

# Високонапонски мрежи и системи

## Регулација на напони и реактивни моќности во ЕЕС

М. Тодоровски

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
[mirko@feit.ukim.edu.mk](mailto:mirko@feit.ukim.edu.mk), [pees.feit.ukim.edu.mk](mailto:pees.feit.ukim.edu.mk)



# Општо

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

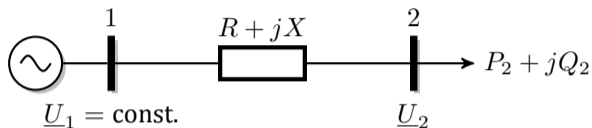
- $U > U_n$ 
  - забрзано стареење на сите елементи од мрежата
  - зголемени загуби во трансформаторите
  - засилена корона и зголемени загуби кај надземните водови
  - зголемени диелектрични загуби и загревање кај каблите, предвремено стареење, можност за топлински пробив
- $U < U_n$ 
  - зголемување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

## Елементарна врска меѓу $Q$ и $U$

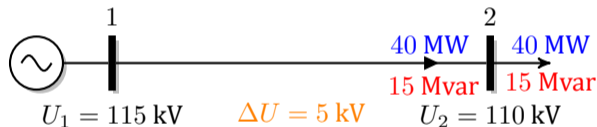


$$\Delta U = |\underline{U}_1| - |\underline{U}_2| \approx \Delta U_d = \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2}$$

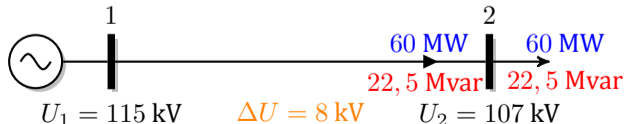
- За елементите во високонапонските мрежи важи  $X/R \gg 1$ , т.е.  $Q_2 \cdot X \gg P_2 \cdot R$
- **Главна причина за варијацијата на напонот во високонапонските мрежи се реактивните моќности.**
- За регулација на напоните дополнителни реактивни моќности се добиваат од кондензаторска батерија, синхрон компензатор или реактор.

## Елементарен пример

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

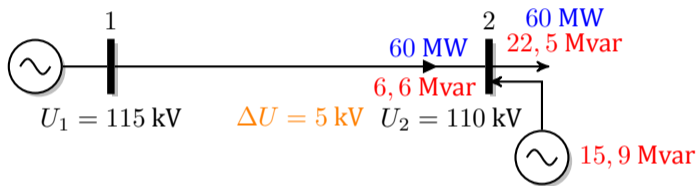


Доколку моќноста на потрошувачот се зголеми за 50% напонот на крајот од водот ќе падне на вредноста  $U_2 = 107,034 \text{ kV}$ .

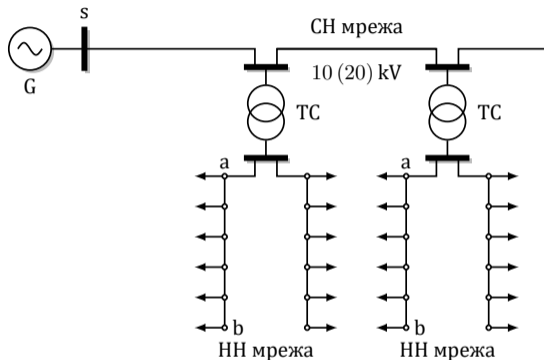


## Елементарен пример

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  $15,9 \text{ Mvar}$ .

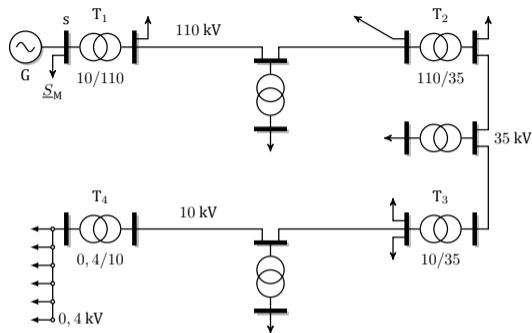


## Регулација на напонот со измена на напоните кај изворите



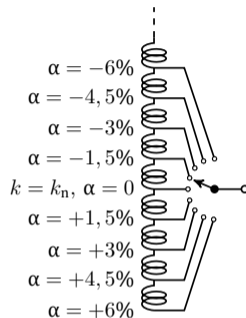
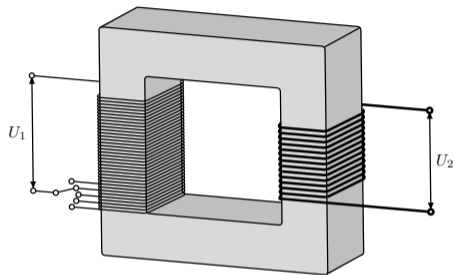
- Во помалите мрежи (микро мрежи) кои се напојуваат од само една електрична централа регулацијата на напонот најчесто се врши со измена на напонот кај самите синхрони генератори.
- Потрошувачите во точките блиску до централата секогаш работат со повисок напон во однос на останатите потрошувачи.

## 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



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

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

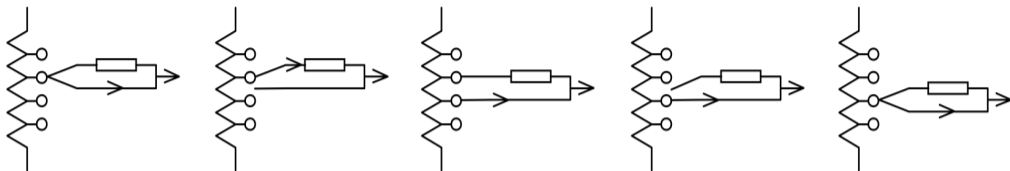
$$\alpha \in \{0; \pm 2,5\%; \pm 5\%\}$$

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

# 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

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

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

3. Пресметка на средна вредност на напонот на секундарот

$$U'_{2, \text{cp.}} = \frac{U'_{2(\min)} + U'_{2(\max)}}{2}$$

4. Пресметка на потребниот коефициент на трансформација

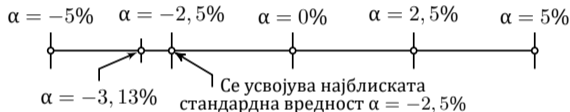
$$k_0 = \frac{U'_{2, \text{cp.}}}{U_{20}}$$

# Регулација во безнапонска состојба

5. Пресметка на најповолна позиција на преклопката

$$\alpha_0 = \left( \frac{k_0}{k} - 1 \right) \cdot 100$$

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 3.1

Потребно е да се избере регулациониот отцеп на СН намотка од трансформаторот за снижување на напонот 35/0,4 kV со моќност 630 kVA така што средната вредност на напонот на НН собирници да биде  $U_{20} = 0,39$  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 СН 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 СН собирници изнесува  $U_{1(\min)} = 35,2$  kV.

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

---

## Пример 3.1

Вредности на сведената вредност на напонот на НН собирници во режим на максималното и минималното оптоварување

$$\begin{aligned}U'_{2(\max)} &= U_{1(\max)} - \frac{P_{\max} \cdot R_T + Q_{\max} \cdot X_T}{U_n} = \\ &= 33,3 - \frac{0,52 \cdot 23,5 + 0,39 \cdot 123,5}{35} = 31,6 \text{ kV},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U'_{2(\min)} &= U_{1(\min)} - \frac{P_{\min} \cdot R_T + Q_{\min} \cdot X_T}{U_n} = \\ &= 35,2 - \frac{0,22 \cdot 23,5 + 0,18 \cdot 123,5}{35} = 34,4 \text{ kV}.\end{aligned}$$

Средна вредност на напонот на секундарната страна сведен на примарната

$$U'_{2, \text{cp.}} = \frac{U'_{2(\min)} + U'_{2(\max)}}{2} = 33,0 \text{ kV}.$$

## Пример 3.1

Потребен коефициент на трансформација

$$k_0 = \frac{U'_{2, \text{cp.}}}{U_{20}} = \frac{33}{0,39} = 84,7,$$

Номинален коефициент на трансформација

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

Потребна вредност на регулациониот отцеп

$$\alpha_0 = \left( \frac{k_0}{k_n} - 1 \right) \cdot 100 = \left( \frac{84,7}{87,5} - 1 \right) \cdot 100 = -3\%.$$

Најблиску до бараната вредност за  $\alpha_0 = -3\%$  е отцепот што одговара на позицијата  $\alpha = -2,5\%$ . Усвоен коефициентот на трансформација

$$k = k_n \cdot \left( 1 + \frac{\alpha}{100} \right) = \frac{35}{0,4} \cdot \left( 1 - \frac{2,5}{100} \right) = 0,975 \cdot k_n = 85,3125.$$

## Пример 3.1

Вистинските вредности на напонот кај НН собирници

- во режим на максимално оптоварување

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

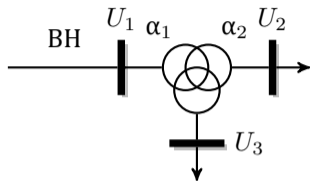
- во режим на минимално оптоварување

$$U_{2(\min)} = \frac{U'_{2(\min)}}{k} = \frac{34,4}{85,3125} = 0,403 \text{ kV}$$

- средна вредност

$$U_{2, \text{cp.}} = \frac{U'_{2, \text{cp.}}}{k} = \frac{33,0}{85,3125} = 0,387 \text{ kV.}$$

# Регулација кај тринамотни трансформатори



Кај тринамотните трансформатори, преклопка за промена на бројот на навивки постои и кај примарната намотка и кај секундарната намотка.

1. Слично како и кај двонамотните трансформатори, се пресметуваат вредностите  $U'_{3(\min)}$  и  $U'_{3(\max)}$  (сведени кон примар) и се пресметува средна вредност

$$U_{3, \text{cp.}} = \frac{U'_{3(\min)} + U'_{3(\max)}}{2}.$$

2. Го определуваме коефициентот на трансформација  $k_{13,0}$  меѓу примарната и терциерната намотка

$$k_{13,0} = \frac{U'_{3, \text{cp.}}}{U_{30}}.$$

## Регулација кај тринамотни трансформатори

3. Се определува положбата на преклопката на примарната намотка која одговара на преносниот однос  $k_{13,0}$

$$\alpha_{10} = \left( \frac{k_{13,0}}{k_{13n}} - 1 \right) \cdot 100.$$

4. Се одбира регулационен отцеп  $\alpha_1$  кој е најблиску до вредноста  $\alpha_{10}$ . На вака избраниот отцеп му одговара преносен однос примар/терциер

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

5. Слично како и кај двонамотните трансформатори, се пресметуваат вредностите  $U'_{2(\min)}$  и  $U'_{2(\max)}$  (сведени кон примар) и се пресметува средна вредност

$$U'_{2, \text{cp.}} = \frac{U'_{2(\min)} + U'_{2(\max)}}{2},$$

од каде се добива потребниот коефициент на трансформација примар/секундар

$$k_{12,0} = \frac{U'_{2, \text{cp.}}}{U_{20}}.$$

## Регулација кај тринамотни трансформатори

6. Бидејќи и примарната и секундарната намотка имаат регулациони отцепи, а преклопката на примарната намотка е веќе поставена на положба  $\alpha_1$ , ќе имаме:

$$k_{12,0} = \frac{1 + \alpha_1/100}{1 + \alpha_{20}/100} \cdot k_{12n},$$
$$\alpha_{20} = \left[ \frac{k_{12n}}{k_{12,0}} \cdot \left( 1 + \frac{\alpha_1}{100} - 1 \right) \right] \cdot 100,$$

а потоа го избираме најблискиот стандарден отцеп  $\alpha_2$ , на којшто му одговара коефициент на трансформација примар/секундар

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

7. Се пресметуваат вистинските вредности на напоните

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

## Пример 3.2

Во една 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 примарната страна:

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

Примарната намотката има регулациона преклопка за РПТ со 18 регулациони отцепи ( $\pm 9 \times 1, 78\%$ ). Секундарната намотка има преклопка за РБС 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

- во режим на максимално оптоварување

$$U_{20(\max)} = 37 \text{ kV}, \quad U_{30(\max)} = 6,3 \text{ kV},$$

- во режим на минимално оптоварување

$$U_{20(\min)} = 36 \text{ kV}, \quad U_{30(\min)} = 6 \text{ kV}.$$

## Пример 3.2

Пресметка на коефициентите на трансформација и избор на соодветните отцепи

$$k_{13,0(\max)} = \frac{U'_{3(\max)}}{U_{30(\max)}} = \frac{96,4}{6,3} = 15,30,$$

$$k_{13,0(\min)} = \frac{U'_{3(\min)}}{U_{30(\min)}} = \frac{102,5}{6,0} = 17,08.$$

$$\alpha_{10(\max)} = \left[ \frac{k_{13,0(\max)}}{k_{13n}} - 1 \right] \cdot 100 = \left( \frac{15,30}{110/6,6} - 1 \right) \cdot 100 = -8,2\%$$

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

$$\alpha_{10(\min)} = \left[ \frac{k_{13,0(\min)}}{k_{13n}} - 1 \right] \cdot 100 = \left( \frac{102,5/6}{110/6,6} - 1 \right) \cdot 100 = +2,4\%,$$

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

## Пример 3.2

Вистински вредности на напонот на терциерот

$$U_{3(\max)} = \frac{U'_{3(\max)}}{\left(1 + \frac{\alpha_{1(\max)}}{100}\right) \cdot k_{13n}} = \frac{96,4}{\left(1 + \frac{-8,9}{100}\right) \cdot \frac{110}{6,6}} = 6,35 \text{ kV},$$

$$U_{3(\min)} = \frac{U'_{3(\min)}}{\left(1 + \frac{\alpha_{1(\min)}}{100}\right) \cdot k_{13n}} = \frac{102,5}{\left(1 + \frac{1,78}{100}\right) \cdot \frac{110}{6,6}} = 6,04 \text{ kV}.$$

За вака усвоените вредности на  $\alpha_{1(\max)}$  и  $\alpha_{1(\min)}$  отстапувањата на напонот  $U_3$  од бараните вредности се мали (под 0,5%).

