

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Анализа на сложени заземјувачки системи

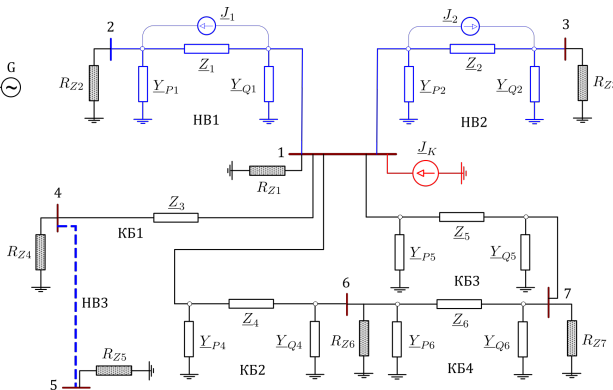
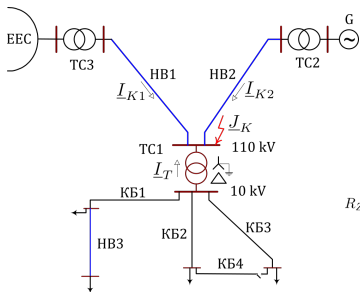
М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

Формирање на колото на заземјувачкиот систем



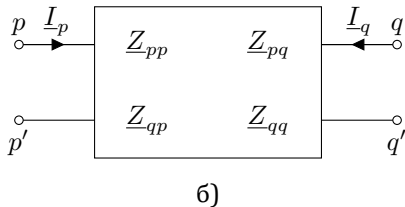
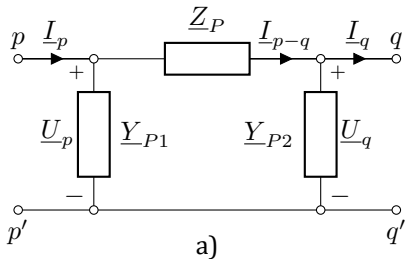
Пресметка на напоните во колото на 3С

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{J}.$$

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \underline{J}_K - \underline{J}_1 - \underline{J}_2 \\ \underline{J}_2 \\ \underline{J}_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{U} = \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{U}_4 \\ \underline{U}_5 \\ \underline{U}_6 \\ \underline{U}_7 \end{bmatrix},$$

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & -\underline{Z}_1^{-1} & -\underline{Z}_2^{-1} & -\underline{Z}_3^{-1} & 0 & -\underline{Z}_4^{-1} & -\underline{Z}_5^{-1} \\ -\underline{Z}_1^{-1} & \underline{Y}_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\underline{Z}_2^{-1} & 0 & \underline{Y}_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\underline{Z}_3^{-1} & 0 & 0 & \underline{Y}_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{55} & 0 & 0 \\ -\underline{Z}_4^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{66} & -\underline{Z}_6^{-1} \\ -\underline{Z}_5^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{Z}_6^{-1} & \underline{Y}_{77} \end{bmatrix}.$$

Пресметка на струите во колото на ЗС



$$\underline{I}_{p-q} = (\underline{U}_p - \underline{U}_q) / \underline{Z}_P,$$

$$\underline{I}_p = \underline{I}_{p-q} + \underline{Y}_{P1} \cdot \underline{U}_p,$$

$$\underline{I}_q = \underline{I}_{p-q} - \underline{Y}_{P2} \cdot \underline{U}_q,$$

$$\underline{I}_{Zi} = \frac{\underline{U}_i}{R_{Zi}}; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

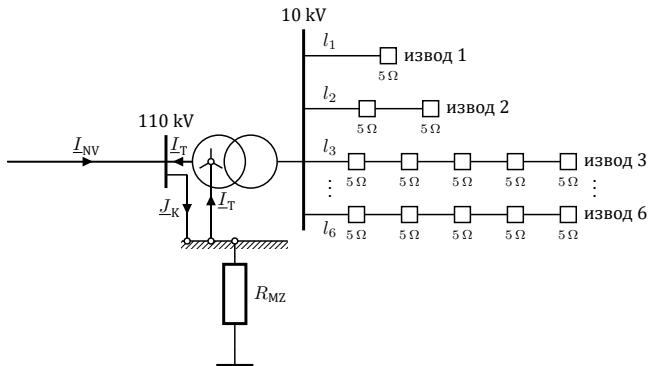
Пример 2

ТС 110/10 kV/kV се напојува со 110 kV вод со заштитно јаже Fe III 50 mm² за кој е познато $\underline{Z}_{vl} = 2,51 \cdot e^{j9,74^\circ}$, $\underline{r}_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}$. Од ТС се напојуваат 6 кабелски изводи

