

Високонапонски мрежи и системи

Регулација на напони и реактивни моќности во ЕЕС

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, 2019

Општо

Работата на елементите на мрежите и потрошувачите се влошува кога тие работат со напон кој се разликува од номиналниот.

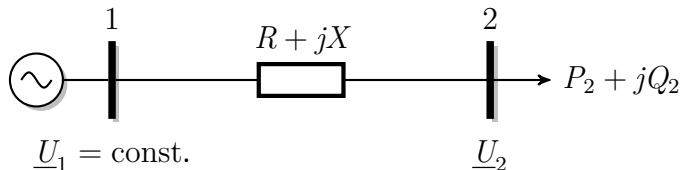
- $U > U_n$
 - ▶ забрзано стареење на сите елементи од мрежата
 - ▶ зголемени загуби во трансформаторите
 - ▶ засилена корона и зголемени загуби кај надземните водови
 - ▶ зголемени диелектрични загуби и загревање кај каблите, предвремено стареење, можност за топлински пробив
- $U < U_n$
 - ▶ зголемување на загубите на активна моќност и енергија во електричните мрежи
 - ▶ влошување на техничките и економските показатели и перформанси на потрошувачите
 - ▶ зголемено лизгање и зголемени загуби кај асинхроните мотори

Причини за промена на напонот

- **промена на оптоварувањето на системот:** во големи ЕЕС односот меѓу максималната и минималната моќност во текот на денот е од 1,5:1 до 2:1, во дистрибутивните мрежи односот може да биде и поголем од 6:1.
- измени на режимот на работа на изворите на електрична енергија
- измени во поврзаноста на мрежата

За да се одржува отстапувањето на напонот кај потрошувачите од неговата номинална вредност во определени граници, потребно е да се врши регулација на напонот во разни точки од мрежата.

Врска меѓу Q и U



$$\Delta U = |\underline{U}_1| - |\underline{U}_2| \approx \Delta U_d = \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2}$$

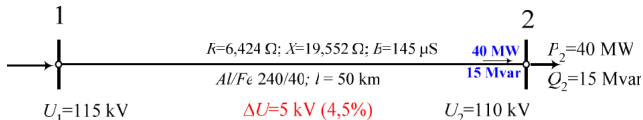
За елементите во високонапонските мрежи важи $X/R \gg 1$, т.е.
 $Q_2 \cdot X \gg P_2 \cdot R$

Главна причина за варијацијата на напонот во високонапонските мрежи се реактивните моќности.

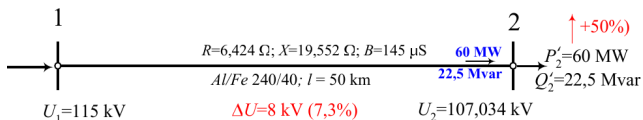
За регулација на напоните дополнителни реактивни моќности се добиваат од кондензаторска батерија, синхрон компензатор или реактор.

Пример 1

Разгледуваме режим на работа на еден 110 kV вод со $R = 6,424 \Omega$, $X = 19,552 \Omega$, $B = 145 \mu\text{S}$, $l = 50 \text{ km}$, како на сликата. Водот напојува потрошувач со моќност $\underline{S}_2 = (40 + j15) \text{ MVA}$ при напон $U_2 = 110 \text{ kV}$. Напонот во напојната точка е притоа $U_1 = 115 \text{ kV}$ и соодветно на тоа, загубата на напон во преносниот во изнесува $\Delta U = 115 - 110 = 5 \text{ kV}$.

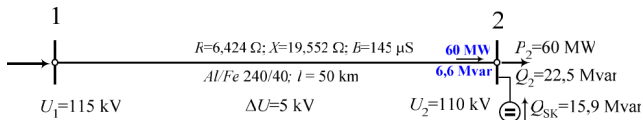


Доколку моќноста на потрошувачот се зголеми за 50% напонот на крајот од водот ќе падне на вредноста $U_2 = 107,034 \text{ kV}$.



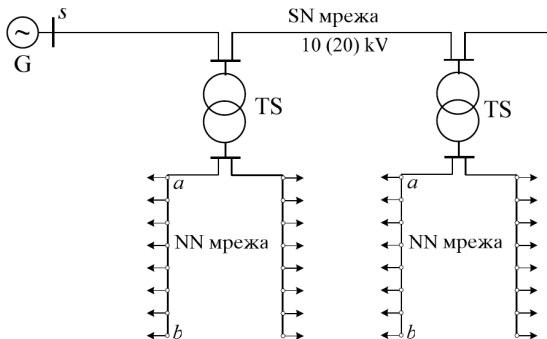
Пример 1

Ако сакаме напонот да остане и понатаму ист и да ја задржи старата вредност $U_2 = 110 \text{ kV}$, тогаш ќе мора да се инјектира дополнителна реактивна моќност во јазелот 2 со вредност од $15,9 \text{ Mvar}$.



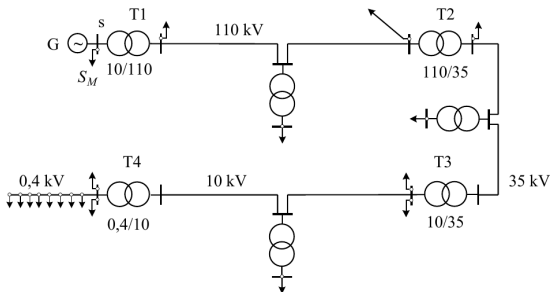
Регулација на напонот со измена на напоните кај изворите

Во помалите мрежи (микро мрежи) кои се напојуваат од само една електрична централа регулацијата на напонот најчесто се врши со измена на напонот кај самите синхрони генератори.



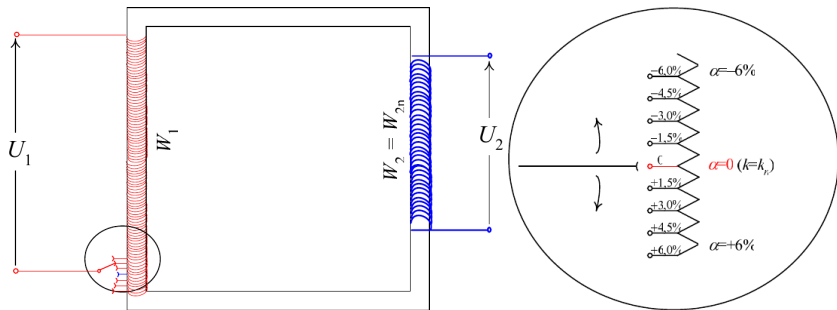
Потрошувачите во точките блиску до централата секогаш работат со повисок напон во однос на останатите потрошувачи.

