

Високонапонски мрежи и системи

Куси врски во ЕЕС

М. Тодоровски

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Факултет за електротехника и информациски технологии
mirko@feit.ukim.edu.mk, pees.feit.ukim.edu.mk



- Куси врски се оштетувања кои создаваат електричен спој помеѓу деловите кои во нормални околности се наоѓаат на различни потенцијали.
- При куса врска низ спојното место и низ гранките од самата мрежа течат струи кои се многукратно поголеми од нормалните погонски струи.
- Доколку кусата врска не се исклучи брзо може да дојде до оштетување или уништување на опремата, а понекогаш и до распаѓање на целиот ЕЕС.
- Пресметката на струите и напоните за време на кусата врска во една мрежа е неопходна и честа операција која се користи за повеќе цели:
 - избор и димензионирање на елементите од мрежата
 - определување на параметрите на расклопната опрема и заземјувачите
 - избор на параметрите на заштитните уреди
 - анализа на влијанието на енергетските водови врз околината (индуцирани напони)
 - анализи на динамичката стабилност на ЕЕС

Причини за појава на кусите врски

- Пренапони
 - Внатрешни (комутациони)
 - Последица на разни комутации (вклучувања и исклучувања) во мрежата и се јавуваат во преодниот период
 - Се карактеризираат со висока фреквенција, кратко времетраење и големината и до 4 пати поголема од номиналниот напон на мрежата
 - Нивната појава е неизбежна и единствено средство за заштита од нив е правилното димензионирање на изолацијата
 - Надворешни (атмосферски)
 - Се јавуваат при удар на гром во електричната мрежа или во нејзината близина и макар што се краткотрајни (100 μ s) нивната големина (неколку MV) е далеку поголема од електричната цврстина на изолацијата
 - Се проценува дека 1/3 од вкупниот број на кусите врски се директна последица од појавата на атмосферските пренапони

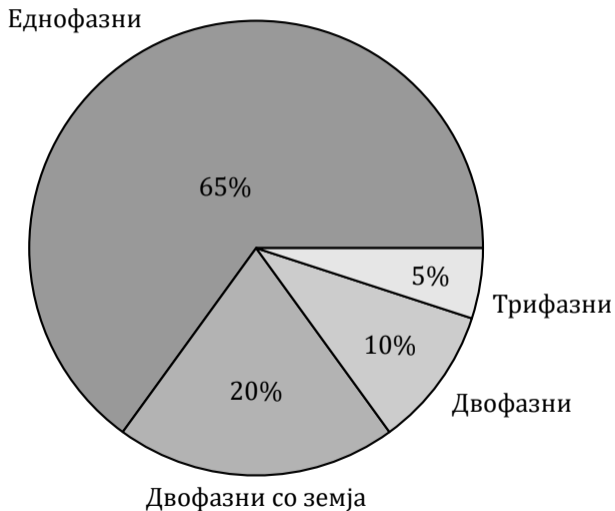
Причини за појава на кусите врски

- Механички повреди на елементите од мрежата
 - прекин на спроводник кај надземен вод и негово паѓање на земјата,
 - механичка повреда на кабел
 - паѓање на гранка врз далекувод
 - испреплетување на фазните спроводници на далекуводот под дејство на силен ветар
- Неправилни и невнимателни манипулации со расклопните уреди во постројките
- Нечистотии и стареење на изолацијата
- Птици и животни
- Комбинација од претходно наведените причини

Штетни последици од кусите врски

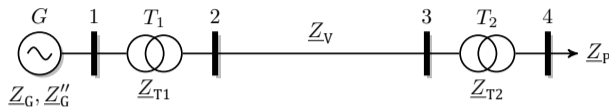
- Струја на куса врска предизвикува големи сили кои може да оштетат или разорат делови на електричните уреди како собирници, расклопни уреди и намотки
- Максималната моментна вредност на струјата на куса врска се нарекува ударна струја на куса врска и е меродавна за големината на механичките напрегања на елементите од мрежата
- Термички напрегања на елементите поради нагло ослободената топлина создадена од струјата на куса врска
- Наглото паѓање на напонот може да доведе до загрозување на стабилноста на работата на системот поради значително намалување на синхронизационите сили кај генераторите, губење на синхронизмот, па дури и распаѓање на системот
- Опасни потенцијални разлики, создадени на површината на земјата непосредно во близина на местото на кусата врска предизвикани од струјното поле создадено од течење на струјата на куса врска низ земјата

Видови на куси врски



Едноставен пример

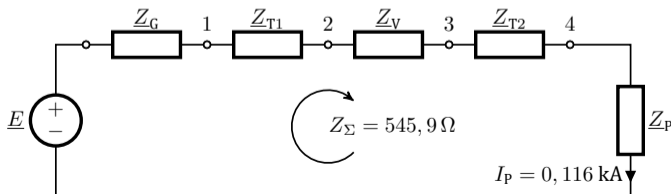
Нормална работна состојба



$$\underline{Z}_G = j290 \Omega, \quad \underline{Z}_G'' = j35 \Omega, \quad \underline{Z}_{T1} = \underline{Z}_{T2} = (0,75 + j24) \Omega,$$

$$\underline{Z}_V = (7,5 + j24) \Omega, \quad \underline{Z}_P = (194 + j145) \Omega$$

$$\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_G + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_V + \underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_P = (202,25 + j507) \Omega = 545,9 \cdot e^{j68,3^\circ} \Omega.$$

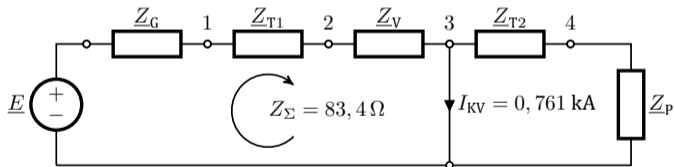
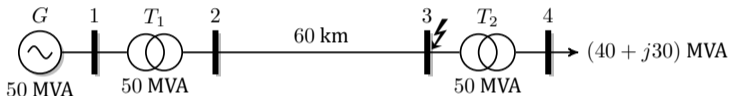


$$I_P = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_\Sigma} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 545,9} = 0,116 \text{ kA}.$$

Едноставен пример

Трифазна куса врска на собирниците 3

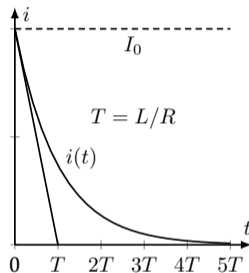
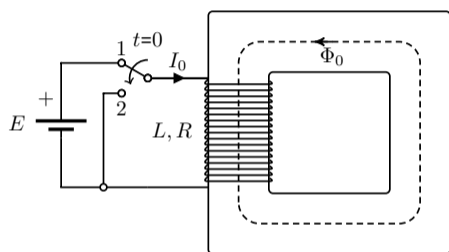
$$\underline{Z}_{\Sigma}'' = \underline{Z}_{G}'' + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{V} = (8,25 + j83) \Omega = 83,4 \cdot e^{j84,3^{\circ}} \Omega.$$



$$I_{KV} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}''} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 83,4} = 0,761 \text{ kA} \approx 6,6 \cdot I_P.$$

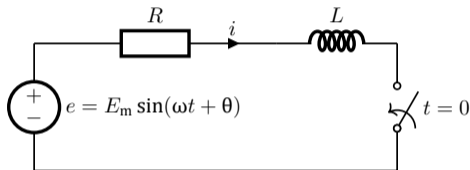
Облик на струјата на кусата врска

Принцип за константен флукс во многу блиски последователни временски моменти



Облик на струјата на кусата врска

Еднофазен генератор за наизменичен напон со облик $e = E_m \sin(\omega t + \theta)$ и намотка претставена со редно RL коло

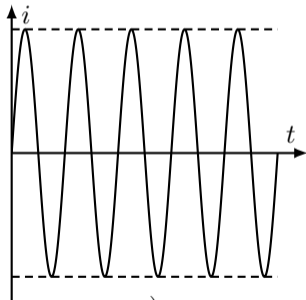


$$L \frac{di}{dt} + Ri = E_m \sin(\omega t + \theta), \quad i(0) = 0$$

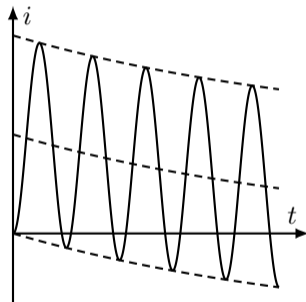
$$i(t) = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \theta - \phi) - \frac{E_m}{Z} \sin(\theta - \phi) e^{-t/T}$$
$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \quad \phi = \arctg(\omega L/R)$$

Облик на струјата на кусата врска

- Случај а: $\theta = \phi$
- Случај б: $\theta - \phi = -\pi/2$



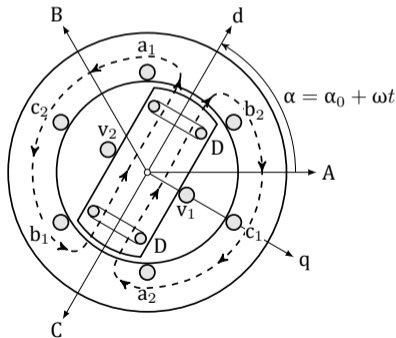
а)



б)

Трифазна куса врска кај синхрон генератор

- Фазни намотки на статорот: a_1 - a_2 , b_1 - b_2 и c_1 - c_2 , оски на намотките A, B и C
- Возбудна намотка на роторот: v_1 - v_2
- Придушни намотки на роторот: D
- Позиција на роторот: агол $\alpha = \alpha_0 + \omega t$
- Моментот кога настанува кусата врска: агол α_0



Трифазна куса врска кај синхрон генератор

- Отпорноста на намотките е занемарена
- Пред настанувањето на кусата врска генераторот работел во празен од
- Единствен флуks во генераторот е Ψ_v создаден од струјата во возбудната намотка
- Флуks во намотките

$$\Psi_{A0} = \Psi_v \cos \alpha_0, \quad \Psi_{B0} = \Psi_v \cos(\alpha_0 - 2\pi/3), \quad \Psi_{C0} = \Psi_v \cos(\alpha_0 - 4\pi/3).$$

- За да се постигне константен флуks во намотките, по кусата врска, во нив ќе протечат струи кои ќе создадат дополнителни флуksови: Ψ'_A , Ψ'_B и Ψ'_C

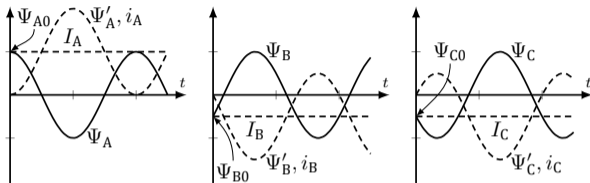
$$\Psi_A(t) + \Psi'_A(t) = \Psi_{a0} = \text{const.}$$

$$\Psi_B(t) + \Psi'_B(t) = \Psi_{b0} = \text{const.}$$

$$\Psi_C(t) + \Psi'_C(t) = \Psi_{c0} = \text{const.}$$

$$\Psi'_A(t) = \Psi_{A0} - \Psi_A(t), \quad \Psi'_B(t) = \Psi_{B0} - \Psi_B(t), \quad \Psi'_C(t) = \Psi_{C0} - \Psi_C(t).$$

Трифазна куса врска кај синхрон генератор



Бидејќи флуксот и струјата се пропорционални, тогаш и обликот на струите ќе биде идентичен со обликот на флуксовите

$$i_A(t) = -I_m(t) \cos(\omega t + \alpha_0) + I_m(0) \cos \alpha_0,$$

$$i_B(t) = -I_m(t) \cos(\omega t + \alpha_0 - 2\pi/3) + I_m(0) \cos(\alpha_0 - 2\pi/3),$$

$$i_C(t) = -I_m(t) \cos(\omega t + \alpha_0 - 4\pi/3) + I_m(0) \cos(\alpha_0 - 4\pi/3),$$

Максимумот на струите е временски зависна функција $I_m(t)$

Трифазна куса врска кај синхрон генератор

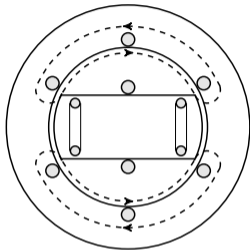
Поради отпорноста на намотките, енергијата во магнетното поле создадено од еднонасочната компонента на струјата постепено се претвора во топлина, со што струјата експоненцијално опаѓа

$$i_A(t) = -I_m(t) \cos(\omega t + \alpha_0) + I_m(0) \cos \alpha_0 \cdot e^{-t/T_a},$$

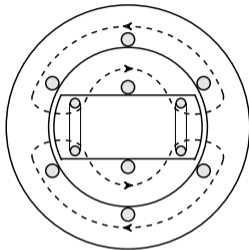
$$i_B(t) = -I_m(t) \cos(\omega t + \alpha_0 - 2\pi/3) + I_m(0) \cos(\alpha_0 - 2\pi/3) \cdot e^{-t/T_a},$$

$$i_C(t) = -I_m(t) \cos(\omega t + \alpha_0 - 4\pi/3) + I_m(0) \cos(\alpha_0 - 4\pi/3) \cdot e^{-t/T_a}.$$

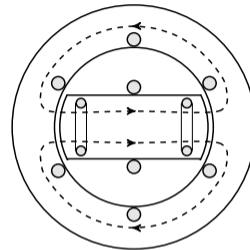
Патеки на флуксот и еквивалентни реактанции



суптранзиентен период



транзиентен период

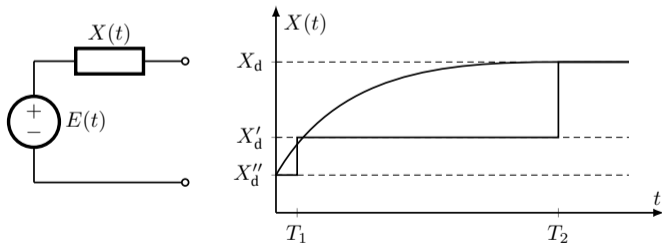


траен период

- Еквивалентната реактанција зависи од патеката на флуксот низ генераторот
- Суптранзиентниот период: голем дел од патеката флуксот ја поминува низ воздух, мала индуктивност, мала реактанција
- Транзиентниот период: флуксот дел од својот пат го поминува низ воздух, а дел низ железното јадро, индуктивноста е зголемена, реактанцијата е зголемена
- Траен период: флуксот скоро целиот свој пат го поминува низ железното јадро, индуктивноста е најголема, реактанцијата е најголема

Временска промена на реактанцијата на синхрон генератор

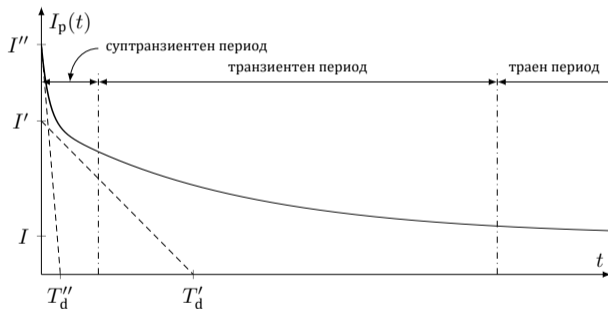
- Генераторот можеме да го претставиме со редна реактанција која е временски променлива
- Наместо да користиме континуирана крива за $X(t)$ ќе користиме скалеста крива за реактанцијата со 3 дискретни вредности
- Реактанција за суптранзиентен, транзиентен и траен период X''_d , X'_d и X_d
- Суптранзиентниот период трае од: 0 до T_1 , транзиентниот од T_1 до T_2 , а трајниот за $t > T_2$



Релација за струјата на куса врска

Струјата на куса врска се состои од две компоненти

- наизменична $i_p(t)$
- еднонасочна или аperiодична компонента $i_a(t)$



$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos \omega t - i_a(t)$$

Релација за струјата на куса врска

Ефективна вредност на наизменичната компонента

$$I_p(t) = (I'' - I') \cdot e^{-t/T_d''} + (I' - I) \cdot e^{-t/T_d'} + I$$

- I'' , I' и I се суптранзиентната, транзиентната и трајната струја на куса врска
- T_d'' и T_d' се суптранзиентната и транзиентната временска константа на придушување
- T_d'' има големина $0,02 \div 0,04$ s
- T_d' има големина $1 \div 2$ s
- Првиот член во се придушува за многу кусо време, за коешто вториот член практично и не се менува

Релација за струјата на куса врска

Еднонасочната компонента $i_a(t)$ е последица на магнетската инерција на флуксот на статорските намотки

$$i(0^-) = i(0^+).$$

Ако струјата пред кусата врска била еднаква на нула, тогаш $i_a(0) = \sqrt{2} \cdot I''$

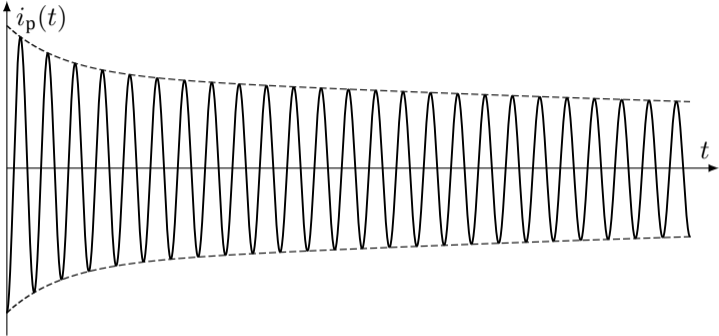
$$i_a(t) = i_a(0) \cdot e^{-t/T_a}$$

Големината T_a претставува временска константа на колото низ кое тече струјата на кусата врска, зависи од структурата на мрежата и од местото каде што настанала кусата врска

$$T_a = L_{\text{вк.}} / R_{\text{вк.}}$$

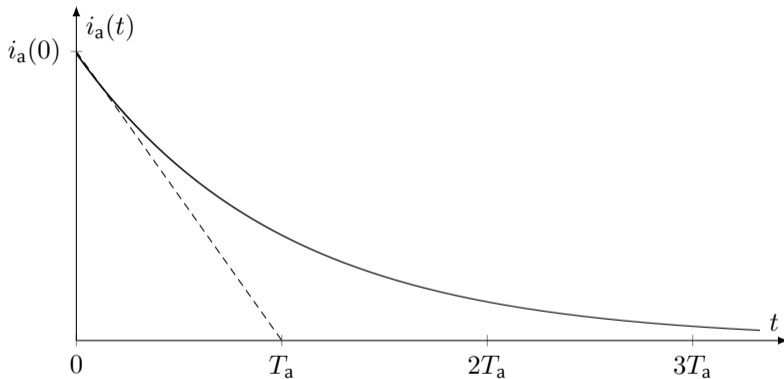
Константата T_a е прилично мала, нешто поголема од T_d'' . Еднонасочната компонента $i_a(t)$ се придушува доста брзо.