## Пример 3.2

Одредување на положбата на регулационата преклопка од секундарната намотка  $\alpha_2$  (иста вредност и за режимот на максимално и за режимот на минимално оптоварување).

Пробуваме со ( $\alpha_2 = 0$ )

$$k_{12(\max)} = \frac{1 + \alpha_{1(\max)}/100}{1 + \alpha_{2(\max)}/100} \cdot k_{12n} = \frac{1 - 8,9/100}{1} \cdot \frac{110}{38,5} = 2,60;$$

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

$$U_{2(\max)} = \frac{U'_{2(\max)}}{k_{12(\max)}} = \frac{93,3}{2,60} = 35,88 \text{ kV},$$

$$U_{2(\min)} = \frac{U'_{2(\min)}}{k_{12(\min)}} = \frac{103,6}{2,91} = 35,69 \text{ kV},$$

$$U_{2, \text{cp.}} = \frac{35,88 + 35,69}{2} = 35,74 \text{ kV}.$$

## Пример 3.2

Вредноста  $U_{2, \text{cp.}} = 35,74 \text{ kV}$  за  $\alpha_2 = 0$  е помала од бараната средна вредност

$$U_{20, \text{cp.}} = \frac{37 + 36}{2} = 36,5 \text{ kV},$$

за  $0,76 \text{ kV}$ , односно за  $2,08\%$ .

Го зголемуваме бројот на навивките на секундарната намотка за  $\alpha_2 = 2,5\%$

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

$$U_{2(\text{max})} = \frac{93,3}{2,54} = 36,73 \text{ kV},$$

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

$$U_{2(\text{min})} = \frac{103,6}{2,84} = 36,48 \text{ kV},$$

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

## Пресметка на напони во ЕЕС

- Решавањето на една електроенергетска мрежа се состои во пресметувањето на напоните на сите јазли како и распределбата на моќности во сите елементи на мрежата.
- Наместо стандардните нумерички методи, пресметката ќе ја правиме со вградената функција `fsolve` (MATLAB/GNU Octave).
- Примена на методот на независни напони преку матричната равенка

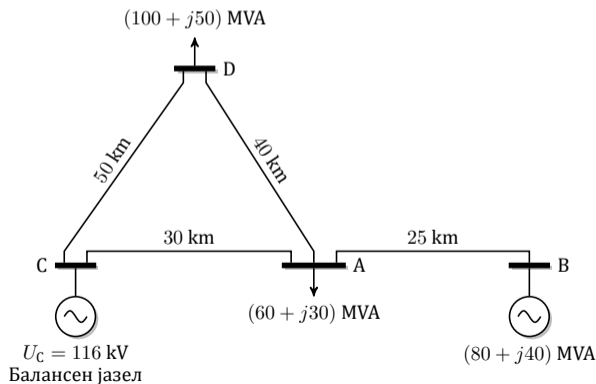
$$\underline{\mathbf{Y}} \cdot \underline{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{I}},$$

која дава врска помеѓу векторот на напоните на јазлите  $\underline{\mathbf{U}}$  и векторот на инјектираните струи  $\underline{\mathbf{I}}$ .

- Редот на системот равенки е еднаков на бројот на јазли во мрежата  $N$ .
- Матрица на адмитанции  $\underline{\mathbf{Y}}$ : квадратна, од ред  $N$  која се формира со директна инспекција на мрежата.
  - Членот  $Y_{kk}$  е еднаков на сумата на адмитанциите на сите елементи на кои им припаѓа јазелот  $k$ ,
  - Членот  $Y_{kl}$  е еднаков на сумата на адмитанциите на сите елементи што директно ги поврзуваат јазлите  $k$  и  $l$ , земена со променет знак.

## Пример 3.3

На сликата е прикажан едноставен ЕЕС. Номиналниот напон на водовите е 110 kV и сите водови се изведени со следните надолжни параметри:  $r = 0,13 \Omega/\text{km}$ ;  $x = 0,4 \Omega/\text{km}$  и  $b = 2,75 \mu\text{S}/\text{km}$ . Должините на водовите се дадени на самата слика, каде што исто така се прикажани моќностите на потрошувачите во јазлите коишто не зависат од нивните напони. Напонот на напојниот јазел С изнесува 116 kV. Да се пресметаат напоните на останатите јазли на мрежата и вкупните загуби на моќност во мрежата.

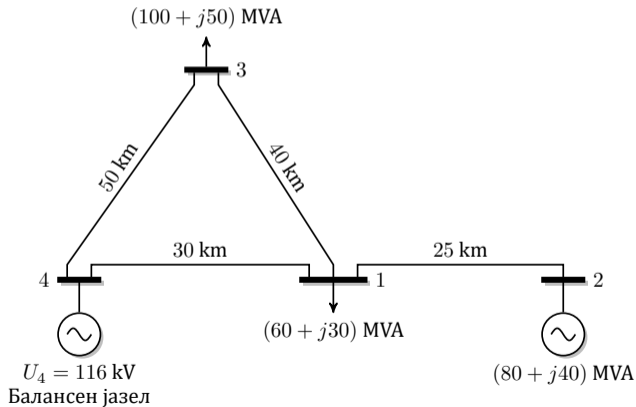


## Пример 3.3

Усвојуваме  $S_B = 100 \text{ MVA}$  и  $U_B = 110 \text{ kV}$  со што добиваме:

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{110^2}{100} = 121 \Omega.$$

Индексирање на јазлите



## Пример 3.3

Редни импеданции од π-заменските шеми

$$\underline{Z}_{4-1} = \frac{(r + jx) \cdot l_{4-1}}{Z_B} = \frac{(0,13 + j0,4) \cdot 30}{121} = (0,0322 + j0,0992) \text{ pu};$$

$$\underline{Z}_{4-3} = \frac{(r + jx) \cdot l_{4-3}}{Z_B} = \frac{(0,13 + j0,4) \cdot 50}{121} = (0,0537 + j0,1653) \text{ pu};$$

$$\underline{Z}_{1-3} = \frac{(r + jx) \cdot l_{1-3}}{Z_B} = \frac{(0,13 + j0,4) \cdot 40}{121} = (0,0430 + j0,1322) \text{ pu};$$

$$\underline{Z}_{2-1} = \frac{(r + jx) \cdot l_{2-1}}{Z_B} = \frac{(0,13 + j0,4) \cdot 25}{121} = (0,0269 + j0,0826) \text{ pu}.$$

## Пример 3.3

Вкупни напречни капацитивни спроводности од  $\pi$ -заменските шеми

$$B'_{4-1} = b \cdot l_{4-1} \cdot Z_B = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 121 = 0,0100 \text{ pu};$$

$$B'_{4-3} = b \cdot l_{4-3} \cdot Z_B = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 121 = 0,0166 \text{ pu};$$

$$B'_{1-3} = b \cdot l_{1-3} \cdot Z_B = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 121 = 0,0133 \text{ pu};$$

$$B'_{2-1} = b \cdot l_{2-1} \cdot Z_B = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 121 = 0,0083 \text{ pu}.$$

Адмитанциите на гранките

$$\underline{Y}_{4-1} = \frac{1}{\underline{Z}_{4-1}} = \frac{1}{0,0322 + j0,0992} = (2,9602 - j9,1198) \text{ pu};$$

$$\underline{Y}_{4-3} = \frac{1}{\underline{Z}_{4-3}} = \frac{1}{0,0537 + j0,1653} = (1,7777 - j5,4721) \text{ pu};$$

$$\underline{Y}_{1-3} = \frac{1}{\underline{Z}_{1-3}} = \frac{1}{0,0430 + j0,1322} = (2,2250 - j6,8406) \text{ pu};$$

$$\underline{Y}_{2-1} = \frac{1}{\underline{Z}_{2-1}} = \frac{1}{0,0269 + j0,0826} = (3,5646 - j10,9457) \text{ pu}.$$

## Пример 3.3

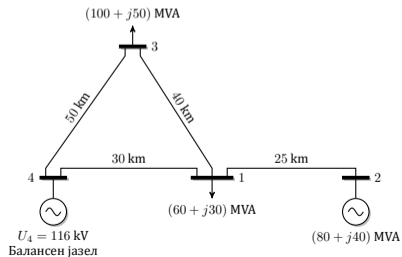
Сума на напречните susceptанции на водовите кај секој од јазлите

$$B_1 = \frac{B'_{4-1} + B'_{1-3} + B_{2-1}'}{2} = \frac{0,0100 + 0,0133 + 0,0083}{2} = 0,0158 \text{ pu};$$

$$B_2 = \frac{B'_{2-1}}{2} = \frac{0,0083}{2} = 0,0042 \text{ pu};$$

$$B_3 = \frac{B'_{4-3} + B'_{1-3}}{2} = \frac{0,0166 + 0,0133}{2} = 0,0149 \text{ pu};$$

$$B_4 = \frac{B'_{4-1} + B'_{4-3}}{2} = \frac{0,0100 + 0,0166}{2} = 0,0133 \text{ pu}.$$



## Пример 3.3

Матрица на адмитанции

$$\underline{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{4-1} + \underline{Y}_{1-3} + \underline{Y}_{2-1} + jB_1 & -\underline{Y}_{2-1} & -\underline{Y}_{1-3} & -\underline{Y}_{4-1} \\ -\underline{Y}_{2-1} & \underline{Y}_{2-1} + jB_2 & 0 & 0 \\ -\underline{Y}_{1-3} & 0 & \underline{Y}_{1-3} + \underline{Y}_{4-3} + jB_3 & -\underline{Y}_{4-3} \\ -\underline{Y}_{4-1} & 0 & -\underline{Y}_{4-3} & \underline{Y}_{4-1} + \underline{Y}_{4-3} + jB_4 \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} 8,750 - j26,890 & -3,565 + j10,946 & -2,225 + j6,841 & -2,960 + j9,120 \\ -3,565 + j10,946 & 3,565 - j10,942 & 0 & 0 \\ -2,225 + j6,841 & 0 & 4,003 - j12,298 & -1,778 + j5,472 \\ -2,960 + j9,120 & 0 & -1,778 + j5,472 & 4,738 - j14,579 \end{bmatrix}$$

## Пример 3.3

Метод на независни напони

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} & \underline{Y}_{14} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & 0 & 0 \\ \underline{Y}_{31} & 0 & \underline{Y}_{33} & \underline{Y}_{34} \\ \underline{Y}_{41} & 0 & \underline{Y}_{43} & \underline{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \end{bmatrix}$$

Бидејќи  $\underline{U}_4 = 116/110 = 1,05455$  е познат, четвртата редица ја испуштаме

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & 0 \\ \underline{Y}_{31} & 0 & \underline{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix} - \underline{U}_4 \cdot \begin{bmatrix} \underline{Y}_{14} \\ 0 \\ \underline{Y}_{34} \end{bmatrix}$$

## Пример 3.3

Инјектирана струја во јазел  $i$

$$\underline{I}_i = \left( \frac{\underline{S}_i}{\underline{U}_i} \right)^*$$

Систем нелинерани равенки

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & 0 \\ \underline{Y}_{31} & 0 & \underline{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{S}_1/\underline{U}_1 \\ \underline{S}_2/\underline{U}_2 \\ \underline{S}_3/\underline{U}_3 \end{bmatrix}^* + \underline{U}_4 \cdot \begin{bmatrix} \underline{Y}_{14} \\ 0 \\ \underline{Y}_{34} \end{bmatrix} = 0$$

Системот нелинеарни равенки може да се реши со `fsolve` во MATLAB. Овој систем равенки во MATLAB е можно да се напише на следниот начин:

```
Y(1:3,1:3)*U1 - conj(Sp(1:3)./U1) + Us*Y(1:3,4)
```

