

# 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.

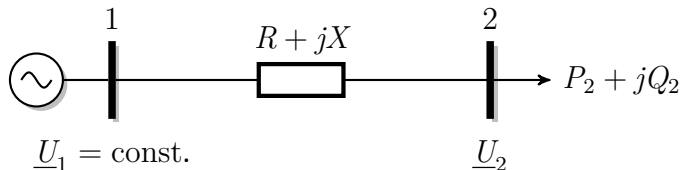
- $U > U_n$ 
  - ▶ забрзано стареење на сите елементи од мрежата
  - ▶ зголемени загуби во трансформаторите
  - ▶ засилена корона и зголемени загуби кај надземните водови
  - ▶ зголемени диелектрични загуби и загревање кај каблите, предвремено стареење, можност за топлински пробив
- $U < U_n$ 
  - ▶ 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 $U$



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

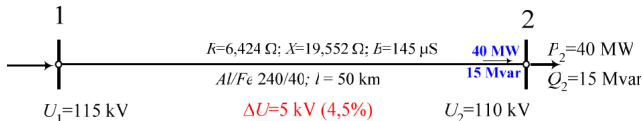
За елементите во високонапонските мрежи важи  $X/R \gg 1$ , т.е.  
 $Q_2 \cdot X \gg P_2 \cdot R$

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

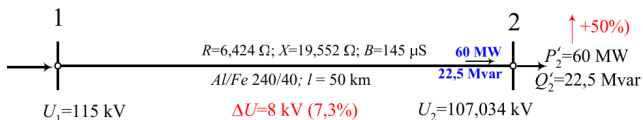
За регулација на напоните дополнителни реактивни моќности се добиваат од кондензаторска батерија, синхрон компензатор или реактор.

# 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  $\Delta U = 115 - 110 = 5 \text{ kV}$ .

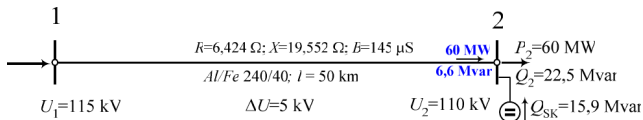


Доколку моќноста на потрошувачот се зголеми за 50% напонот на крајот од водот ќе падне на вредноста  $U_2 = 107,034 \text{ kV}$ .



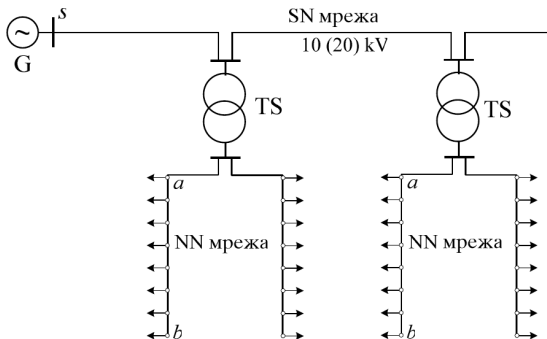
# Пример 1

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  $15,9 \text{ Mvar}$ .



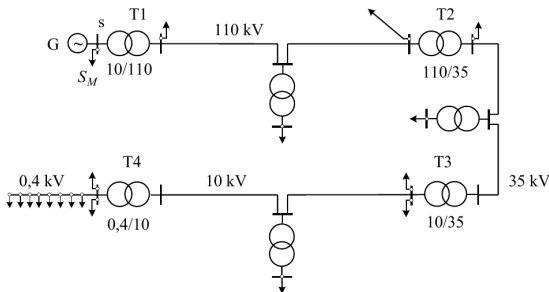
# Регулација на напонот со измена на напоните кај изворите

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.

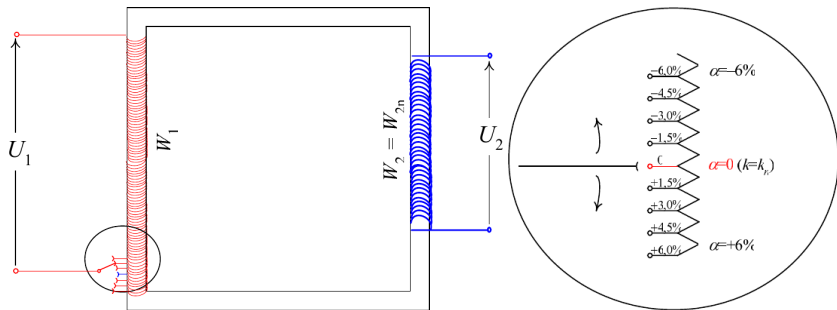
# Регионална мрежа



- 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



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

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

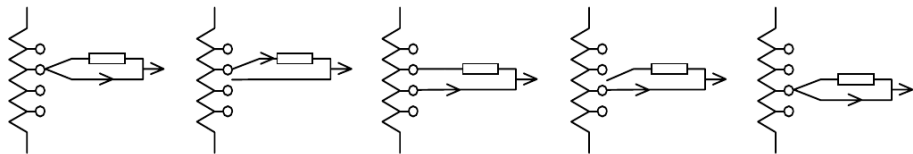
$$\alpha \in \{0; \pm 2, 5\%; \pm 5\%\}$$

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

# 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

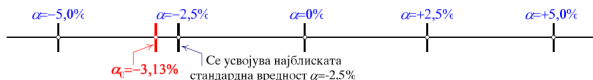
$$k_o = \frac{U'_{2(sr)}}{U_{2o}}, \quad U_{2o} \text{ е посакуваната вредност на напонот}$$

# 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  $U_{2o} = 0,39 \text{ kV}$ , 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  $P_{\max} = 520 \text{ kW}$  и  $Q_{\max} = 390 \text{ kvar}$  и напонот на VN собирници изнесува  $U_{1(\max)} = 33,3 \text{ kV}$ .