Регионална мрежа



- Загубата на напон до најоддалечените потрошувачи, после неколку трансформации, може да изнесува и повеќе од 30%.
- Генераторите го менуваат напонот во опсег $\pm 5\% U_n$.
- Ако минималната моќност изнесува $1/3$ од максималната тогаш ширината на интервалот во кој ќе варира напонот ќе изнесува $2/3 \cdot 30 - 5 = 15\%$ што е премногу.
- Регулацијата на напонот кај електричните центри во големите ЕЕС е само помошно, а не основно средство за регулација на напоните.

Регулација на напон со трансформатори



$$k_n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}$$

$$k = \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \cdot k_n$$

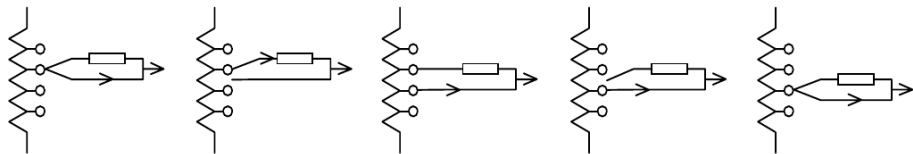
$$\alpha \in \{0; \pm 2, 5\%; \pm 5\%\}$$

$$\alpha \in \{0; \pm 1, 5\%; \pm 3\%; \dots \pm 15\%\}$$

Начини за менувањето на коефициентот на трансформација

- Регулација во безнапонска состојба – позицијата на преклопката се менува кога трансформаторот е исклучен од мрежата.
 - ▶ Се применува кај дистрибутивните трансформатори со помали моќности и тоа ретко, т.е. сезонски.
- Регулација под товар – позицијата на преклопката се менува кога трансформаторот е оптоварен.
 - ▶ Се применува кај поголемите високонапонски трансформатори со моќност $S_n > 20 \text{ MVA}$ и тоа постојано преку целиот ден – работи автоматски.

Принцип на работа на регулационата преклопка



- Опсегот на регулација кај регулационите трансформатори изнесува обично $\pm 15\%$, а понекогаш $\pm 10\%$ или $\pm 20\%$.
- Чекорот на регулација изнесува $1,5\%$ ($\pm 10 \times 1,5\%$) и $1,78\%$ ($\pm 9 \times 1,78\%$).
- Чекор поголем од 2% би давал премногу груба регулација на напонот, додека чекорот помал од 1% значително би ја усложнил и поскапил регулационата преклопка.

Регулација во безнапонска состојба

1. Пресметка на напон во ВН мрежа за максимално и минимално оптоварување $U_{1(\max)}$ и $U_{1(\min)}$
2. Пресметка на сведените вредности на напонот на секундарот за режимите на максимално и минимално оптоварување

$$U'_{2(\max)} \approx U_{1(\max)} - \frac{P_{T(\max)} \cdot R_T + Q_{T(\max)} \cdot X_T}{U_n}$$

$$U'_{2(\min)} \approx U_{1(\min)} - \frac{P_{T(\min)} \cdot R_T + Q_{T(\min)} \cdot X_T}{U_n}$$

3. Пресметка на средна вредност на напонот на секундарот

$$U'_{2(sr)} = \frac{U'_{2(\max)} + U'_{2(\min)}}{2}$$

4. Пресметка на потребниот коефициент на трансформација

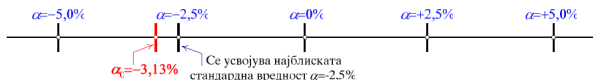
$$k_o = \frac{U'_{2(sr)}}{U_{2o}}, \quad U_{2o} \text{ е посакуваната вредност на напонот}$$

Регулација во безнапонска состојба

5. Пресметка на најповолна позиција на преклопката

$$\alpha_o = \left(\frac{k_o}{k_n} - 1 \right) \cdot 100$$

6. Заокружување позиција на преклопката на најблиската постоечка вредност



7. Пресметка на коефициентот на трансформација

$$k = \left(1 + \frac{\alpha}{100} \right) \cdot k_n$$

8. Проверка на напонските прилики на секундарот

$$U_{2(\max)} = \frac{U'_{2(\max)}}{k}, \quad U_{2(\min)} = \frac{U'_{2(\min)}}{k}$$

Пример 2

Пример 3.1 од книгата: Потребно е да се избере регулациониот отцеп на VN намотка од трансформаторот за снижување на напонот 35/0,4 kV со моќност 630 kVA така што средната вредност на напонот на NN собирници да биде $U_{2o} = 0,39$ kV, а отстапувањата на напонот во режимот на максимално и минимално оптоварување околу средната вредност да бидат приближно еднакви.

Во режимот на максимално оптоварување потрошувачите земаат моќност $P_{\max} = 520$ kW и $Q_{\max} = 390$ kvar и напонот на VN собирници изнесува $U_{1(\max)} = 33,3$ kV.

Во режимот на минимално оптоварување моќноста на потрошувачите изнесува $P_{\min} = 220$ kW и $Q_{\min} = 180$ kvar, а напонот на VN собирници изнесува $U_{1(\min)} = 35,2$ kV.

Активната и реактивната отпорност на трансформаторот, сведени на VN страна, изнесуваат $R_T = 23,5$ Ω и $X_T = 123,5$ Ω .

Пример 2

$$\begin{aligned}U'_{2(\max)} &= U_{1(\max)} - \frac{P_{T(\max)} \cdot R_T + Q_{T(\max)} \cdot X_T}{U_n} = \\ &= 33,3 - \frac{0,52 \cdot 23,5 + 0,39 \cdot 123,5}{35} = 31,6 \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U'_{2(\min)} &= U_{1(\min)} - \frac{P_{T(\min)} \cdot R_T + Q_{T(\min)} \cdot X_T}{U_n} \\ &= 35,2 - \frac{0,22 \cdot 23,5 + 0,18 \cdot 123,5}{35} = 34,4 \text{ kV}\end{aligned}$$

$$U'_{2(sr)} = \frac{U'_{2(\max)} + U'_{2(\min)}}{2} = \frac{31,6 + 34,4}{2} = 33 \text{ kV}$$

$$k_o = \frac{U'_{2(sr)}}{U_{2o}} = \frac{33}{0,39} = 84,7$$

$$k_n = \frac{35}{0,4} = 87,5$$

$$\alpha_o = \left(\frac{k_o}{k_n} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{84,7}{87,5} - 1 \right) \cdot 100 = -3,2\%$$

