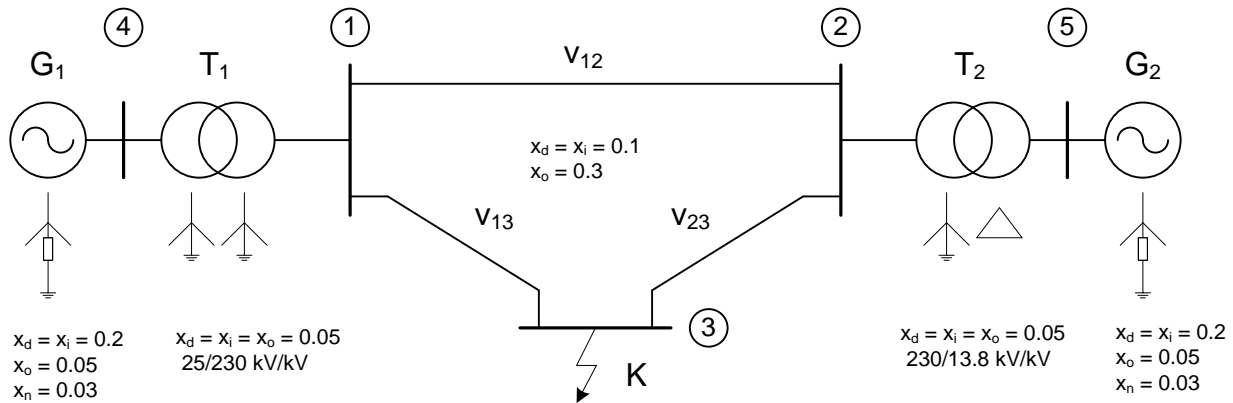


### Zadatak 1.

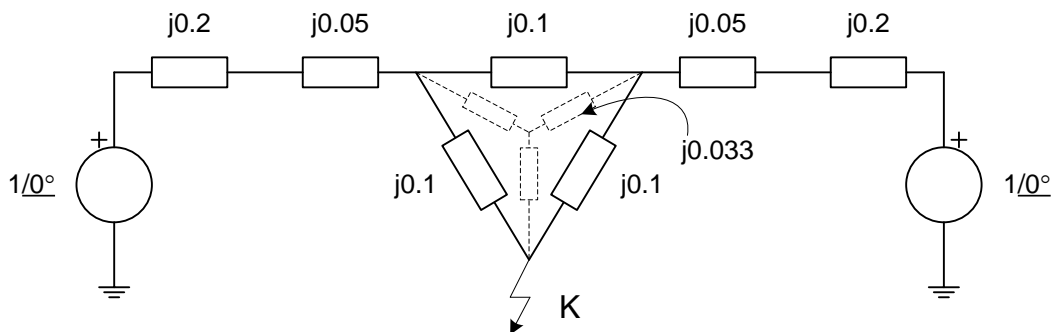
Za elektroenergetski sistem čija je jednopolna šema prikazana na slici ispod:

- Formirati ekvivalentne zamjenske šeme direktnog, inverznog i nultog redosljeda.
- Proračunati fazne struje i napone u slučaju jednopolnog, dvopolnog, dvopolnog sa zemljom i trolejnog kratkog spoja u čvoru 3.