Облик на струјата на куса врска



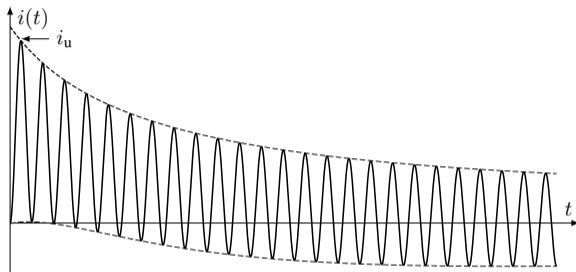
Наизменична компонента на струјата на куса врска

Облик на струјата на куса врска



Еднонасочна компонента на струјата на куса врска

Облик на струјата на куса врска



Осцилограм на струјата на куса врска

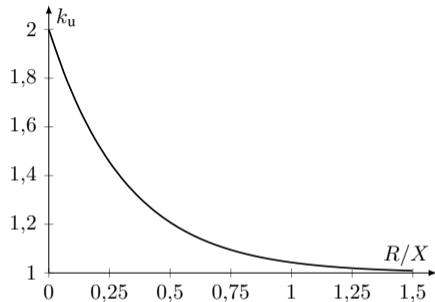
Максимална моментална вредност на струјата на куса врска: ударна струја

$$i_u = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot \left(1 + e^{-0,01/T_a}\right) = \sqrt{2} \cdot k_u \cdot I''$$

Ударен коефициент

$$k_u = 1 + e^{-0,01/T_a}$$

Ударен коефициент



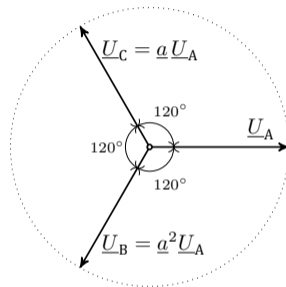
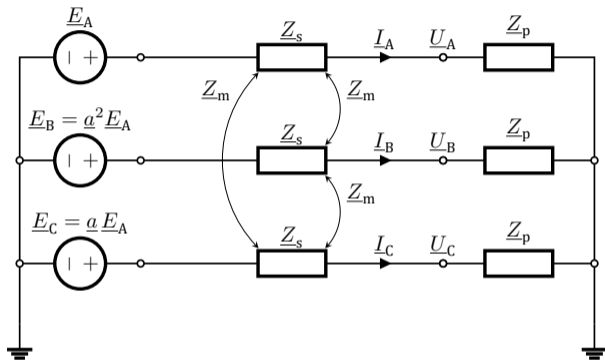
- Вредноста на k_u се движи во границите од 1 до 2
- За куси врски настанати во непосредна близина на генераторите k_u има вредност помеѓу 1,6 и 2
- За куси врски настанати подлабоко во мрежата k_u има вредност помеѓу 1,2 и 1,6

Упростувања при анализите на режимот на куса врска

- Во систем со повеќе синхрони генератори кусата врска се поистоветува со процесот што настанува кога постои само еден синхрон генератор (се занемаруваат различните временски константи)
- Се занемарува дејството на напонскиот регулатор и регулаторот на моќност
- Се занемаруваат сите попречни гранки во системот во кој настанала кусата врска
- Се занемаруваат активните отпорности на сите елементи во мрежите со висок напон ($U_n \geq 110 \text{ kV}$)
 - Водови: $X/R = 3 \div 10$
 - Трансформатори: $X/R = 10 \div 20$

Симетрични компоненти

Симетрични трифазни кола



- Симетричен трифазен генератор

$$\underline{E}_A, \quad \underline{E}_B = \underline{a}^2 \underline{E}_A, \quad \underline{E}_C = \underline{a} \underline{E}_A, \quad \underline{a} = e^{j2\pi/3}$$

- Трифазен вод: еднакви фазни импеданции \underline{Z}_s и меѓусебни импеданции \underline{Z}_m
- Трифазен потрошувач: три еднакви импеданции \underline{Z}_p поврзани во звезда

Симетрични компоненти

Симетрични трифазни кола

Вектор со фазните напони на трифазниот генератор

$$\underline{\mathbf{E}}_f = \begin{bmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{a}^2 \cdot \underline{E}_A \\ \underline{a} \cdot \underline{E}_A \end{bmatrix},$$

Матрица на импеданции на водот

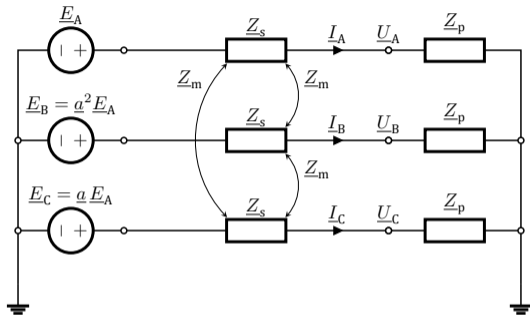
$$\underline{\mathbf{Z}}_{v, f} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{bmatrix},$$

Матрица на импеданции на потрошувачот

$$\underline{\mathbf{Z}}_{p, f} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_p & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_p & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_p \end{bmatrix}.$$

Симетрични компоненти

Симетрични трифазни кола



Матрична равенка за колото

$$\underline{\mathbf{E}}_f = (\underline{\mathbf{Z}}_{v, f} + \underline{\mathbf{Z}}_{p, f}) \cdot \underline{\mathbf{I}}_f$$

Струи во трите фази на водот

$$\underline{\mathbf{I}}_f = (\underline{\mathbf{Z}}_{v, f} + \underline{\mathbf{Z}}_{p, f})^{-1} \cdot \underline{\mathbf{E}}_f$$

Проблем

- Постапката изгледа едноставно како да решаваме еднофазно електрично коло, само што наместо со скалари оперираме со матрици и вектори
- Проблем е што во одреден момент се појавува потреба од инверзија на матрица со димензии 3×3 , т. е. решавање на систем од 3 линеарни равенки

Симетрични компоненти

Симетрични трифазни кола

$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \Rightarrow$ сумата на струи е еднаква на нула

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$$

$$\begin{bmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix},$$

$$\underline{E}_A = \underline{U}_A + \underline{Z}_s \underline{I}_A + \underline{Z}_m \underline{I}_B + \underline{Z}_m \underline{I}_C = \underline{U}_A + \underline{Z}_s \underline{I}_A + \underline{Z}_m (\underline{I}_B + \underline{I}_C).$$

$$\underline{I}_B + \underline{I}_C = -\underline{I}_A,$$

$$\underline{E}_A = \underline{U}_A + \underline{Z}_s \underline{I}_A - \underline{Z}_m \underline{I}_A = \underline{U}_A + (\underline{Z}_s - \underline{Z}_m) \underline{I}_A = \underline{U}_A + \underline{Z} \underline{I}_A.$$

$$\underline{E}_A = \underline{U}_A + \underline{Z} \underline{I}_A, \quad \underline{E}_B = \underline{U}_B + \underline{Z} \underline{I}_B, \quad \underline{E}_C = \underline{U}_C + \underline{Z} \underline{I}_C.$$

$\underline{Z} = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m$ е редна погонска импеданција на трифазниот вод

Симетрични компоненти

Симетрични трифазни кола

$$\underline{U}_A = \underline{Z}_p \underline{I}_A, \quad \underline{U}_B = \underline{Z}_p \underline{I}_B, \quad \underline{U}_C = \underline{Z}_p \underline{I}_C,$$

$$\underline{E}_A = (\underline{Z} + \underline{Z}_p) \underline{I}_A,$$

$$\underline{E}_B = (\underline{Z} + \underline{Z}_p) \underline{I}_B,$$

$$\underline{E}_C = (\underline{Z} + \underline{Z}_p) \underline{I}_C.$$

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z} + \underline{Z}_p}.$$

Бидејќи колото е симетрично и урамнотежено, за струите во другите две фази имаме $\underline{I}_B = \underline{a}^2 \underline{I}_A$ и $\underline{I}_C = \underline{a} \underline{I}_A$.

Пример В.1

На сликата е прикажан симетричен трифазен вод со сопствени импеданции на фазите $\underline{Z}_s = j10 \Omega$ и меѓусебни импеданции $\underline{Z}_m = j5 \Omega$. Водот се напојува од симетричен трифазен генератор со напони на фазите од клемите на генераторот: $\underline{E}_A = E$, $\underline{E}_B = \underline{a}^2 \cdot E$ и $\underline{E}_C = \underline{a} \cdot E$, при што е $E = 230 \text{ V}$ и $\underline{a} = e^{j \cdot 2\pi/3} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$. На крајот од водот е приклучен трифазен симетричен потрошувач со сопствени импеданции по фаза $\underline{Z}_p = 10 \Omega$. Да се пресметаат струите во фазите: \underline{I}_A , \underline{I}_B и \underline{I}_C .

$$\underline{\mathbf{E}}_f = \begin{bmatrix} E \\ \underline{a}^2 E \\ \underline{a} E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 230 \\ -115 - j199,186 \\ -115 + j199,186 \end{bmatrix} \text{ V,}$$

$$\underline{\mathbf{Z}}_{v,f} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j10 & j5 & j5 \\ j5 & j10 & j5 \\ j5 & j5 & j10 \end{bmatrix} \Omega,$$

$$\underline{\mathbf{Z}}_{p,f} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_p & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_p & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \Omega.$$

Пример В.1

Прв начин

$$\begin{aligned}\underline{I}_f &= (\underline{Z}_{v,f} + \underline{Z}_{p,f})^{-1} \cdot \underline{E}_f = \\ &= \begin{bmatrix} 10 + j10 & j5 & j5 \\ j5 & 10 + j10 & j5 \\ j5 & j5 & 10 + j10 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 230 \\ -115 - j199,186 \\ -115 + j199,186 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 18,4 - j9,2 \\ -17,1674 - j11,3349 \\ -1,2326 + j20,5349 \end{bmatrix} \text{ A.}\end{aligned}$$

Втор начин

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z} + \underline{Z}_p} = \frac{230}{j10 - j5 + 10} = (18,4 - j9,2) \text{ A.}$$

$$\underline{I}_B = \underline{a}^2 \underline{I}_A = (-1/2 - j\sqrt{3}/2) \cdot (18,4 - j9,2) = (-17,1674 - j11,3349) \text{ A,}$$

$$\underline{I}_C = \underline{a} \underline{I}_A = (-1/2 + j\sqrt{3}/2) \cdot (18,4 - j9,2) = (-1,2326 + j20,5349) \text{ A.}$$

Пример В.1

programi/sim/sim_kolo.m

```
1 a = exp(1j*2*pi/3);
2 E = 230 * [1; a^2; a];
3 Zv = [10j  5j  5j
4       5j 10j  5j
5       5j  5j 10j];
6 Zp = diag([10 10 10]);
7 I = (Zv + Zp)\E
8
9 Ia = 230/(10j - 5j + 10)
10 Ib = a^2*Ia
11 Ic = a*Ia
```

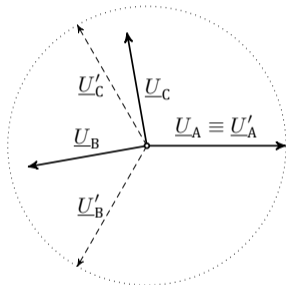
```
>> sim_kolo
```

```
I =
 18.4000 - 9.2000i
-17.1674 -11.3349i
 -1.2326 +20.5349i
Ia =
 18.4000 - 9.2000i
Ib =
-17.1674 -11.3349i
Ic =
 -1.2326 +20.5349i
```

Симетрични компоненти

Несиметричен генератор

Напони со различни ефективни вредности и меѓусебни агли кои не се 120°



Три вектори во рамнина: \underline{U}_A , \underline{U}_B и \underline{U}_C ,
можеме да ги изразиме преку други три
вектори: \underline{U}_1 , \underline{U}_2 и \underline{U}_3

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \overset{\textcircled{1}}{c_{11}\underline{U}_1} + \overset{\textcircled{2}}{c_{12}\underline{U}_2} + \overset{\textcircled{3}}{c_{13}\underline{U}_3} \\ \underline{U}_B &= c_{21}\underline{U}_1 + c_{22}\underline{U}_2 + c_{23}\underline{U}_3 \\ \underline{U}_C &= c_{31}\underline{U}_1 + c_{32}\underline{U}_2 + c_{33}\underline{U}_3\end{aligned}$$

- Секој вектор е заменет со сума од три вектори (9 вектори)
- Деветте вектори се групирани во три групи (системи) кои содржат по три вектори

систем 1: $c_{11}\underline{U}_1$, $c_{21}\underline{U}_1$, $c_{31}\underline{U}_1$,

систем 2: $c_{12}\underline{U}_2$, $c_{22}\underline{U}_2$, $c_{32}\underline{U}_2$,

систем 3: $c_{13}\underline{U}_3$, $c_{23}\underline{U}_3$, $c_{33}\underline{U}_3$,

Симетрични компоненти

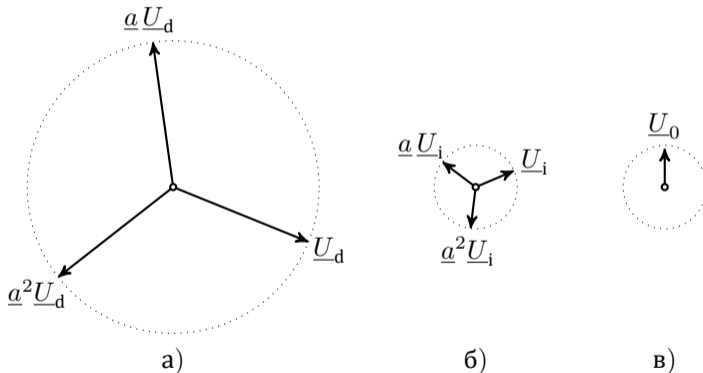
Несиметричен генератор

- Коефициентите c_{ij} ги избираме така што трите нови системи да се состојат од симетрични вектори
 - Систем од симетрични вектори: векторите имаат еднакви амплитуди и еднакви меѓусебни фазни разлики (0° или 120°)
 - Ако фазните агли се 120° : векторите доцнат за по 120° или векторите предничат за по 120°
1. Директен систем: амплитуда U_d , фазата В доцни зад фазата А за 120° , фазата С доцни зад фазата А за 240° .
Компоненти: $\underline{U}_d, \underline{a}^2 \underline{U}_d$ и $\underline{a} \underline{U}_d$
 2. Инверзен систем: амплитуда U_i , фазата В предничи пред фазата А за 120° , фазата С предничи пред фазата А за 240° .
Компоненти: $\underline{U}_i, \underline{a} \underline{U}_i$ и $\underline{a}^2 \underline{U}_i$
 3. Нулти систем: амплитуда U_0 , сите се во фаза (фазна разлика од 0°).
Компонентите: $\underline{U}_0, \underline{U}_0$ и \underline{U}_0

Симетрични компоненти

Несиметричен генератор

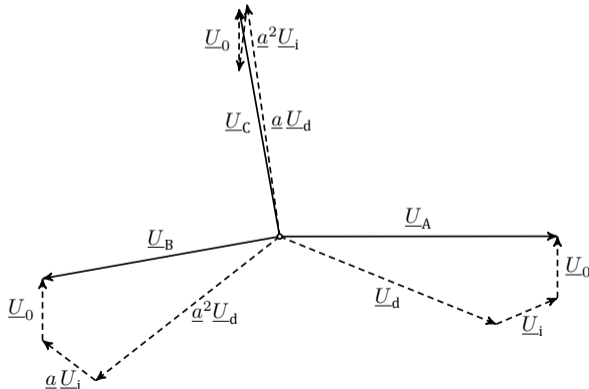
Векторите \underline{U}_d , \underline{U}_i и \underline{U}_0 се нарекуваат симетрични компоненти



Симетрични компоненти

Несиметричен генератор

- Со сумирање на компонентите по фази од трите симетрични системи ќе го добиеме почетниот несиметричен систем
- Секој несиметричен систем на напони можеме да го претставиме како сума од 3 посебни симетрични системи на напони



Симетрични компоненти

Несиметричен генератор

Доколку сакаме еден несиметричен систем од вектори да го претставиме како сума од три система со симетрични вектори тогаш за коефициентите c_{ij} треба да одбереме

$$\underline{U}_A = \underline{U}_d + \underline{U}_i + \underline{U}_0,$$

$$\underline{U}_B = \underline{a}^2 \underline{U}_d + \underline{a} \underline{U}_i + \underline{U}_0,$$

$$\underline{U}_C = \underline{a} \underline{U}_d + \underline{a}^2 \underline{U}_i + \underline{U}_0,$$

$$\underline{\mathbf{U}}_f = \underline{\mathbf{F}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_s,$$

$$\underline{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\underline{\mathbf{U}}_f = [\underline{U}_A \quad \underline{U}_B \quad \underline{U}_C]^T \quad \underline{\mathbf{U}}_s = [\underline{U}_d \quad \underline{U}_i \quad \underline{U}_0]^T.$$

Симетрични компоненти

Несиметричен генератор

Симетрични компоненти преку фазни напони

$$\begin{aligned}\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C &= (1 + \underline{a} + \underline{a}^2) \cdot \underline{U}_d + (1 + \underline{a} + \underline{a}^2) \cdot \underline{U}_i + 3 \cdot \underline{U}_0 \\ &= 3 \cdot \underline{U}_0,\end{aligned}$$

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3} (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C).$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_A + \underline{a}\underline{U}_B + \underline{a}^2\underline{U}_C &= (1 + \underline{a}^3 + \underline{a}^3) \cdot \underline{U}_d + (1 + \underline{a}^2 + \underline{a}^4) \cdot \underline{U}_i \\ &\quad + (1 + \underline{a} + \underline{a}^2) \cdot \underline{U}_0 = 3 \cdot \underline{U}_d,\end{aligned}$$

$$\underline{U}_d = \frac{1}{3} (\underline{U}_A + \underline{a}\underline{U}_B + \underline{a}^2\underline{U}_C),$$

$$\underline{U}_A + \underline{a}^2\underline{U}_B + \underline{a}\underline{U}_C = 3 \cdot \underline{U}_i,$$

$$\underline{U}_i = \frac{1}{3} (\underline{U}_A + \underline{a}^2\underline{U}_B + \underline{a}\underline{U}_C).$$

Симетрични компоненти

Несиметричен генератор

Симетрични компоненти преку фазни напони

$$\underline{\mathbf{U}}_s = \underline{\mathbf{F}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{U}}_f,$$

$$\underline{\mathbf{F}}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{\mathbf{F}}^*)^T.$$

Равенки за напоните на генераторот и за струите во водот

$$\underline{\mathbf{U}}_f = \underline{\mathbf{E}}_f - \underline{\mathbf{Z}}_{v,f} \cdot \underline{\mathbf{I}}_f,$$

Трансформација користејќи симетрични компоненти

$$\underline{\mathbf{F}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_s = \underline{\mathbf{F}} \cdot \underline{\mathbf{E}}_s - \underline{\mathbf{Z}}_{v,f} \cdot \underline{\mathbf{F}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_s,$$

$$\underline{\mathbf{U}}_s = \underline{\mathbf{E}}_s - \underline{\mathbf{F}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{Z}}_{v,f} \cdot \underline{\mathbf{F}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_s,$$

$$\underline{\mathbf{U}}_s = \underline{\mathbf{E}}_s - \underline{\mathbf{Z}}_{v,s} \cdot \underline{\mathbf{I}}_s,$$

Симетрични компоненти

Несиметричен генератор

Матрица на импеданции на водот во симетрични компоненти (дијагонална матрица)

$$\underline{\mathbf{Z}}_{v,s} = \underline{\mathbf{F}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{Z}}_{v,f} \cdot \underline{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s - \underline{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_s - \underline{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_s + 2\underline{Z}_m \end{bmatrix},$$

Елементите на дијагоналата: директна, инверзна и нулта импеданција на водот

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m,$$

$$\underline{Z}_i = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m,$$

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_s + 2\underline{Z}_m.$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{E}_d \\ \underline{E}_i \\ \underline{E}_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d \\ \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i \\ \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_0 \end{bmatrix},$$

Симетрични компоненти

Несиметричен генератор

$$\underline{\mathbf{Z}}_{p, f} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_p & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_p & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_p \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{Z}}_{p, s} = \underline{\mathbf{F}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{Z}}_{p, f} \cdot \underline{\mathbf{F}} = \underline{\mathbf{Z}}_{p, f},$$

$$\underline{U}_d = \underline{Z}_p \cdot \underline{I}_d, \quad \underline{U}_i = \underline{Z}_p \cdot \underline{I}_i, \quad \underline{U}_0 = \underline{Z}_p \cdot \underline{I}_0,$$

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_p},$$

$$\underline{I}_i = \frac{\underline{E}_i}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_p},$$

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{E}_0}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_p}.$$

Пример В.2

Во трифазното коло од примерот В.1 генераторот е несиметричен и неговите фазни напони изнесуваат $\underline{E}_A = 230 \text{ V}$, $\underline{E}_B = 200 \cdot e^{j190^\circ} \text{ V}$ и $\underline{E}_C = 190 \cdot e^{j100^\circ}$. Водот и потрошувачот ги имаат истите параметри како претходно. Да се пресметаат струите во фазите: \underline{I}_A , \underline{I}_B и \underline{I}_C .

