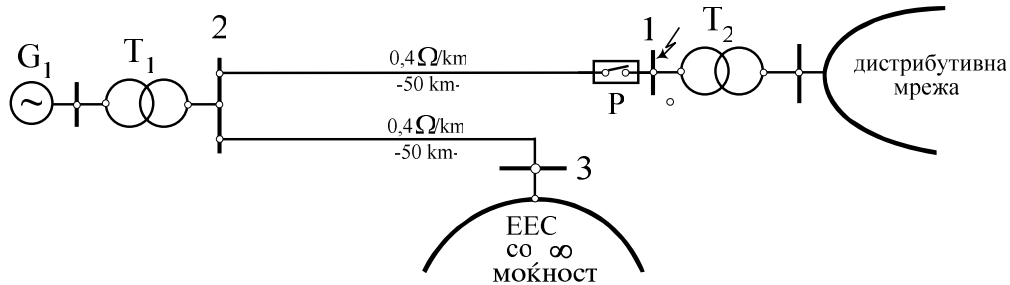


**Пример 4.5.** Да се одреди расклопната струја и моќност на прекинувачот “Р” за случај на трифазна куса врска кај собирниците “1” од системот прикажан на слика П.4.5.1. Да се претпостави дека пред настанување на кусата врска системот работел во режим близок до номиналниот и дека за исклучување на кусата врска доаѓа во транзиентниот период.



Слика П.4.5.1

**Податоци за елементите:**

- $G_1$ : 80 MVA; 10,5 kV;  $X_d'' = X_i = 15\%$ ;  $X_d' = 30\%$
- $T_1$ : 80 MVA; 10,5/121 kV;  $u_k = 10\%$
- $T_2$ : 40 MVA; 110/36,75 kV;  $u_k = 10\%$

**Решение:**

Бидејќи во задачата се работи за трифазна куса врска, во системот ќе се јават само струи со директен редослед на фазите. Затоа нас не интересира само еквивалентната шема за директен систем, при што сите генератори ќе ги претставиме со соодветните транзиентни реактанции  $X_d'$  зад кои се наоѓа е.м.с.  $E' = 1,2 \cdot U_{nf}$  (номинално оптоварен систем во режимот кој ѝ претходел на кусата врска).

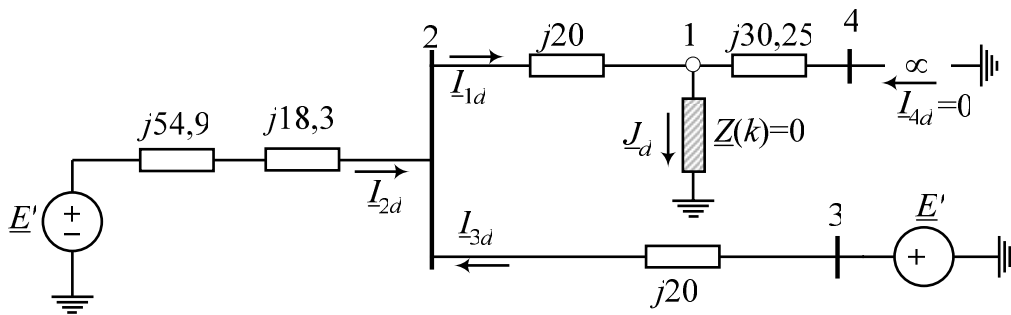
Дистрибутивната мрежа се состои од водови, трансформатори и потрошувачи, т.е. главно се состои од пасивни елементи. Затоа, во согласност со Тевененовата теорема, неа можеме да ја еквивалентираме со една пасивна гранка (импеданција) со многу голема реактанција (практично  $X \rightarrow \infty$ ).

Од друга страна, систем со бесконечна моќност или “крута мрежа” претставува систем кој покрај останатите елементи содржи и голем број моќни синхрони машини (машини со мали внатрешни реактанции) што работат паралелно. Согласно на Тевененовата теорема, еден таков систем кој содржи активни елементи може да се претстави со еден единствен генератор со е.м.с.  $E$  (во нашиот случај  $E = E' = 1,2 \cdot U_{nf}$ ) и со реактанција  $X_e$  која е еднаква на влезната реактанција на системот, гледано од точката на приклучување (јазелот “3”). Колку е бројот на агрегатите во системот поголем и колку се поголеми се нивните моќности (т.е. помали се нивните внатрешни реактанции) толку еквивалентната реактанција на системот  $X_e$  ќе

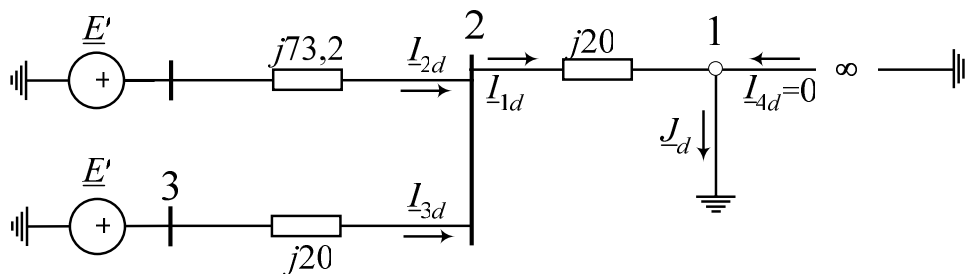
биде помала. Ако вкупната моќност на агрегатите тежи кон бесконечност, еквивалентната реактанција на системот ќе тежи кон нулата ( $X_e \rightarrow 0$ ). Систем со бесконечна моќност ќе има  $X_e = 0$ .

Всушност, секој ЕЕС има одредена **конечна инсталирана моќност**, т.е. еквивалентната реактанција на системот  $X_e$  е секогаш поголема од 0. Меѓутоа, честопати големите ЕЕС во пресметките се третираат како системи со **бесконечна моќност**. Тоа значително ги олеснува и упростира пресметките, а добиените резултати за струите на кусите врски се секогаш нешто зголемени, што оди во прилог на зголемување на сигурноста при проектирањето.

Согласно со напред реченото, еквивалентната шема за директниот систем во транзиентниот период (сведена на 110 kV страна) ќе биде како на слика П.4.5.2 а.



Слика П.4.5.2 а



Слика П.4.5.2 б

Сега, со помош на сликата П.4.5.2 б која претставува упростена шема од сликата 4.4.2 а, ќе ја одредиме **влезната импеданција** на директниот систем  $\underline{Z}_d$  (за транзиентниот период), гледана од местото на кусата врска:

$$\underline{Z}_d = j20 + j73,2 \parallel j20 = j20 + \frac{j72,2 \cdot j20}{j93,2} = j35,71 \Omega .$$

Директната компонента на струјата на куса врска  $\underline{J}_d$  на местото на кусата врска ќе биде:

$$\underline{J}_d = \frac{E'}{\underline{Z}_d + \underline{Z}(k)} = \frac{1,2U_{nf}}{j35,71 + 0} = -j2,135 \text{ kA} .$$

Во случај на трифазна куса врска, инверзната и нултата компонента на струјата на кусата врска се еднакви на 0, т.е.:

$$\underline{J}_i = p(3) \cdot \underline{J}_d = 0; \quad \underline{J}_0 = q(3) \cdot \underline{J}_d = 0,$$

т.е. струи ќе течат само во директниот систем.