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

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

## 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

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

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

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

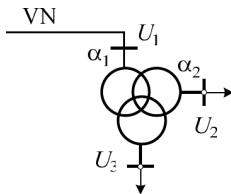
$$U_{2(\max)} = \frac{U'_{2(\max)}}{k} = \frac{31,6}{85,3125} = 0,371 \text{ kV}$$

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

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



# Регулација кај тринамотни трансформатори



1. Слично како и кај двонамотните трансформатори се пресметуваат вредностите на напоните на терциерот  $U'_{3(\max)}$  и  $U'_{3(\min)}$
2. Пресметка на средна вредност на напонот на терциерот

$$U'_{3(sr)} = \frac{U'_{3(\max)} + U'_{3(\min)}}{2}$$

3. Пресметка на потребниот коефициент на трансформација примар/терциер

$$k_{13o} = \frac{U'_{3(sr)}}{U_{3o}}, \quad U_{3o} \text{ е посакуваната вредност на напонот}$$

# Регулација кај тринамотни трансформатори

4. Пресметка на најповолна позиција на преклопката на примарот

$$\alpha_{1o} = \left( \frac{k_{13o}}{k_{13n}} - 1 \right) \cdot 100$$

5. Заокружување позиција на преклопката на најблиската постоечка вредност  $\alpha_1$
6. Пресметка на коефициентот на трансформација примар/терциер

$$k_{13} = \left( 1 + \frac{\alpha_1}{100} \right) \cdot k_{13n}$$

7. Слично како и кај двонамотните трансформатори се пресметуваат вредностите на напоните на секундарот  $U'_{2(\max)}$  и  $U'_{2(\min)}$
8. Пресметка на средна вредност на напонот на секундарот

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

# Регулација кај тринамотни трансформатори

9. Пресметка на потребниот коефициент на трансформација примар/секундар

$$k_{12o} = \frac{U'_{2(sr)}}{U_{2o}}, \quad U_{2o} \text{ е посакуваната вредност на напонот}$$

10. Пресметка на најповолна позиција на преклопката на секундарот Бидејќи и VN и SN намотки имаат регулациони отцепи, а преклопката на VN намотка е веќе поставена на положба  $\alpha_1$  ќе имаме

$$k_{12o} = \frac{1 + \alpha_1/100}{1 + \alpha_{2o}/100} \cdot k_{12n}$$

од каде добиваме

$$\alpha_{2o} = \left[ \frac{k_{12n}}{k_{12o}} \cdot \left( 1 + \frac{\alpha_1}{100} \right) - 1 \right] \cdot 100$$

11. Заокружување позиција на преклопката на најблиската постоечка вредност  $\alpha_2$

# Регулација кај тринамотни трансформатори

12. Пресметка на коефициентот на трансформација примар/секундар

$$k_{12} = \frac{1 + \alpha_1/100}{1 + \alpha_2/100} \cdot k_{12n}$$

13. Проверка на напонските прилики на секундарот и терциерот

$$U_{2(\max)} = \frac{U'_{2(\max)}}{k_{12}}, \quad U_{2(\min)} = \frac{U'_{2(\min)}}{k_{12}}$$
$$U_{3(\max)} = \frac{U'_{3(\max)}}{k_{13}}, \quad U_{3(\min)} = \frac{U'_{3(\min)}}{k_{13}}$$

## Пример 3

Пример 3.2 од книгата: Во една регионална трансформаторска станица за снижување на напонот инсталиран е тринамотен трансформатор 110/38,5/6,6 kV со моќност 10 MVA. Со електрична пресметка се одредени напоните на секундарната и терциерната страна, во режимот на максимално и минимално оптоварување, сведени на VN страна

$$\begin{aligned}U'_{2(\max)} &= 93,3 \text{ kV}, & U'_{3(\max)} &= 96,4 \text{ kV} \\U'_{2(\min)} &= 103,6 \text{ kV}, & U'_{3(\min)} &= 102,5 \text{ kV}\end{aligned}$$

Намотката на VN страна има регулациона преклопка за регулација под товар со 18 регулациони отцепи ( $\pm 9 \times 1, 78\%$ ).

SN намотка 35 kV има преклопка за регулација во безнапонска состојба со 4 регулациони отцепи ( $\pm 2 \times 2, 5\%$ ).

Потребно е да се одреди со кои регулациони отцепи на примарната и секундарната намотка ќе треба да работи трансформаторот за да постигнеме напоните на секундарната и терциерната страна да изнесуваат

во режим на максимално оптоварување:  $U_{2o \max} = 37 \text{ kV}$  и  $U_{3o \max} = 6,3 \text{ kV}$

во режим на минимално оптоварување:  $U_{2o \min} = 36 \text{ kV}$  и  $U_{3o \min} = 6 \text{ kV}$

## Пример 3

Бидејќи трансформаторот може да ја промени положбата на преклопката на примарот во текот на денот под товар ќе одредиме два коефициенти на трансформација  $k_{13o(\max)}$  и  $k_{13o(\min)}$  со коишто трансформаторот треба да работи во режимот на максимално и минимално оптоварување.

