

Високонапонски мрежи и системи

Вовед

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

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↺

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

1 / 5

Структура на ЕЕС

Вообичаена е поделбата на ЕЕС според фазите на технолошкиот процес на производството, распределбата и користењето на електричната енергија:

- извори,
- преносна мрежа,
- дистрибутивна мрежа (извори).

Прецизно разграничување меѓу преносните и дистрибутивните мрежи е тешко да се направи. Според „техничката“ поделба, **преносната мрежа** ја сочинуваат водовите и постројките со номинален напон **110 kV и повеќе**.

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↺

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

2 / 5

Структура на ЕЕС

- Производство на електрична енергија
 - ▶ Големи генератори: хидро, термо, нуклеарни центриали
 - ★ десетици и стотици MW
 - ★ сконцентрирани на мал број локации
 - ★ поврзани на преносна мрежа
 - ▶ Мали генератори (обновливи): ветер, сонце, хидро, биомаса
 - ★ неколку MW
 - ★ распределени на многу локации
 - ★ поврзани на дистрибутивна мрежа
- Преносна мрежа – сложена структура
 - ▶ Напони: 110, 220, 400, 750 kV
 - ▶ Растојанија: десетици и стотици km
 - ▶ Интерконекции: илјадници km
 - ▶ Моќности: десетици и стотици MW
- Дистрибутивна мрежа – радијална структура
 - ▶ Напони: 10, 20, 35 kV
 - ▶ Растојанија: единици и десетици km
 - ▶ Моќности: единици и десетици MW
- Нисконапонска мрежа – радијална структура
 - ▶ Напон: 0,4 kV (230 V фазен напон)
 - ▶ Растојанија: помалку од 1 km
 - ▶ Моќности: десетици kW

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↺

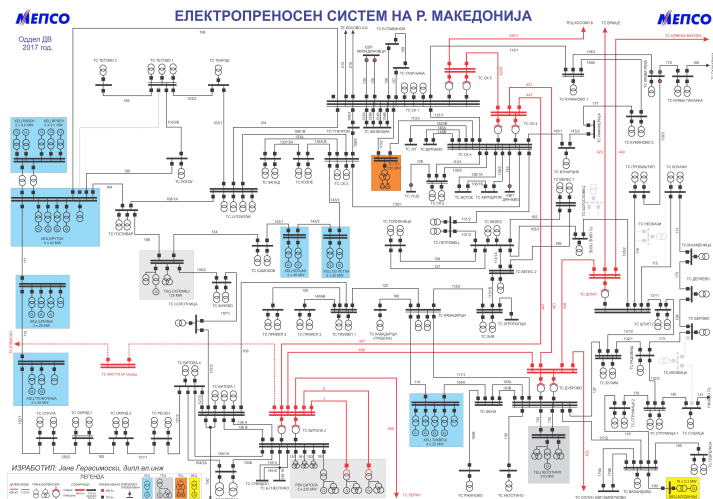
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

3 / 5

ЕЕС на Македонија



МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

4 / 5

Област на изучување

- Пренос на електрична енергија со долги трифазни водови
 - ▶ Водови како елемент на електрично коло
 - ▶ Идеални водови, карактеристична импеданција, природна моќност, „прецизна“ π -шема
- Регулација на напони и реактивни моќности во ЕЕС
 - ▶ Регулација на напони со помош на трансформатори
 - ▶ Регулација на напони со помош на генератори
 - ★ Матрица на импеданции на електрично коло: сопствени и меѓусебни импеданции на јазлите
- Куси врски во ЕЕС
 - ▶ Решавање на несиметрични трифазни кола – симетрични компоненти
 - ▶ Субтранзиентни, транзиенти и трајни импеданции на генератори
 - ▶ Заменски шеми за нулти систем за трансформатори
 - ▶ Матрица на импеданции на електрично коло
- Стабилност на работата на ЕЕС
 - ▶ Диференцијална равенка на движење на синхрон генератор
 - ▶ Статична стабилност – мали промени во системот
 - ▶ Динамичка стабилност – големи промени во системот: куси врски, испади на генератори и потрошувачи
 - ▶ Нумеричко решавање на диференцијални равенки

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

5 / 5

Високонапонски мрежи и системи

Пренос на електрична енергија со долги трифазни водови

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

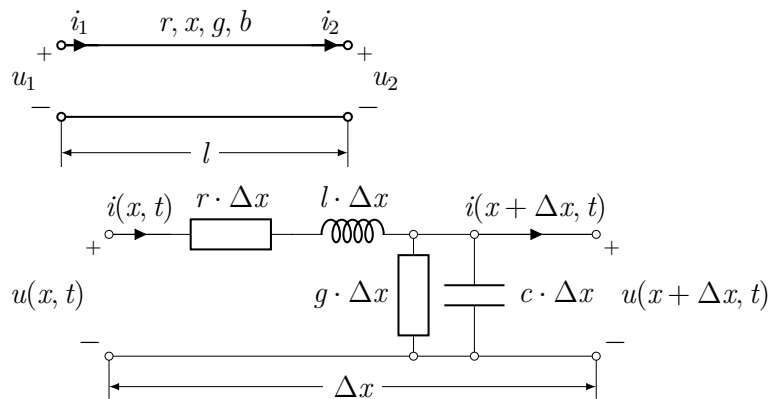
Скопје, 2019

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 1 / 45

Еднофазен вод – елемент на водот



$$i(x, t) = i(x + \Delta x, t) + g \cdot \Delta x \cdot u(x + \Delta x, t) + c \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial t}$$

$$u(x, t) = u(x + \Delta x, t) + r \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + l \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 2 / 45

Еднофазен вод – телеграфски равенки

$$-\frac{i(x + \Delta x, t) - i(x, t)}{\Delta x} = g \cdot u(x + \Delta x, t) + c \cdot \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial t}$$

$$-\frac{u(x + \Delta x, t) - u(x, t)}{\Delta x} = r \cdot i(x, t) + l \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}$$

$$\Delta x \rightarrow 0$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = g \cdot u(x, t) + c \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = r \cdot i(x, t) + l \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 3 / 45

Еднофазен вод – простопериодичен режим

$$i(x, t) = \sqrt{2} \cdot I(x) \cdot \sin[\omega t + \psi(x)]$$

$$u(x, t) = \sqrt{2} \cdot U(x) \cdot \sin[\omega t + \theta(x)]$$

$$i(x, t) \Rightarrow \underline{I} \quad \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \Rightarrow j\omega \underline{I} \quad \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} \Rightarrow \frac{d\underline{I}}{dx}$$

$$u(x, t) \Rightarrow \underline{U} \quad \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \Rightarrow j\omega \underline{U} \quad \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \Rightarrow \frac{d\underline{U}}{dx}$$

$$-\frac{d\underline{I}}{dx} = g \cdot \underline{U} + j\omega c \cdot \underline{U} = (g + j\omega c) \cdot \underline{U} = \underline{y} \cdot \underline{U}$$

$$-\frac{d\underline{U}}{dx} = r \cdot \underline{I} + j\omega l \cdot \underline{I} = (r + j\omega l) \cdot \underline{I} = \underline{z} \cdot \underline{I}$$

$$\underline{y} = g + j\omega c$$

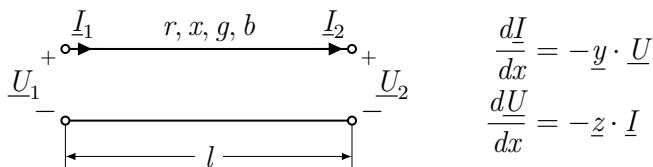
$$\underline{z} = r + j\omega l$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 4 / 45

Еднофазен вод – општо решение



Бранови равенки

$$\frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} = \underline{z} \cdot \underline{y} \cdot \underline{U}$$

$$\frac{d^2 \underline{I}}{dx^2} = \underline{z} \cdot \underline{y} \cdot \underline{I}$$

$$\underline{U} = \underline{C}_1 e^{-\gamma x} + \underline{C}_2 e^{\gamma x}$$

$$\underline{I} = \underline{C}_3 e^{-\gamma x} + \underline{C}_4 e^{\gamma x}$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} \quad \text{коэффициент на простирање}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 5 / 45

Еднофазен вод – општо решение

$$\underline{I} = -\frac{1}{\underline{z}} \frac{d\underline{U}}{dx} = \frac{1}{\underline{z}} \underline{C}_1 \gamma e^{-\gamma x} - \frac{1}{\underline{z}} \gamma \underline{C}_2 e^{\gamma x}$$

$$\underline{U} = \underline{C}_1 e^{-\gamma x} + \underline{C}_2 e^{\gamma x}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{C}_1}{\underline{Z}_c} e^{-\gamma x} - \frac{\underline{C}_2}{\underline{Z}_c} e^{\gamma x}$$

$$\underline{U}|_{x=l} = \underline{U}_2$$

$$\underline{I}|_{x=l} = \underline{I}_2$$

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} \quad \text{карактеристична импеданција}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 6 / 45

Еднофазен вод – општо решение

$$\underline{U}_2 = \underline{C}_1 e^{-\underline{\gamma}l} + \underline{C}_2 e^{\underline{\gamma}l}$$
$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{C}_1}{\underline{Z}_c} e^{-\underline{\gamma}l} - \frac{\underline{C}_2}{\underline{Z}_c} e^{\underline{\gamma}l}$$

$$\underline{C}_1 = \frac{\underline{U}_2 + \underline{Z}_c \underline{I}_2}{2} e^{\underline{\gamma}l}$$
$$\underline{C}_2 = \frac{\underline{U}_2 - \underline{Z}_c \underline{I}_2}{2} e^{-\underline{\gamma}l}$$

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cosh \underline{\gamma}(l-x) + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \sinh \underline{\gamma}(l-x)$$

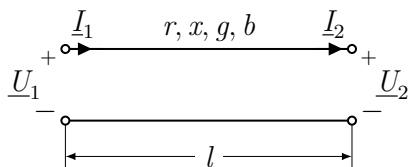
$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \sinh \underline{\gamma}(l-x) + \underline{I}_2 \cosh \underline{\gamma}(l-x)$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 7 / 45

Еднофазен вод – решение



$$\underline{U}|_{x=0} = \underline{U}_1$$
$$\underline{I}|_{x=0} = \underline{I}_1$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cosh \underline{\gamma}l + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \sinh \underline{\gamma}l$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \sinh \underline{\gamma}l + \underline{I}_2 \cosh \underline{\gamma}l$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 8 / 45

Трифазен вод

Во електроенергетиката е вообичаено да оперираме со меѓуфазни напони и со трифазни моќности.

$$\underline{U} = \sqrt{3} \underline{U}_f$$

$$\underline{I} = \underline{I}_f$$

$$\underline{S} = 3 \underline{S}_f = 3 \underline{U}_f \underline{I}_f^* = \sqrt{3} \underline{U} \underline{I}^*$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cosh \underline{\gamma}l + \sqrt{3} \underline{Z}_c \underline{I}_2 \sinh \underline{\gamma}l$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \underline{Z}_c} \sinh \underline{\gamma}l + \underline{I}_2 \cosh \underline{\gamma}l$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 9 / 45

Трифазен вод – моќност на крајот

Дадена е моќноста на крајот на водот $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$

Струјата на крајот на водот изнесува

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{S}_2^*}{\sqrt{3}\underline{U}_2} = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3}\underline{U}_2}$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cosh \underline{\gamma}l + \underline{Z}_c \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{U}_2} \sinh \underline{\gamma}l = \underline{U}_2 \left(\cosh \underline{\gamma}l + \underline{Z}_c \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{U}_2^2} \sinh \underline{\gamma}l \right)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}\underline{Z}_c} \sinh \underline{\gamma}l + \frac{\underline{S}_2^*}{\sqrt{3}\underline{U}_2} \cosh \underline{\gamma}l = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}\underline{Z}_c} \left(\sinh \underline{\gamma}l + \underline{Z}_c \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{U}_2^2} \cosh \underline{\gamma}l \right)$$

$$\underline{S}_{N2} = \frac{\underline{U}_2^2}{\underline{Z}_c^*} \quad \text{природна моќност на водот}$$

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

10 / 45

Трифазен вод – природна моќност на водот

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left(\cosh \underline{\gamma}l + \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{S}_{N2}^*} \sinh \underline{\gamma}l \right)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}\underline{Z}_c} \left(\sinh \underline{\gamma}l + \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{S}_{N2}^*} \cosh \underline{\gamma}l \right)$$

ако е $\underline{S}_2 = \underline{S}_{N2}$, тогаш е и $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}\underline{Z}_c}$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 e^{\underline{\gamma}l} \Rightarrow \underline{U}_1 = e^\alpha \underline{U}_2 \quad e^\alpha \approx 1$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}\underline{Z}_c} e^{\underline{\gamma}l} = \underline{I}_2 e^{\underline{\gamma}l} \Rightarrow \underline{I}_1 = e^\alpha \underline{I}_2$$

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

11 / 45

Упростени формули за $\underline{\gamma}$ и \underline{Z}_c

$$\sqrt{1+a} = 1 + \frac{a}{2} - \frac{a^2}{8} + \frac{a^3}{16} - \dots$$

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{r+jx}{jb}} = \sqrt{\frac{x}{b}} \cdot \sqrt{1-j\frac{r}{x}} = \sqrt{\frac{x}{b}} \cdot \left(1 - j\frac{r}{2x}\right)$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(r+jx) \cdot jb} = j \cdot \sqrt{xb} \cdot \sqrt{1-j\frac{r}{x}} = j \cdot \sqrt{xb} \cdot \left(1 - j\frac{r}{2x}\right)$$

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

12 / 45

Пример 1

Пример 2.1 од книгата: 220 kV далекувод со должина $l = 400$ km има подолжни параметри $r = 0,09 \Omega/\text{km}$; $x = 0,422 \Omega/\text{km}$; $g = 0$; $b = 2,62 \mu\text{S}/\text{km}$. Водот е оптоварен на крајот со моќност $P_2 = 70$ MW при $\cos \varphi_2 = 0,95$;
($Q_2 = P_2 \cdot \tan \varphi_2 = 70 \cdot 0,328 = 23,1$ Mvar) при напон $U_2 = 220 \cdot e^{j0^\circ}$ kV. Потребно е да се пресмета комплексната вредност на напонот на почетокот од водот.

Во книгата е работено со упростиени формули за $\underline{\gamma}$ и \underline{Z}_c и е добиен следниот резултат: $\underline{\gamma} = (0,112 \cdot 10^{-3} + j1,0515 \cdot 10^{-3})$ 1/km,
 $\underline{Z}_c = (406 - j43,8) \Omega$, $\underline{U}_2 = 235 \cdot e^{j12,8^\circ}$ kV

Пример 1

```
programi/primer_2_1.m
1 clear
2 z = 0.09 + 1j*0.422;
3 y = 1j*2.62e-6;
4 S2 = 70 + 1j*23.1
5 U2 = 220;
6 l = 400;
7 Zc = sqrt(z/y)
8 gama = sqrt(z*y)
9 Sn2 = U2^2/conj(Zc)
10 U1 = U2*(cosh(gama*l) + conj(S2/Sn2)*sinh(gama*l))
11 U1_modul = abs(U1)
12 U1_ago1 = angle(U1)/pi*180
```

```
>> primer_2_1
S2 =
    70.0000 + 23.1000i
Zc =
    4.0358e+02 - 4.2558e+01i
gama =
    0.0001 + 0.0011i
Sn2 =
    1.1861e+02 - 1.2507e+01i
U1 =
    2.2883e+02 + 5.2678e+01i
U1_modul =
    234.8154
U1_ago1 =
    12.9641
```

Идеални водови – упростувања

Под идеален вод (вод без загуби) се подразбира вод за кој важи $r = 0$ и $g = 0$.

Реалните преносни водови со големи должини во нормалните режими на работа се многу слични со идеалните. Идеалните водови многу полесно се проучуваат.

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(r + jx) \cdot (g + jb)} = j\sqrt{xb} = j\beta$$

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{r + jx}{g + jb}} = \sqrt{\frac{x}{b}} = Z_c \leftarrow \text{реален број}$$

$$\cosh \underline{\gamma}l = \cosh j\beta l = \cos \beta l$$

$$\sinh \underline{\gamma}l = \sinh j\beta l = j \sin \beta l$$

Идеални водови – равенки

Упростени равенки $\beta = 0,06^\circ/\text{km}$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j\sqrt{3}Z_c I_2 \sin \beta l$$

$$\underline{I}_1 = j\frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}Z_c} \sin \beta l + \underline{I}_2 \cos \beta l$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left(\cos \beta l + j\frac{S_2^*}{P_{N2}} \sin \beta l \right)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}Z_c} \left(j \sin \beta l + \frac{S_2^*}{P_{N2}} \cos \beta l \right)$$

Пренос на природна моќност $\underline{S}_2 = P_{N2} = U_2^2/Z_c$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 e^{j\beta l} \Rightarrow U_1 = U_2, \quad U_2 \text{ доцни за агол } \beta l$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}Z_c} e^{j\beta l} = \underline{I}_2 e^{j\beta l} \Rightarrow I_1 = I_2$$

Идеални водови – $\underline{S}_2 = P_2 = P_{N2}$

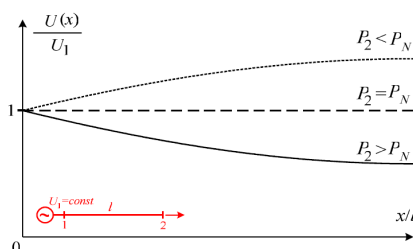
При пренос на природна моќност ефективната вредност на напонот и струјата по должина на водот не се менува

$$U(x) = U_1 = \text{const.}$$

$$I(x) = \frac{U(x)}{\sqrt{3}Z_c} = \text{const.}$$

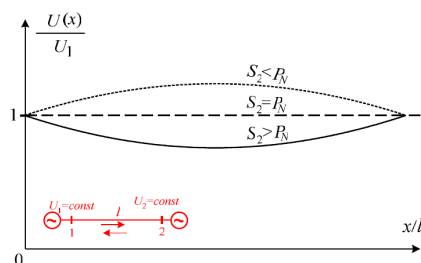
Идеални водови – $\underline{S}_2 = P_2 \neq P_{N2}$

- $P_2 < P_{N2}$
 - ▶ Водот произведува реактивна моќност повеќе отколку што троши, т.е. преовладува капацитивноста на водот. Со оддалечување од неговиот почеток напонот расте.
- $P_2 > P_{N2}$
 - ▶ Водот троши реактивна моќност повеќе отколку што произведува, т.е. преовладува индуктивноста на водот. Со оддалечување од неговиот почеток напонот опаѓа.



Идеални водови – $U_1 = \text{const.}$ и $U_2 = \text{const.}$

Случај кога се работи за многу долг вод, на чијшто почеток и крај се наоѓаат две електрични централи (или пак два одвоени ЕЕС кои можат да се еквивалентираат на тој начин), кои ги држат ефективните вредности на напоните U_1 и U_2 на константна вредност.



Идеални водови – празен од, $I_2 = 0$

Режимот на празен од кај долгите преносни водови е ретка, но многу непријатна и непожелна појава: $U_2 > U_1$ – Ферантиев ефект.