- извод бр. 1, IPO 13 3x95 6/10 kV со должина $l_1 = 800$ m, на чиј крај се наоѓа индустриска ТС СН/НН 2x1000 kVA, со отпорност на распростирање на работниот заземјувач $R_{Z1} = 4 \Omega$, специфична отпорност на теренот $\rho = 100 \Omega\text{m}$;
- извод бр. 2, IPO 13 3x95 6/10 kV со вкупна должина $l_2 = 1200$ m, по чија должина рамномерно се наоѓаат 2 ТС СН/НН 630 kVA, со отпорност на распростирање на работните заземјувачи $R_{Z2} = 5 \Omega$ секој; $\rho = 100 \Omega\text{m}$;
- 4 идентични изводи (бр. 3, 4, 5 и 6) од по $l_3 = 2500$ m, ХНЕ 49 А 3x1x150, 6/10 kV. Секој од каблите напојува по 5 ТС СН/НН, рамномерно распределени по нивната должина. Отпорноста на распростирање на работните заземјувачи на овие ТС изнесуваат $R_{Z3} = 5 \Omega$ секој.

Мрежестиот заземјувач има $R_{MZ} = 0,661 \Omega$; $E_{d.\max} = 24,7\%$; $E_{c.\max} = 7,1\%$.
 $\underline{J}_K = 6$ kA; $\underline{I}_{NV} = 5,2$ kA; $\underline{I}_T = 0,8$ kA.

Пример 2



$$\underline{Z}_{vl.NV} = 2,510 \cdot e^{j9,74^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}_{vl.1} = 0,727 \cdot e^{j34,4^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}_{vl.2} = 0,145 \cdot e^{j11,8^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}_{vl.3} = 0,901 \cdot e^{j28,9^\circ} \Omega;$$

$$\underline{r}_{f.NV} = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ};$$

$$\underline{k}_{i.1} = 0,280 \cdot e^{-j79,7^\circ};$$

$$\underline{k}_{i.2} = 0,308 \cdot e^{-j57,3^\circ};$$

$$\underline{k}_{i.3} = 0,742 \cdot e^{-j14,5^\circ}.$$

Пример 2

Да се пресмета

- а) напонот \underline{U}_{MZ} на мрежестиот заземјува како и најголемите напони на допир и чекор во ТС 110/10 kV. Да се провери дали има опасност по луѓето?
- б) распределбата на струите на одведување $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \dots, \underline{I}_8$ по изводите за време на грешката како и напоните $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \dots, \underline{U}_8$ кај првите ТС СН/НН во секој од изводите.

Пример 2

$$\underline{J}_Z = \underline{J}_K - \underline{I}_T - (1 - r_{f.NV}) \cdot \underline{I}_{NV} = r_{f.NV} \cdot \underline{I}_{NV} = 4,94 \cdot e^{-j5,6^\circ} \text{ kA.}$$

$$\underline{Z}_{ek} = R_{MZ} \Pi \underline{Z}_{vl.NV} \Pi \underline{Z}_{vl.1} \Pi \underline{Z}_{vl.2} \Pi \underline{Z}_{vl.3} \Pi \underline{Z}_{vl.4} \Pi \underline{Z}_{vl.5} \Pi \underline{Z}_{vl.6},$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ek} &= \left(\frac{1}{R_{MZ}} + \frac{1}{Z_{vl.NV}} + \sum_{k=1}^6 \frac{1}{Z_{vl.k}} \right)^{-1} = \\ &= (0,066253 + j0,021315) = 0,0696 \cdot e^{j17,8^\circ} \Omega. \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{MZ} = \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_Z = 344 \cdot e^{-j1,2^\circ} \text{ V.}$$

$$\underline{U}_k = \underline{k}_{i.k} \cdot \underline{U}_{MZ}; \quad k = 1, 2, \dots, 6.$$