$$k_{13o(\max)} = \frac{U'_{3(\max)}}{U_{3o(\max)}} = \frac{96,4}{6,3} = 15,3$$

$$k_{13o(\min)} = \frac{U'_{3(\min)}}{U_{3o(\min)}} = \frac{102,5}{6} = 17,1$$

$$\alpha_{1o(\max)} = \left( \frac{k_{13o(\max)}}{k_{13n}} - 1 \right) \cdot 100 = \left( \frac{15,3}{110/6,6} - 1 \right) \cdot 100 = -8,2\%$$

$$\alpha_{1(\max)} = -5 \cdot 1,78 = -8,9\%$$

$$\alpha_{1o(\min)} = \left( \frac{k_{13o(\min)}}{k_{13n}} - 1 \right) \cdot 100 = \left( \frac{17,1}{110/6,6} - 1 \right) \cdot 100 = +2,5\%$$

$$\alpha_{1(\min)} = 1 \cdot 1,78 = 1,78\%$$

## Пример 3

Со усвоените позиции на регулационата преклопка за вистинските вредности на напонот на терциерот ќе добиеме

$$U_{3(\max)} = \frac{U'_{3(\max)}}{\left(1 + \frac{\alpha_{1(\max)}}{100}\right) \cdot k_{13n}} = \frac{96,4}{\left(1 + \frac{-8,9}{100}\right) \cdot \frac{110}{6,6}} = 6,33 \text{ kV}$$

$$U_{3(\min)} = \frac{U'_{3(\min)}}{\left(1 + \frac{\alpha_{1(\min)}}{100}\right) \cdot k_{13n}} = \frac{102,5}{\left(1 + \frac{1,78}{100}\right) \cdot \frac{110}{6,6}} = 6,02 \text{ kV}$$

Уште треба да ја одредиме положбата на регулационата преклопка од SN намотка така што ќе постигнеме напонот на секундарот собирници да варира во интервалот  $36 \text{ kV} \leq U_2 \leq 37 \text{ kV}$ . Бидејќи преклопката е со регулација во безнапонска состојба позицијата ќе остане иста и за режимот на максимално и за режимот на минимално оптоварување.

## Пример 3

Ќе пробаме со  $\alpha_2 = 0$

$$k_{12(\max)} = \frac{1 + \alpha_{1(\max)}/100}{1 + \alpha_2/100} \cdot k_{12n} = \frac{1 - 8,9/100}{1} \cdot \frac{110}{38,5} = 2,61$$

$$k_{12(\min)} = \frac{1 + \alpha_{1(\min)}/100}{1 + \alpha_2/100} \cdot k_{12n} = \frac{1 + 1,78/100}{1} \cdot \frac{110}{38,5} = 2,91$$

$$U_{2(\max)} = \frac{U'_{2(\max)}}{k_{12(\max)}} = \frac{93,3}{2,61} = 35,7 \text{ kV}$$

$$U_{2(\min)} = \frac{U'_{2(\min)}}{k_{12(\min)}} = \frac{103,6}{2,91} = 35,8 \text{ kV}$$

$$U_{2(sr)} = \frac{U_{2(\max)} + U_{2(\min)}}{2} = \frac{35,7 + 35,8}{2} = 35,75 \text{ kV}$$



## Пример 3

Вредноста  $U_{2(sr)} = 35,75 \text{ kV}$ , добиена со  $\alpha_2 = 0$ , е помала од бараната средна вредност

$$U_{2o(sr)} = \frac{37 + 36}{2} = 36,5 \text{ kV}$$

за  $0,75 \text{ kV}$  односно за  $2,05\%$  затоа бираме најблиска вредност  $\alpha_2 = +2,5\%$ .

$$k_{12(\max)} = \frac{1 + \alpha_{1(\max)}/100}{1 + \alpha_2/100} \cdot k_{12n} = \frac{1 - 8,9/100}{1 + 2,5/100} \cdot \frac{110}{38,5} = 2,54$$

$$k_{12(\min)} = \frac{1 + \alpha_{1(\min)}/100}{1 + \alpha_2/100} \cdot k_{12n} = \frac{1 + 1,78/100}{1 + 2,5/100} \cdot \frac{110}{38,5} = 2,84$$

$$U_{2(\max)} = \frac{U'_{2(\max)}}{k_{12(\max)}} = \frac{93,3}{2,54} = 36,73 \text{ kV}$$

$$U_{2(\min)} = \frac{U'_{2(\min)}}{k_{12(\min)}} = \frac{103,6}{2,84} = 36,48 \text{ kV}$$

$$U_{2(sr)} = \frac{U_{2(\max)} + U_{2(\min)}}{2} = \frac{36,73 + 36,48}{2} = 36,6 \text{ kV}$$

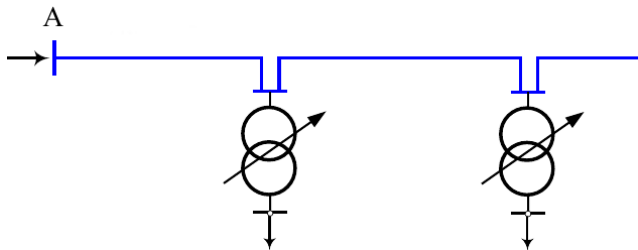
## Пример 3

На крајот ќе напоменеме дека во пресметките е претпоставено дека режимите на максимално и минимално оптоварување временски се совпаѓаат и за двете мрежи, 6 kV и 35 kV, што не мора секогаш да биде така. Дијаграмите на оптоварување на едната и другата мрежа понекогаш можат да бидат временски „изместени“, а тоа во голема мерка зависи од карактерот на приклучените потрошувачи во секоја од нив.