Сега, со помош на сликата 4.4.2 б, лесно можеме да ја одредиме распределбата на струите во системот:

Врз основа на кирхофовите закони пишуваме:

$$\underline{I}_{1d} = \underline{J}_d = -j2,135 \text{ kA} ;$$

$$\underline{I}_{2d} + \underline{I}_{3d} = \underline{I}_{1d} \text{ и}$$

$$j73,2 \cdot \underline{I}_{2d} = j20 \cdot \underline{I}_{3d} .$$

Следува решението:

$$\underline{I}_{2d} = \frac{20}{20 + 73,2} \underline{I}_{1d} = -j0,458 \text{ kA} ,$$

$$\underline{I}_{3d} = \underline{I}_{1d} - \underline{I}_{2d} = -j1,677 \text{ kA} .$$

Фазните струи  $\underline{I}_{1A}$  ,  $\underline{I}_{1B}$  ,  $\underline{I}_{1C}$  низ прекинувачот во режимот на кусата врска ќе се добијат на следниот начин:

$$\underline{I}_{1A} = \underline{I}_{1d} + \underline{I}_{1i} + \underline{I}_{1o} = \underline{I}_{1d} + 0 + 0 = \underline{I}_{1d} ,$$

$$\underline{I}_{1B} = a^2 \cdot \underline{I}_{1d} + a \cdot \underline{I}_{1i} + \underline{I}_{1o} = a^2 \cdot \underline{I}_{1d} + 0 + 0 = a^2 \cdot \underline{I}_{1d} ,$$

$$\underline{I}_{1C} = a \cdot \underline{I}_{1d} + a^2 \cdot \underline{I}_{1i} + \underline{I}_{1o} = a \cdot \underline{I}_{1d} + 0 + 0 = a \cdot \underline{I}_{1d} .$$

Оттука следува:

$$I_{1A} = I_{1B} = I_{1C} = I_{1d} = 2,135 \text{ kA} .$$

Значи, струите во сите три фази се еднакви по ефективна вредност и се симетрично поместени за по  $2\pi/3$ , што значи дека режимот на трифазна куса врска претставува симетричен режим.

Расклопната струја на прекинувачот е најголемата фазна струја што прекинувачот мора да ја исклучи, т.е.

$$I_r = \max\{I_{1A}, I_{1B}, I_{1C}\} .$$

Во нашиот случај, тоа ќе биде:

$$I_r = I_{1A} = I_{1B} = I_{1C} = 2,135 \text{ kA} .$$

Расклопна моќност на прекинувач се дефинира како:

$$S_r = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_r .$$

За прекинувачот “P”, во случајов, расклопната моќност на трифазна куса врска изнесува:

$$S_r = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2,135 = 407 \text{ MVA} .$$

За прекинувачот “P” да биде во можност да ја исклучува трифазната куса врска настаната на собирниците “1”, неговата расклопна моќност треба да биде поголема од расклопната моќност на трифазна куса врска, која во случајов изнесува 407 MVA.

**Пример 4.6.** Се посматра режим на куса врска во суптранзиентниот период, настаната кај потрошувачките собирници “3” (сл. П.4.6.1). Да се одредат фазните напони и струи на местото на куса врска за случај на:

- а) трифазна куса врска,    б) двофазна куса врска.

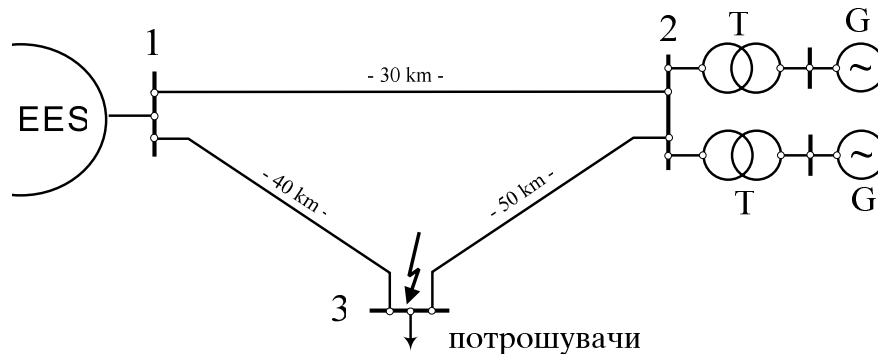
Сите водови имаат исти подолжни параметри  $\underline{z} = (0,1 + j0,4) \Omega/\text{km}$ . Пред настанувањето на кусата врска системот бил практично растоварен (празен од во системот).

Податоци за елементите:

–G: 50 MVA; 10,5 kV;  $X'_d = X'_i = 13\%$ ;  $X_0 = 8\%$

–T: 50 MVA; 10,5/115 kV;  $u_k = 12\%$

–EES:  $U_n = 10 \text{ kV}$ ;  $S''_{k3} = 1210 \text{ MVA}$ ; 110/36,75 kV;  $X'_d = X'_i$



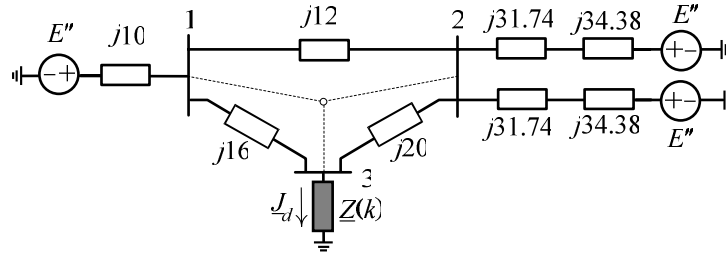
Слика П.4.6.1

**Решение:**

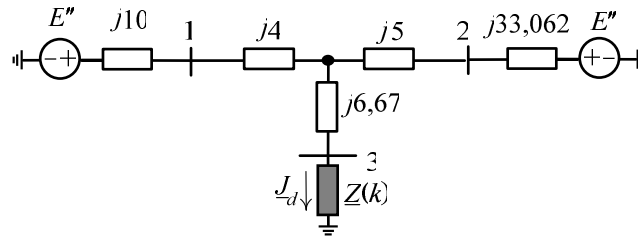
За да ги одредиме приликите кај потрошувачот во режимот на кусата врска, најнапред ќе биде потребно да ги одредиме влезните импеданции на системот  $\underline{Z}_d$  (за суптранзиентниот период, како што е нагласено во задачата) и  $\underline{Z}_i$ , посматрани од местото на кусата врска. Притоа, се разбира, ќе ги занемариме активните отпори на сите елементи од системот и за импеданциите на директниот и инверзниот систем  $\underline{Z}_d$  и  $\underline{Z}_i$  ќе добиеме чисто имагинарни вредности.

Еквивалентната шема за директниот систем е прикажана на сликата П.4.6.2 а, а на сликата П.4.6.2 б е дадена истата шема во упростен облик, при што триаголникот 1–2–3 е трансфигуриран во ѕвезда и групата на

генератори и трансформатори, приклучени на собирниците “2”, се еквивалентираат со еден еквивалентен генератор. Е.м.с  $E''$  на сите генератори во овој случај ќе изнесува  $E'' = U_{nf} = U_n / \sqrt{3}$  (празен од во системот пред настанување на кусата врска).