	ИЗВОД						
U_{MZ}	1	2	3	4	5	6	
U_k (V)	344	96	106	255	255	255	255
I_k (A)	520	473	2371	382	382	382	382

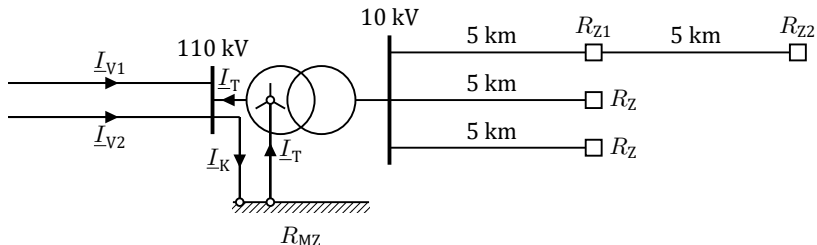
$$U_{d. \max} = \frac{E_{d. \max}}{s_d} = \frac{E_{d. \max} \%}{100} \cdot \frac{U_{MZ}}{s_d} = \frac{24,7}{100} \cdot \frac{344}{1,15} = 74 \text{ V.}$$

Пример 3

ТС се напојува од два 110 kV вода и на 10 kV има 3 кабелски изводи. Познати се:

- Надземните водови за 110 kV имаат $\underline{Z}_{v1,V} = 3,1 \cdot e^{j4^\circ} = (3,09 + j0,22) \Omega$ и $r_f = 0,68 \cdot e^{j10^\circ}$;
- Првиот кабелски извод е изведен со кабел со изолиран плашт со надолжна импеданција $\underline{z} = (0,4 + j0,8) \Omega/\text{km}$. Тој се состои од две секции кои се долги по 5 km. На крајот од секоја секција има трафостаница 10/0,4 kV/kV која што има заштитен заземјувач со отпорност на заземјувачот $R_{Z1} = 8 \Omega$ и $R_{Z2} = 2 \Omega$, соодветно.
- Останатите 2 кабелски изводи се идентични и се е изведени со кабел со изолиран плашт со надолжна импеданција $\underline{z} = (0,4 + j0,8) \Omega/\text{km}$. Нивните должини се по 5 km, а на крајот од нив има трафостаница 10/0,4 kV/kV која што има заштитен заземјувач со отпорност на заземјувачот $R_Z = 5 \Omega$.

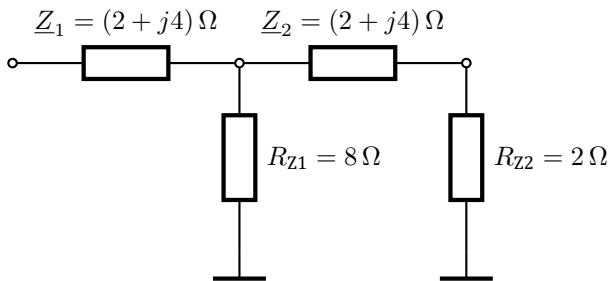
Пример 3



$\underline{I}_K = 10 \text{ kA}$, $\underline{I}_{V1} = 5 \text{ kA}$, $\underline{I}_{V2} = 3 \text{ kA}$ и $\underline{I}_T = 2 \text{ kA}$, $R_{MZ} = 0,2 \Omega$. Да се одредат

- Влезните импеданции на кабелските изводи.
- Еквивалентата импеданција на заземјувачкиот систем.
- Ефективните вредности на
 - напонот на мрежестиот заземјувач,
 - струјата што истекува во земјата од мрежестиот заземјувач,
 - напонот на заземјувачот на крајот од првата секција на првиот кабелски извод.
- Ефективната вредност на струјата што тече во плаштот на вториот кабелски извод.
- Со примена на методот за решавање на електрично коло во форма на скала да се определи коефициентот на изнесен потенцијал за првиот кабелски извод.