$$\underline{\mathbf{E}}_f = \begin{bmatrix} 230 \\ 200 \cdot e^{j190^\circ} \\ 190 \cdot e^{j100^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 230 \\ -196,962 - j34,730 \\ -32,993 + j187,113 \end{bmatrix} \text{ V},$$

$$\underline{\mathbf{E}}_s = \underline{\mathbf{F}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{E}}_f = \begin{bmatrix} 179,033 - j72,731 \\ 50,952 + j21,936 \\ 0,015 + j50,795 \end{bmatrix} \text{ V}.$$

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{I}}_f &= (\underline{\mathbf{Z}}_{v,f} + \underline{\mathbf{Z}}_{p,f})^{-1} \cdot \underline{\mathbf{E}}_f = \\ &= \begin{bmatrix} 10 + j10 & j5 & j5 \\ j5 & 10 + j10 & j5 \\ j5 & j5 & 10 + j10 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 230 \\ -196,962 - j34,730 \\ -32,993 + j187,113 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 18,3991 - j12,2477 \\ -17,1470 + j2,0524 \\ 4,8442 + j13,2411 \end{bmatrix} \text{ A}. \end{aligned}$$

Пример В.2

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = j10 - j5 = j5 \Omega \quad \underline{Z}_0 = j10 + 2 \cdot j5 = j20 \Omega$$

$$\underline{I}_d = \frac{179,033 - j72,731}{j5 + 10} = (11,4134 - j12,9798) \text{ A},$$

$$\underline{I}_i = \frac{50,952 + j21,936}{j5 + 10} = (4,9536 - j0,2832) \text{ A},$$

$$\underline{I}_0 = \frac{0,015 + j50,795}{j20 + 10} = (4,8442 + j13,2411) \text{ A}.$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_0 = (18,3991 - j12,2477) \text{ A},$$

$$\underline{I}_B = \underline{a}^2 \underline{I}_d + \underline{a} \underline{I}_i + \underline{I}_0 = (-17,1470 + j2,0524) \text{ A},$$

$$\underline{I}_C = \underline{a} \underline{I}_d + \underline{a}^2 \underline{I}_i + \underline{I}_0 = (4,8442 + j13,2411) \text{ A}.$$

Пример В.2

programi/sim/nesim_kolo_1.m

```
1 Ef = [230; 200*exp(1j*190/180*pi); 190*exp(1j*100/180*pi)];
2 Zf = [10j 5j 5j
3       5j 10j 5j
4       5j 5j 10j];
5 Zp = diag([10 10 10]);
6 If = (Zf + Zp)\Ef
7
8 a = exp(1j*2*pi/3);
9 F = [1 1 1; a^2 a 1; a a^2 1];
10 Es = 1/3*F'*Ef;
11 Id = Es(1)/(5j + 10)
12 Ii = Es(2)/(5j + 10)
13 I0 = Es(3)/(20j + 10)
14 If = F*[Id; Ii; I0]
```

```
>> nesim_kolo_1
If =
    18.3991 -12.2477i
   -17.1470 + 2.0524i
    4.8442 +13.2411i
Id =
    11.4134 -12.9798i
Ii =
    4.9536 - 0.2832i
I0 =
    2.0321 + 1.0153i
If =
    18.3991 -12.2477i
   -17.1470 + 2.0524i
    4.8442 +13.2411i
```

Симетрични компоненти

Несиметричен потрошувач

$$\underline{\mathbf{Z}}_{p, f} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_3 \end{bmatrix}$$

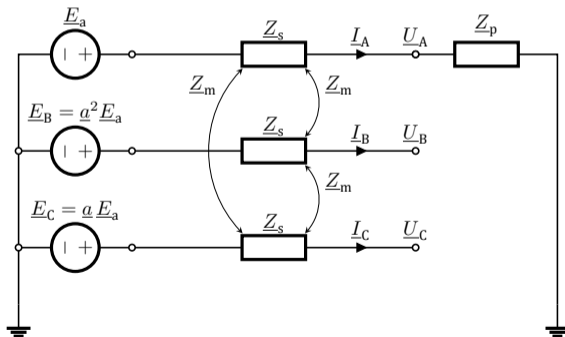
$$\underline{\mathbf{Z}}_{p, s} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + \underline{a}^2 \underline{Z}_2 + \underline{a} \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + \underline{a} \underline{Z}_2 + \underline{a}^2 \underline{Z}_3 \\ \underline{Z}_1 + \underline{a} \underline{Z}_2 + \underline{a}^2 \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + \underline{a}^2 \underline{Z}_2 + \underline{a} \underline{Z}_3 \\ \underline{Z}_1 + \underline{a}^2 \underline{Z}_2 + \underline{a} \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + \underline{a} \underline{Z}_2 + \underline{a}^2 \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 \end{bmatrix}.$$

- Матрицата $\underline{\mathbf{Z}}_{p, s}$ не е дијагонална, немаме три одделни равенки туку систем од равенки
- Во специјални случаи кога сите елементи во колото се симетрични освен потрошувачот кај кој има „екстремна“ несиметрија можеме да дојдеме до три одделни равенки во симетрични компоненти
- „Екстремните“ несиметрии нè интересираат во случаите кога треба да анализираме куси врски во електроенергетски мрежи

Пример В.3

На сликата е прикажан симетричен трифазен вод кој се напојува од симетричен трифазен генератор кои имаат исти параметри како во примерот В.1. На крајот од водот: само на фазата А е приклучен потрошувач со импеданција $\underline{Z}_p = 10 \Omega$, додека фазите В и С се отворени. Да се пресметаат напоните на сите три фази на крајот од водот \underline{U}_A , \underline{U}_B и \underline{U}_C , како и струите во фазите: \underline{I}_A , \underline{I}_B и \underline{I}_C . Пресметките да се направат на два начина:

- Решавајќи го колото во фазен домен,
- Решавајќи го колото со примена на симетрични компоненти.



Пример В.3

Начин а)

$$\underline{\mathbf{E}}_f = \begin{bmatrix} 230 \\ -115 - j199,186 \\ -115 + j199,186 \end{bmatrix} \text{ V,}$$
$$\underline{\mathbf{Z}}_{v,f} = \begin{bmatrix} j10 & j5 & j5 \\ j5 & j10 & j5 \\ j5 & j5 & j10 \end{bmatrix} \Omega, \quad \underline{\mathbf{Z}}_{p,f} = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 10^8 \end{bmatrix} \Omega,$$
$$\underline{\mathbf{I}}_f = (\underline{\mathbf{Z}}_{v,f} + \underline{\mathbf{Z}}_{p,f})^{-1} \cdot \underline{\mathbf{E}}_f =$$
$$= \begin{bmatrix} 10 + j10 & j5 & j5 \\ j5 & 10^8 + j10 & j5 \\ j5 & j5 & 10^8 + j10 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 230 \\ -115 - j199,186 \\ -115 + j199,186 \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} 11,5 - j11,5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A,}$$

Пример В.3

$$\begin{aligned}\underline{\mathbf{U}}_f &= \underline{\mathbf{E}}_f - \underline{\mathbf{Z}}_{v,f} \cdot \underline{\mathbf{I}}_f = \\ &= \begin{bmatrix} 230 \\ -115 - j199,186 \\ -115 + j199,186 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} j10 & j5 & j5 \\ j5 & j10 & j5 \\ j5 & j5 & j10 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 11,5 - j11,5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 115 - j115 \\ -172,5 - j256,686 \\ -172,5 + j141,686 \end{bmatrix} \text{ V.}\end{aligned}$$

Пример В.3

Начин б)

Три одделни равенки

$$\underline{\mathbf{E}}_{\text{dio}} = \underline{\mathbf{F}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{E}}_{\text{abc}} = \underline{\mathbf{F}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} E \\ \underline{a}^2 E \\ \underline{a} E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d \\ \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i \\ \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_0 \end{bmatrix}.$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_0 + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_d + \underline{a} \cdot \underline{I}_i = 0,$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_0 + \underline{a} \cdot \underline{I}_d + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_i = 0,$$

$$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0.$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_0 + \underline{I}_d + \underline{I}_i = 3 \cdot \underline{I}_d,$$

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_A}{3}.$$

Пример В.3

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_d \\ \underline{Z}_i \\ \underline{Z}_0 \end{bmatrix} \cdot \frac{\underline{I}_A}{3},$$

$$\underline{U}_d = E - \underline{Z}_d \cdot \frac{\underline{I}_A}{3},$$

$$\underline{U}_i = -\underline{Z}_i \cdot \frac{\underline{I}_A}{3},$$

$$\underline{U}_0 = -\underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{I}_A}{3}.$$

$$\underline{U}_A = \underline{U}_d + \underline{U}_i + \underline{U}_0 = E - (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0) \cdot \frac{\underline{I}_A}{3}.$$

$$\underline{U}_A = \underline{Z}_p \cdot \underline{I}_A,$$

Пример В.3

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \frac{3 \cdot E}{3 \cdot \underline{Z}_p + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} = \frac{3 \cdot 230}{3 \cdot 10 + j5 + j5 + j20} \\ &= (11,5 - j11,5) \text{ A.}\end{aligned}$$

$$\underline{U}_A = \underline{Z}_p \cdot \underline{I}_A = 10 \cdot (11,5 - j11,5) = (115 - j115) \text{ V.}$$

$$\underline{U}_d = E - \underline{Z}_d \cdot \frac{\underline{I}_A}{3} = 230 - j5 \cdot \frac{11,5 - j11,5}{3} = (210,833 - j19,167) \text{ V}$$

$$\underline{U}_i = -\underline{Z}_i \cdot \frac{\underline{I}_A}{3} = -j5 \cdot \frac{11,5 - j11,5}{3} = (-19,167 - j19,167) \text{ V}$$

$$\underline{U}_0 = -\underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{I}_A}{3} = -j20 \cdot \frac{11,5 - j11,5}{3} = (-76,667 - j76,667) \text{ V}$$

Пример В.3

$$\underline{U}_B = \underline{U}_0 + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_d + \underline{a} \cdot \underline{U}_i = (-172,5 - j256,686) \text{ V},$$

$$\underline{U}_C = \underline{U}_0 + \underline{a} \cdot \underline{U}_d + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_i = (-172,5 - j141,686) \text{ V}.$$

- Струјата на потрошувачот се добива со проста формула

$$\underline{I}_A = \frac{3 \cdot E}{3 \cdot \underline{Z}_p + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0}.$$

- Во случајот кога е $\underline{Z}_p = 0$, кој се нарекува еднофазна куса врска, струјата е

$$\underline{I}_A = \frac{3 \cdot E}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0}.$$

- Симетрични компоненти на струјата на еднофазна куса врска

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_A}{3} = \frac{E}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0}.$$

Пример В.3

programi/sim/nesim_kolo_2.m

```
1 E = 230; Zs = 10j; Zm = 5j; Zp = 10;  
2 a = exp(1j*2*pi/3);  
3  
4 disp('a'));  
5 Ef = 230 *[1; a^2; a];  
6 Zf = [Zs Zm Zm  
7       Zm Zs Zm  
8       Zm Zm Zs];  
9 Z = diag([Zp 1e8 1e8]);  
10 If = (Zf + Z)\Ef  
11 Uf = Zf*If  
12  
13 disp('b'));  
14 Zd = Zs - Zm;  
15 Zi = Zs - Zm;  
16 Zo = Zs + 2*Zm;  
17 Ia = 3*E/(3*Zp + Zd + Zi + Zo)  
18 Ud = E - Zd*Ia/3  
19 Ui = -Zi*Ia/3  
20 Uo = -Zo*Ia/3  
21 Ua = Ud + Ui + Uo  
22 Ub = a^2*Ud + a*Ui + Uo  
23 Uc = a*Ud + a^2*Ui + Uo
```

```
>> nesim_kolo_2
```

```
a)
```

```
Iabc =  
11.5000 -11.5000i  
-0.0000 - 0.0000i  
-0.0000 + 0.0000i
```

```
Uabc =  
1.0e+02 *  
1.1500 - 1.1500i  
-1.7250 - 2.5669i  
-1.7250 + 1.4169i
```

```
b)
```

```
Ia =  
11.5000 -11.5000i
```

```
Ud =  
2.1083e+02 - 1.9167e+01i
```

```
Ui =  
-19.1667 -19.1667i
```

```
Uo =  
-76.6667 -76.6667i
```

```
Ua =  
1.1500e+02 - 1.1500e+02i
```

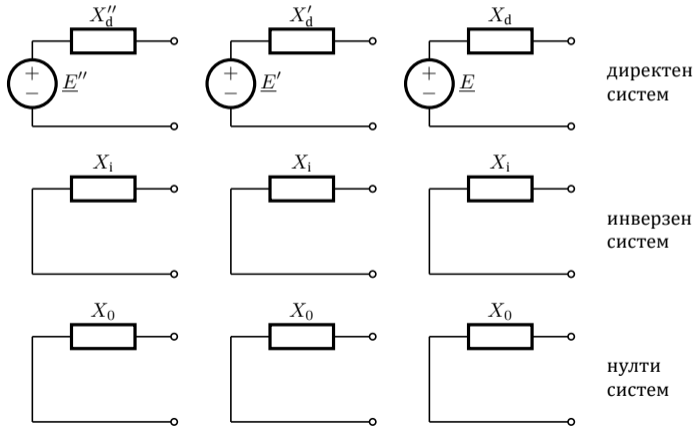
```
Ub =  
-1.7250e+02 - 2.5669e+02i
```

```
Uc =  
-1.7250e+02 + 1.4169e+02i
```

Реактанции на синхроните генератори

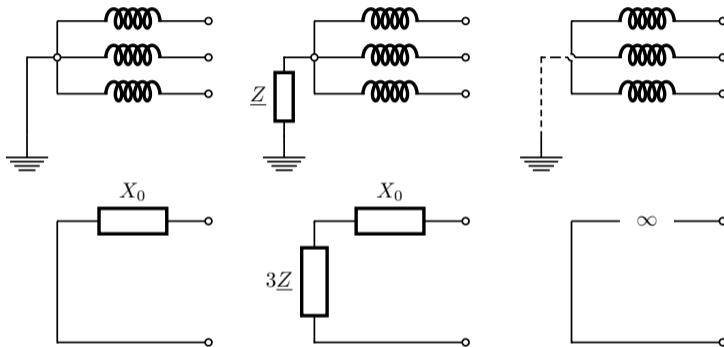
Променлива реактанција на генераторот за директен систем

- субтранзиентна реактанција X_d''
- транзиентна реактанција X_d'
- трајна реактанција X_d



Реактанции на синхроните генератори

Еквивалента шема на синхрон генератор за нулти систем



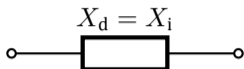
Реактанции на синхроните генератори

Просечни вредности на реактанциите (%) кај синхроните машини

Вид на машини	X_d''	X_d'	X_d	X_i	X_0
Турбогенератори	9 ÷ 15	13 ÷ 22	160 ÷ 200	9 ÷ 15	3 ÷ 9
Хидрогенератори со придушна намотка	15 ÷ 30	20 ÷ 45	60 ÷ 140	15 ÷ 30	3 ÷ 15
Хидрогенератори без придушна намотка	25 ÷ 45	25 ÷ 45	50 ÷ 140	30 ÷ 65	3 ÷ 15
Синхрони компензатори	18 ÷ 38	30 ÷ 60	150 ÷ 220	17 ÷ 37	3 ÷ 15

Двонамотни трансформатори

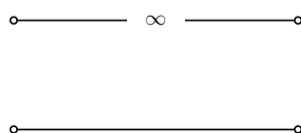
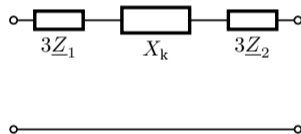
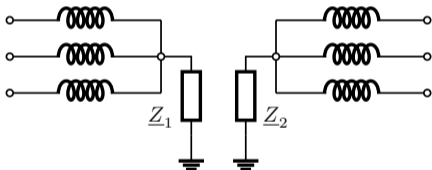
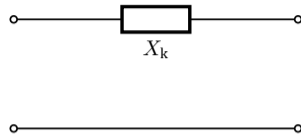
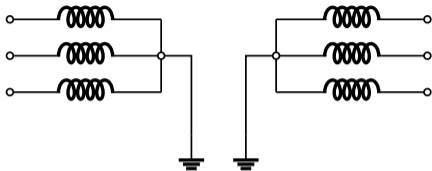
Директен и инверзен систем



$$X_d = X_i = X_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}.$$

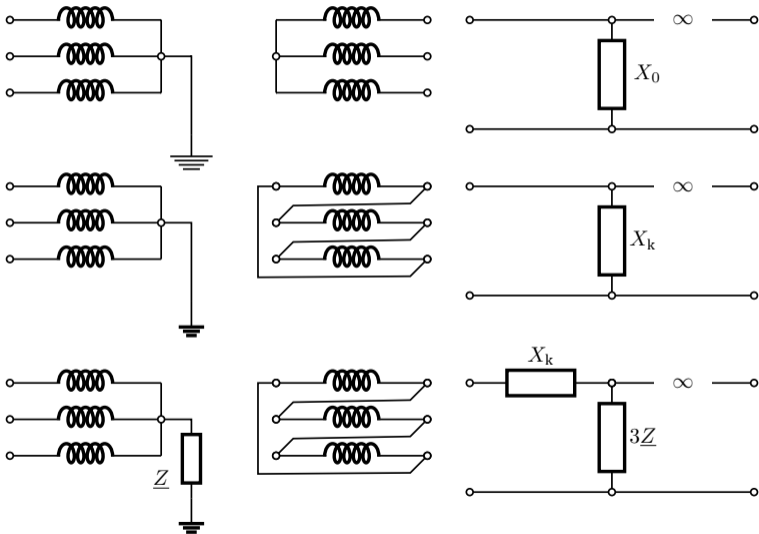
Двонамотни трансформатори

Нулти систем



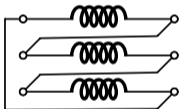
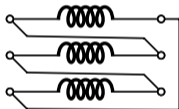
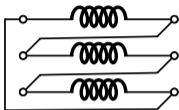
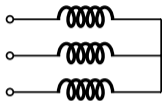
Двонамотни трансформатори

Нулти систем



Двонамотни трансформатори

Нулти систем



Реактанции на надземните водови и каблите

- Директна и инверзна реактанција

$$X_d = X_i = X = x \cdot l$$

- Нулта реактанција

- за единичен вод без заштитно јаже $x_0 \approx 3,5 \cdot x$,
- за единичен вод со челично заштитно јаже $x_0 \approx 3,0 \cdot x$,
- за единичен вод со заштитно јаже од алуминиум-челик или алумовелд $x_0 \approx 2,0 \cdot x$,
- за двосистемски вод без заштитно јаже $x_0 \approx 5,5 \cdot x$,
- за двосистемски вод со челично заштитно јаже $x_0 \approx 4,7 \cdot x$,
- за двосистемски вод со заштитно јаже од алуминиум-челик или алумовелд $x_0 \approx 3,0 \cdot x$,
- нултата реактанција на каблите зависи конструкцијата $x_0 \approx (3,5 \div 4,5) \cdot x$.