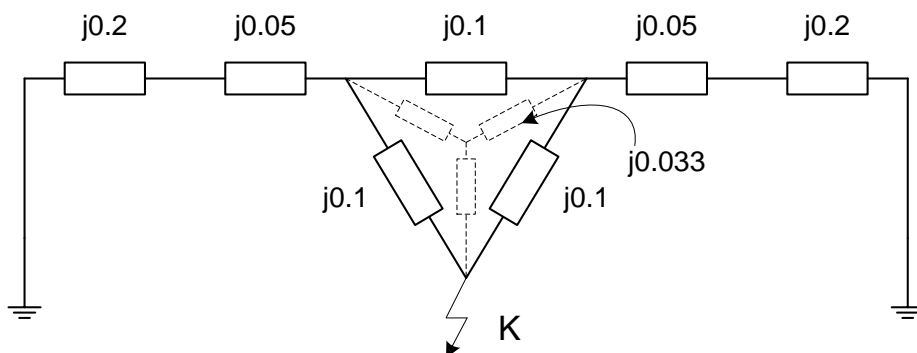


### Rješenje:

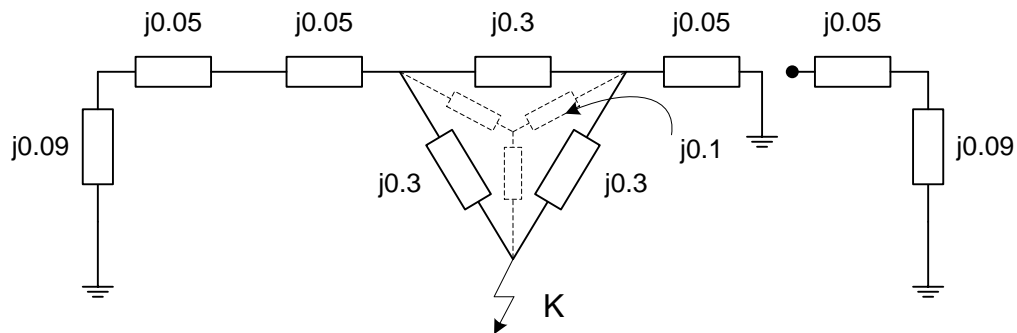
- Zamjenska šema direktnog redosljeda je:



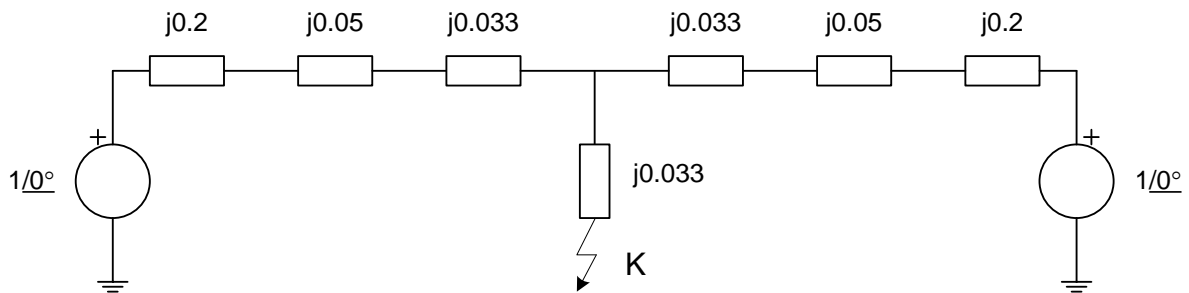
Zamjenska šema inverznog redosljeda je:



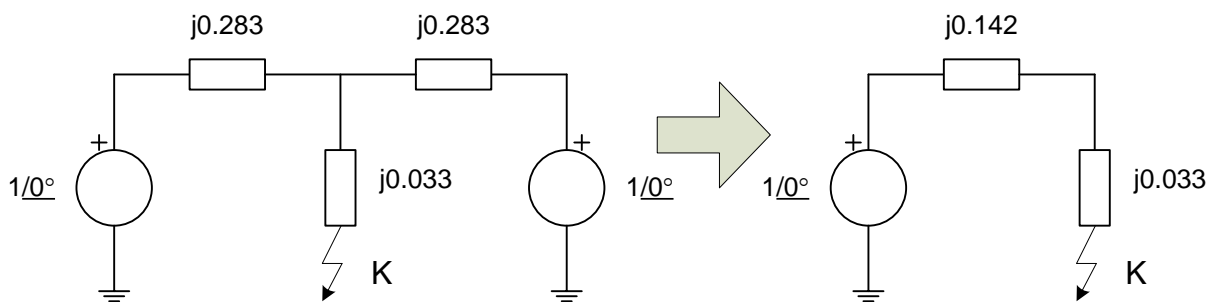
Zamjenska šema nultog redosljeda je:



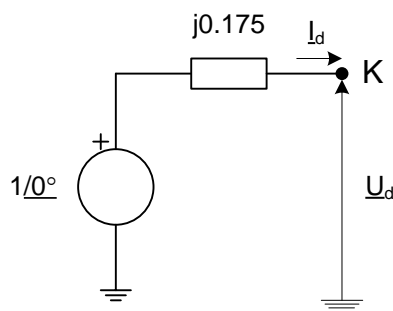
Zamjenske šeme je neophodno svesti na što jednostavniji oblik vodeći računa da se očuva mjesto kvara. Prema tome, kako je mjesto kvara označeno sa K, onda je lako uočiti trougao impedansi u šemama sva tri redosljeda koje je moguće transformisati u zvijezdu. Tada je šema direktnog redosljeda:



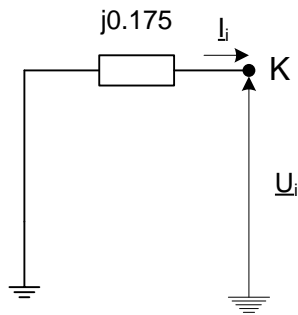
Daljim ekvivalentiranjem dobija se:



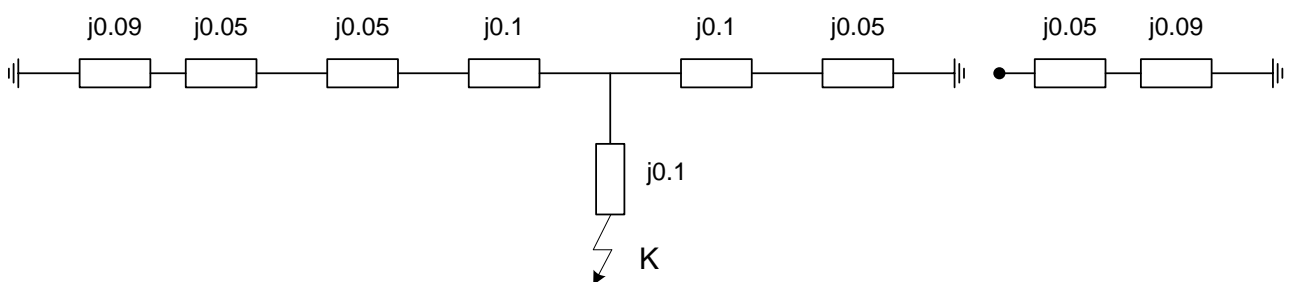
Na kraju, osnovna šema direktnog redosljeda sa označenim smjerom struje i napona je oblika:



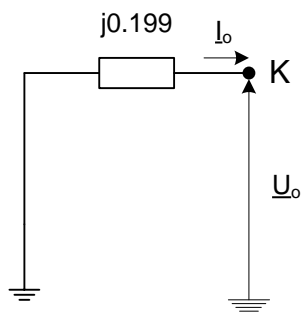
Analognim postupkom, za inverzni redosljed se dobija:



dok je zamjenska šema nultog redosljeda:



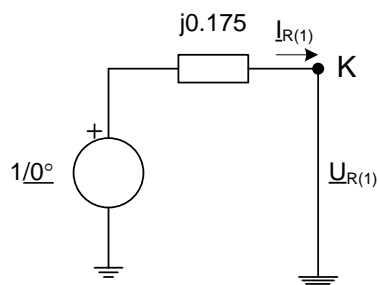
čijim se ekvivalentiranjem dolazi do oblika:



- b) Zavisno od tipa kvara, formirane šeme direktnog, inverznog i nultog redosljeda se sprežu na mjestu kvara da bi se, rješavanjem ekvivalentne šeme, odredili parametri potrebni za dimenzionisanje opreme i podešavanje zaštitnih relejnih uređaja.

### ***Tropolni kratki spoj:***

U slučaju trofaznog kratkog spoja, posmatra se samo zamjenska šema direktnog redosljeda:



Struje direktnog, inverznog i nultog redosljeda su tada:

$$\underline{I}_{R(1)} = \frac{1}{j0.175} = -j5.71$$

$$\underline{I}_{R(2)} = \underline{I}_{R(0)} = 0$$

dok su naponi:

$$\underline{U}_{R(1)} = \underline{U}_{R(2)} = \underline{U}_{R(0)} = 0$$

Fazne struje su tada:

$$\underline{I}_R = \underline{I}_{R(1)} + \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = -j5.71 = 5.71 \angle -90^\circ$$

$$\underline{I}_S = \underline{I}_{S(1)} + \underline{I}_{S(2)} + \underline{I}_{S(0)} = \underline{a}^2 \underline{I}_{R(1)} + \underline{a} \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = 5.71 \angle 150^\circ$$