Слика П.4.6.2 а



Слика П.4.6.2 б

Од сликата П.4.6.2 б лесно ќе ја одредиме влезната импеданција  $\underline{Z}_d$  на директниот систем, посматрана од местото на кусата врска (собирници “3”):

$$\underline{Z}_d = j6,67 + j(10+4) \parallel j(5+33,062) = j16,9 \Omega .$$

Еквивалентната шема за инверзниот систем, во дадениот случај, е напдно иста со шемата од директниот систем (за суптранзиентен период), со таа разлика што инверзниот систем е пасивен (без е.м.с, кои се премостени). Тоа значи дека влезната импеданција во инверзниот систем  $\underline{Z}_i$  (посматрана од јазелот “3”) ќе биде:

$$\underline{Z}_i = \underline{Z}_d = j16,9 \Omega \text{ (сведени на 110 kV страна) .}$$

Сега лесно ќе ги одредиме симетричните компоненти на струите и напоните кај собирниците “3”, а потоа ќе ги одредиме и соодветните фазни величини.

- а) Трифазна куса врска кај потрошувачите (собирници “3”):  
 $[k = 3; \underline{Z}(k) = \underline{Z}(3) = 0]$ .

$$\underline{J}_d = \frac{E''}{(\underline{Z}(k) + \underline{Z}_d)} = \frac{E''}{\underline{Z}_d} = \frac{110 / \sqrt{3}}{j16,9} = -j3,758 \text{ kA ;}$$

$$\underline{J}_i = \underline{J}_0 = 0 \text{ kA ,}$$

$$\underline{J}_A = \underline{J}_d + \underline{J}_i + \underline{J}_o = \underline{J}_d ;$$

$$\underline{J}_B = a^2 \cdot \underline{J}_d + a \cdot \underline{J}_i + \underline{J}_o = a^2 \cdot \underline{J}_d ;$$

$$\underline{J}_C = a \cdot \underline{J}_d + a^2 \cdot \underline{J}_i + \underline{J}_o = a \cdot \underline{J}_d$$

$$\underline{U}_{3d} = \underline{Z}(k) \cdot \underline{J}_d = 0 ; \quad \underline{U}_{3i} = \underline{U}_{3o} = 0 ;$$

$$\Rightarrow \underline{U}_{3A} = \underline{U}_{3B} = \underline{U}_{3C} = 0$$

Значи, фазните напони на местото на кусата врска за случај на трифазна куса врска се секогаш еднакви на нула.

б) Двофазна куса врска кај потрошувачите (собирници”3”):

$$(k = 2, \underline{Z}(k) = \underline{Z}(2) = \underline{Z}_i = j16,9 \Omega.)$$

$$\underline{J}_d = \frac{E''}{(\underline{Z}(2) + \underline{Z}_d)} = \frac{110/\sqrt{3}}{j16,9 + j16,9} = -j1,879 \text{ kA} ;$$

$$\underline{J}_i = -\underline{J}_d = j1,879 \text{ kA} ;$$

$$\underline{J}_o = 0 \text{ kA} ;$$

$$\underline{J}_A = \underline{J}_d + \underline{J}_i + \underline{J}_o = 0 ;$$

$$\underline{J}_B = a^2 \cdot \underline{J}_d + a \cdot \underline{J}_i + \underline{J}_o = (a^2 - a) \cdot \underline{J}_d = -j\sqrt{3} \cdot (-j1,879) = -j3,254 \text{ kA}$$

$$\underline{J}_C = -\underline{J}_B = j3,254 \text{ kA}$$

$$\underline{U}_{3d} = \underline{Z}(k) \cdot \underline{J}_d = j16,9 \cdot (-j1,879) = 31,755 \text{ kV} ;$$

$$\underline{U}_{3i} = \underline{U}_{3d} ;$$

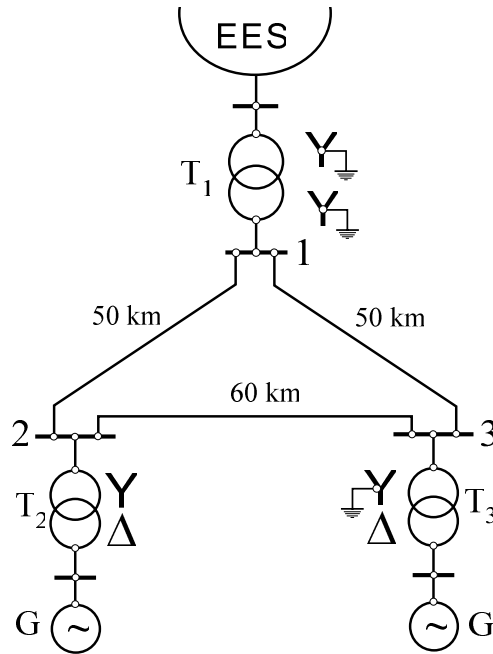
$$\underline{U}_{3o} = 0$$

$$\underline{U}_{3A} = \underline{U}_{3d} + \underline{U}_{3i} + \underline{U}_{3o} = 2 \cdot \underline{U}_{3d} = 63,51 \text{ kV} ;$$

$$\underline{U}_{3B} = \underline{U}_{3C} = (a^2 + a) \cdot \underline{U}_{3d} = -\underline{U}_{3d} = -31,755 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{3C} = \underline{U}_{3B} = -31,755 \text{ kV} .$$

**Пример 4.7.** За системот прикажан на сликата П.4.7.1 да се одреди ефективната вредност на наизменичната компонента на струјата низ заземјувачот на трансформаторот  $T_1$  во суптранзиентниот период, за случај на еднофазна куса врска:



Слика П.4.7.1

а) кај собирниците “1”; б) кај собирниците “2”.

Колкави се фазните напони во повредениот јазел во обата случаја?

Да се претпостави дека пред настанување на кусата врска системот бил практично неоптоварен.

**Податоци за елементите:**

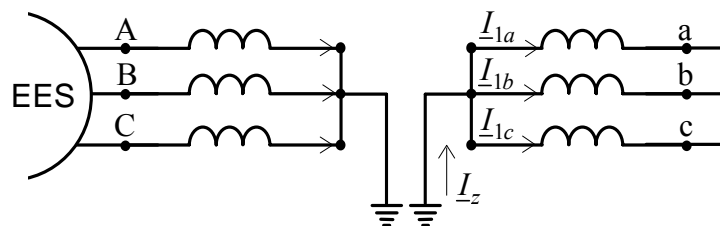
– G: 80 MVA; 10,5 kV;  $X_d'' = X_i = 10\%$ ;  $X_d' = 25\%$ ;  $X_d = 150\%$ ;  $X_0 = 8\%$

–  $T_1$ : 150 MVA; 110/231 kV;  $u_k = 12\%$

–  $T_2 \equiv T_3$ : 80 MVA; 10,5/115 kV;  $u_k = 10\%$

– EES:  $U_n = 220$  kV;  $S_{k3}'' = 3330$  MVA;  $X_d'' = X_i = X_0$ ;  $X_d' = 1,1 \cdot X_d''$

Сите водови имаат ист пресек и исти подолжни параметри:  $x = 0,4 \Omega/\text{km}$ ;  $x_0 = 3 \cdot x = 1,2 \Omega/\text{km}$ .