Пример 2

$$\alpha_o = -3,2\%$$

$$\alpha = -2,5\% \quad \text{најблиска постоечка вредност}$$

$$k = \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \cdot k_n = \left(1 - \frac{2,5}{100}\right) \cdot 87,5 = 85,3125$$

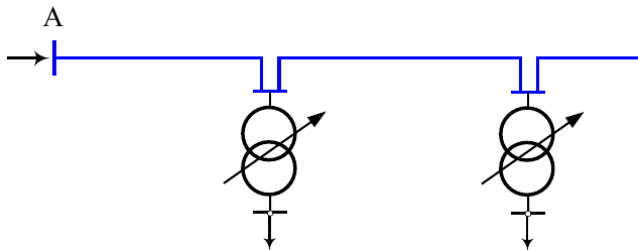
$$U_{2(\max)} = \frac{U'_{2(\max)}}{k} = \frac{31,6}{85,3125} = 0,371 \text{ kV}$$

$$U_{2(\min)} = \frac{U'_{2(\min)}}{k} = \frac{24,4}{85,3125} = 0,403 \text{ kV}$$

$$U_{2(sr)} = \frac{U_{2(\max)} + U_{2(\min)}}{2} = \frac{0,371 + 0,403}{2} = 0,387 \text{ kV}$$

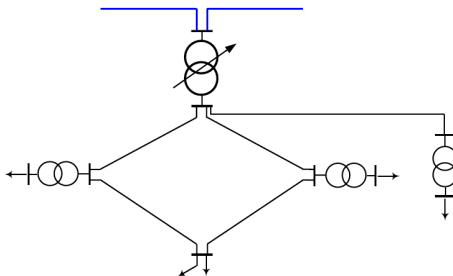
Регулација на напонот во дистрибутивни мрежи

- Голем процент од водовите се кабелски (мала загуба на напон) или пак надземни со релативно мал пресек (големо R).
- Загубата на напон претежно се должи на течењето на активните, а не на реактивните моќности (висок фактор на моќност $\cos \varphi > 0,9$). Компензацијата на реактивната моќност ќе има слаб ефект.
- Само регулационите трансформатори можат да ги задоволат барањата во поглед на напоните кај потрошувачите.



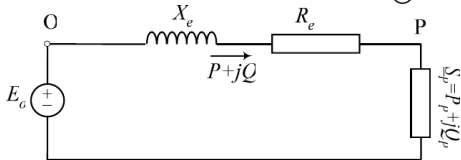
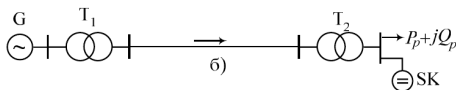
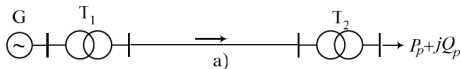
Централна регулација на напонот

- Еден регулационен трансформатор за напојувањето на цел регион, поставен во точка која во најголема мерка ја карактеризира напонската состојба во мрежата.
- Ако потрошувачите имаат различен карактер и дијаграми на оптоварување потребни се дополнителни инјекции на реактивна моќност во одредени точки од мрежата.
- Ако ни со дополнителни мерки не можат да се постигнат задоволителни резултати, тогаш се преминува на локална регулација на напонот кај одредени потрошувачи со поставување регулационен трансформатор.



Регулација на напоните со прераспределба на реактивните моќности во ЕЕС

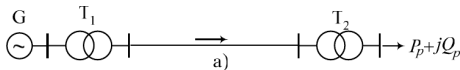
- Со инјектирање на реактивна моќност во одделните јазли од системот
- Со прераспределба на реактивните моќности на изворите на енергија



$$R_e = R_{T1} + R_V + R_{T2} \quad X_e = X_{T1} + X_V + X_{T2}$$

$$\Delta U \approx \frac{P_p \cdot R_e + Q_p \cdot X_e}{U_n}$$

Пример 4



Нека се познати параметрите на елементите од системот
 $S_{nT1} = S_{nT2} = 50 \text{ MVA}$, $u_{k1} = u_{k2} = 10\%$, $P_p = 40 \text{ MW}$ и нека преносниот вод со номинален напон 110 kV и должина $l = 60 \text{ km}$ е изведен со спроводници $\text{Al/Fe } 240/40 \text{ mm}^2/\text{mm}^2$. Во тој случај би добиле

$$R_e = R_{T1} + R_V + R_{T2} = 0,75 + 7,5 + 0,75 = 9 \Omega$$

$$X_e = X_{T1} + X_V + X_{T2} = 290 + 24 + 24 + 24 = 362 \Omega$$

$$X_e/R_e = 362/9 = 40,2$$

$$\cos \varphi_p \quad (Q_p \cdot X_e)/(P_p \cdot R_e)$$

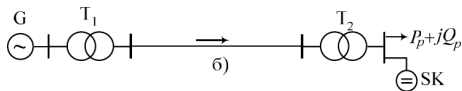
$$0,95 \quad 4760/360 = 13,2$$

$$0,90 \quad 7013/360 = 19,5$$

$$0,80 \quad 10860/360 = 30,0$$

Со промена на Q во водот ќе можеме ефикасно да ја менуваме загубата на напон, односно да вршиме регулација на напон кај потрошувачот.

Пример 4



$$\Delta U = \frac{P_p \cdot R_e + (Q_p - Q_{SK}) \cdot X_e}{U_n}$$

Напонот кај потрошувачот ќе порасне од вредноста U_p на нова вредност U'_p

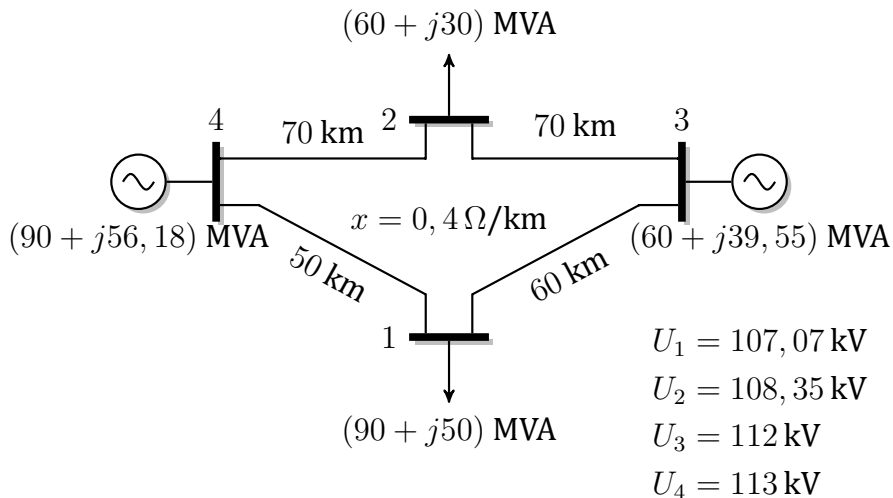
$$U'_p = U_p + \frac{Q_{SK} \cdot X_e}{U_n}$$

Инјектирањето на реактивна моќност во принцип претставува средство за прераспределба на реактивните моќности во ЕЕС. Потрошувачот добива дел од реактивната моќност од SK наместо од генераторот G.