## Пример 3.3

programi/naponi/naponi\_1.m

---

```
1 Us = 116/110; % napon na balansniot jazel
2 Sp = [-60-30j; 80+40j; -100-50j; 0]/100; % injektirani moknosti
3 Y41 = 1/(0.0322 + 0.0992j); % redni admitancii na grankite
4 Y43 = 1/(0.0537 + 0.1653j);
5 Y13 = 1/(0.0430 + 0.1322j);
6 Y21 = 1/(0.0269 + 0.0826j);
7 B1 = (0.0100 + 0.0133 + 0.0083)/2; % susceptancii vo jazlite
8 B2 = 0.0083/2;
9 B3 = (0.0166 + 0.0133)/2;
10 B4 = (0.0100 + 0.0166)/2;
11 Y = [Y41+Y13+Y21  -Y21      -Y13      -Y41 % matrica na admitancii
12         -Y21  Y21      0      0
13         -Y13  0  Y13+Y43  -Y43
14         -Y41  0  -Y43  Y41+Y43];
15 Y = Y + 1j*diag([B1 B2 B3 B4]); % dodavanje na naprecnite granki
16 ravenki = @(U1) Y(1:3,1:3)*U1 - conj(Sp(1:3)./U1) + Us*Y(1:3,4);
17 opt = optimoptions('fsolve','Display','off');
18 U1 = fsolve(ravenki, [1; 1; 1], opt); % resavanje na sistemot ravenki
19 U = [U1; Us] % naponi na site jazli
20 Um = abs(U)*110 % naponi vo kV
21 Ua = angle(U)/pi*180 % fazni agli na naponite
22 Sinj = U.*conj(Y*U)*100; % injektirani moknosti vo jazlite
23 dS = sum(Sinj) % vkupni zagubi na moknost
```

---

## Пример 3.3

Со активирање на програмата paroni\_1 го добиваме следниот резултат:

```
U =  
  1.0269 - 0.0216i  
  1.0764 + 0.0311i  
  0.9738 - 0.0708i  
  1.0545 + 0.0000i  
Um =  
 112.9845  
 118.4575  
 107.3955  
 116.0000  
Ua =  
 -1.2077  
  1.6524  
 -4.1583  
    0  
dS =  
 5.4469 +11.6969i
```

## Пример 3.4

За мрежата од примерот 3.3 да се определи промената на напоните во сите јазли при промена на реактивната моќност на генераторот во јазелот 2 во опсегот од  $-40 \text{ Mvar}$  до  $40 \text{ Mvar}$ .

Влезни податоци за мрежата

programi/naponi/ees\_1.m

```
1 function ees = ees_1()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.Us = 116/110;
4 ees.jazli = [
5     1 110 -60 -30
6     2 110  80  40
7     3 110 -100 -50
8     4 110   0   0
9 ];
10 ees.granki = [
11     4  1 0.0322 0.0992 0.0100
12     4  3 0.0537 0.1653 0.0166
13     1  3 0.0430 0.1322 0.0133
14     2  1 0.0269 0.0826 0.0083
15 ];
```

## Пример 3.4

Решавање електроенергетска мрежа со примена на fsolve

programi/naponi/naponi\_pq.m

---

```
1 function [Um, Ua, dS] = naponi_pq(datoteka)
2 if isstruct(datoteka)
3     ees = datoteka;
4 else
5     ees = feval(datoteka);
6 end
7 Y = matrica_y(ees.granki); % matrica na admitancii
8 Us = ees.Us; % napon na balansniot jazel
9 Sp = (ees.jazli(:,3) + 1j*ees.jazli(:,4))/ees.Sb; % potrosuvaci
10 n = size(ees.jazli, 1);
11 ravenki = @(U1) Y(1:n-1,1:n-1)*U1 ...
12             - conj(Sp(1:n-1)./U1) + Us*Y(1:n-1, n);
13 U1 = fsolve(ravenki, ones(n-1, 1)); % resi ravenki
14 U = [U1; Us]; % naponi na site jazli
15 Um = abs(U).*ees.jazli(:,2); % naponi vo kV
16 Ua = angle(U)/pi*180; % fazni agli na naponite
17 Sinj = U.*conj(Y*U)*ees.Sb; % injektirani moknosti vo jazlite
18 dS = sum(Sinj); % vkupni zagubi na moknost
```

---

## Пример 3.4

Формирање на матрицата на адмитанции

programi/naponi/matrica\_y.m

---

```
1 function Y = matrica_y(granki)
2 f = granki(:, 1);
3 t = granki(:, 2);
4 ngr = size(granki,1);
5 n = max([f; t]);
6 Yg = 1./(granki(:,3) + 1j*granki(:,4));
7 Bg = granki(:,5);
8 A = sparse(1:ngr, f, ones(ngr, 1), ngr, n) ...
9     - sparse(1:ngr, t, ones(ngr, 1), ngr, n);
10 Y = A' * sparse(1:ngr, 1:ngr, Yg) * A ...
11     + sparse(f, f, 1j*Bg/2, n, n) ...
12     + sparse(t, t, 1j*Bg/2, n, n);
```

---

## Пример 3.4

За да го решиме примерот треба само да напишеме:

```
>> [Um, Ua, dS] = naponi_pq('ees_1')
```

```
Um =
```

```
112.9845
```

```
118.4575
```

```
107.3955
```

```
116.0000
```

```
Ua =
```

```
-1.2077
```

```
1.6524
```

```
-4.1583
```

```
0
```

```
dS =
```

```
5.4469 +11.6969i
```

## Пример 3.4

Повеќекратни пресметки

programi/naponi/q\_promenljivo.m

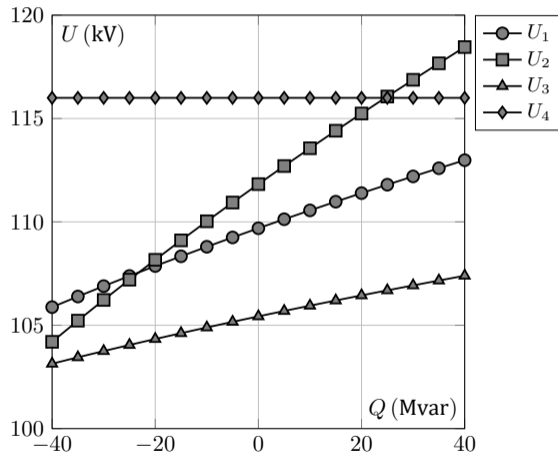
---

```
1 ees = ees_1;
2 Q = -40:5:40;
3 n = length(Q);
4 U = zeros(n, 4);
5 for i = 1:n
6     ees.jazli(2,4) = Q(i);
7     Um = naponi_pq(ees);
8     U(i, :) = Um';
9 end
10 plot(Q, U, '-o');
11 legend('U1', 'U2', 'U3', 'U4');
12 xlabel('Q (Mvar)')
13 ylabel('U (kV)')
14 grid;
```

---

## Пример 3.4

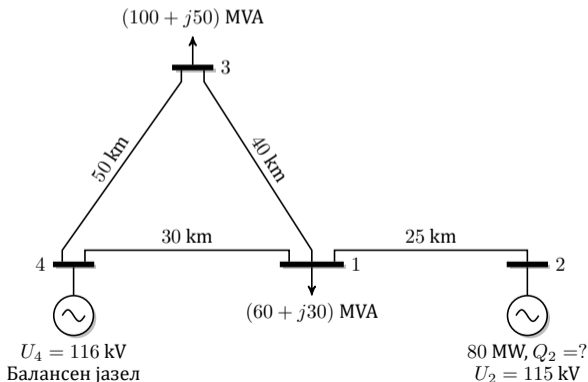
Зависност на напоните од инјектираната реактивна моќност



- Со промена на инјектираната реактивна моќност, во само еден јазел од мрежата се менуваат напоните на сите јазли.
- Промената на напоните е речиси линеарно зависна од инјектираната реактивна моќност.
- Најголема промена на напон се забележува во јазелот 2 каде што се случува промена на инјектираната реактивна моќност, додека кај јазлите 1 и 3 промените се помали.

## Пример 3.5

На сликата е прикажан ЕЕС од примерот 3.3 во којшто за генераторот во јазелот 2 не е позната неговата реактивна моќност туку се знае дека тој го одржува напонот на јазелот на вредност од 115 kV. Да се пресмета колкава реактивна моќност треба да има генераторот во јазелот 2 и да се пресметаат напоните на останатите јазли на мрежата и вкупните загуби на моќност во мрежата.



## Пример 3.5

Дефинираме нова променлива  $Q_2$  со која ќе постигнеме

$$|\underline{U}_2| = \frac{115}{110}.$$

Пресметуваме инјекција на струја која ја додаваме во системот равенки

$$\underline{I}'_2 = \left( \frac{jQ_2}{\underline{U}_2} \right)^*.$$

Систем равенки со 4 непознати величини:  $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$  и  $Q_2$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & 0 \\ \underline{Y}_{31} & 0 & \underline{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} - \\ & - \begin{bmatrix} \underline{S}_1/\underline{U}_1 \\ \underline{S}_2/\underline{U}_2 \\ \underline{S}_3/\underline{U}_3 \end{bmatrix}^* + \underline{U}_4 \cdot \begin{bmatrix} \underline{Y}_{14} \\ 0 \\ \underline{Y}_{34} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ jQ_2/\underline{U}_2 \\ 0 \end{bmatrix} = 0, \\ & |\underline{U}_2| = \frac{115}{110}. \end{aligned}$$

## Пример 3.5

Податоците за ЕЕС

programi/naponi/ees\_2.m

---

```
1 function ees = ees_2()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.Us = 116/110;
4 ees.jazli = [
5     1  110  -60  -30
6     2  110   80   0
7     3  110 -100  -50
8     4  110   0   0
9 ];
10 ees.granki = [
11     4   1  0.0322  0.0992  0.0100
12     4   3  0.0537  0.1653  0.0166
13     1   3  0.0430  0.1322  0.0133
14     2   1  0.0269  0.0826  0.0083
15 ];
16 ees.pv = [
17     2  115/110
18 ];
```

---

## Пример 3.5

Сите непознати ги сместуваме во векторот  $W$  со следниот редослед: модули на напоните, фазните агли на напоните и реактивните моќности на генераторите.

programi/naponi/podeli\_w.m

---

```
1 function [U1, Qpv] = podeli_w(W, n1)
2 U1m = W(1:n1);
3 U1a = W(n1+1:2*n1);
4 U1 = U1m.*exp(1j*U1a);
5 Qpv = W(2*n1+1:end);
```

---

Систем равенки

programi/naponi/jaz\_pot.m

---

```
1 function F = jaz_pot(W, Y1, Us, Ys, Sp1, ipv, Upv)
2 n1 = size(Y1, 1);
3 [U1, Qpv] = podeli_w(W, n1);
4 F = Y1 * U1 - conj(Sp1 ./ U1) + Us * Ys;
5 F(ipv) = F(ipv) - conj(1j*Qpv./U1(ipv));
6 F = [
7     real(F)
8     imag(F)
9     abs(U1(ipv)) - Upv
10    ];
```

---

## Пример 3.5

Решавање електроенергетска мрежа со јазли со контролиран напон

programi/naponi/naponi.m

```
1 function [Um, Ua, Qpv, dS] = naponi(datoteka)
2 if isstruct(datoteka)
3     ees = datoteka;
4 else
5     ees = feval(datoteka);
6 end
7 Y = matrica_y(ees.granki); % matrica na admitancii
8 Us = ees.Us; % napon na balansniot jazel
9 Sp = (ees.jazli(:,3) + lj*ees.jazli(:,4))/ees.Sb; % potrosuvaci
10 ipv = ees.pv(:,1); % indeksi na PV jazlite
11 Upv = ees.pv(:,2); % zadaden napon na PV jazlite
12 n = size(ees.jazli, 1);
13 npv = size(ipv, 1);
14 ravenki = @(W) jaz_pot(W, Y(1:n-1,1:n-1), ...
15     Us, Y(1:n-1, n), Sp(1:n-1), ipv, Upv);
16 W0 = [ones(n-1, 1); zeros(n-1, 1); zeros(npv, 1)];
17 W = fsolve(ravenki, W0); % resi ravenki
18 [U1, Qpv] = podeli_w(W, n - 1);
19 U = [U1; Us]; % naponi na site jazli
20 Um = abs(U).*ees.jazli(:,2); % naponi vo kV
21 Ua = angle(U)/pi*180; % fazni agli na naponite
22 Qpv = Qpv*ees.Sb; % Q na generatorite kaj PV jazlite
23 Sinj = U.*conj(Y*U)*ees.Sb; % injektirani moknosti vo jazlite
24 dS = sum(Sinj); % vkupni zagubi na moknost
```

## Пример 3.5

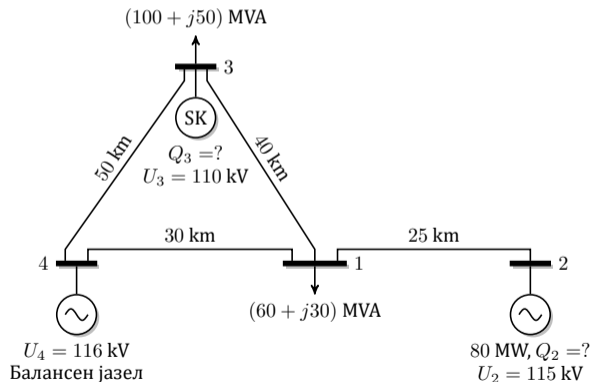
```
>> [Um, Ua, Qpv, dS] = naponi('ees_2')
Um
 111.2708
 115.0000
 106.3732
 116.0000
Ua =
 -0.9294
  2.3759
 -4.0649
      0
Qpv =
 18.5321
dS =
 5.6604 +12.4615i
```

Генераторот во јазелот 2 треба да има реактивна моќност еднаква на 18,53 Mvar за неговиот напон да изнесува 115 kV.