Реактанции на потрошувачите

- Сите потрошувачи (освен големи синхрони и асинхрони мотори) се исфрлаат од еквивалентните шеми на мрежата. Нивното постоење се уважува преку зголемување на пресметаните вредности на струите за определен износ (10 ÷ 20%)
- Синхроните мотори и компензатори се третираат исто како синхроните генератори
- Асинхроните мотори со $P_n \geq 100 \text{ kW}$ се уважуваат само во суптранзиентниот период

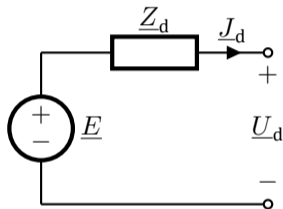
$$X_d = X_i = X_k = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_p} = \frac{1}{k_p} \frac{U_n^2}{S_n}$$

I_p струја на пуштање

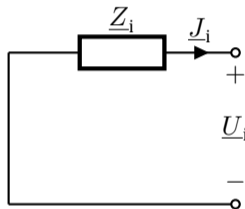
$k_p = I_p/I_n = (3 \div 5)$ коефициент на пуштање

Еквивалентни шеми

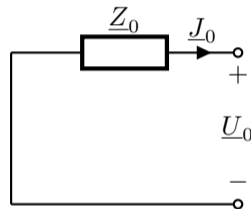
Според Тевененовата теорема секоја линеарна мрежа во однос на било кој пар јазли може да се еквивалентира со еден напонски генератор. Неговата внатрешна импеданција е еднаква на влезната импеданција, а неговиот напон е еднаков на напонот на празен од.



а) Еквивалентна шема за директен систем



б) Еквивалентна шема за инверзен систем



в) Еквивалентна шема за нулти систем

$$\underline{E} = \underline{U}_d + \underline{Z}_d \cdot \underline{J}_d$$

$$0 = \underline{U}_i + \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i$$

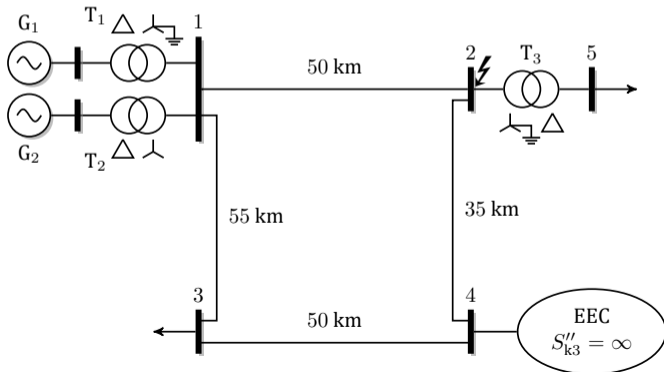
$$0 = \underline{U}_0 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0$$

Пример 4.2

На сликата е прикажана високонапонска мрежа во којашто сите водови $x = 0,4 \Omega/\text{km}$ (за директен систем) и $x_0 = 1,2 \Omega/\text{km}$ (за нулти систем). Мрежата е приклучена на ЕЕС со бесконечна моќност, а истовремено во неа работи и една електрична централа со два блока генератор–трансформатор. Познати се следните податоци:

- $G_1 = G_2$: $S_n = 120 \text{ MVA}$, $U_n = 15,75 \text{ kV}$, $x''_d = 15\%$, $x_i = 20\%$,
- $T_1 = T_2$: $S_n = 120 \text{ MVA}$, преносен однос $15,75/115,5 \text{ kV/kV}$, $u_k = 10\%$,
- T_3 : $S_n = 31,5 \text{ MVA}$, преносен однос $110/10,5 \text{ kV/kV}$, $u_k = 11\%$.

Да се формираат шемите за: директен, инверзен и нулти редослед.



Пример 4.2

Реактанциите на водовите за директен/инверзен и нулти систем

$$\begin{aligned}X_{1-2} &= x \cdot l_{1-2} = 0,4 \cdot 50 = 20 \Omega, & X_{1-2,0} &= x_0 \cdot l_{1-2} = 1,2 \cdot 50 = 60 \Omega, \\X_{1-3} &= x \cdot l_{1-3} = 0,4 \cdot 55 = 22 \Omega, & X_{1-3,0} &= x_0 \cdot l_{1-3} = 1,2 \cdot 55 = 66 \Omega, \\X_{3-4} &= x \cdot l_{3-4} = 0,4 \cdot 50 = 20 \Omega, & X_{3-4,0} &= x_0 \cdot l_{3-4} = 1,2 \cdot 50 = 60 \Omega, \\X_{2-4} &= x \cdot l_{2-4} = 0,4 \cdot 35 = 14 \Omega, & X_{2-4,0} &= x_0 \cdot l_{2-4} = 1,2 \cdot 35 = 42 \Omega.\end{aligned}$$

Реактанции на трансформаторите

$$\begin{aligned}X_{T1} = X_{T2} &= \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{10}{100} \cdot \frac{115,5^2}{120} = 11,117 \Omega; \\X_{T3} &= \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{11}{100} \cdot \frac{110^2}{31,5} = 42,254 \Omega.\end{aligned}$$

Реактанции на генераторите

$$\begin{aligned}X_{G1,d} = X_{G2,d} &= \frac{x''_d}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot k^2 = \frac{15}{100} \cdot \frac{15,75^2}{120} \cdot \left(\frac{115,5}{15,75}\right)^2 = 16,675 \Omega; \\X_{G1,i} = X_{G2,i} &= \frac{x_i}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot k^2 = \frac{20}{100} \cdot \frac{15,75^2}{120} \cdot \left(\frac{115,5}{15,75}\right)^2 = 22,234 \Omega.\end{aligned}$$

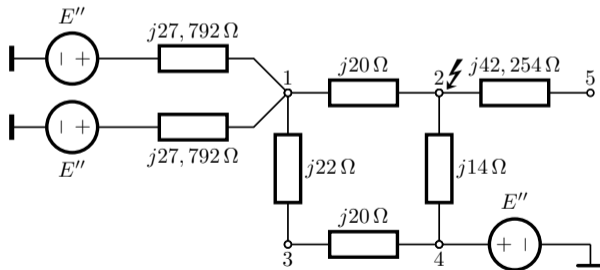
Пример 4.2

Вкупна реактанција на сервиската врска од генераторот и блок трансформаторот

$$X_{GT,d} = 16,675 + 11,117 = 27,792 \Omega,$$

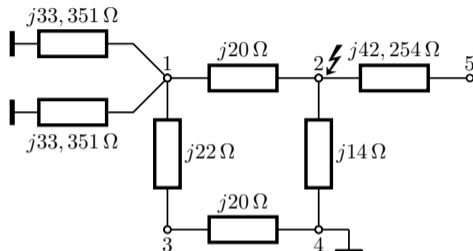
$$X_{GT,i} = 22,234 + 11,117 = 33,351 \Omega.$$

Еквивалентна шема за директен систем

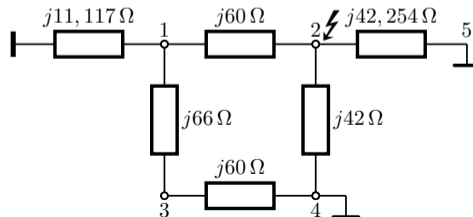


Пример 4.2

Еквивалентна шема за инверзен систем



Еквивалентна шема за нулти систем



Пресметување на режимот на куса врска

- На местото на куса врска имаме 6 непознати величини: \underline{U}_d , \underline{U}_i , \underline{U}_0 и \underline{J}_d , \underline{J}_i , \underline{J}_0 .
- Од еквиваленцијата на мрежата добиваме 3 општи равенки кои не зависи од типот на кусата

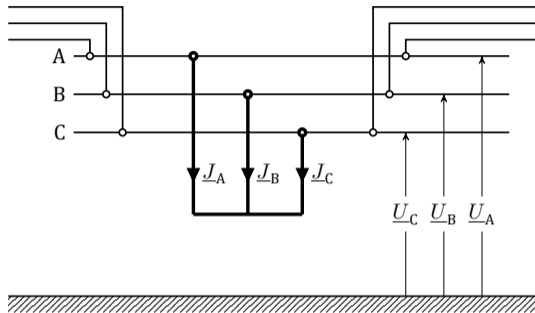
$$\underline{E} = \underline{U}_d + \underline{Z}_d \cdot \underline{J}_d$$

$$0 = \underline{U}_i + \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i$$

$$0 = \underline{U}_0 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0$$

- Секој вид на куса врска воведува 3 релации помеѓу фазните напони и струи. Релациите се трансформираат во систем на симетрични компоненти.
- Решавање на систем од 6 равенки во симетрични компоненти, трансформација во фазни компоненти.
- Пресметка на симетричните компоненти на напоните на јазлите и струите во гранките за директен, инверзен и нулти систем за целата мрежа. Трансформација во фазни компоненти.

Трифазна куца врска



Три општи равенки

$$\underline{E} = \underline{U}_d + \underline{Z}_d \cdot \underline{J}_d$$

$$0 = \underline{U}_i + \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i$$

$$0 = \underline{U}_0 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0$$

Три посебни равенки

$$\underline{J}_A + \underline{J}_B + \underline{J}_C = 0$$

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B = \underline{U}_C$$

$$\underline{J}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{J}_A + \underline{J}_B + \underline{J}_C) = 0$$

$$\underline{U}_0 = -\underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0 = 0$$

$$\underline{U}_d = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{a} \cdot \underline{U}_B + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_C) = 0$$

$$\underline{U}_i = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_B + \underline{a} \cdot \underline{U}_C) = 0$$

Трифазна куса врска

Решение со симетрични компоненти

$$\underline{U}_d = \underline{U}_i = \underline{U}_0 = 0,$$

$$\underline{J}_d = \underline{E}/\underline{Z}_d,$$

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

Фазни напони и струи на местото на кусата врска

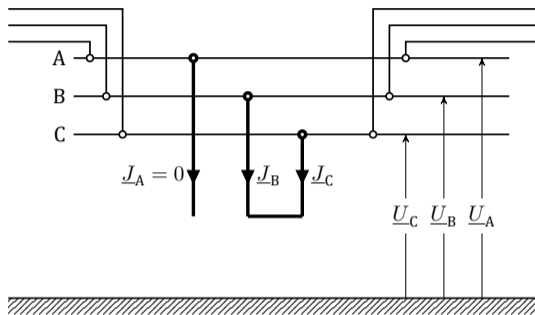
$$\underline{U}_A = \underline{U}_B = \underline{U}_C = 0,$$

$$\underline{J}_A = \underline{J}_d,$$

$$\underline{J}_B = \underline{a}^2 \underline{J}_d,$$

$$\underline{J}_C = \underline{a} \underline{J}_d.$$

Двофазна куса врска



Три општи равенки

$$\underline{E} = \underline{U}_d + \underline{Z}_d \cdot \underline{J}_d$$

$$0 = \underline{U}_i + \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i$$

$$0 = \underline{U}_0 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0$$

Три посебни равенки

$$\underline{J}_A = 0, \quad \underline{J}_B + \underline{J}_C = 0,$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_C.$$

$$\underline{J}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{J}_A + \underline{J}_B + \underline{J}_C) = 0$$

$$\underline{U}_0 = -\underline{Z}_0 \underline{J}_0 = 0$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_C \Rightarrow \underline{a} \underline{U}_d + \underline{a}^2 \underline{U}_i + \underline{U}_0 = \underline{a}^2 \underline{U}_d + \underline{a} \underline{U}_i + \underline{U}_0$$

$$\underline{U}_d = \underline{U}_i$$

Двофазна куса врска

$$\underline{J}_d = (\underline{J}_A + \underline{a} \underline{J}_B + \underline{a}^2 \underline{J}_C) / 3 = (0 + \underline{a} \underline{J}_B - \underline{a}^2 \underline{J}_B) / 3,$$

$$\underline{J}_i = (\underline{J}_A + \underline{a}^2 \underline{J}_B + \underline{a} \underline{J}_C) / 3 = (0 + \underline{a}^2 \underline{J}_B - \underline{a} \underline{J}_B) / 3 = -\underline{J}_d.$$

$$\underline{J}_0 = 0, \quad \underline{U}_d = \underline{U}_i, \quad \underline{J}_i = -\underline{J}_d$$

Решение со симетрични компоненти

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}, \quad \underline{J}_i = -\underline{J}_d, \quad \underline{J}_0 = 0.$$

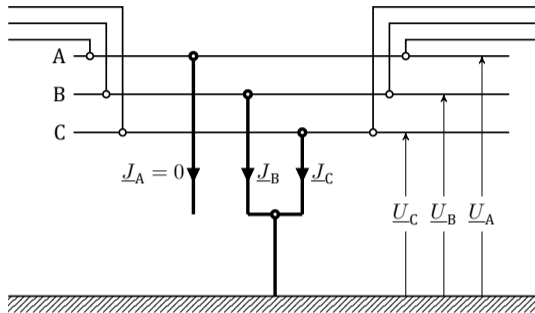
$$\underline{U}_d = \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_d = \frac{\underline{Z}_i \cdot \underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}, \quad \underline{U}_i = \underline{U}_d, \quad \underline{U}_0 = 0.$$

Фазни напони и струи на местото на кусата врска

$$\underline{J}_A = 0, \quad \underline{J}_B = -j\sqrt{3} \cdot \underline{J}_d, \quad \underline{J}_C = -\underline{J}_B,$$

$$\underline{U}_A = 2 \cdot \underline{U}_d = \frac{2 \cdot \underline{E} \cdot \underline{Z}_i}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}, \quad \underline{U}_B = -\frac{\underline{U}_A}{2}, \quad \underline{U}_C = \underline{U}_B.$$

Двофазна куса врска со земја



Три општи равенки

$$\underline{E} = \underline{U}_d + \underline{Z}_d \cdot \underline{J}_d$$

$$0 = \underline{U}_i + \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i$$

$$0 = \underline{U}_0 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0$$

Три посебни равенки

$$\underline{J}_A = 0$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_C = 0$$

$$\underline{U}_d = \underline{U}_i = \underline{U}_0$$

$$\underline{J}_d + \underline{J}_i + \underline{J}_0 = 0$$

Двофазна куса врска со земја

Решение со симетрични компоненти

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k}, \quad \underline{J}_i = \frac{-\underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_d}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_0}, \quad \underline{J}_0 = \frac{-\underline{Z}_i \cdot \underline{J}_d}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_0},$$

$$\underline{U}_d = \frac{\underline{E} \cdot \underline{Z}_k}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k}, \quad \underline{U}_i = \underline{U}_d, \quad \underline{U}_0 = \underline{U}_d.$$

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_i \parallel \underline{Z}_0 = \frac{\underline{Z}_i \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_0}.$$

Фазни напони и струи на местото на кусата врска

$$\underline{J}_A = 0,$$

$$\underline{J}_B = \frac{(\underline{a}^2 - 1) \cdot \underline{Z}_i + (\underline{a}^2 - \underline{a}) \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_d \cdot \underline{Z}_i + \underline{Z}_d \cdot \underline{Z}_0 + \underline{Z}_i \cdot \underline{Z}_0} \cdot \underline{E},$$

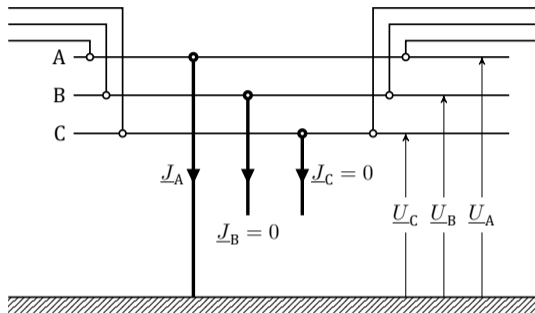
$$\underline{J}_C = \frac{(\underline{a} - 1) \cdot \underline{Z}_i - (\underline{a}^2 - \underline{a}) \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_d \cdot \underline{Z}_i + \underline{Z}_d \cdot \underline{Z}_0 + \underline{Z}_i \cdot \underline{Z}_0} \cdot \underline{E}$$

$$\underline{U}_A = 3 \cdot \underline{U}_d = \frac{3 \cdot \underline{E} \cdot \underline{Z}_k}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k},$$

$$\underline{U}_B = 0,$$

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

Еднофазна куса врска



Три општи равенки

$$\underline{E} = \underline{U}_d + \underline{Z}_d \cdot \underline{J}_d$$

$$0 = \underline{U}_i + \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i$$

$$0 = \underline{U}_0 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0$$

Три посебни равенки

$$\underline{U}_A = 0,$$

$$\underline{J}_B = 0, \quad \underline{J}_C = 0.$$

$$\underline{J}_d = \underline{J}_i = \underline{J}_0$$

$$\underline{U}_d + \underline{U}_i + \underline{U}_0 = 0$$

Еднофазна куса врска

Решение со симетрични компоненти

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_i + \underline{Z}_0$$

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k},$$

$$\underline{J}_i = \underline{J}_d,$$

$$\underline{J}_0 = \underline{J}_d.$$

$$\underline{U}_d = \frac{\underline{E} \cdot \underline{Z}_k}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k},$$

$$\underline{U}_i = -\underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i,$$

$$\underline{U}_0 = -\underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0.$$

Фазни напони и струи на местото на кусата врска

$$\underline{J}_A = 3 \cdot \underline{J}_d = \frac{3\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0},$$

$$\underline{J}_B = 0,$$

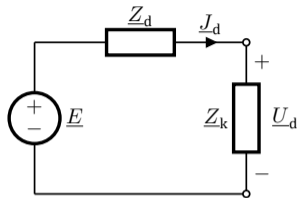
$$\underline{J}_C = 0.$$

$$\underline{U}_A = 0;$$

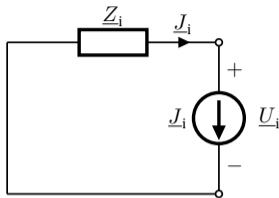
$$\underline{U}_B = \frac{(a^2 - a) \cdot \underline{Z}_i + (a^2 - 1) \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} \cdot \underline{E},$$

$$\underline{U}_C = \frac{(a - a^2) \cdot \underline{Z}_i + (a - 1) \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} \cdot \underline{E}.$$

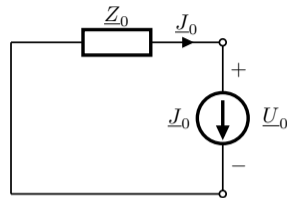
Куси врски - заклучок



директен систем



инверзен систем



нулти систем

$$\begin{aligned} \underline{J}_d &= \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k} & \underline{U}_d &= \underline{Z}_k \cdot \underline{J}_d = \frac{\underline{Z}_k \cdot \underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k} \\ \underline{J}_i &= \underline{p}_k \cdot \underline{J}_d & \underline{U}_i &= -\underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i \\ \underline{J}_0 &= \underline{q}_k \cdot \underline{J}_d & \underline{U}_0 &= -\underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0 \end{aligned}$$

Куси врски - заклучок

Вредности на величините: \underline{Z}_k , \underline{p}_k и \underline{q}_k во зависност од видот на кусата врска

Вид на куса врска	\underline{Z}_k	\underline{p}_k	\underline{q}_k
Трифазна	0	0	0
Двофазна	\underline{Z}_i	-1	0
Двофазна со земја	$\frac{\underline{Z}_i \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_0}$	$\frac{-\underline{Z}_0}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_0}$	$\frac{-\underline{Z}_i}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_0}$
Еднофазна	$\underline{Z}_i + \underline{Z}_0$	1	1

Матрична постапка за пресметување на режимот на куса врска

- Современите ЕЕС се просторно големи и имаат сложена топологија така што не можат да бидат решени без компјутер
- Еден ефикасен начин за решавање на електрични кола со компјутер е примена на методот на јазлови потенцијали
- За решавање на куси врски треба да се решат 3 електрични кола: директен, инверзен и нулти систем, т.е. ни требаат **3 матрици на импеданции** \underline{Z}_d , \underline{Z}_i и \underline{Z}_0 , а во суштина ни треба по **една колона од матрицата на импеданции**
- Влезните импеданции: \underline{Z}_d , \underline{Z}_i и \underline{Z}_0 (\underline{U}_d , \underline{U}_i , \underline{U}_0) и на местото на кусата врска ќе бидат дијагонални елементи од матриците: \underline{Z}_d , \underline{Z}_i и \underline{Z}_0 на позицијата (k, k) .
- Иако $\underline{Z} = \underline{Y}^{-1}$ ние никогаш нема да пресметуваме инверзна матрица
- Напоните на јазлите во директен, инверзен и нулти систем

$$\underline{U}_d(j) = \underline{E} - \underline{Z}_d(k, j) \cdot \underline{J}_d,$$

$$\underline{U}_i(j) = -\underline{Z}_i(k, j) \cdot \underline{J}_i, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\underline{U}_0(j) = -\underline{Z}_0(k, j) \cdot \underline{J}_0,$$