Регулационите трансформатори претставуваат основно средство за регулација на напонот во ЕЕС. Многу често тие претставуваат и единствено економски оправдано средство за регулација на напоните не само во регионалните туку и во месните мрежи.

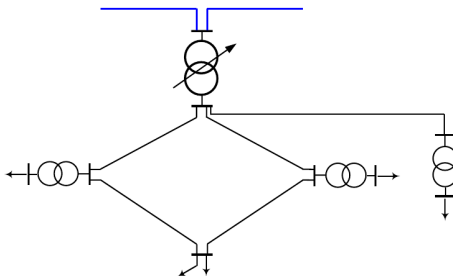
# Регулација на напонот во дистрибутивни мрежи

- 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.



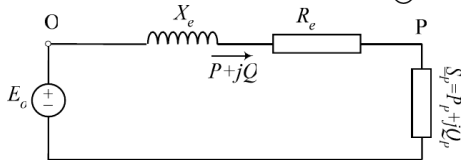
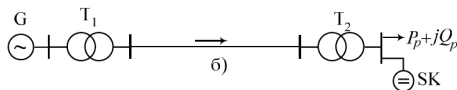
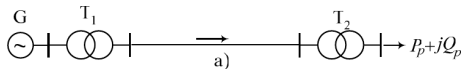
# Централна регулација на напонот

- 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

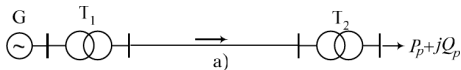
- Со инјектирање на реактивна моќност во одделните јазли од системот
- Со прераспределба на реактивните моќности на изворите на енергија



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

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

## 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  $110 \text{ kV}$  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

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

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

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

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

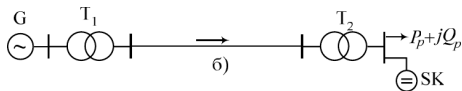
$$0,95 \quad 4760/360 = 13,2$$

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

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

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  $U'_p$

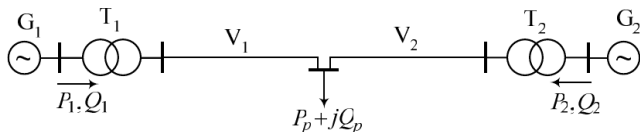
$$U'_p = U_p + \frac{Q_{SK} \cdot X_e}{U_n}$$

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.**

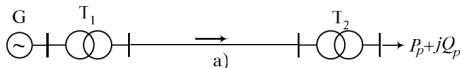
# Два генератори



- Регулација на напоните во ЕЕС може да се оствари и со прераспределба на произведуваните реактивни моќности меѓу изворите во системот.
- Секој потрошувач може да прима реактивна моќност во помала или поголема мерка од еден или друг генератор со што тековите на моќности во водовите се менуваат, а со тоа и загубите на напон.



# $U - Q$ карактеристика



$$U_p \approx U_G - \frac{P_p \cdot R_e + Q_p \cdot X_e}{U_n} \approx U_G - \frac{Q_p \cdot X_e}{U_n}$$

Во реалните ЕЕС  $U - Q$  карактеристиките не се линеарни функции. Напонот во некој јазел од системот зависи и од активната и од реактивната моќност во тој јазел, т.е.  $U = \Phi(P, Q)$ .

Ако во некој јазел активната моќност се измени за износ  $dP$ , а реактивната моќност се измени за износ  $dQ$ , тогаш напонот  $U$  во истиот тој јазел ќе се измени за некоја вредност

$$dU = \frac{\partial U}{\partial P} dP + \frac{\partial U}{\partial Q} dQ$$
$$\frac{dU}{\partial U} = \frac{dP}{\partial U} + \frac{dQ}{\partial U}$$

## $U - Q$ карактеристика

За вод со параметри  $R$  и  $X$ , оптоварен на крајот со моќност  $\underline{S} = P + jQ$  и со познат напон на почетокот  $U_1$  имаме (приближно)

$$U = U_1 - \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U}$$

$$P \cdot R + Q \cdot X = U \cdot (U_1 - U)$$

$$\frac{\partial}{\partial P}(P \cdot R + Q \cdot X) = \frac{\partial}{\partial P}[U \cdot (U_1 - U)]$$

$$R = \frac{\partial U}{\partial P} \cdot (U_1 - U) + U \cdot \left(0 - \frac{\partial U}{\partial P}\right) = \frac{\partial U}{\partial P} \cdot (U_1 - 2U)$$

$$\frac{\partial U}{\partial P} = \frac{R}{U_1 - 2U}$$

$$\boxed{\frac{\partial P}{\partial U} = \frac{U_1 - 2U}{R}} \quad \frac{\partial P}{\partial U} < 0$$

$$\boxed{\frac{\partial Q}{\partial U} = \frac{U_1 - 2U}{X}} = -K_U \quad \frac{\partial Q}{\partial U} < 0$$

# Коефициент $K_U$

- Коефициентот  $K_U = -\partial Q/\partial U$  во ЕЕС има многу поголемо значење отколку големината  $\partial P/\partial U$ .
- $K_U$  можеме да го добиеме со пресметки или со мерење во самата мрежа со инјектирање на реактивна моќност  $\Delta Q$  и мерење на промената на напонот  $\Delta U$ .

$$K_U = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$$

- $K_U$  зависи од реактанцијата на водот, а во сложен систем од еквивалентната (влезната) реактанција на посматраниот јазел. За јазел со мала реактанција коефициентот е голем и обратно.
- Во јазел со мала реактанција напонот е помалку зависен од оптоварувањето и обратно. Во таков јазел напонот помалку паѓа, но и потешко се регулира.