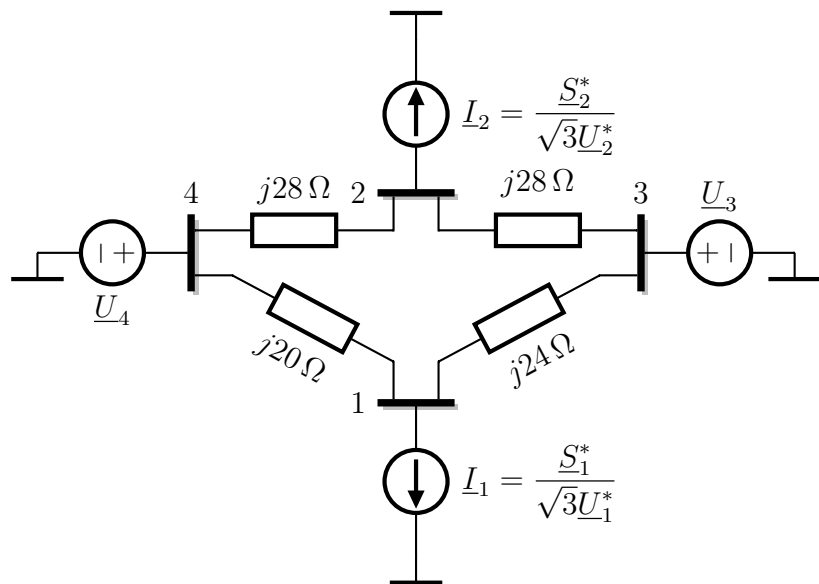
Регулацијата на напоните во мрежите со измена на тековите на реактивни моќности може да се оствари и со примена на кондензаторски батерии и реактори.

Забелешка: слајдовите од 32 до 42 може да се прескокнат.

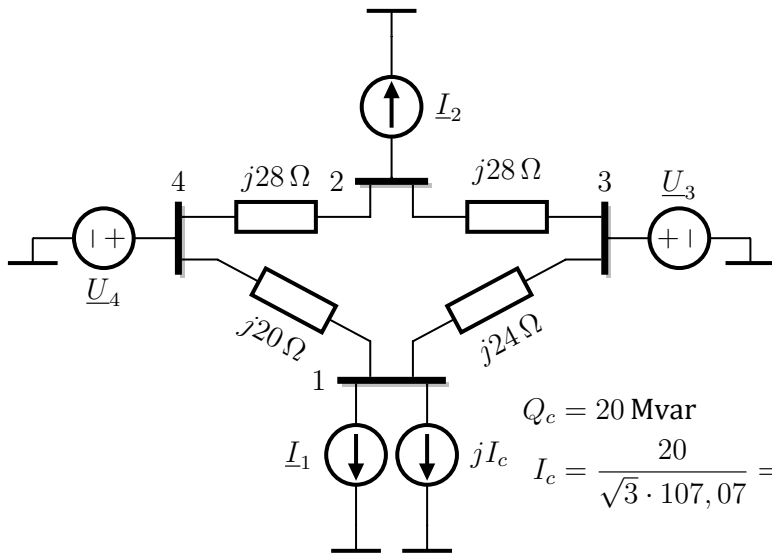
Пример 6 – подготовка за матрица \underline{Z}



Пример 6 – подготовка за матрица \underline{Z}



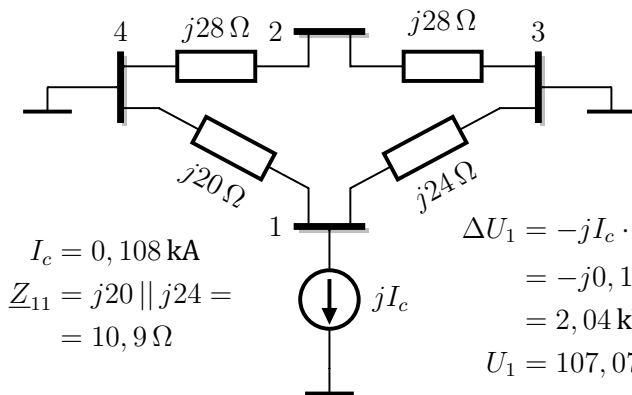
Пример 6 – подготовка за матрица \underline{Z}



$$Q_c = 20 \text{ Mvar}$$

$$I_c = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 107,07} = 0,108 \text{ kA}$$

Пример 6 – подготовка за матрица \underline{Z}



$$I_c = 0,108\ \text{kA}$$

$$\underline{Z}_{11} = j20 \parallel j24 =$$

$$= 10,9\ \Omega$$

$$\Delta U_1 = -jI_c \cdot \underline{Z}_{11} \cdot \sqrt{3}$$

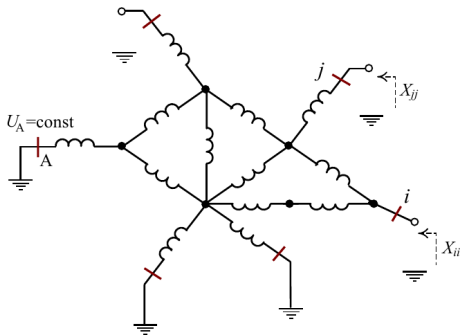
$$= -j0,108 \cdot j10,9 \cdot \sqrt{3}$$

$$= 2,04\ \text{kV}$$

$$U_1 = 107,07 + 2,04 = 109,11\ \text{kV}$$

Матрица \underline{Z}

Инјектирањето на реактивна моќност во еден јазел ќе предизвика извесно покачување на напоните и во останатите јазли од мрежата. Промените се одредуваат со помош на матрицата на импеданции (реактанции) на независните јазли која се нарекува и краткоспојна матрица.