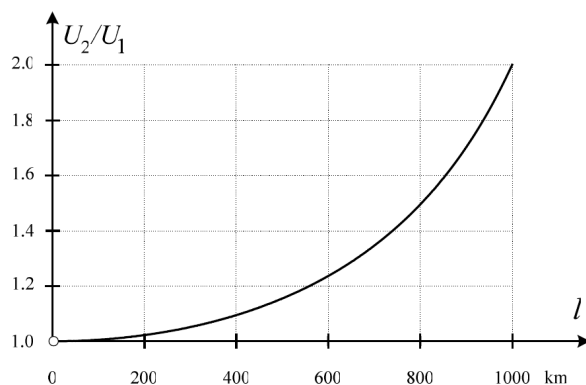
$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l \Rightarrow \underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\cos \beta l} \Rightarrow U_2 > U_1$$

$$\underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \sin \beta l$$

На почетокот од водот тече струја која има чисто капацитивен карактер, во режимот на празен од водот произведува реактивна моќност

$$Q_0 = \text{Imag}(\sqrt{3} \underline{U}_1 \underline{I}_1^*) = \frac{U_1^2}{Z_c} \text{tg } \beta l$$

Ферантиев ефект кај долги неоптоварени водови



Пример 2

Да се реши примерот 1 така што ќе се смета дека водот е идеален и има $r = 0$. Моќноста на крајот од водот е еднаква на неговата природна моќност. Што ќе се случи ако водот е долг 500 km?

programi/primer_2_1_idealен.m

```

1 clear
2 z = 1j*0.422;
3 y = 1j*2.62e-6;
4 U2 = 220;
5 l = 400;
6 Zc = sqrt(z/y)
7 gama = sqrt(z*y)
8 Sn2 = U2^2/conj(Zc);
9 S2 = Sn2
10 U1 = U2*(cosh(gama*l) + conj(S2/Sn2)*sinh(gama*l))
11 U1_modul = abs(U1)
12 U1_agol = angle(U1)/pi*180

```

```

>> primer_2_1_idealен
Zc =
    401.3337
gama =
    0.0000 + 0.0011i
S2 =
    120.5979
U1 =
    2.0083e+02 + 8.9827e+01i
U1_modul =
    220
U1_agol =
    24.0985

```

» 🔍

MT (ПЕЕС)

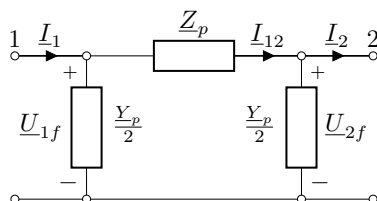
ВНМС

Скопје, 2019

22 / 45

Параметри на точната π -заменска шема

При анализите најчесто не интересираат само приликите (напоните и струите) на краевите на водовите. Поради тоа е погодно тие да бидат претставени со π -заменски шема.



$$\underline{U}_{1f} = \underline{U}_{2f} + \underline{Z}_p \underline{I}_{12} = \underline{U}_{2f} + \underline{Z}_p \left(\underline{I}_2 + \frac{\underline{Y}_p}{2} \underline{U}_{2f} \right)$$

$$\underline{U}_1 = \left(1 + \frac{\underline{Z}_p \underline{Y}_p}{2} \right) \underline{U}_2 + \sqrt{3} \underline{Z}_p \underline{I}_2$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cosh \underline{\gamma} l + \sqrt{3} \underline{Z}_c \underline{I}_2 \sinh \underline{\gamma} l$$

» 🔍

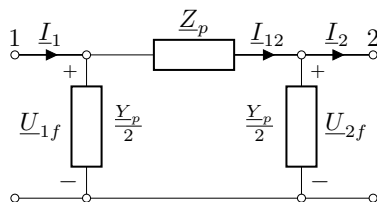
MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

23 / 45

Параметри на точната π -заменска шема



$$1 + \frac{\underline{Z}_p \underline{Y}_p}{2} = \cosh \underline{\gamma} l$$

$$\underline{Z}_p = \underline{Z}_c \sinh \underline{\gamma} l$$

$$\frac{\underline{Y}_p}{2} = \frac{\cosh \underline{\gamma} l - 1}{\underline{Z}_p} = \frac{\cosh \underline{\gamma} l - 1}{\underline{Z}_c \sinh \underline{\gamma} l} = \frac{1}{\underline{Z}_c} \operatorname{tgh} \frac{\underline{\gamma} l}{2}$$

» 🔍

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

24 / 45

Упростена π -заменска шема

Упростени изрази за приближно определување на π -заменска шема за случај кога должината $l \leq 1000$ km. Хиперболичните функции се разложуваат во ред и притоа се уважуваат само првите два члена од редот.

$$\underline{Z}_p = k_r \cdot (r \cdot l) + jk_x \cdot (x \cdot l)$$

$$\frac{\underline{Y}_p}{2} = k_b \cdot (b \cdot l)$$

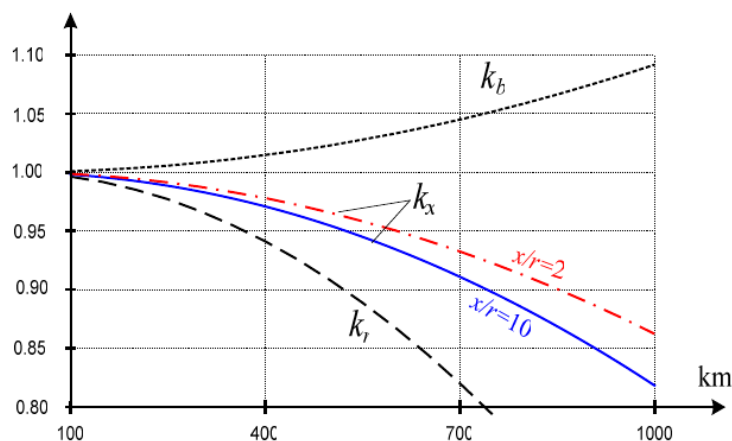
Кенелиеви коефициенти

$$k_r = 1 - xb \frac{l^2}{3}$$

$$k_x = 1 - \left(xb - \frac{b}{x} r^2 \right) \frac{l^2}{6} \approx 1 - xb \frac{l^2}{6}$$

$$k_b = 1 - xb \frac{l^2}{12}$$

Зависност на Кенелиевите коефициенти од должината на водот



Зависност на Кенелиевите коефициенти од должината на водот

l (km)	k_r	k_x	k_b
100	0,99633	0,99817	1,00091
150	0,99175	0,99588	1,00206
200	0,98533	0,99267	1,00367
250	0,97708	0,98854	1,00573
300	0,96700	0,98350	1,00825
350	0,95508	0,97754	1,01123
400	0,94133	0,97067	1,01467
450	0,92575	0,96288	1,01856
500	0,90833	0,95417	1,02292
550	0,88908	0,94454	1,02773
600	0,86800	0,93400	1,03300
650	0,84508	0,92254	1,03873
700	0,82033	0,91017	1,04492
750	0,79375	0,89688	1,05156
800	0,76533	0,88267	1,05867
850	0,73508	0,86754	1,06623
900	0,70300	0,85150	1,07425
950	0,66908	0,83454	1,08273
1000	0,63333	0,81667	1,09167

Пример 3

Пример 2.2 од книгата: 220 kV преносен вод со должина $l = 400$ km ги има следните карактеристики (пример 2.1): $z = (0,09 + j0,422) \Omega/\text{km}$ и $y = j2,62 \mu\text{S}/\text{km}$. Да се одредат параметрите на точната и приближната π -заменска шема на дадениот вод.

Приближна π -заменска шема

$$\underline{Z} = z \cdot l = (0,09 + j0,422) \cdot 400 = (36 + j168,8) \Omega$$
$$\underline{Y}/2 = j \cdot bl/2 = j \cdot 2,62 \cdot 400/2 = j524 \mu\text{S}$$

Точна π -заменска шема

$$\underline{Z}_p = \underline{Z}_c \sinh \underline{\gamma} l = (33,905 + j164,087) \Omega$$
$$\frac{\underline{Y}_p}{2} = \frac{\cosh \underline{\gamma} l - 1}{\underline{Z}_c \sinh \underline{\gamma} l} = (1,707 + j531,857) \mu\text{S}$$

Пример 3

programi/primer_2_2.m

```
1 clear
2 z = 0.09 + 1j*0.422;
3 y = 1j*2.62e-6;
4 l = 400;
5 Z = z*l
6 Y_polovina = y*l/2
7 Zc = sqrt(z/y);
8 gama = sqrt(z*y);
9 Zp = Zc*sinh(gama*l)
10 Yp_polovina = 1/Zc*(cosh(gama*l)-1)/sinh(gama*l)
```

```
>> primer_2_2
Z =
 3.6000e+01 + 1.6880e+02i
Y_polovina =
 0.0000e+00 + 5.2400e-04i
Zp =
 3.3905e+01 + 1.6409e+02i
Yp_polovina =
 1.7073e-06 + 5.3186e-04i
```

Пример 4

Пример 2.3 од книгата: Идеален вод со должина $l = 800$ km работи во празен од. Напонот на почетокот на водот се држи на константна вредност U_1 . Да се одреди распределбата на напонот и струјата долж водот.

$$\underline{I}_2 = 0$$
$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l$$
$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\cos \beta l}$$

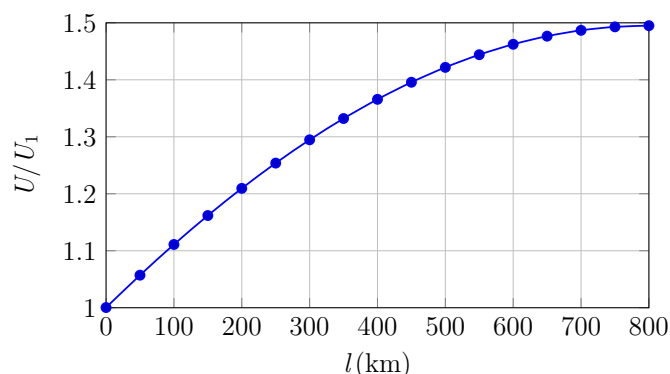
$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cos \beta(l-x) = \frac{\underline{U}_1}{\cos \beta l} \cos \beta(l-x)$$

$$\underline{I} = j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \sin \beta(l-x) = j \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_c \cos \beta l} \sin \beta(l-x)$$

Пример 4

$$\beta l = 0,06 \cdot 800 = 48^\circ$$

$$\frac{U}{U_1} = \frac{\cos \beta(l-x)}{\cos \beta l} = \frac{\cos(48^\circ - 0,06 \cdot x)}{\cos 48^\circ} = 1,495 \cdot \cos(48^\circ - 0,06 \cdot x)$$



МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

31 / 45

Задача 1

Задача 2.3 од книгата: Да се пресмета вредноста на напонот на крајот од вод чија должина изнесува $l = 800$ km и чија карактеристична импеданса изнесува $Z_c = 370 \Omega$. Пресметките да се извршат:

- со занемарување на активната отпорност на водот;
- со нејзиното уважување, ако е $r = 0,06 \Omega/\text{km}$.

a)

$$Z_c = \sqrt{\frac{x}{b}} \quad \beta = \sqrt{xb}$$

$$x = \beta Z_c = \frac{0,06 \cdot \pi}{180} \cdot 370 = 0,388 \Omega/\text{km}$$

$$b = \frac{x}{Z_c^2} = \frac{0,388}{370^2} = 2,83 \mu\text{S}/\text{km}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

32 / 45

Задача 1

a)

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos \beta l} = \frac{1}{\cos 800 \cdot 0,06^\circ} = 1,495$$

б)

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\frac{r + jx}{jb}} = \sqrt{\frac{0,06 + j0,388}{j2,83 \cdot 10^{-6}}} = (0,081 + j1,05) \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{k} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cosh \underline{\gamma} l} = \frac{1}{[\cosh(0,081 + j1,05) \cdot 10^{-3} \cdot 800]} = 1,4878 - j0,1072$$

$$k = \sqrt{1,4878^2 + 0,1072^2} = 1,492$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

33 / 45

Задача 1

programi/zadaca_2_3.m

```
1 clear
2 Zc = 370;
3 beta = 0.06/180*pi;
4 l = 800;
5 x = Zc*beta
6 b = x/Zc^2
7 disp('a');
8 gama = 1j*beta
9 k = 1/cosh(gama*l)
10 disp('b');
11 r = 0.06;
12 z = r + 1j*x;
13 y = 1j*b;
14 gama = sqrt(z*y)
15 k = 1/cosh(gama*l)
16 k_modul = abs(k)
```

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

34 / 45

Задача 2

Задача 2.6 од книгата: Вод со позната должина l напојува потрошувач со чисто активно оптоварување $P_2 = k \cdot P_N$. Да се определи зависноста на напонот U_2 од степенот на оптовареноста на водот k , ако напонот на почетокот од водот U_1 се одржува на константна вредност. Во пресметките водот да се третира како идеален.

$$U_1 = U_2(\cos \beta l + jk \cdot \sin \beta l)$$

$$U_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\cos^2 \beta l + k^2 \sin^2 \beta l}}$$

$k = \frac{P_2}{P_N}$	U_2/U_1 $l = 300 \text{ km}$	U_2/U_1 $l = 500 \text{ km}$
0,00	1,052	1,155
0,25	1,048	1,143
0,50	1,038	1,110
0,75	1,022	1,033
1,00	1,000	1,000
1,50	0,945	0,873
2,00	0,882	0,756

MT (ПЕЕС)

ВНМС

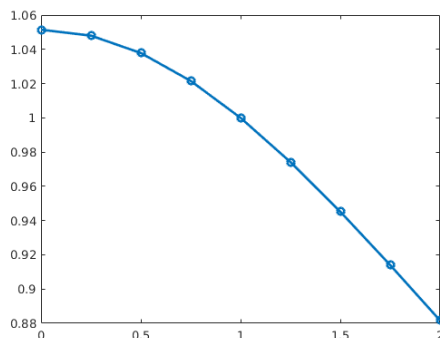
Скопје, 2019

35 / 45

Задача 2

programi/zadaca_2_6.m

```
1 clear
2 beta = 0.06/180*pi;
3 l = 300;
4 k = (0:0.25:2)';
5 f = 1./sqrt(cos(beta*l)^2 + k.^2*sin(beta*l)^2);
6 tabela = [k f]
7 plot(k,f, '-o', 'LineWidth', 2)
```



MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

36 / 45

Задача 3

Задача 2.8 од книгата: Даден е идеален вод долг $l = 250$ km, со карактеристична импеданција $Z_c = 350 \Omega$. Напонот на почетокот на водот изнесува $U_1 = 380$ kV и се држи на константна вредност, независно од неговиот режим на работа.

- Да се одреди напонот на крајот од водот и струјата на почетокот од водот во случајот кога водот работи во режимот на празен од. Колкава ќе биде реактивната моќност што водот ја произведува во тој случај?
- Колкава треба да биде реактанцијата на реакторот X_p , приклучена на крајот од водот, за да биде струјата на почетокот од водот еднаква на нула. Колкав е напонот U_2 и моќноста S_2 во овој случај?
- Да се одреди законот на измена на напонот долж водот $U(x)$ за разни вредности на реактансата X_p . Колкава треба да биде реактанцијата X_p за да бидат напоните U_1 и U_2 еднакви меѓу себе?

MT (ПЕЕС) ВНМС Скопје, 2019 37 / 45

Задача 3а

$$\beta l = 0,06^\circ \cdot 250 = 15^\circ$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\cos \beta l} = \frac{380}{\cos 15^\circ} = 393,4 \text{ kV}$$

$$\underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \sin \beta l = j \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{tg} \beta l$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= \sqrt{3} \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = \sqrt{3} \underline{U}_1 \left(j \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{tg} \beta l \right)^* = -j \frac{\underline{U}_1^2}{Z_c} \operatorname{tg} \beta l = \\ &= -j \frac{380^2}{\sqrt{3} \cdot 350} \operatorname{tg} 15^\circ = -j110,55 \text{ MVA} \end{aligned}$$

MT (ПЕЕС) ВНМС Скопје, 2019 38 / 45

Задача 3б

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \sin \beta l + \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot j X_p} \cos \beta l = j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sin \beta l}{Z_c} - \frac{\cos \beta l}{X_p} \right) = 0 \\ \frac{\sin \beta l}{Z_c} - \frac{\cos \beta l}{X_p} &= 0 \end{aligned}$$

$$X_p = \frac{Z_c}{\operatorname{tg} \beta l} = \frac{350}{\operatorname{tg} 15^\circ} = 1306,22 \Omega$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j \sqrt{3} Z_c \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot j X_p} \sin \beta l = \underline{U}_2 \left(\cos \beta l + \frac{Z_c}{X_p} \sin \beta l \right)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 (\cos \beta l + \operatorname{tg} \beta l \cdot \sin \beta l) = \frac{\underline{U}_2}{\cos \beta l}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \cos \beta l = 380 \cdot \cos 15^\circ = 367,05 \text{ kV}$$

$$\underline{S}_2 = \sqrt{3} \underline{U}_2 \underline{I}_2^* = \sqrt{3} \underline{U}_2 \frac{\underline{U}_2^*}{-j X_p} = j \frac{\underline{U}_2^2}{X_p} = j \frac{367,05^2}{1306,22} = j103,14 \text{ MVA}$$

MT (ПЕЕС) ВНМС Скопје, 2019 39 / 45

Задача 3в

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j\sqrt{3}Z_c \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot jX_p} \sin \beta l$$
$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left(\cos \beta l + \frac{Z_c}{X_p} \sin \beta l \right)$$
$$\cos \beta l + \frac{Z_c}{X_p} \sin \beta l = 1$$
$$X_p = \frac{Z_c \sin \beta l}{1 - \cos \beta l} = \frac{350 \cdot \sin 15^\circ}{1 - \cos 15^\circ} = 2658,51 \Omega$$

← □ ▶ ← ◀ ▶ ← ≡ ▶ ← ≡ ▶ ≡ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

40 / 45

Задача 4

Задача 2.11 од книгата: Идеален вод со должина $l = 1000 \text{ km}$ и со карактеристична импеданција $Z_c = 300 \Omega$ работи во режим на празен од. Напонот на почетокот од водот се држи на константна вредност $U_A = 500 \text{ kV} = \text{const.}$ За да се намали реактивната моќност што водот ја генерира во режимот на празен од и за да се ограничат вредностите на напонот долж водот, се предвидува на средината од водот ($x = l/2$) да се приклучи реактор, чија реактанција ќе изнесува $X_p = 450 \Omega$. Да се одредат напоните U_B и U_C во средината и на крајот од водот

- пред приклучувањето на реакторот,
- по приклучувањето на реакторот.

Колкави се реактивните моќности на почетокот од водот во овие два случаи?

← □ ▶ ← ◀ ▶ ← ≡ ▶ ← ≡ ▶ ≡ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

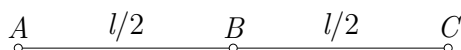
ВНМС

Скопје, 2019

41 / 45

Задача 4а

$$\beta l = 0,06^\circ \cdot 1000 = 60^\circ$$



$$U_A = U_C \cos \beta l$$
$$U_C = \frac{U_A}{\cos \beta l} = \frac{500}{\cos 60^\circ} = 1000 \text{ kV}$$
$$U_B = U_C \cos \frac{\beta l}{2} = 1000 \cos 30^\circ = 866,03 \text{ kV}$$

← □ ▶ ← ◀ ▶ ← ≡ ▶ ← ≡ ▶ ≡ 🔍 ↻

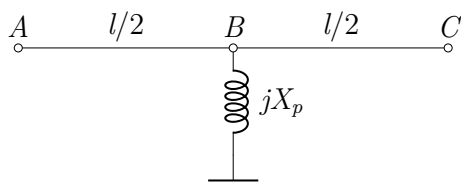
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

42 / 45

Задача 4в



$$\underline{U}_B = \underline{U}_C \cos \frac{\beta l}{2} \quad \underline{I}_B = j \frac{\underline{U}_C}{\sqrt{3} Z_c} \sin \beta l$$

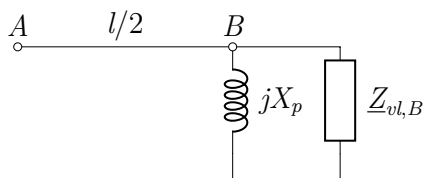
$$\underline{Z}_{vl,B} = \frac{\underline{U}_B}{\sqrt{3} \underline{I}_B} = -j \frac{\underline{U}_C \cos \frac{\beta l}{2}}{\sqrt{3} \cdot j \frac{\underline{U}_C}{\sqrt{3} Z_c}} = -j \frac{Z_c}{\operatorname{tg} \frac{\beta l}{2}} = -j \frac{300}{\operatorname{tg} 30^\circ} = -j 519,615 \Omega$$

MT (ПЕЕС)

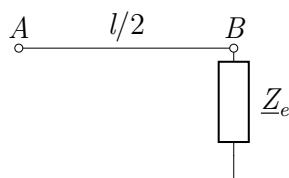
ВНМС

Сконье, 2019 43 / 45

Задача 4в



$$\underline{Z}_e = \frac{jX_p \cdot \underline{Z}_{vl,b}}{jX_p + \underline{Z}_{vl,b}} = \frac{j450 \cdot (-j519,615)}{j450 - j519,615} = j3358,856 \Omega$$

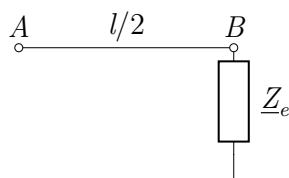


MT (ПЕЕС)

ВНМС

Сконье, 2019 44 / 45

Задача 4в



$$\underline{U}_A = \underline{U}_B \cos \frac{\beta l}{2} + j\sqrt{3} Z_c \frac{\underline{U}_B}{\sqrt{3} Z_e} \sin \frac{\beta l}{2} = \underline{U}_B \left(\cos \frac{\beta l}{2} + j \frac{Z_c}{Z_e} \sin \frac{\beta l}{2} \right)$$

$$\underline{U}_B = \frac{\underline{U}_A}{\cos \frac{\beta l}{2} + j \frac{Z_c}{Z_e} \sin \frac{\beta l}{2}} = \frac{500}{\cos 30^\circ + j \frac{300}{3358,856} \sin 30^\circ} = 549,04 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_C \cos \frac{\beta l}{2} \Rightarrow \underline{U}_C = \frac{\underline{U}_B}{\cos \frac{\beta l}{2}} = \frac{549,04}{\cos 30^\circ} = 633,98 \text{ kV}$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Сконье, 2019 45 / 45

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

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 1 / 71

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

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 2 / 71

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.

