanjem trougla 1-2-3 sa sl. 3.19d u zvezdu, dobija se šema na sl. 3.19e.



Sl. 3.19e Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda posle transfiguracije trougla 1-2-3 sa sl. 3.19d u zvezdu 123Z.

Konačno, ekvivalentna impedansa nultog redosleda za slučaj izolovanog zvezdišta transformatora  $T_1$  je:

$$\underline{Z}_{0(iZ)}^{ekv} = j63 + j \frac{90,43 \cdot 92,04}{90,43 + 92,04} = j108,61 \Omega.$$

a) Tražena struja jednofaznog kratkog spoja za slučaj izolovanog zvezdišta transformatora  $T_1$  je:

$$\underline{I}_{k1Z(iz)} = 3\underline{I}_{0(iz)} = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_{0(iz)}^{ekv}} = \frac{3 \cdot 220 / \sqrt{3}}{2 \cdot j34,64 + j108,61} = -j2,142 \text{ kA}.$$

Za slučaj direktno uzemljenog zvezdišta ekvivalentna impedansa nultog redosleda je:

$$\underline{Z}_{0(uz)}^{ekv} = \underline{Z}_{0(iz)}^{ekv} \parallel j21,34 = j \frac{108,61 \cdot 21,34}{108,61 + 21,34} = j17,84 \Omega.$$

Struja jednofaznog kratkog spoja sa zemljom za ovaj slučaj je:

$$\underline{I}_{k1Z(uz)} = 3\underline{I}_{0(uz)} = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_{0(uz)}^{ekv}} = \frac{3 \cdot 220 / \sqrt{3}}{2 \cdot j34,64 + j17,84} = -j4,374 \text{ kA}.$$

b) Napon izolovanog zvezdišta transformatora  $T_1$  za slučaj jednofaznog kratkog spoja sa zemljom na sabirnicama 1 je:

$$\underline{U}_N = -\underline{Z}_{0(iz)}^{ekv} \underline{I}_{0(iz)} = -\underline{Z}_{0(iz)}^{ekv} \frac{\underline{I}_{k1Z(iz)}}{3} = -j108,61 \cdot \frac{-j2,142}{3} = -77,55 \text{ kV}.$$

c) Pošto je kriterijum efikasnosti uzemljenja zvezdišta proizvoljnog elektroenergetskog sistema  $X_0/X_d \leq 3$ , za elektroenergetski sistem iz zadatka za slučaj izolovanog zvezdišta transformatora  $T_1$  se dobija:

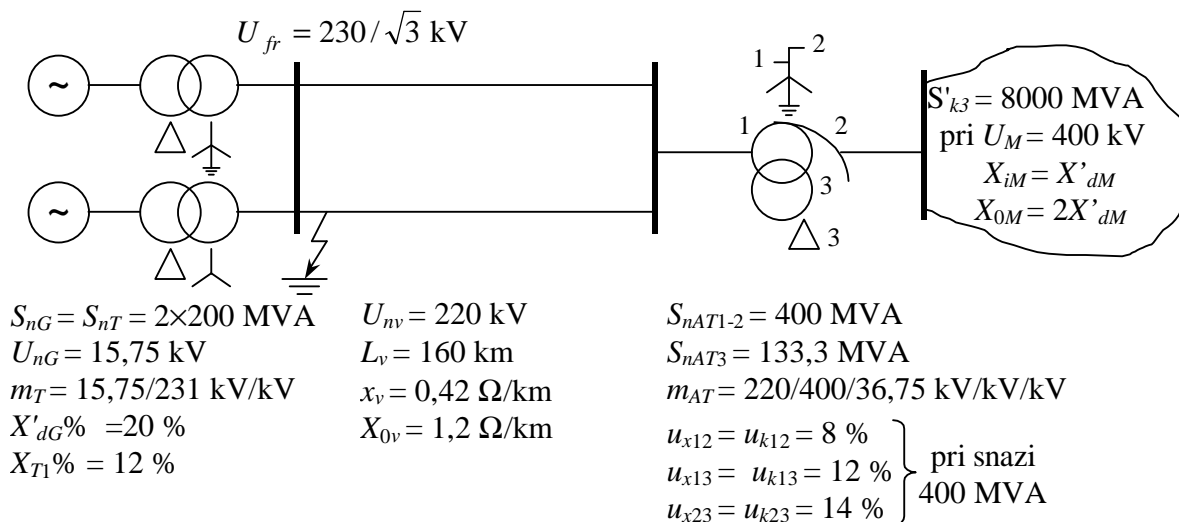
$$X_0/X_d = 108,61/34,64 = 3,135 > 3,$$

pa se može zaključiti da zvezdište transformatora  $T_1$  ne sme raditi izolovano. □

**Zadatak 3.20**

Za dati trofazni, jednofazno prikazani elektroenergetski sistem sa sl. 3.20a, proveriti da li sme zvezdište jednog od dva generatorska transformatora da se drži neuzemljeno, ako je izolacija zvezdišta prema "masi" (zemlji) dimenzionisana za nivo trećine nominalnog faznog napona odgovarajućeg namotaja. Proveru vrednosti kvazistacionarnog napona zvezdišta prema zemlji izvršiti samo za slučaj jednofaznog kratkog spoja na početku jednog od dva voda u tranzijentnom periodu.

Podaci o parametrima elemenata sistema, dati su ispod sl. 3.20a.



Sl. 3.20a Jednofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.20

Rešenje:

Parametri elemenata elektroenergetskog sistema sa sl. 3.20a su:

$$X'_{dGe} = \frac{X'_{dG}\%}{100} \frac{U_{nG}^2}{2S_{nG}} \frac{1}{m_T^2} = \frac{20}{100} \frac{15,75^2}{2 \cdot 200} \left( \frac{231}{15,75} \right)^2 = 26,68 \text{ } \Omega;$$

$$X_{Te} = \frac{X_T\%}{100} \frac{U_{nT}^2}{2S_{nT}} = \frac{12}{100} \frac{231^2}{2 \cdot 200} = 16 \text{ } \Omega;$$

$$X_{ve} = \frac{1}{2} X_v = \frac{1}{2} x_v L_v = \frac{1}{2} 0,42 \cdot 160 = 33,6 \text{ } \Omega;$$

$$X_{12} = \frac{u_{x12}\%}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{AT12}} = \frac{8}{100} \frac{220^2}{400} = 9,68 \text{ } \Omega;$$

$$X_{13} = \frac{u_{x13}\%}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{AT12}} = \frac{12}{100} \frac{220^2}{400} = 14,52 \text{ } \Omega;$$

$$X_{23} = \frac{u_{x23}\%}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{AT12}} = \frac{14}{100} \frac{220^2}{400} = 16,94 \text{ } \Omega.$$

Na osnovu napred proračunatih reaktansi rasipanja autotransformatora, svedenih na naponski nivo voda (220 kV), nalaze se parametri odgovarajuće zvezde tog tronamotajnog autotransformatora:

$$X_1 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{13} - X_{23}) = \frac{1}{2}(9,68 + 14,52 - 16,94) = 3,63 \Omega ;$$

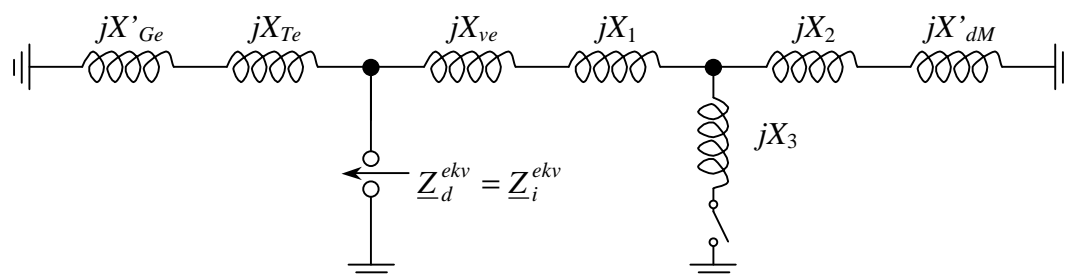
$$X_2 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{23} - X_{13}) = \frac{1}{2}(9,68 + 16,94 - 14,52) = 6,05 \Omega ;$$

$$X_3 = \frac{1}{2}(X_{13} + X_{23} - X_{12}) = \frac{1}{2}(14,52 + 16,94 - 9,68) = 10,89 \Omega .$$

Reaktansa mreže svedena na naponski nivo voda je:

$$X'_{dM} = \frac{U_M^2}{S'_{k3}} \left( \frac{220}{400} \right)^2 = \frac{400^2}{8000} \left( \frac{220}{400} \right)^2 = 6,05 \Omega .$$

Na osnovu izračunatih parametara na sl. 3.20b nacrtana je odgovarajuća ekvivalentna šema impedansi za direktni i inverzni redosled.



Sl. 3.20b Mreža direktnih i inverznih impedansi sistema sa sl. 3.20a

Krak zvezde sa reaktansom  $jX_3$  je otvoren, s obzirom da je tercijer neopterećen. Naime, direktne i inverzne ems se indukuju u tercijeru ali je njihov fazorski zbir po zatvorenoj konturi (trouglu) jednak nuli (sistem od 3 vektora međusobno pomena za  $120^\circ$ ), tako da struje direktnog i inverznog redosleda u simetričnim režimima ne teku po trouglu.

Sa sl. 3.20b nalazi se da je:

$$\underline{Z}_d^{ekv} = \underline{Z}_i^{ekv} = j(X'_{Ge} + X_{Te}) \parallel j(X_{ve} + X_1 + X_2 + X'_{dM}),$$

odakle je posle zamene brojčanih vrednosti pojedinih reaktansi:

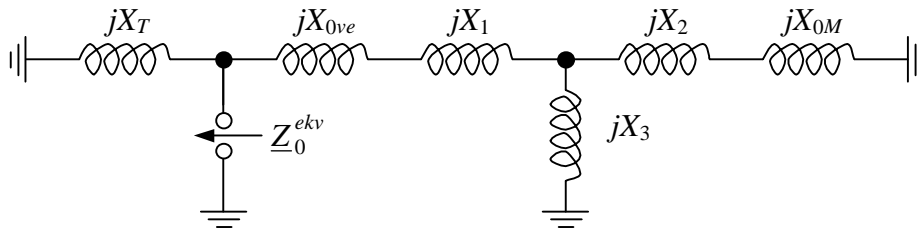
$$\underline{Z}_d^{ekv} = \underline{Z}_i^{ekv} = j42,68 \parallel j49,33 = j22,88 \Omega .$$

Nulta ekvivalentna šema impedansi sistema kada je samo jedan blok-generatorski transformator direktno uzemljen, ima izgled kao na sl. 3.20c. Nulte reaktanse elemenata na sl. 3.20c su onda:

$$X_T = 2X_{Te} = 32 \Omega;$$

$$X_{0ve} = \frac{1}{2}x_{ov}L_v = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 160 = 96 \Omega;$$

$$X_{0M} = 2X'_{dM} = 2 \cdot 6,05 = 12,1 \Omega.$$



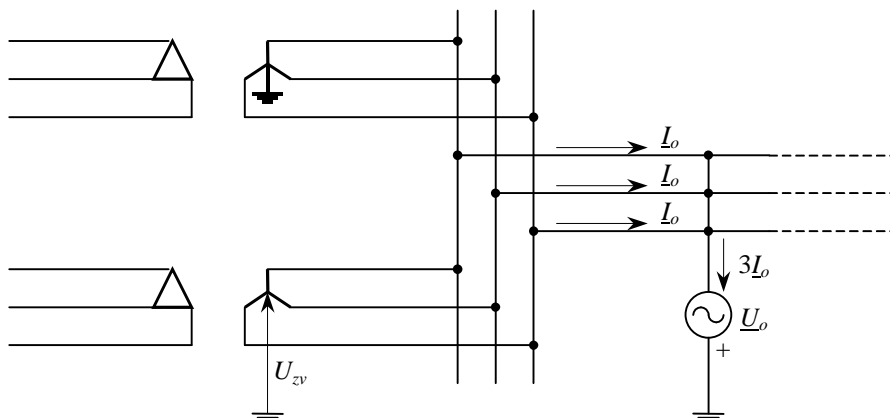
Sl. 3.20c Mreža nultih impedansi sistema sa sl. 3.20a

Ekvivalentna nulta impedansa posmatrana odočno sa mesta kvara je:

$$\underline{Z}_0^{ekv} = jX_T \parallel \left( j(X_{0ve} + X_1) + j(X_2 + X_{0M}) \parallel jX_3 \right) = j32 \parallel j106,44 = j24,604 \Omega.$$

Napon zvezdišta izolovanog transformatora prema zemlji određen je samo nultom komponentom napona pošto direktna i inverzna komponenta napona (kod simetričnog trofaznog sistema) ne utiču na potencijal zvezdišta. Pri tome, napon zvezdišta upravo je jednak naponu na mestu kvara (nultoj komponenti) pošto se nulte struje kroz izolovano zvezdište ne zatvaraju i jednostavno se nulti potencijal sa mesta kvara prenosi do zvezdišta. Dakle, shodno sl. 3.20d je:

$$\begin{aligned} \underline{U}_N = -\underline{U}_0 &= -\frac{\underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_0^{ekv} + \underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} U_{fr} = -\frac{24,604}{24,604 + 2 \cdot 22,88} \cdot \frac{230}{\sqrt{3}} = \\ &= 46,43 \text{ kV} > U_{izolacije zvezdišta} = \frac{1}{3} U_{nf} = \frac{1}{3} \cdot \frac{231}{\sqrt{3}} = 44,456 \text{ kV}. \end{aligned}$$



Sl. 3.20d Ekvivalentna šema sistema iz zadatka 3.20 za proračun napona izolovanog zvezdišta blok-generatorskog transformatora na strani mreže

Zaključuje se da zvezdište treba izolovati jače od 1/3 punog faznog napona (npr. izolacija zvezdišta treba da je dimenzionisana na 2/3 vrednosti punog faznog napona).

□

**Zadatak 3.21**

Za elektroenergetski sistem prikazan na sl. 3.21a odrediti:

a) Struju trofaznog kratkog spoja na sabirnicama 6.

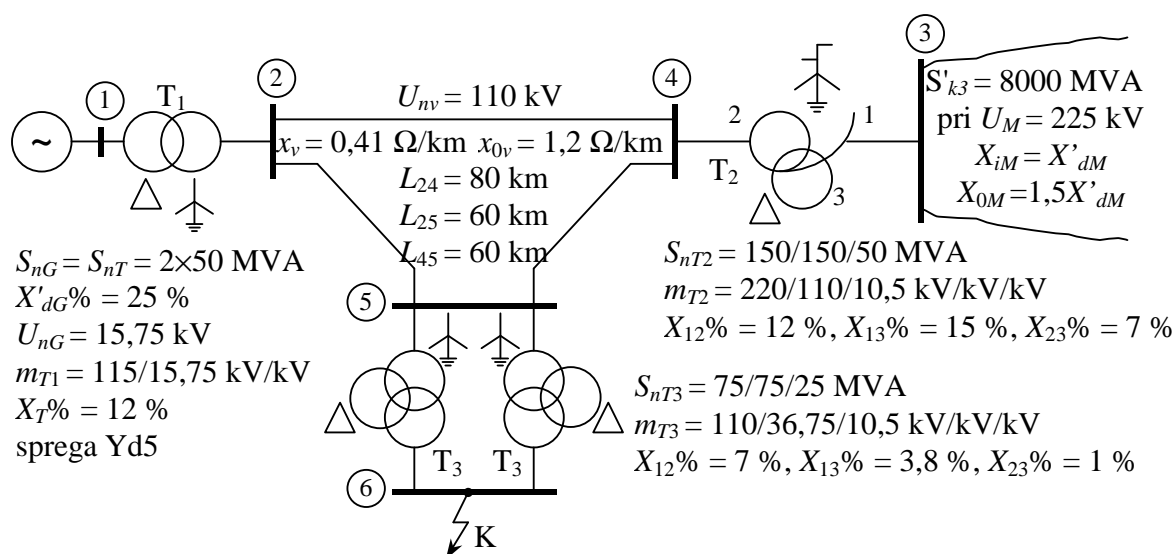
b) Struju jednofaznog kratkog spoja na istim sabirnicama, kao i struju i napon na krajevima otpora za uzemljenje u naredna dva slučaja:

b1) Svako od zvezdišta na 35 kV strani transformatora T<sub>3</sub> je uzemljeno preko otpornosti za uzemljenje  $R = 30 \Omega$ .

b2) Zvezdišta na 35 kV strani oba transformatora T<sub>3</sub> međusobno su povezana i uzemljena preko zajedničke otpornosti za uzemljenje  $R = 30 \Omega$ .

Napon na mestu kvara, pre kvara je  $U_{fr} = 36,5 / \sqrt{3}$  kV. Ostali podaci o sistemu su dati na sl. 3.22a.

*Napomena:* Procentualne reaktanse transformatora T<sub>2</sub> su proračunate za snagu 150 MVA, dok su za transformatore T<sub>3</sub> date za odgovarajuće prolazne snage.



Sl. 3.21a Jednoplina šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.21

**Rešenje:**

Parametri sistema svedeni na naponski nivo 35 kV su:

$$X'_{dG} = \frac{X'_{dG} \%}{100} \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} m_{T1}^2 \frac{1}{m_{T3}^2} = \frac{25}{100} \frac{15,75^2}{100} \left( \frac{115}{15,75} \right)^2 \left( \frac{36,75}{110} \right)^2 = 3,69 \Omega;$$

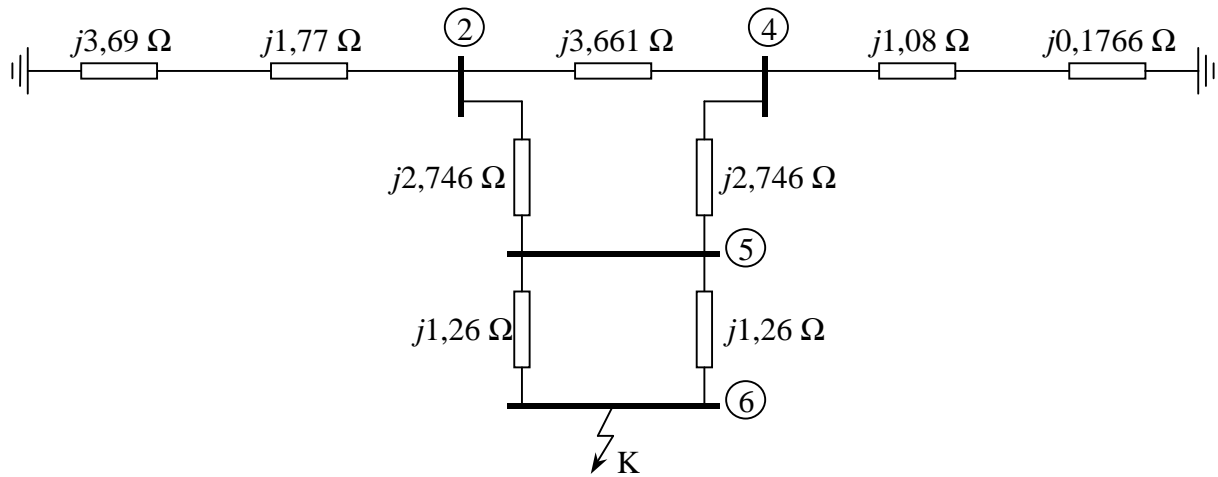
$$X_{T1} = \frac{X_{T1} \%}{100} \frac{U_{nT1}^2}{S_{nT}} \frac{1}{m_{T3}^2} = \frac{12}{100} \frac{115^2}{100} \left( \frac{36,75}{110} \right)^2 = 1,77 \Omega;$$

$$X_{dv24} = x_{dv} L_{24} \frac{1}{m_{T3}^2} = 0,41 \cdot 80 \cdot \left( \frac{36,75}{110} \right)^2 = 3,661 \Omega;$$

$$X_{0v24} = x_{0v} L_{24} \frac{1}{m_{T3}^2} = 1,2 \cdot 80 \cdot \left( \frac{36,75}{110} \right)^2 = 10,715 \Omega;$$

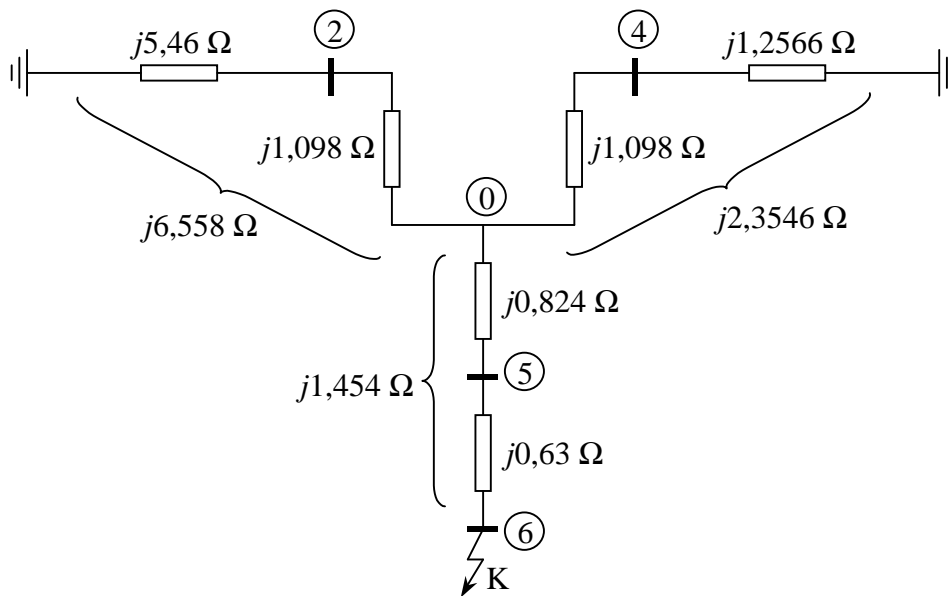
$$\begin{aligned}
X_{dv25} &= x_{dv} L_{25} \frac{1}{m_{T3}^2} = 0,41 \cdot 60 \cdot \left( \frac{36,75}{110} \right)^2 = 2,746 \, \Omega; \\
X_{0v25} &= x_{0v} L_{25} \frac{1}{m_{T3}^2} = 1,2 \cdot 60 \cdot \left( \frac{36,75}{110} \right)^2 = 8,036 \, \Omega; \\
X_{dv45} &= X_{dv25} = 2,746 \, \Omega; \\
X_{0v45} &= X_{0v25} = 8,036 \, \Omega; \\
X_{T2_{12}} &= \frac{X_{T2_{12}} \% U_{nT2}^2}{100 S_{nT2_1} m_{T3}^2} = \frac{12}{100} \frac{110^2}{150} \left( \frac{36,75}{110} \right)^2 = 1,08 \, \Omega; \\
X_{T2_{13}} &= \frac{X_{T2_{13}} \% U_{nT2}^2}{100 S_{nT2_1} m_{T3}^2} = \frac{15}{100} \frac{110^2}{150} \left( \frac{36,75}{110} \right)^2 = 1,35 \, \Omega; \\
X_{T2_{23}} &= \frac{X_{T2_{23}} \% U_{nT2}^2}{100 S_{nT2_1} m_{T3}^2} = \frac{7}{100} \frac{110^2}{150} \left( \frac{36,75}{110} \right)^2 = 0,63 \, \Omega; \\
X_{T2_1} &= \frac{1}{2} (X_{T2_{12}} + X_{T2_{13}} - X_{T2_{23}}) = \frac{1}{2} (1,08 + 1,35 - 0,63) = 0,9 \, \Omega; \\
X_{T2_2} &= \frac{1}{2} (X_{T2_{12}} + X_{T2_{23}} - X_{T2_{13}}) = \frac{1}{2} (1,08 + 0,63 - 1,35) = 0,18 \, \Omega; \\
X_{T2_3} &= \frac{1}{2} (X_{T2_{13}} + X_{T2_{23}} - X_{T2_{12}}) = \frac{1}{2} (1,35 + 0,63 - 1,08) = 0,45 \, \Omega; \\
X_{T3_{12}} &= \frac{x_{T3_{12}} U_{nT3}^2}{100 S_{nT3_1}} = \frac{7}{100} \frac{36,75^2}{75} = 1,26 \, \Omega; \\
X_{T3_{13}} &= \frac{x_{T3_{13}} U_{nT3}^2}{100 S_{nT3_3}} = \frac{3,8}{100} \frac{36,75^2}{25} = 2,053 \, \Omega; \\
X_{T3_{23}} &= \frac{x_{T3_{23}} U_{nT3}^2}{100 S_{nT3_3}} = \frac{1}{100} \frac{36,75^2}{25} = 0,54 \, \Omega; \\
X_{T3_1} &= \frac{1}{2} (X_{T3_{12}} + X_{T3_{13}} - X_{T3_{23}}) = \frac{1}{2} (1,26 + 2,053 - 0,54) = 1,3865 \, \Omega; \\
X_{T3_2} &= \frac{1}{2} (X_{T3_{12}} + X_{T3_{23}} - X_{T3_{13}}) = \frac{1}{2} (1,26 + 0,54 - 2,053) = -0,1265 \, \Omega; \\
X_{T3_3} &= \frac{1}{2} (X_{T3_{13}} + X_{T3_{23}} - X_{T3_{12}}) = \frac{1}{2} (2,053 + 0,54 - 1,26) = 0,6665 \, \Omega; \\
X'_{dM} &= \frac{U_M^2}{S'_{k3}} m_{T2}^2 \frac{1}{m_{T3}^2} = \frac{225^2}{8000} \left( \frac{110}{220} \right)^2 \left( \frac{36,75}{110} \right)^2 = 0,1766 \, \Omega; \\
X_{0M} &= 1,5 X'_{dM} = 0,2649 \, \Omega.
\end{aligned}$$

Ekvivalentna šema za impedanse direktnog (inverznog) sistema data je na sl. 3.21b.