$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{13} & \cdots & \underline{Z}_{1n} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & \underline{Z}_{23} & \cdots & \underline{Z}_{2n} \\ \underline{Z}_{31} & \underline{Z}_{32} & \underline{Z}_{33} & \cdots & \underline{Z}_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{Z}_{n1} & \underline{Z}_{n2} & \underline{Z}_{n3} & \cdots & \underline{Z}_{nn} \end{bmatrix}$$

Матрица \underline{Z}

- Ако во јазелот i инјектираме реактивна моќност $\Delta Q_i = \sqrt{3} U_i I_i$ тогаш напонот во истиот јазел ќе порасне за вредноста

$$\Delta U_i = \sqrt{3} X_{ii} I_i = \frac{X_{ii}}{U_i} \cdot \Delta Q_i \approx \frac{X_{ii}}{U_n} \cdot \Delta Q_i$$

- Ако во јазелот i инјектираме реактивна моќност ΔQ_i тогаш напонот во јазелот j ќе порасне за вредноста

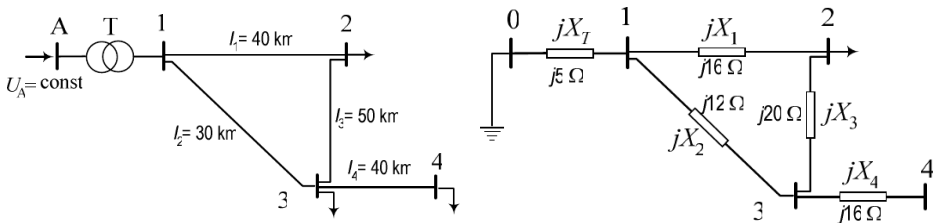
$$\Delta U_j = \frac{X_{ij}}{U_i} \cdot \Delta Q_i \approx \frac{X_{ij}}{U_n} \cdot \Delta Q_i$$

- Ако во секој од јазлите вршине инјектирање на реактивна моќност, според принципот на суперпозиција, измената на напонот во произволен јазел i ќе биде

$$\Delta U_i = \frac{X_{i1}}{U_n} \cdot \Delta Q_1 + \frac{X_{i2}}{U_n} \cdot \Delta Q_2 + \dots + \frac{X_{in}}{U_n} \cdot \Delta Q_n$$

Пример 7

Да се формира матрицата $\underline{\mathbf{Z}}$ за мрежата од сликата ако е познато дека $X_T = 5 \Omega$, а сите водови имаат $x = 0,4 \Omega/\text{km}$.



$$\underline{\mathbf{Y}} = \frac{1}{j} \begin{bmatrix} X_T^{-1} + X_1^{-1} + X_2^{-1} & -X_1^{-1} & X_2^{-1} & 0 \\ -X_1^{-1} & X_1^{-1} + X_3^{-1} & -X_3^{-1} & 0 \\ -X_2^{-1} & -X_3^{-1} & X_2^{-1} + X_3^{-1} + X_4^{-1} & -X_4^{-1} \\ 0 & 0 & -X_4^{-1} & X_4^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{Z}} = \underline{\mathbf{Y}}^{-1}$$

Пример 7

programi/primer_mat_z_1.m

```
1 Y = [  
2   1/5+1/16+1/12   -1/16   -1/12   0  
3   -1/16   1/16+1/20   -1/20   0  
4   -1/12   -1/20   1/12+1/16+1/20   -1/16  
5   0   0   -1/16   1/16  
6   ]  
7  
8 Z = Y^-1
```

```
>> primer_mat_z_1
```

```
Y =  
    0.3458   -0.0625   -0.0833         0  
   -0.0625    0.1125   -0.0500         0  
   -0.0833   -0.0500    0.1958   -0.0625  
         0         0   -0.0625    0.0625  
  
Z =  
    5.0000    5.0000    5.0000    5.0000  
    5.0000   15.6667    9.0000    9.0000  
    5.0000    9.0000   14.0000   14.0000  
    5.0000    9.0000   14.0000   30.0000
```

Пример 8

За мрежата од претходниот пример да се определи само колоната 4, а потоа и заедно колоните 2 и 4 од матрицата \underline{Z} без употреба на инверзна матрица.

programi/primer_mat_z_2.m

```
1 Y = [  
2   1/5+1/16+1/12   -1/16   -1/12   0  
3   -1/16   1/16+1/20   -1/20   0  
4   -1/12   -1/20   1/12+1/16+1/20   -1/16  
5   0   0   -1/16   1/16  
6   ]  
7  
8 Y = sparse(Y)  
9  
10 A = [0  
11   0  
12   0  
13   1];  
14 Z4 = Y\A  
15  
16 A = [0 0  
17   1 0  
18   0 0  
19   0 1];  
20 Z24 = Y\A
```

Пример 8

```
>> primer_mat_z_2
```

```
Y =  
  0.3458  -0.0625  -0.0833     0  
 -0.0625   0.1125  -0.0500     0  
 -0.0833  -0.0500   0.1958  -0.0625  
      0      0  -0.0625   0.0625
```

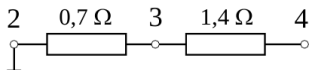
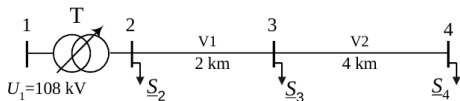
```
Y =  
(1,1)    0.3458  
(2,1)   -0.0625  
(3,1)   -0.0833  
(1,2)   -0.0625  
(2,2)    0.1125  
(3,2)   -0.0500  
(1,3)   -0.0833  
(2,3)   -0.0500  
(3,3)    0.1958  
(4,3)   -0.0625  
(3,4)   -0.0625  
(4,4)    0.0625
```

```
Z4 =  
 5.0000  
 9.0000  
14.0000  
30.0000
```

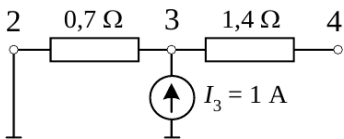
```
Z24 =  
 5.0000  5.0000  
15.6667  9.0000  
 9.0000 14.0000  
 9.0000 30.0000
```

Пример 9

Да се одреди матрицата \underline{Z} за мрежата од сликата ако е познато дека напонот на јазелот 2 е константен, а за водовите е познато $x = 0,35 \Omega/\text{km}$.