Вкупните загуби на моќност се:  $\Delta P = 5,66 \text{ MW}$  и  $\Delta Q = 12,46 \text{ Mvar}$ .

## Пример 3.6

На сликата е прикажана ЕЕС од примерот 3.5 во којшто е додаден синхрон компензатор во јазелот 3 којшто има задача да обезбедува напонот на тој јазел да биде со ефективна вредност 110 kV. Да се пресметаат реактивните моќности на генераторот во јазелот 2 и на синхрониот компензатор во овој случај.



## Пример 3.6

Матрицата  $p_v$  во овој случај е

```
ees.pv = [  
    2 115/110  
    3 1  
    ];  
  
>> [Um, Ua, Qpv, dS] = naponi('ees_3');  
>> Qpv  
Qpv =  
    8.1228  
   36.2772
```

Реактивната моќност на генераторот во јазелот 2 изнесува 8, 1228 Mvar, а реактивната моќност на синхронизираниот компензатор изнесува 36, 2772 Mvar.

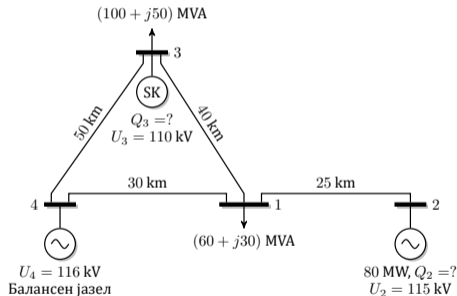
Ефективни вредности на напоните

```
>> Um  
Um =  
   112.1912  
   115.0000  
   110.0000  
   116.0000
```

# Врска меѓу напоните и реактивните моќности во ЕЕС

Поглавјето **Линеарна U-Q карактеристика добиена со развој во Тајлоров ред** може да се види во книгата, стр. 78-86.

Познато решение за ЕЕС од примерот 3.6

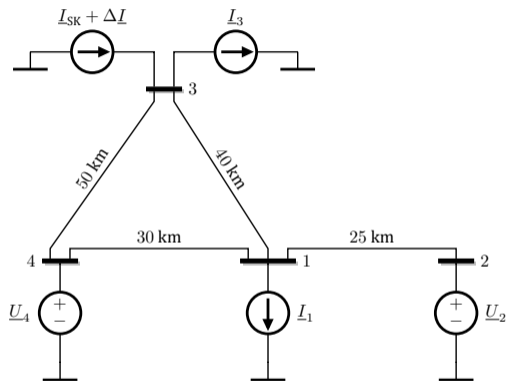


- Потрошувачите и синхронизираниот компензатор ги заменуваме со струјни генератори

$$\underline{I}_1 = \left( \frac{\underline{S}_1}{\underline{U}_1} \right)^*, \quad \underline{I}_3 = \left( \frac{\underline{S}_3}{\underline{U}_3} \right)^*, \quad \underline{I}_{SK} = \left( \frac{jQ_{SK}}{\underline{U}_3} \right)^*$$

- Генераторите во јазлите 2 и 4 кои одржуваат константни напони ги заменуваме со напонски генератори  $\underline{U}_2$  и  $\underline{U}_4$

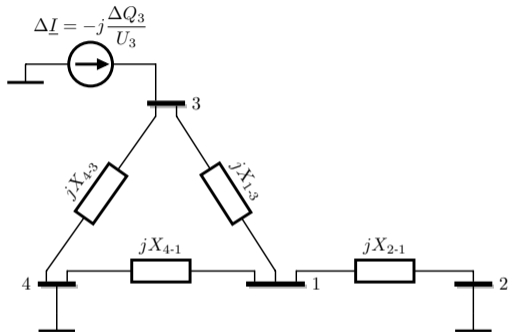
# Линеарна U-Q карактеристика добиена со примена на суперпозиција



- Сакаме да пресметаме колкави ќе бидат промените на напоните ако синхронитот компензатор ја промени својата својата струја за  $\Delta I$
- Струјниот генератор со струја  $I_{SK} + \Delta I$  го третираме како 2 паралелно поврзани струјни генератори  $I_{SK}$  и  $\Delta I$
- Суперпозиција
  1. Во колото се вклучени напонските генератори  $U_2$  и  $U_4$  и струјните генератори  $I_{SK}$ ,  $I_1$  и  $I_3$ ,
  2. Во колото е вклучен само струјниот генератор  $\Delta I$ .

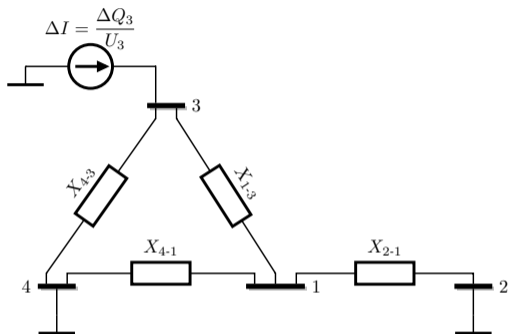
1. Решението во првиот случај одговара на оригиналната состојба од примерот 3.6
2. Решението во вториот случај ќе ги даде промените на напоните што ќе настанат поради промената на инјектираната струја на синхронитот компензатор

# Линеарна U-Q карактеристика добиена со примена на суперпозиција



- Ќе сметаме дека фазните агли на напоните се еднакви на нула, а гранките од мрежата се претставени само со нивните реактанции
- Бидејќи струјата и импеданциите се чисто имагинарни броеви, пресметаните напони ќе бидат позитивни реални броеви. Од практични причини, можеме да сметаме дека параметрите на сите елементи во колото се реални броеви.

## Линеарна U-Q карактеристика добиена со примена на суперпозиција



$$B_{4-1} = \frac{1}{X_{4-1}} = \frac{1}{0,0992} = 10,0806 \text{ pu};$$

$$B_{4-3} = \frac{1}{X_{4-3}} = \frac{1}{0,1653} = 6,0496 \text{ pu};$$

$$B_{1-3} = \frac{1}{X_{1-3}} = \frac{1}{0,1322} = 7,5643 \text{ pu};$$

$$B_{2-1} = \frac{1}{X_{2-1}} = \frac{1}{0,0826} = 12,1065 \text{ pu}.$$

Колото можеме да го решиме со примена на методот на независни напони

$$\mathbf{B}'' \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta I \end{bmatrix}$$

# Линеарна U-Q карактеристика добиена со примена на суперпозиција

$$\mathbf{B}'' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cc} B_{4-1} + B_{1-3} + B_{2-1} & B_{1-3} \\ B_{1-3} & B_{1-3} + B_{4-3} \end{array} \right] \end{matrix}$$

$$\Delta I = \Delta Q_3 / U_3$$

$$\mathbf{X}'' = (\mathbf{B}'')^{-1}$$

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{X}'' \cdot \Delta \mathbf{Q} / \mathbf{U}.$$

Имајќи предвид дека е  $\Delta Q_1 = 0$

$$\Delta U_3 = X''_{33} \cdot \frac{\Delta Q_3}{U_3}, \quad \Rightarrow \quad \Delta Q_3 = \frac{\Delta U_3 \cdot U_3}{X''_{33}}.$$

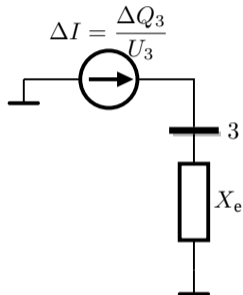
Во конкретниот случај имаме

$$\mathbf{B}'' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cc} 29,7515 & -7,5643 \\ -7,5643 & 13,6139 \end{array} \right] \text{ pu}, \quad \mathbf{X}'' = (\mathbf{B}'')^{-1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cc} 0,03914 & 0,02175 \\ 0,02175 & 0,08554 \end{array} \right] \text{ pu}, \end{matrix}$$

$$\Delta Q_3 = \frac{\Delta U_3 \cdot U_3}{X''_{33}} = \frac{1/110 \cdot 1}{0,08554} \cdot 100 = 10,63 \text{ Mvar}.$$

# Линеарна U-Q карактеристика добиена со примена на суперпозиција

Сите реактанции во колото со правилата за редно-паралелно поврзување ги еквивалентираме во единствена реактанција



$$X_e = (X_{4-1} \parallel X_{2-1} + X_{1-3}) \parallel X_{4-3} \\ = (0,0992 \parallel 0,0826 + 0,1322) \parallel 0,1653 = 0,0855 \text{ pu,}$$

$$\Delta U_3 = X_e \cdot \frac{\Delta Q_3}{U_3},$$

$$\Delta Q_3 = \frac{\Delta U_3 \cdot U_3}{X_e} = \frac{1/110 \cdot 1}{0,0855} \cdot 100 = 10,63 \text{ Mvar.}$$

programi/naponi/par.m

```
1 function Ze = par(Z1, Z2)
2 Ze = Z1*Z2/(Z1 + Z2);
```

```
>> Xe = par(par(0.0992, 0.0826) + 0.1322, 0.1653)
Xe =
0.0855
```

## Пример 3.7

За системот од примерот 3.6, да се пресмета колкава дополнителна реактивна моќност треба да инјектира синхронизираниот компензатор во јазелот 3, за неговиот напон да се покачи за 1 kV. Да се пресмета и за колкава вредност ќе се покачи напонот на јазелот 1. При тоа да се смета дека генераторите во јазлите 2 и 4 ги одржуваат напоните на зададените константни вредности. Во пресметките да се занемарат редните активни отпорности на гранките и нивните капацитивности, што значи дека е  $r = 0$  и  $b = 0$ .

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{13} \\ X_{31} & X_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta Q_1 / U_1 \\ \Delta Q_3 / U_3 \end{bmatrix}$$

Бидејќи е  $\Delta Q_1 = 0$

$$\Delta U_1 = X_{13} \cdot \frac{\Delta Q_3}{U_3},$$

$$\Delta U_3 = X_{33} \cdot \frac{\Delta Q_3}{U_3},$$

$$\Delta Q_3 = \frac{\Delta U_3 \cdot U_3}{X_{33}}.$$

## Пример 3.7

Импеданции на гранките

$$\underline{Z}_{4-1} = \frac{jx \cdot l_{4-1}}{Z_B} = \frac{j0,4 \cdot 30}{121} = j0,0992 \text{ pu};$$

$$\underline{Z}_{4-3} = \frac{jx \cdot l_{4-3}}{Z_B} = \frac{j0,4 \cdot 50}{121} = j0,1653 \text{ pu};$$

$$\underline{Z}_{1-3} = \frac{jx \cdot l_{1-3}}{Z_B} = \frac{j0,4 \cdot 40}{121} = j0,1322 \text{ pu};$$

$$\underline{Z}_{2-1} = \frac{jx \cdot l_{2-1}}{Z_B} = \frac{j0,4 \cdot 25}{121} = j0,0826 \text{ pu};$$

Адмитанции на гранките

$$\underline{Y}_{4-1} = \frac{1}{\underline{Z}_{4-1}} = \frac{1}{j0,0992} = -j10,0806 \text{ pu};$$

$$\underline{Y}_{4-3} = \frac{1}{\underline{Z}_{4-3}} = \frac{1}{j0,1653} = -j6,0496 \text{ pu};$$

$$\underline{Y}_{1-3} = \frac{1}{\underline{Z}_{1-3}} = \frac{1}{j0,1322} = -j7,5643 \text{ pu};$$

$$\underline{Y}_{2-1} = \frac{1}{\underline{Z}_{2-1}} = \frac{1}{j0,0826} = -j12,1065 \text{ pu}.$$



## Пример 3.7

Познавајќи ги реактанциите  $X_{13}$  и  $X_{33}$ , водејќи сметка дека е:  $\Delta U_3 = 1/110 = 0,0091$  pu,  $U_3 = 110/110 = 1$  pu и  $\Delta Q_1 = 0$ , пресметуваме:

$$\Delta Q_3 = \frac{\Delta U_3 \cdot U_3}{X_{33}''} = \frac{1/110 \cdot 1}{0,08554} = 0,10628 \text{ pu} = 10,628 \text{ Mvar},$$

$$\Delta U_1 = X_{13}'' \cdot \frac{\Delta Q_3}{U_3} = 0,02175 \cdot \frac{0,10628}{1} = 0,00231 \text{ pu} = 0,254 \text{ kV},$$

$$\Delta U_3 = X_{33}'' \cdot \frac{\Delta Q_3}{U_3} = 0,08554 \cdot \frac{0,10628}{1} = 0,00909 \text{ pu} = 1 \text{ kV}.$$