**Sl. 3.21b** Ekvivalentna šema impedansi direktnog (inverznog) redosleda sistema sa sl. 3.21a

Ekvivalentovanjem rednih grana i prebacivanjem trougla 2-4-5 mreže sa sl. 3.21b u zvezdu dobija se šema data na sl. 3.21c:



**Sl. 3.21c** Ekvivalentna šema impedansi sa sl. 3.21b, posle transformacije trougla 2-3-4 u zvezdu

Sa prethodne šeme dobija se ekvivalentna impedansa direktnog (inverznog) redosleda, za kvar na sabirnicama 6:

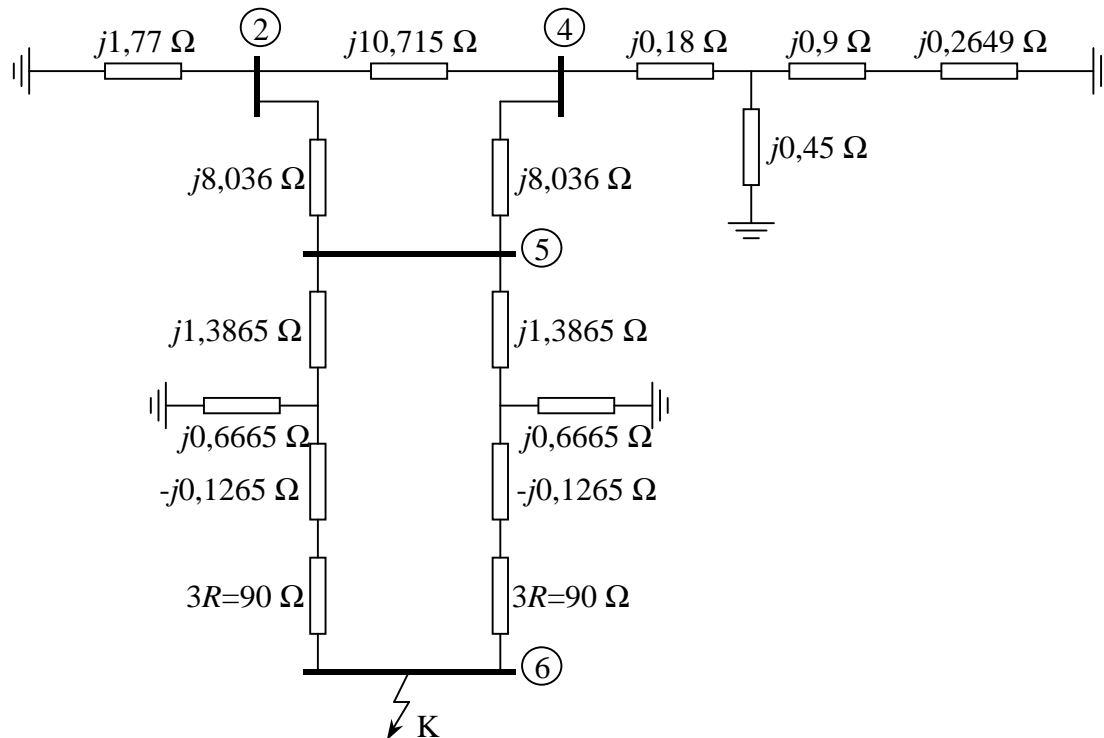
$$\underline{Z}_d^{ekv} = jX_d^{ekv} = j1,454 + j \frac{6,558 \cdot 2,3546}{6,558 + 2,3546} = j3,1865 \Omega.$$

Struja trofaznog kratkog spoja na sabirnicama 6 je onda:



$$I_{k3} = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv}} = \frac{36,5/\sqrt{3}}{j3,1865} = -j6,613 \text{ kA.}$$

b1) Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda za slučaj kada je svako od zvezdišta transformatora T<sub>3</sub> uzemljeno preko individualnih otpornosti za uzemljenje, data je na sl. 3.21d.



**Sl. 3.21d** Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda sistema pri individualnom uzemljenju zvezdišta na 35 kV strani transformatora u grani 5-6 preko otpora od 30 Ω

Ekvivalentovanjem paralelnih i rednih grana i prebacivanjem trougla 2-4-5 i zvezdu dobija se uprošćena šema data na sl. 3.21e.

Sa sl. 3.21e se dalje dobija ekvivalentna nulta impedansa sistema, za kvar na sabirnicama 6:

$$\underline{Z}_0^{ekv} = (45 + j0,25) \Omega.$$

Struja jednofaznog kratkog spoja za kvar na sabirnicama 6 je onda:

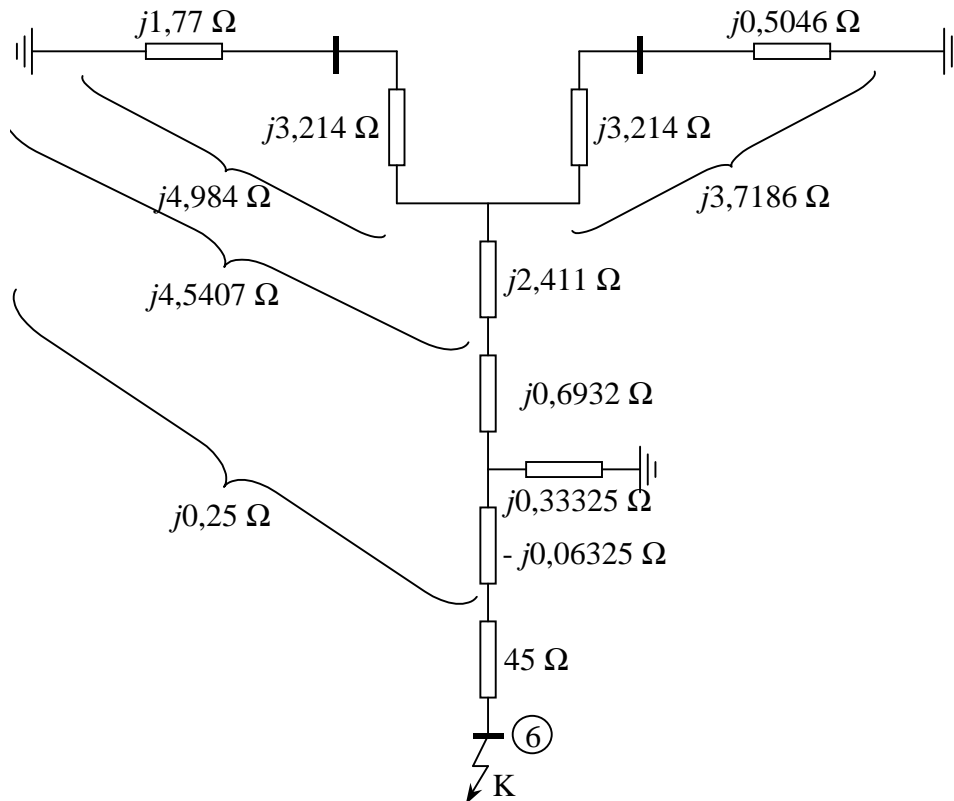
$$\underline{I}_{k1Z} = \frac{3U_{fr}/\sqrt{3}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{3 \cdot 36,5/\sqrt{3}}{2 \cdot j3,1865 + 45 + j0,25} = (1,375 - j0,202) = 1,39 \text{ kA} \angle -8,37^\circ$$

Struja kroz otpornik za uzemljenje svakog od transformatora u grani 5-6, jednaka je polovini struje jednofaznog kratkog spoja:

$$\underline{I}_R = \frac{\underline{I}_{k1Z}}{2} = (0,6875 - j0,101) = 0,695 \text{ kA} \underline{-8,37^\circ}.$$

Napon na krajevima otpornosti za uzemljenje je:

$$U_R = I_R \cdot R = 0,695 \cdot 30 = 20,85 \text{ kV}.$$



**Sl. 3.21e** Ilustracija postupka sažimanja mreže nultih impedansi sa sl. 3.21d

b2) Za slučaj kada su zvezdišta na 35 kV strani oba transformatora u grani 5-6 međusobno povezana i uzemljena preko zajedničke otpornosti menja se samo deo ekvivalentne šeme transformatora  $T_3$ , kako je to pokazano na sl. 3.21f.

Sa sl. 3.21f se dobija da je u ovom slučaju ekvivalentna nulta impedansa sistema, za kvar na sabirnicama 6:

$$\underline{Z}_0^{ekv} = (90 + j0,25) \Omega.$$

Struja jednofaznog kratkog spoja za kvar na sabirnicama 6 onda je:

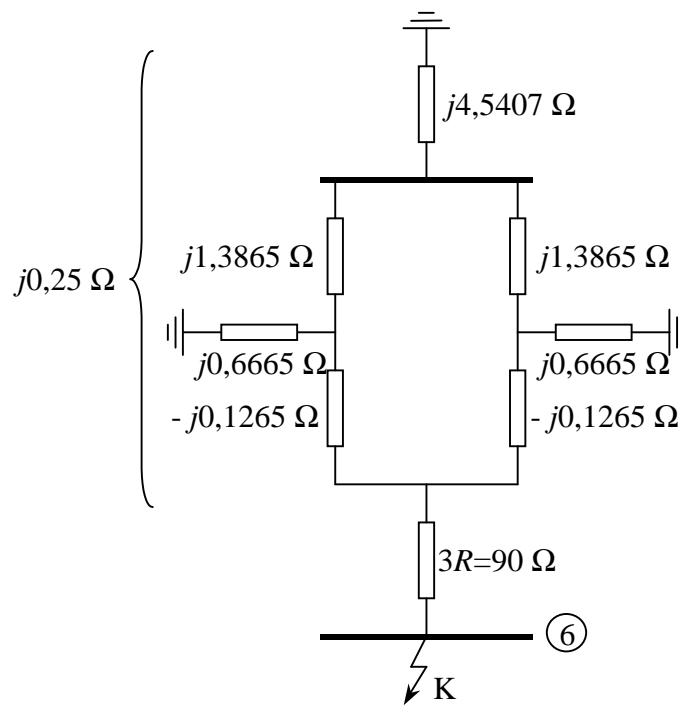
$$\begin{aligned} \underline{I}_{k1Z} &= \frac{3U_{fr} / \sqrt{3}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{3 \cdot 36,5 / \sqrt{3}}{2 \cdot j3,1865 + 90 + j0,25} = (0,6986 - j0,0514) = \\ &= 0,7005 \text{ kA} \underline{-4,21^\circ}. \end{aligned}$$

Struja kroz otpornost za uzemljenje jednaka je struji jednofaznog kratkog spoja, tj:

$$\underline{I}_R = \underline{I}_{k1Z} = (0,6986 - j0,0514) = 0,7005 \text{ kA} \underline{/ -4,21^\circ}.$$

Napon na krajevima otpornosti za uzemljenje je:

$$U_R = R \cdot I_R = 30 \cdot 0,7005 = 21,016 \text{ kV}.$$

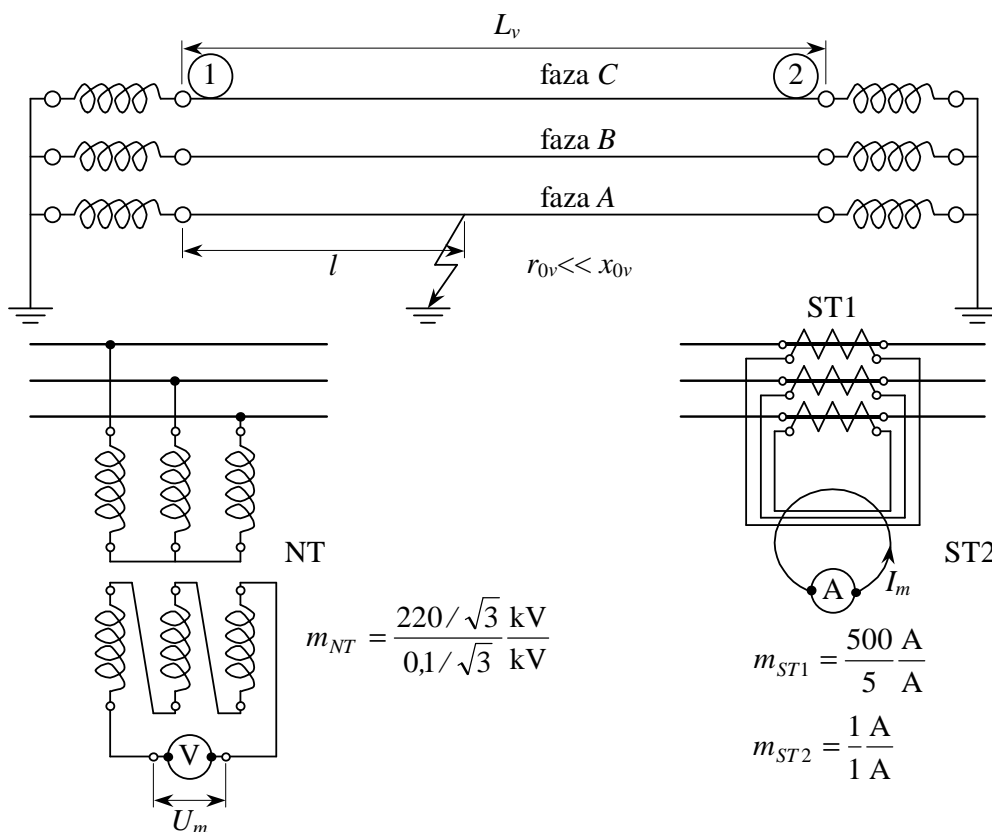


**Sl. 3.21f** Ekvivalentna šema sistema nultih impedansi pri zajedničkom uzemljenju zvezdišta na 35 kV strani transformatorau grani 5-6, preko otpora od 30 Ω



**Zadatak 3.22**

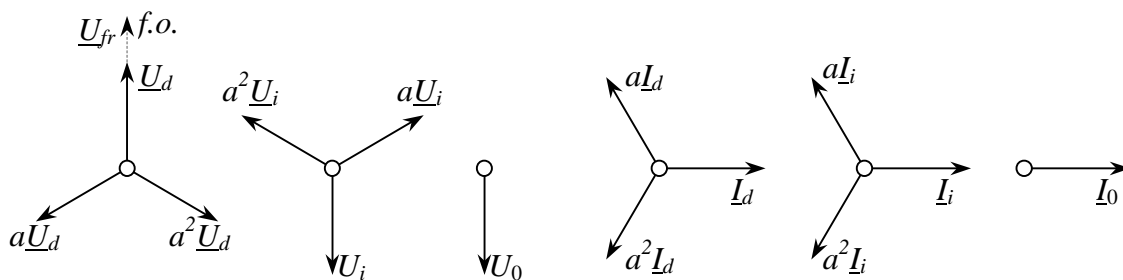
Na sl. 3.22a dat je dalekovod 1-2 dužine  $L_v$ , podužne nulte reaktanse  $x_{0v}$ , na čijim krajevima su transformacije sa direktno uzemljenim zvezdištima na strani voda. Za vreme jednofaznog kratkog spoja na vodu, izmerene su blokiranjem merenja pri isključenju prekidača u istom trenutku tranzijentnog perioda, efektivne vrednosti napona i struja na početku i kraju voda ( $U_1, U_2, I_1, I_2$ ). Voltmetri i ampermetri za merenja napona i struje priključeni su u odgovarajuća sekundarna kola merenih transformatora prema šematski prikazanom načinu merenja na sl. 3.22a. Izračunati rastojanje  $l$  mesta kvara od podstanice 1.



Sl. 3.22a Trofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.22

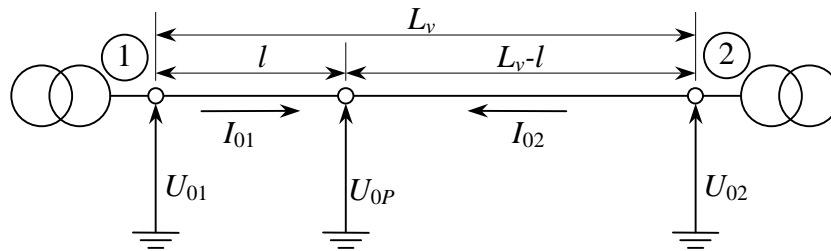
**Rešenje:**

Fazorski dijagrami simetričnih komponenta faznih napona i struja za vreme kvara, na mestu kvara prikazani su na sl. 3.22b (odnose se na simetrične komponente faze A gde je oznaka faze namerno izostavljena).



Sl. 3.22b Fazorski dijagrami simetričnih komponenta napona i struja na mestu kvara, za vreme kvara

Da bi se odredilo mesto kvara na vodu posmatra se monofazna šema prema sl. 3.22c.



**Sl. 3.22c** Monofazna šema sistema sa sl. 3.22a, na osnovu koje se određuje mesto kvara

Prema šemi sa sl. 3.22c, jednačine za napone na kraju i početku voda su:

$$\underline{U}_{02} = \underline{U}_{0P} + j(L_v - l)x_{0v}\underline{I}_{02};$$

$$\underline{U}_{01} = \underline{U}_{0P} + jlx_{0v}\underline{I}_{01}.$$

Odavde je:

$$\underline{U}_{02} - \underline{U}_{01} = j(L_v - l)x_{0v}\underline{I}_{02} - jlx_{0v}\underline{I}_{01},$$

odnosno kada se gornja jednačina reši po  $l$  (rastojanju mesta kvara od tačke 1), biće

$$l = \frac{\underline{U}_{01} - \underline{U}_{02} + jL_v x_{0v} \underline{I}_{02}}{jx_{0v}(\underline{I}_{01} + \underline{I}_{02})}.$$

Idući od mesta kvara  $U_0$  se smanjuje, ali je fazni stav isti. Prema orijentaciji osa on je negativan, pa u obrazac treba staviti  $-U_{01}$  i  $-U_{02}$ . Sličnim rezonovanjem zaključuje se i za struje  $\underline{I}_{01} = -jI_{01}$  i  $\underline{I}_{02} = -jI_{02}$ .