Слика П.4.7.2

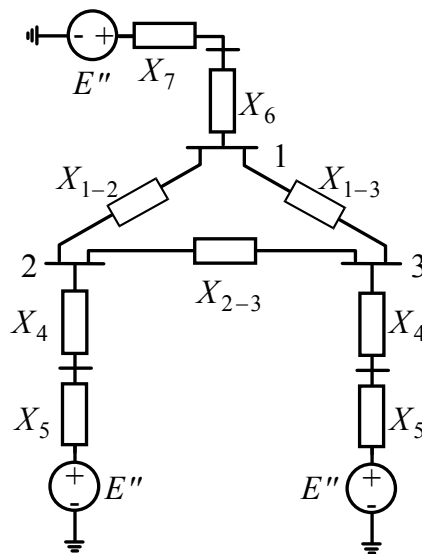
**Решение:**

Струјата  $I_z$  низ заземјувачот од трансформаторот  $T_1$  е еднаква на збирот од струите во сите три фази (слика П.4.7.2), т.е. таа изнесува:

$$I_z = I_{1a} + I_{1b} + I_{1c} = 3 \cdot I_{10}.$$

Значи, за да ја одредиме струјата  $I_z$  низ заземјувачот од  $T_1$ , потребно е да ги одредиме фазните струи низ  $T_1$ , односно нултата компонента  $I_{10}$  на струјата низ трансформаторот  $T_1$ .

**а) Еднофазна куса врска кај собирниците "1"**



**Слика П.4.7.3**

Еквивалентната шема на директниот систем за суптранзиентниот период е прикажана на сликата П.4.7.3. ЕЕС во шемата за директниот систем се претставува со соодветната суптранзиентна реактанција ( $X_7$ ) и со е.м.с  $E''$  зад неа. Субтранзиентната реактанција  $X_7$  на ЕЕС се пресметува врз основа на суптранзиентната моќност на трифазна куса врска  $S''_{k3}$  на ЕЕС.

$$X_7 = \frac{U_n^2}{S''_{k3}} = \frac{220^2}{3330} = 14,534 \Omega.$$

Сведена на 110 kV страна, таа изнесува:

$$X_7 = 14,534 \cdot \left(\frac{110}{231}\right)^2 = 3,3 \Omega.$$

Реактанциите на останатите елементи во системот лесно ќе ги пресметаме со помош на познатите релации. Сведени на 110 kV страна, тие изнесуваат:  $X_{1-2} = X_{1-3} = 50 \cdot 0,4 = 20 \Omega$ ;  $X_{2-3} = 60 \cdot 0,4 = 24 \Omega$ ;  $X_4 = 16,53 \Omega$ ;  $X_5 = 16,53 \Omega$  и  $X_6 = 9,68 \Omega$ .

Е.м.сила  $E''$ , согласно на горе кажанато (неоптоварен систем пред настанување на кусата врска), изнесува:

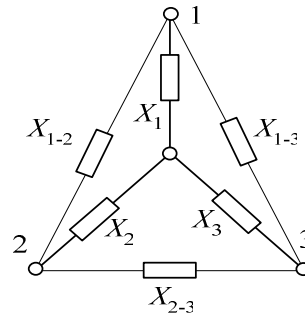


$$E'' = 1 \cdot U_{nf} = 110 / \sqrt{3} = 63,51 \text{ kV} .$$

Шемата од сликата П.4.7.3 можеме да ја поедноставиме, ако триаголникот 1–2–3 го трансфигурираме во звезда (слика П.4.7.4). Параметрите на звездата  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  ќе бидат:

$$X_1 = \frac{X_{1-2} \cdot X_{1-3}}{X_{1-2} + X_{1-3} + X_{2-3}} = 6,25 \Omega ;$$

$$X_2 = X_3 = \frac{X_{1-2} \cdot X_{2-3}}{X_{1-2} + X_{1-3} + X_{2-3}} = 7,5 \Omega$$



Слика П.4.7.4

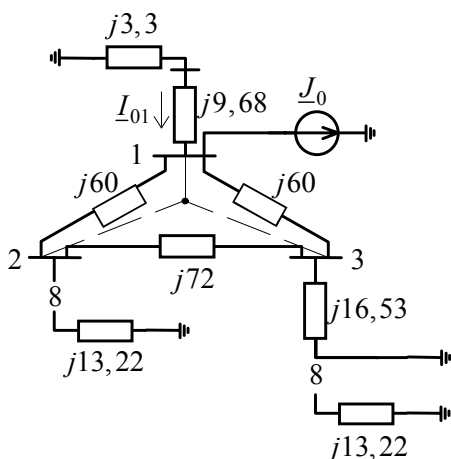
Сега лесно ќе ја одредиме импеданцијата на директниот систем  $\underline{Z}_d$ . Таа претставува влезна импеданција во директниот систем, гледана од повредениот јазел, т.е. од местото на кусата врска. Во случајов, таа изнесува:

$$\underline{Z}_d = j(X_6 + X_7) \Pi [jX_1 + j(X_2 + X_4 + X_5) \Pi j(X_3 + X_4 + X_5)] = j8,714 \Omega$$

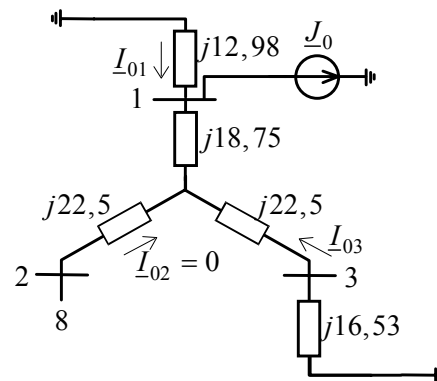
На сличен начин се добива и реактанцијата  $\underline{Z}_i$  на инверзниот систем. Во конкретниов случај таа е еднаква на директната, т.е.

$$\underline{Z}_i = \underline{Z}_d = j8,714 \Omega .$$

Еквивалентната шема за нулти систем е прикажана на сликата П.4.7.5 а, а на сликата П.4.7.5 б е дадена истата шема во упростен облик. Импеданцијата на нултиот систем  $\underline{Z}_o$  претставува влезна импеданција во нултиот систем, гледана од јазелот “1” и таа изнесува (слика П.4.7.5 б):



Слика П.4.7.5 а



Слика П.4.7.5 б

$$\underline{Z}_o = j12,98 \Pi j(22,5 + 18,75 + 16,63) = j10,6 \Omega .$$

Симетричните компоненти на струјата на местото на кусата врска ќе бидат ( $k = 1$ ,  $\underline{Z}(k) = \underline{Z}_i + \underline{Z}_0$ ):

$$\underline{J}_d = \underline{J}_i = \underline{J}_o = \frac{E''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}(k)} = \frac{E''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} = \frac{63,51}{j28,03} = -j2,266 \text{ kA} .$$

Нултата компонента на струјата  $\underline{I}_{1o}$  низ трансформаторот  $T_1$  лесно се одредува од шемата за нултиот систем (слика П.4.7.5 б) со помош на Кирхофовите закони:

$$\underline{I}_{1o} = \frac{\underline{Z}_o \underline{J}_o}{j12,98} = \frac{j10,6 \cdot (-j2,266)}{j12,98} = -j1,850 \text{ kA} .$$

Ефективната вредност на наизменичната компонента на струјата  $I_z$  низ заземјувачот од трансформаторот  $T_1$  ќе биде:

$$I_z = 3 \cdot I_{1o} = 5,55 \text{ kA} .$$

Симетричните компоненти на фазните напони кај повредениот јазел “1”, ги одредуваме со помош на општите равенки:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1d} &= E'' - \underline{Z}_d \cdot \underline{J}_d = 43,764 \text{ kV} & \underline{U}_{1A} &= 0 \\ \underline{U}_{1i} &= 0 - \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i = -19,746 \text{ kV} & \Rightarrow \underline{U}_{1B} &= 65,75 \angle 236,8^\circ \text{ kV} \\ \underline{U}_{1o} &= 0 - \underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0 = -24,02 \text{ kV} & \underline{U}_{1C} &= 65,75 \angle 123,2^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

### б) Еднофазна куса врска кај собирниците “2”

Решението во овој случај гласи:

$$I_z = 1,608 \text{ kA}; \quad \underline{U}_{2A} = 0;$$

$$\underline{U}_{2B} = \underline{U}_{2C}^* = (-58,319 - j55) \text{ kV} = 80,164 \angle 223,3^\circ \text{ kV} .$$

Како што гледаме, во овој случај напоните на здравите фази се поголеми од номиналниот фазен напон ( $U_{nf} = 110/\sqrt{3} = 63,51 \text{ kV}$ ). Во конкретниов случај тоа покачување на местото на кусата врска изнесува околу 26%.