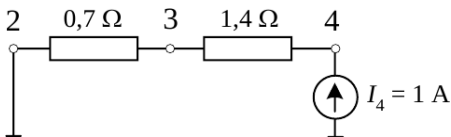


Начин 1:



$$X_{33} = \frac{U_3}{I_3} = \frac{0,7}{1} = 0,7 \Omega$$

$$X_{43} = \frac{U_4}{I_3} = \frac{0,7}{1} = 0,7 \Omega$$

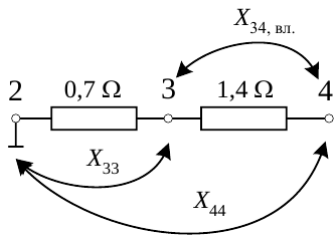


$$X_{44} = \frac{U_4}{I_4} = \frac{2,7}{1} = 2,1 \Omega$$

$$X_{34} = \frac{U_3}{I_4} = \frac{0,7}{1} = 0,7 \Omega$$

Пример 9

Начин 2:



$$X_{33} = 0,7\Omega$$

$$X_{44} = 0,7 + 1,4 = 2,1\Omega$$

$$X_{34,вл.} = 1,4\Omega$$

$$\begin{aligned} X_{34} = X_{43} &= \frac{X_{33} + X_{44} - X_{34,вл.}}{2} \\ &= \frac{0,7 + 2,1 - 1,4}{2} = 0,7\Omega \end{aligned}$$

Пример 9

Начин 3:

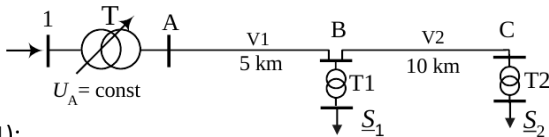
$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \frac{1}{0,7} + \frac{1}{1,4} & -\frac{1}{1,4} \\ -\frac{1}{1,4} & \frac{1}{1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,143 & -0,714 \\ -0,714 & 0,714 \end{bmatrix} \mathbf{S}$$

$$D = 2,143 \cdot 0,714 - 0,714 \cdot 0,714 = 1,02$$

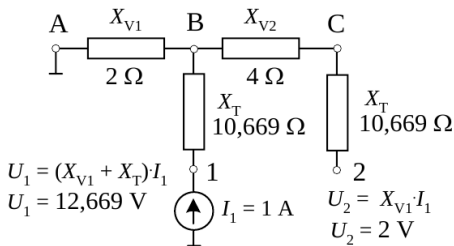
$$\mathbf{Z} = \mathbf{Y}^{-1} = \frac{1}{1,02} \cdot \begin{bmatrix} 0,714 & 0,714 \\ 0,714 & 2,143 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,7 & 0,7 \\ 0,7 & 2,1 \end{bmatrix} \mathbf{\Omega}$$

Пример 10

Да се одреди матрицата \underline{Z} за јазлите 1 и 2 за мрежата од сликата ако е познато дека напонот на јазелот А е константен, за водовите е познато $x = 0,4 \Omega/\text{km}$, а трансформаторите имаат реактанции $X_T = 10,669 \Omega$.



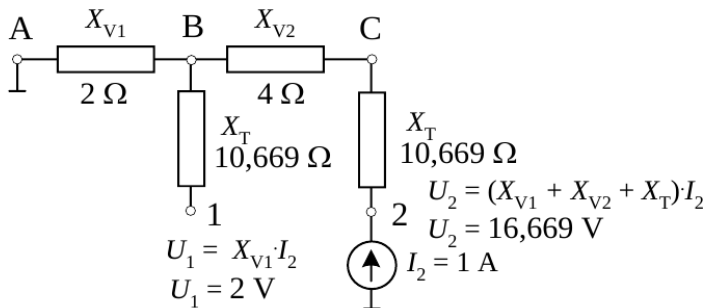
Начин 1 (јазел 1):



$$X_{11} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{12,669}{1} = 12,669 \Omega \text{ и } X_{21} = \frac{U_2}{I_1} = \frac{2}{1} = 2 \Omega.$$

Пример 10

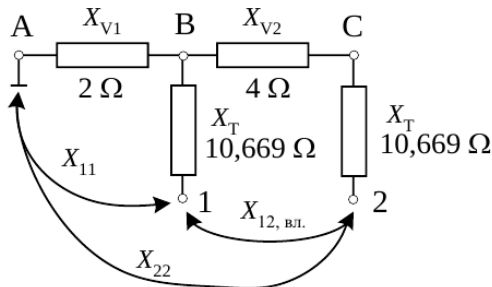
Начин 1 (јазел 2):



$$X_{22} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{16,669}{1} = 16,669 \Omega \text{ и } X_{12} = \frac{U_1}{I_2} = \frac{2}{1} = 2 \Omega.$$

Пример 10

Начин 2:



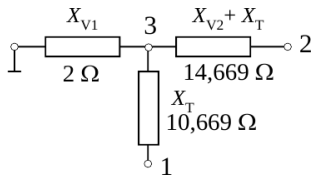
$$X_{11} = 2 + 10,669 = 12,669 \Omega; \quad X_{22} = 2 + 4 + 10,669 = 16,669 \Omega$$

$$X_{12, \text{вл.}} = 2 + 2 \cdot 10,669 = 25,338 \Omega$$

$$X_{12} = X_{21} = \frac{X_{11} + X_{22} - X_{12, \text{вл.}}}{2} = \frac{12,669 + 16,669 - 25,338}{2} = 2 \Omega,$$

Пример 10

Начин 3:



programi/primer_mat_z_3.m

```
1 Y = [  
2     1/10.669    0    -1/10.669  
3     0          1/14.669  -1/14.669  
4    -1/10.669  -1/14.669  1/10.669+1/14.669+1/2  
5     ]  
6  
7 Z = Y^-1
```

```
>> primer_mat_z_3
```

```
Y =  
    0.0937         0    -0.0937  
         0     0.0682    -0.0682  
   -0.0937    -0.0682     0.6619  
Z =  
   12.6690     2.0000     2.0000  
    2.0000    16.6690     2.0000  
    2.0000     2.0000     2.0000
```

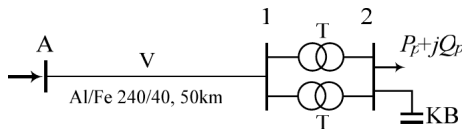
Пример 11

Пример 3.4 од книгата: Регионална трансформаторска станица се напојува преку 110 kV далекувод од напојната точка А. Во неа се инсталирани два идентични трансформатори од по 31,5 MVA, со преносен однос $110 \pm 4 \times 2,5\%/11 \text{ kV/kV}$, за кои што ги знаеме $R_T = 2,2 \Omega$ и $X_T = 30,73 \Omega$ (сведени на 110 kV страна). За водот ги знаеме $R_V = 6,25 \Omega$ и $X_V = 20 \Omega$.