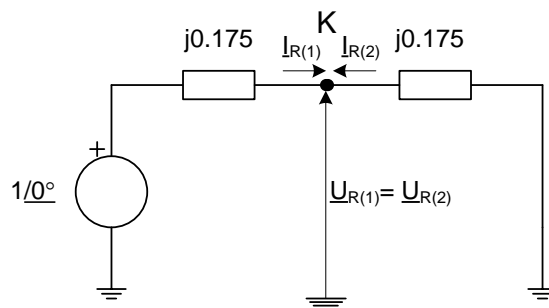
$$\underline{I}_T = \underline{I}_{T(1)} + \underline{I}_{T(2)} + \underline{I}_{T(0)} = \underline{a} \underline{I}_{R(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = 5.71 \angle 30^\circ$$

dok su fazni naponi:

$$\underline{U}_R = \underline{U}_S = \underline{U}_T = 0$$

### ***Dvopolni kratki spoj:***

U slučaju dvopolnog kratkog spoja, ekvivalentna zamjenska šema predstavlja paralelnu vezu zamjenskih šema direktnog i inverznog redosljeda:



Struje direktnog, inverznog i nultog redosljeda su:

$$\underline{I}_{R(1)} = -\underline{I}_{R(2)} = \frac{1}{j0.175 + j0.175} = -j2.86$$

$$\underline{I}_{R(0)} = 0$$

dok su naponi direktnog, inverznog i nultog redosljeda na mjestu kvara:

$$\underline{U}_{R(1)} = \underline{U}_{R(2)} = 1 - j0.175(-j2.86) = 0.5$$

$$\underline{U}_{R(0)} = 0$$

Fazne struje su tada:

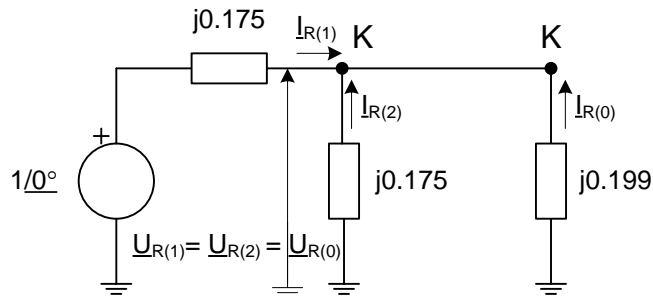
$$\begin{aligned}\underline{I}_R &= \underline{I}_{R(1)} + \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = 0 \\ \underline{I}_S &= \underline{a}^2 \underline{I}_{R(1)} + \underline{a} \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = -4.95 \\ \underline{I}_T &= \underline{a} \underline{I}_{R(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = 4.95\end{aligned}$$

a fazni naponi:

$$\begin{aligned}\underline{U}_R &= \underline{U}_{R(1)} + \underline{U}_{R(2)} + \underline{U}_{R(0)} = 1 \\ \underline{U}_S &= \underline{a}^2 \underline{U}_{R(1)} + \underline{a} \underline{U}_{R(2)} + \underline{U}_{R(0)} = -0.5 \\ \underline{U}_T &= \underline{a} \underline{U}_{R(1)} + \underline{a}^2 \underline{U}_{R(2)} + \underline{U}_{R(0)} = -0.5\end{aligned}$$

### **Dvopolni kratki spoj sa zemljom:**

U slučaju dvopolnog kratkog spoja sa zemljom, ekvivalentna zamjenska šema predstavlja paralelnu vezu zamjenskih šema direktnog, inverznog i nultog redosljeda:



Struje direktnog, inverznog i nultog redosljeda na mjestu kvara su:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{R(1)} &= -j3.73 \\ \underline{I}_{R(2)} &= j1.99 \\ \underline{I}_{R(0)} &= j1.75\end{aligned}$$

pa su fazne struje:

$$\begin{aligned}\underline{I}_R &= \underline{I}_{R(1)} + \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = 0 \\ \underline{I}_S &= \underline{a}^2 \underline{I}_{R(1)} + \underline{a} \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = 5.6[152.1^\circ] \\ \underline{I}_T &= \underline{a} \underline{I}_{R(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = 5.6[27.9^\circ]\end{aligned}$$