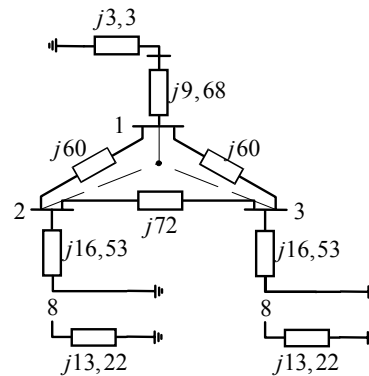
**Пример 4.8.** Колкави ќе бидат фазните напони на повредениот јазел “2” во суптранзиентниот период, за случај на еднофазна куса врска кај собирниците “2” во системот од претходната задача, ако ѕвездиштето од трансформаторот  $T_2$  е директно заземјено. Пред настанување на кусата врска системот бил практично неоптоварен.

**Решение:**

Со оглед на фактот дека еквивалентните шеми за директен и инверзен систем не зависат од спрегите на трансформаторите, импеданциите  $\underline{Z}_d$  и  $\underline{Z}_i$  ќе ги одредиме со помош на сликите П.4.7.3 и П.4.7.4 од претходната задача:

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = j(X_4 + X_5) \Pi [jX_2 + j(X_1 + X_6 + X_7) \Pi j(X_3 + X_4 + X_5)] = j12,67 \Omega .$$

Меѓутоа, еквивалентната шема за нулти систем во споредба со претходната задача сега ќе се измени (слика П.4.8.1), поради тоа што ѕвездиштето од високонапонската намотка на трансформаторот  $T_2$  во овој случај е директно заземјено. Затоа и влезната импеданција во нултиот систем гледана од местото на кусата врска, т.е. импеданцијата на нултиот систем  $\underline{Z}_0$ , во овој случај ќе биде помала. Неа ја добиваме од сликата П.4.8.1 и таа изнесува:  $\underline{Z}_0 = j11,7 \Omega$ .



Слика П.4.8.1

Симетричните компоненти на фазните напони на местото на кусата врска ќе бидат:

$$\underline{U}_{2d} = E'' - \underline{Z}_d \underline{J}_d = (\underline{Z}_i + \underline{Z}_0) \cdot E'' / (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0) = 41,782 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{2i} = -\underline{Z}_i \underline{J}_i = -\underline{Z}_i \cdot E'' / (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0) = -21,727 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{20} = -\underline{Z}_0 \underline{J}_0 = -\underline{Z}_0 \cdot E'' / (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0) = -20,055 \text{ kV}$$

Фазните напони во повредениот јазел изнесуваат:

$$\underline{U}_{2A} = \underline{U}_{2d} + \underline{U}_{2i} + \underline{U}_{20} = 0 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{2B} = a^2 \cdot \underline{U}_{2d} + a \cdot \underline{U}_{2i} + \underline{U}_{20} = 62,7 \angle 241,3^\circ \text{ kV}$$

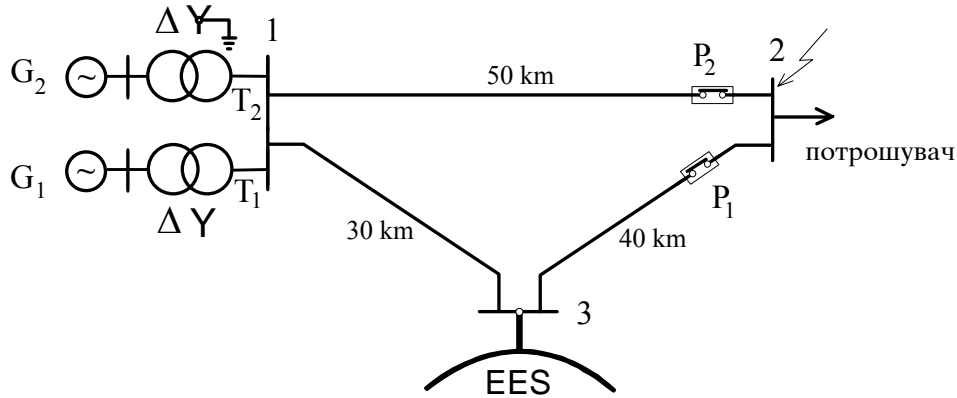
$$\underline{U}_{2C} = a \cdot \underline{U}_{2d} + a^2 \cdot \underline{U}_{2i} + \underline{U}_{20} = 62,7 \angle 118,7^\circ \text{ kV}$$

Ако извршиме споредување со резултатите што ги добивме во претходната задача под б), ќе заклучиме дека со заземјување на ѕвездиштето на трансформаторот  $T_2$  напоните на здравите фази во режимот на кусата врска значително се намалија и тие се сега приближно еднакви на номиналниот напон. Тоа и требаше да се очекува, бидејќи со намалување на факторот на заземјување  $k_z = \underline{Z}_0 / \underline{Z}_d$  се намалуваат и напоните во здравите фази при еднофазната куса врска. Кај мрежите со изолирана неутрална точка ( $\underline{Z}_0 \rightarrow \infty$ ) фазните напони во здравите фази можат да бидат еднакви на линиските (меѓуфазните) напони, т.е. за 73% поголеми од  $U_{nf}$ .

**Пример 4.9.** За системот прикажан на сликата П.4.9.1 да се димензионираат прекинувачите  $P_1$  и  $P_2$  според суптранзиентната струја на:

- а) трифазна куса врска; б) еднофазна куса врска,

во случај кусата врска да настане кај потрошувачите, приклучени во јазелот “2”. Да се претпостави крајно неповолен случај (номинално оптоварен систем пред настанувањето на кусата врска).