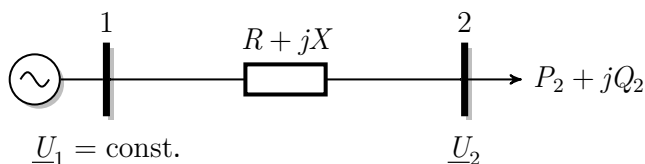
◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 3 / 71

Врска меѓу Q и U



$$\Delta U = |U_1| - |U_2| \approx \Delta U_d = \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2}$$

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.

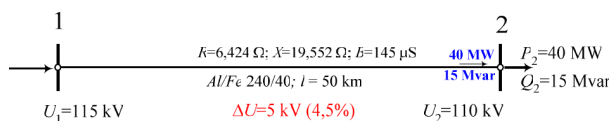
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

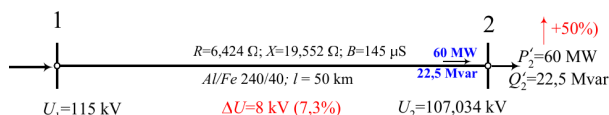
Скопје, 2019 4 / 71

Пример 1

Разгледуваме режим на работа на еден 110 kV вод со $R = 6,424 \Omega$, $X = 19,552 \Omega$, $B = 145 \mu S$, $l = 50 \text{ km}$, како на сликата. Водот напојува потрошувач со моќност $S_2 = (40 + j15) \text{ MVA}$ 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 $U_2 = 107,034 \text{ kV}$.



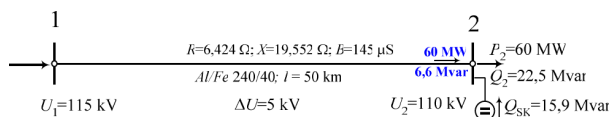
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 5 / 71

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 Mvar.



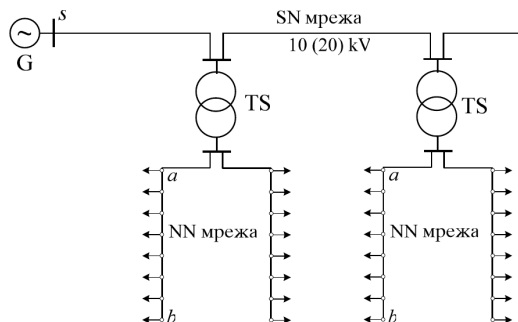
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 6 / 71

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.

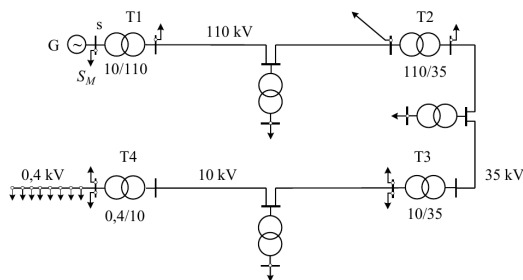
MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

7 / 71

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 $2/3 \cdot 30 = 20\%$ што е премногу.
- Регулацијата на напонот кај електричните централи во големите ЕЕС е само помошно, а не основно средство за регулација на напоните.

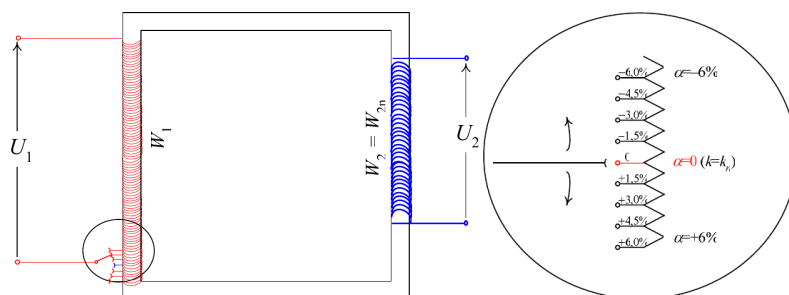
MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

8 / 71

Регулација на напон со трансформатори



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

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

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

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

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

9 / 71

Начини за менувањето на коефициентот на трансформација

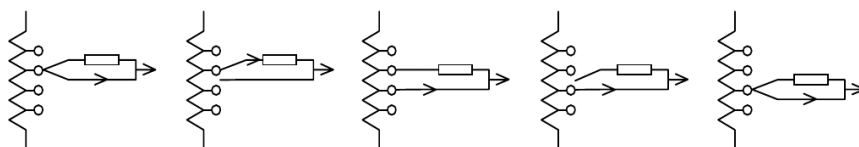
- Регулација во безнапонска состојба – позицијата на преклопката се менува кога трансформаторот е исклучен од мрежата.
 - ▶ Се применува кај дистрибутивните трансформатори со помали моќности и тоа ретко, т.е. сезонски.
- Регулација под товар – позицијата на преклопката се менува кога трансформаторот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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 10 / 71

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.

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 11 / 71

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

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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 12 / 71

Регулација во безнапонска состојба

5. Пресметка на најповолна позиција на преклопката

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

6. Заокружување позиција на преклопката на најблиската постоечка вредност



7. Пресметка на коефициентот на трансформација

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

8. Проверка на напонските прилики на секундарот

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

Пример 2

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

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

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

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

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

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

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

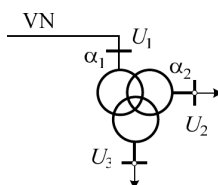
$$U_{2(\max)} = \frac{U'_{2(\max)}}{k} = \frac{31,6}{85,3125} = 0,371 \text{ kV}$$

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

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

MT (ПЕЕС) ВНС Сконје, 2019 16 / 71

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

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

MT (ПЕЕС) ВНС Сконје, 2019 17 / 71

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 α_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

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

MT (ПЕЕС) ВНС Сконје, 2019 18 / 71

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 $k_{13(\max)}$ и $k_{13(\min)}$ со коишто трансформаторот треба да работи во режимот на максимално и минимално оптоварување.

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

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

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

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

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

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

Navigation icons

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.

Navigation icons

Пример 3

Ќе пробаме со $\alpha_2 = 0$

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

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

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

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

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

Navigation icons

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 $\alpha_2 = +2,5\%$.

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

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

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

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

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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 25 / 71

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.

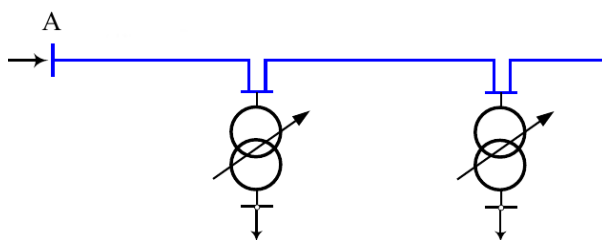
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 26 / 71

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.



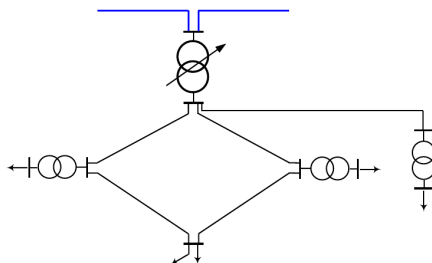
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 27 / 71

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.



МТ (ПЕЕС)

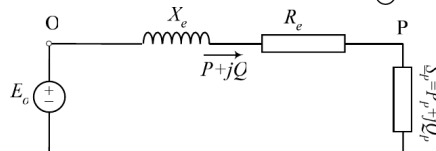
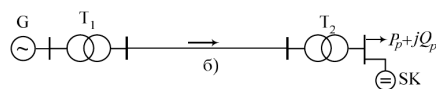
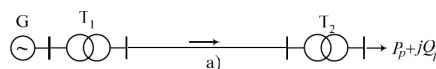
ВНМС

Скопје, 2019

28 / 71

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



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

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

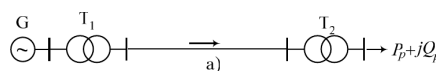
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

29 / 71

Пример 4



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

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

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

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

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

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

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

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

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

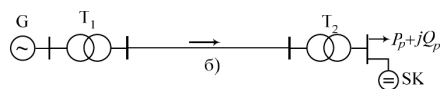
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

30 / 71

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

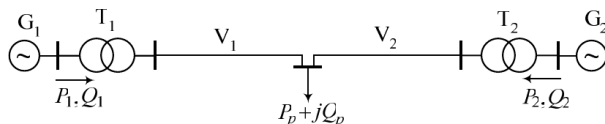
$$U'_p = U_p + \frac{Q_{SK} \cdot X_e}{U_n}$$

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.

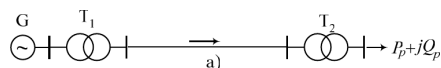
Забелешка: [слајдовите од 32 до 42 може да се прескојнат.](#)

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

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

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

$U - Q$ 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 ΔQ и мерење на промената на напонот ΔU .

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

- 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 $U = U_n$

$$I_{K3} = \frac{U_n}{\sqrt{3}X_e} \quad S_{K3} = \sqrt{3}U_n I_{K3} = \frac{U_n^2}{X_e}$$
$$K_U = \frac{2U - U_1}{X_e} = \frac{2U_n - U_n}{X_e} = \frac{U_n}{X_e}$$
$$\boxed{K_U = \frac{S_{K3}}{U_n} = \sqrt{3}I_{K3}}$$

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 kV и обратно.

Ако сакаме напонот во јазелот да го покачимо за 5 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: $S_{k3} = 2500 \text{ MVA}$.

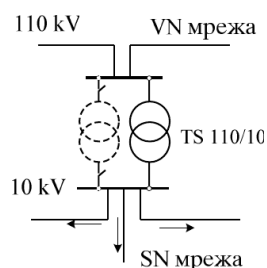
- Да се пресметаат коефициентите k_{U1} и k_{U2} за високонапонската (примарната) собирница 1 и среднонапонската (секундарната) собирница 2 и да се определат $U-Q$ карактеристиките за обете собирници.
- Да се процени колкави ќе бидат новите вредности на напоните U_1 и U_2 ако дојде до испад на еден од 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.

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 37 / 71

Пример 5



Податоци за трансформаторот

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

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

$$u_k = 12\%$$

$$i_0 = 0,2\%$$

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

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

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

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

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

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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 38 / 71

Пример 5а

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

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

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

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

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

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

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

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

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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 39 / 71

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 5б

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

$$\Delta U_1 = \frac{\Delta Q_1}{k_{U1}} = \frac{8}{22,727} = 0,352 \text{ kV}$$
$$\Delta U_2 = \frac{\Delta Q_2}{k_{U2}} = \frac{8}{41,4915} = 0,193 \text{ kV}$$
$$U_1 = 111,892 + 0,352 = 112,244 \text{ kV}$$
$$U_2 = 10,2 + 0,193 = 10,393 \text{ kV}$$

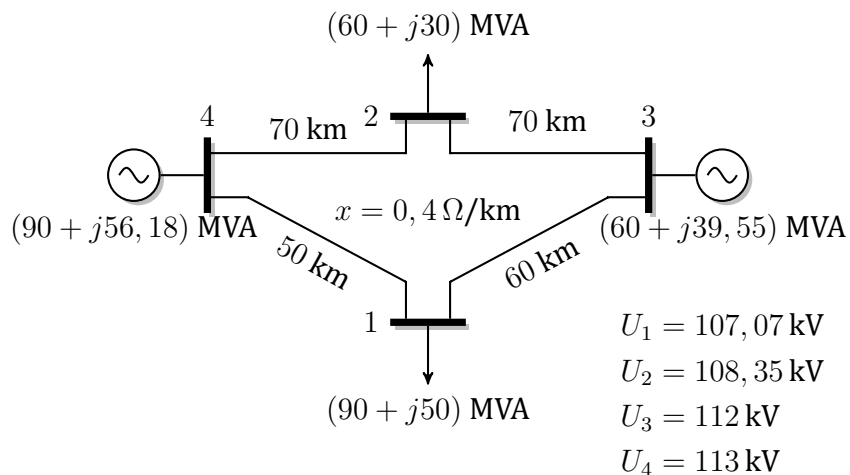
Пример 5в

$$X_{EES} = \frac{U_n^2}{S_{k3}} = \frac{110^2}{2500} = 4,84 \Omega \quad X''_{EES} = \frac{4,84}{10,4762} = 0,0441 \Omega$$
$$X'_{2ek} = X_{EES} + X_T/2 = 4,84 + 11,467 = 16,307 \Omega$$
$$X_{2ek} = \frac{X'_{2ek}}{k_n^2} = \frac{16,307}{10,4762^2} = 0,1486 \Omega$$

$$k_{U1} = \frac{U_{1n}}{X_{EES}} = \frac{110}{4,84} = 22,727 \text{ kA} \quad (\text{без промени})$$
$$k_{U2} = \frac{U_{2n}}{X_{2ek}} = \frac{10,5}{0,1486} = 70,668 \text{ kA}$$

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 Z

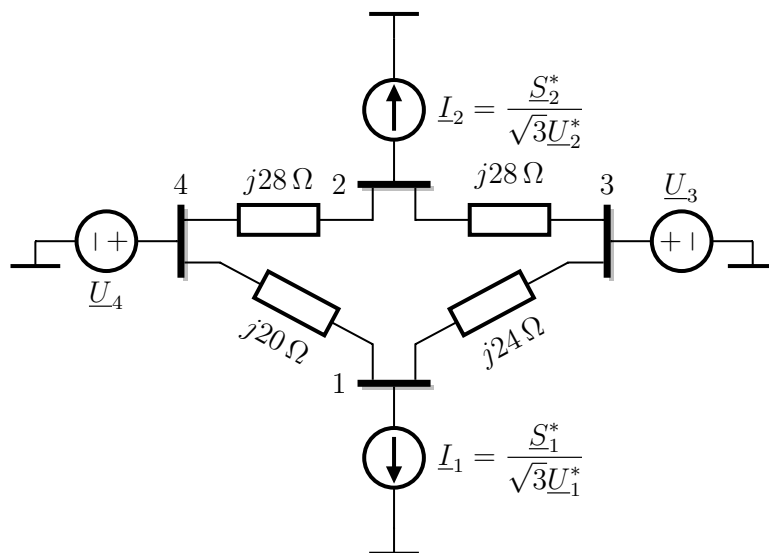


MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 43 / 71

Пример 6 – подготовка за матрица Z

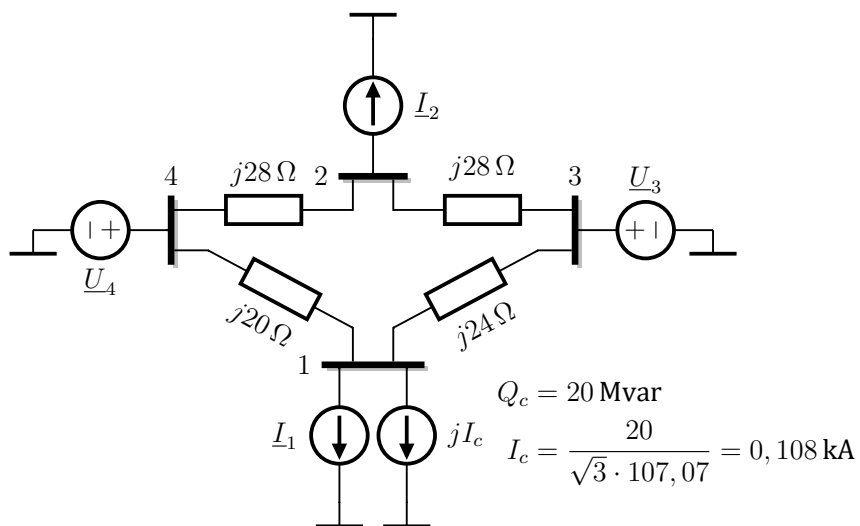


MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 44 / 71

Пример 6 – подготовка за матрица Z

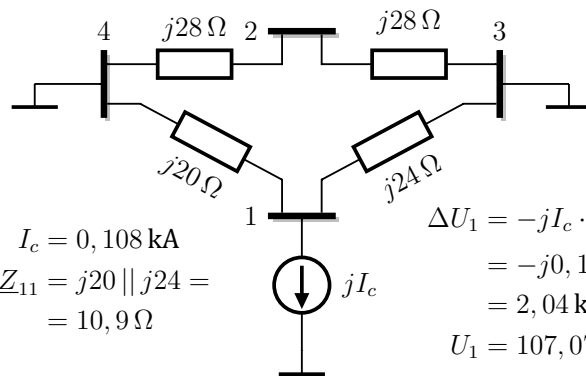


MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 45 / 71

Пример 6 – подготовка за матрица \underline{Z}



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

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

$$= 10,9 \Omega$$

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

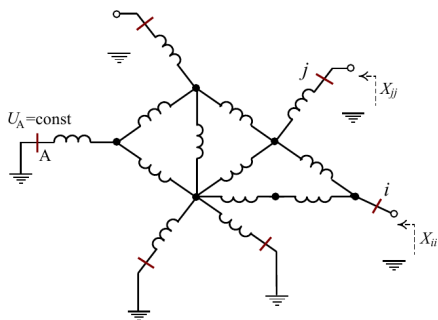
$$= -j0,108 \cdot j10,9 \cdot \sqrt{3}$$

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

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

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.



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

Матрица \underline{Z}

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

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

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

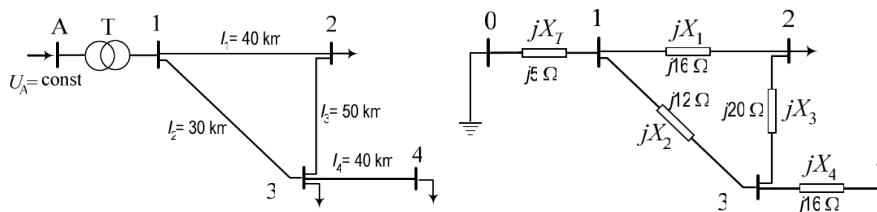
$$\Delta U_j = \frac{X_{ij}}{U_i} \cdot \Delta Q_i \approx \frac{X_{ij}}{U_n} \cdot \Delta Q_i$$

- Ако во секој од јазлите вршме 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{Z} за мрежата од сликата ако е познато дека $X_T = 5 \Omega$, а сите водови имаат $x = 0,4 \Omega/\text{km}$.