Разгледуваме два работни режима

максимален: $P_{\max} = 40 \text{ MW}$, $Q_{\max} = 20 \text{ Mvar}$, $U_{A(\max)} = 110 \text{ kV}$

минимален: $P_{\min} = 20 \text{ MW}$, $Q_{\min} = 12,5 \text{ Mvar}$, $U_{A(\min)} = 113 \text{ kV}$



За да се подобрат напонските прилики кај потрошувачот, се предвидува инсталирање на кондензаторска батерија на 10 kV со можност за регулација. Да се избере коефициентот на трансформација k на трансформаторите и да се одреди најмалата вредност на инсталираната моќност на батеријата за да постигнеме $U_{2o(\max)} = 10,5 \text{ kV}$ и $U_{2o(\min)} = 10,0 \text{ kV}$.

Пример 11

$$R_e = R_V + R_T/2 = 7,35 \Omega$$

$$X_e = X_V + X_T/2 = 35,36 \Omega$$

$$U'_{2(\max)} = U_{A(\max)} - \frac{P_{\max} R_e + Q_{\max} X_e}{U_n} = 100,9 \text{ kV}$$

$$U'_{2(\min)} = U_{A(\min)} - \frac{P_{\min} R_e + Q_{\min} X_e}{U_n} = 107,64 \text{ kV}$$

Кондензаторите можат само да покачат напонот, затоа во режим на минимално оптоварување ќе биде потребно да се исклучени. Коэффициентот на трансформација k на ќе го избереме така што напонот $U_{2o(\min)}$ ќе ја добие бараната вредност $U_{2o(\min)} = 10,0 \text{ kV}$.

$$k_o = \frac{U'_{2(\min)}}{U_{2o(\min)}} = \frac{107,64}{10} = 10,764$$

$$\alpha_o = \left(\frac{k_o}{k_n} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{10,764}{110/11} - 1 \right) \cdot 100 = 7,64\% \Rightarrow \alpha = 3 \times 2,5\% = 7,5\%$$

$$k = k_n \cdot (1 + \alpha/100) = 10 \cdot (1 + 7,5/100) = 10,75$$

Пример 11

$$U_{2(\min)} = \frac{U'_{2(\min)}}{k} = \frac{107,64}{10,75} = 10,01 \text{ kV}$$

$$U_{2(\max)} = \frac{U'_{2(\max)}}{k} = \frac{100,9}{10,75} = 9,39 \text{ kV}$$

За да постигнеме $U_{2(\max)} = U_{2o(\max)} = 10,5 \text{ kV}$ треба да инјектираме реактивна моќност ΔQ , со што ќе се добие покачување на напонот за $\Delta U = 10,5 - 9,39 = 1,11 \text{ kV}$.

$$X''_e = \frac{X_e}{k^2} = \frac{35,36}{10,75^2} = 0,2923 \Omega$$

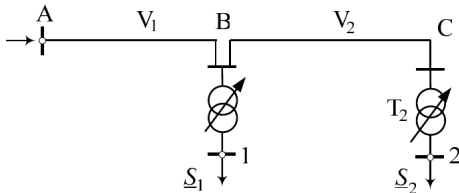
$$\Delta Q = \frac{\Delta U \cdot U_{2o(\max)}}{X''_e} = \frac{1,11 \cdot 10,5}{0,2923} = 39,9 \text{ Mvar}$$

Номиналната моќноста на батеријата Q_{KB} се дава за номинален $U_n = 10 \text{ kV}$

$$\Delta Q = Q_{KB} \cdot \left(\frac{U_{2o}}{U_n}\right)^2 \Rightarrow Q_{KB} = \Delta Q \cdot \left(\frac{U_n}{U_{2o}}\right)^2 = 39,9 \cdot \left(\frac{10}{10,5}\right)^2 = 36,2 \text{ Mvar}$$

Пример 12

Пример 3.5 од книгата: Дадена е 35 kV надземна мрежа која напојува два потрошувача. Во режимот на максимално оптоварување потрошувачите земаат од мрежата моќности $\underline{S}_{1 \max} = (7,5 + j3,63) \text{ MVA}$ и $\underline{S}_{2 \max} = (5 + j3,75) \text{ MVA}$, додека во режимот на минимално оптоварување нивните моќности за 3 пати помали. Водовите имаат исти параметри $R_V = 3,15 \Omega$ и $X_V = 3,5 \Omega$, а за трансформаторите се познати следните податоци $38,5 \pm 2 \times 2,5\%/11, \text{ kV/kV}$, $R_{T1} = 1,364 \Omega$, $X_{T1} = 11 \Omega$, $R_{T2} = 1,976 \Omega$ и $X_{T2} = 14,69 \Omega$ (сведени на 35 kV). Напонот во напојната точка А се држи на константна вредност $U_A = 36,75 \text{ kV}$.



Потребно е да се одредат коефициентите на трансформација на двата трансформатора така што средната вредност на напоните кај потрошувачите да изнесува $U_{1o} = U_{2o} = U_n = 10 \text{ kV}$.

Пример 12

$$\Delta U_{AB(\max)} = \frac{[P_{1(\max)} + P_{2(\max)}] \cdot R_V + [Q_{1(\max)} + Q_{2(\max)}] \cdot X_V}{U_n} = 1,863 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{BC(\max)} = \frac{P_{2(\max)} \cdot R_V + Q_{2(\max)} \cdot X_V}{U_n} = 0,825 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{T1(\max)} = \frac{P_{1(\max)} \cdot R_{T1} + Q_{1(\max)} \cdot X_{T1}}{U_n} = 1,434 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{T2(\max)} = \frac{P_{2(\max)} \cdot R_{T2} + Q_{2(\max)} \cdot X_{T2}}{U_n} = 1,856 \text{ kV}$$

Во режимот на минимално оптоварување овие загуби на напон ќе бидат приближно 3 пати помали (3 пати помали моќности).

$$U_{B(\max)} = 34,887 \text{ kV} \quad U_{C(\max)} = 34,062 \text{ kV}$$

$$U'_{1(\max)} = 33,454 \text{ kV} \quad U'_{2(\max)} = 32,206 \text{ kV}$$

$$U_{B(\min)} = 36,129 \text{ kV} \quad U_{C(\min)} = 35,854 \text{ kV}$$

$$U'_{1(\min)} = 35,651 \text{ kV} \quad U'_{2(\min)} = 35,235 \text{ kV}$$

Пример 12

$$U'_{1(sr)} = \frac{U'_{1(max)} + U'_{1(min)}}{2} = 34,55 \text{ kV}$$

$$U'_{2(sr)} = \frac{U'_{2(max)} + U'_{2(min)}}{2} = 33,72 \text{ kV}$$

$$k_{T1o} = \frac{U'_{1(sr)}}{U_{1o}} = \frac{34,55}{10} = 3,455$$

$$k_{T2o} = \frac{U'_{2(sr)}}{U_{2o}} = \frac{33,72}{10} = 3,372$$

$$\alpha_{1o} = \left(\frac{k_{T1o}}{k_{T1n}} - 1 \right) \cdot 100 = -1,28\% \Rightarrow \alpha_1 = -2,5\%$$