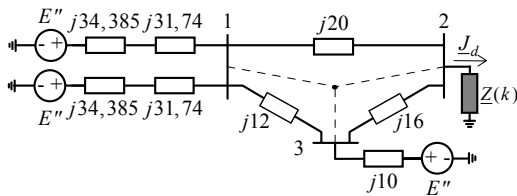
Слика П.4.9.1

Податоци за елементите:

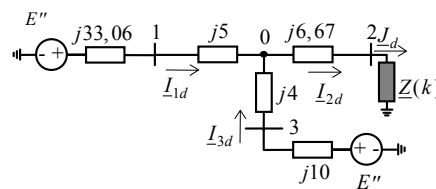
- $G_1 \equiv G_2$ : 50 MVA; 10,5 kV;  $X_d'' = X_i = 13\%$ ;  $X_0 = 8\%$
- $T_1 \equiv T_2$ : 50 MVA; 10,5/115 kV;  $u_k = 12\%$
- EES:  $U_n = 110$  kV;  $s_{k3}'' = 1210$  MVA;  $X_d'' = X_i = X_0/2$
- Водови: Сите водови имаат ист пресек и исти подолжни параметри:  
 $\underline{z} = (0,12 + j0,4) \Omega/\text{km}$ ;  $x_0 = 1,3 \Omega/\text{km}$  (реактанција за нулти систем)

**Решение:**

Еквивалентната шема на мрежата за директен систем, сведена на 110 kV страна, е прикажана на сликата П.4.9.2 а. Истата шема можеме да ја упростиме ако триаголникот 1–2–3 го трансфигурираме во звезда (слика П.4.9.2 б) и ако извршиме извесни упростувања.



Слика П.4.9.2 а



Слика П.4.9.2 б

**а) Трифазна куса врска при собирниците “2”**

Во случај на трифазна куса врска, импеданцијата на кусата врска ќе биде  $\underline{Z}(k) = \underline{Z}(3) = 0$ . Влезната импеданција во директниот систем  $\underline{Z}_d$ , гледана од местото на кусата врска (јазел “2”), ќе биде:

$$\underline{Z}_d = j6,67 + j(4+10) \parallel j(5+33,06) = j16,9 \Omega .$$

Директната компонента  $\underline{J}_d$  на струјата на кусата врска сега ќе биде:

$$\underline{J}_d = E'' / (\underline{Z}_d + \underline{Z}(k)) = E'' / \underline{Z}_d = 1,1 \cdot 110 / \sqrt{3} / j16,9 = -j4,133 \text{ kA} ;$$

$$\underline{J}_i = \underline{J}_o = 0 .$$

Симетричните компоненти на напонот во точката “2” во режимот на трифазна куса врска се еднакви на нула, т.е. :

$$\underline{U}_{2d} = \underline{U}_{2i} = \underline{U}_{2o} = 0 .$$

Согласно со шемата прикажана на сликата П.4.9.2 б, напонот во јазелот “0” ќе биде:

$$\underline{U}_{0d} = \underline{U}_{2d} + j6,67 \cdot \underline{I}_{2d} = j6,67 \underline{J}_d = 27,555 \text{ kV} ; \quad \underline{U}_{0i} = \underline{U}_{0o} = 0 \text{ kV} .$$

Од истата шема следуваат и односите:

$$\left. \begin{array}{l} \underline{I}_{1d} + \underline{I}_{3d} = \underline{I}_{2d} = \underline{J}_d = -j4,133 \text{ kA} \\ E'' - j(33,06 + 5) \cdot \underline{I}_{1d} = E'' - j(4 + 10) \cdot \underline{I}_{3d} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} \underline{I}_{1d} = -j1,111 \text{ kA} \\ \underline{I}_{3d} = -j3,022 \text{ kA} \end{array}$$

Сега можеме да ги одредиме и напоните  $\underline{U}_{1d}$  и  $\underline{U}_{3d}$  во јазлите “1” и “3”:

$$\underline{U}_{1d} = \underline{U}_{0d} + j5 \cdot \underline{I}_{1d} = 33,11 \text{ kV} ;$$

$$\underline{U}_{3d} = \underline{U}_{0d} + j4 \cdot \underline{I}_{3d} = 39,643 \text{ kV}$$

Директната компонента на струјата низ водот 1–2 (сл. П.4.9.2 а) ќе биде:

$$\underline{I}_{1-2d} = (\underline{U}_{1d} - \underline{U}_{2d}) / j20 = \underline{U}_{1d} / j20 = -j1,655 \text{ kA} .$$

Слично за водот 3–2:

$$\underline{I}_{3-2d} = (\underline{U}_{3d} - \underline{U}_{2d}) / j16 = \underline{U}_{3d} / j16 = -j2,478 \text{ kA} .$$

Бидејќи трифазната куса врска претставува симетричен режим, фазните напони и струи во било кој елемент од системот се исти по ефективна вредност и временски се поместени за по  $T/3$ , т.е.:

$$\underline{I}_{1-2A} = \underline{I}_{1-2B} = \underline{I}_{1-2C} = \underline{I}_{1-2d} = 1,655 \text{ kA} , \text{ и}$$

$$\underline{I}_{3-2A} = \underline{I}_{3-2B} = \underline{I}_{3-2C} = \underline{I}_{3-2d} = 2,478 \text{ kA} .$$

Расклопната моќност на прекинувачот  $P_1$  се дефинира како производ од номиналниот напон на прекинувачот и расклопната струја на прекинувачот  $I_{r1}$  (струја што тој треба да ја прекине), т.е.:

$$S_{r1} = \sqrt{3} \cdot U_n I_{r1} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1,655 = 315,34 \text{ MVA} .$$

Слично, за прекинувачот P<sub>2</sub>:

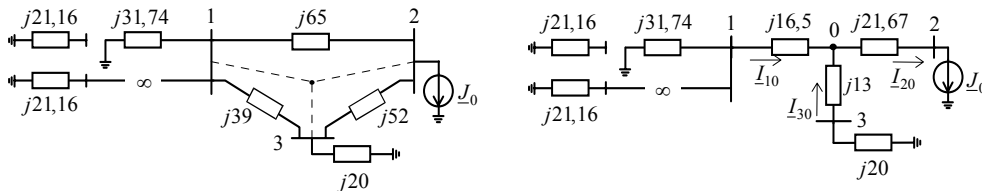
$$S_{r2} = \sqrt{3} \cdot U_n I_{r2} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2,478 = 472,12 \text{ MVA} .$$

### б) Еднофазна куса врска кај собирниците “2”

За одредување на фазните струи низ водовите 1–2 и 2–3 во случајот на еднофазна куса врска, најнапред ќе ги одредиме приликите во повредениот јазел 2. За таа цел, потребно е да ги одредиме импеданциите  $\underline{Z}_d$ ,  $\underline{Z}_i$  и  $\underline{Z}_0$  на соодветните симетрични системи.

Еквивалентната шема за директниот систем (слика 4.8.2 а) не зависи од видот на кусата врска и затоа е напoлно иста како и во претходниот случај. Единствената разлика е импеданцијата на кусата врска  $\underline{Z}(k)$  која во случајов ( $k = 1$ ) изнесува:

$$\underline{Z}(k) = \underline{Z}(1) = \underline{Z}_i + \underline{Z}_o ,$$



Слика П.4.9.3 а      Слика П.4.9.3 б

На сликата П.4.9.3 а е прикажана еквивалентната шема на нултиот систем, а на сликата П.4.9.3 б истата шема, но во упростен облик, од која можеме да ја одредиме и импеданцијата на нултиот систем  $\underline{Z}_0$ :

$$\underline{Z}_0 = j21,67 + j(13 + 20) \parallel j(16,5 + 31,74) = j41,265 \Omega$$

Приликите на местото на кусата врска ги одредуваме од веќе познатите равенки:

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}''}{(\underline{Z}_d + \underline{Z}(1))} = \frac{\underline{E}''}{(\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0)} = \frac{1,1 \cdot 110}{j\sqrt{3} \cdot (16,9 + 16,9 + 41,265)} = -j0,931 \text{ kA}$$