# Коефициент $K_U$ и струја на трифазна куса врска

Случај на празен од на системот во кој напоните на сите јазли се  $U = U_n$

$$I_{K3} = \frac{U_n}{\sqrt{3}X_e} \quad S_{K3} = \sqrt{3}U_n I_{K3} = \frac{U_n^2}{X_e}$$

$$K_U = \frac{2U - U_1}{X_e} = \frac{2U_n - U_n}{X_e} = \frac{U_n}{X_e}$$

$$K_U = \frac{S_{K3}}{U_n} = \sqrt{3}I_{K3}$$

Ако струјата на трифазна куса врска во некој јазел од мрежата изнесува  $I_{K3} = 5 \text{ kA}$ , тогаш ќе имаме  $K_U = \sqrt{3} \cdot 5 = 8,66 \text{ Mvar/kV}$ .

Тоа би значело дека доколку реактивното оптоварување во јазелот се зголеми за  $8,66 \text{ Mvar}$ , тогаш напонот во јазелот ќе падне за  $1 \text{ kV}$  и обратно.

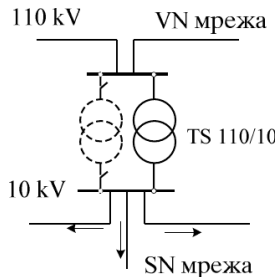
Ако сакаме напонот во јазелот да го покачимо за  $5 \text{ kV}$ , ќе биде потребно во него да инјектираме реактивна моќност  $Q = 5 \cdot 8,66 = 43,3 \text{ Mvar}$ .

## Пример 5

Во една ТС 110/10 kV/kV се инсталирани два идентични, паралелно врзани, трансформатора, од коишто едниот служи како резерва и е нормално исклучен од погонот. Во посматраниот режим, значи, работи само еден трансформатор и притоа тој е оптоварен со моќност  $\underline{S}_2 = (52 + j18) \text{ MVA}$  при напон  $U_2 = 10,2 \text{ kV}$ . Позната е моќноста на трифазна куса врска за собирниците 1:  $S_{k3} = 2500 \text{ MVA}$ .

- Да се пресметаат коефициентите  $k_{U1}$  и  $k_{U2}$  за високонапонската (примарната) собирница 1 и среднонапонската (секундарната) собирница 2 и да се определат  $U-Q$  карактеристиките за обете собирници.
- Да се процени колкави ќе бидат новите вредности на напоните  $U_1$  и  $U_2$  ако дојде до испад на еден од изводите што се напојуваат од собирниците 2 со што сумарната моќност на оптоварување на трансформаторот се намали на вредноста  $\underline{S}_2 = (32 + j10) \text{ MVA}$ .
- Колкави ќе бидат коефициентите  $k_{U1}$  и  $k_{U2}$  ако се вклучи и вториот трансформатор.

## Пример 5



Податоци за трансформаторот

$$U_{1n}/U_{2n} = 110/10,5 \text{ kV/kV}$$

$$S_n = 63 \text{ MVA}$$

$$u_k = 12\%$$

$$i_0 = 0,2\%$$

$$\Delta P_{Cun} = 750 \text{ kW}$$

$$\Delta P_{Fe} = 165 \text{ kW}$$

$$k_n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{110}{10,5} = 10,4762$$

$$R_T = \Delta P_{Cun} \frac{U_n^2}{S_n^2} = 0,75 \cdot \frac{110^2}{63} = 2,2865 \Omega$$

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{12}{100} \cdot \frac{110^2}{63} = 23,0476 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 22,934 \Omega \quad X_T/R_T = 10,03$$

## Пример 5а

$$U'_2 = k_n U_2 = 106,857 \text{ kV}$$

$$U_1 = U_2 + \frac{P_2 R_T + Q_2 X_T}{U_2} + j \frac{P_2 X_T - Q_2 R_T}{U_2} = 111,892 \cdot e^{j1,867^\circ} \text{ kV}$$

$$\Delta P_{Fe} = 0,165 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_{Fe} = \frac{i_0}{100} \cdot S_n = 0,1575 \text{ Mvar}$$

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2'^2} \cdot R_T = 0,771 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{Fe} + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2'^2} \cdot X_T = 6,239 \text{ Mvar}$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + P_T + jQ_T = 52 + j18 + 0,771 + j6,239 = (52,771 + j24,239) \text{ MVA}$$

$$X_{EES} = \frac{U_n^2}{S_{k3}} = \frac{110^2}{2500} = 4,84 \Omega \quad X''_{EES} = \frac{4,84}{10,4762} = 0,462 \Omega$$

$$X'_{2ek} = X_{EES} + X_T = 4,84 + 22,934 = 27,774 \Omega \quad X_{2ek} = X'_{2ek}/k_n^2 = 0,2531 \Omega$$

## Пример 5а

$$k_{U1} = \frac{U_{1n}}{X_{EES}} = \frac{110}{4,84} = 22,727 \text{ kA}$$

$$k_{U2} = \frac{U_{2n}}{X_{2ek}} = \frac{10,5}{0,2531} = 41,4915 \text{ kA}$$

$U - Q$  карактеристика за јазелот 1

$$U - U_1 = -1/k_{U1} \cdot (Q - Q_1)$$

$$U - 111,892 = -1/22,727 \cdot (Q - 24,239)$$

$$U = -0,044Q + 112,959$$

$U - Q$  карактеристика за јазелот 2

$$U - U_2 = -1/k_{U2} \cdot (Q - Q_2)$$

$$U - 10,2 = -1/41,4915 \cdot (Q - 18)$$

$$U = -0,0241Q + 10,634$$



## Пример 56

Моќноста на потрошувачот е намалена за 20 MW и 8 Mvar

$Q_1$  приближно ќе се намали исто за 8 Mvar и ќе биде

$Q_1 = 24,239 - 8 = 12,239$  Mvar (точната вредност е  $Q_1 = 12,415$  Mvar).