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

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

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

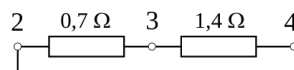
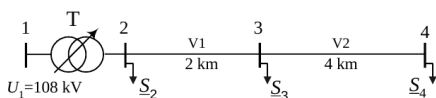
Z4 =
 5.0000
 9.0000
14.0000
30.0000

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

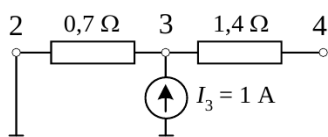
МТ (ПЕЕС) ВНМС Скопје, 2019 52 / 71

Пример 9

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

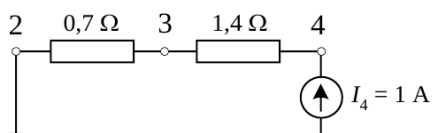


Начин 1:



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

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



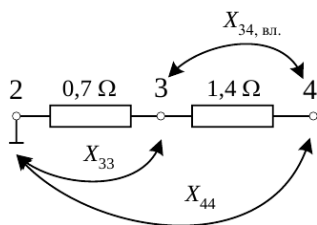
$$X_{44} = \frac{U_4}{I_4} = \frac{2,7}{1} = 2,7 \Omega$$

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

МТ (ПЕЕС) ВНМС Скопје, 2019 53 / 71

Пример 9

Начин 2:



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

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

$$X_{34,вл.} = 1,4 \Omega$$

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

МТ (ПЕЕС) ВНМС Скопје, 2019 54 / 71

Пример 9

Начин 3:

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

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

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

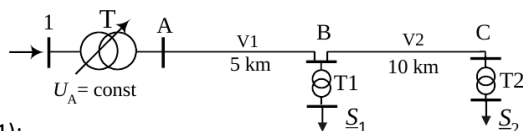
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

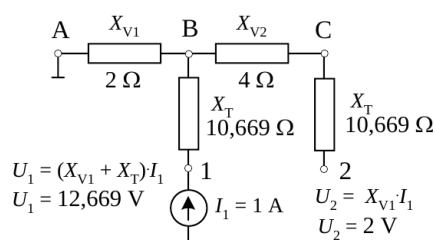
Скопје, 2019 55 / 71

Пример 10

Да се одреди матрицата \mathbf{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):



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

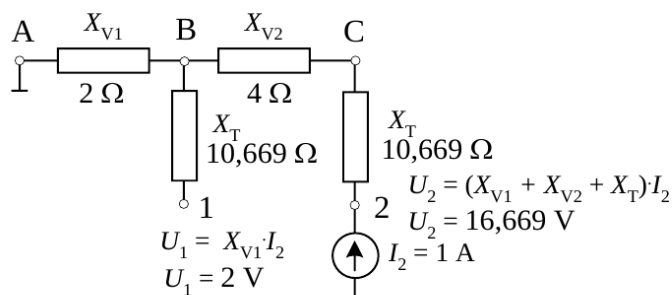
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 56 / 71

Пример 10

Начин 1 (јазел 2):



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

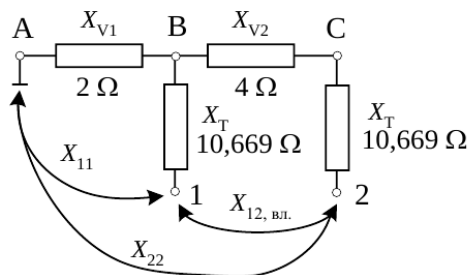
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 57 / 71

Пример 10

Начин 2:



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

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

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

МТ (ПЕЕС)

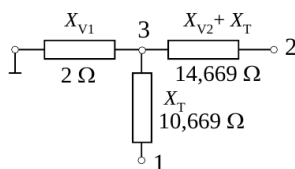
ВНМС

Скопје, 2019

58 / 71

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

```

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

59 / 71

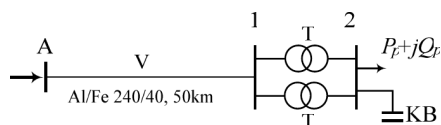
Пример 11

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 $110 \pm 4 \times 2,5\% / 11 \text{ kV} / \text{kV}$, 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 $U_{2o(\min)} = 10,0 \text{ kV}$.

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

60 / 71

Пример 11

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

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

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

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

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

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

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

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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

61 / 71

Пример 11

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

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

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

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

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

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

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

МТ (ПЕЕС)

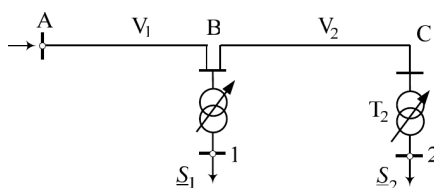
ВНМС

Скопје, 2019

62 / 71

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 $U_{1o} = U_{2o} = U_n = 10 \text{ kV}$.

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

63 / 71

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).

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

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

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

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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

64 / 71

Пример 12

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

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

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

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

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

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

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

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

МТ (ПЕЕС)

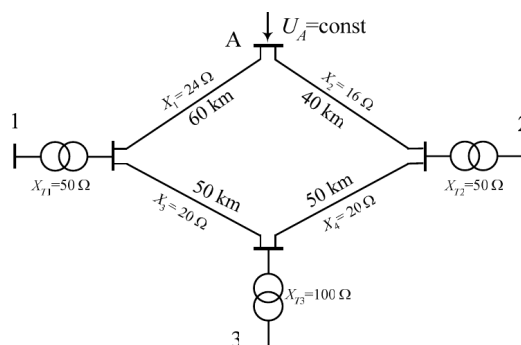
ВНМС

Скопје, 2019

65 / 71

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 $x = 0,4 \Omega/\text{km}$.



МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

66 / 71

Пример 13

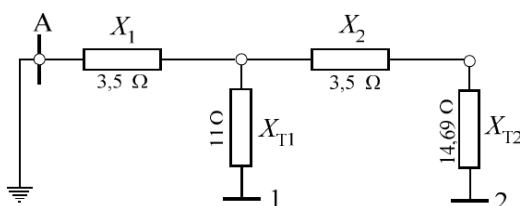
$$\begin{aligned}
 X_{11} &= X_{T1} + X_1 \parallel (X_2 + X_3 + X_4) = 66,8 \Omega \\
 X_{22} &= X_{T2} + X_2 \parallel (X_1 + X_3 + X_4) = 62,8 \Omega \\
 X_{33} &= X_{T3} + (X_1 + X_3) \parallel (X_2 + X_4) = 119,8 \Omega \\
 X_{12,вл.} &= X_{T1} + (X_1 + X_2) \parallel (X_3 + X_4) + X_{T2} = 120 \Omega \\
 X_{13,вл.} &= X_{T1} + X_3 \parallel (X_1 + X_2 + X_4) + X_{T3} = 165 \Omega \\
 X_{23,вл.} &= X_{T2} + X_4 \parallel (X_1 + X_2 + X_3) + X_{T3} = 165 \Omega \\
 X_{12} = X_{21} &= \frac{X_{11} + X_{22} - X_{12,вл.}}{2} = 4,8 \Omega \\
 X_{13} = X_{31} &= \frac{X_{11} + X_{33} - X_{13,вл.}}{2} = 10,8 \Omega \\
 X_{23} = X_{32} &= \frac{X_{22} + X_{33} - X_{23,вл.}}{2} = 8,8 \Omega
 \end{aligned}$$

Пример 14

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

Пример 15

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



Пример 15

$$\begin{aligned}X_{11} &= X_1 + X_{T1} = 14,5 \Omega \\X_{22} &= X_1 + X_2 + X_{T2} + X_2 = 21,69 \Omega \\X_{12} = X_{21} &= \frac{X_{11} + X_{22} - X_{12,вн.}}{2} = 3,5 \Omega\end{aligned}$$

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

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

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

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.

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

70 / 71

Пример 15

$$\begin{aligned}\Delta U_1 &= k_{T1} \cdot [U_{1o(\max)} - U_{1(\max)}] = 3,4125 \cdot (10 - 9,803) = 0,67 \text{ kV} \\ \Delta U_2 &= k_{T2} \cdot [U_{2o(\max)} - U_{2(\max)}] = 3,4125 \cdot (10 - 9,438) = 1,92 \text{ kV}\end{aligned}$$

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

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

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

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

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

71 / 71

Високонапонски мрежи и системи

Куси врски 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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 1 / 76

Вовед

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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 2 / 76

Причини за појава на кусите врски

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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 3 / 76

Причини за појава на кусите врски

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

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↺

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 4 / 76

Штетни последици од кусите врски

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

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↺

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 5 / 76

Видови на куси врски

- | | |
|--------------------------------|-----|
| ● еднофазни куси врски | 65% |
| ● двофазни куси врски | 10% |
| ● двофазни куси врски со земја | 20% |
| ● трифазни куси врски | 5% |

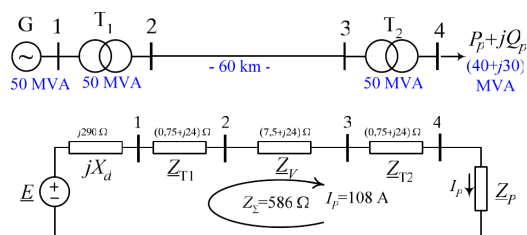
◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↺

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 6 / 76

Пример 1 – нормален работен режим



$$Z_P = \frac{U_n^2}{S_P^*} = \frac{110^2}{40 - j30} = (194 + j145) \Omega$$

$$Z_\Sigma = jX_d + Z_{T1} + Z_V + Z_{T2} + Z_P = 203 + j507 = 546 \cdot e^{j68^\circ} \Omega$$

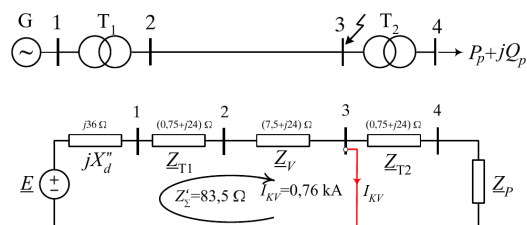
$$I_P = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z_\Sigma} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 546} = 0,116 \text{ kA}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 7 / 76

Пример 1 – куса врска



$$Z'_\Sigma = jX'_d + Z_{T1} + Z_V = 8,25 + j84 = 84,4 \cdot e^{j84^\circ} \Omega$$

$$I_P = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z'_\Sigma} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 84,4} = 0,752 \text{ kA} \approx 6,5 \cdot I_P$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 8 / 76

Облик на струјата на кусата врска

При кусата врска, во синхроните генератори се одвива сложен електромагнетен процес којшто се манифестира со промена на нивните внатрешни реактанции во многу широки граници. Поради тоа струјата на куса врска во преодниот период се менува по прилично сложен закон. Таа се состои од две компоненти

- наизменична $i_p(t)$
- еднонасочна или апериодична $i_a(t)$

Обликот на струјата на куса врска може приближно да се опише со равенката

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

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

I'' , I' , I се суптранзиентната, транзиентната и трајната струја на куса врска, T'_d , T_d суптранзиентната и транзиентната временска константа на придушување.

$$T'_d = 0,02 \div 0,04 \text{ s}$$

$$T_d = 1 \div 2 \text{ s}$$

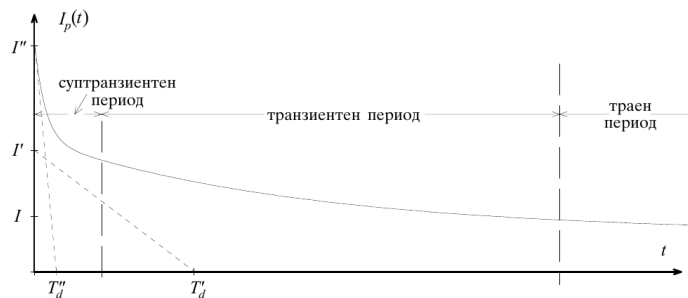
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 9 / 76

Облик на ефективната вредност на наизменичната компонента

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

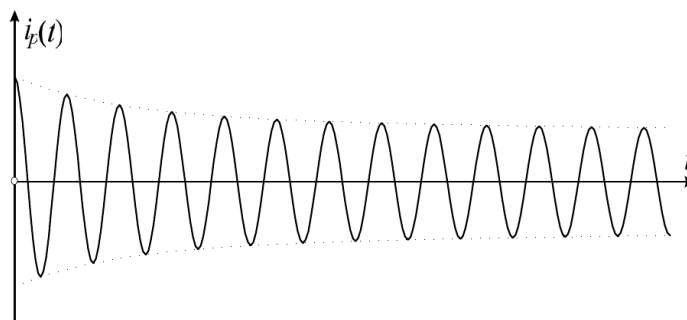


Упростување

- Суптранзиентен период $I_p(t) = I''$
- Транзиентен период $I_p(t) = I'$
- Траен период $I_p(t) = I$

Navigation icons

Наизменична компонента на струјата на куса врска



Navigation icons

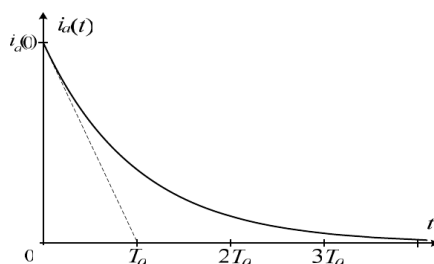
Еднонасочна компонента на струјата на куса врска

- Последица на магнетската инерција на статорските намотки на синхроните генератори и елементите од мрежата

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

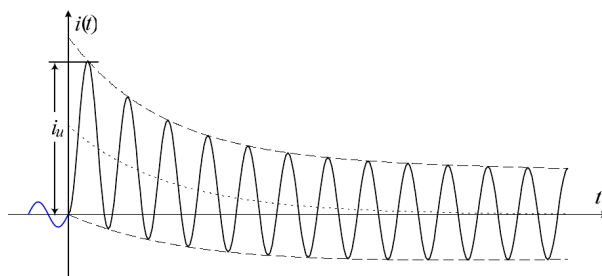
- Ако пред кусата врска системот бил во празен од

$$i_a(0) = \sqrt{2}I' \quad i_a(t) = i_a(0)e^{-t/T_a} \quad T_a = L_e/R_e \text{ малку поголема од } T_d''$$



Navigation icons

Осцилограм на струјата на куса врска



- Ударна струја на куса врска

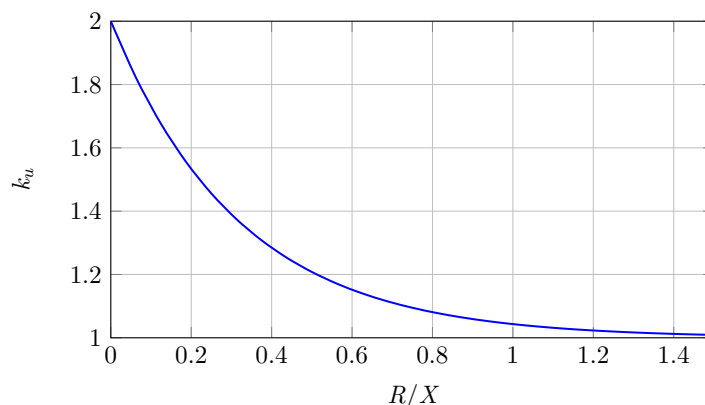
$$i_u = \sqrt{2}I'' \left(1 + e^{-0,01/T_a}\right) = \sqrt{2}k_u I''$$

- Ударен коефициент

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

Ударен коефициент

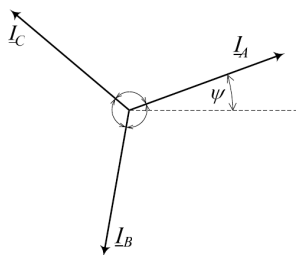
$$k_u = 1 + e^{-0,01/T_a} \quad T_a = \frac{X/\omega}{R} \quad \frac{1}{T_a} = \omega \frac{R}{X} = 100\pi \frac{R}{X}$$
$$k_u = 1 + e^{-\pi \cdot (R/X)}$$



Упростувања при анализите на кусите врски

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

Симетрични трифазни системи



директен редослед на фазите

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= I \cdot e^{j\psi} & \underline{I}_A &= I \\ \underline{I}_B &= I \cdot e^{j(\psi-2\pi/3)} & \underline{I}_B &= \underline{a}^2 \cdot I \\ \underline{I}_C &= I \cdot e^{j(\psi+2\pi/3)} & \underline{I}_C &= \underline{a} \cdot I \end{aligned}$$

$$\underline{a} = e^{j2\pi/3}$$

$$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \Rightarrow \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$$

$$\underline{a} = \underline{a}^4 = \underline{a}^7 = \dots = -1/2 + j\sqrt{3}/2$$

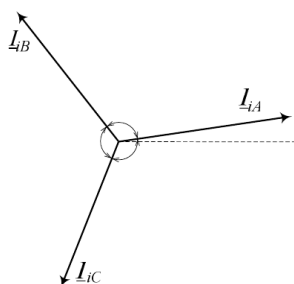
$$\underline{a}^2 = \underline{a}^5 = \underline{a}^8 = \dots = -1/2 - j\sqrt{3}/2$$

$$\underline{a}^3 = \underline{a}^6 = \underline{a}^9 = \dots = 1$$

Navigation icons

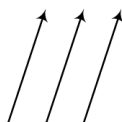
Несиметрични трифазни системи

Метод на **симетрични компоненти**: секој несиметричен трифазен систем на напони или струи може да се разложи во три трифазни симетрични системи од кои едниот има **директен**, другиот **инверзен** и третиот **нулти** редослед на фазите.



инверзен редослед на фазите

$$\underline{I}_{0A} = \underline{I}_{0B} = \underline{I}_{0C}$$



нулти редослед на фазите

Navigation icons

Симетрични компоненти

$$\begin{aligned} \underline{I}_{dA} &= \underline{I}_d & \underline{I}_{iA} &= \underline{I}_i & \underline{I}_{0A} &= \underline{I}_0 \\ \underline{I}_{dB} &= \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_d & \underline{I}_{iB} &= \underline{a} \cdot \underline{I}_i & \underline{I}_{0B} &= \underline{I}_0 \\ \underline{I}_{dC} &= \underline{a} \cdot \underline{I}_d & \underline{I}_{iC} &= \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_i & \underline{I}_{0C} &= \underline{I}_0 \end{aligned}$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{dA} + \underline{I}_{iA} + \underline{I}_{0A} = \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_0$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{dB} + \underline{I}_{iB} + \underline{I}_{0B} = \underline{a}^2 \underline{I}_d + \underline{a} \underline{I}_i + \underline{I}_0$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{dC} + \underline{I}_{iC} + \underline{I}_{0C} = \underline{a} \underline{I}_d + \underline{a}^2 \underline{I}_i + \underline{I}_0$$

Големините \underline{I}_d , \underline{I}_i и \underline{I}_0 се нарекуваат симетрични компоненти на несиметричниот трифазен систем (\underline{I}_A , \underline{I}_B и \underline{I}_C).

$$\underline{I}_d = (\underline{I}_A + \underline{a} \underline{I}_B + \underline{a}^2 \underline{I}_C) / 3$$

$$\underline{I}_i = (\underline{I}_A + \underline{a}^2 \underline{I}_B + \underline{a} \underline{I}_C) / 3$$

$$\underline{I}_0 = (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) / 3$$

Navigation icons

Симетрични компоненти

$$\mathbf{I}_f = \mathbf{F} \cdot \mathbf{I}_s$$

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{I}_f$$

$$\mathbf{I}_f = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad \mathbf{I}_s = \begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

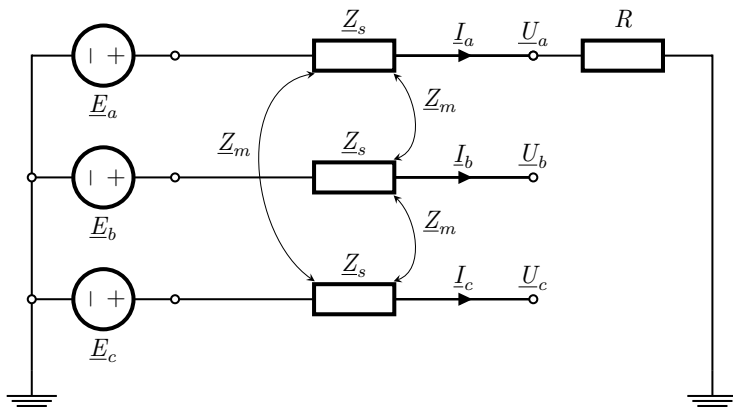
Пример 2

На сликата е прикажан симетричен трифазен вод со сопствени импеданции на фазите $\underline{Z}_s = j10 \Omega$ и меѓусебни импеданции $\underline{Z}_m = j5 \Omega$. Водот се напојува од симетричен трифазен генератор со напони на фазите $\underline{E}_a = E$, $\underline{E}_b = \underline{a}^2 \cdot E$ и $\underline{E}_c = \underline{a} \cdot E$, при што е $E = 230 \text{ V}$ и $\underline{a} = e^{j2\pi/3} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$. На крајот од водот само на фазата a е приклучен отпорник $R = 10 \Omega$, додека фазите b и c се отворени. Да се пресметаат напоните на сите три фази на крајот од водот \underline{U}_a , \underline{U}_b и \underline{U}_c , како и струите во фазите \underline{I}_a , \underline{I}_b и \underline{I}_c . Пресметките да се направат на два начина

- Решавајќи го колото во фазен домен сметајќи дека тоа се состои од 3 еднофазни генератори, 3 меѓусебно спрегнати импеданции и 1 отпорник,
- Решавајќи го колото со примена на симетрични компоненти.

Пример 2

$\underline{Z}_s = j10 \Omega$, $\underline{Z}_m = j5 \Omega$, $\underline{E}_a = E$, $\underline{E}_b = \underline{a}^2 \cdot E$, $\underline{E}_c = \underline{a} \cdot E$, $E = 230 \text{ V}$, $R = 10 \Omega$.

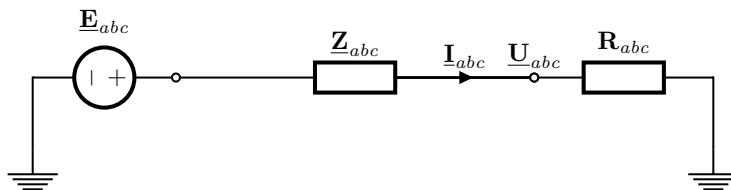


Пример 2а

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

$$\underline{\mathbf{Z}}_{abc} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j10 & j5 & j5 \\ j5 & j10 & j5 \\ j5 & j5 & j10 \end{bmatrix} \Omega$$

$$\underline{\mathbf{R}}_{abc} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 10^8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 10^8 \end{bmatrix} \Omega$$

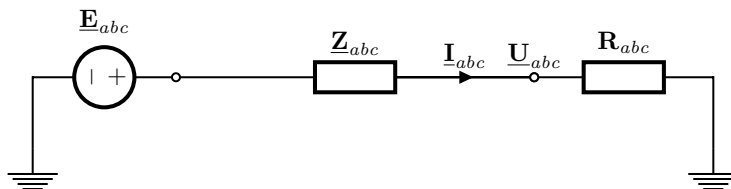


MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скронје, 2019 22 / 76

Пример 2а



$$\underline{\mathbf{E}}_{abc} = (\underline{\mathbf{Z}}_{abc} + \underline{\mathbf{R}}_{abc}) \cdot \underline{\mathbf{I}}_{abc}$$

$$\underline{\mathbf{I}}_{abc} = (\underline{\mathbf{Z}}_{abc} + \underline{\mathbf{R}}_{abc})^{-1} \cdot \underline{\mathbf{E}}_{abc} =$$

$$= \begin{bmatrix} 10 + j10 & j5 & j5 \\ j5 & 10^8 + j10 & j5 \\ j5 & j5 & 10^8 + j10 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 230 \\ -115 - j199,186 \\ -115 + j199,186 \end{bmatrix} =$$

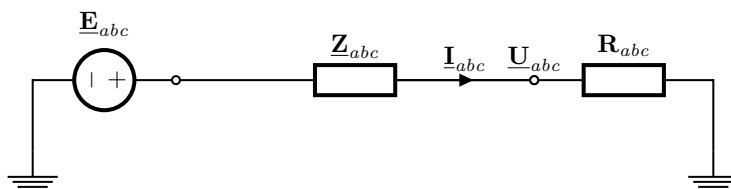
$$= \begin{bmatrix} 11,5 - j11,5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A}$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скронје, 2019 23 / 76

Пример 2а



$$\underline{\mathbf{U}}_{abc} = \underline{\mathbf{E}}_{abc} - \underline{\mathbf{Z}}_{abc} \cdot \underline{\mathbf{I}}_{abc} =$$

$$= \begin{bmatrix} 230 \\ -115 - j199,186 \\ -115 + j199,186 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} j10 & j5 & j5 \\ j5 & j10 & j5 \\ j5 & j5 & j10 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 11,5 - j11,5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 115 - j115 \\ -172,5 - j256,686 \\ -172,5 + j141,686 \end{bmatrix} \text{ V}$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скронје, 2019 24 / 76

Пример 26

$$\begin{aligned} \underline{U}_{abc} &= \underline{E}_{abc} - \underline{Z}_{abc} \cdot \underline{I}_{abc} \\ \underline{U}_{abc} &= \underline{F} \cdot \underline{U}_{dio} \quad \underline{E}_{abc} = \underline{F} \cdot \underline{E}_{dio} \quad \underline{I}_{abc} = \underline{F} \cdot \underline{I}_{dio} \\ \underline{F} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \\ \underline{F} \cdot \underline{U}_{dio} &= \underline{F} \cdot \underline{E}_{dio} - \underline{Z}_{abc} \cdot \underline{F} \cdot \underline{I}_{dio} \\ \underline{U}_{dio} &= \underline{E}_{dio} - \underline{F}^{-1} \cdot \underline{Z}_{abc} \cdot \underline{F} \cdot \underline{I}_{dio} \\ \underline{U}_{dio} &= \underline{E}_{dio} - \underline{Z}_{dio} \cdot \underline{I}_{dio} \\ \underline{Z}_{dio} &= \underline{F}^{-1} \cdot \underline{Z}_{abc} \cdot \underline{F} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s - \underline{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_s - \underline{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m \end{bmatrix} \\ \underline{Z}_d &= \underline{Z}_s - \underline{Z}_m = j5 \Omega \\ \underline{Z}_i &= \underline{Z}_s - \underline{Z}_m = j5 \Omega \\ \underline{Z}_o &= \underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m = j20 \Omega \end{aligned}$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 25 / 76

Пример 26

$$\begin{aligned} \underline{E}_{dio} &= \underline{F}^{-1} \cdot \underline{E}_{abc} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_o \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d \\ \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i \\ \underline{Z}_o \cdot \underline{I}_o \end{bmatrix} \end{aligned}$$

3 одделни равенки

$$\underline{I}_b = \underline{I}_o + a^2 \cdot \underline{I}_d + a \cdot \underline{I}_i = 0$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_o + a \cdot \underline{I}_d + a^2 \cdot \underline{I}_i = 0$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_o$$

$$\underline{I}_a = \underline{I}_o + \underline{I}_d + \underline{I}_i = 3 \cdot \underline{I}_d$$

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_o = \frac{\underline{I}_a}{3}$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 26 / 76

Пример 26

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

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

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

$$\underline{U}_o = -\underline{Z}_o \cdot \frac{\underline{I}_a}{3}$$

$$\underline{U}_a = \underline{U}_d + \underline{U}_i + \underline{U}_o = E - (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o) \cdot \frac{\underline{I}_a}{3}$$

$$\underline{U}_a = R \cdot \underline{I}_a$$

$$\underline{I}_a = \frac{3 \cdot E}{3 \cdot R + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o} = \frac{3 \cdot 230}{3 \cdot 10 + j5 + j5 + j20} = (11,5 - j11,5) \text{ A}$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 27 / 76

Пример 26

$$\underline{U}_a = R \cdot \underline{I}_a = 10 \cdot (11,5 - j11,5) = (115 - j115) \text{ V}$$

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

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

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

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

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

При решавањето на несиметричното коло со помош на симетрични компоненти струјата на потрошувачот се добива со проста формула

$$\underline{I}_a = \frac{3 \cdot E}{3 \cdot R + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o}.$$

Пример 26

Ако е $R = 0$ (еднофазна куса врска), за струјата на куса врска добиваме

$$\underline{I}_a = \frac{3 \cdot E}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o}$$

Симетричните компоненти на струјата на еднофазна куса врска се

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_o = \frac{\underline{I}_a}{3} = \frac{E}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o}$$

Пример 2

programi/nesim_kolo.m