Kada se ovo uvrsti u izvedeni obrazac, dobija se konačni obrazac za izračunavanje mesta kvara na kome se dogodio jednofazni kratak spoj ako su poznate nulte komponente struje i napona na početku i kraju voda:

$$l = \frac{U_{02} - U_{01} + L_v x_{0v} I_{02}}{x_{0v}(I_{01} + I_{02})}.$$

Za brojčane vrednosti izmerenih veličina:

$$U_{m1} = 30 \text{ V}; \quad U_{m2} = 40 \text{ V}; \quad I_{m1} = 9 \text{ A}; \quad I_{m2} = 12 \text{ A};$$

$$L_v = 180 \text{ km}; \quad x_{0v} = 1,3 \Omega/\text{km};$$

dobija se:

$$U_{01} = \frac{30 \text{ V}}{3} \frac{220}{0,1} = 22000 \text{ V}; \quad U_{02} = \frac{40 \text{ V}}{3} \frac{220}{0,1} = 29200 \text{ V};$$
$$I_{01} = \frac{9 \text{ A}}{3} \frac{500}{5} = 300 \text{ A}; \quad I_{02} = \frac{12 \text{ A}}{3} \frac{500}{5} = 400 \text{ A};$$
$$l = \frac{U_{02} - U_{01} + L_v x_{0v} I_{02}}{x_{0v} (I_{01} + I_{02})} = \frac{29200 - 22000 + 180 \cdot 1,3 \cdot 400}{1,3(300 + 400)} = 110,8 \text{ km}.$$

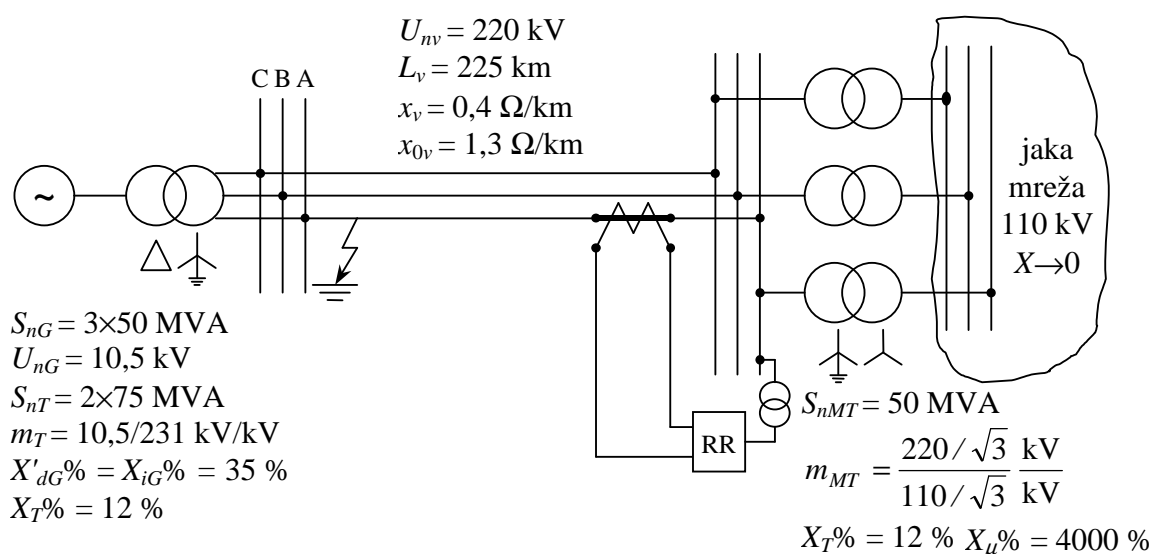
Potrebno je naglasiti da na sl. 3.22a voltmetar meri trostruki nulti napon, a ampermatar trostruku nultu struju pa otuda broj 3 u imeniocu u izrazima za  $U_{01}$ ,  $U_{02}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ .



**Zadatak 3.23**

Za trofazni sistem prikazan na sl. 3.23a, izračunati da li će u slučaju kratkog spoja faze A sa zemljom na početku dalekovoda 220 kV isključiti prekidač (odnosno pol prekidača) na istoj fazi na kraju dalekovoda, ako je dalekovod pre kvara radio praktično neopterećen sa međufaznim naponom na početku od 230 kV, a impuls za isključenje prekidača se dobija preko reaktantnog releja napajanog iz naponskog transformatora odnosa transformacije  $\frac{220/\sqrt{3} \text{ kV}}{0,1 \text{ kV}}$  i strujnog transformatora odnosa transformacije  $\frac{500 \text{ A}}{1 \text{ A}}$ , u slučajevima kada je merena reaktansa (ovde odnos sekundarnog merenog/računatog napona i sekundarne merene/računate struje) manja od reaktanse na koju se pobuđuje rele i koja iznosi  $60 \Omega$ .

Podaci o parametrima elemenata sistema dati su na sl. 3.23a.



**Sl. 3.23a** Trofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.23

**Rešenje:**

Reaktanse generatora, transformatora, voda i monofaznih transformatora sistema su:

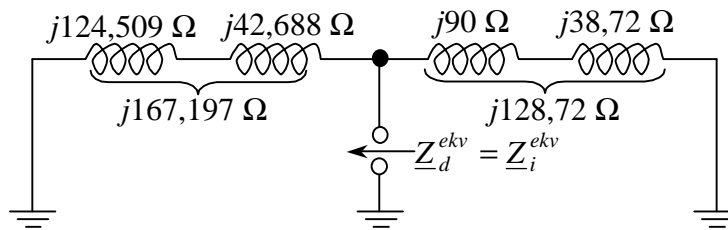
$$X'_{dG} = X_{iG} = \frac{X'_{dG}\%}{100} \frac{U_{nGsv}^2}{S_{nG}} = \frac{35}{100} \frac{231^2}{150} = 124,509 \Omega;$$

$$X_T = \frac{X_T\%}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{12}{100} \frac{231^2}{150} = 42,688 \Omega;$$

$$X_v = x_v L_v = 0,4 \cdot 225 = 90 \Omega;$$

$$X_{MT} = \frac{X_T\%}{100} \frac{U_{nMT}^2}{3S_{nMT}} = \frac{12}{100} \frac{220^2}{150} = 38,720 \Omega.$$

Zamenske šeme mreža simetričnih komponenata direktnog i inverznog sistema su identične i prikazane su na sl. 3.23b.



Sl. 3.23b Zamenska šema impedansi direktnog i inverznog redosleda sistema sa sl. 3.23a

Posle sređivanja šeme sa sl. 3.23b dobijaju se ukupna direktna i inverzna impedansa gledane sa mesta kvara:

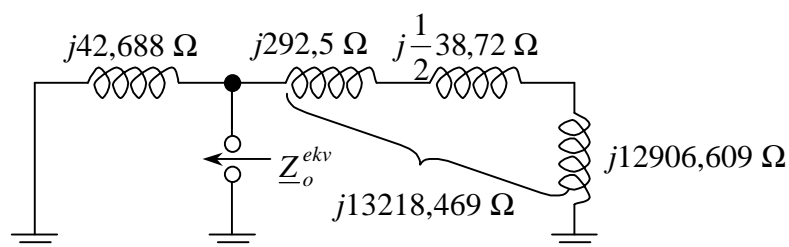
$$\underline{Z}_d^{ekv} = \underline{Z}_i^{ekv} = j \frac{167,197 \cdot 128,72}{167,197 + 128,72} = j72,7 \Omega.$$

Nulte reaktanse voda i transformatora su:

$$X_{0v} = x_{0v} L_v = 1,3 \cdot 225 = 292,5 \Omega;$$

$$X_{\mu T} = \frac{X_{\mu} \% U_{nMT}^2}{100 S_{nMT}} = \frac{4000 \cdot 220^2}{100 \cdot 150} = 12906,66 \Omega.$$

Ekvivalentna šema nultog (homopolarnog) sistema impedansi, prikazana je na sl. 3.23c. Reaktanse levo od transformatora nisu prikazane pošto je transformator spregnut u trougao sa primarne strane mreže pa se nulte struje zatvaraju kroz navoje primara.



Sl. 3.23c Zamenska šema impedansi nultog redosleda sistema sa sl. 3.23a

Posle sređivanja prethodne šeme sa sl. 3.23c dobija se ekvivalentna nulta impedansa sistema posmatrana sa mesta kvara, čija je vrednost:

$$\underline{Z}_0^{ekv} = j \frac{42,688 \cdot 13218,469}{42,688 + 13218,469} = j42,6 \Omega.$$

Simetrične komponente struja na mestu kvara su jednake i iznose:



$$\underline{I}_0 = \underline{I}_i = \underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{230/\sqrt{3}}{j72,7 + j72,7 + j42,6} = -j0,707 \text{ kA}.$$

Direktna i inverzna komponenta struje, koje pritiču sa strane voda na mesto kvara izračunavaju se iz jednačine:

$$\underline{I}_{dD} = \underline{I}_{iD} = \frac{\underline{I}_d \underline{Z}_d^{ekv}}{\underline{Z}_{dD}} = \frac{-j0,707 \cdot j72,7}{j128,72} = -j0,4 \text{ kA} = -j400 \text{ A}.$$

Nulta komponenta struje kvara, koja protiče sa strane voda na mesto kvara biće:

$$\underline{I}_{0D} = \frac{\underline{I}_0 \underline{Z}_0^{ekv}}{\underline{Z}_{0D}} = \frac{-j0,707 \cdot j42,6}{j13237,88} = -j0,00228 \text{ kA} = -j2,28 \text{ A}.$$

Direktna komponenta napona na mestu kvara, posle nastanka kvara može se izračunati iz jednačine:

$$\underline{U}_d = \underline{U}_{fr} - \underline{I}_d \underline{Z}_d^{ekv} = \frac{230}{\sqrt{3}} - (-j0,707) \cdot j72,7 = 81,6 \text{ kV}.$$

Inverzna komponenta napona na mestu kvara, posle nastanka kvara može se izračunati iz jednačine:

$$\underline{U}_i = -\underline{I}_i \underline{Z}_i^{ekv} = -(-j0,707) \cdot j72,7 = -51,5 \text{ kV}.$$

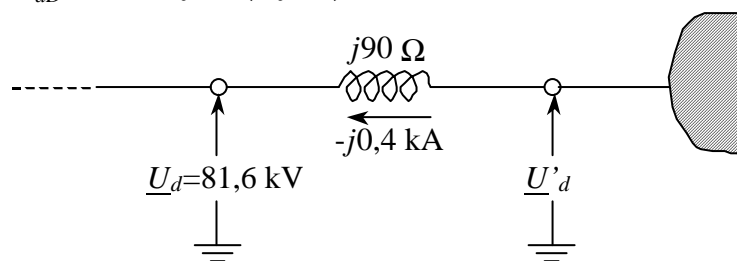
Nulta komponenta napona na mestu kvara, posle nastanka kvara može se izračunati iz jednačine:

$$\underline{U}_0 = -\underline{I}_0 \underline{Z}_0 = -(-j0,707) \cdot j42,6 = -30,2 \text{ kV}.$$

S obzirom da je kvar na fazi A, na mestu kvara treba da je  $\underline{U}_d + \underline{U}_i + \underline{U}_0 = 0$ . Kada se u ovoj jednačini zamene izrazi za  $\underline{U}_d$ ,  $\underline{U}_i$  i  $\underline{U}_0$  dobiće se tačno 0.

Direktna komponenta napona na kraju prenosnog voda (tamo gde su priključeni merni transformatori) shodno sl. 3.23d biće:

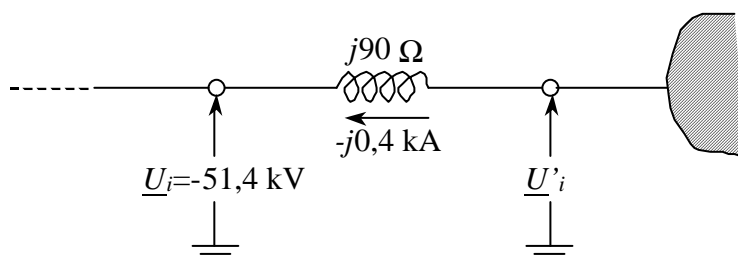
$$\underline{U}'_d = \underline{U}_d + j90 \underline{I}_{dD} = 81,6 + j90 \cdot (-j0,4) = 81,6 + 36 = 117,6 \text{ kV}.$$



**Sl. 3.23d** Ekvivalentna šema za proračun direktne komponente napona na kraju voda

Inverzna komponenta napona na mestu priključenja mernog transformatora shodno sl. 3.23e je:

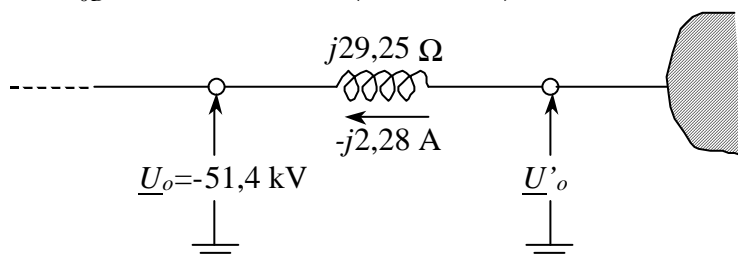
$$U'_i = U_i + j90I_{iD} = -51,4 + j90 \cdot (-j0,4) = -15,4 \text{ kV}.$$



Sl. 3.23e Zamenska šema za proračun inverzne komponente napona na kraju voda

Nulta komponenta napona na tom istom mestu shodno sl. 3.23f biće:

$$U'_0 = U_0 + j292,5I_{0D} = -30,2 + j292,5 \cdot (-j0,00228) = -29,53 \text{ kV}.$$



Sl. 3.23f Zamenska šema za proračun nulte komponente napona na kraju voda

Struja i napon u fazi A na kraju voda za vreme kvara su onda:

$$\underline{I}'_A = \underline{I}_{dD} + \underline{I}_{iD} + \underline{I}_{0D} = -j0,4 - j0,4 - j0,00228 = -j0,80228 \text{ kA};$$

$$\underline{U}'_A = \underline{U}'_d + \underline{U}'_i + \underline{U}'_0 = 117,6 - 15,4 - 29,53 = 72,666 \text{ kV}.$$

Kada se oni preko mernih transformatora svedu na njihove sekundarne strane, biće:

$$|I'_{AMT}| = |I'_A| \cdot \frac{1}{500} = 802,28 \cdot \frac{1}{500} = 1,60456 \text{ A};$$

$$|U'_{AMT}| = |U'_A| \cdot \frac{0,1}{220/\sqrt{3}} = 72,666 \cdot \frac{0,1}{127} = 52,7 \text{ V}.$$

Reaktantni rele će da meri reaktansu, čija je vrednost:

$$\frac{U'_{AMT}}{I'_{AMT}} = \frac{52,7}{1,60456} = 35,6 \Omega,$$

te će naznačeni prekidač isključiti.

U ovakvim slučajevima kada sekundarna strana nije uzemljena, a nema ni tercijera, nulta reaktansa ima visoku vrednost pa je potrebno proveriti ispunjenje uslova za pobuđivanje releja.

□

**Zadatak 3.24**

U transformatorsku stanicu 110/35 kV, shodno sl. 3.24a ugrađena su dva identična tronamotajna transformatora 110 kV/35 kV/10,5 kV, sprega  $Y_0Y_0\Delta_5$ , sa zajedničkim sabirnicama 110 kV i 35 kV (tercijeri 10,5 kV, vezani u zatvoren trougao, ne koriste se), preko kojih su dalje povezani sa odgovarajućim mrežama. Razmatrati dva uobičajena stanja njihovih neutralnih tačaka:

a) Oba transformatora rade sa direktno uzemljenim zvezdištem na strani 110 kV i 35 kV.

b) Transformator  $T_1$  radi sa direktno uzemljenim zvezdištem na strani 110 kV (dok mu je zvezdište 35 kV izolovano), a transformator  $T_2$  sa direktno uzemljenim zvezdištem na strani 35 kV (zvezdište na strani 110 kV mu je izolovano).

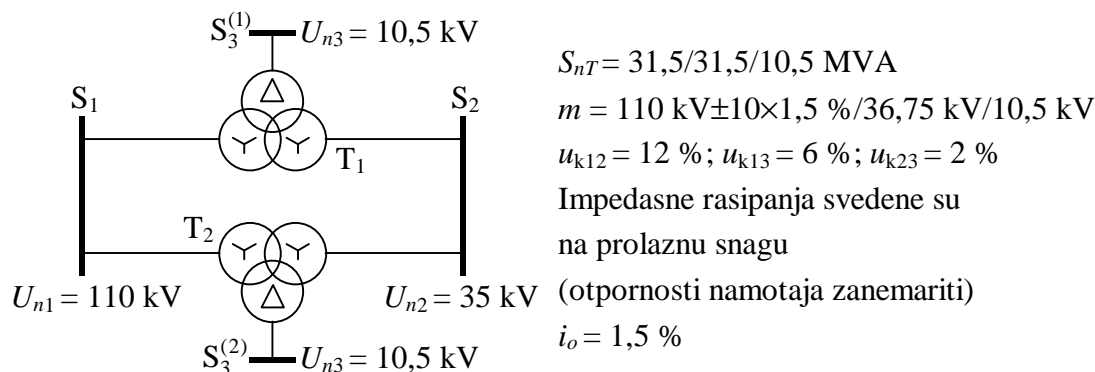
Proračunati struje i snage trofaznog kratkog spoja i jednofaznog zemljospoja, pri kvarovima na sabirnicama  $S_1$  (110 kV) i  $S_2$  (35 kV), ako su uticaji mreža koje povezuju:

- na strani sabirnica 110 kV:  $S_{kM1} = 5000$  MVA;

- na strani sabirnica 35 kV:  $S_{kM2} = 1500$  MVA.

U proračunima pretpostaviti da su ekvivalentne impedanse susednih mreža jednake za sve tri simetrična komponente ( $Z_{dM1} = Z_{iM1} = Z_{oM1}$ , odnosno  $Z_{dM2} = Z_{iM2} = Z_{oM2}$ ).

Ostali parametri transformatora, neophodni za proračune, dati su na sl. 3.24a.



**Sl. 3.24a** Monofazna šema i parametri transformatora transformatorske stanice iz zadatka 3.24

**Rešenje:**

a1) Proračun impedansi (sve vrednosti svedene su na napon  $U_{n1} = 110$  kV i prolaznu snagu):

$$X_{12} = \frac{u_{k12}}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_{n1}} = \frac{12}{100} \frac{110^2}{31,5} = 46,1 \Omega ;$$

$$X_{13} = \frac{u_{k13}}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_{n3}} = \frac{6}{100} \frac{110^2}{10,5} = 69,15 \Omega ;$$

$$X_{23} = \frac{u_{k23}}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_{n3}} = \frac{2}{100} \frac{110^2}{10,5} = 23,05 \Omega .$$

Impedanse Y-ekvivalenta tronamotajnog transformatora, shodno šemi sa sl. 3.24b su:

$$X_1 = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{13} - X_{23}) = 46,1 \Omega ;$$

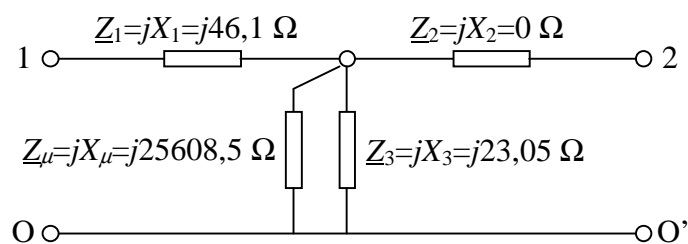
$$X_2 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{23} - X_{13}) = 0 \Omega;$$

$$X_3 = \frac{1}{2}(X_{13} + X_{23} - X_{12}) = 23,05 \Omega;$$

$$X_\mu = \frac{U_{n1}^2}{S_{n1}} \frac{100}{i_o} = \frac{110^2}{31,5} \frac{100}{1,5} = 25608,5 \Omega.$$

Ekvivalentna reaktansa paralelnih otočnih grana sa sl. 3.24b je:

$$X'_\mu = \frac{X_\mu X_3}{X_\mu + X_3} = \frac{25608,5 \cdot 23,05}{25608,5 + 23,05} = 23,03 \Omega.$$



Sl. 3.24b Y-ekvivalent tronamotajnog transformatora sa sl. 3.24a

Direktna i inverzna impedansa transformatora su jednake i u oba slučaja (a i b) iznose:

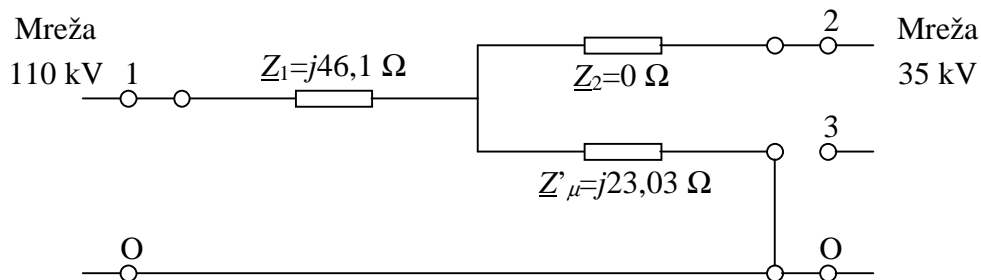
$$\underline{Z}_d^{ekv} = \underline{Z}_i^{ekv} = j \frac{X_1}{2} = j \frac{46,1}{2} = j23,05 \Omega.$$

Nulte impedanse se razlikuju u dva pomenuta slučaja:

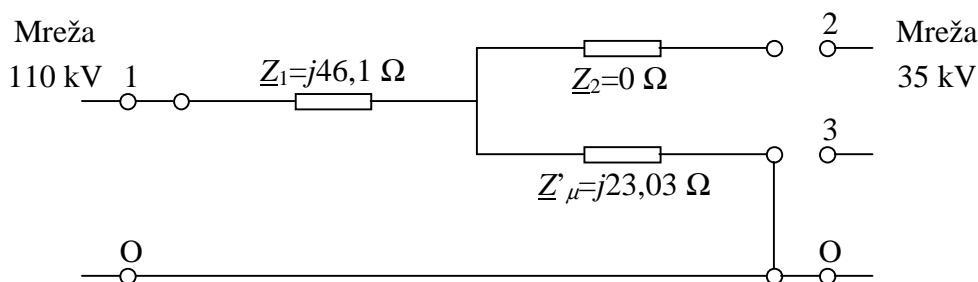
a) Oba zvezdišta transformatora su direktno uzemljena: Ekvivalentna šema nultih impedansi svakog transformatora prikazana je na sl. 3.24c.

b1) Zvezdište transformatora  $T_1$  na strani 110 kV je direktno uzemljeno (zvezdište na strani 35 kV je izolovano): Ekvivalentna šema nultih impedansi prikazana je na sl. 3.24d.

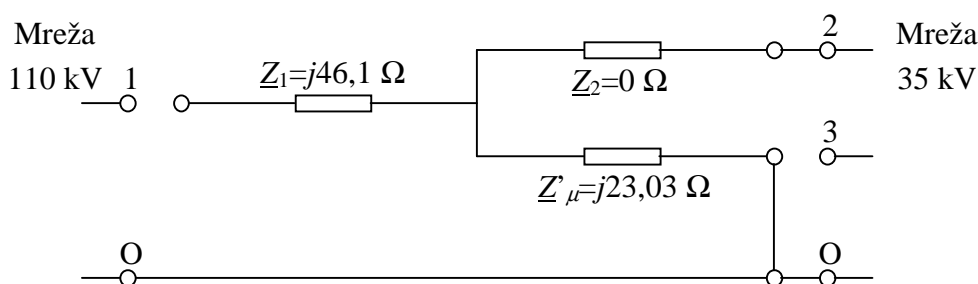
b2) Zvezdište transformatora  $T_2$  na strani 35 kV je direktno uzemljeno (zvezdište na strani 110 kV je izolovano): Ekvivalentna šema nultih impedansi prikazana je na sl. 3.24e.