Притоа е земено дека  $\underline{Z}_i = \underline{Z}_d$ , што може јасно да се види и од податоците за параметрите на елементите. Исто така, треба да се има на ум дека еквивалентната шема за инверзен систем е напoлно иста со еквивалентната шема за директен систем. Бидејќи во режимот на еднофазна куса врска важи  $\underline{J}_d = \underline{J}_i = \underline{J}_0$ , тоа значи дека струите низ сите гранки во директниот и во инверзниот систем ќе бидат еднакви. Нив ќе ги одредиме користејќи ја сликата П.4.9.2 б:

$$\underline{I}_{2d} = \underline{J}_d = -j0,931 \text{ kA} ;$$

$$\underline{I}_{3d} = (\underline{E}'' - \underline{U}_{0d}) / j(4 + 10) ;$$

$$\underline{U}_{0d} = (j6,67 + \underline{Z}(1)) \cdot \underline{J}_d = 60,361 \text{ kV}$$

$$\underline{I}_{3d} = (69,86 - 60,361) / j14 = -j0,678 \text{ kA} ;$$

$$\underline{I}_{1d} = \underline{I}_{2d} - \underline{I}_{3d} = -j0,253 \text{ kA}$$

$$\underline{U}_{1-2d} = j5 \cdot \underline{I}_{1d} + j6,67 \cdot \underline{I}_{2d} = 7,475 \text{ kV}$$

$$\underline{I}_{1-2d} = \underline{U}_{1-2d} / j20 = -j0,374 \text{ kA}$$

$$\underline{U}_{3-2d} = j4 \cdot \underline{I}_{3d} + j6,67 \cdot \underline{I}_{2d} = 8,922 \text{ kV}$$

$$\underline{I}_{3-2d} = \underline{U}_{3-2d} / j16 = -j0,577 \text{ kA}$$

Бидејќи шемите за директен и инверзен систем се исти, исти ќе бидат и струите низ гранките, т.е.:

$$\underline{I}_{1-2i} = -j0,374 \text{ kA}; \underline{I}_{3-2i} = -j0,577 \text{ kA} .$$

Ни останува уште да ги одредиме, на ист начин, и струите низ гранките во нултиот систем. Според сликата П.4.9.3 б имаме:

$$\underline{I}_{20} = \underline{J}_0 = -j0,931 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{30} = -(j21,67 \cdot \underline{I}_{20} - j41,265 \cdot \underline{J}_0) / j(13 + 20) = -j0,553 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{10} = \underline{I}_{20} - \underline{I}_{30} = -j0,378 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{1-20} = \frac{j16,5 \cdot \underline{I}_{10} + j21,67 \cdot \underline{I}_{20}}{j65} = -j0,406 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{3-20} = \frac{j13 \cdot \underline{I}_{30} + j21,67 \cdot \underline{I}_{20}}{j52} = -j0,526 \text{ kA}$$

Фазните струи низ водот 1–2 ќе бидат:

$$\underline{I}_{1-2A} = \underline{I}_{1-2d} + \underline{I}_{1-2i} + \underline{I}_{1-20} = -j0,374 - j0,374 - j0,406 = -j1,154 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{1-2B} = a^2 \cdot \underline{I}_{1-2d} + a \cdot \underline{I}_{1-2i} + \underline{I}_{1-20} = (a^2 + a) \cdot (-j0,374) - j0,406 = -j0,032 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{1-2C} = a \cdot \underline{I}_{1-2d} + a^2 \cdot \underline{I}_{1-2i} + \underline{I}_{1-20} = (a + a^2) \cdot (-j0,374) - j0,406 = -j0,032 \text{ kA}$$

Фазните струи низ водот 3–2 ќе бидат:

$$\underline{I}_{3-2A} = \underline{I}_{3-2d} + \underline{I}_{3-2i} + \underline{I}_{3-20} = -j0,557 - j0,557 - j0,526 = -j1,64 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{3-2B} = a^2 \cdot \underline{I}_{3-2d} + a \cdot \underline{I}_{3-2i} + \underline{I}_{3-20} = (a^2 + a) \cdot (-j0,577) - j0,526 = j0,031 \text{ kA} .$$

$$\underline{I}_{3-2C} = a \cdot \underline{I}_{3-2d} + a^2 \cdot \underline{I}_{3-2i} + \underline{I}_{3-20} = (a + a^2) \cdot (-j0,577) - j0,526 = j0,031 \text{ kA}$$

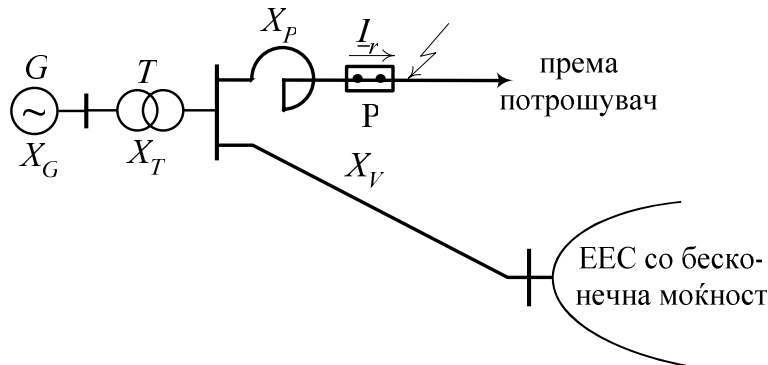
Расклопната моќност на прекинувачите  $P_1$  и  $P_2$  ќе биде:

$$S_{r1} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{1-2A} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1,154 = 219,9 \text{ MVA},$$

$$S_{r2} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{3-2A} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1,64 = 312,5 \text{ MVA}.$$

Пресметките покажуваат дека во случајов меродавна за димензионирање на прекинувачите  $P_1$  и  $P_2$  е струјата на трифазната куса врска.

**Пример 4.10.** На сликата е прикажан 220 kV преносен систем. Познати се реактанциите на поедините елементи (сведени на 220 kV страна):  $X_G = 10 \Omega$ ;  $X_T = 10 \Omega$ ;  $X_V = 7,87 \Omega$ . Потребно е да се одреди реактанцијата  $X_P$  на придушницата, приклучена во гранката со прекинувачот P така што прекинувачот да биде способен да ја исклучи струјата на трифазната куса врска, настаната зад прекинувачот, ако тој има номинална расклопна моќност  $S_{nr} = 5000 \text{ MVA}$ . Притоа да се претпостави дека пред настанување на кусата врска системот бил номинално оптоварен и дека кусата врска се исклучува во суптранзиентниот период.