```
1 a = exp(1j*2*pi/3);
2 E = 230;
3 R = 10;
4 Zs = 1j*10;
5 Zm = 1j*5;
6
7 disp('a');
8 Eabc = E*[1; a^2; a];
9 Zabc = [Zs Zm Zm
10         Zm Zs Zm
11         Zm Zm Zs];
12 Rabc = diag([R 1e8 1e8]);
13 Iabc = (Zabc + Rabc)\Eabc
14 Uabc = Rabc*Iabc
15
16 disp('b');
17 Zd = Zs - Zm;
18 Zi = Zs - Zm;
19 Zo = Zs + 2*Zm;
20 Ia = 3*E/(3*R + Zd + Zi + Zo)
21 Ud = E - Zd*Ia/3
22 Ui = -Zi*Ia/3
23 Uo = -Zo*Ia/3
24 Ua = Ud + Ui + Uo
25 Ub = a^2*Ud + a*Ui + Uo
26 Uc = a*Ud + a^2*Ui + Uo
```

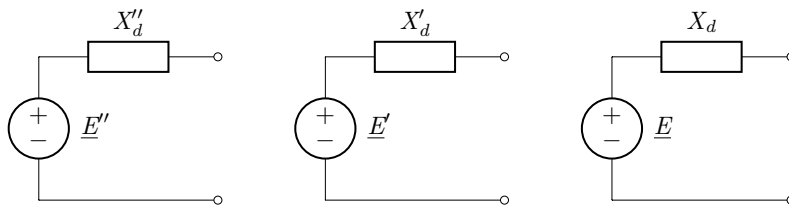
Пример 2