Sl. 3.24c Y-ekvivalent za nulte impedanse svakog od transformatora, u postrojenju sa sl. 3.24a kada su mu oba zvezdišta direktno uzemljena



**Sl. 3.24d** Y-ekvivalent za nulte impedanse transformatora sa sl. 3.24a, kada mu je zvezdište na strani 110 kV direktno uzemljeno, a na strani 35 kV izolovano



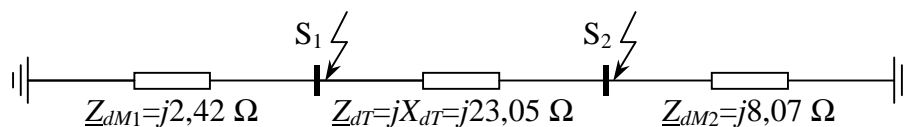
**Sl. 3.24e** Y-ekvivalent za nulte impedanse transformatora sa sl. 3.24a, kada mu je zvezdište na strani 35 kV direktno uzemljeno, a na strani 110 kV izolovano

Ekvivalentne impedanse uticaja mreža visokog napona ( $U_1$ ) i srednjeg napona ( $U_2$ ), svedene na napon 110 kV su:

$$\underline{Z}_{dM1} = \underline{Z}_{iM1} = \underline{Z}_{oM1} = j \frac{U_{n1}^2}{S_{kM1}} = j \frac{110^2}{5000} = j2,42 \Omega;$$

$$\underline{Z}_{dM2} = \underline{Z}_{iM2} = \underline{Z}_{oM2} = j \frac{U_{n2}^2}{S_{kM2}} \left( \frac{U_{n1}}{U_{n2}} \right)^2 = j \frac{110^2}{1500} = j8,07 \Omega.$$

Ekvivalentna šema direktnih (inverznih) impedansi postrojenja sa sl. 3.24a ista je za sve načine uzemljenja zvezdišta transformatora i prikazana je na sl. 3.24f.

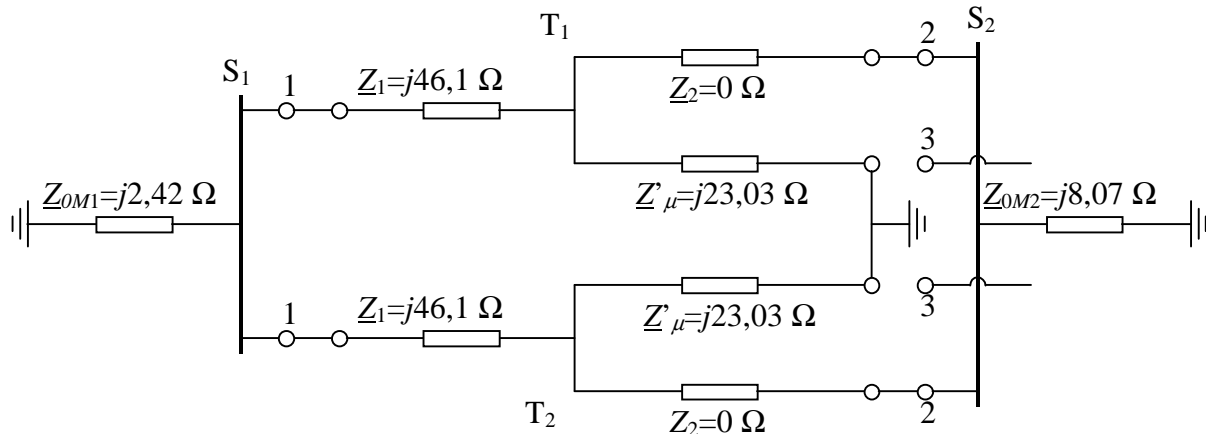


**Sl. 3.24f** Ekvivalentna šema impedansi direktnog (inverznog) redosleda sistema sa sl. 3.24a

Za kvar na sabirnicama  $S_1$ , ekvivalentne impedanse sistema direktnog i inverznog redosleda su:

$$\underline{Z}_{dS1}^{ekv} = \underline{Z}_{iS1}^{ekv} = j \frac{2,42 \cdot (23,05 + j8,07)}{2,42 + 31,12} = j \frac{75,31}{33,54} = j2,255 \Omega.$$

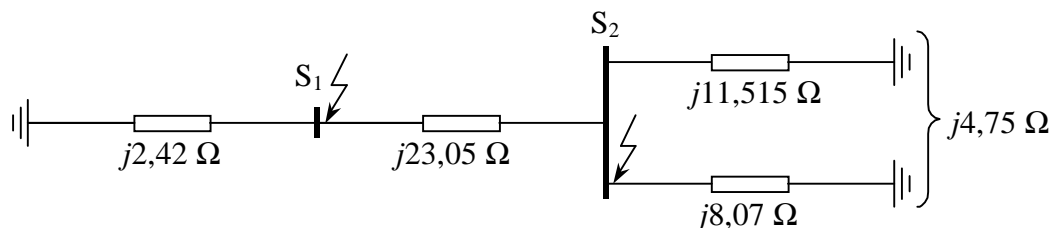
a) Ekvivalentna impedansa nultog redosleda, kada su zvezdišta na obe strane transformatora  $T_1$  i  $T_2$  uzemljena, dobija se sa šeme prikazane na sl. 3.24g.



**Sl. 3.24g** Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda sa sl. 3.24a, kada su zvezdišta na obe strane transformatora  $T_1$  i  $T_2$  direktno uzemljena

Elementarnim transformacijama, šema sa sl. 3.24g, svodi se na šemu prikazanu na sl. 3.24h, odakle se, pri kvaru na sabirnicama  $S_1$ , ekvivalentna impedansa nultog redosleda sistema dobija paralelnim sprežanjem ekvivalenta mreže  $\underline{Z}_{0M1} = j2,42 \Omega$ , sa ekvivalentom paralelnih grana  $\underline{Z}'_{\mu}/2 = j11,515 \Omega$  i  $\underline{Z}_{0M2} = j8,07 \Omega$ , vezanim na red sa impedansom  $\underline{Z}_1/2 = j23,05 \Omega$ :

$$\underline{Z}_{0S1}^{ekv} = j \frac{(4,75 + 23,05) \cdot 2,42}{27,8 + 2,42} = j2,23 \Omega.$$



**Sl. 3.24h** Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda, pri kvaru na sabirnicama  $S_1$  ( $S_2$ ) (oba zvezdišta transformatora direktno uzemljena), posle elementarnih sažimanja šeme sa sl. 3.24g

Struja i snaga trofaznog kratkog spoja na sabirnicama  $S_1$  su onda:

$$I_{k3} = \frac{U_{n1}/\sqrt{3}}{Z_{dS1}^{ekv}} = \frac{110/\sqrt{3}}{2,255} = 28,164 \text{ kA};$$

$$S_{k3} = \sqrt{3}U_{n1}I_{k3} = 5365,7 \text{ MVA}.$$

S druge strane, struja i snaga jednofaznog zemljospoja su:

$$I_{k1ZS1}^{(a)} = \frac{\sqrt{3}U_{n1}}{\left| X_d^{ekv} + X_i^{ekv} + X_0^{ekv} \right|_{S1}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 110}{2 \cdot 2,255 + 2,23} = 28,27 \text{ kA};$$

$$S_{k1ZS1}^{(a)} = \sqrt{3}U_{n1}I_{k1Z} = 5385,5 \text{ MVA}.$$

Za slučaj kvara na sabirnicama  $S_2$ , kada su oba zvezdišta transformatora uzemljena, ekvivalentne impedanse simetričnih komponenta, shodno šemama sa 3.24f i 3.24h su:

$$Z_{dS2}^{ekv} = Z_{iS2}^{ekv} = j \frac{(2,42 + 23,05) \cdot 8,07}{25,47 + 8,07} = j6,13 \Omega;$$

$$Z_{0S2}^{ekv} = j \frac{4,75 \cdot (23,05 + 2,42)}{4,75 + 25,47} = j4,0 \Omega.$$

Struja i snaga trofaznog kratkog spoja na sabirnicama  $S_2$  su onda:

$$I_{k3} = \frac{U_{n1}/\sqrt{3}}{Z_{dS2}^{ekv}} \frac{110}{36,75} = \frac{110/\sqrt{3}}{6,13} \frac{110}{36,75} = 10,36 \cdot 2,993 = 31,01 \text{ kA}$$

Prethodno proračunata vrednost struje trofaznog kratkog spoja na sabirnicama  $S_2$  svedena je na naponski nivo 35 kV, tako da je trofazna snaga kratkog spoja:

$$S_{k3} = \sqrt{3}U_{n1}I'_{k3} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10,36 = \sqrt{3} \cdot 36,75 \cdot 31,01 = 1973,8 \text{ MVA}.$$

Struja i snaga jednofaznog zemljospoja na sabirnicama  $S_2$  su:

$$I_{k1ZS2}^{(a)} = \frac{\sqrt{3}U_{n1}}{\left| X_d^{ekv} + X_i^{ekv} + X_0^{ekv} \right|_{S2}} \frac{110}{36,75} = \frac{\sqrt{3} \cdot 110}{2 \cdot 6,13 + 4} \cdot 2,993 = 11,72 \cdot 2,993 = 35,07 \text{ kA (svedena}$$

na naponski nivo 35 kV)

$$S_{k1ZS2}^{(a)} = \sqrt{3}U_{n1}I'_{k1Z} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 11,72 = 2232,9 \text{ MVA}$$

b) Ekvivalentne impedanse sistema direktnog i inverznog redosleda, za slučaj da je uzemljeno po jedno zvezdište na svakom od transformatora ( $T_1$ , na strani višeg, a  $T_2$  na strani srednjeg napona) iste su kao u prethodnom slučaju, kada su im uzemljena zvezdišta na obe strane, tj. shodno sl. 3.24f:

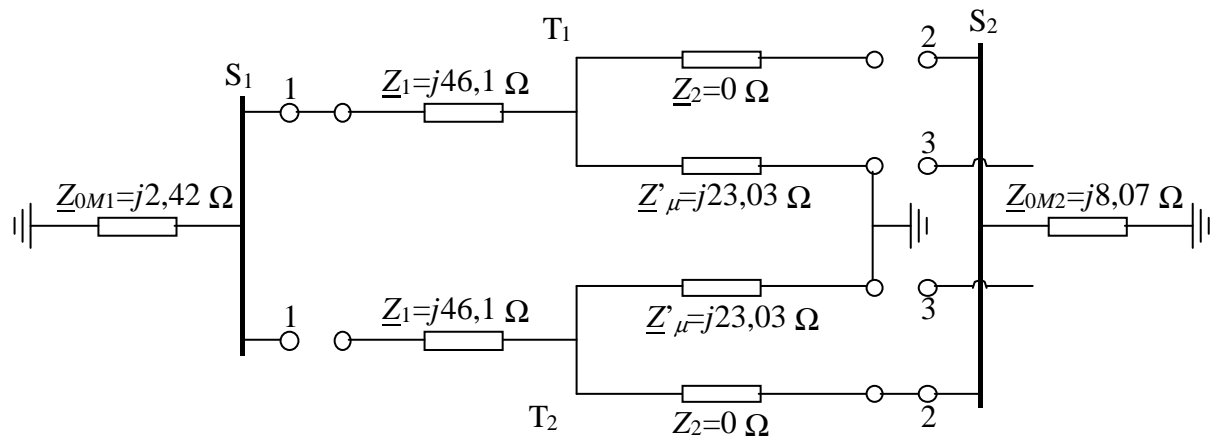
Pri kvaru na sabirnicama  $S_1$ :

$$\underline{Z}_{dS1}^{ekv} = \underline{Z}_{iS1}^{ekv} = j2,255 \Omega.$$

Pri kvaru na sabirnicama  $S_2$ :

$$\underline{Z}_{dS2}^{ekv} = \underline{Z}_{iS2}^{ekv} = j6,13 \Omega.$$

Proračun ekvivalentnih impedansi nultog redosleda sprovede se uz pomoć zamenske šeme sa sl. 3.24i.



**Sl. 3.24i** Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda za slučaj da je na  $T_1$  uzemljeno zvezdište na strani višeg napona, a na  $T_2$  na strani srednjeg napona

Uvidom u sl. 3.24i vidi se da je mreža nultih impedansi razdvojena. Impedanse transformatora  $T_1$  se pridružuju sabirnicama  $S_1$ , a  $T_2$  sabirnicama  $S_2$ .

Ekvivalentna impedansa sistema nultog redosleda pri kvaru na sabirnicama  $S_1$  je:

$$\underline{Z}_{0S1}^{ekv} = j \frac{2,42 \cdot (46,1 + 23,03)}{2,42 + 69,13} = j2,34 \Omega,$$

a pri kvaru na sabirnicama  $S_2$  je:

$$\underline{Z}_{0S2}^{ekv} = j \frac{8,07 \cdot 23,03}{8,07 + 23,03} = j5,98 \Omega.$$

Struje trofaznog kratkog spoja su iste kao u prethodnom slučaju, jer stanje zvezdišta transformatora utiče samo na nulte impedanse sistema, odnosno na struje zemljospoja.

Struja i snaga pri jednofaznom zemljospoju na sabirnicama  $S_1$  su:

$$I_{k1ZS1}^{(b)} = \frac{\sqrt{3}U_{n1}}{\left(X_d^{ekv} + X_i^{ekv} + X_0^{ekv}\right)_{S1}^{(b)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 110}{2 \cdot 2,255 + 2,34} = 27,81 \text{ kA}.$$

Gore proračunata vrednost je nešto niža nego u slučaju a, gde je iznosila 28,27 kA.



$$S_{k1ZS1}^{(b)} = \sqrt{3}U_n I_{k1ZS1}^{(b)} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 27,85 = 5306 \text{ MVA} .$$

Struja i snaga jednofaznog zemljospoja pri kvaru na sabirnicama  $S_2$  su:

$$I_{k1ZS2}^{(b)} = \frac{\sqrt{3}U_{n1}}{\left(X_d^{ekv} + X_i^{ekv} + X_0^{ekv}\right)_{S2}^{(b)}} \frac{110}{36,75} = \frac{\sqrt{3} \cdot 110}{2 \cdot 6,13 + 5,98} \frac{110}{36,75} = 10,445 \cdot 2,993 = 31,26 \text{ kA} . ;$$

$$S_{k1ZS2}^{(b)} = \sqrt{3}U_{n1} I_{k1ZS2}^{(b)} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10,445 = \sqrt{3} \cdot 36,75 \cdot 31,26 = 1990 \text{ MVA} .$$

Znači u slučaju b, snaga jednofaznog zemljospoja je u odnosu na slučaj a) oko 10,9 % manja pri kvaru na sabirnicama  $S_2$ , a svega oko 1,5 % manja, pri kvaru na sabirnicama  $S_1$ . Drugim rečima, otvaranje zvezdišta sekundara jednog od dva paralelna transformatora iz tač. b zadatka prvenstveno utiče na smanjenje snage zemljospoja na sabirnicama sekundara.

□

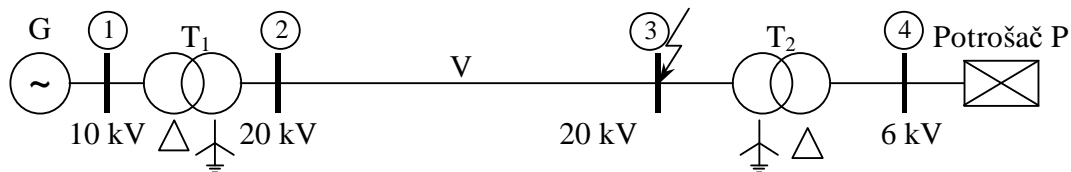
**Zadatak 3.25**

Jednostavan radialni elektroenergetski sistem prikazan na sl. 3.25a, sastoji se od generatora (G), generatorskog blok-transformatora ( $T_1$ ), distributivnog voda (V) i distributivno-potrošačkog transformatora ( $T_2$ ), preko kojeg se napaja industrijski potrošač (P).

a) Proračunati subtranzijentne struje i napone pri dvofaznom kratkom spoju između faza B i C (bez zemljospoja) na sabirnicama 3 transformatora  $T_2$  posredstvom impedanse kvara  $\underline{Z}_k = (4 + j0) \Omega$ , uvažavajući efekat potrošačkog opterećenja.

b) Naći raspodelu struje kvara.

c) Nacrtati fazorske dijagrame napona i struja u tački kvara. Parametri sistema, neophodni za gornje proračune dati su takođe na sl. 3.25a.



$$S_{nG} = 25 \text{ MVA}$$

$$S_{nT1} = 30 \text{ MVA}$$

$$U_{nG} = 10 \text{ kV}$$

$$m_{nT1} = 20/10 \text{ kV/kV}$$

$$X''_{dG} \% = 12,5 \%$$

$$X_{T1} \% = 10,5 \%, \text{ sprega } Y_{0d5}$$

$$\underline{Z}_v = (2 + j4) \Omega$$

$$\underline{Z}_k = (4 + j0) \Omega$$

$$S_{nT2} = 20 \text{ MVA}$$

$$m_{nT2} = 20/6 \text{ kV/kV}$$

$$X_{T2} \% = 5 \%$$

$$\text{sprega } Y_{0d5}$$

$$\underline{S}_p = (10 + j5) \text{ MVA}$$

$$U_p = U_4 = 6 \text{ kV}$$

$$\text{(pre kvara)}$$

**Sl. 3.25a** Monofazna šema i osnovni podaci za sistem iz zadatka 3.25

**Rešenje:**

a1) Proračun impedansi elemenata sistema svedenih na napon sabirnica 3 (20 kV):

$$X''_{dG} = \frac{X''_{dG} \% U_{nG}^2}{100 S_{nG}} m_{nT1}^2 = \frac{12,5 \cdot 10^2}{100 \cdot 25} \left( \frac{20}{10} \right)^2 = 2,0 \Omega;$$

$$X_{T1} = \frac{X_{T1} \% U_{nT1}^2}{100 S_{nT1}} = \frac{10,5 \cdot 20^2}{100 \cdot 30} = 1,40 \Omega;$$

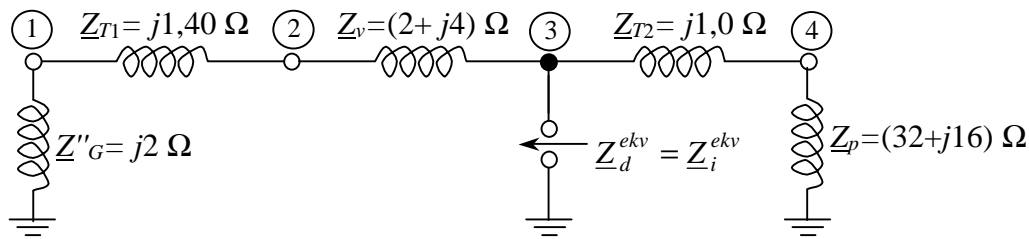
$$\underline{Z}_v = (2 + j4) \Omega;$$

$$X_{T2} = \frac{X_{T2} \% U_{nT2}^2}{100 S_{nT2}} = \frac{5 \cdot 20^2}{100 \cdot 20} = 1,00 \Omega;$$

$$\underline{Z}_p = \frac{U_{np}^2}{\underline{S}_p^*} m_{nT2}^2 = \frac{6^2}{10 - j5} \left( \frac{20}{6} \right)^2 = (32 + j16) \Omega;$$

$$\underline{Z}_k = (4 + j0) \Omega = 4 \Omega / 0^\circ.$$

a2) Ekvivalentna šema mreža direktnih (inverznih) impedansi prikazana je na sl. 3.25b.



Sl. 3.25b Ekvivalentna šema direktnih (inverznih) impedansi sistema sa sl. 3.25a

a3) Struja potrošača pre kvara je:

$$\underline{I}_p = \frac{S_p^*}{\sqrt{3}\underline{U}_p} = \frac{10 - j5}{\sqrt{3} \cdot 6} = (0,962 - j0,481) \text{ kA}.$$

Struja potrošača, svedena na napon 20 kV je:

$$\underline{I}_p^{sv} = \underline{I}_p \frac{6}{20} = (0,289 - j0,145) \text{ kA}.$$

a4) Theveninov napon na sabirnicama 3 pre kvara:

$$\begin{aligned} \underline{U}_3 &= \underline{U}_4^{sv} + j\sqrt{3}X_{T2}\underline{I}_p^{sv} = 6 \cdot \frac{20}{6} + j\sqrt{3} \cdot 1,00 \cdot (0,289 - j0,145) = \\ &= (20,25 + j0,5) = 20,25 \text{ kV} / 1,415^\circ. \end{aligned}$$

a5) Ekvivalentne vrednosti impedansi direktnog i inverznog redosleda sistema, gledano iz tačke 3 su:

$$\underline{Z}_{d3}^{ekv} = \underline{Z}_{i3}^{ekv} = \frac{(2 + j7,4)(32 + j17)}{34 + j24,4} = (2,56 + j6,14) \Omega = 6,64 \Omega / 67,37^\circ;$$

a6) Struje direktnog i inverznog redosleda, pri kvaru na sabirnicama 3 (dvofazni kratak spoj, bez spoja sa zemljom), kroz impedansu luka  $\underline{Z}_k$  su:

$$\begin{aligned} \underline{I}''_{d3} = -\underline{I}''_{i3} &= \frac{\underline{U}_{f3}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_k} = \frac{20,25 / \sqrt{3} / 1,45^\circ}{(2,56 + j6,14) \cdot 2 + 4} = \frac{11,692 / 1,415^\circ}{15,3 / 53,4^\circ} = \\ &= 0,764 / -51,985^\circ = (0,471 - j0,602) \text{ kA}. \end{aligned}$$

a7) Fazne struje na mestu kvara su:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}''_{A3} \\ \underline{I}''_{B3} \\ \underline{I}''_{C3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}''_{d3} \\ \underline{I}''_{i3} \\ \underline{I}''_{03} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}''_{d3} + \underline{I}''_{i3} \\ \underline{a}^2 \underline{I}''_{d3} + \underline{a} \underline{I}''_{i3} \\ \underline{a} \underline{I}''_{d3} + \underline{a}^2 \underline{I}''_{i3} \end{bmatrix}, \text{ jer je } \underline{I}_{03} = 0.$$