## Пример 3.7

programi/naponi/naponi\_5.m

---

```
1 ees = ees_3;
2 [U1, ~, Qpv1] = naponi(ees);
3
4 ees.pv = [
5     2  115/110
6     3  111/110
7 ];
8 [U2, ~, Qpv2] = naponi(ees);
9 dQ3_tocno = Qpv2(2) - Qpv1(2)
10 dU_tocno = U2([1 3]) - U1([1 3])
11
12 ees.granki(:, [3, 5]) = 0;
13 Y = matrica_y(ees.granki);
14 X = -imag(Y([1 3], [1 3]))^-1;
15 dQ3 = 1/110*1/X(2,2)*100
16 dU = X*[0; dQ3/100]*110
17 greska = (dQ3/dQ3_tocno - 1)*100
```

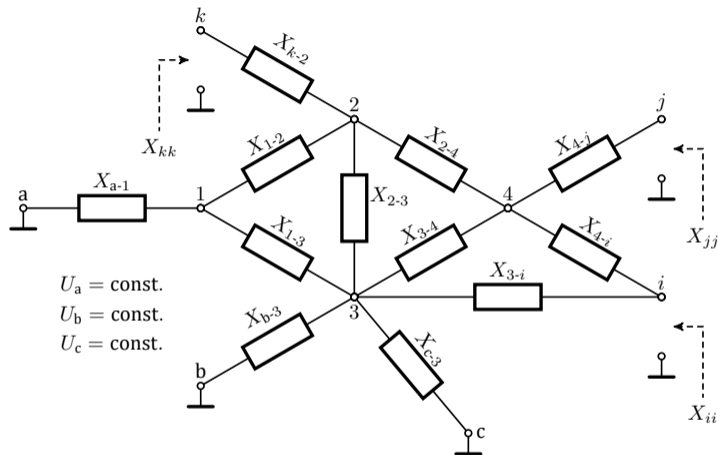
---

## Пример 3.7

```
>> naponi_5
dQ3_tocno =
  10.4718
dU_tocno =
  0.2534
  1.0000
dQ3 =
  10.6279
dU =
  0.2542
  1.0000
greska =
  1.4902
```

забележуваме одлично поклопување на пресметаните прирасти на  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_3$  споредено со вредностите добиени со решавање со програмата naponi, грешката кај пресметаната вредност на  $\Delta Q_3$  е 1,5%

# Матрица на реактанции на кусоврзаната мрежа

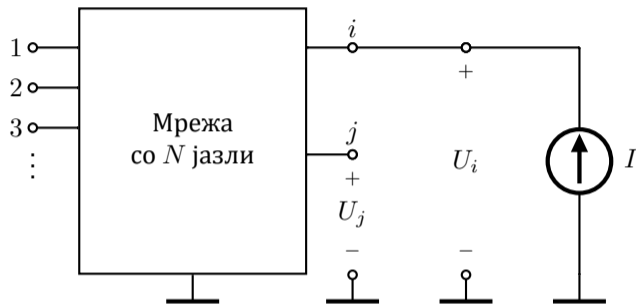


- $X_{ii}$  е сопствена или влезна реактанција во јазелот  $i$ ,
- $X_{ij}$  е меѓусебна реактанција на јазлите  $i$  и  $j$ .

$$\Delta U_i = X_{i1} \cdot \frac{\Delta Q_1}{U_1} + X_{i2} \cdot \frac{\Delta Q_2}{U_2} + \dots + X_{ii} \cdot \frac{\Delta Q_i}{U_i} + \dots + X_{in} \cdot \frac{\Delta Q_n}{U_n}$$

$$\mathbf{X} = (-\mathbf{B}')^{-1}$$

## Матрица на реактанции на кусоврзаната мрежа



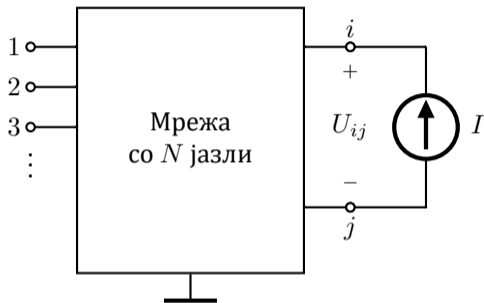
- Влезна реактанција на јазелот  $i$

$$X_{ii} = \frac{U_i}{I},$$

- Меѓусебна реактанција помеѓу јазлите  $i$  и  $j$

$$X_{ij} = \frac{U_j}{I}.$$

# Матрица на реактанции на кусоврзаната мрежа



- Влезната реактанција помеѓу јазлите  $i$  и  $j$

$$X_{ij, \text{вл.}} = X_{ii} + X_{jj} - 2X_{ij}$$

- Меѓусебна реактанција помеѓу јазлите  $i$  и  $j$

$$X_{ij} = \frac{X_{ii} + X_{jj} - X_{ij, \text{вл.}}}{2}$$

- Влезна реактанција

$$X_{ij, \text{вл.}} = \frac{U_{ij}}{I} = \frac{U_i - U_j}{I}$$

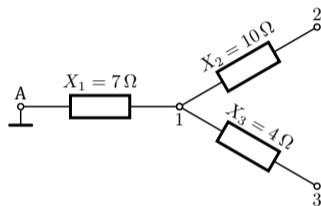
- Методот на независни напони

$$\begin{bmatrix} U_i \\ U_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ii} & X_{ij} \\ X_{ji} & X_{jj} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ -I \end{bmatrix}$$

$$U_i - U_j = (X_{ii} + X_{jj} - 2X_{ij}) \cdot I$$

## Пример 3.8

За колото од сликата да се пресметаат влезната реактанција  $X_{22}$  и меѓусебната реактанција  $X_{23}$ .



*Постапка бр. 1*

Со инспекција на колото ја добиваме матрицата  $\mathbf{B}'$

$$-\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} X_1^{-1} + X_2^{-1} + X_3^{-1} & -X_2^{-1} & -X_3^{-1} \\ -X_2^{-1} & X_2^{-1} & 0 \\ -X_3^{-1} & 0 & X_3^{-1} \end{bmatrix},$$

а потоа со нејзина инверзија ќе ја добиеме матрицата  $\mathbf{X}$

## Пример 3.8

programi/naponi/x\_primer\_1.m

---

```
1 B = -[1/7+1/10+1/4 -1/10 -1/4
2         -1/10  1/10  0
3         -1/4   0  1/4];
4 X = (-B)^-1
```

---

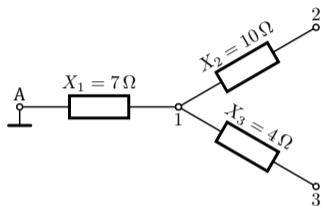
```
>> x_primer_1
```

```
X =
  7.0000    7.0000    7.0000
  7.0000   17.0000    7.0000
  7.0000    7.0000   11.0000
```

од каде се гледа дека е  $X_{22} = 17 \Omega$  и  $X_{23} = 7 \Omega$

## Пример 3.8

Постапка бр. 2



$$X_{22} = X_1 + X_2 = 7 + 10 = 17 \Omega,$$

$$X_{33} = X_1 + X_3 = 7 + 4 = 11 \Omega,$$

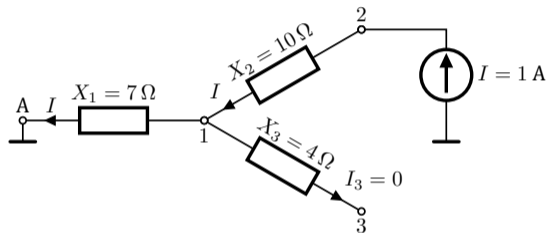
$$X_{23, \text{вл.}} = X_2 + X_3 = 10 + 4 = 14 \Omega.$$

$$X_{23} = \frac{X_{22} + X_{33} - X_{23, \text{вл.}}}{2} = \frac{17 + 11 - 14}{2} = 7 \Omega.$$

## Пример 3.8

Постапка бр. 3

Во јазелот 2 инјектираме струја  $I = 1 \text{ A}$



$$U_1 = X_1 \cdot I = 7 \cdot 1 = 7 \text{ V},$$

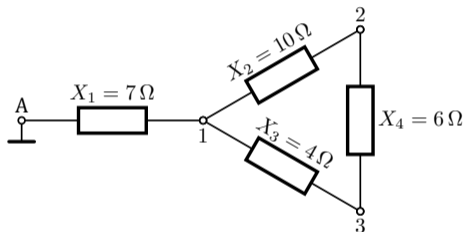
$$U_2 = U_1 + X_2 \cdot I = 7 + 10 \cdot 1 = 17 \text{ V},$$

$$U_3 = U_1 + X_3 \cdot I_2 = 7 + 4 \cdot 0 = 7 \text{ V},$$

$$X_{22} = \frac{U_2}{I} = \frac{17}{1} = 17 \Omega, \quad X_{23} = \frac{U_3}{I} = \frac{7}{1} = 7 \Omega$$

## Пример 3.9

Во колото од примерот 3.8 се додава уште една реактанција  $X_4$  поврзана помеѓу јазлите 2 и 3 како што е прикажано на сликата. Да се извршат пресметките на влезната реактанција  $X_{22}$  и меѓусебната реактанција  $X_{23}$ .



Постапка бр. 1

$$-\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} X_1^{-1} + X_2^{-1} + X_3^{-1} & -X_2^{-1} & -X_3^{-1} \\ -X_2^{-1} & X_2^{-1} + X_4^{-1} & -X_4^{-1} \\ -X_3^{-1} & -X_4^{-1} & X_3^{-1} + X_4^{-1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = (-\mathbf{B}')^{-1}$$

## Пример 3.9

programi/naponi/x\_primer\_2.m

---

```
1 B = -[1/7+1/10+1/4    -1/10    -1/4
2           -1/10  1/10+1/6    -1/6
3           -1/4    -1/6  1/4+1/6];
4 X = (-B)^-1
```

---

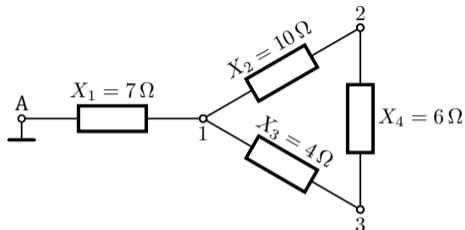
>> x\_primer\_2

```
X =
  7.0000    7.0000    7.0000
  7.0000   12.0000    9.0000
  7.0000    9.0000   10.2000
```

$X_{22} = 12 \Omega$  и  $X_{23} = 9 \Omega$

## Пример 3.9

Постапка бр. 2



$$X_{22} = (X_3 + X_4) \parallel X_2 + X_1 = (6 + 4) \parallel 10 + 7 = 12 \Omega,$$

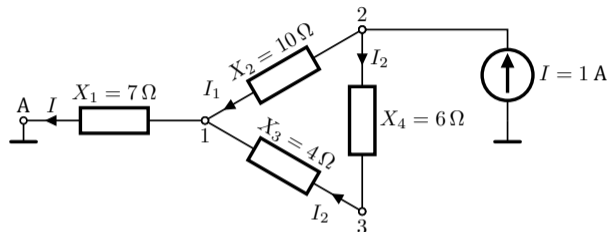
$$X_{33} = (X_2 + X_4) \parallel X_3 + X_1 = (10 + 6) \parallel 4 + 7 = 10,2 \Omega,$$

$$X_{23, \text{вл.}} = (X_2 + X_3) \parallel X_4 = (10 + 4) \parallel 6 = 4,2 \Omega.$$

$$X_{23} = \frac{X_{22} + X_{33} - X_{23, \text{вл.}}}{2} = \frac{12 + 10,2 - 4,2}{2} = 9 \Omega.$$

## Пример 3.9

Постапка бр. 3



$$I_1 = \frac{X_3 + X_4}{X_2 + (X_3 + X_4)} \cdot I = \frac{6 + 4}{10 + (6 + 4)} \cdot 1 = 0,5 \text{ A},$$

$$I_2 = I - I_1 = 0,5 \text{ A}.$$

$$U_1 = X_1 \cdot I = 7 \cdot 1 = 7 \text{ V},$$

$$U_2 = U_1 + X_2 \cdot I_1 = 7 + 10 \cdot 0,5 = 12 \text{ V},$$

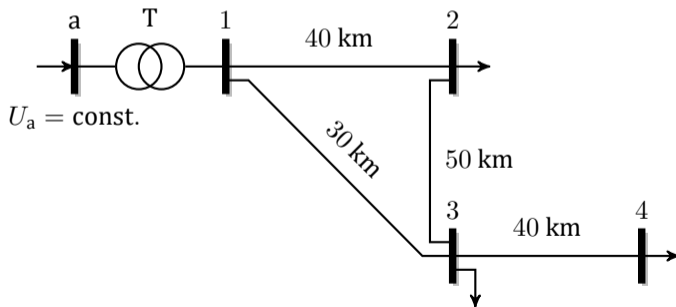
$$U_3 = U_1 + X_3 \cdot I_2 = 7 + 4 \cdot 0,5 = 9 \text{ V},$$

$$X_{22} = \frac{U_2}{I} = \frac{12}{1} = 12 \Omega,$$

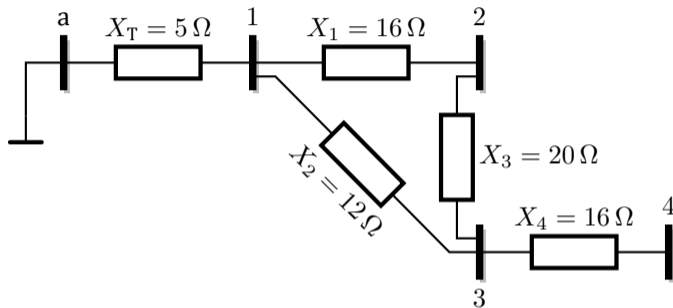
$$X_{23} = \frac{U_3}{I} = \frac{9}{1} = 9 \Omega.$$

## Пример 3.10

Да се формира матрицата на реактанции на кусоврзаната мрежа за независните јазли за мрежата прикажана на сликата. Сите водови во мрежата се од ист тип и имаат иста надолжни реактанција  $x = 0,4 \Omega/\text{km}$ , а нивните должини се прикажани на сликата. Трансформаторот 400/110 kV/kV има реактанција на редната гранка (сведена кон 110 kV страна) која изнесува  $X_T = 5 \Omega$ . Напонот на високонапонската страна на трансформаторот Т се одржува на константна вредност.