```
>> nesim_kolo
a)
Iabc =
 11.5000 -11.5000i
 -0.0000 - 0.0000i
 -0.0000 + 0.0000i
Uabc =
 1.0e+02 *
 1.1500 - 1.1500i
 -1.7250 - 2.5669i
 -1.7250 + 1.4169i
b)
Ia =
 11.5000 -11.5000i
Ud =
 2.1083e+02 - 1.9167e+01i
Ui =
 -19.1667 -19.1667i
Uo =
 -76.6667 -76.6667i
Ua =
 1.1500e+02 - 1.1500e+02i
Ub =
 -1.7250e+02 - 2.5669e+02i
Uc =
 -1.7250e+02 + 1.4169e+02i
```

Реактанци на синхроните генератори – директен систем

Кусата врска надворешно гледано се манифестира како да се менува внатрешната реактанција на генераторот. Упростено, можеме да сметаме дека реактанцијата на генераторот се менува скоковито

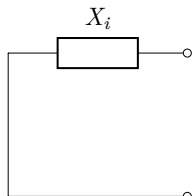
- субтранзиентна реактанција X''_d
- транзиентна реактанција X'_d
- трајна реактанција X_d



$$\underline{E}'' = \underline{E}' = \underline{E} = U_n / \sqrt{3}$$

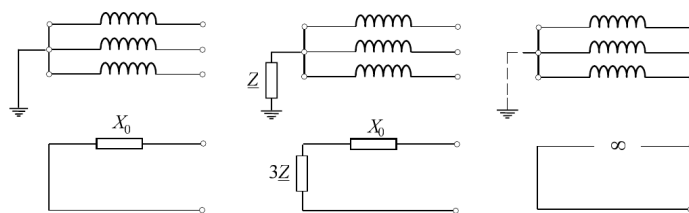
Реактанци на синхроните генератори – инверзен систем

Иста реактанција за сите 3 периоди.



Реактанции на синхроните генератори – нулти систем

Иста реактанција за сите 3 периоди.



МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 34 / 76

Просечни вредности на реактанциите (%)

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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 35 / 76

Двонамотни трансформатори – директен и инверзен систем

$$X_d = X_i$$

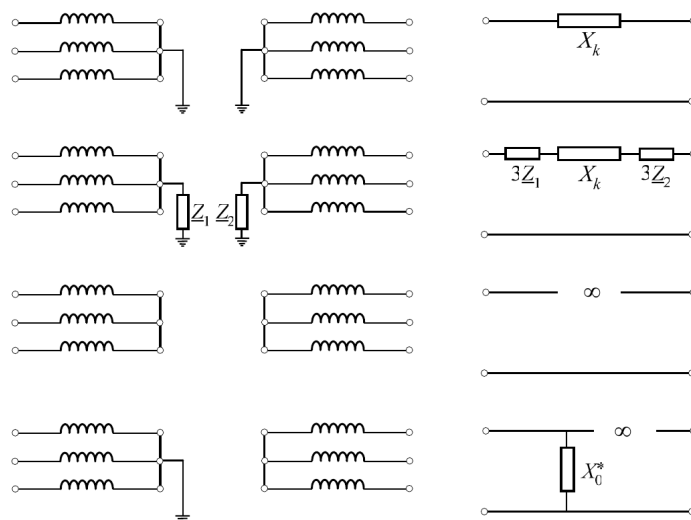
$$X_d = X_i = X_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 36 / 76

Двонамотни трансформатори – нулти систем



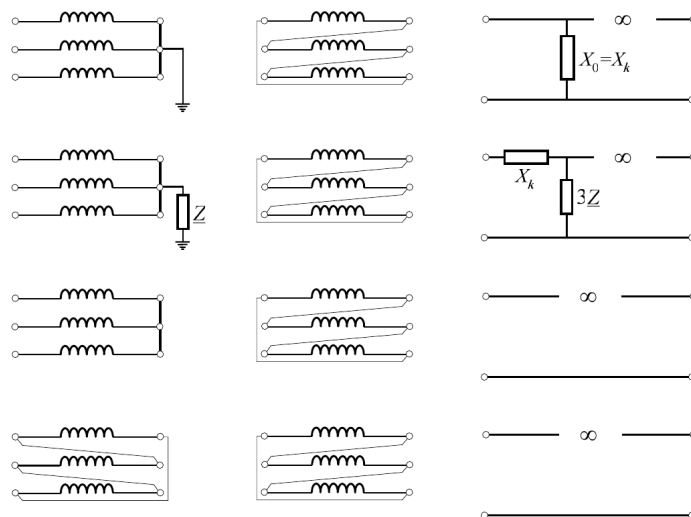
MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

37 / 76

Двонамотни трансформатори – нулти систем



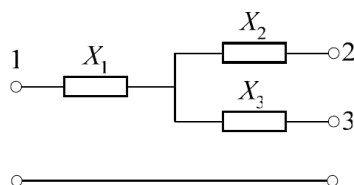
MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

38 / 76

Тринамотни трансформатори – директен и инверзен систем



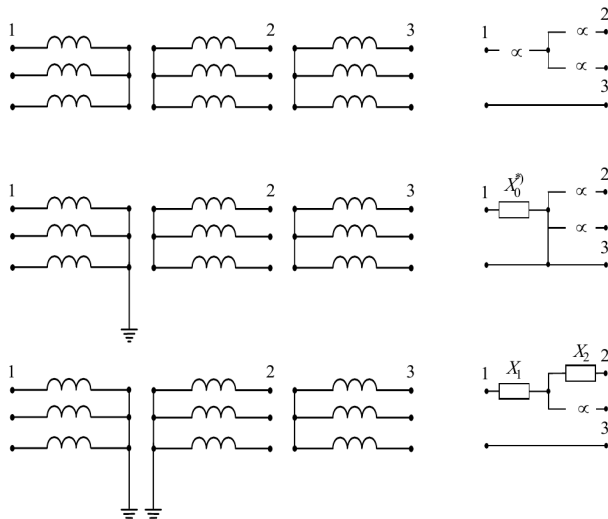
MT (ПЕЕС)

ВНМС

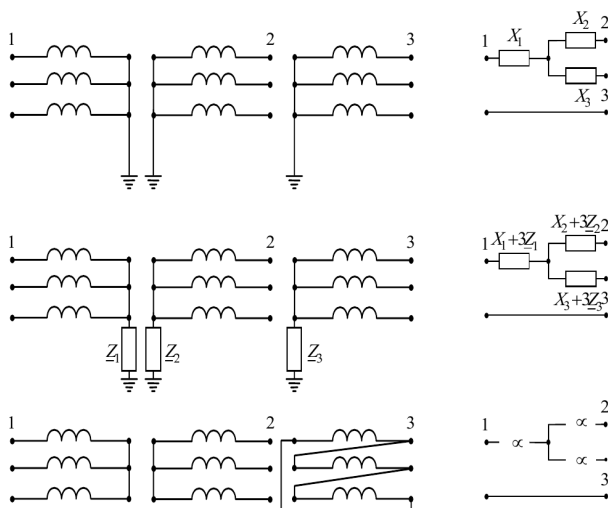
Скопје, 2019

39 / 76

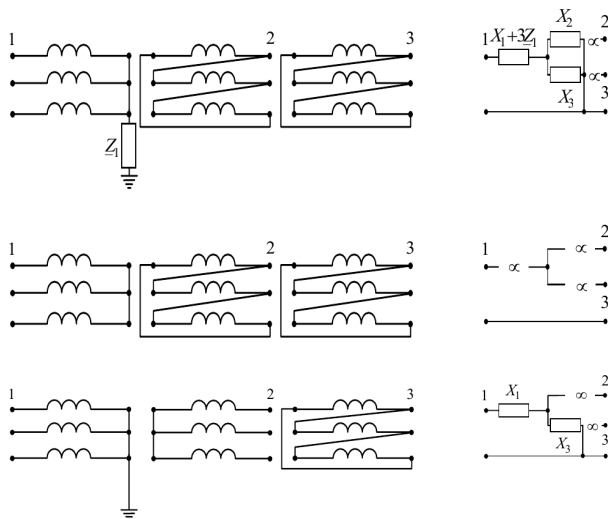
Тринамотни трансформатори – нулти систем



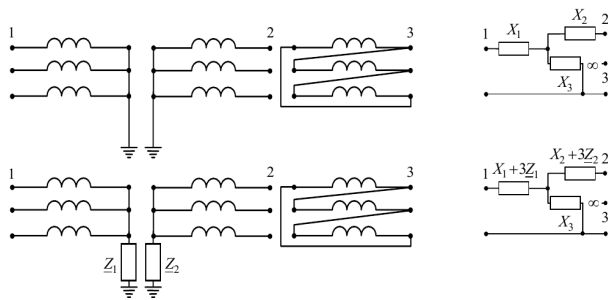
Тринамотни трансформатори – нулти систем



Тринамотни трансформатори – нулти систем

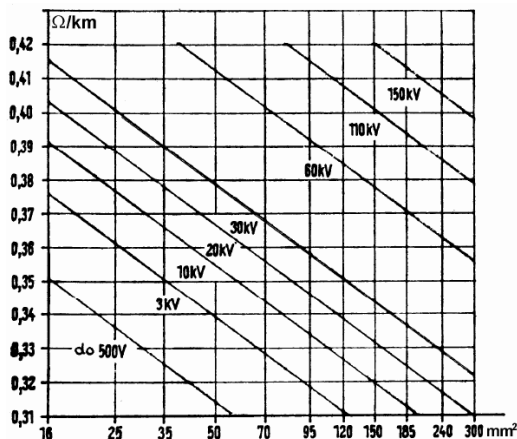


Тринамотни трансформатори – нулти систем



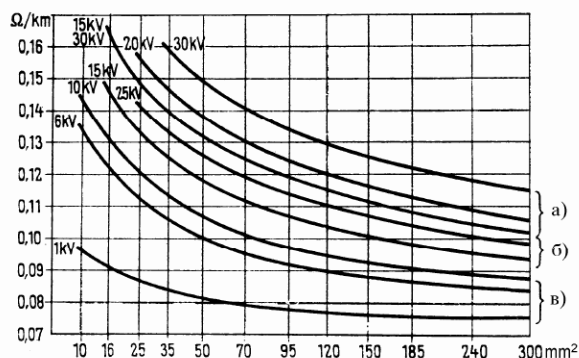
Реактанци на надземните водови – директен и инверзен систем

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



Реактанци на каблите – директен и инверзен систем

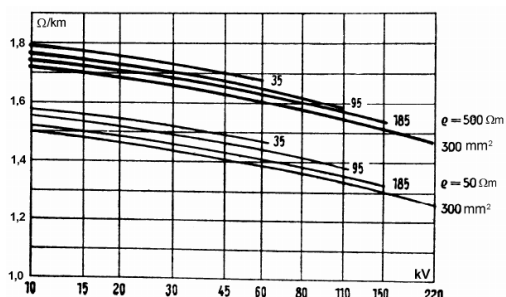
$$X_d = X_i = X = x \cdot l$$



а) со 3 засебни плаштови, б) екранирани Н-кабли, в) појасни кабли

Реактанции на надземните водови – нулти систем

- единечен вод без заштитно јаже $x_0 \approx 3,5 \cdot x$
- единечен вод со челично заштитно јаже $x_0 \approx 3,0 \cdot x$
- единечен вод со зашт. јаже Al/Џ или алумовелд (AW) $x_0 \approx 2,0 \cdot x$
- двосистемски вод без заштитно јаже $x_0 \approx 5,5 \cdot x$
- двосистемски вод со челично заштитно јаже $x_0 \approx 4,7 \cdot x$
- двосистемски вод со зашт. јаже Al/Џ или алумовелд (AW) $x_0 \approx 3,0 \cdot x$



МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

46 / 76

Реактанции на каблите – нулти систем

Нултата реактанција на каблите зависи од

- заемниот распоред на жилите во кабелот
- спроводноста на повратниот пат на струјата низ земјата
- присуството на метални делови во земјата долж трасата на кабелот
- конструкцијата на кабелот (метален плашт)
- присуството на други кабли

Нултата реактанција на еден ист тип кабел не е константна и таа може да варира во широки граници, зависно од начинот на неговото полагање. Таа тешко се пресметува и таа најчесто се добива со мерење.

$$x_0 \approx (3,5 \div 4,5) \cdot x$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

47 / 76

Реактанции на потрошувачите

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

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

I_p струја на пуштање

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

МТ (ПЕЕС)

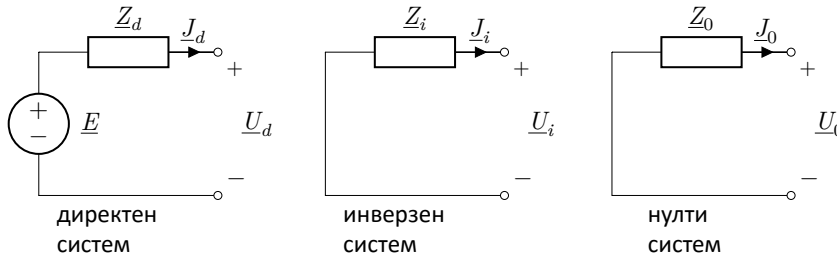
ВНМС

Скопје, 2019

48 / 76

Еквивалентни шеми

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



три општи равенки

$$E = U_d + Z_d \cdot J_d$$

$$0 = U_i + Z_i \cdot J_i$$

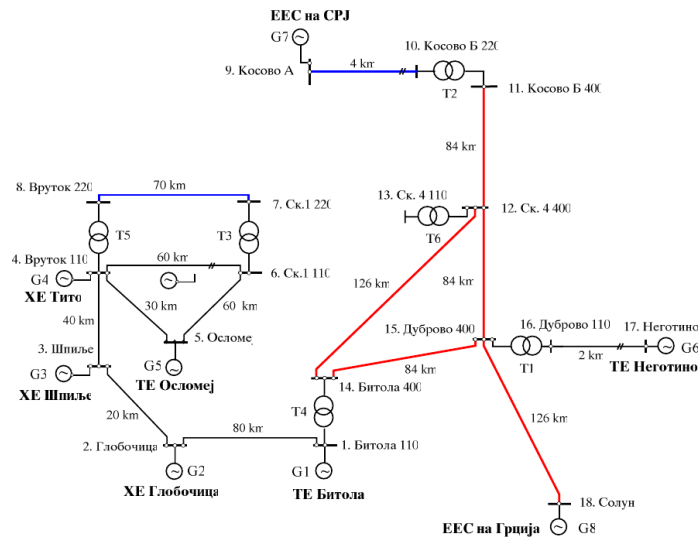
$$0 = U_0 + Z_0 \cdot J_0$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 49 / 76

Пример 3

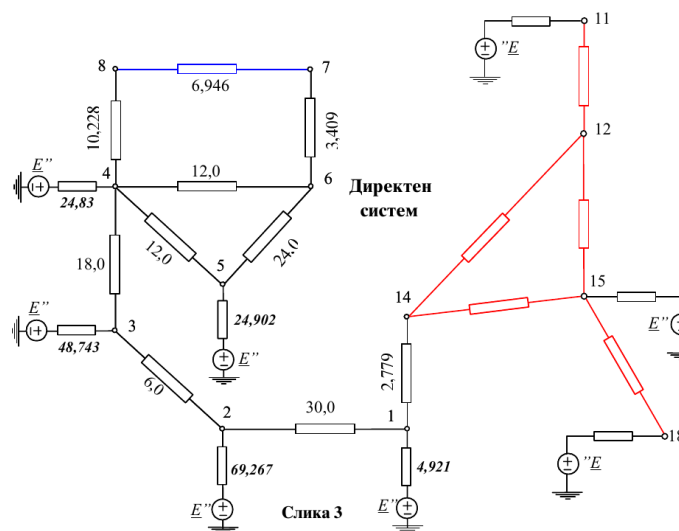


МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 50 / 76

Пример 4

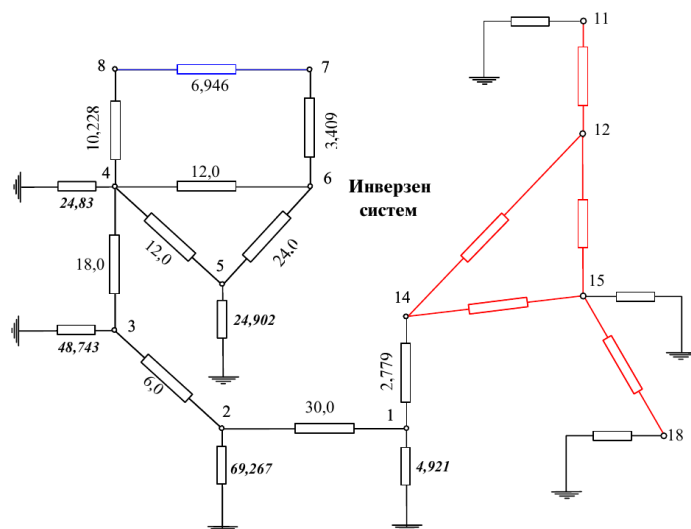


МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 51 / 76

Пример 5

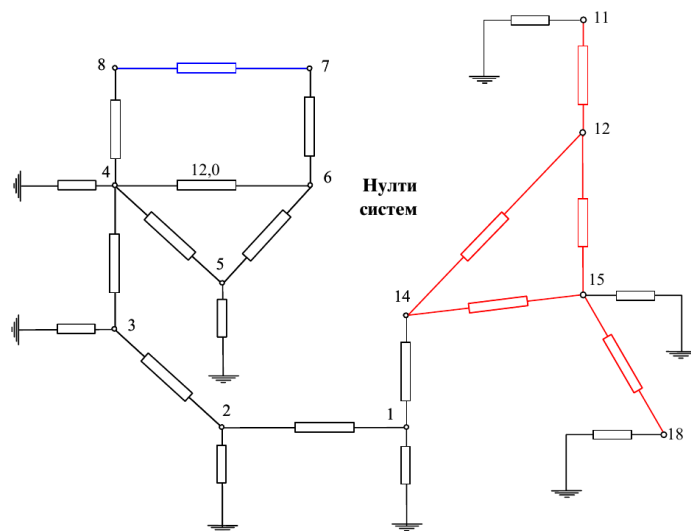


МТ (ПЕЭС)

ВНМС

Скопје, 2019 52 / 76

Пример 6

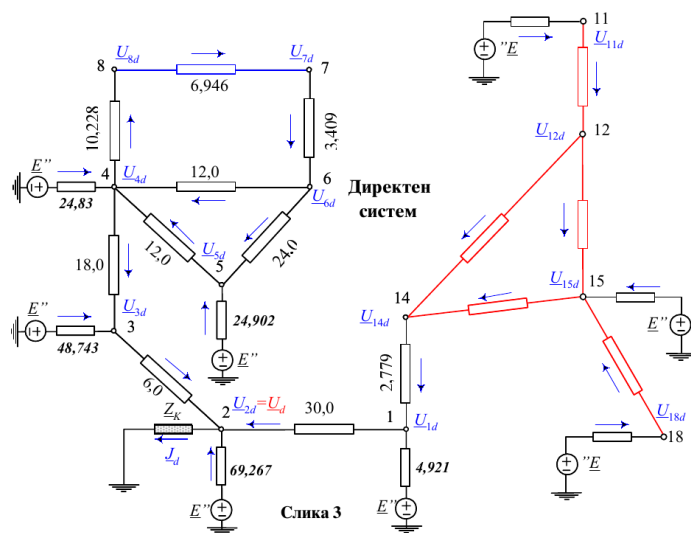


МТ (ПЕЭС)

ВНМС

Скопје, 2019 53 / 76

Пример 7

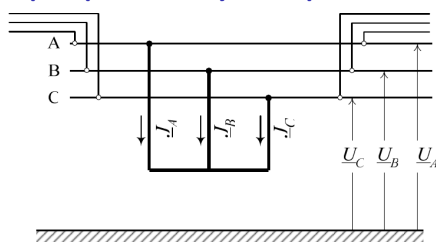


МТ (ПЕЭС)

ВНМС

Скопје, 2019 54 / 76

Трифазна куца врска



три општи равенки

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

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

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

три посебни равенки

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

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

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

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

$$\underline{U}_d = (\underline{U}_A + \underline{a}\underline{U}_B + \underline{a}^2\underline{U}_C)/3 = 0 \Rightarrow \underline{J}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d}$$

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

Трифазна куца врска

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

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

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d}$$

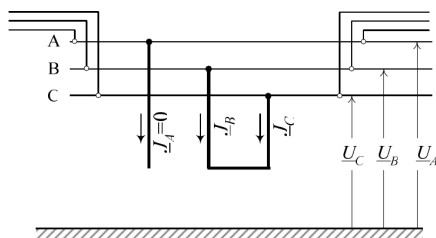
$$\underline{U}_A = \underline{U}_B = \underline{U}_C = 0$$

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

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

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

Двофазна куца врска



три општи равенки

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

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

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

три посебни равенки

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

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

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

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

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

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

Двофазна куса врска

$$\begin{aligned} \underline{J}_d &= (\underline{J}_A + \underline{a}\underline{J}_B + \underline{a}^2\underline{J}_C)/3 = (\underline{a}\underline{J}_B - \underline{a}^2\underline{J}_B)/3 \\ \underline{J}_i &= (\underline{J}_A + \underline{a}^2\underline{J}_B + \underline{a}\underline{J}_C)/3 = (\underline{a}^2\underline{J}_B - \underline{a}\underline{J}_B)/3 = -\underline{J}_d \\ \left. \begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{U}_d \\ \underline{J}_i &= -\underline{J}_d \\ \underline{E} &= \underline{U}_d + \underline{Z}_d \cdot \underline{J}_d \\ 0 &= \underline{U}_i + \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i \end{aligned} \right\} \Rightarrow \underline{J}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \quad \underline{U}_d = \frac{\underline{Z}_i \underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{J}_d &= \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} & \underline{J}_i &= -\underline{J}_d & \underline{J}_0 &= 0 \\ \underline{U}_d &= \frac{\underline{Z}_i \underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} & \underline{U}_i &= \underline{U}_d & \underline{U}_0 &= 0 \end{aligned}$$

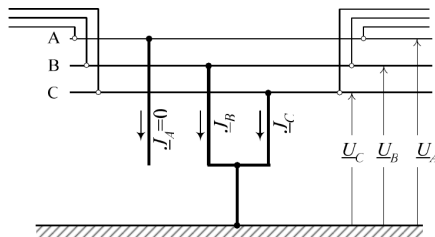
$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= 2\underline{U}_d = \frac{2\underline{Z}_i \underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} & \underline{J}_A &= 0 \\ \underline{U}_B &= -\underline{U}_A/2 & \underline{J}_B &= -j\sqrt{3}\underline{J}_d \\ \underline{U}_C &= -\underline{U}_A/2 & \underline{J}_C &= -\underline{J}_B \end{aligned}$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 58 / 76

Двофазна куса врска со земја



три општи равенки

$$\begin{aligned} \underline{E} &= \underline{U}_d + \underline{Z}_d \cdot \underline{J}_d \\ 0 &= \underline{U}_i + \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i \\ 0 &= \underline{U}_0 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{J}_0 \end{aligned}$$

три посебни равенки

$$\begin{aligned} \underline{J}_A &= 0 \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_C = 0 \end{aligned}$$

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

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 59 / 76

Двофазна куса врска со земја

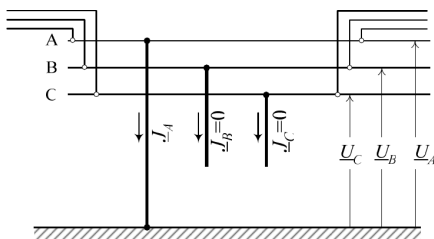
$$\begin{aligned} \underline{J}_A &= 0 \\ \underline{J}_B &= \frac{(\underline{a}^2 - 1)\underline{Z}_i + (\underline{a}^2 - \underline{a})\underline{Z}_0}{\underline{Z}_d \underline{Z}_i + \underline{Z}_d \underline{Z}_0 + \underline{Z}_i \underline{Z}_0} \cdot \underline{E} \\ \underline{J}_C &= -\underline{J}_B \\ \underline{U}_A &= 3\underline{U}_d = \frac{3 \cdot \underline{E} \cdot \underline{Z}_k}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_k} \\ \underline{U}_B &= 0 \\ \underline{U}_C &= 0 \end{aligned}$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 60 / 76

Еднофазна куса врска



три општи равенки

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

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

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

три посебни равенки

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Еднофазна куса врска

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

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

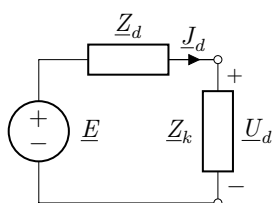
$$\underline{J}_C = 0$$

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

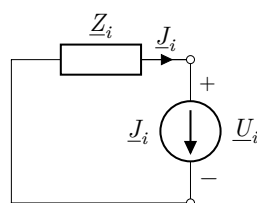
$$\underline{U}_B = \frac{(a^2 - a)\underline{Z}_i + (a^2 - 1)\underline{Z}_0}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} \cdot \underline{E}$$

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

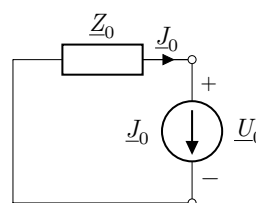
Куси врски – заклучок



директен систем



инверзен систем



нулти систем

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

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

$$\underline{J}_i = \underline{p}_k \cdot \underline{J}_d$$

$$\underline{J}_0 = \underline{q}_k \cdot \underline{J}_d$$

Куси врски – заклучок

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

Матрична постапка

- Современите ЕЕС се просторно големи и имаат сложена топологија така што не можат да бидат решени без компјутер
- Еден ефикасен начин за решавање на електрични кола со компјутер е примена на методот на јазлови потенцијали
- За решавање на куси врски треба да се решат 3 електрични кола: директен, инверзен и нулти систем, т.е. ни требаат 3 матрици на импеданции \underline{Z}_d , \underline{Z}_i и \underline{Z}_0 , а во суштина ни треба по **една колона од матрицата на импеданции**

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_{kk}^d \quad \underline{Z}_i = \underline{Z}_{kk}^i \quad \underline{Z}_0 = \underline{Z}_{kk}^0$$

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

$$\underline{U}_j^d = \underline{E} - \underline{Z}_{kj}^d \cdot \underline{J}_d \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\underline{U}_j^i = -\underline{Z}_{kj}^i \cdot \underline{J}_i \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\underline{U}_j^0 = -\underline{Z}_{kj}^0 \cdot \underline{J}_0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

- Иако $\underline{Z} = \underline{Y}^{-1}$ ние никогаш нема да пресметуваме инверзна матрица

Една колона од матрицата на импеданции

Проблем: за дадена матрица \underline{Y} да се пресмета само колоната k од нејзината инверзна матрица \underline{Z} .

Решение: бараната колона ќе ја добиеме како решение на следниот систем равенки

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

каде што векторот \underline{I} е полн со нули освен на позиција k каде што има единица

$$\underline{I}_j = \begin{cases} 0 & i \neq k, \\ 1 & i = k. \end{cases}$$

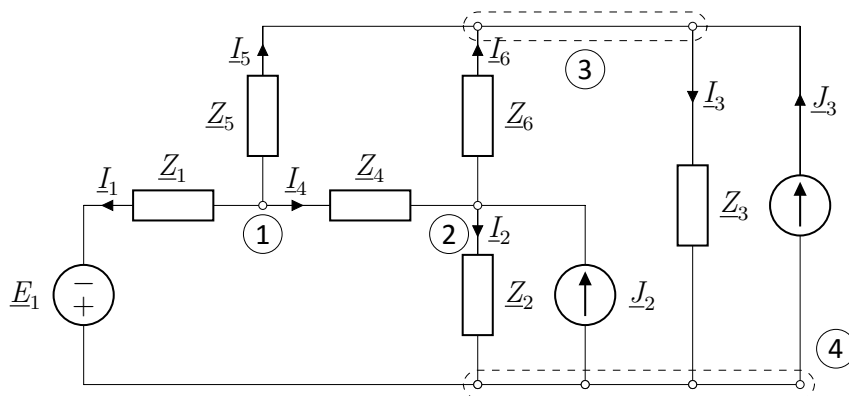
Решение во Matlab

```
I = zeros(n, 1);
I(k) = 1;
U = Y \ I
```

Во Matlab никогаш нема да напишеме вака

```
Z = Y^-1
```

Метод на јазлови потенцијали



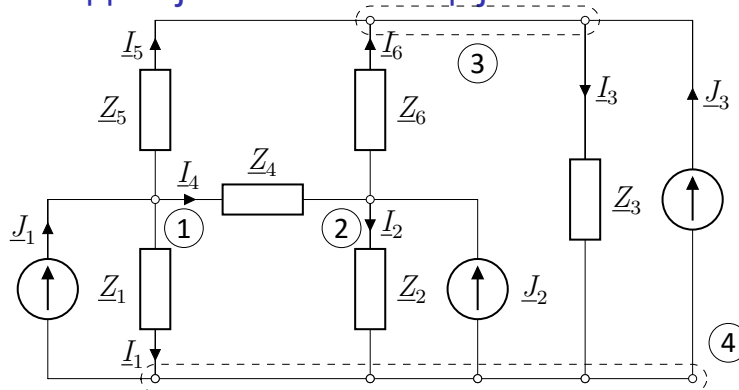
$$J_1 = \frac{E_1}{Z_1}$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 67 / 76

Метод на јазлови потенцијали



$$J_1 = I_1 + I_4 + I_5$$

$$J_2 = I_2 - I_4 + I_6$$

$$J_3 = I_3 - I_5 - I_6$$

јазел 4: $J_1 + J_2 + J_3 = I_1 + I_2 + I_3$ (сума од горните 3) $\Rightarrow U_4 = 0$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 68 / 76

Струи изразени преку напони

$$J_1 = \frac{U_1}{Z_1} + \frac{U_1 - U_2}{Z_4} - \frac{U_1 - U_3}{Z_5},$$

$$J_2 = \frac{U_2}{Z_2} - \frac{U_1 - U_2}{Z_4} + \frac{U_2 - U_3}{Z_6},$$

$$J_3 = \frac{U_3}{Z_3} - \frac{U_1 - U_3}{Z_5} - \frac{U_2 - U_3}{Z_6}.$$

$$\left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5} \right) U_1 - \frac{1}{Z_4} U_2 - \frac{1}{Z_5} U_3 = J_1,$$

$$-\frac{1}{Z_4} U_1 + \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_6} \right) U_2 - \frac{1}{Z_6} U_3 = J_2,$$

$$-\frac{1}{Z_5} U_1 - \frac{1}{Z_6} U_2 + \left(\frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_6} \right) U_3 = J_3,$$

$$\mathbf{Y} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{J},$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 69 / 76

Матрица \underline{Y}

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5} & -\frac{1}{Z_4} & -\frac{1}{Z_5} \\ -\frac{1}{Z_4} & \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_6} & -\frac{1}{Z_6} \\ -\frac{1}{Z_5} & -\frac{1}{Z_6} & \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_6} \end{bmatrix},$$

- елементот \underline{Y}_{kk} е еднаков на сумата на адмитанциите на сите елементи на кои им припаѓа јазелот k ,
- елементот \underline{Y}_{ik} е еднаков на сумата на адмитанциите на сите елементи што директно ги поврзуваат јазлите i и k , со променет знак.

Метод на јазлови потенцијали – матрично

Кирхофовиот закон за струи за сите јазли одеднаш

$$\underline{J} = \underline{C} \cdot \underline{I} = \underline{C} \cdot [I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4 \ I_5 \ I_6]^T$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix},$$

матрица на инциденција

$$\underline{A} = \underline{C}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Метод на јазлови потенцијали – матрично

$$\underline{U}_{GR} = \underline{A} \cdot \underline{U},$$

$$\underline{U}_{GR} = \underline{A} \cdot \underline{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_1 - U_2 \\ U_1 - U_3 \\ U_2 - U_3 \end{bmatrix},$$

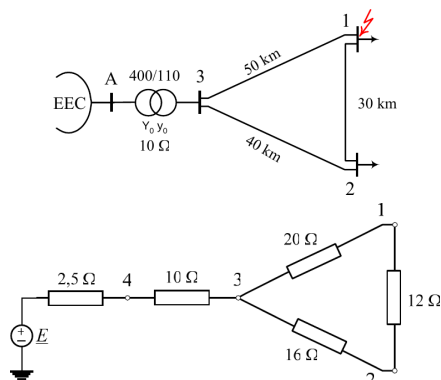
$$\underline{Z}_{GR} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_6 \end{bmatrix},$$

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

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

Пример 8

Пример 4.2 од книгата: За системот на сликата се познати $X_{EES}^d = 2,5 \Omega$, $X_T = 10 \Omega$, $x_d = 0,4 \Omega/\text{km}$ за сите водови. Со помош на матричната постапка пресметаат напоните и струи во прикажаниот ЕЕС за време на трифазна куца врска настаната кај јазелот 1. Пред настанување на кусата врска системот работел во режим на празен од.



МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 73 / 76

Пример 8

programi/primer_4_2_maty.m