Naponi direktnog, inverznog i nultog redosljeda su:

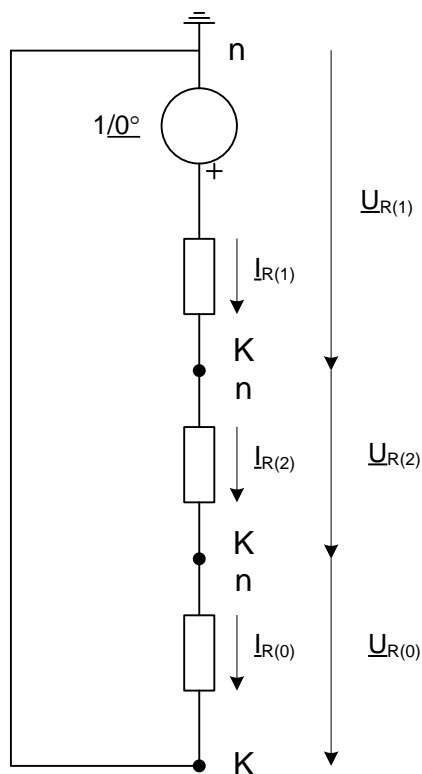
$$\underline{U}_R = \underline{U}_{R(2)} = \underline{U}_{R(0)} = 0.348$$

pa su fazni naponi na mjestu kvara:

$$\begin{aligned}\underline{U}_R &= \underline{U}_{R(1)} + \underline{U}_{R(2)} + \underline{U}_{R(0)} = 1.044 \\ \underline{U}_S &= \underline{a}^2 \underline{U}_{R(1)} + \underline{a} \underline{U}_{R(2)} + \underline{U}_{R(0)} = 0 \\ \underline{U}_T &= \underline{a} \underline{U}_{R(1)} + \underline{a}^2 \underline{U}_{R(2)} + \underline{U}_{R(0)} = 0\end{aligned}$$

### ***Jednopolni kratki spoj:***

U slučaju jednopolnog kratkog spoja, ekvivalentna zamjenska šema određuje se rednom vezom zamjenskih šema direktnog, inverznog i nultog redosljeda:



Struje direktnog, inverznog i nultog redosljeda su tada:

$$\underline{I}_R = \underline{I}_{R(1)} = \underline{I}_{R(2)} = \underline{I}_{R(0)} = -j1.82$$

dok su fazne struje:

$$\begin{aligned}\underline{I}_R &= \underline{I}_{R(1)} + \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = -j5.46 \\ \underline{I}_S &= \underline{a}^2 \underline{I}_{R(1)} + \underline{a} \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = 0 \\ \underline{I}_T &= \underline{a} \underline{I}_{R(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{R(2)} + \underline{I}_{R(0)} = 0\end{aligned}$$

Naponi direktnog, inverznog i nultog redosljeda su:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{R(1)} &= 1 - j0.175(-j1.82) = 0.681 \\ \underline{U}_{R(2)} &= -j0.175(-j1.82) = -0.319 \\ \underline{U}_{R(0)} &= -j0.199(-j1.82) = -0.362\end{aligned}$$

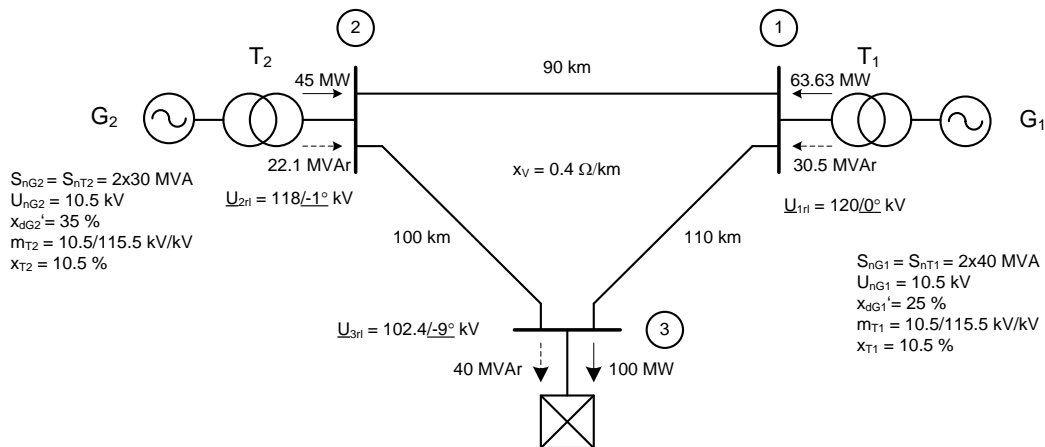
dok su fazni naponi na mjestu kvara:

$$\begin{aligned}\underline{U}_R &= \underline{U}_{R(1)} + \underline{U}_{R(2)} + \underline{U}_{R(0)} = 0 \\ \underline{U}_S &= \underline{a}^2 \underline{U}_{R(1)} + \underline{a} \underline{U}_{R(2)} + \underline{U}_{R(0)} = 1.022[238^\circ \\ \underline{U}_T &= \underline{a} \underline{U}_{R(1)} + \underline{a}^2 \underline{U}_{R(2)} + \underline{U}_{R(0)} = 1.022[-58^\circ\end{aligned}$$

## Zadatak 2.

Za elektroenergetski sistem čija je jednopolna šema prikazana na slici ispod:

- Ako su ulazni podaci zadati iz riješenog problema tokova snaga, odrediti metodom stvarnih elektromotornih sila struju kvara na sabirnicama 1, na kojima je došlo do troleznog kratkog spoja.
- U slučaju da podaci pod a) koji se tiču napona i raspodjela snaga nisu poznati, odrediti istim metodom struju kvara u slučaju 3KS na istom mjestu.



## Rješenje:

Parametri zamjenske šeme sistema, svedeni na 110 kV naponski nivo su:

$$X_{G1+T1} = \frac{25}{100} \frac{(10.5)^2 (115.5)^2}{80 (10.5)^2} + \frac{10.5 (115.5)^2}{100 \cdot 80} = 59.1974 \Omega$$

$$X_{G2+T2} = \frac{35}{100} \frac{(10.5)^2 (115.5)^2}{60 (10.5)^2} + \frac{10.5 (115.5)^2}{100 \cdot 60} = 101.1635 \Omega$$

$$X_{V12} = 0.4 \cdot 90 = 36 \Omega$$

$$X_{V23} = 0.4 \cdot 100 = 40 \Omega$$

$$X_{V13} = 0.4 \cdot 110 = 44 \Omega$$

$$R_p = \frac{U_p^2}{S_p} \cos \varphi = \frac{102.4^2}{\sqrt{100^2 + 40^2}} \frac{100}{\sqrt{100^2 + 40^2}} = 90.3945 \Omega$$

$$X_p = \frac{U_p^2}{S_p} \sin \varphi = \frac{102.4^2}{\sqrt{100^2 + 40^2}} \frac{40}{\sqrt{100^2 + 40^2}} = 36.1578 \Omega$$

- Prvi korak kod primjene metoda stvarnih elektromotornih sila je određivanje elektromotornih sila generatora prije kvara. Iz poznatih radnih uslova, elektromotorne sile generatora se određuju kao:

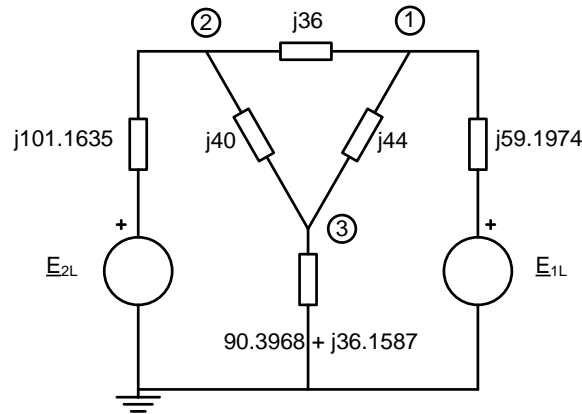
$$\underline{E}_{1L} = 120 + \frac{30.5 \cdot 59.1974}{120} + j \frac{63.63 \cdot 59.1974}{120} = 135.05 + j31.39 = 138.65 \angle 13.1^\circ \text{ kV}$$

$$\underline{E}_{2L} = 118 + \frac{22.1 \cdot 101.1635}{118} + j \frac{45 \cdot 101.1635}{118} = 142.28 \angle 15.7^\circ \text{ kV}$$