Матрична постапка за пресметување на режимот на куса врска

- Симетрични компоненти на струите во гранките

$$\underline{I}_d(g) = \frac{\underline{U}_d(i) - \underline{U}_d(j)}{\underline{Z}_{gr.d}(g)},$$

$$\underline{I}_i(g) = \frac{\underline{U}_i(i) - \underline{U}_i(j)}{\underline{Z}_{gr.i}(g)}, \quad g = 1, 2, \dots, m$$

$$\underline{I}_0(g) = \frac{\underline{U}_0(i) - \underline{U}_0(j)}{\underline{Z}_{gr.0}(g)}.$$

- Симетрични компоненти на струите во генераторите

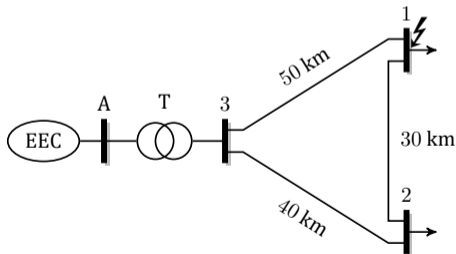
$$\underline{I}_{d.g}(i) = \frac{\underline{E} - \underline{U}_d(i)}{\underline{Z}_{g.d}(i)},$$

$$\underline{I}_{i.g}(i) = -\frac{\underline{U}_i(i)}{\underline{Z}_{g.i}(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n_g$$

$$\underline{I}_{0.g}(i) = -\frac{\underline{U}_0(i)}{\underline{Z}_{g.0}(i)}.$$

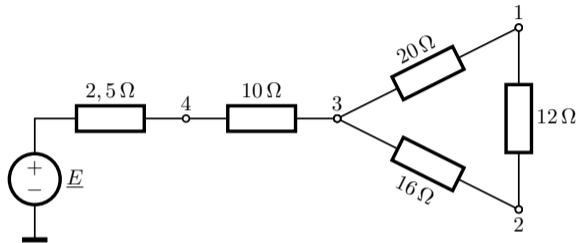
Пример 4.3

Разгледуваме мрежа 110 kV којашто преку еден трансформатор со $X_T = 10 \Omega$, се напојува од напојната точка A со константен напон. ЕЕС од којшто се напојува точката A може да се, еквивалентира со еквивалентен генератор со: $X_{EES.d} = 2,5 \Omega$, $X_{EES.i} = 3 \Omega$ и $X_{EES.0} = 5 \Omega$. Сите водови имаат $x_d = 0,4 \Omega/\text{km}$ и $x_0 = 3 \cdot x_d = 1,2 \Omega/\text{km}$. Со помош на матричната постапка да се пресметаат сите фазни напони и струи за време на трифазна куса врска настаната на собирниците бр. 1.



Пример 4.3

Во случај на трифазна куца врска доволно е да се анализира само директниот систем



$$\underline{\mathbf{Y}} = -j \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{20} + \frac{1}{12} & -\frac{1}{12} & -\frac{1}{20} & 0 \\ -\frac{1}{12} & \frac{1}{12} + \frac{1}{16} & -\frac{1}{16} & 0 \\ -\frac{1}{20} & -\frac{1}{16} & \frac{1}{20} + \frac{1}{16} + \frac{1}{10} & -\frac{1}{10} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{10} & \frac{1}{10} + \frac{1}{2,5} \end{bmatrix} \text{ S,}$$

Пример 4.3

$$\underline{\mathbf{Y}} = -j \cdot \begin{bmatrix} 0,13333 & -0,08333 & -0,05 & 0 \\ -0,08333 & 0,14583 & -0,06250 & 0 \\ -0,05 & -0,06250 & 0,21250 & -0,1 \\ 0 & 0 & -0,1 & 0,5 \end{bmatrix} \text{ S.}$$

$$\underline{\mathbf{Z}} = \underline{\mathbf{Y}}^{-1} = j \cdot \begin{bmatrix} 24,167 & 19,167 & 12,5 & 2,5 \\ 19,167 & 23,167 & 12,5 & 2,5 \\ 12,5 & 12,5 & 12,5 & 2,5 \\ 2,5 & 2,5 & 2,5 & 2,5 \end{bmatrix} \Omega.$$

Бидејќи кусата врска е настаната во јазелот 1, за нас е од интерес првата редица односно колона на $\underline{\mathbf{Z}}$

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}(1,1) = j24,167 \Omega.$$

$$\underline{E} = U_{\text{nf}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,509 \text{ kV.}$$

Пример 4.3

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k} = \frac{63,509}{j24,167} = -j2,628 \text{ kA}, \quad \underline{U}_d = \underline{Z}_k \cdot \underline{J}_d = 0.$$

Напони на јазлите во директен систем ($k = 1$)

$$\underline{U}_d(j) = \underline{E} - \underline{Z}_d(k, j) \cdot \underline{J}_d, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

$$\underline{U}_d(1) = 63,509 - j24,167 \cdot (-j2,628) = 0,$$

$$\underline{U}_d(2) = 63,509 - j19,167 \cdot (-j2,628) = 13,140 \text{ kV},$$

$$\underline{U}_d(3) = 63,509 - j12,5 \cdot (-j2,628) = 30,659 \text{ kV},$$

$$\underline{U}_d(4) = 63,509 - j2,5 \cdot (-j2,628) = 56,939 \text{ kV}.$$

Бидејќи $\underline{J}_i = \underline{J}_0 = 0$ следува

$$\underline{U}_i(j) = \underline{U}_0(j) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Пример 4.3

Фазни напони

$$U_f(j) = U_d(j), \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Директни компоненти на струите во одделните гранки

$$\underline{I}_{2-1.d} = \frac{\underline{U}_d(2) - \underline{U}_d(1)}{jX_{gr.2-1}} = \frac{13,14 - 0}{j12} = -j1,095 \text{ kA},$$

$$\underline{I}_{3-1.d} = \frac{\underline{U}_d(3) - \underline{U}_d(1)}{jX_{gr.3-1}} = \frac{30,659 - 0}{j20} = -j1,533 \text{ kA},$$

$$\underline{I}_{3-2.d} = \frac{\underline{U}_d(3) - \underline{U}_d(2)}{jX_{gr.3-2}} = \frac{30,659 - 13,14}{j16} = -j1,095 \text{ kA},$$

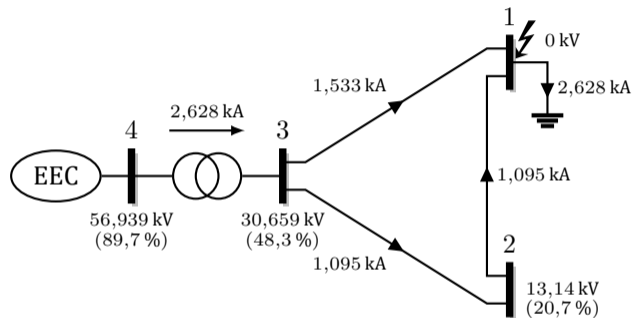
$$\underline{I}_{4-3.d} = \frac{\underline{U}_d(4) - \underline{U}_d(3)}{jX_{gr.4-3}} = \frac{56,939 - 30,659}{j10} = -j2,628 \text{ kA}.$$

Проверка

$$\underline{U}_d(4) = 63,509 - j2,5 \cdot (-j2,628) = 56,939 \text{ kV},$$

што е точно еднакво на фазниот напон на јазелот 4

Пример 4.3



Пример 4.3

programi/kv/kv_primer_1.m

```
1 % matrica na admitancii
2 Y = -1j*[
3     1/20+1/12     -1/12         -1/20         0
4     -1/12  1/12+1/16     -1/16         0
5     -1/20     -1/16  1/20+1/16+1/10     -1/10
6         0         0     -1/10  1/10+1/2.5];
7
8 % vlezna impedancija
9 J = [1 0 0 0]';
10 Z = Y\J
11
12 % struja na kusa vrska
13 Uf = 110/sqrt(3);
14 J = Uf/Z(1)
15 % naponi na jazlite
16 U = Uf - J*Z
17 % strui na grankite
18 f = [2 3 3 4]';
19 t = [1 1 2 3]';
20 Zgr = 1j*[12 20 16 10]';
21 Igr = (U(f) - U(t)) ./ Zgr
22 % struja na generatorot
23 Ig = (Uf - U(4))/2.5j
```

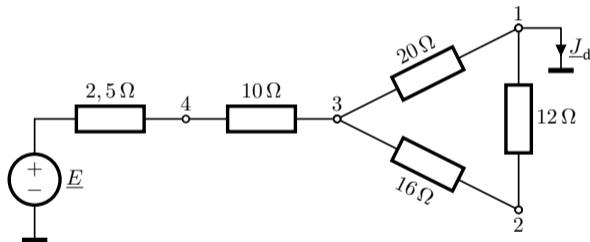
Пример 4.3

```
>> resi_primer_1
Z =
    0.0000 +24.1667i
    0.0000 +19.1667i
    0.0000 +12.5000i
    0.0000 + 2.5000i
J =
    0.0000 - 2.6279i
U =
    0.0000
   13.1397
   30.6593
   56.9387
Igr =
    0.0000 - 1.0950i
    0.0000 - 1.5330i
    0.0000 - 1.0950i
    0.0000 - 2.6279i
Ig =
    0.0000 - 2.6279i
```

Пример 4.4

Да се пресметаат фазните напони и струи во ЕЕС од примерот 4.3 за случај на еднофазна куца врска настаната на фазата А на собирниците бр. 1.

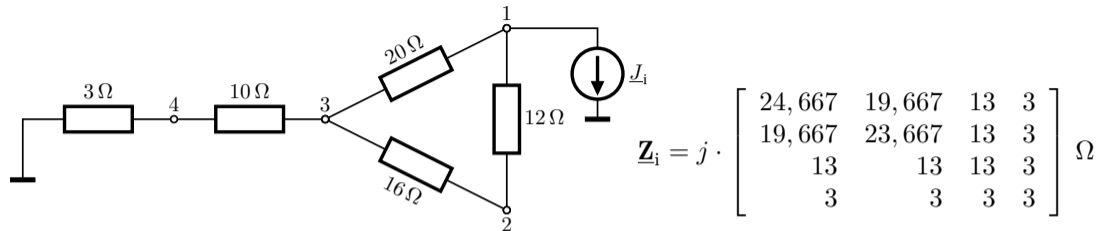
При еднофазна куца врска се формираат три матрици \underline{Z}_d , \underline{Z}_i и \underline{Z}_0



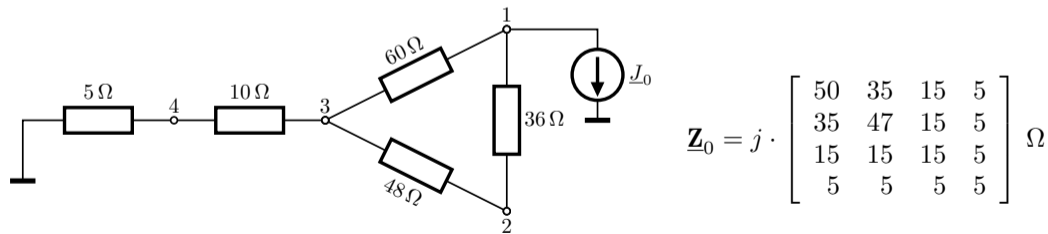
$$\underline{Z}_d = j \cdot \begin{bmatrix} 24,167 & 19,167 & 12,5 & 2,5 \\ 19,167 & 23,167 & 12,5 & 2,5 \\ 12,5 & 12,5 & 12,5 & 2,5 \\ 2,5 & 2,5 & 2,5 & 2,5 \end{bmatrix} \Omega$$

Еквивалентна шема за директен редослед

Пример 4.4



Еквивалентна шема за инверзен редослед



Еквивалентна шема за нулти редослед

Пример 4.4

Импеданција на кусата врска

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_i(1, 1) + \underline{Z}_0(1, 1) = j24,667 + j50 = j74,667 \Omega.$$

Прилики во директниот систем на местото на кусата врска

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k} = \frac{63,509}{j24,167 + j74,667} = -j0,643 \text{ kA},$$
$$\underline{U}_d = \underline{Z}_k \cdot \underline{J}_d = j74,667 \cdot (-j0,643) = 47,979 \text{ kV}.$$

Прилики во инверзниот и нултиот систем на местото на кусата врска

$$\underline{J}_i = \underline{J}_d = -0,643 \text{ kA}, \quad \underline{U}_i = -\underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i = -15,850 \text{ kV},$$
$$\underline{J}_0 = \underline{J}_d = -0,643 \text{ kA}, \quad \underline{U}_0 = -\underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0 = -32,129 \text{ kV}.$$

Пример 4.4

Напони на јазлите во директниот, инвезрниот и нултиот систем

$$\underline{U}_d = \underline{E} - \underline{J}_d \cdot \underline{Z}_{d.1} = 63,509 - (-j0,643) \cdot j \begin{bmatrix} 24,167 \\ 19,167 \\ 12,5 \\ 2,5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 47,979 \\ 51,192 \\ 55,476 \\ 61,902 \end{bmatrix} \text{ kV},$$

$$\underline{U}_i = \underline{J}_i \cdot \underline{Z}_{i.1} = -(-j0,643) \cdot j \begin{bmatrix} 24,667 \\ 19,667 \\ 13 \\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -15,850 \\ -12,637 \\ -8,354 \\ -1,928 \end{bmatrix} \text{ kV},$$

$$\underline{U}_0 = \underline{J}_0 \cdot \underline{Z}_{0.1} = -(-j0,643) \cdot j \begin{bmatrix} 50 \\ 35 \\ 15 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -32,129 \\ -22,490 \\ -9,639 \\ -3,213 \end{bmatrix} \text{ kV}.$$

Пример 4.4

Струи во гранките од директниот, инверзниот и нултиот систем

$$\underline{I}_{2-1.d} = \frac{\underline{U}_d(2) - \underline{U}_d(1)}{jX_{gr.1-2.d}} = \frac{51,192 - 47,979}{j12} = -j0,268 \text{ kA},$$

$$\underline{I}_{2-1.i} = \frac{\underline{U}_i(2) - \underline{U}_i(1)}{jX_{gr.1-2.i}} = \frac{-12,637 + 15,850}{j12} = -j0,268 \text{ kA},$$

$$\underline{I}_{2-1.0} = \frac{\underline{U}_0(2) - \underline{U}_0(1)}{jX_{gr.1-2.0}} = \frac{-22,490 + 32,129}{j36} = -j0,268 \text{ kA}.$$

гранка	\underline{I}_d (kA)	\underline{I}_i (kA)	\underline{I}_0 (kA)
2-1	$-j0,268$	$-j0,268$	$-j0,268$
3-1	$-j0,375$	$-j0,375$	$-j0,375$
3-2	$-j0,268$	$-j0,268$	$-j0,268$
4-3	$-j0,643$	$-j0,643$	$-j0,643$

Пример 4.4

Фазни напони на јазлите

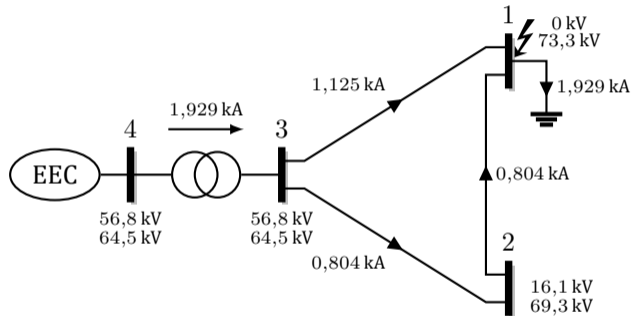
јазел	\underline{U}_A (kV)	\underline{U}_B (kV)	\underline{U}_C (kV)
1	0	$73,337 \cdot e^{-j131,1^\circ}$	$73,337 \cdot e^{j131,1^\circ}$
2	16,065	$69,284 \cdot e^{-j127,1^\circ}$	$69,284 \cdot e^{j127,1^\circ}$
3	37,484	$64,482 \cdot e^{-j121,0^\circ}$	$64,482 \cdot e^{j121,0^\circ}$
4	56,761	$64,482 \cdot e^{-j121,0^\circ}$	$64,482 \cdot e^{j121,0^\circ}$

Фазни струи во гранките

гранка	\underline{I}_A (kA)	\underline{I}_B (kA)	\underline{I}_C (kA)
2-1	$-j0,803$	0	0
3-1	$-j1,125$	0	0
3-2	$-j0,803$	0	0
4-3	$-j1,928$	0	0

Пример 4.4

Струи во фазата A , напон U_A , напони на фазите U_B и U_C (еднакви)



Пример 4.4

programi/kv/kv_ees_1.m

```
1 function ees = kv_ees_1()
2 ees.Uf = 110/sqrt(3);
3 ees.granki = [
4 % pocetok kraj Xd Xi X0
5     2     1    12    12    36
6     3     1    20    20    60
7     3     2    16    16    48
8     4     3    10    10    10
9 ];
10 ees.generatori = [
11 % jazel Xd Xi X0
12     4    2.5  3.0  5.0
13 ];
```

Пример 4.4

programi/kv/podatoci_kv.m

```
1 function [f,t,Ygr,ngr,n,g,Yg,ng,Uf] = podatoci_kv(datoteka)
2 % vlezni podatoci
3 ees = feval(datoteka);
4 Uf = ees.Uf;
5 % podatoci za grankite
6 f = ees.granki(:,1);
7 t = ees.granki(:,2);
8 Ygr = -lj./ees.granki(:,3:5);
9 ngr = size(ees.granki,1);
10 n = max([f; t]);
11 % podatoci za generatorite
12 g = ees.generatori(:,1);
13 Yg = -lj./ees.generatori(:,2:4);
14 ng = size(ees.generatori,1);
```

Пример 4.4

programi/kv/matrica_y_dio.m

```
1 function [Yd, Yi, Y0] = matrica_y_dio(f,t,Ygr,ng,n,g,Yg)
2 % matrica na incidencija
3 A = sparse(1:ng, f, ones(ng, 1), ng, n) ...
4   - sparse(1:ng, t, ones(ng, 1), ng, n);
5 % matrici na admitancii za direkten, inverzen i nulti sistem
6 Yd = A'*sparse(1:ng,1:ng,Ygr(:,1))*A + sparse(g,g,Yg(:,1),n,n);
7 Yi = A'*sparse(1:ng,1:ng,Ygr(:,2))*A + sparse(g,g,Yg(:,2),n,n);
8 Y0 = A'*sparse(1:ng,1:ng,Ygr(:,3))*A + sparse(g,g,Yg(:,3),n,n);
```

Пример 4.4

programi/kv/kusi_vrski.m

```
1 function resenie = kusi_vrski(datoteka,kv,kv_tip)
2 % vlezni podatoci
3 [f, t, Ygr, ngr, n, g, Yg, ng, Uf] = podatoci_kv(datoteka);
4 % matrici na admitancii za direkten, inverzen i nulti sistem
5 [Yd, Yi, Y0] = matrica_y_dio(f,t,Ygr,ngr,n,g,Yg);
6 % vlezni impedancii za direkten, inverzen i nulti sistem
7 J = zeros(n,1); J(kv) = 1;
8 Zd = Yd\J; Zi = Yi\J; Z0 = Y0\J;
9 % simetricni komponenti na strujata na kusa vrska
10 switch kv_tip
11     case 1
12         Zk = Zi(kv) + Z0(kv); p = 1; q = 1;
13     case 2
14         Zk = Zi(kv); p = -1; q = 0;
15     case 3
16         Zk = 0; p = 0; q = 0;
17     case 4
18         Zk=Zi(kv)*Z0(kv)/(Zi(kv)+Z0(kv)); p=-Zk/Zi(kv); q=-Zk/Z0(kv);
19 end
20 Jd = Uf/(Zd(kv) + Zk); Ji = p * Jd; J0 = q * Jd;
21 % simetricni komponenti na naponite
```