Намалувањето на реактивното оптоварување на потрошувачот може да се третира како позитивна инјекција на реактивна моќност од 8 Mvar

$$\Delta U_1 = \frac{\Delta Q_1}{k_{U1}} = \frac{8}{22,727} = 0,352 \text{ kV}$$

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta Q_2}{k_{U2}} = \frac{8}{41,4915} = 0,193 \text{ kV}$$

$$U_1 = 111,892 + 0,352 = 112,244 \text{ kV}$$

$$U_2 = 10,2 + 0,193 = 10,393 \text{ kV}$$

## Пример 5в

$$X_{EES} = \frac{U_n^2}{S_{k3}} = \frac{110^2}{2500} = 4,84 \Omega \quad X''_{EES} = \frac{4,84}{10,4762} = 0,0441 \Omega$$

$$X'_{2ek} = X_{EES} + X_T/2 = 4,84 + 11,467 = 16,307 \Omega$$

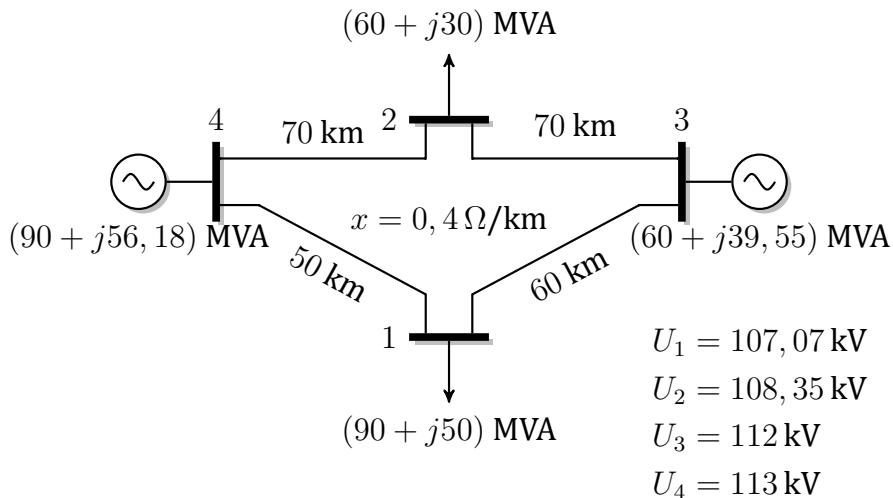
$$X_{2ek} = \frac{X'_{2ek}}{k_n^2} = \frac{16,307}{10,4762^2} = 0,1486 \Omega$$

$$k_{U1} = \frac{U_{1n}}{X_{EES}} = \frac{110}{4,84} = 22,727 \text{ kA} \quad (\text{без промени})$$

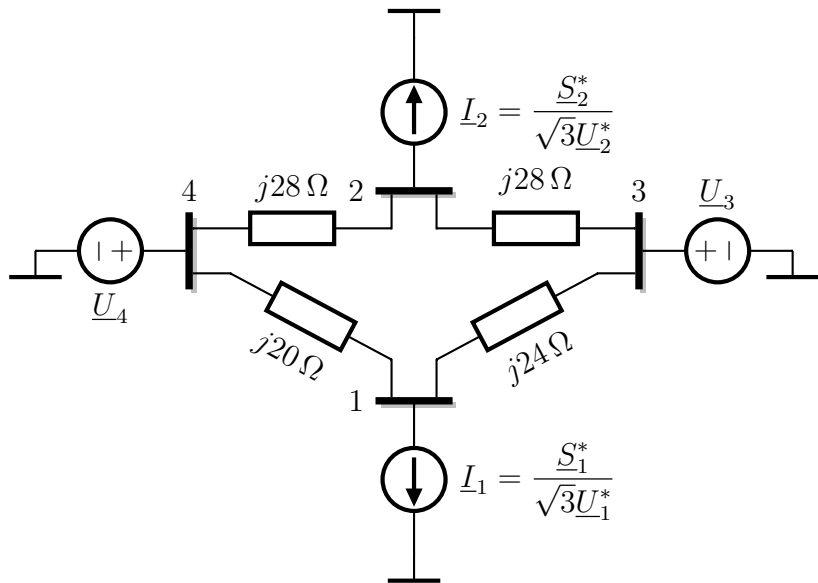
$$k_{U2} = \frac{U_{2n}}{X_{2ek}} = \frac{10,5}{0,1486} = 70,668 \text{ kA}$$

Бидејќи со вклучувањето на вториот трансформатор во погонот вредноста на  $k_{U2}$  се зголеми, варијациите на напонот кај собирниците 2 поради промените на товарот сега ќе бидат помали.