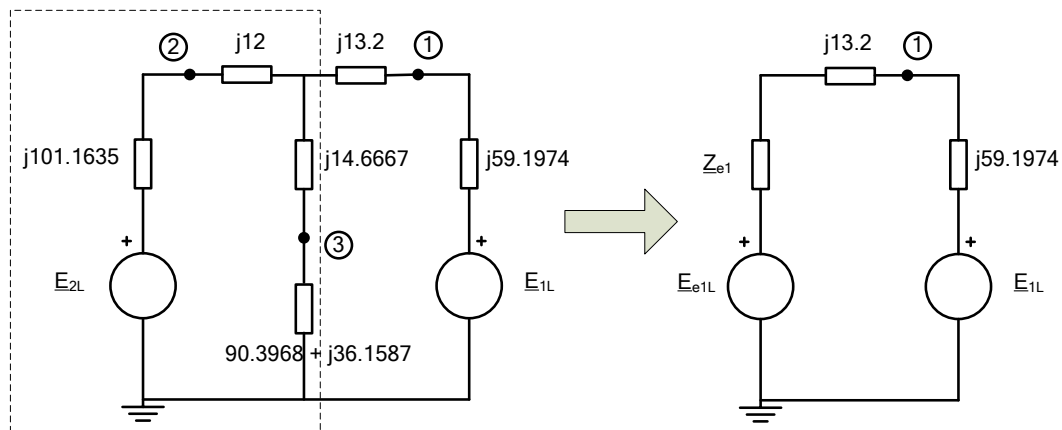
Dobijeni fazni stav je potrebno korigovati za vrijednost ugla za koji napon  $\underline{U}_{2r}$  zaostaje za faznom osom (a to je ugao od  $1^\circ$ ), pa je:

$$\underline{E}_{2L} = 142.28[14.7^\circ \text{ kV}]$$

Zamjenska šema direktnog redosljeda je:



Vodeći računa da se kvar desio u čvoru 1, može se izvršiti ekvivalentiranje posmatrane šeme tako što se trougao impedansi transfiguriše u zvijezdu:



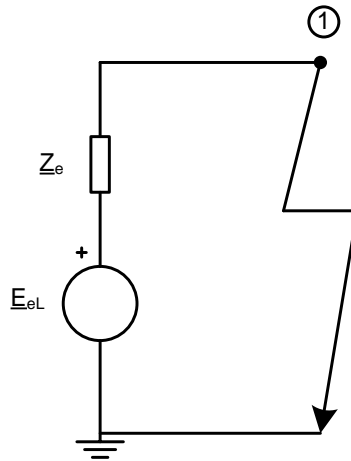
Sa slike gore, može se uočiti dio šeme koji je uokviren gdje je moguće izvršiti transfiguraciju na osnovu pravila o paralelnim granama sa generatorima i dobiti ekvivalentni generator sa ems  $\underline{E}_{e1L}$  i impedansom  $\underline{Z}_{e1}$ .

$$\underline{Z}_{e1} = \frac{(j101.1635 + j12)(j14.6667 + 90.3968 + j36.1587)}{(j101.1635 + j12 + j14.6667 + 90.3968 + j36.1587)} = 62.6729[58.2^\circ \Omega]$$

$$\underline{E}_{e1L} = \frac{(j14.6667 + 90.3968 + j36.1587)}{(j101.1635 + j12 + j14.6667 + 90.3968 + j36.1587)} \underline{E}_{2L} = 78.797[-17.074^\circ \text{ kV}]$$

Koristeći isti princip, može se izvršiti dalje ekvivalentiranje šeme kada se dobija šema:





gdje su:

$$\underline{Z}_e = \frac{(\underline{Z}_{e1} + j13.2) \cdot j59.1974}{(\underline{Z}_{e1} + j13.2 + j59.1974)} = 33.814[78.323^\circ \Omega$$

$$\underline{E}_{eL} = \frac{\underline{E}_{e1L} \cdot j59.1974 + \underline{E}_{1L}(\underline{Z}_{e1} + j13.2)}{(j59.1974 + \underline{Z}_{e1} + j13.2)} = 115.037[0.245^\circ \text{ kV}$$