Onda je:

$$\underline{I}''_{A3} = 0;$$

$$\begin{aligned} \underline{I}''_{B3} &= (\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{I}''_{d3} = \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \underline{I}''_{d3} = -j\sqrt{3} \underline{I}''_{d3} = \\ &= (-1,043 - j0,816) \text{ kA} = 1,323 \text{ kA} / 218,05^\circ; \end{aligned}$$

$$\underline{I}''_{C3} = (\underline{a} - \underline{a}^2) \underline{I}''_{d3} = -\underline{I}''_{s3} = j\sqrt{3} \underline{I}''_{d3} = (1,043 + j0,816) \text{ kA} = 1,323 \text{ kA} / 38,05^\circ.$$

a8) Naponi simetričnih komponenta na mestu kvara su:

$$\underline{U}_{03} = 0;$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{d3} &= \underline{U}_{f3} - \underline{Z}_d^{ekv} \underline{I}''_{d3} = (11,692 + j0,289) - (2,56 + j6,14) \cdot (0,471 - j0,602) = \\ &= 11,692 + j0,289 - (4,89 + j1,349) = (6,802 - j1,06) \text{ kV} = 6,89 \text{ kV} / -8,86^\circ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{i3} &= -\underline{Z}_i^{ekv} \underline{I}''_{i3} = -(2,56 + j6,14) \cdot (0,471 - j0,602) = \\ &= (4,89 + j1,349) \text{ kV} = 5,073 \text{ kV} / 15,42^\circ. \end{aligned}$$

a9) Fazni i linijski naponi u tački 3 posle kvara su:

$$\underline{U}_{fA3} = \underline{U}_{d3} + \underline{U}_{i3} = 6,802 - j1,06 + 4,89 + j1,349 = (11,692 + j0,289) \text{ kV} = 11,693 \text{ kV} / 1,415^\circ$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{fB3} &= \underline{a}^2 \underline{U}_{d3} + \underline{a} \underline{U}_{i3} = 1 / 240^\circ \cdot 6,89 / -8,86^\circ + 1 / 120^\circ \cdot 5,073 / 15,42^\circ \\ &= (-7,935 - j1,804) \text{ kV} = 8,138 / 188,81^\circ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{fC3} &= \underline{a} \underline{U}_{d3} + \underline{a}^2 \underline{U}_{i3} = 1 / 120^\circ \cdot 6,89 / -8,86^\circ + 1 / 240^\circ \cdot 5,073 / 15,42^\circ \\ &= (-3,763 + j1,517) \text{ kV} = 4,057 / 158,04^\circ. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB}^{(3)} &= \underline{U}_{fA3} - \underline{U}_{fB3} = 11,692 + j0,289 + 7,935 + j1,804 = \\ &= (19,627 + j2,093) \text{ kV} = 19,74 \text{ kV} / 6,09^\circ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{BC}^{(3)} &= \underline{U}_{fB3} - \underline{U}_{fC3} = -7,935 - j1,804 + 3,763 - j1,517 = \\ &= (-4,172 - j3,321) \text{ kV} = 5,33 \text{ kV} / 218,51^\circ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{CA}^{(3)} &= \underline{U}_{fC3} - \underline{U}_{fA3} = -3,763 + j1,517 - 11,692 - j0,289 = \\ &= (-15,455 + j1,228) \text{ kV} = 15,504 \text{ kV} / 175,457^\circ. \end{aligned}$$

Provera:

$$\underline{U}_{AB}^{(3)} + \underline{U}_{BC}^{(3)} + \underline{U}_{CA}^{(3)} = (19,627 + j2,093) + (-4,172 - j3,321) + (-15,455 + j1,228) = 0$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{Z}_K \underline{I}''_{B3} = 4 \cdot (-1,043 - j0,816) = 5,33 \text{ kV} / 218,038^\circ$$

(Trebalo da bude  $\underline{U}_{BC} = 5,33 \text{ kV} / 218,51^\circ$ ; postoji mala računaska greška u veličini faznog stava  $\underline{U}_{BC}$ , usled zaokruživanja rezultata).

b) Raspodela struje kvara nalazi se iz jednačina:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{dL} \underline{I}''_{dL} &= \underline{Z}_{dD} \underline{I}''_{dD} = \underline{Z}_d^{ekv} \underline{I}''_{d3}; & \underline{I}''_{dL} + \underline{I}''_{dD} &= \underline{I}''_{d3}; \\ \underline{Z}_{iL} \underline{I}''_{iL} &= \underline{Z}_{iD} \underline{I}''_{iD} = \underline{Z}_i^{ekv} \underline{I}''_{i3}; & \underline{I}''_{iL} + \underline{I}''_{iD} &= \underline{I}''_{i3},\end{aligned}$$

gde je:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{dL} &= \underline{Z}_{iL} = j2,0 + j1,40 + (2,0 + j4,0) = (2 + j7,40) \Omega; \\ \underline{Z}_{dD} &= \underline{Z}_{iD} = j1,0 + (32 + j16) = (32 + j17) \Omega; \\ \underline{Z}_d^{ekv} &= \underline{Z}_i^{ekv} = (2,56 + j6,14) \Omega; \\ \underline{I}''_{dL} &= -\underline{I}''_{iL}; \quad \underline{I}''_{dD} = -\underline{I}''_{iD}.\end{aligned}$$

Onda je:

$$\begin{aligned}\underline{I}''_{dL} &= \frac{\underline{Z}_d^{ekv}}{\underline{Z}_{dL}} \underline{I}''_{d3} = \frac{2,56 + j6,14}{2,0 + j7,4} (0,471 - j0,602) = \\ &= \frac{6,64 / 67,37^\circ}{7,67 / 74,88^\circ} 0,764 / -51,95^\circ = 0,662 \text{ kA} / -59,46^\circ = (0,336 - j0,570) \text{ kA};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{I}''_{dD} &= \frac{\underline{Z}_d^{ekv}}{\underline{Z}_{dD}} \underline{I}''_{d3} = \frac{2,56 + j6,14}{32 + j17} (0,471 - j0,602) = \\ &= \frac{6,64 / 67,37^\circ}{36,24 / 27,98^\circ} 0,764 / -51,95^\circ = 0,14 \text{ kA} / -12,56^\circ = (0,137 - j0,031) \text{ kA}.\end{aligned}$$

Provera:

$$\begin{aligned}\underline{I}''_{dL} + \underline{I}''_{dD} &= 0,336 - j0,570 + 0,137 - j0,031 = \\ &= (0,473 - j0,601) \text{ kA} \approx \underline{I}''_{d3} = (0,471 - j0,602) \text{ kA}; \\ \underline{I}''_{iL} &= -\underline{I}''_{dL} = (-0,336 + j0,570) \text{ kA} = 0,662 \text{ kA} / 120,54^\circ; \\ \underline{I}''_{iD} &= -\underline{I}''_{dD} = (-0,137 + j0,031) \text{ kA} = 0,140 \text{ kA} / 167,44^\circ; \\ \underline{I}''_{AL} &= \underline{I}''_{dL} + \underline{I}''_{iL} = 0; \quad \underline{I}''_{AD} = \underline{I}''_{dD} + \underline{I}''_{iD} = 0; \\ \underline{I}''_{BL} &= \underline{a}^2 \underline{I}''_{dL} + \underline{a} \underline{I}''_{iL} = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{I}''_{dL} = -j\sqrt{3} \underline{I}''_{dL} = \\ &= -j\sqrt{3} (0,336 - j0,570) = (-0,988 - j0,582) \text{ kA} = 1,147 \text{ kA} / 210,5^\circ; \\ \underline{I}''_{BD} &= \underline{a}^2 \underline{I}''_{dD} + \underline{a} \underline{I}''_{iD} = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{I}''_{dD} = -j\sqrt{3} \underline{I}''_{dD} = \\ &= -j\sqrt{3} (0,137 - j0,031) = (-0,054 - j0,237) \text{ kA} = 0,243 \text{ kA} / 257,17^\circ.\end{aligned}$$

Provera:

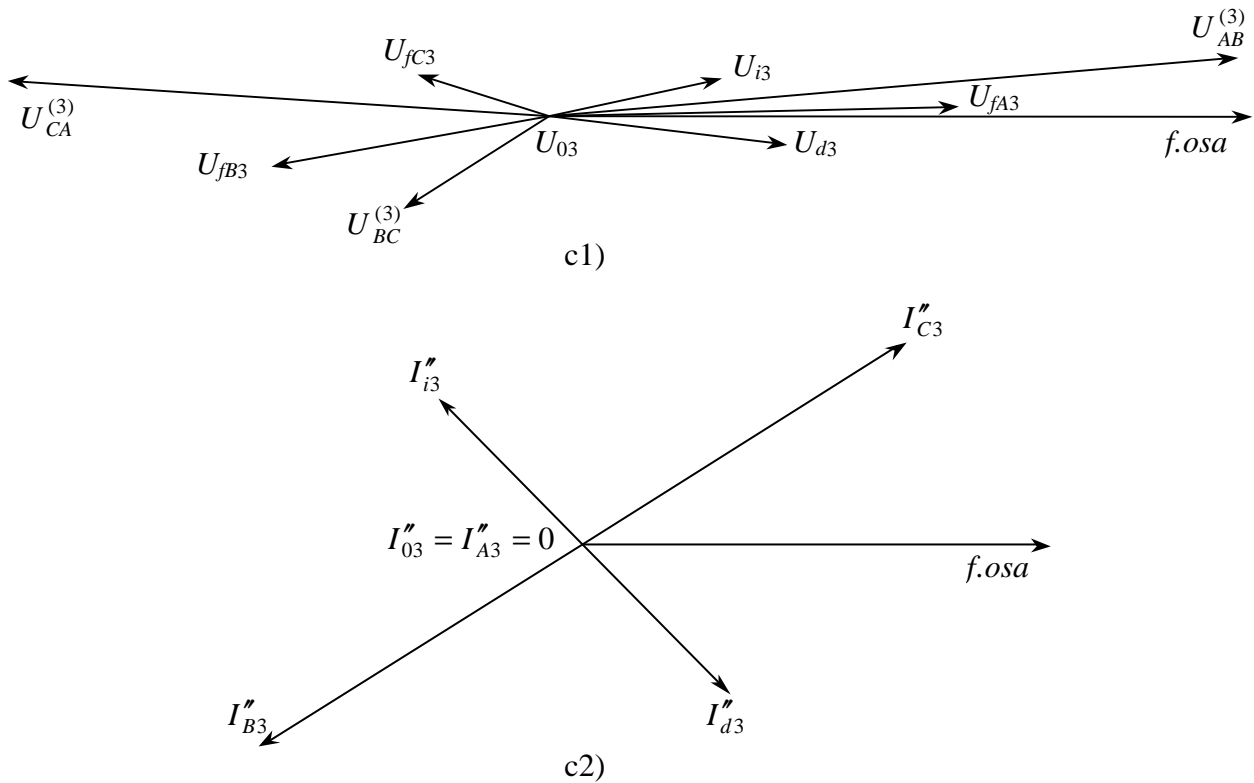
$$\underline{I}''_{B3} = \underline{I}''_{BL} + \underline{I}''_{BD} = (-0,988 - j0,582) + (-0,054 - j0,237) = (-1,042 - j0,819) \text{ kA},$$

(ranije je proračunato:  $(-1,043 - j0,816)$ ).

$$\underline{I}''_{CL} = -\underline{I}''_{BL} = (0,988 + j0,582) \text{ kA} = 1,147 \text{ kA} / 30,5^\circ;$$

$$\underline{I}''_{CD} = -\underline{I}''_{BD} = (0,054 + j0,237) \text{ kA} = 0,243 \text{ kA} / 77,17^\circ.$$

c) Fazorski dijagrami napona i struja u tački 3, posle kvara, prikazani su na sl. 3.25c:



Sl. 3.25c Fazorski dijagram napona (c1) i struja (c2) na mestu kvara (posle nastanka kvara)



**Zadatak 3.26**

Jednostavan radijalni elektroenergetski sistem prikazan na sl. 3.26a izložen je dvofaznom zemljospoju (faze B i C) na sabirnicama 3.

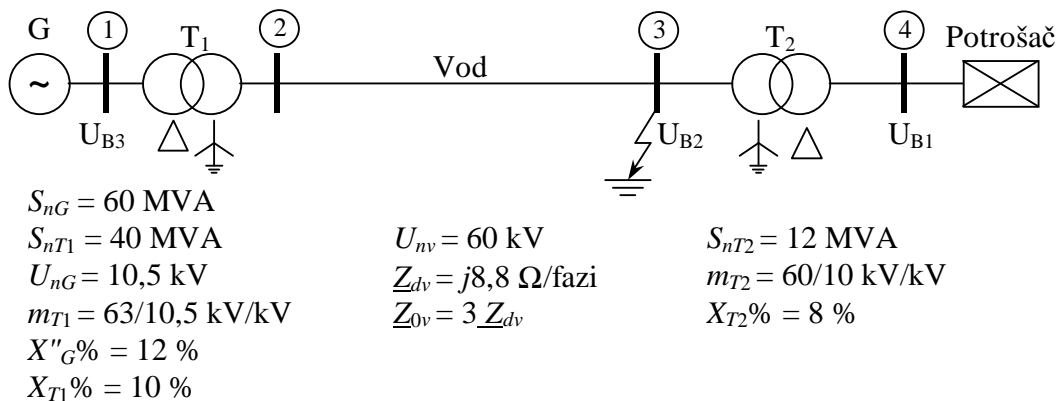
a) Uz pretpostavku da je impedansa luka  $\underline{Z}_k = 0$ , impedanse sistema  $\underline{Z}_d = \underline{Z}_i$ , izračunati veličinu struje kvara, prema kojoj treba proveriti opasnost od napona koraka i dodira, pod pretpostavkom da je potrošač na sabirnicama 4 pasivan, a napon na sabirnicama 3 u trenutku kvara  $U_3 = 63$  kV.

b) Ako se sa  $k$  obeleži moduo odnosa ekvivalentnih impedansi  $\left| \frac{\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv}} \right|$  na mestu kvara, korišćenjem približnih izraza koji daju struju kvara u funkciji od  $k$ , izvedenih u zadatku 3.3, odrediti tip kvara i veličinu struje, prema kojoj treba proveriti snagu prekidanja prekidača na sabirnicama 3.

c) Naći napon zdrave faze na sabirnicama 3 posle kvara koristeći formulu izvedenu u zadatku 3.4.

Proračun sprovedi koristeći sistem relativnih jedinica sa  $S_B = 60$  MVA i  $U_{B2} = 60$  kV (na kraju izračunati i sve tražene apsolutne vrednosti struja i napona iz tačaka a, b, c).

Osnovni podaci neophodni za proračune, dati su na sl. 3.26a.



**Sl. 3.26a** Monofazna šema i osnovni podaci elemenata sistema iz zadatka 3.26

**Rešenje:**

a1) Proračun baznih vrednosti napona, struja i impedansi za  $S_B = 60$  MVA i  $U_{B2} = 60$  kV:

$$U_{B1} = 60 \frac{10}{60} = 10 \text{ kV}; \quad I_{B1} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B1}} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 10} = 3,464 \text{ kA}; \quad Z_{B1} = \frac{U_{B1}^2}{S_B} = \frac{10^2}{60} = 1,667 \Omega.$$

$$U_{B2} = 60 \text{ kV}; \quad I_{B2} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B2}} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 60} = 0,5774 \text{ kA}; \quad Z_{B2} = \frac{U_{B2}^2}{S_B} = \frac{60^2}{60} = 60 \Omega.$$

$$U_{B3} = 60 \frac{10,5}{63} = 10 \text{ kV}; \quad I_{B3} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B3}} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 10} = 3,464 \text{ kA}; \quad Z_{B3} = \frac{U_{B3}^2}{S_B} = \frac{10^2}{60} = 1,667 \Omega.$$

$$\underline{Z}_{dG} = jX_{dG} = j \frac{X_{dG}\%}{100} \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \frac{1}{Z_{B3}} = j \frac{12}{100} \frac{10,5^2}{60} \frac{1}{1,667} = j0,132 \text{ r.j.};$$

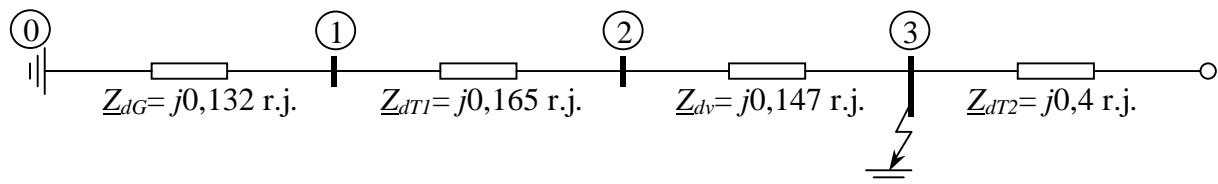
$$\underline{Z}_{dT1} = jX_{dT1} = j \frac{X_{T1} \% U_{nT1}^2}{100 S_{nT1} Z_{B2}} \frac{1}{Z_{B2}} = j \frac{10 \cdot 63^2}{100 \cdot 40 \cdot 60} = j0,165 \text{ r.j.}$$

$$\underline{Z}_{OT1} = \underline{Z}_{dT1} = j0,165 \text{ r.j.};$$

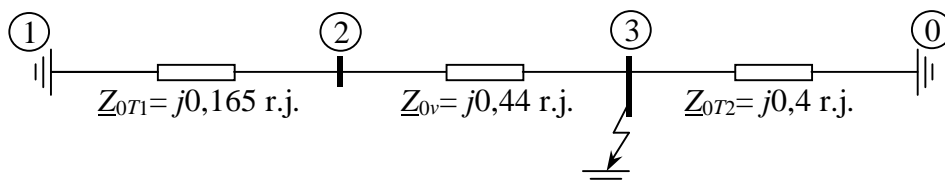
$$\underline{Z}_{dv} = jX_{dv} = j \frac{8,8}{60} = j0,147 \text{ r.j.}; \quad \underline{Z}_{0v} = 3\underline{Z}_{dv} = j0,44 \text{ r.j.};$$

$$\underline{Z}_{dT2} = jX_{dT2} = j \frac{X_{T2} \% U_{nT2}^2}{100 S_{nT2} Z_{B2}} \frac{1}{Z_{B2}} = j \frac{8 \cdot 60^2}{100 \cdot 12 \cdot 60} = j0,4 \text{ r.j.}; \quad \underline{Z}_{OT2} = \underline{Z}_{dT2} = j0,4 \text{ r.j.};$$

Mreža sistema direktnog (inverznog) redosleda, prikazana je na sl. 3.26b, a sistema nultog redosleda, na sl. 3.26c.



Sl. 3.26b Mreža sistema direktnog (inverznog) redosleda



Slika 3.26c Mreža sistema nultog redosleda

Sa prethodnih slika se dobijaju ekvivalentne impedanse simetričnih komponenta, gledano sa mesta kvara:

$$\underline{Z}_{d3}^{ekv} = \underline{Z}_{i3}^{ekv} = j(0,132 + 0,165 + 0,147) = j0,444 \text{ r.j.};$$

$$\underline{Z}_{03}^{ekv} = j \frac{(0,165 + 0,44) \cdot 0,4}{0,605 + 0,4} = j \frac{0,605 \cdot 0,4}{1,005} = j0,2408 \text{ r.j.}$$

a2) Proračun nulte komponente struje dvofaznog zemljospoja na sabirnicama 3:

$$I_0 = \frac{U_{f3} X_i^{ekv}}{X_d^{ekv} X_i^{ekv} + X_d^{ekv} X_0^{ekv} + X_i^{ekv} X_0^{ekv}} = \frac{63/60}{X_d^{ekv} + 2X_0^{ekv}} =$$

$$= \frac{1,05}{0,444 + 2 \cdot 0,2408} = 1,134 \text{ r.j.} = 1,134 \cdot 0,5774 = 0,655 \text{ kA};$$

Za proračun napona koraka i dodira, pri dvofaznom zemljospoju, merodavna je trostruka vrednost nulte komponente struje kvara:

$$3I_0 = 3 \cdot 1,134 \text{ r.j.} = 3,403 \text{ r.j.} = 3,403 \cdot 0,5774 = 1,965 \text{ kA}.$$



Raspodela trostruke struje nultog redosleda, dobija se sa sl. 3.26c, shodno formulama:

$$3I_{013} = \frac{X_{0T2}}{X_{013} + X_{0T2}} \cdot 3I_0 = \frac{0,4}{0,605 + 0,4} \cdot 3,403 = 1,354 \text{ r.j.} = 0,782 \text{ kA};$$

$$3I_{003} = \frac{X_{013}}{X_{013} + X_{0T2}} \cdot 3I_0 = \frac{0,605}{0,605 + 0,4} \cdot 3,403 = 2,049 \text{ r.j.} = 1,183 \text{ kA}.$$

Za proveru napona koraka i dodira, u postrojenju kod sabirnica 3, merodavna je znači struja  $3I_{003} = 1,183 \text{ kA}$ , tj. trostruka struja nultog redosleda, koja na mesto kvara (tačka 3) dotiče iz napojne mreže (sa strane potrošača).

b) Proračun merodavne struje isključenja prekidača na sabirnicama 3, shodno uprošćenim formulama iz zadatka 3.3.

Struja trofaznog kratkog spoja na sabirnicama 3 je:

$$I_{k3} = \frac{U_{f3}^{pk}}{X_{d3}^{eq}} = \frac{1,05}{0,444} = 2,365 \text{ r.j.} = 1,366 \text{ kA}.$$

Struja dvofaznog kratkog spoja na sabirnicama 3 je:

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3} = 0,866 \cdot 2,365 \text{ r.j.} = 2,048 \text{ r.j.} = 1,183 \text{ kA}.$$

Struja dvofaznog zemljospoja na sabirnicama 3, za  $k = X_{03}^{ekv} / X_{d3}^{ekv} = 0,2408 / 0,444 = 0,542$  prema uprošćenoj formuli iz zadatka 3.3 je:

$$I_{k2Z} = I_{k3} \frac{\sqrt{3} \sqrt{k^2 + k + 1}}{1 + 2k} = 2,365 \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,542^2 + 0,542 + 1}}{1 + 2 \cdot 0,542} = 2,663 \text{ r.j.} = 1,538 \text{ kA}$$

Struja jednofaznog zemljospoja na sabirnicama 3, prema uprošćenoj formuli iz zadatka 3.3, za  $k = 0,542$  je:

$$I_{k1Z} = I_{k3} \frac{3}{2 + k} = 2,365 \frac{3}{2 + 0,542} = 2,791 \text{ r.j.} = 1,612 \text{ kA}.$$

Za dimenzionisanje prekidača na sabirnicama 60 kV na kraju voda, merodavna je znači struja jednofaznog zemljospoja, koja iznosi 1,612 kA.

c) Napon zdrave faze (A) na sabirnicama 3, posle dvofaznog zemljospoja (faze B i C) za  $k = 0,542$ , shodno uprošćenom obrascu izvedenom u zadatku 3.4 je:

$$U_{fA} = \frac{3k}{2k + 1} U_{f3} = \frac{3 \cdot 0,542}{2 \cdot 0,542 + 1} U_{f3} = 0,78 \cdot U_{f3} = 0,78 \cdot 1,05 = 0,819 \text{ r.j.} = 28,37 \text{ kV}.$$

□

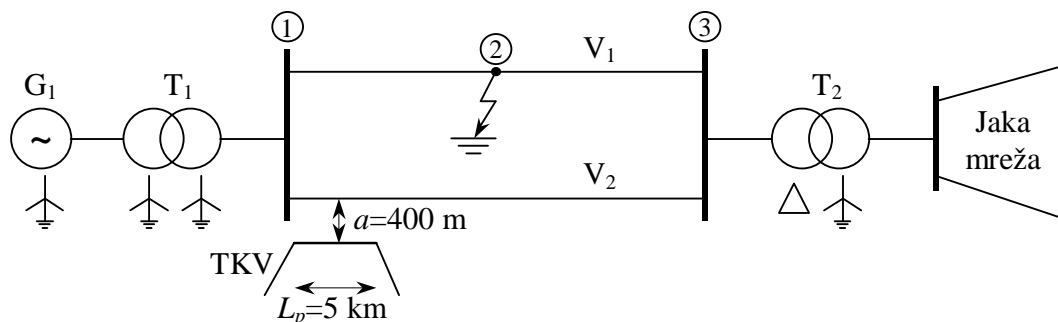
**Zadatak 3.27**

Za mrežu sa sl. 3.27a:

a) Odrediti matrice impedansi direktnog, inverznog i nultog redosleda za proračun kratkih spojeva matričnom metodom.

b) Izračunati kolika je indukovana elektromotorna sila u telekomunikacionom vodu za slučaj jednofaznog kratkog spoja na mestu koje se nalazi na polovini voda  $V_1$ . Vodovi  $V_1$  i  $V_2$  su paralelno vođeni i njihovo međusobno rastojanje je 50 metara.