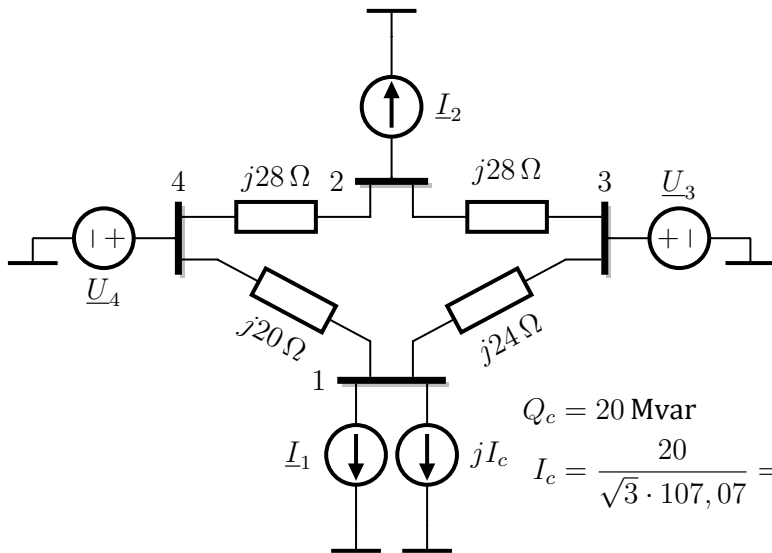
## Пример 6 – подготовка за матрица $\underline{Z}$



## Пример 6 – подготовка за матрица $\underline{Z}$



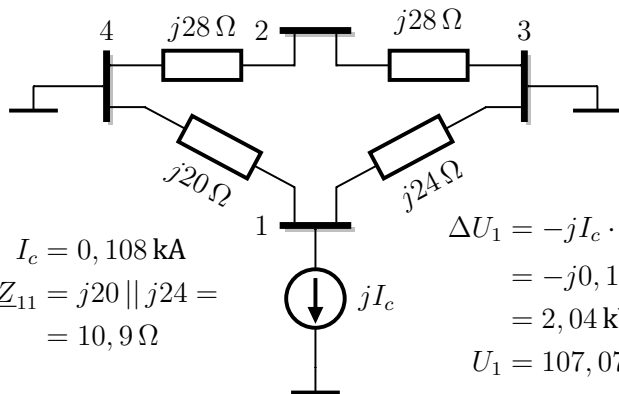
## Пример 6 – подготовка за матрица $\underline{Z}$



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

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

## Пример 6 – подготовка за матрица $\underline{Z}$



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

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

$$= 10,9\ \Omega$$

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

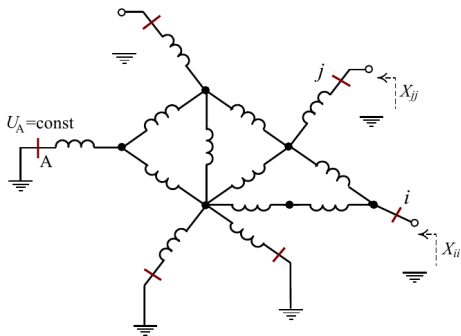
$$= -j0,108 \cdot j10,9 \cdot \sqrt{3}$$

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

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

# 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 $Z$

- 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  $\Delta Q_i$  тогаш напонот во јазелот  $j$  ќе порасне за вредноста

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

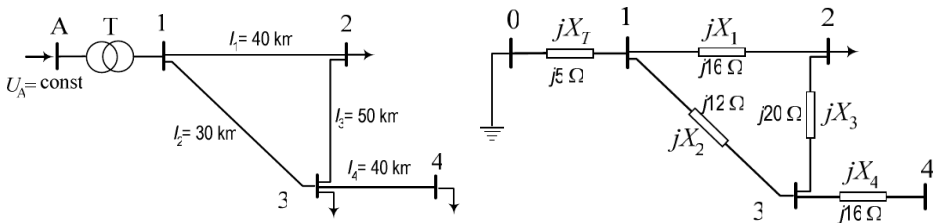
- Ако во секој од јазлите вршине инјектирање на реактивна моќност, според принципот на суперпозиција, измената на напонот во произволен јазел  $i$  ќе биде