Struja kvara je tada:

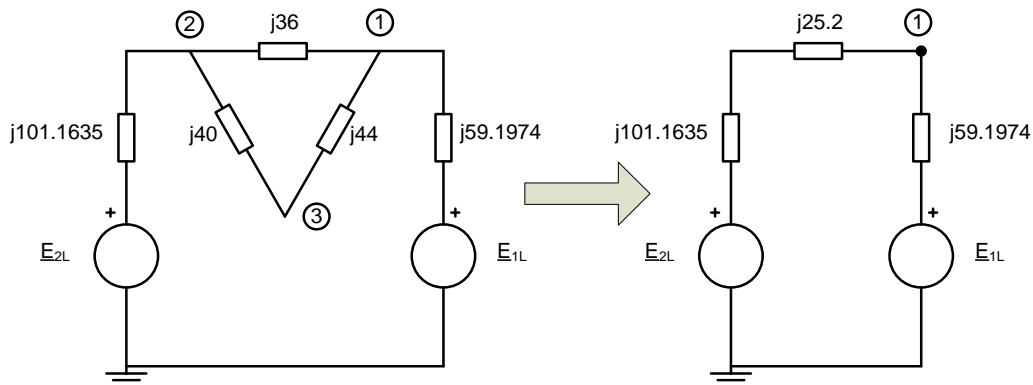
$$\underline{I}_K = \frac{\underline{E}_{eL}}{\sqrt{3}\underline{Z}_e} = \frac{115.037[0.245^\circ]}{\sqrt{3} \cdot 33.814[78.323^\circ]} = (0.405 - j1.922) \text{ kA}$$

- b) Sada je potrebno riješiti isti problem, ali uzimajući u obzir da nisu poznate veličine dobijene iz proračuna tokova snaga. Kako nisu raspoloživi nikakvi podaci koji se tiču režima rada posmatranog EES-a, pretpostavlja se da je sistem u praznom hodu i onda se sprovedi proračun. Kako je sistem u praznom hodu to važi:

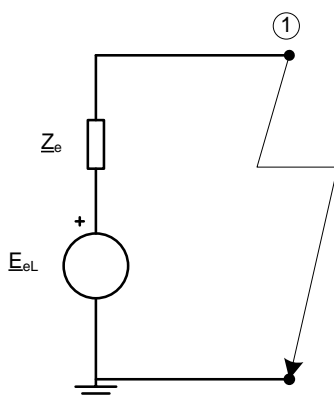
$$\underline{E}_{1L} = 115.5[0^\circ \text{ kV}$$

$$\underline{E}_{2L} = 115.5[0^\circ \text{ kV}$$

Takođe je potrebno napomenuti da u slučaju praznog hoda, potrošače ne uzimamo u obzir jer ne predstavljaju nikakvo opterećenje. Uzimajući naprijed rečeno u obzir ekvivalentna šema problema je:



Daljim ekvivalentiranjem paralelnih izvora dolazi se do zamjenske šeme:



gdje je:

$$\underline{Z}_e = \frac{(j101.1635 + j25.2)(j59.1974)}{(j101.1635 + j25.2 + j59.1974)} = j40.312 \, \Omega$$

$$\underline{E}_{eL} = \frac{j59.1974 \cdot \underline{E}_{2L} + (j101.1635 + j25.2) \cdot \underline{E}_{1L}}{(j59.1974 + j101.1635 + j25.2)} = 115 \angle 0^\circ \, kV$$

Sada je struja kvara:

$$\underline{I}_K = \frac{\underline{E}_{eL}}{\sqrt{3}\underline{Z}_e} = -j1.654 \, kA$$

Upoređivanjem rezultata uočava se da odstupanje nije veliko (oko 19% manja struja) što ukazuje na to da je moguće sprovesti dovoljno kvalitetne proračune na sistemu u praznom hodu, tj. ne poznavajući režimske parametre.