*Napomena:* Za bazne vrednosti usvojiti  $S_B = 100$  MVA i  $U_B = 220$  kV. Napon na mestu kvara pre kvara je 1 r.j. Ostali podaci o parametrima elemenata sistema, dati su u tab. 3.27a.



**Sl. 3.27a** Monofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.27

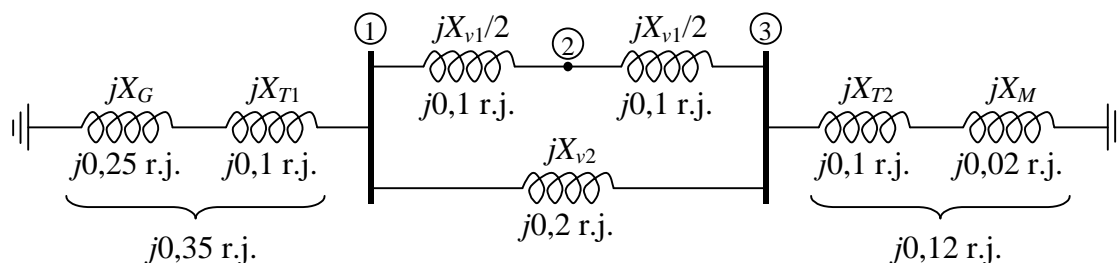
**Tab. 3.27a** Parametri sistema sa sl. 3.27a

	G1	T1	T2	V1	V2	Mreža
$X_d = X_i$ (r.j.)	0,25	0,1	0,1	0,2	0,2	0,02
$X_0$ (r.j.)	0,1	0,1	0,1	0,6	0,6	0,05

**Rešenje:**

Radi određivanja indukovane elektromotorne sile u TK vodu potrebno je najpre odrediti matrice direktnog, inverznog i nultog redosleda.

Ekvivalentna šema sistema za direktni i inverzni redosled je ista i predstavljena je na sl. 3.27b.



**Sl. 3.27b** Mreže impedansi direktnog i inverznog redosleda sistema sa sl. 3.27a

U prethodnoj šemi sa sl. 3.27b imaju se praktično tri čvora i pet grana pa je za dobijanje matrice impedansi direktnog i inverznog redosleda potrebno sprovesti sledećih pet koraka:

1. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 1$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,35$  r.j.):

$$\underline{Z}_d = [\underline{Z}_{gr}] = j[0,35].$$

2. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 2$ ) i starog čvora ( $i = 1$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,1$  r.j.):

$$\underline{Z}_d^{post} = \left[ \begin{array}{c|c} \underline{Z}_d^{pre} & \underline{Z}_d^{pre}(1,i) \\ \hline \underline{Z}_d^{pre}(i,1) & \underline{Z}_{gr} + \underline{Z}_d^{pre}(i,i) \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,35 & 0,35 \\ 0,35 & 0,45 \end{bmatrix}.$$

3. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 3$ ) i starog čvora ( $i = 1$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,2$  r.j.):

$$\underline{Z}_d^{post} = \left[ \begin{array}{cc|c} \underline{Z}_d^{pre} & & \underline{Z}_d^{pre}(1,i) \\ & & \underline{Z}_d^{pre}(2,i) \\ \hline \underline{Z}_d^{pre}(i,1) & \underline{Z}_d^{pre}(i,2) & \underline{Z}_{gr} + \underline{Z}_d^{pre}(i,i) \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,35 & 0,35 & 0,35 \\ 0,35 & 0,45 & 0,35 \\ 0,35 & 0,35 & 0,55 \end{bmatrix}.$$

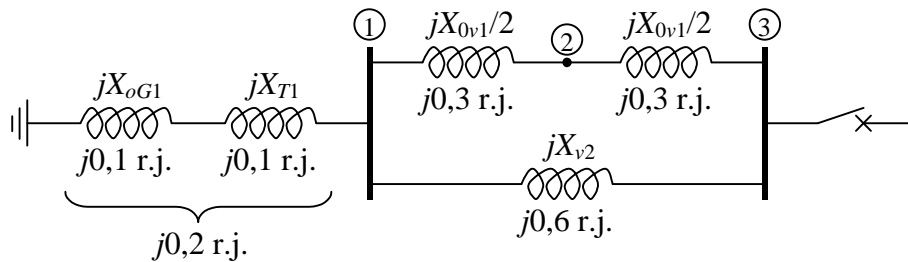
4. korak: Dodavanje grane između dva stara čvora ( $i = 2, j = 3$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,1$  r.j.):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_d^{post} &= \underline{Z}_d^{pre} - \Delta \underline{Z}_d = \underline{Z}_d^{pre} - \\ & \frac{1}{\underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_d^{pre}(j,j) - 2\underline{Z}_d^{pre}(i,j) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) - \underline{Z}_d^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) - \underline{Z}_d^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(3,i) - \underline{Z}_d^{pre}(3,j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) - \underline{Z}_d^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) - \underline{Z}_d^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(3,i) - \underline{Z}_d^{pre}(3,j) \end{bmatrix}^T \\ \underline{Z}_d^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,35 & 0,35 & 0,35 \\ 0,35 & 0,45 & 0,35 \\ 0,35 & 0,35 & 0,55 \end{bmatrix} - \frac{1}{j(0,45 + 0,55 - 2 \cdot 0,35 + 0,1)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,35 - 0,35 \\ 0,45 - 0,35 \\ 0,35 - 0,55 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,35 - 0,35 \\ 0,45 - 0,35 \\ 0,35 - 0,55 \end{bmatrix}^T \\ \underline{Z}_d^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,35 & 0,35 & 0,35 \\ 0,35 & 0,425 & 0,4 \\ 0,35 & 0,4 & 0,45 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

5. korak: Dodavanje grane između starog čvora ( $i = 3$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,12$  r.j.):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_d^{post} &= \underline{Z}_d^{pre} - \Delta \underline{Z}_d = \underline{Z}_d^{pre} - \frac{1}{\underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(3,i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(3,i) \end{bmatrix}^T \\ \underline{Z}_d^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,35 & 0,35 & 0,35 \\ 0,35 & 0,425 & 0,4 \\ 0,35 & 0,4 & 0,45 \end{bmatrix} - \frac{1}{j(0,45 + 0,12)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,35 \\ 0,4 \\ 0,45 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,35 \\ 0,4 \\ 0,45 \end{bmatrix}^T \\ \underline{Z}_d^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,1351 & 0,1044 & 0,0737 \\ 0,1044 & 0,1443 & 0,0842 \\ 0,0737 & 0,0842 & 0,0947 \end{bmatrix} = \underline{Z}_d = \underline{Z}_i. \end{aligned}$$

Ekvivalentna šema za impedanse nultog redosleda data je na sl. 3.27c.



Sl. 3.27c Mreža impedansi nultog redosleda sistema sa sl. 3.27a

U prethodnoj šemi na sl. 3.27c ima praktično 3 čvora i 4 grane pa je potrebno sprovesti 4 koraka u cilju dobijanja matrice impedansi za nulti redosled.

1. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 1$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,2$  r.j.):

$$\underline{Z}_0 = [\underline{Z}_{gr}] = j[0,2].$$

2. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 2$ ) i starog čvora ( $i = 1$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,3$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \left[ \begin{array}{c|c} \underline{Z}_0^{pre} & \underline{Z}_0^{pre}(1,i) \\ \hline \underline{Z}_0^{pre}(i,1) & \underline{Z}_{gr} + \underline{Z}_0^{pre}(i,i) \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,5 \end{bmatrix}.$$

3. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 3$ ) i starog čvora ( $i = 1$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,6$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \left[ \begin{array}{cc|c} \underline{Z}_0^{pre} & & \underline{Z}_0^{pre}(1,i) \\ & & \underline{Z}_0^{pre}(2,i) \\ \hline \underline{Z}_0^{pre}(i,1) & \underline{Z}_0^{pre}(i,2) & \underline{Z}_{gr} + \underline{Z}_0^{pre}(i,i) \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,5 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 \end{bmatrix}.$$

4. korak: Dodavanje grane između dva stara čvora ( $i = 2, j = 3$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,3$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \underline{Z}_0^{pre} - \Delta \underline{Z}_0 = \underline{Z}_0^{pre} - \frac{1}{\underline{Z}_0^{pre}(i,i) + \underline{Z}_0^{pre}(j,j) - 2 \cdot \underline{Z}_0^{pre}(i,j) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_0^{pre}(1,i) - \underline{Z}_0^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(2,i) - \underline{Z}_0^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(3,i) - \underline{Z}_0^{pre}(3,j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_0^{pre}(1,i) - \underline{Z}_0^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(2,i) - \underline{Z}_0^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(3,i) - \underline{Z}_0^{pre}(3,j) \end{bmatrix}^T$$

$$\underline{Z}_0^{post} = j \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,5 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 \end{bmatrix} - \frac{1}{j(0,5 + 0,8 - 2 \cdot 0,2 + 0,3)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,2 - 0,2 \\ 0,5 - 0,2 \\ 0,2 - 0,8 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,2 - 0,2 \\ 0,5 - 0,2 \\ 0,2 - 0,8 \end{bmatrix}^T$$

$$\underline{\mathbf{Z}}_0^{post} = j \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,425 & 0,35 \\ 0,2 & 0,35 & 0,5 \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{Z}}_0.$$

Na osnovu izračunatih matrica impedansi za direktni, inverzni i nulti redosled, mogu se odrediti simetrične komponente struje na mestu jednofaznog kratkog spoja:

$$\underline{I}_{d2} = \underline{I}_{i2} = \underline{I}_{02} = \frac{U_{fr}}{\underline{\mathbf{Z}}_d(2,2) + \underline{\mathbf{Z}}_i(2,2) + \underline{\mathbf{Z}}_0(2,2)} = \frac{1}{2 \cdot j0,1443 + j0,425} = -j1,401 \text{ r.j.}$$

Da bi se odredila indukovana elektromotorna sila u TK vodu potrebno je odrediti vrednosti nultih struja po oba voda. Najpre će se odrediti nulti naponi u čvorovima 1 i 2:

$$\underline{U}_{01} = -\underline{\mathbf{Z}}_0(1,2) \cdot \underline{I}_{02} = -j0,2 \cdot (-j1,401) = -0,2802 \text{ r.j.};$$

$$\underline{U}_{02} = -\underline{\mathbf{Z}}_0(2,2) \cdot \underline{I}_{02} = -j0,425 \cdot (-j1,401) = -0,595 \text{ r.j.}$$

Na osnovu vrednosti nultih komponenta napona u čvorovima 1 i 2 mogu se izračunati nulte komponente struje na oba voda:

$$\underline{I}_{0v1} = \frac{(\underline{U}_{01} - \underline{U}_{02})}{\underline{\mathbf{Z}}_{012}^{gr}} = \frac{(-0,2802 + 0,595)}{j0,3} = -j1,049 \text{ r.j.} \rightarrow |\underline{I}_{0v1}| = 1,049 \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{0v2} = \frac{(\underline{U}_{01} - \underline{U}_{02})}{\underline{\mathbf{Z}}_{013}^{gr} + \underline{\mathbf{Z}}_{023}^{gr}} = \frac{(-0,2802 + 0,595)}{j0,6 + j0,3} = -j0,3498 \text{ r.j.} \rightarrow |\underline{I}_{0v2}| = 0,3498 \text{ r.j.}$$

Na osnovu bazne vrednosti za struju:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 220} = 0,262 \text{ kA},$$

mogu se izračunati vrednosti nulte komponente struja vodova u amperima:

$$|\underline{I}_{0v1}| = 1,049 \cdot 0,262 = 0,2753 \text{ kA} = 275,3 \text{ A};$$

$$|\underline{I}_{0v2}| = 0,3498 \cdot 0,262 = 0,0918 \text{ kA} = 91,8 \text{ A}.$$

Ukupna elektromotorna sila koja se indukuje u TK vodu jednaka je zbiru elektromotornih sila koje su posledica uticaja nultih struja u pojedinačnim vodovima:

$$E_{v1} = 3|\underline{I}_{0v1}| \cdot 2\pi f L_p \frac{4}{\sqrt{a_1}} = 3 \cdot 0,2753 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot \frac{4}{\sqrt{450}} = 244,63 \text{ V};$$

$$E_{v2} = 3|\underline{I}_{0v2}| \cdot 2\pi f L_p \frac{4}{\sqrt{a_2}} = 3 \cdot 0,0918 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot \frac{4}{\sqrt{400}} = 86,52 \text{ V};$$

$$E_{\Sigma} = E_{v1} + E_{v2} = 331,15 \text{ V}.$$

□

**Zadatak 3.28**

Na sl. 3.28a dat je jedan elektroenergetski sistem. Parametri elemenata sistema dati su u tab. 3.28a.

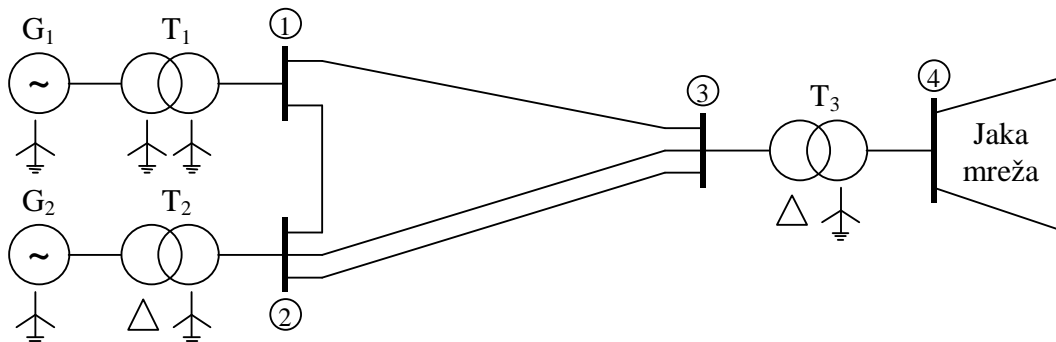
a) Odrediti matrice impedansi direktnog, inverznog i nultog redosleda za proračun kratkih spojeva matričnom metodom.

b) Odrediti fazne struje kroz transformator  $T_3$  u dva slučaja:

b1) Za jednofazni kratki spoj na sabirnicama 3.

b2) Za jednofazni kratki spoj na sabirnicama 4.

*Napomena:* Napon na mestu kvara pre kvara je 1 r.j.



**Sl. 3.28a** Monofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.28

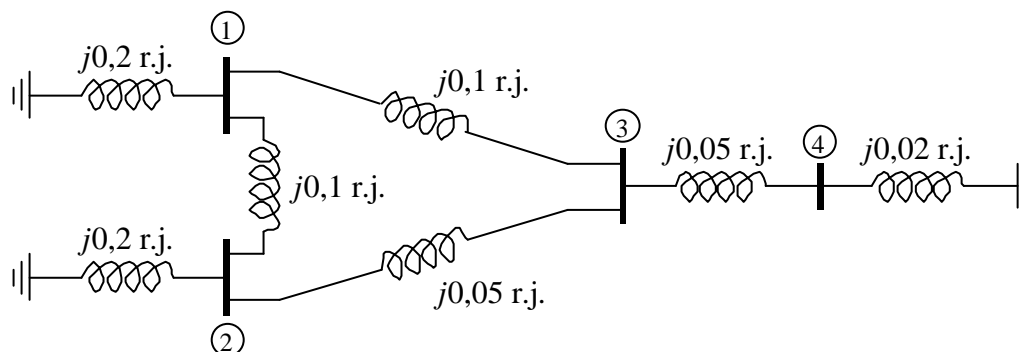
**Tab. 3.28a** Parametri sistema sa sl. 3.28a

	$G_1$	$G_2$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{23}^*$	Mreža
$X_d = X_i$ (r.j.)	0,14	0,14	0,06	0,06	0,05	0,1	0,1	0,1*	0,02
$X_0$ (r.j.)	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,3	0,3	0,3*	0,05

\* Podaci za jedan vod

**Rešenje:**

a) Ekvivalentna šema za impedanse direktnog i inverznog redosleda je ista i predstavljena je na sl. 3.28b.



**Sl. 3.28b** Mreža impedansi direktnog i inverznog redosleda sistema sa sl. 3.28a

Na prethodnoj šemi (sa sl. 3.28b) već su ekvivalentovane impedanse generatora  $G_1$  i transformatora  $T_1$ , generatora  $G_2$  i transformatora  $T_2$  i dva paralelno vezana voda između sabirnica 2 i 3. Prethodna šema ima 4 čvora i 7 grana pa je potrebno sprovesti sledećih 7 koraka za dobijanje matrice impedansi direktnog i inverznog redosleda:

1. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 1$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,2$  r.j.):

$$\underline{Z}_d = [\underline{Z}_{gr}] = j[0,2].$$

2. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 2$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,2$  r.j.):

$$\underline{Z}_d^{post} = \left[ \begin{array}{c|c} \underline{Z}_d^{pre} & 0 \\ \hline 0 & \underline{Z}_{gr} \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{bmatrix}.$$

3. korak: Dodavanje grane između dva stara čvora ( $i = 1, j = 2$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,1$  r.j.):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_d^{post} &= \underline{Z}_d^{pre} - \Delta \underline{Z}_d = \underline{Z}_d^{pre} - \\ &- \frac{1}{\underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_d^{pre}(j,j) - 2\underline{Z}_d^{pre}(i,j) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) - \underline{Z}_d^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) - \underline{Z}_d^{pre}(2,j) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) - \underline{Z}_d^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) - \underline{Z}_d^{pre}(2,j) \end{bmatrix}^T; \\ \underline{Z}_d^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{bmatrix} - \frac{1}{j(0,2 + 0,2 - 2 \cdot 0 + 0,1)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,2 - 0 \\ 0 - 0,2 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,2 - 0 \\ 0 - 0,2 \end{bmatrix}^T = j \begin{bmatrix} 0,12 & 0,08 \\ 0,08 & 0,12 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

4. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 3$ ) i starog čvora ( $i = 1$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,1$  r.j.):

$$\underline{Z}_d^{post} = \left[ \begin{array}{cc|c} \underline{Z}_d^{pre} & & \underline{Z}_d^{pre}(1,i) \\ & & \underline{Z}_d^{pre}(2,i) \\ \hline \underline{Z}_d^{pre}(i,1) & \underline{Z}_d^{pre}(i,2) & \underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_{gr} \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,12 & 0,08 & 0,12 \\ 0,08 & 0,12 & 0,08 \\ 0,12 & 0,08 & 0,22 \end{bmatrix}.$$

5. korak: Dodavanje grane između dva stara čvora ( $i = 2, j = 3$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,05$  r.j.):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_d^{post} &= \underline{Z}_d^{pre} - \Delta \underline{Z}_d = \underline{Z}_d^{pre} - \\ &- \frac{1}{\underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_d^{pre}(j,j) - 2\underline{Z}_d^{pre}(i,j) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) - \underline{Z}_d^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) - \underline{Z}_d^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(3,i) - \underline{Z}_d^{pre}(3,j) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) - \underline{Z}_d^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) - \underline{Z}_d^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(3,i) - \underline{Z}_d^{pre}(3,j) \end{bmatrix}^T; \\ \underline{Z}_d^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,12 & 0,08 & 0,12 \\ 0,08 & 0,12 & 0,08 \\ 0,12 & 0,08 & 0,22 \end{bmatrix} - \frac{1}{j(0,12 + 0,22 - 2 \cdot 0,08 + 0,05)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,08 - 0,12 \\ 0,12 - 0,08 \\ 0,08 - 0,22 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,08 - 0,12 \\ 0,12 - 0,08 \\ 0,08 - 0,22 \end{bmatrix}^T; \\ \underline{Z}_d^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,113 & 0,087 & 0,0957 \\ 0,087 & 0,113 & 0,1043 \\ 0,0957 & 0,1043 & 0,1348 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

6. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 4$ ) i starog čvora ( $i = 3$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,05$  r.j.):

$$\underline{Z}_d^{post} = \begin{bmatrix} & & & \underline{Z}_d^{pre}(1,i) \\ & \underline{Z}_d^{pre} & & \underline{Z}_d^{pre}(2,i) \\ & & & \underline{Z}_d^{pre}(3,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(i,1) & \underline{Z}_d^{pre}(i,2) & \underline{Z}_d^{pre}(i,3) & \underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_{gr} \end{bmatrix};$$

$$\underline{Z}_d^{post} = j \begin{bmatrix} 0,113 & 0,087 & 0,0957 & 0,0957 \\ 0,087 & 0,113 & 0,1043 & 0,1043 \\ 0,0957 & 0,1043 & 0,1348 & 0,1348 \\ 0,0957 & 0,1043 & 0,1348 & 0,1848 \end{bmatrix}.$$

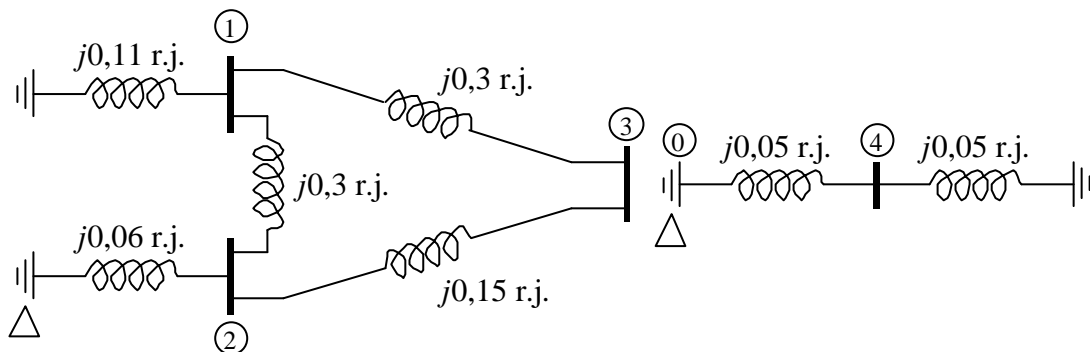
7. korak: Dodavanje grane između starog čvora ( $i = 4$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,02$  r.j.):

$$\underline{Z}_d^{post} = \underline{Z}_d^{pre} - \Delta \underline{Z}_d = \underline{Z}_d^{pre} - \frac{1}{\underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(3,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(4,i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(3,i) \\ \underline{Z}_d^{pre}(4,i) \end{bmatrix}^T$$

$$\underline{Z}_d^{post} = j \begin{bmatrix} 0,113 & 0,087 & 0,0957 & 0,0957 \\ 0,087 & 0,113 & 0,1043 & 0,1043 \\ 0,0957 & 0,1043 & 0,1348 & 0,1348 \\ 0,0957 & 0,1043 & 0,1348 & 0,1848 \end{bmatrix} - \frac{1}{j(0,1848 + 0,02)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,0957 \\ 0,1043 \\ 0,1348 \\ 0,1848 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,0957 \\ 0,1043 \\ 0,1348 \\ 0,1848 \end{bmatrix}^T$$

$$\underline{Z}_d^{post} = j \begin{bmatrix} 0,0684 & 0,0382 & 0,0327 & 0,0093 \\ 0,0382 & 0,0599 & 0,0357 & 0,0102 \\ 0,0327 & 0,0357 & 0,0461 & 0,0132 \\ 0,0093 & 0,0102 & 0,0132 & 0,018 \end{bmatrix} = \underline{Z}_d = \underline{Z}_i.$$

Ekvivalentna šema za impedanse nultog redosleda data je na sl. 3.28c.