## Пример 3.10



$$-\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} X_T^{-1} + X_1^{-1} + X_2^{-1} & -X_1^{-1} & -X_2^{-1} & 0 \\ -X_1^{-1} & X_1^{-1} + X_3^{-1} & -X_3^{-1} & 0 \\ -X_2^{-1} & -X_3^{-1} & X_2^{-1} + X_3^{-1} + X_4^{-1} & -X_4^{-1} \\ 0 & 0 & -X_4^{-1} & X_4^{-1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = (-\mathbf{B}')^{-1}$$

## Пример 3.10

programi/naponi/x\_primer\_3.m

---

```
1 XT = 5; X1 = 16; X2 = 12; X3 = 20; X4 = 16;  
2 B = -[1/XT+1/X1+1/X2      -1/X1      -1/X2      0  
3      -1/X1      1/X1+1/X3      -1/X3      0  
4      -1/X2      -1/X3      1/X2+1/X3+1/X4 -1/X4  
5      0      0      -1/X4      1/X4];  
6 X = (-B)^-1
```

---

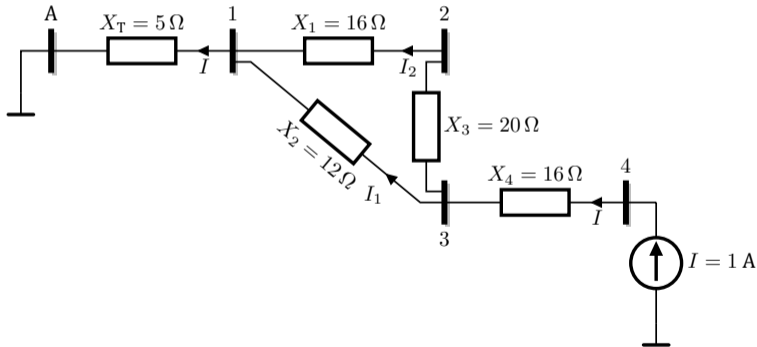
```
>> x_primer_3
```

```
X =  
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 3.11

За мрежата од примерот 3.10 да се определи само колоната 4, а потоа и заедно колоните 2 и 4 од матрицата  $\mathbf{X}$  без употреба на инверзна матрица.

За да ја добиеме колоната 4, во јазелот 4 инјектираме струја  $I = 1 \text{ A}$



## Пример 3.11

$$I_1 = \frac{X_1 + X_3}{X_2 + (X_1 + X_3)} \cdot I = \frac{16 + 20}{12 + (16 + 20)} \cdot 1 = 0,75 \text{ A},$$

$$I_2 = I - I_1 = 0,25 \text{ A}.$$

$$U_1 = X_T \cdot I = 5 \cdot 1 = 5 \text{ V},$$

$$U_2 = U_1 + X_1 \cdot I_2 = 5 + 16 \cdot 0,25 = 9 \text{ V},$$

$$U_3 = U_1 + X_2 \cdot I_1 = 5 + 12 \cdot 0,75 = 14 \text{ V},$$

$$U_4 = U_3 + X_4 \cdot I = 14 + 16 \cdot 1 = 30 \text{ V},$$

$$X_{14} = U_1/I = 5 \Omega,$$

$$X_{24} = U_2/I = 9 \Omega,$$

$$X_{34} = U_3/I = 14 \Omega,$$

$$X_{44} = U_4/I = 30 \Omega.$$

## Пример 3.11

programi/naponi/x\_primer\_4.m

```
1 XT = 5; X1 = 16; X2 = 12; X3 = 20; X4 = 16;
2 B = -[1/XT+1/X1+1/X2      -1/X1      -1/X2      0
3      -1/X1      1/X1+1/X3      -1/X3      0
4      -1/X2      -1/X3      1/X2+1/X3+1/X4 -1/X4
5              0              0              -1/X4  1/X4];
6 I1 = [0
7       0
8       0
9       1];
10 X1 = -B\I1
11 I2 = [0 0
12       1 0
13       0 0
14       0 1];
15 X2 = -B\I2
```

```
>> x_primer_4
X1 =
    5.0000
    9.0000
   14.0000
   30.0000
X2 =
    5.0000    5.0000
   15.6667    9.0000
    9.0000   14.0000
    9.0000   30.0000
```

## Пример 3.12

Да се направи функција (во MATLAB) со која ќе се формира матрицата  $\mathbf{B}'$  за мрежа со произволна конфигурација. Потоа, со примена на функцијата да се реши примерот 3.10.

programi/naponi/granki\_1.m

```
1 function granki = granki_1()  
2 granki = [  
3     0     1     5  
4     1     2    16  
5     1     3    12  
6     2     3    20  
7     3     4    16  
8 ];
```

```
>> B = matrica_b('granki_1');  
>> X = full(B^-1)  
X =  
  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 3.12

programi/naponi/matrica\_b.m

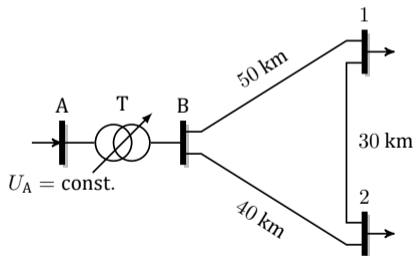
---

```
1 function B = matrica_b(datoteka)
2 if ischar(datoteka)
3     granki = feval(datoteka);
4 else
5     granki = datoteka;
6 end
7 f = granki(:, 1);
8 t = granki(:, 2);
9 Bg = 1./granki(:,3);
10 ngr = size(granki,1);
11 n = max([f; t]) + 1;
12 f(f == 0) = n;
13 t(t == 0) = n;
14 A = sparse(1:ngr, f, ones(ngr, 1), ngr, n) ...
15     - sparse(1:ngr, t, ones(ngr, 1), ngr, n);
16 B = A' * sparse(1:ngr, 1:ngr, Bg) * A;
17 B = B(1:n-1, 1:n-1);
```

---

## Пример 3.13

На сликата е прикажана мрежа 110 kV која се напојува од напојната точка A. Може да се смета дека напонот во погонот кај оваа точка се држи на константна вредност. Сите водови имаат еднакви параметри  $\underline{z} = (0, 123 + j0, 4) \Omega/\text{km}$ . Трансформаторот T ги има следните номинални податоци: 150 MVA, 220/110 kV/kV,  $u_k = 12, 5\%$  и  $Z_T = (0, 33 + j10) \Omega$  (сведени на страна 110 kV).

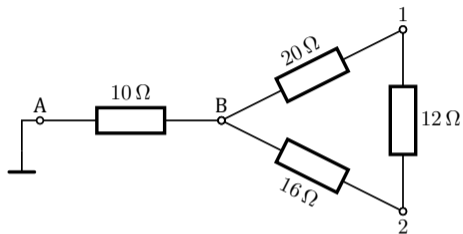


Го дефинираме следниот коефициент

$$K_{U,i} = \frac{\Delta Q_i}{\Delta U_i} = \frac{U_i}{X_{ii}}$$

Да се пресметаат  $K_{U,1}$  и  $K_{U,2}$  за јазлите 1 и 2. Колкави ќе бидат овие коефициенти доколку трансформаторот T има можност за регулација под товар, така што напонот во точката B се одржува на константна вредност?

## Пример 3.13



Трансформаторот Т работи без можност за регулација под товар

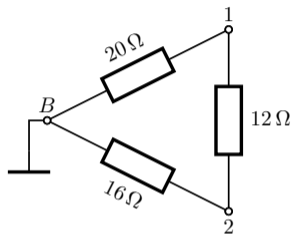
$$X_{11} = 20 \parallel (12 + 16) + 10 = 21,667 \Omega,$$

$$X_{22} = 16 \parallel (12 + 20) + 10 = 20,667 \Omega,$$

$$K_{U,1} = U_n / X_{11} = 110 / 21,667 = 5,08 \text{ Mvar/kV},$$

$$K_{U,2} = U_n / X_{22} = 110 / 20,667 = 5,32 \text{ Mvar/kV}.$$

## Пример 3.13



Регулационата преклопка го одржува напонот  $U_B$  на константна вредност

$$X_{11} = 20 \parallel (12 + 16) = 11,667 \Omega,$$

$$X_{22} = 16 \parallel (12 + 20) = 10,667 \Omega,$$

$$K_{U,1} = U_n / X_{11} = 110 / 11,667 = 9,43 \text{ Mvar/kV},$$

$$K_{U,2} = U_n / X_{22} = 110 / 10,667 = 10,31 \text{ Mvar/kV}.$$

## Пример 3.13

- Коефициентот  $K_{U,i}$  е поголем доколку е помала влезната реактанција. Ќе треба голема вредност на реактивната моќност за мала промена на напонот.
- Прв случај: ако реактивната моќност во јазелот 1 се зголеми за 5,08 Mvar, напонот ќе падне за 1 kV и обратно.
- Втор случај: за промена на напонот од 1 kV, ќе биде потребна промена на реактивната моќност за вредност 9,43 Mvar.
- Доколку сакаме напонот во јазелот 1 да го покачине за 5 kV, ќе биде потребно да инјектираме реактивна моќност со вредност  $5 \cdot 5,08 = 25,4$  Mvar во првиот случај и  $5 \cdot 9,43 = 47,15$  Mvar во вториот случај.

## Пример 3.14

Регионална трансформаторска станица за снижување на напонот се напојува преку далекувод 110 kV од напојната точка А. Во неа се инсталирани два идентични трансформатора од по 31,5 MVA, со преносен однос  $(110 \pm 4 \times 2,5\%)/11 \text{ kV/kV}$ , за коишто ги знаеме следните податоци (се однесуваат на еден трансформатор): 31,5 MVA;  $u_k = 8\%$ ;  $\Delta P_{Cun} = 180 \text{ kW}$ ;  $R_T = 2,2 \Omega$ ;  $X_T = 30,73 \Omega$  (сведени на високонапонската страна). Водот V ги има следните параметри:  $Z_V = (6,25 + j20) \Omega$ .

Моќноста на потрошувачот напојуван од трансформаторската станица се менува и изнесува:

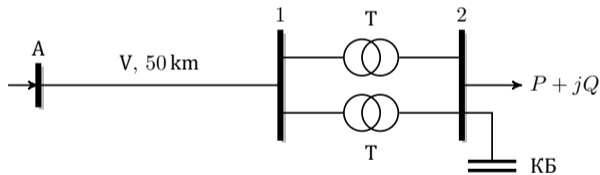
- во режим на максимално оптоварување  
 $P_{\max} = 40 \text{ MW}$ ;  $Q_{\max} = 20 \text{ Mvar}$ ;
- во режим на минимално оптоварување  
 $P_{\min} = 20 \text{ MW}$ ;  $Q_{\min} = 12,5 \text{ Mvar}$ .

Напонот во напојната точка А се менува и во двата карактеристични режима на работа и неговата вредност изнесува

$$U_{A(\max)} = 110 \text{ kV}; \quad U_{A(\min)} = 113 \text{ kV}.$$

## Пример 3.14

За да се подобрат напонските прилики кај потрошувачот, се предвидува инсталирање на кондензаторска батерија (КБ) при собирници 10 kV од трансформаторската станица, со можност за регулација. Да се избере коефициентот на трансформација  $k$  на трансформаторите и да се одреди најмалата вредност на инсталираната моќност  $Q_{\text{КБ}}$  на КБ за да постигнеме, во режимот на максималното и минималното оптоварување, напонот на собирници 10 kV да изнесува  $U_{20(\text{max})} = 10,5 \text{ kV}$  и  $U_{20(\text{min})} = 10 \text{ kV}$ .