```

1 mreza = [4 3 10
2         3 1 20
3         3 2 16;
4         2 1 12];
5
6 generatori = [4 2.5];
7
8 [p, k, x] = deal(mreza(:,1), mreza(:,2), mreza(:,3));
9
10 ngr = size(mreza, 1);
11 n = max([p; k]);
12
13 A = sparse(1:ngr, p, ones(ngr, 1), ngr, n) - ...
14     sparse(1:ngr, k, ones(ngr, 1), ngr, n);
15 Y = A' * sparse(1:ngr, 1:ngr, 1./x) * A;
16
17 [ig, xg] = deal(generatori(:, 1), generatori(:, 2));
18 Y = Y + sparse(ig, ig, 1./xg, n, n);
19
20 kv = 1;
21 I = zeros(4,1); I(kv) = 1;
22
23 Z = Y \ I
24
25 Jd = 110/sqrt(3)/Z(kv)
26 Ud = 110/sqrt(3) - Z*Jd
27 Id = A*Ud./x
    
```

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 74 / 76

Пример 8

Во програмата се користи командата `sparse` која што ја има следната синтакса $S = \text{sparse}(i, j, s, m, n)$

векторите i, j и s се користат за генерирање на ретка матрица со димензии $m \times n$ за чии елементи важи следното $S(i(k), j(k)) = s(k)$. Векторите i, j и s треба да се со иста должина. Ако во s постојат елементи еднакви на нула тие се игнорираат, а доколку во i и j има дупликати тогаш елементите од s на тие позиции се собираат.

$S = \text{sparse}([3 2 3 4 1], [1 2 2 3 4], [1 2 3 4 5], 4, 4)$

$S =$

```

(3,1)    1
(2,2)    2
(3,2)    3
(4,3)    4
(1,4)    5
    
```

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \end{bmatrix}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 75 / 76

Пример 8

```
>> primer_4_2_maty
Y =
(1,1)    0.1333
(2,1)   -0.0833
(3,1)   -0.0500
(1,2)   -0.0833
(2,2)    0.1458
(3,2)   -0.0625
(1,3)   -0.0500
(2,3)   -0.0625
(3,3)    0.2125
(4,3)   -0.1000
(3,4)   -0.1000
(4,4)    0.5000