Sl. 3.28c Mreža impedansi nultog redosleda sistema sa sl. 3.28a



Na prethodnoj šemi (sl. 3.28c) već su ekvivalentovane impedanse generatora  $G_1$  i transformatora  $T_1$  i dva paralelno vezana voda između sabirnica 2 i 3. Prethodna šema ima 4 čvora i 7 grana ali se broj grana može redukovati na 6 ekvivalentovanjem grana koje su incidentne čvoru 4. Prema tome, za dobijanje matrice impedasni nultog redosleda, potrebno je sprovesti sledećih 6 koraka:

1. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 1$ ) i referentnog čvora, ( $Z_{gr} = j0,11$  r.j.):

$$\underline{Z}_0 = [\underline{Z}_{gr}] = j[0,11].$$

2. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 2$ ) i referentnog čvora, ( $Z_{gr} = j0,06$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \left[ \begin{array}{c|c} \underline{Z}_0^{pre} & 0 \\ \hline 0 & \underline{Z}_{gr} \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,11 & 0 \\ 0 & 0,06 \end{bmatrix}.$$

3. korak: Dodavanje grane između dva stara čvora ( $i = 1, j = 2$ ), ( $Z_{gr} = j0,3$  r.j.):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_0^{post} &= \underline{Z}_0^{pre} - \Delta \underline{Z}_0 = \underline{Z}_0^{pre} - \\ & \frac{1}{\underline{Z}_0^{pre}(i,i) + \underline{Z}_0^{pre}(j,j) - 2\underline{Z}_0^{pre}(i,j) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_0^{pre}(1,i) - \underline{Z}_0^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(2,i) - \underline{Z}_0^{pre}(2,j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_0^{pre}(1,i) - \underline{Z}_0^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(2,i) - \underline{Z}_0^{pre}(2,j) \end{bmatrix}^T; \\ \underline{Z}_0^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,11 & 0 \\ 0 & 0,06 \end{bmatrix} - \frac{1}{j(0,11 + 0,06 - 2 \cdot 0 + 0,3)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,11 - 0 \\ 0 - 0,06 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,11 - 0 \\ 0 - 0,06 \end{bmatrix}^T; \\ \underline{Z}_0^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,0843 & 0,014 \\ 0,014 & 0,0523 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

4. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 3$ ) i starog čvora ( $i = 1$ ), ( $Z_{gr} = j0,3$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \left[ \begin{array}{cc|c} \underline{Z}_0^{pre} & & \underline{Z}_0^{pre}(1,i) \\ & & \underline{Z}_0^{pre}(2,i) \\ \hline \underline{Z}_0^{pre}(i,1) & \underline{Z}_0^{pre}(i,2) & \underline{Z}_0^{pre}(i,i) + \underline{Z}_{gr} \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,0843 & 0,014 & 0,0843 \\ 0,014 & 0,0523 & 0,014 \\ 0,0843 & 0,014 & 0,3843 \end{bmatrix}.$$

5. korak: Dodavanje grane između dva stara čvora ( $i = 2, j = 3$ ), ( $Z_{gr} = j0,05$  r.j.):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_0^{post} &= \underline{Z}_0^{pre} - \Delta \underline{Z}_0 = \underline{Z}_0^{pre} - \\ & \frac{1}{\underline{Z}_0^{pre}(i,i) + \underline{Z}_0^{pre}(j,j) - 2\underline{Z}_0^{pre}(i,j) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_0^{pre}(1,i) - \underline{Z}_0^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(2,i) - \underline{Z}_0^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(3,i) - \underline{Z}_0^{pre}(3,j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_0^{pre}(1,i) - \underline{Z}_0^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(2,i) - \underline{Z}_0^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(3,i) - \underline{Z}_0^{pre}(3,j) \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_0^{post} = j \begin{bmatrix} 0,0843 & 0,014 & 0,0843 \\ 0,014 & 0,0523 & 0,014 \\ 0,0843 & 0,014 & 0,3843 \end{bmatrix} -$$

$$- \frac{1}{j(0,0523 + 0,3843 - 2 \cdot 0,014 + 0,15)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,014 - 0,0843 \\ 0,0523 - 0,014 \\ 0,014 - 0,3843 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,014 - 0,0843 \\ 0,0523 - 0,014 \\ 0,014 - 0,3843 \end{bmatrix}^T$$

$$\underline{Z}_d^{post} = j \begin{bmatrix} 0,0754 & 0,0189 & 0,0377 \\ 0,0189 & 0,0497 & 0,0394 \\ 0,0377 & 0,0394 & 0,1389 \end{bmatrix}.$$

**6. korak:** Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 4$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,05/2 = j0,025$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \left[ \begin{array}{ccc|c} \underline{Z}_0^{pre} & & & 0 \\ & & & 0 \\ & & & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{gr} \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,0754 & 0,0189 & 0,0377 & 0 \\ 0,0189 & 0,0497 & 0,0394 & 0 \\ 0,0377 & 0,0394 & 0,1389 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,025 \end{bmatrix} = \underline{Z}_0.$$

b1) Simetrične komponente struja za slučaj jednofaznog kratkog spoja na sabirnicama 3 su:

$$\underline{I}_{d3} = \underline{I}_{i3} = \underline{I}_{o3} = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d(3,3) + \underline{Z}_i(3,3) + \underline{Z}_0(3,3)} = \frac{1}{2 \cdot j0,0461 + j0,1389} = -j4,327 \text{ r.j.}$$

Za pronalaženje struja kroz transformator  $T_3$  potrebno je najpre izračunati simetrične komponente napona čvorova 3 i 4 jer su oni od interesa. Njihove vrednosti su:

$$\begin{aligned} U_{d3} &= U_{fr} - \underline{Z}_d(3,3) \cdot \underline{I}_{d3} = 1 - j0,0461 \cdot (-j4,327) = 0,8 \text{ r.j.}; \\ U_{i3} &= -\underline{Z}_i(3,3) \cdot \underline{I}_{i3} = -j0,0461 \cdot (-j4,327) = -0,2 \text{ r.j.}; \\ U_{o3} &= -\underline{Z}_0(3,3) \cdot \underline{I}_{o3} = -j0,1389 \cdot (-j4,327) = -0,6 \text{ r.j.}; \\ U_{d4} &= U_{fr} - \underline{Z}_d(4,3) \cdot \underline{I}_{d3} = 1 - j0,0132 \cdot (-j4,327) = 0,943 \text{ r.j.}; \\ U_{i4} &= -\underline{Z}_i(4,3) \cdot \underline{I}_{i3} = -j0,0132 \cdot (-j4,327) = -0,057 \text{ r.j.}; \\ U_{o4} &= -\underline{Z}_0(4,3) \cdot \underline{I}_{o3} = -j0 \cdot (-j4,327) = 0 \text{ r.j.} \end{aligned}$$

Na osnovu izračunatih simetričnih komponenta napona, mogu se izračunati simetrične komponente struja kroz transformator  $T_3$ :

$$\underline{I}_{dT_3} = \underline{I}_{d43} = \frac{U_{d4} - U_{d3}}{\underline{Z}_{d43}^{gr}} = \frac{0,943 - 0,8}{j0,05} = -j2,86 \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{iT_3} = \underline{I}_{i43} = \frac{U_{i4} - U_{i3}}{\underline{Z}_{i43}^{gr}} = \frac{-0,057 + 0,2}{j0,05} = -j2,86 \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{0T_3} = \underline{I}_{043} = \frac{\underline{U}_{04} - \underline{U}_{03}}{\underline{Z}_{043}^{gr}} = \frac{0 + 0,6}{\infty} = 0 \text{ r.j.}$$

Konačno, fazne komponente struja kroz transformator su:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{AT_3} \\ \underline{I}_{BT_3} \\ \underline{I}_{CT_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{dT_3} \\ \underline{I}_{iT_3} \\ \underline{I}_{0T_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} -2,86 \\ -2,86 \\ 0 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -5,72 \\ 2,86 \\ 2,86 \end{bmatrix} \text{ r.j.}$$

b2) Simetrične komponente struja za slučaj jednofaznog kratkog spoja na sabirnicama 4 su:

$$\underline{I}_{d4} = \underline{I}_{i4} = \underline{I}_{04} = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d(4,4) + \underline{Z}_i(4,4) + \underline{Z}_0(4,4)} = \frac{1}{2 \cdot j0,018 + j0,025} = -j16,39 \text{ r.j.}$$

Simetrične komponente napona čvorova 3 i 4 su:

$$U_{d3} = U_{fr} - \underline{Z}_d(4,3) \cdot \underline{I}_{d4} = 1 - j0,0132 \cdot (-j16,39) = 0,784 \text{ r.j.};$$

$$U_{i3} = -\underline{Z}_i(4,3) \cdot \underline{I}_{i4} = -j0,0132 \cdot (-j16,39) = -0,216 \text{ r.j.};$$

$$U_{03} = -\underline{Z}_0(4,3) \cdot \underline{I}_{04} = -j0 \cdot (-j16,39) = 0 \text{ r.j.};$$

$$U_{d4} = U_{fr} - \underline{Z}_d(4,4) \cdot \underline{I}_{d4} = 1 - j0,018 \cdot (-j16,39) = 0,705 \text{ r.j.};$$

$$U_{i4} = -\underline{Z}_i(4,4) \cdot \underline{I}_{i4} = -j0,018 \cdot (-j16,39) = -0,295 \text{ r.j.};$$

$$U_{04} = -\underline{Z}_0(4,4) \cdot \underline{I}_{04} = -j0,025 \cdot (-j16,39) = -0,41 \text{ r.j.}$$

Sada se mogu izračunati i simetrične komponente struja kroz transformator  $T_3$ :

$$\underline{I}_{dT_3} = \underline{I}_{d34} = \frac{\underline{U}_{d3} - \underline{U}_{d4}}{\underline{Z}_{d34}^{gr}} = \frac{0,784 - 0,705}{j0,05} = -j1,58 \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{iT_3} = \underline{I}_{i34} = \frac{\underline{U}_{i3} - \underline{U}_{i4}}{\underline{Z}_{i43}^{gr}} = \frac{-0,216 + 0,295}{j0,05} = -j1,58 \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{0T_3} = \underline{I}_{004} = \frac{0 - \underline{U}_{04}}{\underline{Z}_{004}^{gr}} = \frac{0 + 0,41}{j0,05} = -j8,2 \text{ r.j.}$$

Konačno, fazne komponente struja kroz transformator su:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{AT_3} \\ \underline{I}_{BT_3} \\ \underline{I}_{CT_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{dT_3} \\ \underline{I}_{iT_3} \\ \underline{I}_{0T_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} -1,58 \\ -1,58 \\ -8,2 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -11,36 \\ -6,62 \\ -6,62 \end{bmatrix} \text{ r.j.}$$

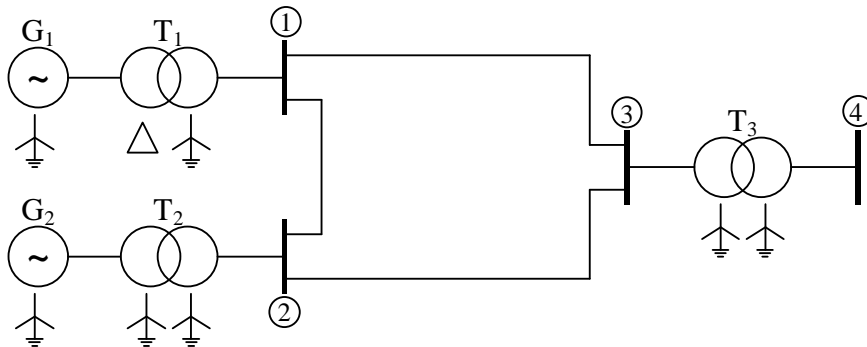
□

**Zadatak 3.29**

U mreži na sl. 3.29a na sabirnicama 4 desio se jednofazni kratki spoj sa zemljom. Matričnim postupkom izračunati:

- Struju kvara.
- Struju po vodu 1-3 u sve tri faze.

*Napomena:* Napon na mestu kvara pre kvara je 1 r.j. Podaci o parametrima sistema dati su u tab. 3.29a.



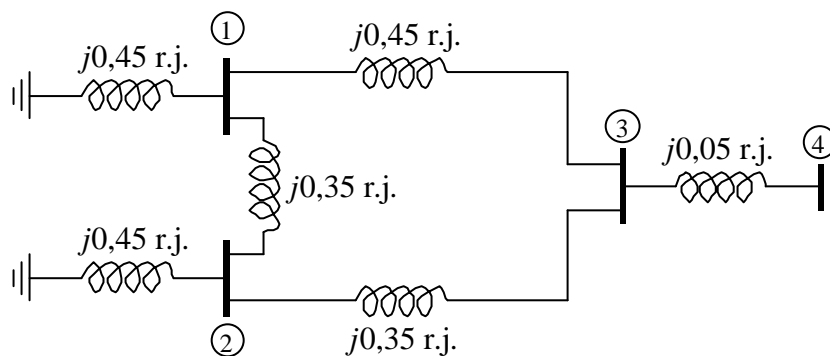
**Sl. 3.29a** Monofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.29

**Tab. 3.29a** Parametri sistema sa sl. 3.29a

	$G_1$	$G_2$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{23}$
$X_d = X_i$ (r.j.)	0,35	0,35	0,1	0,1	0,05	0,35	0,45	0,35
$X_0$ (r.j.)	0,09	0,09	0,1	0,1	0,05	1,15	1,40	1,15

**Rešenje:**

a) Ekvivalentna šema za impedanse direktnog i inverznog redosleda je identična i predstavljena je na sl. 3.29b.



**Sl. 3.29b** Mreža impedansi direktnog i inverznog redosleda sistema sa sl. 3.29a

Na prethodnoj šemi već su ekvivalentovane impedanse generatora  $G_1$  i transformatora  $T_1$  i generatora  $G_2$  i transformatora  $T_2$  sa sl. 3.29a. Prethodna šema ima 4 čvora i 6 grana pa je potrebno sprovesti sledećih 6 koraka za dobijanje matrice impedasni direktnog i inverznog redosleda:

1. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 1$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,45$  r.j.):

$$\underline{Z}_d = \lfloor \underline{Z}_{gr} \rfloor = j[0,45].$$

2. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 2$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,45$  r.j.):

$$\underline{Z}_d^{post} = \left[ \begin{array}{c|c} \underline{Z}_d^{pre} & 0 \\ \hline 0 & \underline{Z}_{gr} \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,45 & 0 \\ 0 & 0,45 \end{bmatrix}.$$

3. korak: Dodavanje grane između dva stara čvora ( $i = 1, j = 2$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,35$  r.j.):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_d^{post} &= \underline{Z}_d^{pre} - \Delta \underline{Z}_d = \underline{Z}_d^{pre} - \\ &- \frac{1}{\underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_d^{pre}(j,j) - 2\underline{Z}_d^{pre}(i,j) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) - \underline{Z}_d^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) - \underline{Z}_d^{pre}(2,j) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) - \underline{Z}_d^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) - \underline{Z}_d^{pre}(2,j) \end{bmatrix}^T; \\ \underline{Z}_d^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,45 & 0 \\ 0 & 0,45 \end{bmatrix} - \frac{1}{j(0,45 + 0,45 - 2 \cdot 0 + 0,35)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,45 - 0 \\ 0 - 0,45 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,45 - 0 \\ 0 - 0,45 \end{bmatrix}^T; \\ \underline{Z}_d^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,288 & 0,162 \\ 0,162 & 0,288 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

4. korak: Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 3$ ) i starog čvora ( $i = 1$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,45$  r.j.):

$$\underline{Z}_d^{post} = \left[ \begin{array}{cc|c} \underline{Z}_d^{pre} & & \underline{Z}_d^{pre}(1,i) \\ & & \underline{Z}_d^{pre}(2,i) \\ \hline \underline{Z}_d^{pre}(i,1) & \underline{Z}_d^{pre}(i,2) & \underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_{gr} \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,288 & 0,162 & 0,288 \\ 0,162 & 0,288 & 0,162 \\ 0,288 & 0,162 & 0,738 \end{bmatrix}.$$

5. korak: Dodavanje grane između dva stara čvora ( $i = 2, j = 3$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,35$  r.j.):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_d^{post} &= \underline{Z}_d^{pre} - \Delta \underline{Z}_d = \underline{Z}_d^{pre} - \\ &- \frac{1}{\underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_d^{pre}(j,j) - 2\underline{Z}_d^{pre}(i,j) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) - \underline{Z}_d^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) - \underline{Z}_d^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(3,i) - \underline{Z}_d^{pre}(3,j) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Z}_d^{pre}(1,i) - \underline{Z}_d^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(2,i) - \underline{Z}_d^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_d^{pre}(3,i) - \underline{Z}_d^{pre}(3,j) \end{bmatrix}^T; \\ \underline{Z}_d^{post} &= j \begin{bmatrix} 0,288 & 0,162 & 0,288 \\ 0,162 & 0,288 & 0,162 \\ 0,288 & 0,162 & 0,738 \end{bmatrix} - \\ &- \frac{1}{j(0,288 + 0,738 - 2 \cdot 0,162 + 0,35)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,162 - 0,288 \\ 0,288 - 0,162 \\ 0,162 - 0,738 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,162 - 0,288 \\ 0,288 - 0,162 \\ 0,162 - 0,738 \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

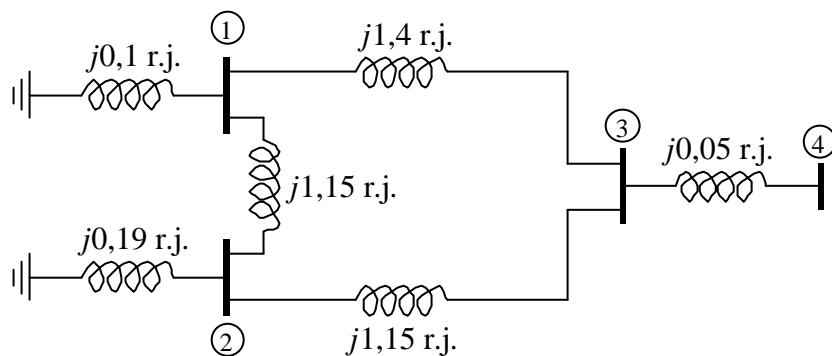
$$\underline{Z}_d^{post} = j \begin{bmatrix} 0,2729 & 0,1771 & 0,219 \\ 0,1771 & 0,2729 & 0,231 \\ 0,219 & 0,231 & 0,4226 \end{bmatrix}$$

**6. korak:** Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 4$ ) i starog čvora ( $i = 3$ ), ( $\underline{Z}_{gr} = j0,05$  r.j.):

$$\underline{Z}_d^{post} = \left[ \begin{array}{ccc|c} & \underline{Z}_d^{pre} & & \underline{Z}_d^{pre}(1,i) \\ & & & \underline{Z}_d^{pre}(2,i) \\ & & & \underline{Z}_d^{pre}(3,i) \\ \hline \underline{Z}_d^{pre}(i,1) & \underline{Z}_d^{pre}(i,2) & \underline{Z}_d^{pre}(i,3) & \underline{Z}_d^{pre}(i,i) + \underline{Z}_{gr} \end{array} \right]$$

$$\underline{Z}_d^{post} = j \begin{bmatrix} 0,2729 & 0,1771 & 0,219 & 0,219 \\ 0,1771 & 0,2729 & 0,231 & 0,231 \\ 0,219 & 0,231 & 0,4226 & 0,4226 \\ 0,219 & 0,231 & 0,4226 & 0,4726 \end{bmatrix} = \underline{Z}_d = \underline{Z}_i.$$

Ekvivalentna šema impedansi nultog redosleda data je na sl. 3.29c.