## Пример 3.14

Параметри на системот сведени на 110 kV

$$R_e = R_V + R_T/2 = 6,25 + 1,1 = 7,35 \Omega,$$

$$X_e = X_V + X_T/2 = 20 + 15,36 = 35,36 \Omega.$$

Напон кај потрошувачот

$$U'_{2(\max)} = U_{A(\max)} - \frac{P_{\max} \cdot R_e + Q_{\max} \cdot X_e}{U_n} = 110 - 9,1 = 100,9 \text{ kV},$$

$$U'_{2(\min)} = U_{A(\min)} - \frac{P_{\min} \cdot R_e + Q_{\min} \cdot X_e}{U_n} = 113 - 5,36 = 107,64 \text{ kV}.$$

КБ само генерира реактивна моќност. Во режим на минимално оптоварување КБ се исклучува од работа.

Коефициентот на трансформација  $k$  се бира така што напонот во режимот на минимално оптоварување ќе ја добие бараната вредност.

$$k_0 = \frac{U'_{2(\min)}}{U_{20(\min)}} = \frac{107,64}{10} = 10,764.$$

## Пример 3.14

$$\alpha_0 = \left( \frac{k_0}{k_n} - 1 \right) \cdot 100 = \left( \frac{10,764}{110/11} - 1 \right) \cdot 100 = 7,64\%.$$

Најблиска вредност  $\alpha = 3 \times 2,5 = 7,5\%$

$$k = k_n \cdot \left( 1 + \frac{\alpha}{100} \right) = 10 \cdot \left( 1 + \frac{7,5}{100} \right) = 10,75.$$

Напони при избраниот преносен однос

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

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

## Пример 3.14

Во режимот на максимално оптоварување е потребно покачување на напонот

$$\Delta U_2 = 10,5 - 9,39 = 1,11 \text{ kV}.$$

Потребна реактивна моќност

$$\Delta Q = \frac{\Delta U \cdot U_{20(\max)}}{X_e''} = \frac{1,11 \cdot 10,5}{0,2923} = 40 \text{ Mvar},$$

каде што  $X_e'' = X_e/k^2 = 35,36/10,75^2 = 0,2923 \Omega$  (сведено на среднонапонската страна).

$$\Delta Q = Q_{\text{КБ}} \cdot \left(\frac{U_{20}}{U_n}\right)^2,$$

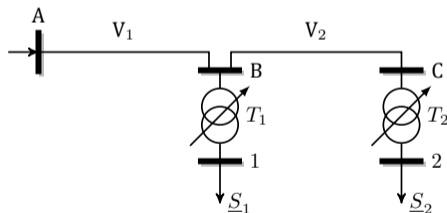
$$Q_{\text{КБ}} = \Delta Q \cdot \left(\frac{U_n}{U_{20}}\right)^2 = 40 \cdot \left(\frac{10}{10,5}\right)^2 = 36,2 \text{ Mvar}.$$

## Пример 3.15

Дадена е надземна мрежа 35 kV која напојува два потрошувача. Во режимот на максимално оптоварување потрошувачите земаат од мрежата моќности:

$$\underline{S}_{1 \max} = (7,5 + j3,63) \text{ MVA}, \quad \underline{S}_{2 \max} = (5 + j3,75) \text{ MVA},$$

во режимот на минимално оптоварување моќностите се за 3 пати помали.



Водовите  $V_1$  и  $V_2$  имаат должини по 10 km и  $\underline{z} = (0,315 + j0,35) \Omega/\text{km}$ .

Напонот во напојната точка A се држи на константна вредност  $U_A = 36,75 \text{ kV}$ .

## Пример 3.15

Познати се и параметрите на трансформаторите  $T_1$  и  $T_2$

$T_1$ : 10 MVA;  $(38,5 \pm 2 \times 2,5\%)/11 \text{ kV/kV}$ ;  $u_k = 7,5\%$ ;  $\Delta P_{Cun} = 92 \text{ kW}$ ;  $R_{T1} = 1,364 \Omega$ ;  
 $X_{T1} = 11 \Omega$  (сведени на 35 kV);

$T_2$ : 7,5 MVA;  $(38,5 \pm 2 \times 2,5\%)/11 \text{ kV/kV}$ ;  $u_k = 7,5\%$ ;  $\Delta P_{Cun} = 75 \text{ kW}$ ;  $R_{T2} = 1,976 \Omega$ ;  
 $X_{T2} = 14,69 \Omega$  (сведени на 35 kV);

Потребно е да се одредат коефициентите на трансформација  $k_{T1}$  и  $k_{T2}$  така што отстапувањата на напонот во режимите на максимално и минимално оптоварување околу средната вредност да бидат приближно еднакви, а средната вредност на напоните кај потрошувачите да изнесува:  $U_{10} = U_{20} = 10 \text{ kV}$ .

Загуби на напон

$$\Delta U_{AB(\max)} = \frac{(P_{1(\max)} + P_{2(\max)}) \cdot r + (Q_{1(\max)} + Q_{2(\max)}) \cdot x}{U_n} \cdot l_1 = 1,863 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{BC(\max)} = \frac{P_{2(\max)} \cdot r + Q_{2(\max)} \cdot x}{U_n} \cdot l_2 = 0,825 \text{ kV};$$

## Пример 3.15

$$\Delta U_{T1(\max)} = \frac{P_{1(\max)} \cdot R_{T1} + Q_{1(\max)} \cdot X_{T1}}{U_n} = 1,433 \text{ kV};$$
$$\Delta U_{T2(\max)} = \frac{P_{2(\max)} \cdot R_{T2} + Q_{2(\max)} \cdot X_{T2}}{U_n} = 1,856 \text{ kV}.$$

Во режимот на минимално оптоварување загубите на напон ќе бидат за 3 пати помали.

Напони во режимот на максимално оптоварување

$$U_{B(\max)} = 34,887 \text{ kV};$$

$$U_{C(\max)} = 34,062 \text{ kV};$$

$$U'_{1(\max)} = 33,454 \text{ kV};$$

$$U'_{2(\max)} = 32,206 \text{ kV}.$$

Напони во режимот на минимално оптоварување

$$U_{B(\min)} = 36,129 \text{ kV};$$

$$U_{C(\min)} = 35,854 \text{ kV};$$

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

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

## Пример 3.15

Средни вредности на напоните

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

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

Коефициенти на трансформација

$$k_{T1o} = \frac{U'_{1, \text{cp.}}}{U_{10}} = \frac{34,55}{10} = 3,455;$$

$$k_{T2o} = \frac{U'_{2, \text{cp.}}}{U_{10}} = \frac{33,72}{10} = 3,372;$$

$$\alpha_{10} = \left( \frac{k_{T1o}}{k_{T1n}} - 1 \right) \cdot 100 = -1,28\%;$$

$$\alpha_{20} = \left( \frac{k_{T2o}}{k_{T1n}} - 1 \right) \cdot 100 = -3,66\%.$$

## Пример 3.15

Усвојуваме  $\alpha_1 = \alpha_2 = -2,5\%$

$$k_{T1} = k_{T2} = (1 - 2,5/100) \cdot 3,5 = 3,4125;$$

$$U_{1(\min)} = 10,447 \text{ kV};$$

$$U_{1(\max)} = 9,803 \text{ kV};$$

$$U_{1, \text{cp.}} = 10,125 \text{ kV};$$

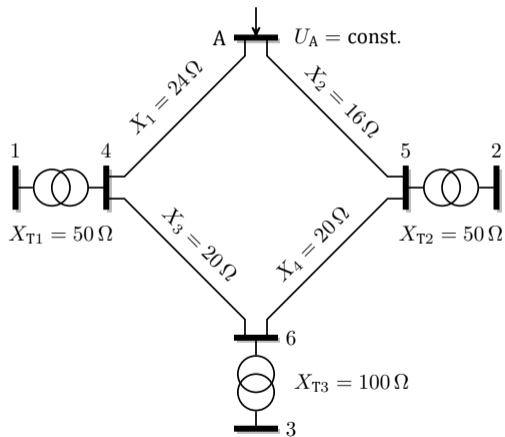
$$U_{2(\min)} = 10,325 \text{ kV};$$

$$U_{2(\max)} = 9,438 \text{ kV};$$

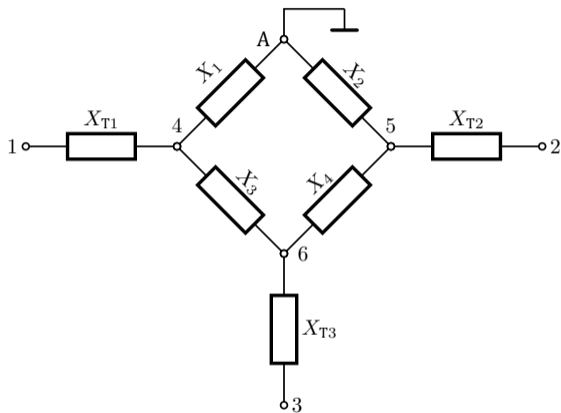
$$U_{2, \text{cp.}} = 9,88 \text{ kV}.$$

## Пример 3.16

Да се одреди матрицата на реактанции  $X$  на краткоспојната мрежа за јазлите: 1, 2 и 3.



## Пример 3.16



$$X_{ii} = X_{i, \text{вл.}}, \quad i = 1, 2, 3,$$

$$X_{ij} = (X_{ii} + X_{jj} - X_{ij, \text{вл.}}) / 2, \quad i, j = 1, 2, 3, i \neq j,$$

## Пример 3.16

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

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

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

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

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

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

$$X_{12} = (X_{11} + X_{22} - X_{12, \text{вл.}})/2 = 4,8 \Omega,$$

$$X_{13} = (X_{11} + X_{33} - X_{13, \text{вл.}})/2 = 10,8 \Omega,$$

$$X_{23} = (X_{22} + X_{33} - X_{23, \text{вл.}})/2 = 8,8 \Omega.$$

## Пример 3.16

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

programi/naponi/granki\_2.m

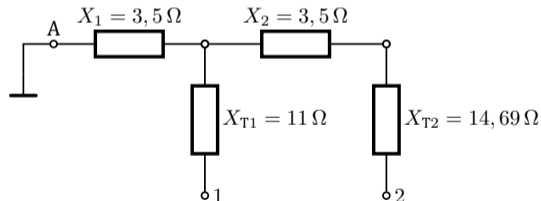
```
1 function granki = granki_2()
2 granki = [
3     0  4   24
4     0  5   16
5     4  6   20
6     6  5   20
7     1  4   50
8     5  2   50
9     6  3  100
10 ];
```

```
>> B = matrica_b('granki_2');
>> X = full(B^-1)
X =
    66.8    4.8   10.8   16.8    4.8   10.8
     4.8   62.8    8.8    4.8   12.8    8.8
    10.8    8.8  119.8   10.8    8.8   19.8
    16.8    4.8   10.8   16.8    4.8   10.8
     4.8   12.8    8.8    4.8   12.8    8.8
    10.8    8.8   19.8   10.8    8.8   19.8
```

```
>> X123 = X(1:3, 1:3)
X123 =
    66.8    4.8   10.8
     4.8   62.8    8.8
    10.8    8.8  119.8
```

## Пример 3.17

Се разгледува мрежата од примерот 3.15, со реактанции на елементите на мрежата како на сликата. 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 потрошувачи. 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:  $U_{10(\max)} = U_{20(\max)} = 10 \text{ kV}$ .