Слика 4.9.1

**Решение:**

Во случај на трифазна куса врска, фазните струи низ прекинувачот P се еднакви по ефективна вредност и изнесуваат:

$$I_A = I_B = I_C = I_r = J_d = E'' / Z_d,$$

каде што импеданцијата на директниот систем изнесува:

$$Z_d = j[X_P + (X_T + X_G) \Pi(X_V + X_{EES})].$$

Бидејќи електроенергетскиот систем ЕЕС е систем со бесконечна моќност, неговата реактанција ќе биде  $X_{EES} = 0$  и соодветно на тоа:

$$Z_d = X_P + X_V \cdot (X_T + X_G) / (X_V + X_T + X_G).$$

Расклопната струја на прекинувачот P ќе биде:

$$I_r = J_d = \frac{E''}{Z_d} = 1,1 \cdot \frac{U_{nf}}{Z_d} = \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d},$$

и соодветно, расклопната моќност:

$$S_r = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_r = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d} = \frac{1,1 \cdot U_n^2}{Z_d}.$$

За да биде прекинувачот P, чија номинална расклопна моќност изнесува  $S_{nr} = 5000 \text{ MVA}$ , способен да ја исклучи кусата врска, потребно е да биде задоволен условот:  $S_r \leq S_{nr}$ , т.е.:



$$\frac{1,1 \cdot U_n^2}{Z_d} \leq S_{nr} ,$$

од каде што следува:

$$Z_d \geq 1,1 \cdot U_n^2 / S_{nr} , \text{ т.е.}$$

$$X_p + X_v \cdot (X_T + X_G) / (X_v + X_T + X_G) \geq 1,1 \cdot U_n^2 / S_{nr} .$$

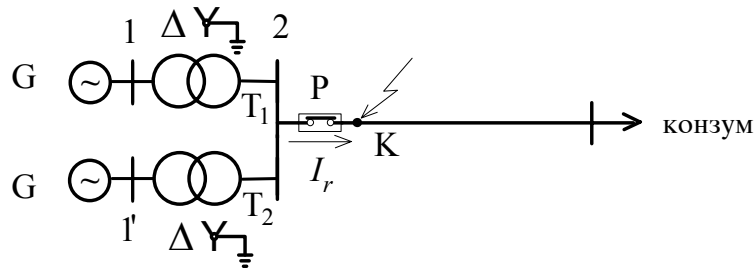
Оттука се добива релацијата:

$$X_p \geq 1,1 \cdot U_n^2 / S_{nr} - X_v \cdot (X_T + X_G) / (X_v + X_T + X_G)$$

$$X_p = 1,1 \cdot 220^2 / 5000 - 7,87 \cdot 20 / 27,87 = 5 \Omega$$

Значи:  $X_p \geq 5 \Omega$  .

**Пример 4.11.** Да се одреди расклопната струја и расклопната моќност на прекинувачот P за случај на еднофазна куса врска во точката “K” (сл. П.4.11.1). Прекинувачот ја исклучува кусата врска во суптранзиентниот период. За колку ќе се намали расклопната струја на еднофазната куса врска, ако ѕвездиштето на трансформаторот T<sub>2</sub> не е заземјено (спрега ΔY). Да се претпостави дека пред настанувањето на кусата врска системот бил номинално оптоварен.



Слика П.4.11.1

**Податоци за елементите:**

- G: 100 MVA; 10,5 kV;  $x_d'' = X_t = 13\%$ ;  $X_o = 8\%$
- T<sub>1</sub> ≡ T<sub>2</sub>: 100 MVA; 10,5/115 kV;  $u_k = 12\%$

**Решение:**

Реактанциите на елементите ќе бидат:

$$X_d'' = X_{iG} = \frac{X_d'' \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{13}{100} \cdot \frac{10,5^2}{100} \left( \frac{115}{10,5} \right)^2 = 17,19 \Omega$$

$$X_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{12}{100} \cdot \frac{115^2}{100} = 15,87 \Omega$$

Еквивалентната импеданција (влезната импеданција) на директниот систем  $Z_d$ , сведена на 110 kV страна, ќе биде:

$$Z_d = (X_d'' + X_T) \Pi (X_d'' + X_T) = (17,19 + 15,87) / 2 = 16,53 \Omega . \text{ Слично:}$$

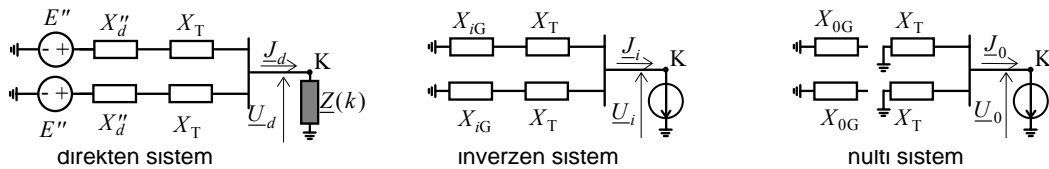
$$Z_i = (X_{iG} + X_T) / 2 = (17,19 + 15,87) / 2 = 16,53 \Omega ,$$

$$\text{и } Z_0 = X_T \Pi X_T = X_T / 2 = 7,935 \Omega .$$

Е.м.с  $E''$  во суптранзиентниот период (уважувајќи го и предоптоварувањето во системот) ќе биде:

$$E'' = 1,1 \cdot U_{nf} = 1,1 \cdot 110 / \sqrt{3} = 1,1 \cdot 63,51 = 69,86 \text{ kV} .$$

Директната компонента на струјата на кусата врска  $J_d$  ќе биде:



Слика П.4.11.2. Заменски шеми за директен, инверзен и нулти систем

$$\underline{J}_d = \frac{E''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}(k)} = \frac{E''}{\underline{Z}_d + (\underline{Z}_i + \underline{Z}_0)} = \frac{69,86}{j16,53 + j(16,53 + 7,935)} = -j1,704 \text{ kA}$$

$$\underline{J}_i = p_k \cdot \underline{J}_d = 1 \cdot \underline{J}_d = -j1,704 \text{ kA}; \underline{J}_o = q_k \cdot \underline{J}_d = \underline{J}_d = -j1,704 \text{ kA}$$

Фазните струи низ прекинувачот P ќе бидат:

$$\underline{I}_A = \underline{J}_d + \underline{J}_i + \underline{J}_o = -j5,112 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_C = (a^2 + a + 1) \cdot \underline{J}_d = 0.$$

Расклопната струја низ прекинувачот ќе биде:

$$I_r = \max\{I_A, I_B, I_C\} = I_A = 5,112 \text{ kA},$$

додека расклопната моќност ќе изнесува:

$$S_r = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_r = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 5,112 = 974 \text{ MVA}.$$

Ако ѕвездиштето на трансформаторот T<sub>2</sub> не е заземјено, неговата реактанција за нултиот систем ќе биде бесконечна и во тој случај импеданцијата на нултиот систем  $\underline{Z}_0$  ќе се зголеми на вредноста:  $\underline{Z}_0 = jX_T = j15,87 \Omega$ . Останатите импеданции  $\underline{Z}_d$  и  $\underline{Z}_i$  нема да се променат, бидејќи импеданцијата на T<sub>2</sub> во директниот и во инверзниот систем не зависи од спрегата на соединување на трансформаторот. Затоа во овој случај струјата на еднофазната куса врска ќе се намали, т.е. ќе имаме:

$$\underline{J}_d = \frac{E''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} = \frac{69,86}{j16,53 + j16,53 + j15,87} = -j1,428 \text{ kA};$$

и соодветно:

$$I_r = I_A = 3 \cdot J_d = 4,283 \text{ kA};$$

$$S_r = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_r = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 4,283 = 816 \text{ MVA}.$$

Гледаме дека расклопната струја и расклопната моќност на прекинувачот се намалија за 16,2% со тоа што ѕвездиштето (неутралната точка) на трансформаторот T<sub>2</sub> не се заземји. Тоа е и една од мерките за намалување на струите на куса врска, бидејќи во голем број случаи струјата на еднофазна куса врска е доста голема, дури и поголема (како што е во овој случај) од струјата на трифазна куса врска и како таква може да биде меродавна при изборот (димензионирањето) на опремата.