**Sl. 3.29c** Mreža impedansi nultog redosleda sistema sa sl. 3.29a

Na prethodnoj šemi već su ekvivalentovane impedanse generatora  $G_2$  i transformatora  $T_2$ . Kao i kod ekvivalentne šeme za direktni redosled i ovde je potrebno sprovesti sledećih 6 koraka:

**1. korak:** Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 1$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,1$  r.j.):

$$\underline{Z}_0 = [\underline{Z}_{gr}] = j[0,1].$$

**2. korak:** Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 2$ ) i referentnog čvora, ( $\underline{Z}_{gr} = j0,19$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \left[ \begin{array}{c|c} \underline{Z}_d^{pre} & 0 \\ \hline 0 & \underline{Z}_{gr} \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,19 \end{bmatrix}$$

**3. korak:** Dodavanje grane između dva stara čvora ( $i = 1, j = 2$ ), ( $Z_{gr} = j1,15$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \underline{Z}_0^{pre} - \Delta \underline{Z}_0 = \underline{Z}_0^{pre} - \frac{1}{\underline{Z}_0^{pre}(i,i) + \underline{Z}_0^{pre}(j,j) - 2\underline{Z}_0^{pre}(i,j) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_0^{pre}(1,i) - \underline{Z}_0^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(2,i) - \underline{Z}_0^{pre}(2,j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_0^{pre}(1,i) - \underline{Z}_0^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(2,i) - \underline{Z}_0^{pre}(2,j) \end{bmatrix}^T$$

$$\underline{Z}_0^{post} = j \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,19 \end{bmatrix} - \frac{1}{j(0,1+0,19-2 \cdot 0+1,15)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,1-0 \\ 0-0,19 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,1-0 \\ 0-0,19 \end{bmatrix}^T = j \begin{bmatrix} 0,0931 & 0,0132 \\ 0,0132 & 0,1649 \end{bmatrix}.$$

**4. korak:** Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 3$ ) i starog čvora ( $i = 1$ ), ( $Z_{gr} = j1,4$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \left[ \begin{array}{cc|c} \underline{Z}_0^{pre} & & \underline{Z}_0^{pre}(1,i) \\ & & \underline{Z}_0^{pre}(2,i) \\ \hline \underline{Z}_0^{pre}(i,1) & \underline{Z}_0^{pre}(i,2) & \underline{Z}_0^{pre}(i,i) + \underline{Z}_{gr} \end{array} \right] = j \begin{bmatrix} 0,0931 & 0,0132 & 0,0931 \\ 0,0132 & 0,1649 & 0,0132 \\ 0,0931 & 0,0132 & 1,4931 \end{bmatrix}.$$

**5. korak:** Dodavanje grane između dva stara čvora ( $i = 2, j = 3$ ), ( $Z_{gr} = j1,15$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \underline{Z}_0^{pre} - \Delta \underline{Z}_0 = \underline{Z}_0^{pre} - \frac{1}{\underline{Z}_0^{pre}(i,i) + \underline{Z}_0^{pre}(j,j) - 2\underline{Z}_0^{pre}(i,j) + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_0^{pre}(1,i) - \underline{Z}_0^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(2,i) - \underline{Z}_0^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(3,i) - \underline{Z}_0^{pre}(3,j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_0^{pre}(1,i) - \underline{Z}_0^{pre}(1,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(2,i) - \underline{Z}_0^{pre}(2,j) \\ \underline{Z}_0^{pre}(3,i) - \underline{Z}_0^{pre}(3,j) \end{bmatrix}^T ;$$

$$\underline{Z}_0^{post} = j \begin{bmatrix} 0,0931 & 0,0132 & 0,0931 \\ 0,0132 & 0,1649 & 0,0132 \\ 0,0931 & 0,0132 & 1,4931 \end{bmatrix} - \frac{1}{j(0,1649+1,4931-2 \cdot 0,0132+1,15)} \cdot j \begin{bmatrix} 0,0132-0,0931 \\ 0,1649-0,0132 \\ 0,0132-1,4931 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0,0132-0,0931 \\ 0,1649-0,0132 \\ 0,0132-1,4931 \end{bmatrix}^T$$

$$\underline{Z}_0^{post} = j \begin{bmatrix} 0,0908 & 0,0176 & 0,0506 \\ 0,0176 & 0,1566 & 0,0939 \\ 0,0506 & 0,0939 & 0,7057 \end{bmatrix}.$$

**6. korak:** Dodavanje grane između novog čvora ( $k = 4$ ) i starog čvora ( $i = 3$ ), ( $Z_{gr} = j0,05$  r.j.):

$$\underline{Z}_0^{post} = \left[ \begin{array}{ccc|c} \underline{Z}_0^{pre} & & & \underline{Z}_0^{pre}(1,i) \\ & & & \underline{Z}_0^{pre}(2,i) \\ & & & \underline{Z}_0^{pre}(3,i) \\ \hline \underline{Z}_0^{pre}(i,1) & \underline{Z}_0^{pre}(i,2) & \underline{Z}_0^{pre}(i,3) & \underline{Z}_0^{pre}(i,i) + \underline{Z}_{gr} \end{array} \right] ;$$

$$\underline{Z}_0^{post} = j \begin{bmatrix} 0,0908 & 0,0176 & 0,0506 & 0,0506 \\ 0,0176 & 0,1566 & 0,0939 & 0,0939 \\ 0,0506 & 0,0939 & 0,7057 & 0,7057 \\ 0,0506 & 0,0939 & 0,7057 & 0,7557 \end{bmatrix} = \underline{Z}_0.$$

a) Simetrične komponente struje kvara za slučaj jednofaznog kratkog spoja su:

$$\underline{I}_{d4} = \underline{I}_{i4} = \underline{I}_{04} = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d(4,4) + \underline{Z}_i(4,4) + \underline{Z}_0(4,4)} = \frac{1}{2 \cdot j0,4726 + j0,7557} = -j0,5879 \text{ r.j.}$$

Struja kvara je onda:

$$\underline{I}_k = \underline{I}_{A4} = \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_0 = -j1,764 \text{ r.j.}$$

b) U cilju određivanja struje po vodu 1-3 potrebno je najpre odrediti simetrične komponente napona čvorova 1 i 3.

$$U_{d1} = U_{fr} - \underline{Z}_d(1,4) \cdot \underline{I}_{d4} = 1 - j0,219 \cdot (-j0,5879) = 0,8712 \text{ r.j.};$$

$$U_{i1} = -\underline{Z}_i(1,4) \cdot \underline{I}_{i4} = -j0,219 \cdot (-j0,5879) = -0,1287 \text{ r.j.};$$

$$U_{01} = -\underline{Z}_0(1,4) \cdot \underline{I}_{04} = -j0,0506 \cdot (-j0,5879) = -0,0297 \text{ r.j.};$$

$$U_{d3} = U_{fr} - \underline{Z}_d(3,4) \cdot \underline{I}_{d4} = 1 - j0,4226 \cdot (-j0,5879) = 0,7515 \text{ r.j.};$$

$$U_{i3} = -\underline{Z}_i(3,4) \cdot \underline{I}_{i4} = -j0,4226 \cdot (-j0,5879) = -0,2484 \text{ r.j.};$$

$$U_{03} = -\underline{Z}_0(3,4) \cdot \underline{I}_{04} = -j0,7057 \cdot (-j0,5879) = -0,4149 \text{ r.j.}$$

Simetrične komponente struja po vodu 1-3 su:

$$\underline{I}_{d13} = \frac{U_{d1} - U_{d3}}{\underline{Z}_{d13}^{gr}} = \frac{0,8712 - 0,7515}{j0,45} = -j0,266 \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{i13} = \frac{U_{i1} - U_{i3}}{\underline{Z}_{i13}^{gr}} = \frac{-0,1287 + 0,2484}{j0,45} = -j0,266 \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{013} = \frac{U_{01} - U_{03}}{\underline{Z}_{013}^{gr}} = \frac{-0,0297 + 0,4149}{j1,4} = -j0,275 \text{ r.j.}$$

Konačno, fazne struje koje teku po vodu 1-3 su:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{A13} \\ \underline{I}_{B13} \\ \underline{I}_{C13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{d13} \\ \underline{I}_{i13} \\ \underline{I}_{013} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} -0,266 \\ -0,266 \\ -0,275 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -0,807 \\ -0,009 \\ -0,009 \end{bmatrix} \text{ r.j.}$$

□



**Zadatak 3.30**

Za uprošćeni elektroenergetski sistem EPS-a, čiji su parametri vodova i transformatora dati u zadatku 2.15, proračunati:

- Struju tranzijentnog perioda trofaznog kratkog spoja u čvoru 1, kao i struje u granama incidentnim ovom čvoru, usvajajući za početni radni režim onaj koji je obrađivan u zadatku 2.15.
- Struju tranzijentnog perioda trofaznog kratkog spoja u čvoru 1, kao i struje u granama incidentnim ovom čvoru, u slučaju zanemarivanja struja radnog režima koji je prethodio kvaru.
- Struje tranzijentnog perioda svih nesimetričnih kratkih spojeva u tom čvoru, u slučaju zanemarivanja struja radnog režima koji je prethodio kvaru.

Vrednosti nominalnih snaga ekvivalentnih agregata pridruženih generatorskim čvorovima u sistemu, kao i snaga angažovanih agregata i odgovarajućih snaga blok-generatorskih transformatora u sistemu, usvojene na osnovu specifikovanih i proračunatih snaga generisanja u zadatku 2.15, date su u tab. 3.30a.

Tab. 3.30a Nominalne i angažovane snage ekvivalentnih agregata sistema

Broj čvora	Naziv čvora	$S_n$ [MVA]	$S_{na}$ [MVA]
1	Obrenovac 400	2188	1461
5	Đerdap	1360	760
6	Kostolac	2132	527
15	Obrenovac 220	1564	732
17	Bajina Bašta	1728	1308
21	Kosovo 220	1782	509

Reaktanse generatora u tranzijentnom režimu po d osi  $x'_d$ , reaktanse generatora inverznog redosleda  $x_i$  i blok-generatorskih transformatora  $x_{BT}$  (sprege Yd), izražene u relativnim jedinicama u odnosu na nominalnu snagu elementa, date su u tab. 3.30b.

**Tab. 3.30b** Reaktanse  $x'_d$  i  $x_i$  generatora i reaktanse blok-generatorskih transformatora  $x_{BT}$  izražene u relativnim jedinicama u odnosu na nominalnu snagu elementa

Broj čvora	Naziv čvora	$x'_d$ [r.j.]	$x_i$ [r.j.]	$x_{BT}$ [r.j.]
1	Obrenovac 400	0,220	0,250	0,1260
5	Đerdap	0,380	0,345	0,1167
6	Kostolac	0,220	0,215	0,1200
15	Obrenovac 220	0,220	0,225	0,1341
17	Bajina Bašta	0,280	0,210	0,1200
21	Kosovo 220	0,330	0,270	0,1162

Reaktanse vodova direktnog redosleda su date u zadatku 2.15, dok je za reaktanse vodova nultog redosleda generalno uzeto da su tri puta veće od datih reaktansi direktnog redosleda. Podaci za transformatore 400/220 kV/kV za šemu direktnog redosleda u relativnim jedinicama su takođe dati u zadatku 2.15. Pri formiranju šeme nultog redosleda neophodno je uvažiti da su sve to autotransformatori sa direktno uzemljenim zvezdištem i kompenzacionim tercijarnim namotajem

vezanim u trougao. Podaci za reaktanse ovih transformatora, uz zanemarivanje aktivnih otpornosti, kao i grane magnećenja nultog redosleda, u relativnim jedinicama za baznu snagu  $S_B = 100$  MVA i bazni napon  $U_B = 400$  kV dati su u tab. 3.30c.

**Tab. 3.30c** Reaktanse transformatora 400/220 kV/kV izražene u relativnim jedinicama za  $S_B = 100$  MVA i  $U_B = 400$  kV

Čvor $i$	Čvor $j$	$x_{12}$ [r.j.]	$x_{13}$ [r.j.]	$x_{23}$ [r.j.]
10	12	0,02970	0,03462	0,02385
10	13	0,02970	0,03366	0,02538
7	19	0,03100	0,03503	0,02595
8	18	0,01550	0,02060	0,01808
1	15	0,01481	0,01731	0,01193
9	21	0,01485	0,01689	0,01255
3	23	0,04200	0,05126	0,03394

### Rešenje:

Reaktanse angažovanih generatora i blok-generatorskih transformatora, preračunate na baznu snagu  $S_B = 100$  MVA i bazni napon  $U_B = 400$  kV su date u tab. 3.30d.

**Tab. 3.30d** Reaktanse  $x'_d$  i  $x_i$  generatora i reaktanse blok-generatorskih transformatora  $x_{BT}$  izražene u relativnim jedinicama za  $S_B = 100$  MVA i  $U_B = 400$  kV

Broj čvora	Naziv čvora	$x'_d$ [r.j.]	$x_i$ [r.j.]	$x_{BT}$ [r.j.]
1	Obrenovac 400	0,015	0,017	0,009
5	Đerdap	0,050	0,045	0,0154
6	Kostolac	0,042	0,041	0,023
15	Obrenovac 220	0,030	0,031	0,018
17	Bajina Bašta	0,020	0,015	0,010
21	Kosovo 220	0,065	0,053	0,023

Reaktanse pojedinih grana transformatora 400/220 kV/kV, neophodne za formiranje zamenskih šema nultog redosleda su date u tab. 3.30e, pri čemu je označavanje izvršeno u odnosu na originalne čvorove mreže, tj. bez posebnih oznaka za fiktivna zvezdišta tronamotajnih transformatora.

**Tab. 3.30e** Reaktanse pojedinih grana transformatora 400/220 kV/kV

Čvor $i$	Čvor $j$	$x_1$ [r.j.]	$x_2$ [r.j.]	$x_3$ [r.j.]
10	12	0,02023	0,00947	0,01438
10	13	0,01899	0,01071	0,01467
7	19	0,02004	0,01096	0,01499
8	18	0,00901	0,00649	0,01159
1	15	0,01010	0,00472	0,00722
9	21	0,00960	0,00525	0,00073
3	23	0,02966	0,01234	0,02160

Korišćenjem proračunatih podataka, kao i podataka iz zadatka 2.15, mogu se izvršiti svi potrebni proračuni kratkih spojeva.

a) Struja trofaznog kratkog spoja, uz uvažavanje radnog režima proračunatog u zadatku 2.15, sa naponom na sabirnicama 1 pre kvara  $U_1 = 1,0075$  r.j. iznosi:

$$I_{k3} = 101,3708 \text{ r.j.}$$

Ova struja je jednaka u sve tri faze sa međusobnim faznim pomerajem od  $120^\circ$ , čime je zadržana simetrija u sistemu.

Fazne struje za vreme tranzijentnog perioda trofaznog kratkog spoja u čvoru 1, po granama incidentnim čvoru 1 su date u tab. 3.30f.

Tab. 3.30f Fazne struje za vreme tranzijentnog perioda trofaznog kratkog spoja u čvoru 1, po granama incidentnim čvoru 1 iz zadatka 3.30a

Grana	$I_A$ [r.j.]	$I_B$ [r.j.]	$I_C$ [r.j.]
2 - 1	8,7034 $\angle -80,1882^\circ$	8,7034 $\angle 159,8118^\circ$	8,7034 $\angle 39,8118^\circ$
8 - 1	19,7533 $\angle -77,9235^\circ$	19,7533 $\angle 162,0765^\circ$	19,7533 $\angle 42,0765^\circ$
10 - 1	5,0447 $\angle -81,5542^\circ$	5,0447 $\angle 158,4458^\circ$	5,0447 $\angle 38,4458^\circ$
15 - 1	19,8622 $\angle -80,9767^\circ$	19,8622 $\angle 159,0233^\circ$	19,8622 $\angle 39,0233^\circ$

Struje u granama koje su električki udaljenije od mesta kvara su manjeg intenziteta (na primer amplituda struje u grani 6 - 8 iznosi 8,0629 r.j., odnosno znatno je manja od struje u grani 8 - 1, te kvar na sabirnicama 1 ne predstavlja kritičan kvar za izbor opreme ovih grana. Zbog toga je i pregled struja kvara i ograničen na grane incidentne čvoru pogođenom kvarom, tj. grane na koje ovaj kvar ima najviše uticaja.

b) U slučaju zanemarivanja prethodnog radnog režima, odnosno u slučaju da su zanemareni potrošači, čime početni radni režim prelazi u "prazan hod", naponi svih čvorova su jednaki i iznose 1 r.j., dok je struja trofaznog kratkog spoja na sabirnicama 1 u tranzijentnom periodu jednaka

$$I_{k3} = 88,1028 \text{ r.j.}$$

Fazne struje u granama incidentnim čvoru 1 su date u tab. 3.30g.

Tab. 3.30g Fazne struje za vreme tranzijentnog perioda trofaznog kratkog spoja u čvoru 1, po granama incidentnim čvoru 1 iz zadatka 3.30b

Grana	$I_A$ [r.j.]	$I_B$ [r.j.]	$I_C$ [r.j.]
2 - 1	7,0308 $\angle -87,1105^\circ$	7,0308 $\angle 152,8895^\circ$	7,0308 $\angle 32,8895^\circ$
8 - 1	17,4635 $\angle -87,2286^\circ$	17,4635 $\angle 152,7714^\circ$	17,4635 $\angle 32,7714^\circ$
10 - 1	4,1059 $\angle -83,3162^\circ$	4,1059 $\angle 156,6838^\circ$	4,1059 $\angle 36,6838^\circ$
15 - 1	18,7648 $\angle -89,5522^\circ$	18,7648 $\angle 150,4478^\circ$	18,7648 $\angle 30,4478^\circ$

Poređenjem rezultata iz tačaka a) i b) pokazuje se da struje u normalnom radnom režimu koje su prethodile kratkom spoju, kao i odstupanje napona od jediničnih vrednosti malo utiču na veličinu struje kvara, kao i struje po granama mreže. Odstupanje ovih struja u slučaju izostavljanja proračuna prethodnog radnog stanja u odnosu na struje gde je prethodno radno stanje uvaženo je retko veće od 10 % (u ovom primeru znatno manje), te se proračuni kratkih spojeva sa dovoljnom tačnošću mogu izvršiti uz zanemarenje prethodnog radnog režima.

c) Slučaj nesimetričnih kratkih spojeva sproveden putem proračuna metodom simetričnih komponenata daje sledeće rezultate:

#### Jednofazni kratki spoj

Simetrične komponente struje kvara su:

$$\underline{I}_{k1Zd} = (-0,7710 + j36,5857) \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{k1Zi} = (-0,7710 + j36,5857) \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{k1Z0} = (-0,7710 + j36,5857) \text{ r.j.}$$

Fazne struje kvara su:

$$\underline{I}_{k1ZA} = 109,7815 \text{ r.j. } \angle -88,7928^\circ;$$

$$\underline{I}_{k1ZB} = 0;$$

$$\underline{I}_{k1ZC} = 0,$$

dok su fazni naponi pojedinih faza na mestu kvara

$$\underline{U}_{k1ZA} = 0;$$

$$\underline{U}_{k1ZB} = 0,9076 \text{ r.j. } \angle -105,5432^\circ;$$

$$\underline{U}_{k1ZC} = 0,9041 \text{ r.j. } \angle 105,4555^\circ.$$

Fazne struje za vreme tranzijentnog perioda jednofaznog kratkog spoja faze A čvora 1, po granama incidentnim čvoru 1 su date u tab. 3.30h.

Tab. 3.30h Fazne struje za vreme tranzijentnog perioda jednofaznog kratkog spoja u čvoru 1, po granama incidentnim čvoru 1 iz zadatka 3.30c

Grana	$\underline{I}_A$ [r.j.]	$\underline{I}_B$ [r.j.]	$\underline{I}_C$ [r.j.]
2 – 1	7,3129 $\angle -86,9300^\circ$	2,3010 $\angle 86,5290^\circ$	2,2945 $\angle 96,9840^\circ$
8 – 1	18,7749 $\angle -86,9600^\circ$	3,7870 $\angle 86,4275^\circ$	3,7798 $\angle 96,1046^\circ$
10 – 1	7,6005 $\angle -85,2660^\circ$	1,4620 $\angle -85,7439^\circ$	1,4839 $\angle -93,4267^\circ$
15 – 1	26,4030 $\angle -89,5145^\circ$	2,5600 $\angle -83,6868^\circ$	2,5795 $\angle -95,6875^\circ$

## Dvofazni kratki spoj

Simetrične komponente struje kvara su:

$$\underline{I}_{k2d} = (-0,9715 + j43,6246) \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{k2i} = (0,9715 - j43,6246) \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{k20} = 0.$$

Fazne struje kvara su:

$$\underline{I}_{k2A} = 0;$$

$$\underline{I}_{k2B} = 75,5788 \text{ r.j. } \angle -178,7242^\circ;$$

$$\underline{I}_{k2C} = 75,5788 \text{ r.j. } \angle 1,2758^\circ,$$

dok su fazni naponi pojedinih faza na mestu kvara

$$\underline{U}_{k2A} = 1,0094 \text{ r.j. } \angle -0,0882^\circ;$$

$$\underline{U}_{k2B} = 0,5047 \text{ r.j. } \angle 179,9118^\circ;$$

$$\underline{U}_{k2C} = 0,5047 \text{ r.j. } \angle 179,9118^\circ.$$

Fazne struje za vreme tranzijentnog perioda dvofaznog kratkog spoja faza *B* i *C* čvora 1, po granama incidentnim čvoru 1 su date u tab. 3.30i.

Tab. 3.30i Fazne struje za vreme tranzijentnog perioda dvofaznog kratkog spoja u čvoru 1, po granama incidentnim čvoru 1 iz zadatka 3.30c

Grana	$\underline{I}_A$ [r.j.]	$\underline{I}_B$ [r.j.]	$\underline{I}_C$ [r.j.]
2 – 1	0,0191 $\angle 137,2622^\circ$	6,2743 $\angle -176,9686^\circ$	6,2877 $\angle 2,9064^\circ$
8 – 1	0,3071 $\angle 92,8764^\circ$	15,3623 $\angle -176,5878^\circ$	15,3625 $\angle 2,2670^\circ$
10 – 1	0,3556 $\angle -92,7383^\circ$	3,6155 $\angle -176,0044^\circ$	3,6742 $\angle 9,5104^\circ$
15 – 1	0,3701 $\angle 92,4500^\circ$	16,4127 $\angle -178,7793^\circ$	16,4248 $\angle -0,0702^\circ$

## Dvofazni kratki spoj sa zemljom

Simetrične komponente struje kvara su:

$$\underline{I}_{k2zd} = (-1,3721 + j68,7474) \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{k2zi} = (0,5018 - j18,9732) \text{ r.j.};$$

$$\underline{I}_{k2z0} = (0,8703 - j49,7742) \text{ r.j.}$$

Fazne struje kvara su:

$$\underline{I}_{k2ZA} = 0;$$

$$\underline{I}_{k2ZB} = 106,3290 \text{ r.j. } \angle 136,6140^\circ;$$

$$\underline{I}_{k2ZC} = 106,7417 \text{ r.j. } \angle 45,6154^\circ,$$

dok su fazni naponi pojedinih faza na mestu kvara

$$\underline{U}_{k2ZA} = 0,6586 \text{ r.j. } \angle 0,1509^\circ;$$

$$\underline{U}_{k2ZB} = 0;$$

$$\underline{U}_{k2ZC} = 0.$$

Struje za vreme tranzijentnog perioda dvofaznog kratkog spoja sa zemljom faza *B* i *C* čvora 1, po granama incidentnim čvoru 1 su date u tab. 3.30j.

**Tab. 3.30j** Fazne struje za vreme tranzijentnog perioda dvofaznog kratkog spoja sa zemljom u čvoru 1, po granama incidentnim čvoru 1 iz zadatka 3.30c

Grana	$\underline{I}_A$ [r.j.]	$\underline{I}_B$ [r.j.]	$\underline{I}_C$ [r.j.]
2 – 1	2,7261 $\angle -88,4960^\circ$	6,9958 $\angle 155,4785^\circ$	6,9323 $\angle 30,6503^\circ$
8 – 1	4,6401 $\angle -89,0099^\circ$	18,2725 $\angle 149,7606^\circ$	18,1219 $\angle 36,1556^\circ$
10 – 1	2,3091 $\angle 90,5072^\circ$	6,8476 $\angle 125,4576^\circ$	7,1566 $\angle 63,7637^\circ$
15 – 1	3,8485 $\angle 90,3082^\circ$	25,3818 $\angle 130,2660^\circ$	25,4963 $\angle 50,4347^\circ$

□