Пример 3а



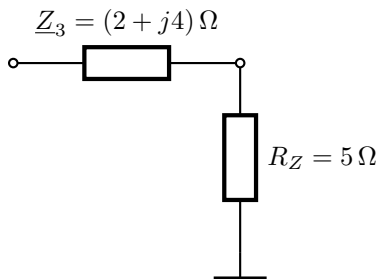
$$\underline{Z}_{e1} = (2 + j4) + 2 = (4 + j4) \Omega$$

$$\underline{Y}_{e2} = \frac{1}{\underline{Z}_{e1}} + \frac{1}{R_{Z1}} = \frac{1}{4 + j4} + \frac{1}{8} = (0,25 - j0,125) \text{ S}$$

$$\underline{Z}_{e2} = \frac{1}{\underline{Y}_{e2}} = \frac{1}{0,25 - j0,125} = (3,2 + j1,6) \Omega$$

$$\underline{Z}_{vl,1} = \underline{Z}_{e2} + \underline{Z}_1 = (3,2 + j1,6) + (2 + j4) = (5,2 + j5,6) \Omega$$

Пример 3а



$$\underline{Z}_{v1,2} = \underline{Z}_3 + R_Z = (2 + j4) + 5 = (7 + j4) \Omega.$$

Пример 36

$$\begin{aligned}\underline{Z}_e &= \frac{1}{\frac{2}{\underline{Z}_{v1,V}} + \frac{1}{\underline{Z}_{v1,1}} + \frac{2}{\underline{Z}_{v1,2}} + \frac{1}{R_{MZ}}} \\ &= \frac{1}{\frac{2}{3,09 + j0,22} + \frac{1}{5,2 + j5,6} + \frac{2}{7 + j4} + \frac{1}{0,2}} = (0,168 + j0,007) \Omega.\end{aligned}$$

Пример 3в,г

$$I_e = r_f \cdot I_{V1} + r_f \cdot I_{V2} = r_f \cdot (I_{V1} + I_{V2}),$$

$$I_e = r_f \cdot (I_{V1} + I_{V2}) = 0,68 \cdot (5 + 3) = 5,44 \text{ kA}.$$

$$U_{MZ} = Z_e \cdot I_e = \sqrt{0,168^2 + 0,007^2} \cdot 5,44 = 0,915 \text{ kV}.$$

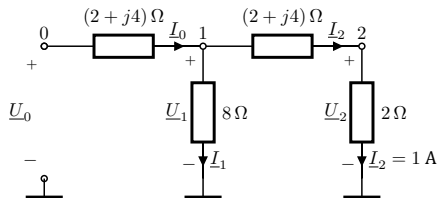
$$I_{MZ} = \frac{U_{MZ}}{R_{MZ}} = \frac{0,915}{0,2} = 4,575 \text{ kA}.$$

Напон на средината на првиот кабелски извод: напонски делител од \underline{Z}_1 и \underline{Z}_{e2} , при што е $\underline{Z}_{e2} = (3,2 + j1,6) \Omega$ и $\underline{Z}_1 = (2 + j4) \Omega$.

$$\begin{aligned} U_{\text{средина}} &= \frac{Z_{e2}}{|\underline{Z}_{e2} + \underline{Z}_1|} \cdot U_{MZ} = \\ &= \frac{\sqrt{3,2^2 + 1,6^2}}{\sqrt{(3,2 + 2)^2 + (1,6 + 4)^2}} \cdot 0,915 = 0,428 \text{ kV}. \end{aligned}$$

$$I_2 = \frac{U_{MZ}}{Z_{v1,2}} = \frac{0,915}{\sqrt{7^2 + 4^2}} = 0,113 \text{ kA}.$$

Пример 3д



$$\underline{I}_2 = 1 \text{ A}, \quad \underline{U}_2 = 2 \cdot 1 = 2 \text{ V}.$$

$$\underline{U}_1 = 2 + (2 + j4) \cdot 1 = (4 + j4) \text{ V} \quad \underline{I}_1 = \frac{4 + j4}{8} = (0,5 + j0,5) \text{ A}.$$

$$\underline{I}_0 = 1 + (0,5 + j0,5) = (1,5 + j0,5) \text{ A}$$

$$\underline{U}_0 = (4 + j4) + (2 + j4) \cdot (1,5 + j0,5) = (5 + j11) \text{ A}.$$

$$\underline{k} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_0} = \frac{2}{5 + j11} = 0,068 - j0,151 \quad k = \sqrt{0,068^2 + 0,151^2} = 0,166.$$

$$\underline{Z}_{v1,2} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{I}_0} = \frac{5 + j11}{1,5 + j0,5} = (5,2 + j5,6) \Omega.$$

$$\underline{k}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_0} = \frac{4 + j4}{5 + j11} = 0,438 - j0,164; \quad U_1 = k_1 U_{MZ} = \sqrt{0,438^2 + 0,164^2} \cdot 0,915 = 0,428 \text{ kV}.$$