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



# 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
```

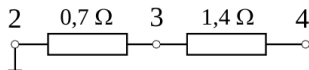
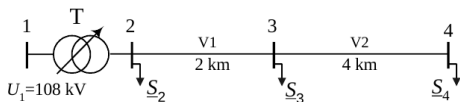
```
Y =  
(1,1)  0.3458  
(2,1) -0.0625  
(3,1) -0.0833  
(1,2) -0.0625  
(2,2)  0.1125  
(3,2) -0.0500  
(1,3) -0.0833  
(2,3) -0.0500  
(3,3)  0.1958  
(4,3) -0.0625  
(3,4) -0.0625  
(4,4)  0.0625
```

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

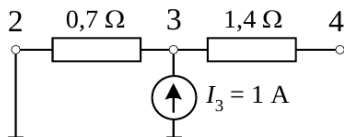
```
Z24 =  
 5.0000  5.0000  
15.6667  9.0000  
 9.0000 14.0000  
 9.0000 30.0000
```

# 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  $x = 0,35 \Omega/\text{km}$ .

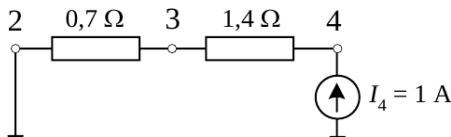


Начин 1:



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

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

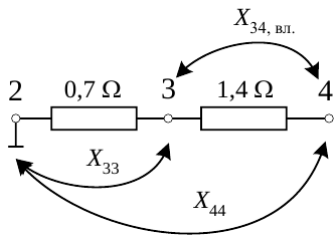


$$X_{44} = \frac{U_4}{I_4} = \frac{2,7}{1} = 2,1 \Omega$$

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

# 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:

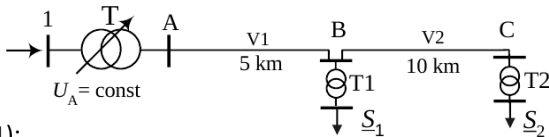
$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \frac{1}{0,7} + \frac{1}{1,4} & -\frac{1}{1,4} \\ -\frac{1}{1,4} & \frac{1}{1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,143 & -0,714 \\ -0,714 & 0,714 \end{bmatrix} \mathbf{S}$$

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

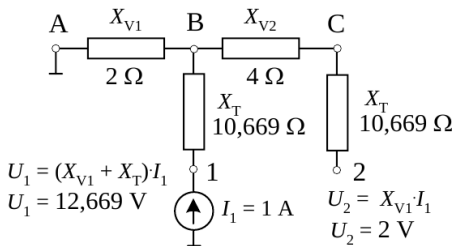
$$\mathbf{Z} = \mathbf{Y}^{-1} = \frac{1}{1,02} \cdot \begin{bmatrix} 0,714 & 0,714 \\ 0,714 & 2,143 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,7 & 0,7 \\ 0,7 & 2,1 \end{bmatrix} \mathbf{\Omega}$$

# 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):

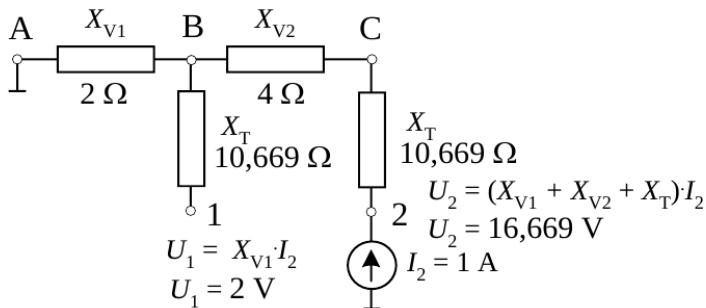


$$X_{11} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{12,669}{1} = 12,669 \Omega \text{ и } X_{21} = \frac{U_2}{I_1} = \frac{2}{1} = 2 \Omega.$$



# Пример 10

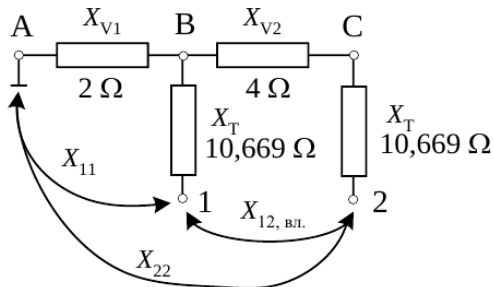
Начин 1 (јазел 2):



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

# Пример 10

Начин 2:



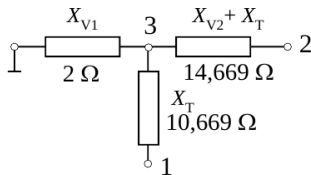
$$X_{11} = 2 + 10,669 = 12,669 \Omega; \quad X_{22} = 2 + 4 + 10,669 = 16,669 \Omega$$

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

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

# 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
```

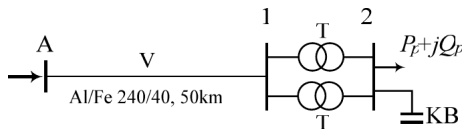
## Пример 11

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. Коefициентот 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  $\Delta Q$ , со што ќе се добие покачување на напонот за  $\Delta U = 10,5 - 9,39 = 1,11 \text{ kV}$ .

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

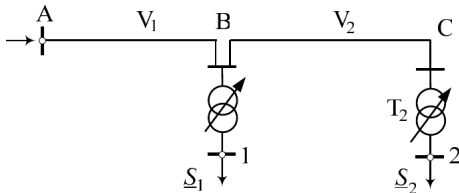
$$\Delta Q = \frac{\Delta U \cdot U_{2o(\max)}}{X''_e} = \frac{1,11 \cdot 10,5}{0,2923} = 39,9 \text{ Mvar}$$

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

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

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

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

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

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

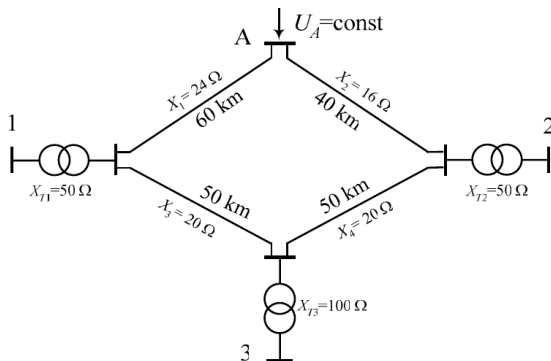
$$\alpha_{2o} = \left( \frac{k_{T2o}}{k_{T2n}} - 1 \right) \cdot 100 = -3,66\% \Rightarrow \alpha_2 = -2,5\%$$

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

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

# 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

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

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

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

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

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

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

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

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

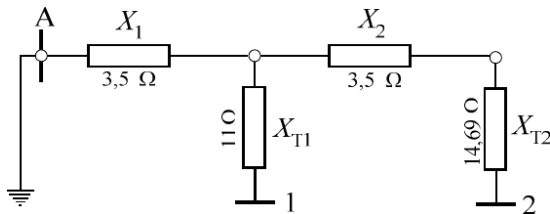
$$X_{23} = X_{32} = \frac{X_{22} + X_{33} - X_{23, \text{вл.}}}{2} = 8,8 \Omega$$

## 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  $\Delta Q_1$  и  $\Delta Q_2$  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

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

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

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

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

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

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