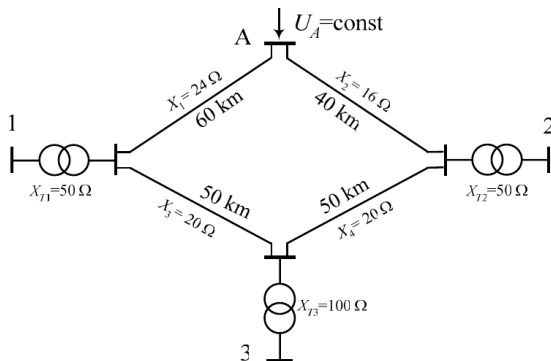
$$\alpha_{2o} = \left(\frac{k_{T2o}}{k_{T2n}} - 1 \right) \cdot 100 = -3,66\% \Rightarrow \alpha_2 = -2,5\%$$

$$U_{1(min)} = 10,447 \text{ kV} \quad U_{1(max)} = 9,803 \text{ kV} \quad U_{1(sr)} = 10,125 \text{ kV}$$

$$U_{2(min)} = 10,325 \text{ kV} \quad U_{2(max)} = 9,438 \text{ kV} \quad U_{2(sr)} = 9,88 \text{ kV}$$

Пример 13

Пример 3.6 од книгата: Да се одреди матрицата на реактанции на краткоспојната мрежа за системот прикажан на сликата. Параметрите на поедините елементи од мрежата се дадени на сликата. Сите водови имаат ист пресек и иста реактанција по единица должина $x = 0,4 \Omega/\text{km}$.



Пример 13

$$X_{11} = X_{T1} + X_1 \parallel (X_2 + X_3 + X_4) = 66,8 \Omega$$

$$X_{22} = X_{T2} + X_2 \parallel (X_1 + X_3 + X_4) = 62,8 \Omega$$

$$X_{33} = X_{T3} + (X_1 + X_3) \parallel (X_2 + X_4) = 119,8 \Omega$$

$$X_{12, \text{вл.}} = X_{T1} + (X_1 + X_2) \parallel (X_3 + X_4) + X_{T2} = 120 \Omega$$

$$X_{13, \text{вл.}} = X_{T1} + X_3 \parallel (X_1 + X_2 + X_4) + X_{T3} = 165 \Omega$$

$$X_{23, \text{вл.}} = X_{T2} + X_4 \parallel (X_1 + X_2 + X_3) + X_{T3} = 165 \Omega$$

$$X_{12} = X_{21} = \frac{X_{11} + X_{22} - X_{12, \text{вл.}}}{2} = 4,8 \Omega$$

$$X_{13} = X_{31} = \frac{X_{11} + X_{33} - X_{13, \text{вл.}}}{2} = 10,8 \Omega$$

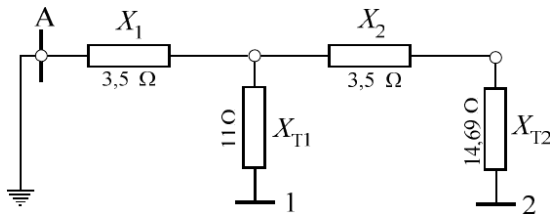
$$X_{23} = X_{32} = \frac{X_{22} + X_{33} - X_{23, \text{вл.}}}{2} = 8,8 \Omega$$

Пример 14

$$\underline{\mathbf{Z}} = j\mathbf{X} = j \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} 66,8 & 4,8 & 10,8 \\ 4,8 & 62,8 & 8,8 \\ 10,8 & 8,8 & 119,8 \end{bmatrix} \Omega$$

Пример 15

Пример 3.7 од книгата: Се разгледува мрежата од примерот 3.5. Во режимот на максимално оптоварување напоните кај потрошувачите изнесуваат $U_{1(\max)} = 9,803 \text{ kV}$ и $U_{2(\max)} = 9,438 \text{ kV}$. Со цел да се поправат напонските прилики во овој режим на работа, се предвидува инсталирање на кондензаторски батерии кај обата потрошувача. Потребно е да се одредат вредностите ΔQ_1 и ΔQ_2 на реактивните моќности што ќе треба да се инјектираат на собирниците 1 и 2 така што нивните напони во режимот на максимално оптоварување да се покачат на вредноста $U_{1o(\max)} = U_{2o(\max)} = 10 \text{ kV}$.



Пример 15

$$X_{11} = X_1 + X_{T1} = 14,5 \Omega$$

$$X_{22} = X_1 + X_2 + X_{T2} + X_2 = 21,69 \Omega$$

$$X_{12} = X_{21} = \frac{X_{11} + X_{22} - X_{12,вл.}}{2} = 3,5 \Omega$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 14,5 & 3,5 \\ 3,5 & 21,69 \end{bmatrix} \Omega$$

$$\Delta U_1 = X_{11} \cdot \frac{\Delta Q_1}{U_1} + X_{12} \cdot \frac{\Delta Q_2}{U_2}$$

$$\Delta U_2 = X_{21} \cdot \frac{\Delta Q_1}{U_1} + X_{22} \cdot \frac{\Delta Q_2}{U_2}$$

Бидејќи реактанциите, се сведени на 35 kV страна, ќе биде потребно и напоните, како и прирастите на напоните, да ги сведеме на 35 kV страна.

Пример 15

$$\Delta U_1 = k_{T1} \cdot [U_{1o(\max)} - U_{1(\max)}] = 3,4125 \cdot (10 - 9,803) = 0,67 \text{ kV}$$

$$\Delta U_2 = k_{T2} \cdot [U_{2o(\max)} - U_{2(\max)}] = 3,4125 \cdot (10 - 9,438) = 1,92 \text{ kV}$$

$$0,67 = 14,5 \cdot \frac{\Delta Q_1}{34,135} + 3,5 \cdot \frac{\Delta Q_2}{34,135}$$

$$1,92 = 3,5 \cdot \frac{\Delta Q_1}{34,135} + 21,69 \cdot \frac{\Delta Q_2}{34,135}$$

$$\Delta Q_1 = 0,9 \text{ Mvar}$$

$$\Delta Q_2 = 2,9 \text{ Mvar}$$