Програма за решавање сложени заземјувачки системи

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{J}.$$

$$\underline{J} = \mathbf{A}^T \cdot \underline{I}$$

$$A_{ki} = \begin{cases} -1, & \text{ако насоката на гранката } k \text{ е кон јазелот } i, \\ 0, & \text{ако гранката } k \text{ не е поврзана со јазелот } i, \\ 1, & \text{ако насоката на гранката } k \text{ е од јазелот } i. \end{cases}$$

$$\underline{U}_{GR} = \mathbf{A} \cdot \underline{U}.$$

$$\underline{I} = \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \underline{U}_{GR} = \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \underline{U},$$

$$\underline{J} = \mathbf{A}^T \cdot \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \underline{U}.$$

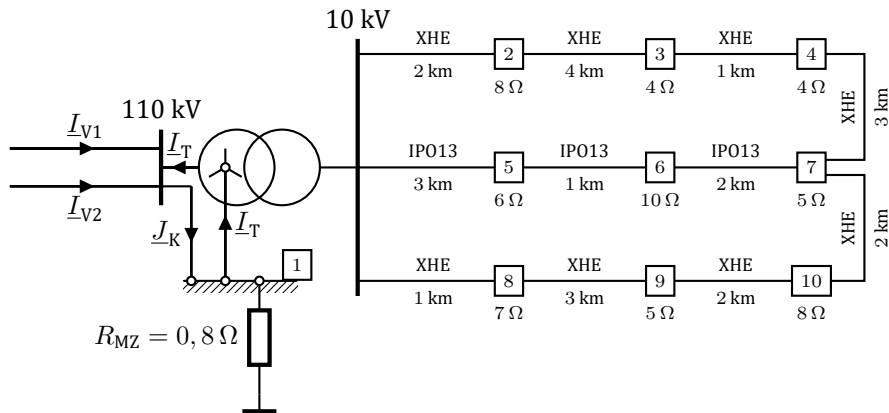
$$\underline{Y} = \mathbf{A}^T \cdot \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \mathbf{A}.$$

Пример 4

ТС се напојува од два 110 kV, а на 10 kV има 3 кабелски изводи 1 – 2 – 3 – 4, 1 – 5 – 6 – 7 и 1 – 8 – 9 – 10. Изводите на крајот се поврзани со резервни водови (4 – 7 и 7 – 10). Должините на сите делници се прикажани на сликата, а исто така се дадени и отпорностите на заземјувачите на сите ТС 10/0,4 kV/kV, како и отпорноста на мрежестиот заземјувач. Познати се и следните податоци:

- Надземните водови за 110 kV имаат влезна импеданција $\underline{Z}_{v1,V} = 2,5 \cdot e^{j9,74^\circ} \Omega$ и $\underline{r}_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}$;
- Првиот и третиот кабелски извод се изведени со кабел со изолиран плашт (ХНЕ) со надолжна импеданција $\underline{z} = (0,29 + j0,668) \Omega/\text{km}$. Со ист кабел се изведени и спојниците 4 – 7 и 7 – 10.
- Вториот кабелски извод е изведен со кабел со неизолиран плашт (IPO13). Кабелот е со дијаметар $d_k = 4,5 \text{ cm}$ и тој е закопан на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$. Надолжната импеданција на кабелот изнесува $\underline{z} = (0,7 + j2) \Omega/\text{km}$. Специфичната отпорност на земјата по должината на делниците 1 – 5, 5 – 6 и 6 – 7 изнесува 200 Ωm , 100 Ωm и 150 Ωm соодветно.

Пример 4



Во ТС настанала еднофазна куса врска на 110 kV, при што се познати $\underline{I}_{V1} = 1000 \text{ A}$ и $\underline{I}_{V2} = 1500 \text{ A}$, $R_{MZ} = 0,8 \Omega$. Да се одредат

- Напоните и струите на сите заземјувачи во системот.
- Струите во пластовите на сите кабли.