Пример 4.4

```
22 Ud = Uf - Jd * Zd;
23 Ui = -Ji * Zi;
24 U0 = -J0 * Z0;
25 % simetricni komponenti na struite na grankite
26 Igr_d = (Ud(f) - Ud(t)) .* Ygr(:,1);
27 Igr_i = (Ui(f) - Ui(t)) .* Ygr(:,2);
28 Igr_0 = (U0(f) - U0(t)) .* Ygr(:,3);
29 % simetricni komponenti na struite na generatorite
30 Ig_d = (Uf - Ud(g)) .* Yg(:,1);
31 Ig_i = -Ui(g) .* Yg(:,2);
32 Ig_0 = -U0(g) .* Yg(:,3);
33 % transformaciona matrica
34 a = exp(1j*2*pi/3); F = [1 1 1; a^2 a 1; a a^2 1];
35 % fazni komponenti na strujata na kusa vrska
36 Jdio = [Jd; Ji; J0]; Jabc = F * Jdio;
37 % fazni komponenti na naponite
38 Udio = [Ud Ui U0]; Uabc = zeros(size(Udio));
39 for i = 1:n
40     Uabc(i,:) = F * Udio(i,:).';
41 end
42 % fazni komponenti na struite na grankite
43 Igr_dio = [Igr_d Igr_i Igr_0];
44 Igr_abc = zeros(size(Igr_dio));
45 for i = 1:ngr
```

Пример 4.4

```
46  Igr_abc(i,:) = F * Igr_dio(i,:).';
47  end
48  % fazni komponenti na struite na generatorite
49  Ig_dio = [Ig_d Ig_i Ig_0];
50  Ig_abc = zeros(size(Ig_dio));
51  for i = 1:ng
52    Igr_abc(i,:) = F * Ig_dio(i,:).';
53  end
54  % formiranje na izleznata promenliva
55  resenie.Yd = Yd;
56  resenie.Yi = Yi;
57  resenie.Y0 = Y0;
58  resenie.Jdio = Jdio;
59  resenie.Jabc = Jabc;
60  resenie.Udio = Udio;
61  resenie.Uabc = Uabc;
62  resenie.Igr_dio = Igr_dio;
63  resenie.Igr_abc = Igr_abc;
64  resenie.Ig_dio = Ig_dio;
65  resenie.Ig_abc = Ig_abc;
```

Пример 4.4

Пресметка на еднофазна куса врска во јазелот 1

```
>> resenie = kusi_vrski('kv_ees_1', 1, 1);
```

Фазни напони на јазлите

```
>> resenie.Uabc
```

```
ans =
```

```
0.0000 + 0.0000i -48.1937 -55.2782i -48.1937 +55.2782i
16.0646 + 0.0000i -41.7678 -55.2782i -41.7678 +55.2782i
37.4840 + 0.0000i -33.2001 -55.2782i -33.2001 +55.2782i
56.7614 + 0.0000i -33.2001 -55.2782i -33.2001 +55.2782i
```

Фазни струи во гранките

```
>> resenie.Igr_abc
```

```
ans =
```

```
0.0000 - 0.8032i 0.0000 - 0.0000i -0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 1.1245i 0.0000 + 0.0000i 0.0000 + 0.0000i
0.0000 - 0.8032i -0.0000 + 0.0000i 0.0000 + 0.0000i
0.0000 - 1.9277i 0.0000 + 0.0000i 0.0000 + 0.0000i
```

Пример 4.5

Да се одреди временскиот тек на струите на куса врска за случај на трифазна куса врска настаната на клемите на генераторот. Пред настанувањето на кусата врска генераторот работел во еден од следните два режима:

а) празен од $I = 0$, при $U = U_n$,

б) чисто активно оптоварување со моќност $P = 100 \text{ MW}$ ($\cos \varphi = 1$), при $U = U_n$.

За генераторот се познати следните податоци:

$S_n = 150 \text{ MVA}$; $U_n = 15,75 \text{ kV}$; $x_d = 120\%$; $x'_d = 30\%$; $x''_d = 20\%$;
 $x_q = 75\%$; $\cos \varphi_n = 0,90$; $T''_d = 0,04 \text{ s}$; $T'_d = 1,0 \text{ s}$; $T_a = 0,15 \text{ s}$.

$$X''_d = \frac{x''_d}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{20}{100} \cdot \frac{15,75^2}{150} = 0,331 \Omega,$$

$$X'_d = \frac{x'_d}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{30}{100} \cdot \frac{15,75^2}{150} = 0,496 \Omega,$$

$$X_d = \frac{x_d}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{120}{100} \cdot \frac{15,75^2}{150} = 1,984 \Omega,$$

$$X_q = \frac{x_q}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{75}{100} \cdot \frac{15,75^2}{150} = 1,240 \Omega.$$

Пример 4.5

$$i(t) = i_p(t) - i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos(\omega t - \alpha_0) - i_a(t)$$

$$I_p(t) = (I'' - I') \cdot e^{-t/T_d''} + (I' - I) \cdot e^{-t/T_d'} + I,$$

$$I'' = \frac{U_f}{X_d''} + I_f \cdot \sin(\theta + \varphi) = I_0'' + I_d,$$

$$I' = \frac{U_f}{X_d'} + I_f \cdot \sin(\theta + \varphi) = I_0' + I_d,$$

$$I = \frac{U_f}{X_d} + I_f \cdot \sin(\theta + \varphi) = I_0 + I_d,$$

$$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_0'' \cdot \cos(\alpha_0 - \theta) \cdot e^{-t/T_a}.$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{X_q \cdot I \cdot \cos \varphi}{U_f + X_q \cdot I \cdot \sin \varphi}.$$

α_0 е агол што оската d на роторот го зафаќа со оската на фазата A во моментот $t = 0$

θ е фазна разлика меѓу \underline{E}_q и \underline{U}_f

φ е фазна разлика меѓу \underline{U}_f и \underline{I}

Пример 4.5

а) Пред настанување на кусата врска генераторот бил во празен од

$$I = 0, \quad \theta = 0, \quad E_q = U_{nf} = 15,75/\sqrt{3} = 9,093 \text{ kV}, \quad I_d = 0.$$

$$I_0'' = \frac{U_f}{X_d''} = \frac{15,75}{\sqrt{3} \cdot 0,331} = 27,472 \text{ kA}, \quad I'' = I_0'' + I_d = I_0'' = 27,472 \text{ kA},$$

$$I_0' = \frac{U_f}{X_d'} = \frac{15,75}{\sqrt{3} \cdot 0,496} = 18,333 \text{ kA}, \quad I' = I_0' + I_d = I_0' = 18,333 \text{ kA},$$

$$I_0 = \frac{U_f}{X_d} = \frac{15,75}{\sqrt{3} \cdot 1,984} = 4,583 \text{ kA}, \quad I = I_0 + I_d = I_0 = 4,583 \text{ kA}.$$

$$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_0'' \cdot \cos(\alpha_0 - \theta) \cdot e^{-t/T_a} = i_a(0) \cdot e^{-t/T_a},$$

$$i_a(0) = \sqrt{2} \cdot 27,472 \cdot \cos(\alpha_0 - 0) = 38,851 \cdot \cos \alpha_0.$$

Ќе усвоиме $\alpha_0 = 0$ што е најнеповолен случај

Пример 4.5

$$I_p(t) = (27,472 - 18,333) \cdot e^{-t/0,04} + (18,333 - 4,583) \cdot e^{-t/1,0} + 4,583;$$

$$I_p(t) = (9,139 \cdot e^{-25t} + 13,75 \cdot e^{-t} + 4,583) \text{ kA.}$$

$$\begin{aligned} i_A(t) &= \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos \omega t - i_a(0) \cdot e^{-t/T_a} \\ &= \sqrt{2} (9,139 \cdot e^{-25t} + 13,75 \cdot e^{-t} + 4,583) \cos \omega t \\ &\quad - 38,851 \cdot e^{-6,667t} \text{ kA.} \end{aligned}$$

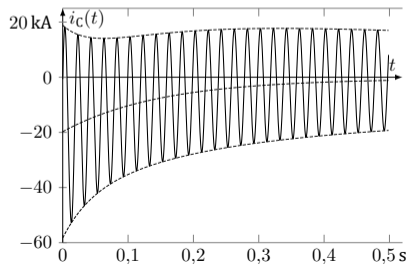
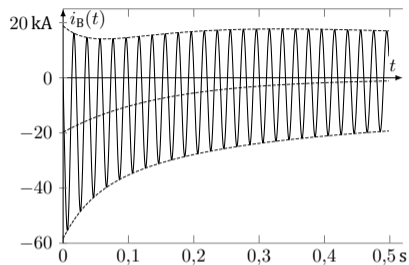
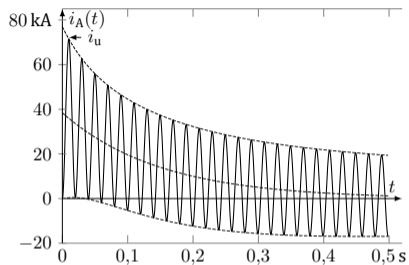
$$i_B(t) = \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) - \sqrt{2} \cdot I_0'' \cdot \cos(-2\pi/3) \cdot e^{-t/T_a},$$

$$i_C(t) = \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3) - \sqrt{2} \cdot I_0'' \cdot \cos(2\pi/3) \cdot e^{-t/T_a},$$

$$\begin{aligned} i_B(t) &= [\sqrt{2} (9,139 \cdot e^{-25t} + 13,75 \cdot e^{-t} + 4,583) \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ &\quad - 19,425 \cdot e^{-6,667t}] \text{ kA,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_C(t) &= [\sqrt{2} (9,139 \cdot e^{-25t} + 13,75 \cdot e^{-t} + 4,583) \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ &\quad - 19,425 \cdot e^{-6,667t}] \text{ kA.} \end{aligned}$$

Пример 4.5



Пример 4.5

$$i_u = i_A(t)_{t=0,01} = \sqrt{2} \cdot I_p(t)_{t=0,01} + i_a(t)_{t=0,01} = 35,799 + 36,345 = 72,144 \text{ kA.}$$

$$k_u = \frac{i_u}{\sqrt{2} \cdot I''} = \frac{72,144}{\sqrt{2} \cdot 27,472} = 1,857.$$

$$k_u \approx 1 + e^{-0,01/T_a} = 1 + e^{-0,01/0,15} = 1,935.$$

Пример 4.5

б) Пред настанување на кусата врска генераторот бил оптоварен со чисто активна моќност $P = 100 \text{ MW}$, $Q = 0$, $U = U_n$

$$U_f = U_{nf} = \frac{15,75}{\sqrt{3}} = 9,093 \text{ kV}; \quad I_f = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 3,666 \text{ kA}.$$

$$\theta = \arctg \frac{X_q \cdot I}{U_f} = \arctg \frac{1,24 \cdot 3,666}{9,093} = 26,56^\circ.$$

$$I_d = I_f \cdot \sin(\theta + \varphi) = 3,666 \cdot \sin 26,56^\circ = 1,639 \text{ kA};$$

$$I_q = I_f \cdot \cos(\theta + \varphi) = 3,666 \cdot \cos 26,56^\circ = 3,279 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_d = -j1,639 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_q = 3,279 \text{ kA}.$$

$$\underline{U}_f = U_f \cdot e^{-j\theta} = 9,093 \cdot e^{-j26,56^\circ} \text{ kV}.$$

Пример 4.5

$$\begin{aligned}\underline{E}_q &= \underline{U}_f + jX_q \cdot \underline{I}_q + jX_d \cdot \underline{I}_d \\ &= 9,093 \cdot e^{-j26,56^\circ} + j1,240 \cdot 3,279 + j1,984 \cdot (-j1,639) = 11,385 \text{ kV}.\end{aligned}$$

$$I_0'' = \frac{E_q}{X_d''} = 34,396 \text{ kA}; I'' = I_0'' + I_d = 36,035 \text{ kA};$$

$$I_0' = \frac{E_q}{X_d'} = 22,954 \text{ kA}; I' = I_0' + I_d = 24,593 \text{ kA};$$

$$I_0 = \frac{E_q}{X_d} = 5,738 \text{ kA}; I = I_0 + I_d = 7,377 \text{ kA};$$

$$I_p(t) = 11,442 \cdot e^{-25t} + 17,216 \cdot e^{-t} + 7,377 \text{ kA};$$

$$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_0'' \cdot \cos(\alpha_0 - \theta).$$

Ќе усвоиме $\alpha_0 = \theta = 26,56^\circ$ што е најнеповолен случај

Пример 4.5

$$\begin{aligned}i_A(t) &= \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos(\omega t - \alpha_0) - i_a(0) \cdot e^{-t/T_a} = \\&= \sqrt{2} \cdot (11,442 \cdot e^{-25t} + 17,216 \cdot e^{-t} + 7,377) \cdot \cos(\omega t - 26,56^\circ) - \\&- 48,643 \cdot e^{-6,667t} \text{ kA.}\end{aligned}$$

Максималната вредност на струјата ќе ја добиеме од условот

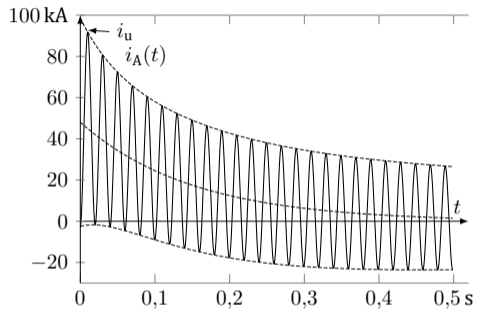
$$\cos(\omega t - \alpha_0) = -1,$$

$$\omega t - \alpha_0 = \pi,$$

$$t = (\pi + \alpha_0) / \omega = 0,0115 \text{ s.}$$

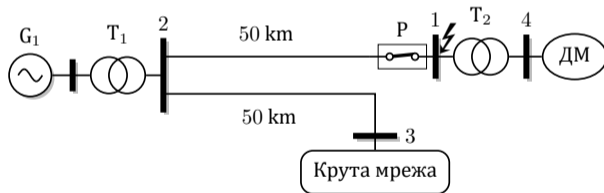
$$i_u = i_A(t)_{t=0,0115} = 92,7 \text{ kA.}$$

Пример 4.5



Пример 4.8

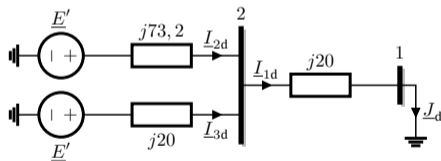
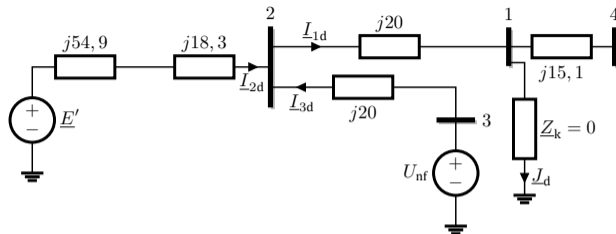
Да се одреди расклопната струја и моќност на прекинувачот P за случај на трифазна куса врска кај собирниците 1. Да се претпостави дека пред настанување на кусата врска системот работел во режим близок до номиналниот и дека до исклучување на кусата врска доаѓа во транзиентниот период. Двата вода имаат $x_d = 0,4 \Omega/\text{km}$. Електроенергетскиот систем (ЕЕС) со кој прикажаниот систем е поврзан во јазелот 3 има бесконечна моќност. Од дадениот систем преку трансформаторот T_2 се напојува една дистрибутивна мрежа (ДМ).



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/kV; $u_k = 10\%$.
- T_2 : 80 MVA; 110/36,75 kV/kV; $u_k = 10\%$.

Пример 4.8



$$\underline{Z}'_d = j20 + j73,2 \parallel j20 = j20 + \frac{j73,2 \cdot j20}{j73,2 + j20} = j35,708 \Omega.$$

Пример 4.8

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}'}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k} = \frac{1,2 \cdot U_{nf}}{j35,708 + 0} = -j2,134 \text{ kA.}$$

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

$$\underline{I}_{1d} = \underline{J}_d = -j2,134 \text{ kA,}$$

$$\underline{I}_{2d} = \frac{j20}{j20 + j73,2} \cdot \underline{I}_{1d} = -j0,458 \text{ kA,}$$

$$\underline{I}_{3d} = \underline{I}_{1d} - \underline{I}_{2d} = -j1,676 \text{ kA.}$$

Фазни струи низ прекинувачот

$$\underline{I}_{1A} = \underline{I}_{1d} + \underline{I}_{1i} + \underline{I}_{10} = \underline{I}_{1d} + 0 + 0 = \underline{I}_{1d},$$

$$\underline{I}_{1B} = \underline{a}^2 \underline{I}_{1d} + \underline{a} \underline{I}_{1i} + \underline{I}_{10} = \underline{a}^2 \underline{I}_{1d} + 0 + 0 = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{1d},$$

$$\underline{I}_{1C} = \underline{a} \underline{I}_{1d} + \underline{a}^2 \underline{I}_{1i} + \underline{I}_{10} = \underline{a} \underline{I}_{1d} + 0 + 0 = \underline{a} \cdot \underline{I}_{1d}.$$

$$I_{1A} = I_{1B} = I_{1C} = I_{1d} = 2,134 \text{ kA.}$$

Пример 4.8

programi/kv/kv_ees_2.m

```
1 function ees = kv_ees_2()
2 ees.Uf = 1.2*110/sqrt(3);
3 ees.granki = [
4 % pocetok kraj Xd Xi X0
5     2     1    20    20    60
6     3     2    20    20    60
7     4     1    20    20    60
8 ];
9 ees.generatori = [
10 % jazel Xd Xi X0
11     2 73.2 27.45 inf
12     3 1e-6 1e-6 1e-6
13 ];
```

```
resenie = kusi_vrski('kv_ees_2',1,3)
```

```
>> abs(resenie.Igr_abc)
```

```
ans =
    2.1343    2.1343    2.1343
    1.6763    1.6763    1.6763
    0.0000    0.0000    0.0000
```

Пример 4.8

```
>> abs(resenie.Ig_abc)
ans =
    0.4580    0.4580    0.4580
    1.6763    1.6763    1.6763

>> abs(resenie.Uabc)/(110/sqrt(3))*100
ans =
         0         0         0
    67.2115    67.2115    67.2115
   120.0000   120.0000   120.0000
    0.0000    0.0000    0.0000
```

Пример 4.9

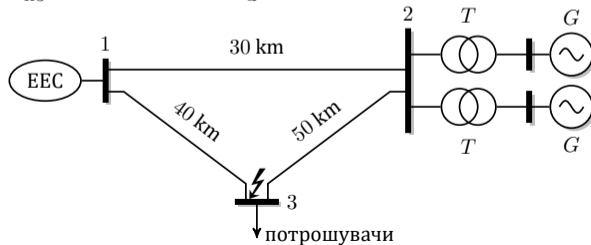
Се посматра режим на куса врска во суптранзиентниот период, настаната кај потрошувачките собирници 3. Да се одредат фазните напони и струи на местото на куса врска за случај на:

- трифазна куса врска,
- двофазна куса врска помеѓу фазите В и С.