## Пример 3.17

Матрица на реактанции

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

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

$$X_{12, \text{вл.}} = X_{T1} + X_2 + X_{T2} = 29,19 \Omega,$$

$$X_{12} = (X_{11} + X_{22} - X_{12, \text{вл.}})/2 = 3,5 \Omega,$$

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

Равенки за прираст на напоните (непознати величини  $\Delta Q_1$  и  $\Delta Q_2$ )

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

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

## Пример 3.17

Напоните и прирастите на напоните ги сведуваме на 35 kV

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

$$\Delta U_2 = k_{T2} \cdot [U_{20(\max)} - U_{2(\max)}] = 3,4125 \cdot (10 - 9,438) = 1,92 \text{ kV},$$

$$U_1 = U_2 = k_{T1} \cdot U_{10(\max)} = k_{T2} \cdot U_{20(\max)} = 34,125 \text{ kV}.$$

Систем равенки за  $\Delta Q_1$  и  $\Delta Q_2$

$$\Delta U_1 = 0,67 = \frac{14,5}{34,125} \cdot \Delta Q_1 + \frac{3,5}{34,125} \cdot \Delta Q_2,$$

$$\Delta U_2 = 1,92 = \frac{3,5}{34,125} \cdot \Delta Q_1 + \frac{21,69}{34,125} \cdot \Delta Q_2,$$

```
>> X = [14.5 3.5; 3.5 21.69];
```

```
>> dQ = X\[0.67; 1.92]*34.125
```

```
dQ =  
0.8820  
2.8784
```

$$\Delta Q_1 = 0,88 \text{ Mvar},$$

$$\Delta Q_2 = 2,88 \text{ Mvar}.$$

## Оптимална големина на компензационите уреди

- Ако сакаме да ги промениме напоните на множество од  $m$  јазли, треба да имаме  $m$  инјекции на реактивна моќност кои се добиваат со решавање на систем од  $m$  линеарни равенки (Пример 3.17)
- **Проблем:** Да се определат инјектираните реактивни моќности на множество од  $m$  јазли, така што ќе се постигне определено ниво на напоните во друго множество од јазли. Целта да се постигне со што е можно помали инјектирани реактивни моќности.
- Минимум на функција која е еднаква на сумата од реактивните моќности

$$\min F = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \dots + \Delta Q_m$$

Ограничувања за напоните

$$\mathbf{U}^o + \Delta \mathbf{U} \geq \mathbf{U}^{\min}$$

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{X} \cdot [\text{diag}(\mathbf{U})]^{-1} \Delta \mathbf{Q}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{X} \cdot [\text{diag}(\mathbf{U})]^{-1}$$

$$\mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{Q} \geq \mathbf{U}^{\min} - \mathbf{U}^o$$

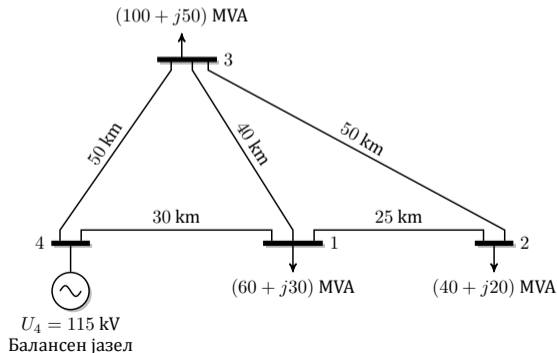
## Пример 3.18

Сите водови имаат параметри:  $r = 0,13 \Omega/\text{km}$ ;  $x = 0,4 \Omega/\text{km}$  и  $b = 2,75 \mu\text{S}/\text{km}$ .

Предвидено е да се постават 2 компензациони уреди, и тоа:

1. компензационите уреди се поставени во јазлите 1 и 3,
2. компензационите уреди се поставени во јазлите 1 и 2,
3. компензационите уреди се поставени во јазлите 2 и 3.

Да се определи најмалата сума од реактивните моќности на двата компензациони уреди, така што вредноста на напоните на сите јазли да не биде пониска од 0,95 pu.



## Пример 3.18

programi/naponi/ees\_4.m

```
1 function ees = ees_4()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.Us = 115/110;
4 ees.jazli = [
5     1 110 -60 -30
6     2 110 -40 -20
7     3 110 -100 -50
8     4 110   0   0
9 ];
10 ees.granki = [
11     4 1 0.0322 0.0992 0.0100
12     4 3 0.0537 0.1653 0.0166
13     1 3 0.0430 0.1322 0.0133
14     2 1 0.0269 0.0826 0.0083
15     2 3 0.0537 0.1653 0.0166
16 ];
```

Со програмата naponi\_rq ги пресметуваме напоните на јазлите

$$U_1^o = 0,9390 \text{ pu}; \quad U_2^o = 0,9118 \text{ pu}; \quad U_3^o = 0,9161 \text{ pu}.$$

## Пример 3.18

Минималниот напон треба да изнесува 0,95 pu, десната страна од ограничувањата за напони е

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}^{\min} - \mathbf{U}^o = \begin{bmatrix} 0,0110 \\ 0,0382 \\ 0,0339 \end{bmatrix} \text{ pu.}$$

Со помош на програмата `matrica_b` ја добиваме  $\mathbf{B}'$ , а потоа пресметуваме  $\mathbf{X} = (-\mathbf{B}')^{-1}$  и  $\mathbf{H} = \mathbf{X} \cdot [\text{diag}(\mathbf{U})]^{-1}$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0,0758 & 0,0691 & 0,0510 \\ 0,0671 & 0,1285 & 0,0658 \\ 0,0498 & 0,0661 & 0,0954 \end{bmatrix} \text{ pu.}$$

## Пример 3.18

### Случај бр. 1

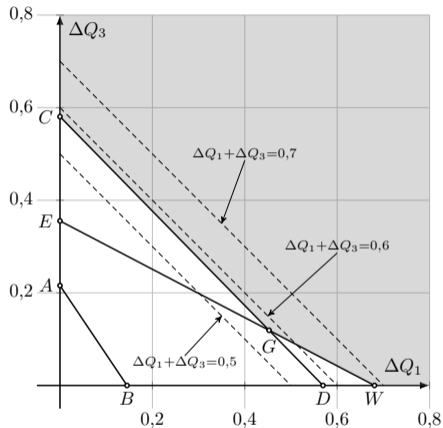
$$F = \Delta Q_1 + \Delta Q_3,$$

Од матрицата **H** ги земаме колоните 1 и 3

$$0,0758 \cdot \Delta Q_1 + 0,0510 \cdot \Delta Q_3 \geq 0,0110;$$

$$0,0671 \cdot \Delta Q_1 + 0,0658 \cdot \Delta Q_3 \geq 0,0382;$$

$$0,0498 \cdot \Delta Q_1 + 0,0954 \cdot \Delta Q_3 \geq 0,0339.$$



- Со отсечките  $A-B$ ,  $C-D$  и  $E-W$  се нацртани ограничувањата
- Со испрекинати отсечки се нацртани сегменти од правите  $\Delta Q_1 + \Delta Q_3 = 0,7$ ;  $\Delta Q_1 + \Delta Q_3 = 0,6$  и  $\Delta Q_1 + \Delta Q_3 = 0,5$

## Пример 3.18

- Сите точки од сегментот  $\Delta Q_1 + \Delta Q_3 = 0,7$  лежат во засенчената област, што значи сите тие се кандидати за решение кое ги исполнува сите ограничувања
- Ниту една од точките на сегментот  $\Delta Q_1 + \Delta Q_3 = 0,5$  не е во засенчената област, така што заклучуваме дека функцијата на цел не може да биде  $0,5$
- Со намалување на  $F$  испрекинатите отсечки се поместуваат од горе-десно кон долу-лево и со намалување на  $F$  треба да прекинеме во оној момент кога само една точка од некоја испрекината отсечка ќе припаѓа во засенчената област (точката  $G$ )
- Најдоброто решение се добива во пресекот на отсечките  $C-D$  и  $E-W$

$$0,0671 \cdot \Delta Q_1 + 0,0659 \cdot \Delta Q_3 = 0,0382;$$

$$0,0498 \cdot \Delta Q_1 + 0,0955 \cdot \Delta Q_3 = 0,0339;$$

$$\Delta Q_1 = 0,4532 \text{ pu} = 45,32 \text{ Mvar}; \quad \Delta Q_3 = 0,1186 \text{ pu} = 11,86 \text{ Mvar};$$

$$F = 0,5719 \text{ pu} = 57,19 \text{ Mvar}.$$

## Пример 3.18

По поставувањето на компензационите уреди, напоните ќе ги имаат следните нови вредности

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}^o + \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0,9390 \\ 0,9118 \\ 0,9161 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,0758 & 0,0510 \\ 0,0671 & 0,0658 \\ 0,0498 & 0,0954 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,4532 \\ 0,1186 \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 0,9794 \\ 0,9500 \\ 0,9500 \end{bmatrix} \text{ pu.}$$

## Пример 3.18

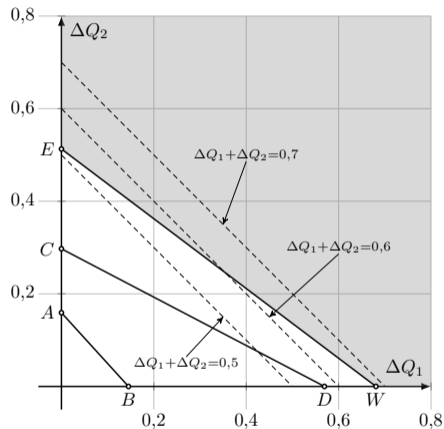
### Случај бр. 2

$$F = \Delta Q_1 + \Delta Q_2$$

$$0,0758 \cdot \Delta Q_1 + 0,0691 \cdot \Delta Q_2 \geq 0,0110;$$

$$0,0671 \cdot \Delta Q_1 + 0,1285 \cdot \Delta Q_2 \geq 0,0382;$$

$$0,0498 \cdot \Delta Q_1 + 0,0661 \cdot \Delta Q_2 \geq 0,0339.$$



Оптималното решение се наоѓа во точката  $E$ , пресек на права со ординатната оска

$$0,0498 \cdot \Delta Q_1 + 0,0661 \cdot \Delta Q_2 = 0,0339;$$

$$\Delta Q_1 = 0; \quad \Delta Q_2 = 0,5124 \text{ pu} = 51,24 \text{ Mvar}; \quad F = 0,5124 \text{ pu} = 51,24 \text{ Mvar}.$$

## Пример 3.18

По компензацијата напоните ќе ги имаат следните вредности

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 0,9744 \\ 0,9776 \\ 0,9500 \end{bmatrix} \text{ pu.}$$

## Пример 3.18

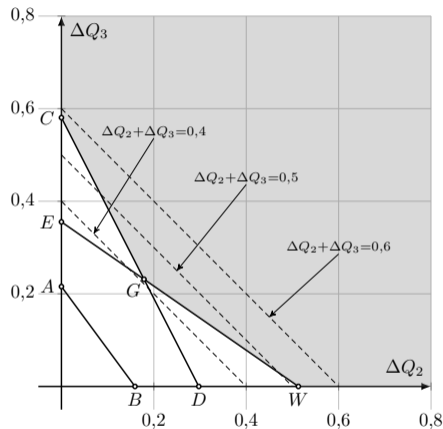
### Случај бр. 3

$$F = \Delta Q_2 + \Delta Q_3$$

$$0,0691 \cdot \Delta Q_2 + 0,0510 \cdot \Delta Q_3 \geq 0,0110;$$

$$0,1285 \cdot \Delta Q_2 + 0,0658 \cdot \Delta Q_3 \geq 0,0382;$$

$$0,0661 \cdot \Delta Q_2 + 0,0954 \cdot \Delta Q_3 \geq 0,0339.$$



Оптимальното решение се наоѓа во точката  $G$  која е пресек на отсечките  $C-D$  и  $E-F$

$$0,1285 \cdot \Delta Q_2 + 0,0658 \cdot \Delta Q_3 = 0,0382;$$

$$0,0661 \cdot \Delta Q_2 + 0,0954 \cdot \Delta Q_3 = 0,0339;$$

## Пример 3.18

$$\begin{aligned}\Delta Q_2 &= 0,1791 \text{ pu} = 17,91 \text{ Mvar}; & \Delta Q_3 &= 0,2311 \text{ pu} = 23,11 \text{ Mvar}; \\ F &= 0,4101 \text{ pu} = 41,01 \text{ Mvar}.\end{aligned}$$

Забележуваме дека решението има најмала вредност за  $F$ , најдобро е компензационите уреди да се поставени во јазлите 2 и 3.

Напоните по компензацијата ги имаат следните вредности

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 0,9632 \\ 0,9500 \\ 0,9500 \end{bmatrix} \text{ pu.}$$

## Пример 3.19

Да се реши примерот 3.18 со примена на MATLAB и GNU Octave.

programi/naponi/qopt\_1.m

```
1 ees = ees_4;
2 U0 = naponi_pq(ees);
3 U0 = U0(1:3)/110;
4 granki = ees.granki(:, [1 2 4]);
5 granki(granki(:, 1) == 4, 1) = 0;
6 B = matrica_b(granki);
7 X = full(B^-1);
8 H = X * diag(1./U0);
9 D = 0.95 - U0;
10 kombinacii = [1 3
11               1 2
12               2 3];
13 opt = optimoptions('linprog', ...
14   'Display', 'off', 'Algorithm', 'dual-simplex');
15 for i = 1:3
16     jazli = kombinacii(i, :)
17     H1 = H(:, jazli);
18     [dQ,F,info] = linprog([1 1], -H1, -D, [], [], [0 0], [], opt)
19     U = U0 + H1*dQ
20 end
```

## Пример 3.19

Решение со помош на библиотеката YALMIP.

programi/naponi/qopt\_1\_bin.m

---

```
1 ees = ees_4;
2 U0 = naponi_pq(ees);
3 U0 = U0(1:3)/110;
4 granki = ees.granki(:, [1 2 4]);
5 granki(granki(:, 1) == 4, 1) = 0;
6 B = matrica_b(granki);
7 X = full(B^-1);
8 H = X * diag(1./U0);
9
10 Q = sdpvar(3,1);
11 a = binvar(3,1);
12 funkcija = sum(Q);
13 ogranicuvanja = [
14     H*Q >= 0.95 - U0
15     0 <= Q <= a*2
16 ];
17 opis = optimize(ogranicuvanja, funkcija);
18 Q = value(Q)
19 a = value(a)
20 f = value(funkcija)
```

---

## Пример 3.19

```
>> qopt_1_bin
Q =
    0
    0.1791
    0.2311
a =
    0
    1
    1
f = 0.4101
```