Пример 4

../programi/sistem/zs_1.m

```
1 function zs = zs_1()
2 zs.Zv = 2.5*exp(1j*9.74/180*pi)*[1 1];
3 zs.J = zeros(10,1);
4 rf = 0.95*exp(-1j*5.6/180*pi)*[1 1];
5 Iv = [1000 1500];
6 zs.J(1) = sum(rf.*Iv);
7 zs.Rz = [0.8 8 4 4 6 10 5 7 5 8]';
8 z = 0.29 + 1j*0.668;
9 zs.granki = [
10 1 2      2*z      0
11 2 3      4*z      0
12 3 4      1*z      0
13 1 5 -40.9057 - 33.4379i  0.7265 - 0.5171i
14 5 6 -2.2525 + 2.9509i  1.2104 - 0.5263i
15 6 7 -17.0354 + 0.0217i  0.8995 - 0.5945i
16 1 8      1*z      0
17 8 9      3*z      0
18 9 10     2*z      0
19 4 7      3*z      0
20 7 10     2*z      0
21 ];
```

Пример 4

Параметрите на π -заменската шема на каблите од типот IPO13 ги пресметуваме со функцијата `neizolian_param`. Така на пример за кабелот 1–5 добиваме

```
>> [~,~,Zp,Yp] = neizolian_param(200,3,0.7,0.045,0.7+2j,inf)
Zp =
-40.9057 -33.4379i
Yp =
0.7265 - 0.5171i
```

Функција за формирање на матрицата Y

```
../programi/sistem/matrica_y.m
```

```
1 function [Y,f,t,Yr,Yp,n] = matrica_y(zs)
2 G = zs.granki;
3 [f,t,Yr,Yp] = deal(G(:,1),G(:,2),1./G(:,3),G(:,4));
4 n = max([f;t]); m = size(G,1);
5 A = sparse(1:m, f, ones(m, 1), m, n) ...
6     - sparse(1:m, t, ones(m, 1), m, n);
7 Y = A' * sparse(1:m,1:m,Yr) * A ...
8     + sparse(f, f, Yp, n, n) ...
9     + sparse(t, t, Yp, n, n) ...
10    + sparse(1:n, 1:n, 1./zs.Rz);
11 Y(1,1) = Y(1,1) + sum(1./zs.Zv);
```

Решавање на заземјувачкиот систем

```
../programi/sistem/resi_zs.m
```

```
1 function [U,Iz,If,It] = resi_zs(datoteka)
2 zs = feval(datoteka);
3 [Y,f,t,Yr,Yp] = matrica_y(zs);
4 U = Y\zs.J;
5 Iz = U./zs.Rz;
6 If = Yr.*(U(f)-U(t)) + Yp.*U(f);
7 It = Yr.*(U(f)-U(t)) - Yp.*U(t);
```

```
>> [U,Iz,If,It] = resi_zs('zs_1');
```

јазел	U (V)	I_Z (A)	гранка	I' (A)	I'' (A)
1	720,8	900,9	1-2	166,0	166,0
2	508,0	63,5	2-3	117,3	117,3
3	209,1	52,3	3-4	70,3	70,3
4	168,2	42,1	1-5	629,0	8,6
5	5,8	1,0	5-6	7,8	2,8
6	2,5	0,3	6-7	3,0	95,2
7	92,5	18,5	1-8	208,7	208,7
8	592,4	84,6	8-9	142,4	142,4
9	313,6	62,7	9-10	93,1	93,1
10	188,7	23,6	4-7	36,5	36,5
/	/	/	7-10	75,5	75,5

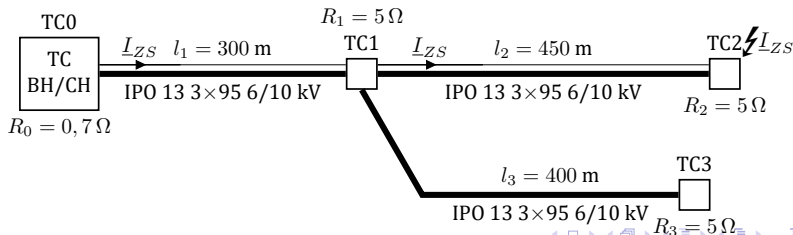
Пример 5

Да се реши колото на заземјувачкиот систем од примерот 8.5 за следните два случаја

- за режим на земјоспој во TC0 со $\underline{I}_{ZS} = 1000 \text{ A}$,
- за режим на земјоспој во TC2 со $\underline{I}_{ZS} = 300 \text{ A}$.