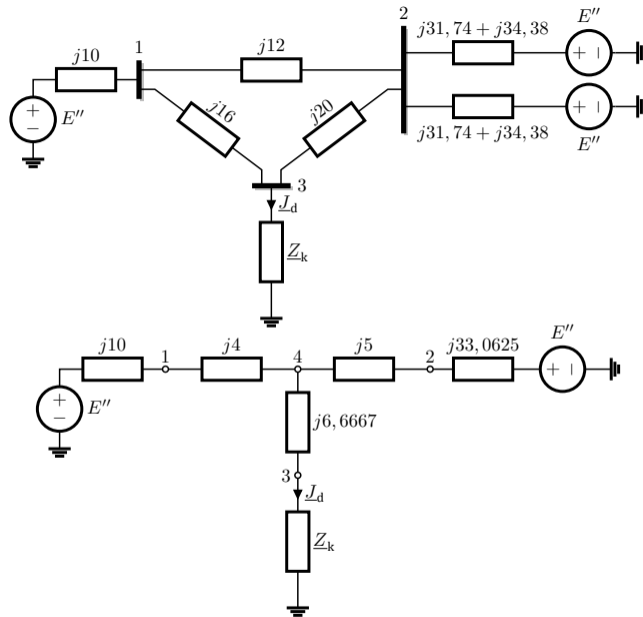
Сите водови имаат еднакви надолжни параметри $x_d = 0,4 \Omega/\text{km}$ и $x_0 = 1,2 \Omega/\text{km}$.

Податоци за елементите:

- G: 50 MVA; 10,5 kV; $x''_d = x_i = 13\%$; $x_0 = 30\%$.
- T: 50 MVA; 10,5/115 kV/kV; $u_k = 12\%$.
- EEC: $U_n = 110 \text{ kV}$; $S''_{k3} = 1210 \text{ MVA}$; $X''_d = X_i$.



Пример 4.9



Пример 4.9

$$\underline{Z}_d'' = j6,6667 + j(10 + 4) \parallel j(5 + 33,0625) = j16,902 \Omega.$$

$$\underline{Z}_i = \underline{Z}_d'' = j16,902 \Omega.$$

а) Трифазна куца врска ($\underline{Z}_k = 0$)

$$\underline{J}_d = \frac{E''}{\underline{Z}_d'' + \underline{Z}_k} = \frac{E''}{\underline{Z}_d''} = \frac{110/\sqrt{3}}{j16,902} = -j3,757 \text{ kA},$$

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

$$\underline{J}_A = \underline{J}_d + \underline{J}_i + \underline{J}_0 = \underline{J}_d,$$

$$\underline{J}_B = \underline{a}^2 \underline{J}_d + \underline{a} \underline{J}_i + \underline{J}_0 = \underline{a}^2 \underline{J}_d,$$

$$\underline{J}_C = \underline{a} \underline{J}_d + \underline{a}^2 \underline{J}_i + \underline{J}_0 = \underline{a} \underline{J}_d.$$

$$\underline{U}_{3d} = \underline{Z}_k \cdot \underline{J}_d = 0, \quad \underline{U}_i = \underline{U}_{30} = 0,$$

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

Пример 4.9

б) Двофазна куса врска ($\underline{Z}_k = \underline{Z}_i = j16,902 \Omega$)

$$\underline{J}_d = \frac{E''}{\underline{Z}_d'' + \underline{Z}_k} = \frac{110/\sqrt{3}}{j16,902 + j16,902} = -j1,8787 \text{ kA},$$

$$\underline{J}_i = -\underline{J}_d = j1,8787 \text{ kA},$$

$$\underline{J}_0 = 0,$$

$$\underline{J}_A = \underline{J}_d + \underline{J}_i + \underline{J}_0 = 0,$$

$$\underline{J}_B = \underline{a}^2 \underline{J}_d + \underline{a} \underline{J}_i + \underline{J}_0 = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \cdot \underline{J}_d = -j\sqrt{3} \cdot (-j1,879) = -3,254 \text{ kA},$$

$$\underline{J}_C = -\underline{J}_B = 3,254 \text{ kA}$$

$$\underline{U}_{3d} = \underline{Z}_k \cdot \underline{J}_d = j16,902 \cdot (-j1,8787) = 31,754 \text{ kV},$$

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

$$\underline{U}_{30} = 0,$$

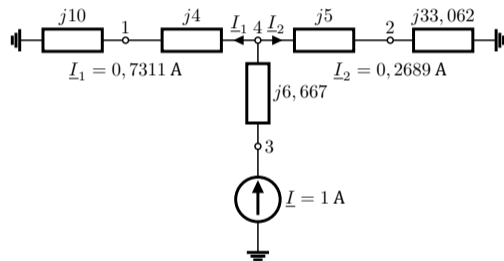
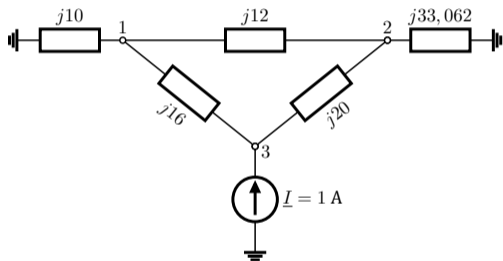
$$\underline{U}_{3A} = \underline{U}_{3d} + \underline{U}_{3i} + \underline{U}_{30} = 2 \cdot \underline{U}_{3d} = 63,508 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{3B} = \underline{U}_{3C} = (\underline{a}^2 + \underline{a}) \cdot \underline{U}_{3d} = -\underline{U}_{3d} = -31,754 \text{ kV},$$

Пример 4.10

За системот од примерот 4.9 да се одредат директните компоненти на напоните на сите јазли и струите во гранките: 1-2, 1-3 и 2-3 за случај на трифазна куса врска.

1. Пресметка на меѓусебни импеданции со еквиваленција на делови од колото



$$\underline{I}_1 = \frac{5 + 33,062}{10 + 4 + 5 + 33,062} \cdot 1 = 0,7311 \text{ A},$$

$$\underline{I}_2 = 1 - 0,7311 = 0,2689 \text{ A}.$$

$$\underline{U}_1 = j10 \cdot 0,7311 = j7,311 \text{ V},$$

$$\underline{U}_2 = j33,062 \cdot 0,2689 = j8,891 \text{ V},$$

$$\underline{U}_4 = j(10 + 4) \cdot 0,7311 = j10,235 \text{ V},$$

$$\underline{U}_3 = j10,235 + j6,667 \cdot 1 = j16,902 \text{ V},$$

Пример 4.10

$$\underline{Z}_{13} = \underline{U}_1 / \underline{I} = j7,311 \Omega,$$

$$\underline{Z}_{23} = \underline{U}_2 / \underline{I} = j8,891 \Omega,$$

$$\underline{Z}_{33} = \underline{U}_3 / \underline{I} = j16,902 \Omega.$$

2. Пресметка на меѓусебни импеданции со примена на методот на независни напони

$$\underline{\mathbf{Y}} \cdot \underline{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{I}}$$

$$\underline{\mathbf{Y}} = j\mathbf{B} \Rightarrow -\mathbf{B} \cdot \underline{\mathbf{U}} = j \cdot \underline{\mathbf{I}}.$$

$$-\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/10 + 1/12 + 1/16 & -1/12 & -1/16 \\ -1/12 & 1/12 + 1/20 + 1/33,062 & -1/20 \\ -1/16 & -1/20 & 1/16 + 1/20 \end{bmatrix},$$

$$j \cdot \underline{\mathbf{I}} = [0 \quad 0 \quad j1]^T.$$

Метод на Гаусова елиминација (проширена матрица на системот равенки)

$$\mathbf{A} = [-\mathbf{B} \quad j \cdot \underline{\mathbf{I}}],$$

Пример 4.10

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0,245833 & -0,083333 & -0,062500 & 0 \\ -0,083333 & 0,163580 & -0,050000 & 0 \\ -0,062500 & -0,050000 & 0,112500 & j1 \end{bmatrix}.$$

Првата редица ја множиме со

$$c = -A_{12}/A_{11} = 0,083333/0,245833 = 0,338983$$

и ја додаваме на втората редица

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0,245833 & -0,083333 & -0,062500 & 0 \\ 0 & 0,135331 & -0,071186 & 0 \\ -0,062500 & -0,050000 & 0,112500 & j1 \end{bmatrix}.$$

Првата редица ја множиме со

$$c = -A_{13}/A_{11} = 0,062500/0,245833 = 0,254237$$

и ја додаваме на третата редица

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0,245833 & -0,083333 & -0,062500 & 0 \\ 0 & 0,135331 & -0,071186 & 0 \\ 0 & -0,071186 & 0,096610 & j1 \end{bmatrix}.$$

Пример 4.10

Втората редица ја множиме со

$$c = -A_{23}/A_{22} = 0,071186/0,135331 = 0,526017$$

и ја додаваме на третата редица

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0,245833 & -0,083333 & -0,062500 & 0 \\ 0 & 0,135331 & -0,071186 & 0 \\ 0 & 0 & 0,059165 & j1 \end{bmatrix}.$$

Трета редица

$$0,059165 \cdot U_3 = j1, \quad U_3 = j1/0,059165 = j16,902 \text{ V}$$

Втора редица

$$0,135331 \cdot U_2 - 0,071186 \cdot U_3 = 0, \quad U_2 = 0,071186 \cdot U_3/0,135331 = j8,891 \text{ V}.$$

Прва редица

$$0,245833 \cdot U_1 - 0,083333 \cdot U_2 - 0,062500 \cdot U_1 = 0, \\ U_1 = (0,083333 \cdot U_2 + 0,062500 \cdot U_3)/0,245833 = j7,311 \text{ V}.$$

Пример 4.10

$$\underline{Z}_{13} = U_1/\underline{I} = j7,311 \Omega,$$

$$\underline{Z}_{23} = U_2/\underline{I} = j8,891 \Omega,$$

$$\underline{Z}_{33} = U_3/\underline{I} = j16,902 \Omega.$$

Пресметка на напони и струи во ЕЕС

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{33}} = \frac{110/\sqrt{3}}{j16,902} = -j3,757 \text{ kA}.$$

$$\underline{U}_1 = \underline{E} - \underline{Z}_{13} \cdot \underline{J}_d = \frac{110}{\sqrt{3}} - j7,311 \cdot (-j3,757) = 36,038 \text{ kV},$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E} - \underline{Z}_{23} \cdot \underline{J}_d = \frac{110}{\sqrt{3}} - j8,891 \cdot (-j3,757) = 30,102 \text{ kV},$$

$$\underline{U}_3 = \underline{E} - \underline{Z}_{33} \cdot \underline{J}_d = \frac{110}{\sqrt{3}} - j16,902 \cdot (-j3,757) = 0 \text{ kV}.$$

Пример 4.10

$$\underline{I}_{1-2} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{jX_{1-2}} = \frac{36,038 - 30,102}{j12} = -j0,495 \text{ kA},$$

$$\underline{I}_{1-3} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_3}{jX_{1-3}} = \frac{36,038 - 0}{j16} = -j2,252 \text{ kA},$$

$$\underline{I}_{2-3} = \frac{\underline{U}_2 - \underline{U}_3}{jX_{2-3}} = \frac{30,102 - 0}{j20} = -j1,505 \text{ kA}.$$

Пример 4.10

programi/kv/kv_ees_3.m

```
1 function ees = kv_ees_3()
2 ees.Uf = 110/sqrt(3);
3 ees.granki = [
4 % pocetok kraj Xd Xi X0
5     1     2    12  12  36
6     1     3    16  16  48
7     2     3    20  20  60
8 ];
9 ees.generatori = [
10 % jazel   Xd   Xi   X0
11     1     10    10   10
12     2  66.12  66.12  inf
13     2  66.12  66.12  inf
14 ];
```

```
resenie = kusi_vrski('kv_ees_3',3,3);
```

Пример 4.10

```
>> resenie.Igr_dio(:,1)
ans =
    0.0000 - 0.4946i
    0.0000 - 2.2524i
    0.0000 - 1.5051i

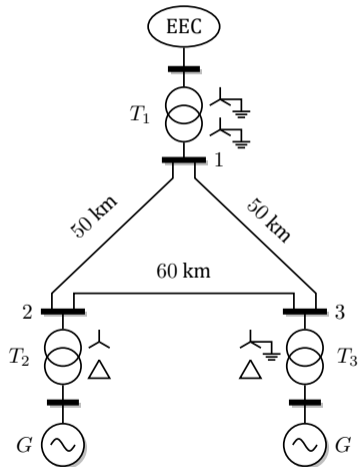
>> resenie.Udio(:,1)
ans =
    36.0382
    30.1024
         0
```

Пример 4.11

За системот прикажан на сликата да се одреди ефективната вредност на наизменичната компонента на струјата низ заземјувачот на трансформаторот T_1 во суптранзиентниот период, за случај на еднофазна куца врска:

- кај собирниците 1,
- кај собирниците 2.

Колкави се фазните напони во повредениот јазел во двата случаја?



Пример 4.11

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

Податоци за елементите:

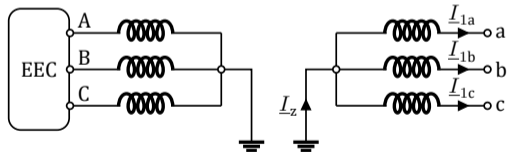
– G: 80 MVA; 10,5 kV; $x''_d = x_i = 10\%$; $x'_d = 25\%$; $x_d = 150\%$; $x_0 = 8\%$.

– T₁: 150 MVA; 110/231 kV/kV; $u_k = 12\%$.

– T₂ ≡ T₃: 80 MVA; 10,5/115 kV/kV; $u_k = 10\%$.

– EEC: $U_n = 220$ kV; $S''_{k3} = 3330$ MVA; $X''_d = X_i = X_0$; $X'_d = 1,1 \cdot X''_d$.

Сите водови имаат $x = 0,4 \Omega/\text{km}$ и $x_0 = 3 \cdot x = 1,2 \Omega/\text{km}$.

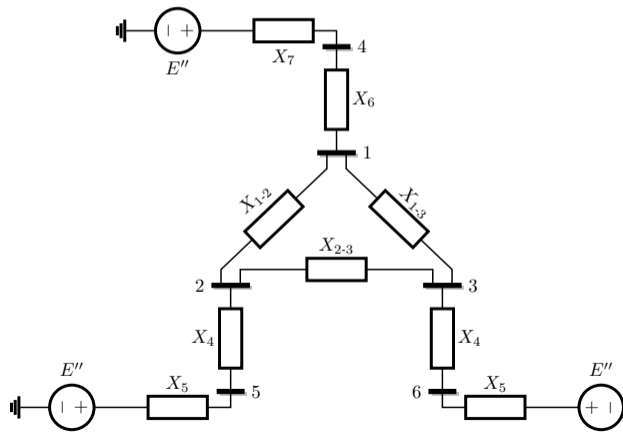


Пример 4.11

Струја низ заземјувачот

$$\underline{I}_z = \underline{I}_{1a} + \underline{I}_{1b} + \underline{I}_{1c} = 3 \cdot \underline{I}_{10}$$

а) Еднофазна куса врска кај собирниците 1



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

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

$$X_{1-2} = X_{1-3} = 50 \cdot 0,4 = 20 \Omega;$$

$$X_{2-3} = 60 \cdot 0,4 = 24 \Omega;$$

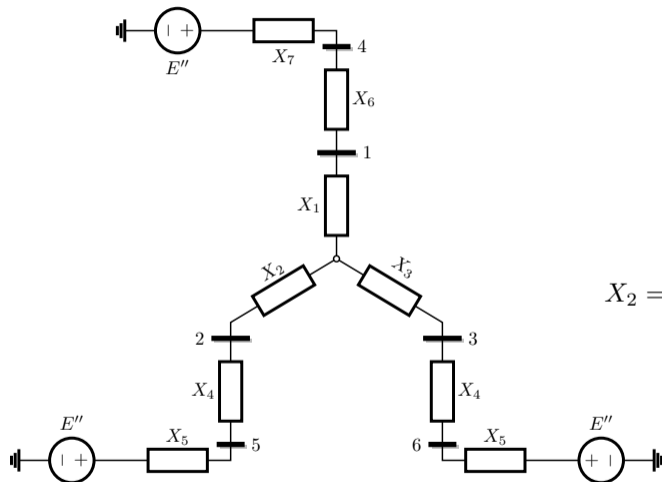
$$X_4 = 16,53 \Omega;$$

$$X_5 = 16,53 \Omega;$$

$$X_6 = 9,68 \Omega$$

$$E'' = U_{nf} = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,509 \text{ kV.}$$

Пример 4.11

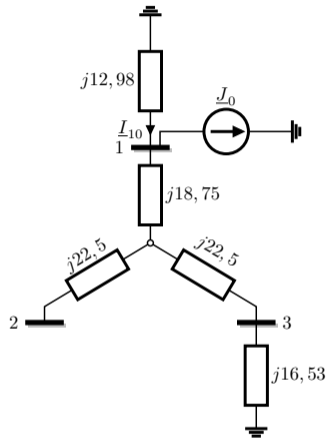
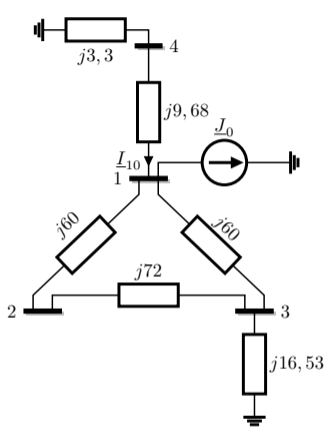


$$X_1 = \frac{X_{1-2} \cdot X_{1-3}}{X_{1-2} + X_{1-3} + X_{2-3}} = 6,25 \Omega;$$

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

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = j(X_6 + X_7) \parallel [jX_1 + j(X_2 + X_4 + X_5) \parallel j(X_3 + X_4 + X_5)] = j8,716 \Omega.$$

Пример 4.11



$$\underline{Z}_0 = j12,98 \parallel j(22,5 + 18,75 + 16,63) = j10,599 \Omega.$$

$$\underline{J}_d = \underline{J}_i = \underline{J}_0 = \frac{E''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k} = \frac{E''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} = \frac{63,509}{j28,031} = -j2,266 \text{ kA}.$$

Пример 4.11

$$\underline{I}_{10} = \frac{\underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0}{j12,98} = \frac{j10,599 \cdot (-j2,266)}{j12,98} = -j1,850 \text{ kA.}$$

$$I_z = 3 \cdot I_{10} = 5,550 \text{ kA.}$$

$$\underline{U}_{1d} = \underline{E}'' - \underline{Z}_d \cdot \underline{J}_d = 43,761 \text{ kV} \quad \underline{U}_{1A} = 0$$

$$\underline{U}_{1i} = -\underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i = -19,747 \text{ kV} \quad \underline{U}_{1B} = 65,746 \cdot e^{236,8^\circ} \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{10} = -\underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0 = -24,014 \text{ kV} \quad \underline{U}_{1C} = 65,746 \cdot e^{123,2^\circ} \text{ kV}$$

б) Еднофазна куса врска кај собирниците 2

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

$$\underline{U}_{2B} = \underline{U}_{2C}^* = (-58,317 - j55) \text{ kV} = 80,162 \cdot e^{223,3^\circ} \text{ kV.}$$

Пример 4.11

programi/kv/kv_ees_4.m

```
1 function ees = kv_ees_4()
2 ees.Uf = 110/sqrt(3);
3 ees.granki = [
4 % pocetok kraj Xd      Xi      X0
5     1     2    20      20      60
6     1     3    20      20      60
7     2     3    24      24      72
8     1     4    9.68    9.68    9.68
9     2     5   16.53   16.53   1e6
10    3     6   16.53   16.53   1e6
11 ];
12 ees.generatori = [
13 % jazel   Xd      Xi      X0
14     4     3.3    3.3    3.3
15     5  16.53   16.53   1e6
16     6  16.53   16.53   1e6
17     3     1e6    1e6   16.53
18 ];
```