Редукциониот фактор на сите кабли од мрежата е $r_f = 0,23 \cdot e^{j12^\circ}$.

Секција	$\underline{Z}_P (\Omega)$	$\underline{Y}_P (\text{S})$
TC0 – TC1	$0,14034 + j0,65136$	$0,61750 - j0,03790$
TC1 – TC2	$0,08167 + j1,05700$	$0,84507 - j0,10671$
TC1 – TC3	$0,11637 + j0,91395$	$0,77440 - j0,07954$



Пример 5а

../programi/sistem/zs_2a.m

```
1 function zs = zs_2a()
2 zs.Zv = inf;
3 zs.J = [1000 0 0 0]';
4 zs.Rz = [0.7 5 5 5]';
5 zs.granki = [
6     1  2  0.14034 + 0.65136i  0.61750 - 0.0379i
7     2  3  0.08167 + 1.05700i  0.84507 - 0.10671i
8     2  4  0.11637 + 0.91395i  0.77440 - 0.07954i
9 ];
```

```
>> [U,Iz,If,It] = resi_zs('zs_2a');
```

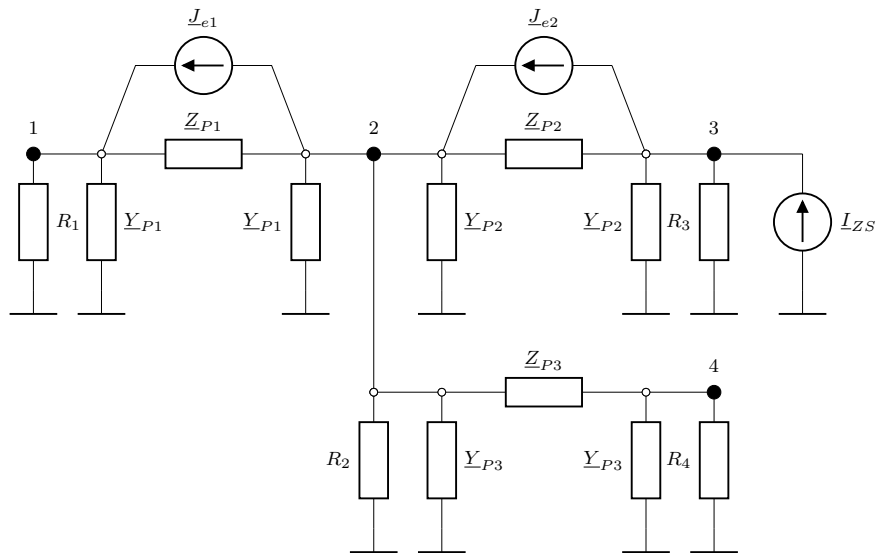
```
>> U = abs(U)
```

```
U =
353.8094
117.6691
72.4670
79.6319
```

```
>> Iz = abs(Iz)
```

```
Iz =
505.4420
23.5338
14.4934
15.9264
```


Пример 56



Пример 56

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \underline{J}_{e1} & -\underline{J}_{e1} + \underline{J}_{e2} & -\underline{J}_{e2} + \underline{I}_{ZS} & 0 \end{bmatrix}^T, \\ \underline{J}_{e1} = \underline{J}_{e2} = (1 - \underline{r}_f) \cdot \underline{I}_{ZS} = (232,51 - j14,346) \text{ A}.$$

../programi/sistem/zs_2b.m

```
1 function zs = zs_2b()
2 zs.Zv = inf;
3 rf = 0.23 * exp(1j*12/180*pi);
4 Izs = 300;
5 Je = (1 - rf)*Izs;
6 zs.J = [Je 0 Izs-Je 0].';
7 zs.Rz = [0.7 5 5 5]';
8 zs.granki = [
9     1 2 0.14034 + 0.65136i 0.61750 - 0.0379i
10    2 3 0.08167 + 1.05700i 0.84507 - 0.10671i
11    2 4 0.11637 + 0.91395i 0.77440 - 0.07954i
12 ];
```

```
>> [U,Iz,If,It] = resi_zs('zs_2b');
>> U = abs(U)'
U =
 84.3082  36.3843  40.3359  24.6229
>> Iz = abs(Iz)'
Iz =
120.4403   7.2769   8.0672   4.9246
```