Пример 4.11

```
>> resenie = kusi_vrski('kv_ees_4',1,1);
resenie.Igr_abc
ans =
    0.0000 + 0.8742i   -0.0000 - 0.2423i   -0.0000 - 0.2423i
    0.0000 + 1.0301i   -0.0000 - 0.0864i   -0.0000 - 0.0864i
    0.0000 + 0.1299i   -0.0000 + 0.1299i    0.0000 + 0.1299i
    0.0000 + 4.8928i   -0.0000 + 0.3287i   -0.0000 + 0.3287i
    0.0000 + 0.7443i   -0.0000 - 0.3722i   -0.0000 - 0.3722i
    0.0000 + 0.7443i    0.0000 - 0.3722i   -0.0000 - 0.3722i

>> Iz = sum(resenie.Igr_abc(4,:))
Iz =
   -0.0000 + 5.5502i

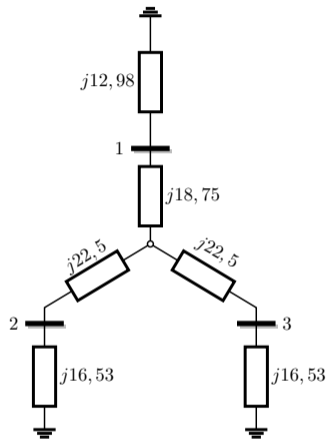
>> abs(resenie.Uabc(1,:))
ans =
    0.0000    65.7459    65.7459

>> angle(resenie.Uabc(1,:))/pi*180
ans =
     0  -123.2220  123.2220
```

Пример 4.12

Колкави ќе бидат фазните напони на повредениот јазел 2 во суптранзиентниот период, за случај на еднофазна куса врска кај собирниците 2 во системот од примерот 4.11, ако ѕвездиштето од трансформаторот T_2 е директно заземјено. Пред настанување на кусата врска системот бил практично неоптоварен.

$$\underline{Z}_0 = j11,697 \Omega$$



$$\begin{aligned} \underline{Z}_d &= \underline{Z}_i = j(X_4 + X_5) \parallel [jX_2 + j(X_1 + X_6 + X_7) \parallel j(X_3 + X_4 + X_5)] = \\ &= j12,671 \Omega. \end{aligned}$$

Пример 4.12

Симетрични компоненти на фазните напони на местото на кусата врска

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

$$\underline{U}_{2i} = -\underline{Z}_i \underline{J}_i = -\underline{Z}_i \cdot E'' / (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0) = -21,726 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{20} = -\underline{Z}_0 \underline{J}_0 = -\underline{Z}_0 \cdot E'' / (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0) = -20,056 \text{ kV}$$

Фазните напони во повредениот јазел

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

$$\underline{U}_{2B} = \underline{a}^2 \underline{U}_{2d} + \underline{a} \underline{U}_{2i} + \underline{U}_{20} = 62,690 \cdot e^{241,3^\circ} \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{2C} = \underline{a} \underline{U}_{2d} + \underline{a}^2 \underline{U}_{2i} + \underline{U}_{20} = 62,690 e^{118,7^\circ} \text{ kV}$$

Споредба со резултатите од примерот 4.11: напоните на здравите фази во режимот на кусата врска значително се намалија и тие се сега приближно еднакви на номиналниот напон

Пример 4.12

programi/kv/kv_ees_5.m

```
1 function ees = kv_ees_5()
2 ees.Uf = 110/sqrt(3);
3 ees.granki = [
4 % pocetok kraj Xd      Xi      X0
5     1     2    20      20      60
6     1     3    20      20      60
7     2     3    24      24      72
8     1     4    9.68    9.68    9.68
9     2     5   16.53   16.53   1e6
10    3     6   16.53   16.53   1e6
11 ];
12 ees.generatori = [
13 % jazel   Xd      Xi      X0
14     4     3.3    3.3    3.3
15     5  16.53   16.53   1e6
16     6  16.53   16.53   1e6
17     2     1e6    1e6   16.53
18     3     1e6    1e6   16.53
19 ];
```

Пример 4.12

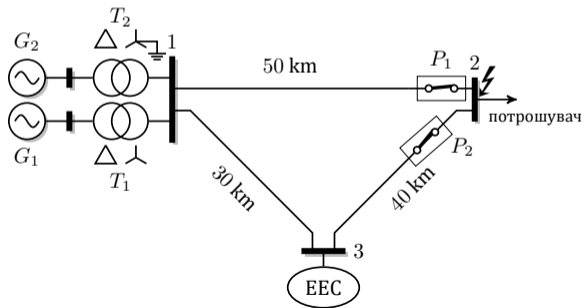
```
>> resenie = kusi_vrski('kv_ees_5',2,1);  
>> abs(resenie.Uabc)  
ans =  
41.2959    60.8497    60.8497  
  0.0000    62.6901    62.6901  
37.3039    60.0993    60.0993  
57.8613    62.7938    62.7938  
31.7543    63.0951    63.0951  
50.4062    61.7127    61.7127
```

Пример 4.13

За системот прикажан на сликата да се димензионираат прекинувачите P_1 и P_2 според суптранзиентната струја на:

- трифазна куса врска,
- 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).



Пример 4.13

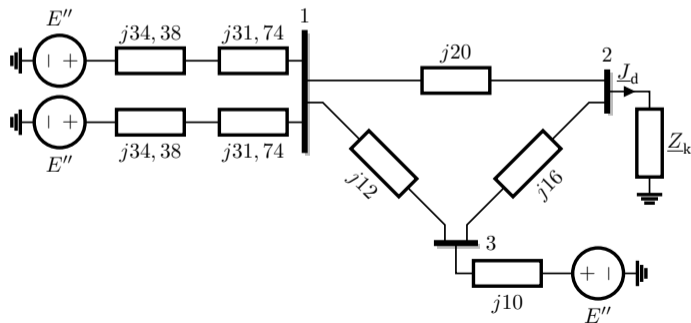
Податоци за елементите:

– $G_1 \equiv G_2$: 50 MVA; 10,5 kV; $x_d'' = x_i = 13\%$; $x_0 = 8\%$.

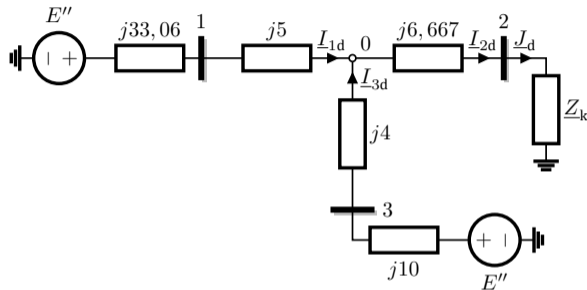
– $T_1 \equiv T_2$: 50 MVA; 10,5/115 kV/kV; $u_k = 12\%$.

– ЕЕС: $U_n = 110$ kV; $S_{k3}'' = 1210$ MVA; $X_d'' = X_i = X_0/2$.

Сите водови имаат еднакви надолжни параметри $x = 0,4 \Omega/\text{km}$ и $x_0 = 1,3 \Omega/\text{km}$.



Пример 4.13



а) Трифазна куса врска при собирниците 2

$$\underline{Z}_d = j6,667 + j(4 + 10) \parallel j(5 + 33,06) = j16,902 \Omega.$$

$$\underline{J}_d = \frac{E''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k} = \frac{E''}{\underline{Z}_d} = \frac{1,1 \cdot 110 / \sqrt{3}}{j16,902} = -j4,133 \text{ kA}, \quad \underline{J}_i = \underline{J}_0 = 0.$$

Пример 4.13

$$\underline{U}_{2d} = \underline{U}_{2i} = \underline{U}_{20} = 0.$$

$$\underline{U}_{0d} = \underline{U}_{2d} + j6,667 \cdot \underline{I}_d = j6,667 \cdot \underline{J}_d = 27,555 \text{ kV}; \quad \underline{U}_{0i} = \underline{U}_{00} = 0 \text{ kV}.$$

Струи во паралелните гранки 0-1-земја и 0-3-земја, струен делител

$$\underline{I}_{3d} = \frac{5 + 33,06}{10 + 4 + 5 + 33,06} \cdot (-j4,133) = -j3,022 \text{ A},$$

$$\underline{I}_{1d} = (-j4,133) - (-j3,022) = -j1,111 \text{ A}.$$

Напони на јазлите 1 и 3

$$\underline{U}_{1d} = \underline{U}_{0d} + j5 \cdot \underline{I}_{1d} = 33,110 \text{ kV};$$

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

Директна компонента на струјата низ водот 1-2

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

Пример 4.13

Струја во водот 3-2

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

Фазните струи се исти по ефективна вредност

$$I_{1-2A} = I_{1-2B} = I_{1-2C} = I_{1-2d} = 1,655 \text{ kA};$$

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

Расклопна моќност на прекинувачот P_1

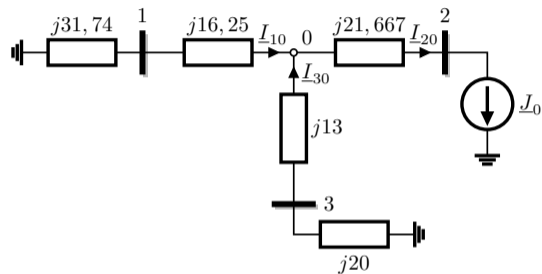
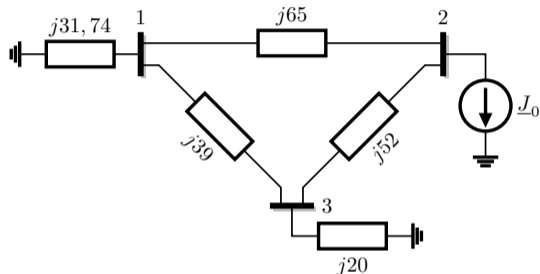
$$S_{r1} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{r1} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1,655 = 315,34 \text{ MVA}.$$

Расклопна моќност на прекинувачот P_2

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

Пример 4.13

б) Еднофазна куса врска кај собирниците 2: $\underline{Z}_k = \underline{Z}_i + \underline{Z}_0$



$$\underline{Z}_0 = j21,667 + j(13 + 20) \parallel j(16,25 + 31,74) = j41,221 \Omega.$$

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k} = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} = \frac{1,1 \cdot 110 / \sqrt{3}}{j(2 \cdot 16,902 + 41,221)} = -j0,931 \text{ kA}.$$

Пример 4.13

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

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

$$\underline{U}_{0d} = (j6,667 + \underline{Z}_k) \cdot \underline{J}_d = 60,319 \text{ kV};$$

$$\underline{I}_{3d} = (1,1 \cdot 110 / \sqrt{3} - 60,319) / j14 = -j0,681 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{1d} = \underline{I}_{2d} - \underline{I}_{3d} = -j0,250 \text{ kA}.$$

$$\underline{U}_{1-2d} = j5 \cdot \underline{I}_{1d} + j6,667 \cdot \underline{I}_{2d} = 7,457 \text{ kV};$$

$$\underline{I}_{1-2d} = \underline{U}_{1-2d} / j20 = -j0,373 \text{ kA};$$

$$\underline{U}_{3-2d} = j4 \cdot \underline{I}_{3d} + j6,667 \cdot \underline{I}_{2d} = 8,931 \text{ kV};$$

$$\underline{I}_{3-2d} = \underline{U}_{3-2d} / j16 = -j0,558 \text{ kA}.$$

Пример 4.13

Шемите за директен и инверзен систем се еднакви, еднакви ќе бидат и струите низ гранките

$$\underline{I}_{1-2i} = -j0,373 \text{ kA}; \quad \underline{I}_{3-2i} = -j0,558 \text{ kA}.$$

Струи на гранките во нултиот систем

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

$$\underline{I}_{30} = -(j21,667 \cdot \underline{I}_{20} - j41,221 \cdot \underline{J}_0) / j(13 + 20) = -j0,552 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{10} = \underline{I}_{20} - \underline{I}_{30} = -j0,379 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{1-20} = \frac{j16,25 \cdot \underline{I}_{10} + j21,667 \cdot \underline{I}_{20}}{j65} = -j0,405 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{3-20} = \frac{j13 \cdot \underline{I}_{30} + j21,667 \cdot \underline{I}_{20}}{j52} = -j0,526 \text{ kA}.$$

Пример 4.13

Фазни струи низ водот 1-2

$$\underline{I}_{1-2A} = 2 \cdot \underline{I}_{1-2d} + \underline{I}_{1-20} = 2 \cdot (-j0,373) - j0,405 = -j1,151 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{1-2B} = (\underline{a}^2 + \underline{a}) \cdot \underline{I}_{1-2d} + \underline{I}_{1-20} = (\underline{a}^2 + \underline{a}) \cdot (-j0,373) - j0,405 = -j0,032 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{1-2C} = (\underline{a} + \underline{a}^2) \cdot \underline{I}_{1-2d} + \underline{I}_{1-20} = (\underline{a} + \underline{a}^2) \cdot (-j0,373) - j0,405 = -j0,032 \text{ kA}.$$

Фазни струи низ водот 3-2

$$\underline{I}_{3-2A} = 2 \cdot \underline{I}_{3-2d} + \underline{I}_{3-20} = 2 \cdot (-j0,558) - j0,526 = -j1,642 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{3-2B} = (\underline{a}^2 + \underline{a}) \cdot \underline{I}_{3-2d} + \underline{I}_{3-20} = (\underline{a}^2 + \underline{a}) \cdot (-j0,558) - j0,526 = -j0,032 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{3-2C} = (\underline{a} + \underline{a}^2) \cdot \underline{I}_{3-2d} + \underline{I}_{3-20} = (\underline{a} + \underline{a}^2) \cdot (-j0,558) - j0,526 = -j0,032 \text{ kA}.$$

Пример 4.13

Расклопна моќност на прекинувачите P_1 и P_2

$$S_{r1} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{1-2A} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1,151 = 219,9 \text{ MVA};$$

$$S_{r2} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{3-2A} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1,642 = 312,8 \text{ MVA}.$$

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

Пример 4.13

programi/kv/kv_ees_6.m

```
1 function ees = kv_ees_6()
2 ees.Uf = 1.1*110/sqrt(3);
3 ees.granki = [
4 % pocetok kraj Xd      Xi      X0
5     1     2    20      20      65
6     1     3    12      12      39
7     2     3    16      16      52
8 ];
9 ees.generatori = [
10 % jazel  Xd      Xi      X0
11     1  66.12  66.12  31.74
12     1  66.12  66.12  inf
13     3   10     10     20
14 ];
```

Пример 4.13

Трифазна куса врска

```
>> resenie = kusi_vrski('kv_ees_6',2,3);  
>> abs(resenie.Igr_abc)  
ans =  
    1.6556    1.6556    1.6556  
    0.5441    0.5441    0.5441  
    2.4776    2.4776    2.4776
```

Еднофазна куса врска

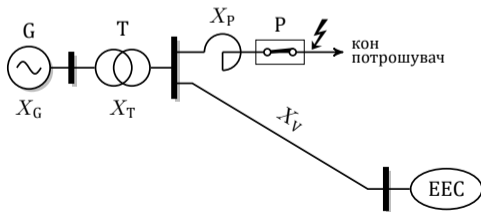
```
>> resenie = kusi_vrski('kv_ees_6',2,1);  
>> abs(resenie.Igr_abc)  
ans =  
    1.1512    0.0323    0.0323  
    0.2710    0.0968    0.0968  
    1.6423    0.0323    0.0323
```

Пример 4.14

На сликата е прикажан преносен систем 220 kV. Познати се реактанциите на поедините елементи (сведени на ниво 220): $X_G = 10 \Omega$, $X_T = 10 \Omega$ и $X_V = 7,87 \Omega$.

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.



Пример 4.14

Трифазна куса врска

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

Импеданцијата на директниот систем

$$\underline{Z}_d'' = j[X_P + (X_T + X_G'') \parallel (X_V + X_{EEC})].$$

Електроенергетскиот систем е со бесконечна моќност, $X_{EEC} = 0$

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

Расклопната струја и моќност на прекинувачот

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

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

Пример 4.14

Потребно е да биде задоволен условот $S_r \leq S_{nr}$

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

$$Z_d'' \geq 1,1 \cdot U_n^2 / S_{nr},$$

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

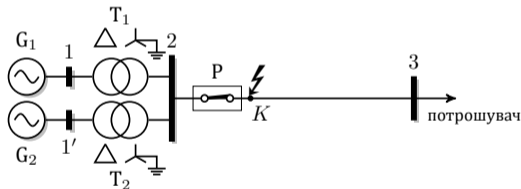
$$X_P \geq 1,1 \cdot U_n^2 / S_{nr} - X_V \cdot (X_T + X_G'') / (X_V + X_T + X_G''),$$

$$X_P \geq 1,1 \cdot 220^2 / 5000 - 7,87 \cdot 20 / 27,87;$$

$$X_P \geq 5 \Omega.$$

Пример 5.15

Да се одреди расклопната струја и расклопната моќност на прекинувачот P за случај на еднофазна куса врска во точката K . Прекинувачот ја исклучува кусата врска во суптранзиентниот период. За колку ќе се намали расклопната струја на еднофазната куса врска, ако свездиштето на трансформаторот T_2 не е заземјено (спрега ΔY). Да се претпостави дека пред настанувањето на кусата врска системот бил номинално оптоварен.



Податоци за елементите:

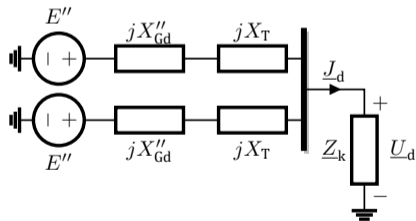
- $G_1 \equiv G_2$: 100 MVA; 10,5 kV; $x_d'' = x_i = 13\%$; $x_0 = 8\%$.
- $T_1 \equiv T_2$: 100 MVA; 10,5/115 kV/kV; $u_k = 12\%$.

Пример 5.15

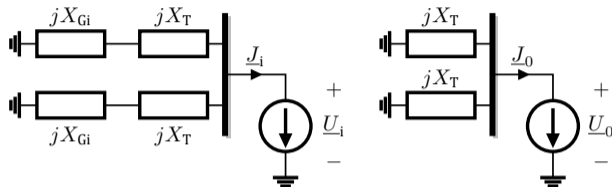
Реактанциите на елементите

$$X''_{Gd} = X_{Gi} = \frac{x''_d}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \left(\frac{115}{10,5} \right)^2 = \frac{13}{100} \cdot \frac{10,5^2}{100} \cdot \left(\frac{115}{10,5} \right)^2 = 17,193 \Omega;$$

$$X_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{12}{100} \cdot \frac{115^2}{100} = 15,870 \Omega.$$



Пример 5.15



$$Z_d'' = (X_{Gd}'' + X_T) \parallel (X_{Gd}'' + X_T) = (17,193 + 15,870)/2 = 16,531 \Omega.$$

$$Z_i = (X_{Gi} + X_T)/2 = (17,193 + 15,870)/2 = 16,531 \Omega;$$

$$Z_0 = X_T/2 = 15,870/2 = 7,935 \Omega.$$

$$E'' = 1,1 \cdot U_{nf} = 1,1 \cdot 110/\sqrt{3} = 69,859 \text{ kV}.$$

Пример 5.15

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k} = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} = \frac{69,859}{2 \cdot j16,531 + j7,935} = -j1,704 \text{ kA};$$

$$\underline{J}_i = \underline{J}_d = -j1,704 \text{ kA}; \quad \underline{J}_0 = \underline{J}_d = -j1,704 \text{ kA}.$$

$$\underline{I}_A = \underline{J}_d + \underline{J}_i + \underline{J}_0 = -j5,112 \text{ kA};$$

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

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

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

Пример 5.15

Свездиштето на трансформаторот T_2 не е заземјено $\underline{Z}_0 = jX_T = j15,870 \Omega$

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} = \frac{69,859}{2 \cdot j16,531 + j15,870} = -j1,428 \text{ kA}$$

$$I_r = I_A = 3 \cdot J_d = 4,284 \text{ kA};$$

$$S_r = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_r = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 4,284 = 816 \text{ MVA}.$$

Расклопната струја и расклопната моќност на прекинувачот се намалија за 16,2%