Z =
24.1667
19.1667
12.5000
 2.5000

Jd =
 2.6279

Ud =
 0.0000
13.1397
30.6593
56.9387

Id =
 2.6279
 1.5330
 1.0950
 1.0950
```



4.7. ПРИМЕРИ

Пример 4.2. Да се одреди временскиот тек на струите на куса врска на случај на трифазна куса врска настаната на клемите на генераторот. Пред настанувањето на кусата врска генераторот работел во режим на:

- а) празен од ($U = U_n$; $I = 0$);
- б) чисто активно отоварување со моќност $P = 100 \text{ MW}$ ($\cos\varphi = 1$).

Податоци за генераторот:

$S_n = 150 \text{ MVA}$; $U_n = 15,75 \text{ kV}$; $x_d\% = 120\%$; $x_d'\% = 30\%$; $x_d''\% = 20\%$;
 $x_q\% = 75\%$; $\cos\theta_n = 0,90$; $T_d'' = 0,04 \text{ s}$; $T_d' = 1,0 \text{ s}$; $T_e = 0,15 \text{ s}$.

Решение:

Реактанциите на генераторот изразени во апсолутни вредности ќе бидат:

$$X_d'' = \frac{x_d''\%}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{20}{100} \frac{15,75^2}{150} = 0,331 \text{ } \Omega$$

$$X_d' = \frac{x_d'\%}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{30}{100} \frac{15,75^2}{150} = 0,496 \text{ } \Omega$$

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

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

Точниот временски тек на струјата на куса врска во една од фазите (на пример во фазата "А") гласи:

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

каде што е:

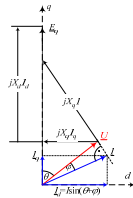
$$I_d(t) = (I' - I'') \cdot e^{-t/T_d''} + (I' - I') \cdot e^{-t/T_d'} + I$$

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

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

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

$$I_d(t) = \sqrt{2} \cdot I_d \cdot \cos(\alpha_d - \theta) \cdot e^{-t/T_d}$$



Слика П4.2.1. Фазорски дијаграм на синхрон генератор со испакнати полюси

Во последниот израз фигурира аголот α_d што оската d на роторот го зафаќа со оската на посматраната фаза (овде фазата "А") во моментот $t = 0$, кога настанала кусата врска. Овој агол претставува случајна величина и може да ги добие сите вредности од интервалот $(0 - 2\pi)$, со подеднаква веројатност.

Величините E_g , U_f , I_f , θ и φ зависат од режимот кој ѝ претходел на кусата врска (види слика 4.1). Затоа тие се нарекуваат **режимски параметри**. При тоа за режимот кој ѝ претходел на кусата врска во општ случај важи:

$$I_d = I_f \cdot \sin(\theta + \varphi); \quad I_q = I_f \cdot \cos(\theta + \varphi)$$

$$\vec{E}_g = I_d \cdot jX_q + I_q + jX_d \cdot I_q; \quad E_g = U_f \cdot \cos\theta + X_d \cdot I_d$$

а) **Пред настанување на кусата врска генераторот работел во празен од.**

Во овој случај ќе имаме:

$$I_f = 0; \quad \theta = 0; \quad E_g = U_f = U_{gp} = 15,75 \cdot \sqrt{3} = 9,093 \text{ kV}; \quad I_f = 0; \quad I_d = 0.$$

Понатаму ќе имаме:

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

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

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

Временскиот тек на еднонасочната компонента на струјата во посматраната фаза "А" ќе биде:

$$i_d(t) = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot \cos(\alpha_0 - \theta) \cdot e^{-t/T_d} = i_d(0) \cdot e^{-t/T_d},$$

каде што е:

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

Ке усвоиме $\alpha_0 = 0$ (најнеповолен случај за големината на струјата во посматраната фаза "А"). За останатите две фази "В" и "С" аголот α_0 ќе има вредности $-2\pi/3$ и $+2\pi/3$, респективно.

За временскиот тек на струјата на куса врска во фазата "А" добиваме:

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

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

За струјата во фазата "А" ќе добиеме:

$$i_d(t) = \sqrt{2} \cdot (9,139 \cdot e^{-25t} + 13,75 \cdot e^{-t} + 4,583) \cdot \cos\alpha_0 - 38,851 \cdot e^{-t/0,04} \text{ kA, или}$$

$$i_d(t) = \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos(\alpha_0) - \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot \cos(0) \cdot e^{-t/T_d}.$$

На сличен начин се добива и временскиот тек на струите во останатите фази:

$$i_b(t) = \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos(\alpha_0 - 2\pi/3) - \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot \cos(-2\pi/3) \cdot e^{-t/T_d},$$

$$i_c(t) = \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos(\alpha_0 + 2\pi/3) - \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot \cos(2\pi/3) \cdot e^{-t/T_d}.$$

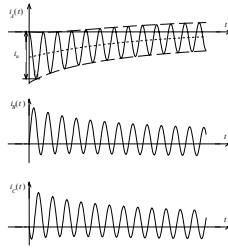
односно:

$$i_b(t) = \sqrt{2} \cdot (9,139 \cdot e^{-25t} + 13,75 \cdot e^{-t} + 4,583) \cdot \cos(\alpha_0 - 2\pi/3) - 19,425 \cdot e^{-t/0,04} \text{ kA};$$

$$i_c(t) = \sqrt{2} \cdot (9,139 \cdot e^{-25t} + 13,75 \cdot e^{-t} + 4,583) \cdot \cos(\alpha_0 + 2\pi/3) - 19,425 \cdot e^{-t/0,04} \text{ kA}$$

Обликот на апериодичната компонента $i_d(t)$ (за фазата "А") и осцилограмите на фазните струи $i_b(t)$, $i_c(t)$ и $i_d(t)$ се прикажани на сликата П4.2.2.

Глава IV. Куси арски во електричните системи



Слика П.4.2.2. Осцилограм на струите на куса арска, наставната директно на клемите на синхрон генератор, за случајот кага е $\alpha = 0$.

Од изразите за струите во фазите "В" и "С" може да се заклучи дека првиот максимум на струјата $i_A(t)$ (по апсолутен износ) се постигнува во моментот $t = 0,01$ s, кој едновременно е најголем. Вредноста на струјата во тој момент, по апсолутен износ, се нарекува ударна струја на куса арска. Таа изнесува:

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

Точната вредност на ударниот коефициент k_u , според тоа, изнесува:

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

Доколку k_u го одредиме приближно, користејќи го изразот (4.12), ќе добиеме:

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

Грешката што се прави ако се користи приближниот израз за одредување на ударниот коефициент, изнесува +4,2%.

б) Пред настанување на кусата арска генераторот бил оптоварен со чисто активна моќност ($P = 100 \text{ MW}$; $Q = 0$; $U = U_N$)

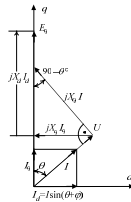
Во овој случај ќе имаме:

4

Глава IV. Куси арски во електричните системи

$$U_M = U_M = 15,73 \sqrt{3} = 9,093 \text{ kV}; I_p = S / (\sqrt{3} \cdot U) = P / (\sqrt{3} \cdot U) = 3,666 \text{ kA},$$

$$\phi = 0; \theta = \arctg \frac{X_s \cdot I_p}{U_M} = \arctg \frac{124 \cdot 3,666}{9,093} = 26,56^\circ \text{ (види слика П.4.2.3)}$$



Слика П.4.2.3. Фазорска дијаграм на генераторот за случајот б)

$$I_M = I_p \cdot \sin(\theta + \phi) = 3,666 \cdot \sin 26,56^\circ = 1,639 \text{ kA};$$

$$I'_0 = \frac{U_M}{X'_d} = 27,472 \text{ kA}; I' = I'_0 + I_M = 29,111 \text{ kA};$$

$$I''_0 = \frac{U_M}{X''_d} = 18,333 \text{ kA}; I'' = I''_0 + I_M = 19,972 \text{ kA};$$

$$I_0 = \frac{U_M}{X_d} = 4,583 \text{ kA}; I = I_0 + I_M = 6,222 \text{ kA};$$

$$i_M(t) = 9,409 \cdot e^{-25t} + 13,75 \cdot e^{-t} + 6,222 \text{ kA};$$

$$i_A(t) = \sqrt{2} \cdot I''_0 \cdot \cos(\omega t - \alpha_0 - \theta).$$

Ке усвоиме дека аголот $\alpha_0 = \theta = 26,56^\circ$, што е најповољно за големината на струјата на кусата арска во фазата "А". Во тој случај временскиот тек на струјата на кусата арска во оваа фаза ќе биде даден со следниот израз:

$$i_A(t) = \sqrt{2} \cdot I''_0 \cdot \cos(\omega t - \alpha_0) - i_A(0) \cdot e^{-t/T_s}$$

$$i_A(t) = \sqrt{2} \cdot (9,409 \cdot e^{-25t} + 13,75 \cdot e^{-t} + 6,222) \cdot \cos(\omega t - 26,56^\circ) - 38,851 \cdot e^{-t/0,15} \text{ kA}$$

5

Глава IV. Куси арски во електричните системи

Максималната (ударната) вредност на струјата на кусата арска ќе ја добиеме од условот:

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

од каде што следува:

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

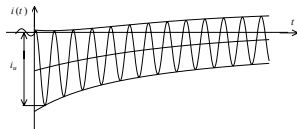
односно:

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

Конечно добиваме:

$$i_A = i_A(t)_{t=0,0115} = 74 \text{ kA}.$$

Обликот на струјата на кусата арска (фаза "А") во овој случај е прикажан на сликата П.4.2.4.



Слика П.4.2.4. Облик на струјата на кусата арска $i_A(t)$ за случајот б)

6

Глава IV. Куса врска во електричните системи

Пример 4.3. Да се одреди временскиот тек на струите на куса врска за случај на трифазна куса врска за генераторот од претходната задача, ако пред настанувањето на кусата врска генераторот работел во номинален режим ($U = U_n$, $I = I_n$, $\cos \phi = 0.9$). За моментот на настанувањето на кусата врска да се усвојат најнеповолниот (критичниот) случај за струјата во фазата "А", $\alpha_0 = \theta$.

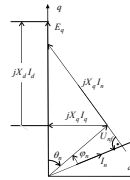
Решение:

Најпрва ќе ги пресметаме режимските параметри θ и ϕ што биле во номиналниот режим кој ξ претходел на кусата врска:

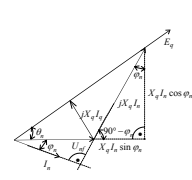
$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = 1501.73 / 15.75 = 5.5 \text{ kA}; \phi_n = \arccos(0.9) = 25.84^\circ$$

Понатаму, во согласност со сликите П.4.3.1 и П.4.3.2, ќе имаме:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= \frac{X_d - I_d \cos \phi_n}{U_d + X_q I_d \sin \phi_n} \Rightarrow \operatorname{tg} \theta = \frac{1.24 \cdot 5.5 - 0.90}{9.093 + 1.24 \cdot 5.5 \cdot 0.328} = 0.509; \\ \Rightarrow \theta &= \operatorname{arctg}(0.509) = 26.96^\circ \\ I_d &= I_n \sin(\theta_n + \phi_n) = 5.5 \cdot \sin(26.96^\circ + 25.84^\circ) = 4.466 \text{ kA}. \end{aligned}$$



Слика П.4.3.1. Фазорски дијаграм на генераторот



Слика П.4.3.2. Заротиран фазорски дијаграм од сликата П.4.3.1.

Бидејќи пред настанувањето на кусата врска генераторот работел со напон еднаков на номиналниот ($U = U_n$), вредностите за струите I_d , I_q и I_a ќе бидат исти како и во примерот од претходната задача, т.е. $I_d = 27.742 \text{ kA}$, $I_q = 18.333 \text{ kA}$ и $I_a = 4.583 \text{ kA}$. Според тоа, во случајот ќе имаме:

Глава IV. Куса врска во електричните системи

$$\begin{aligned} I' &= I_d + I_q = 27.472 + 4.466 = 31.938 \text{ kA}; \\ I' &= I_d + I_q = 18.333 + 4.466 = 22.799 \text{ kA}; \\ I &= I_d + I_q = 4.583 + 4.466 = 9.049 \text{ kA}. \end{aligned}$$

Се разгледува струјата во фазата "А". Во тој случај, согласно условот во задачата, ќе имаме:

$$\alpha_0 = \theta = 26.96^\circ$$

Понатаму, ефективната вредност на најзменачната компонента на струјата на куса врска $i_A(t)$, која е иста за сите три фази, ќе биде:

$$\begin{aligned} I_p(t) &= (31.938 - 22.799) e^{-25t} + (22.799 - 9.049) e^{-t} + 9.049 \text{ kA}, \\ I_p(t) &= 9.139 e^{-25t} + 13.75 e^{-t} + 9.049 \text{ kA}. \end{aligned}$$

Конечно, временските текови на фазните струи $i_A(t)$, $i_B(t)$ и $i_C(t)$ за време на кусата врска ќе бидат:

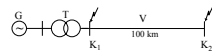
$$\begin{aligned} i_A(t) &= \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos(\omega t - \theta_0) - \sqrt{2} \cdot I_d \cdot \cos(0) \cdot e^{-6.667t}; \\ i_B(t) &= \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos(\omega t - \theta_0 - 2\pi/3) - \sqrt{2} \cdot I_d \cdot \cos(-2\pi/3) \cdot e^{-6.667t}; \\ i_C(t) &= \sqrt{2} \cdot I_p(t) \cdot \cos(\omega t - \theta_0 + 2\pi/3) - \sqrt{2} \cdot I_d \cdot \cos(+2\pi/3) \cdot e^{-6.667t}. \end{aligned}$$

Глава IV. Куса врска во електричните системи

Пример 4.4. Да се одредат струите на куса врска во трите карактеристични периоди (суправизентен, транзиентен и траен), како и соодветните аритметичка на овие периоди за случајот на трифазна куса врска настаната:

- a) на почетокот од водот V (место K1),
- b) на крајот од водот V (место K2 на сликата П.4.4.1).

Пред настанувањето на кусата врска генераторот работел во режим на празен од.



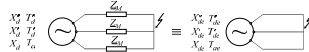
Слика П.4.4.1. Карактеристични места на настанување на кусата врска

Податоци за параметрите на елементите:

- генератор G: $S_n = 150 \text{ MVA}$; $U_n = 15.75 \text{ kV}$; $x_d\% = 120\%$; $x_d'\% = 30\%$; $x_d''\% = 20\%$; $x_q\% = 75\%$; $\cos \phi_n = 0.90$; $T_d' = 0.04 \text{ s}$; $T_d'' = 1.0 \text{ s}$; $T_n = 0.15 \text{ s}$.
- трансформатор T: $S_n = 150 \text{ MVA}$; $U_{1n}/U_{2n} = 15.75/121 \text{ kV/kV}$; $u_n\% = 12\%$; $X_T/R_T = 25$.
- вод V: $l = 100 \text{ km}$; $z = (r + jx) = (0.064 + j0.33) \Omega/\text{km}$.

Решение:

Пресметката на кусите врска кои настанале некаде во мрежата се врши со истите формули со кои се решаваат кусите врска настанати кај самиот генератор (види примери 4.2 и 4.3). Значи, разликата во постапката за пресметување практично нема. Единствената разлика којашто постои помеѓу овие два случаја ќе состои во тоа што сега, наместо да се оперира со природните параметри на синхронот генератор, ќе се оперира со некои негови "еквивалентни" параметри, како што е тоа прикажано на сликата П.4.4.2. Значи, сета параметрите на генераторот се изменети, бидејќи тие го опфаќаат и вклучувањето на импеданцијата на мрежата $Z_M = R_M + jX_M$, т.е. влијанието на еквивалентната импеданција на елементите од мрежата што се наоѓаат помеѓу влезите на генераторот и местото на кусата врска.



Слика П.4.4.2. Пресметка на кусата врска во мрежата со помош на "еквивалентен генератор"

Глава IV . Кусат врски во електричните системи

Притоа важат следните односи:

$$X_{d0}'' = X_{d0}' + X_M ; X_{d0}'' = X_{d0}' + X_M ; X_{d0}'' = X_{d0}' + X_M ;$$

$$R_e = R + R_M = \frac{X_M^2}{\omega T_e} + R_M ;$$

$$T_{d0}'' = T_d' \frac{X_M}{X_{d0}''} \frac{X_{d0}''}{X_{d0}'} = T_d' \frac{X_M}{X_{d0}'} \frac{X_{d0}''}{X_{d0}'} ; T_{d0}'' = \frac{X_{d0}''}{\omega R_e} = \frac{X_{d0}''}{\omega R_e}$$

Во последните изрази со X_{d0}'' , X_{d0}' , X_{d0} , T_{d0}'' , T_d' и T_{d0} се означени еквивалентните реактивности и еквивалентните временски константи на генераторот преку кои е звазано влијанието на мрежата. Во истите изрази со R е означена активната отпорност (по фаза) на статорските намотки од генераторот, и доволу не е директно зададена, таа може приближно да се пресмета преку познатата временска константа на приднување на аperiодичната компонента на струјата на куса врска T_{d0} со помош на изразот: $T_{d0} = X_{d0}'/\omega R = X_{d0}'/\omega R$, од каде што следува горе употребениот израз за пресметка на отпорноста R .

а) Кусата врска настанала на почетокот на водот (место K1);

Во овој случај, за импеданцијата на мрежата ќе имаме:

$$Z_{m-} = Z_T + jX_T$$

Параметрите на трансформаторот, сведени на SN страна, ќе бидат:

$$X_T = \frac{u_k \%}{100} \frac{U_1^2}{S_N} = \frac{12}{100} \frac{15,75^2}{150} = 0,198 \Omega ; R_T = X_T / 25 = 7,92 \text{ m}\Omega ;$$

$$Z_{m-} = Z_T = (7,92 + j198) \text{ m}\Omega .$$

Параметрите на синхронот генератор, коишто беа пресметани во претходната задача, изнесуваат:

$$X_{d0}' = 331 \text{ m}\Omega ; X_{d0}'' = 496 \text{ m}\Omega ; X_M = 1984 \text{ m}\Omega ; T_d' = 0,04 \text{ s}; T_d'' = 1 \text{ s}; T_{d0} = 0,15 \text{ s}.$$

Сета ќе имаме:

$$X_{d0}'' = 331 + 198 = 529 \text{ m}\Omega ; X_{d0}'' = 496 + 198 = 694 \text{ m}\Omega ;$$

$$X_{d0} = 1984 + 198 = 2182 \text{ m}\Omega ;$$

$$R_e = R + R_M = 7,03 + 7,92 = 14,95 \text{ m}\Omega ;$$

$$T_{d0}'' = T_d' \frac{X_M}{X_{d0}''} \frac{X_{d0}''}{X_{d0}'} = 0,04 \frac{496}{331} \frac{694}{496} = 0,046 \text{ s};$$

$$T_{d0}'' = T_d' \frac{X_M}{X_{d0}''} \frac{X_{d0}''}{X_{d0}'} = 1,0 \frac{496}{496} \frac{694}{2182} = 1,272 \text{ s};$$

$$R = \frac{X_M}{\omega T_{d0}} = \frac{0,331}{314 \cdot 0,15} = 7,03 \text{ m}\Omega ;$$

10

Глава IV . Кусат врски во електричните системи

$$R_e = R + R_M = 14,95 \text{ m}\Omega ; T_{d0}'' = \frac{X_{d0}''}{\omega R_e} = 0,113 \text{ s}.$$

$$I'' = I_0'' = \frac{U_{d0}''}{X_{d0}''} = \frac{9,093}{0,529} = 17,19 \text{ kA} ;$$

$$I' = I_0' = \frac{U_{d0}'}{X_{d0}'} = \frac{9,093}{0,694} = 13,103 \text{ kA} ;$$

$$I = I_0 = \frac{U_{d0}}{X_{d0}} = \frac{9,093}{2,182} = 4,167 \text{ kA}.$$

Значи, во случајот кога кусата врска настанала на почетокот од водот (место "K1"), ќе ја имаме следната ситуација:

Период	Струја	Времетраење
Суптранзиентен	$I'' = 17,19 \text{ kA}$	$= 3T_{d0}'' = 0,14 \text{ s}$
Транзиентен	$I' = 13,103 \text{ kA}$	$= 3T_{d0}' = 3,82 \text{ s}$
Траен	$I = 4,167 \text{ kA}$	∞

- време на приднување на аperiодичната компонента: $= 3T_{d0}'' = 0,34 \text{ s}$.

- ударен коефициент на струјата на куса врска: $k_u = 1 + e^{0,0113 \omega t} = 1,915$.

б) Кусата врска настанала на крајот од водот (место K2);

Во овој случај ќе биде $Z_{m-} = Z_T + Z_{m+} = (R_T + R_M) + j(X_T + X_M)$. Затоа, најлесно ќе ја пресметаме вредноста на импеданцијата на водот Z_{m-} , сведена на среднонапонската (SN) страна од трансформаторот:

$$Z_{m-} = z \cdot l = (r + jx) \cdot l = (0,064 + j0,33) \cdot 100 = (6,4 + j33) \Omega ;$$

$$Z_{m-} = Z_T + (U_{d0} / U_{d2})^2 = (6,4 + j33) + (15,75 / 121)^2 = (0,108 + j0,559) \Omega ;$$

Понатаму имаме:

$$R_{m-} = R_T + R_{m-} = 7,92 + 108 = 116 \text{ m}\Omega ;$$

$$X_{m-} = X_T + X_{m-} = 198 + 559 = 757 \text{ m}\Omega ;$$

$$Z_{m-} = (116 + j757) \text{ m}\Omega .$$

Повторувајќи ја истата постапка како и во претходниот случај "а", но со повторно пресметаната вредност за импеданцијата на мрежата Z_{m-} , ќе ги добиеме следните резултати:

$$X_{d0}'' = 331 + 757 = 1088 \text{ m}\Omega ; I'' = I_0'' = 8,357 \text{ kA}; T_{d0}'' = 0,052 \text{ s}.$$

$$X_{d0}'' = 496 + 757 = 1253 \text{ m}\Omega ; I' = I_0' = 7,257 \text{ kA} ; T_{d0}' = 1,828 \text{ s}.$$

$$X_{d0} = 1984 + 757 = 2741 \text{ m}\Omega ; I = I_0 = 3,317 \text{ kA} ; T_{d0} = 0,028 \text{ s}.$$

Според тоа, во случајот кога кусата врска настанала на крајот од водот (место "K2"), ќе имаме значително поинаква ситуација:

11

Глава IV . Кусат врски во електричните системи

Период	Струја	Времетраење
Суптранзиентен	$I'' = 8,357 \text{ kA}$	$= 3T_{d0}'' = 0,16 \text{ s}$
Транзиентен	$I' = 7,257 \text{ kA}$	$= 3T_{d0}' = 5,50 \text{ s}$
Траен	$I = 3,317 \text{ kA}$	∞

- време на приднување на аperiодичната компонента:

$$= 3T_{d0}'' = 0,084 \text{ s}.$$

- ударен коефициент на струја на кусата врска:

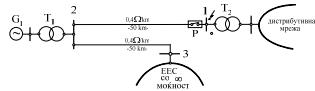
$$k_u = 1 + e^{0,0113 \omega t} = 1,7.$$

Од овој пример јасно се гледа дека параметрите и обликот на струјата на куса врска зависи во голема мера, меѓу другото, и од импеданцијата на мрежата Z_{m-} , т.е. посредно зависи и од местото на настанување на кусата врска. Колку е кусата врска подлабоко во мрежата, подлазку од изворите, толку ќе бидат струите во поедините карактеристични периоди помали и меѓусебно помалку ќе се разликуваат; временските константи T_{d0}'' и T_{d0}' ќе растат, а со тоа ќе се продолжува времетраењето на суптранзиентниот и транзиентниот период, додека временската константа T_{d0} , поради релативно високот однос R/X на водоните, ќе се намалува, поради што ќе се намалува времетраењето на аperiодичната компонента на струјата на куса врска $i_d(t)$, како и големината на ударниот коефициент k_u .

12

Глава IV - Кува врска во електричните системи

Пример 4.5. Да се одреди распонната струја и моќност на прекинувачот "P" за случај на трифазна кува врска кај собирниците "1" од системот прикажан на сликата П.4.5.1. Да се претпостави дека пред настанување на кувата врска системот работел во режим близо до номиналниот и дека за исклучување на кувата врска доаѓа во транзиентниот период.



Слика П.4.5.1

Податоци за елементите:

- G₁: 80 MVA; 10,5 kV; X_d' = 15%; X_d = 30%
- T₁: 80 MVA; 10,5/121 kV; u_k = 10%
- T₂: 40 MVA; 110/36,75 kV; u_k = 10%

Решение:

Бидејќи во задачата се работи за трифазна кува врска, во системот ќе се јават само струи со директен редослед на фазите. Затоа не е интересна само еквивалентната шема за директен систем, при што сите генератори ќе ги претставиме со соодветните транзиентни реакцисии X_d' зад кои се наоѓа е.м.с. E' = 1,2 · U_ф (номинално оптоварен систем во режим кој ѝ претходел на кувата врска).

Дистрибутивната мрежа се состои од водови, трансформатори и потрошувачи, т.е. главно се состои од пасивни елементи. Затоа, во согласност со Тевененовата теорема, неа можеме да ја еквивалентираме со една пасивна гранка (импеданција) со многу голема реактанција (практично X → ∞).

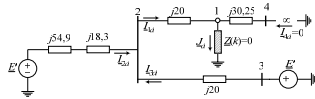
Од друга страна, систем со бесконечна моќност или "крута мрежа" претставува систем кој покрај останатите елементи содржи и голем број моќни синхронни машини (машини со мали внатрешни реактанции) што работат паралелно. Согласно на Тевененовата теорема, еден таков систем кој содржи активни елементи може да се претстави со еден единствен генератор со е.м.с. E (во нашиот случај E = E' = 1,2 · U_ф) и со реактанција X_к која е еднаква на влезната реактанција на системот, гледано од точката на приклучување (влезот "3"). Колку е бројот на агрегатите во системот поголем и колку се поголеми се нивните моќности (т.е. помали се нивните внатрешни реакцисии) толку еквивалентната реактанција на системот X_к ќе

Глава IV - Кува врска во електричните системи

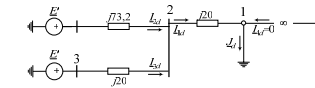
биде помала. Ако вкупната моќност на агрегатите тежи кон бесконечност, еквивалентната реактанција на системот ќе тежи кон нулата (X_к → 0). Систем со бесконечна моќност ќе има X_к = 0.

Всушност, секој ЕЕС има одредена **конечна инсталлирана моќност**, т.е. еквивалентната реактанција на системот X_к е секогаш поголема од 0. Меѓутоа, честопати големите ЕЕС во пресметките се третираат како системи со **бесконечна моќност**. Тоа значително ги олеснува и упростира пресметките, а добените резултати за струите на кувите врска се секогаш нешто зголемени, што ода во прилог на зголемување на сигурноста при проектирањето.

Согласно со напред реченото, еквивалентната шема за директниот систем во транзиентниот период (свездана на 110 kV страна) ќе биде како на сликата П.4.5.2 а.



Слика П.4.5.2 а



Слика П.4.5.2 б

Сега, со помош на сликата П.4.5.2 б која претставува упростена шема од сликата 4.4.2 а, ќе ја одредиме **влезната импеданција** на директниот систем Z_к (за транзиентниот период), гледана од местото на кувата врска:

$$Z_k = j20 + j73,21j20 = j20 + \frac{j73,2 \cdot j20}{j93,2} = j35,71 \Omega$$

Директната компонента на струјата на кува врска I_к на местото на кувата врска ќе биде:

$$I_k = \frac{E'}{Z_k + Z(f)} = \frac{1,2U_{ф}}{j35,71 + 0} = -j2,135 \text{ kA}$$

Глава IV - Кува врска во електричните системи

Во случај на трифазна кува врска, инверзната и нулатата компонента на струјата на кувата врска се еднакви на 0, т.е.:

$$I_{L1} = p(3) \cdot I_k = 0; \quad I_{L0} = q(3) \cdot I_k = 0,$$

т.е. струи ќе течат само во директниот систем.

Сега, со помош на сликата 4.4.2 б, лесно можеме да ја одредиме распределбата на струите во системот:

Врз основа на кирхофовите закони пишуваме:

$$I_{L1} = I_{L2} = -j2,135 \text{ kA};$$

$$I_{L1} + I_{L2} = I_{L3} \text{ и}$$

$$j73,2 \cdot I_{L1} = j20 \cdot I_{L3}$$

Следеа решението:

$$I_{L1} = \frac{20}{20 + 73,2} I_{L3} = -j0,458 \text{ kA},$$

$$I_{L2} = I_{L1} - I_{L3} = -j1,677 \text{ kA}.$$

Фазните струи I_{A1}, I_{B1}, I_{C1} низ прекинувачот во режимот на кувата врска ќе се добидат на следниот начин:

$$I_{A1} = I_{L1} + I_{L0} + I_{L2} = I_{L1} + 0 + 0 = I_{L1},$$

$$I_{B1} = a^2 \cdot I_{L1} + a \cdot I_{L0} + I_{L2} = a^2 \cdot I_{L1} + 0 + 0 = a^2 \cdot I_{L1},$$

$$I_{C1} = a \cdot I_{L1} + a^2 \cdot I_{L0} + I_{L2} = a \cdot I_{L1} + 0 + 0 = a \cdot I_{L1}.$$

Оттука следува:

$$I_{A1} = I_{B1} = I_{C1} = I_{L1} = 2,135 \text{ kA}.$$

Значи, струите во сите три фази се еднакви по ефективна вредност и се симетрично поместени за по 2π/3, што значи дека режимот на трифазна кува врска претставува симетричен режим.

Распонната струја на прекинувачот е најголемата фазна струја што прекинувачот мора да ја исклучи, т.е.

$$I_p = \max\{I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}\}.$$

Во нашиот случај, тоа ќе биде:

$$I_p = I_{A1} = I_{B1} = I_{C1} = 2,135 \text{ kA}.$$

Распонна моќност на прекинувач се дефинира како:

$$S_p = \sqrt{3} \cdot U_{ф} \cdot I_p.$$

За прекинувачот "P", во случајот, распонната моќност на трифазна кува врска изнесува:

$$S_p = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2,135 = 407 \text{ MVA}.$$

Глава IV. Куса врска во електричните системи

За прекинувачот "P" да биде во можност да ја исклучува трифазната куса врска настаната на собиралиците "1", неговата расклопна моќност треба да биде поголема од расклопната моќност на трифазна куса врска, која во случајот изнесува 407 MVA.

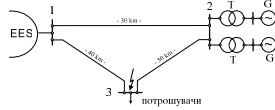
Пример 4.6. Се посматра режим на куса врска во суптранзиентниот период, настаната кај потрошувачите собиралицата "3" (сл. П.4.6.1). Да се одредат фазните напони и струи на местото на кусата врска за случај на:

- а) трифазна куса врска, б) двофазна куса врска.

Сите волони имаат исти подолжни параметри $z = (0,1 + j0,4) \Omega/\text{km}$. Пред настанувањето на кусата врска системот бил практично растоварен (презен од во системот).

Податоци за елементите:

- G: 50 MVA; 10,5 kV; $x_2' = x_2'' = 13\%$; $x_0 = 8\%$
- T: 50 MVA; 10,5/115 kV; $u_k = 12\%$
- EEC: $U_n = 10 \text{ kV}$; $S_n = 1210 \text{ MVA}$; 110/36,75 kV; $x_1' = x_1''$



Слика П.4.6.1

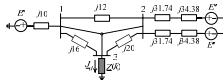
Решение:

За да ги одредиме приликите кај потрошувачот во режимот на кусата врска, најпрвин ќе биде потребно да ги одредиме влезните импедансии на системот Z_k (за суптранзиентниот период, како што е нагласено во задачата) и Z_n посматрани од местото на кусата врска. Притоа, се разбира, ќе ги занемариме активните отпори на сите елементи од системот и за импеданциите на директниот и инверзниот систем Z_k и Z_n ќе добиеме чисто имагинери вредности.

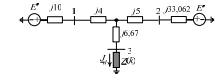
Еквивалентната шема за директниот систем е прикажана на сликата П.4.6.2 а, а на сликата П.4.6.2 б е дадена истата шема во упростен облик, при што триаголникот 1-2-3 е трансформиран во звезда и групата на

Глава IV. Куса врска во електричните системи

генератори и трансформатори, приклучени на собиралиците "2", се еквивалентираат со еден еквивалентен генератор. Е.м.с E^* на сите генератори во овој случај ќе изнесува $E^* = U_n \sqrt{3}$ (презент од во системот пред настанување на кусата врска).



Слика П.4.6.2 а



Слика П.4.6.2 б

Од сликата П.4.6.2 б лесно ќе ја одредиме влезната импеданција Z_k на директниот систем, посматрана од местото на кусата врска (собиралица "3").

$$Z_k = j6,67 + j(10 + 4)j(5 + 33,062) = j16,9 \Omega$$

Еквивалентната шема за инверзниот систем, во дадениот случај, е напозно нека со шемата од директниот систем (за суптранзиентниот период), со таа разлика што инверзниот систем е пасивен (без е.м.с, кои се премостени). Тоа значи дека влезната импеданција во инверзниот систем Z_n (посматрана од јазолот "3") ќе биде:

$$Z_n = Z_k = j16,9 \Omega \text{ (свидени на 110 kV страна)}$$

Сега лесно ќе ги одредиме симетричните компоненти на струите и напоните кај собиралиците "3", а потоа ќе ги одредиме и соодветните фазни величини.

- а) Трифазна куса врска кај потрошувачите (собиралица "3"):
 $k = 3$; $Z(0) = Z(3) = 0$;

$$I_d = \frac{E^*}{Z_k + Z_n} = \frac{E^*}{j16,9} = -j3,758 \text{ kA};$$

$$I_0 = I_n = 0 \text{ kA};$$

$$I_1 = I_d + I_n = I_d;$$

Глава IV. Куса врска во електричните системи

$$U_B = a^2 \cdot I_d + a \cdot I_1 + I_n = a^2 \cdot I_d;$$

$$U_C = a \cdot I_d + a^2 \cdot I_1 + I_n = a \cdot I_d;$$

$$U_{1B} = Z(k) \cdot I_d = 0; \quad U_{1C} = U_{1B} = 0;$$

$$\Rightarrow U_{1A} = U_{1B} = U_{1C} = 0$$

Значи, фазните напони на местото на кусата врска за случај на трифазна куса врска се секогаш сланкави на нула.

- б) Двофазна куса врска кај потрошувачите (собиралица "3"):
 $k = 2$; $Z(0) = Z(2) = Z = j16,9 \Omega$;

$$I_d = \frac{E^*}{Z(2) + Z_n} = \frac{110 \sqrt{3}}{j16,9 + j16,9} = -j1,879 \text{ kA};$$

$$I_1 = -I_d = j1,879 \text{ kA};$$

$$I_n = 0 \text{ kA};$$

$$I_2 = I_d + I_n = I_d = 0;$$

$$U_B = a^2 \cdot I_d + a \cdot I_1 + I_n = (a^2 - a) \cdot I_d = -j\sqrt{3} \cdot (-j1,879) = -j3,254 \text{ kA}$$

$$U_C = -I_d = j3,254 \text{ kA}$$

$$U_{1B} = Z(k) \cdot I_d = j16,9 \cdot (-j1,879) = 31,755 \text{ kV};$$

$$U_{1C} = U_{1B};$$

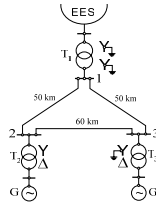
$$U_{10} = 0$$

$$U_{1A} = U_{1B} + U_{1C} + U_{10} = 2 \cdot U_{1B} = 63,51 \text{ kV};$$

$$U_{1B} = U_{1C} = (a^2 + a) \cdot U_{1B} = -U_{1B} = -31,755 \text{ kV}$$

$$U_{1C} = U_{1B} = -31,755 \text{ kV}.$$

Пример 4.7. За системот прикажан на сликата П.4.7.1 да се одреди ефективната вредност на најмалата компонента на струјата низ заземувачот на трансформаторот T_1 во суптранзитниот период, за случај на еднофазна куса арса.



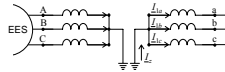
Слика П.4.7.1

а) кај собиралиците "1"; б) кај собиралиците "2".
 Колкави се фазните напони во повредениот јазел во обата случаја?
 Да се претпостави дека пред настанување на кусата арса системот бил практично неоптоварен.

Податоци за елементите:

- G: 80 MVA; 10,5 kV; $X_d^* = X_i = 10\%$; $x_d = 25\%$; $X_d = 150\%$; $X_q = 8\%$
- T_1 : 150 MVA; 110/231 kV; $u_k = 12\%$
- $T_2 = T_3$: 80 MVA; 10,5/115 kV; $u_k = 10\%$
- EES: $U_n = 220$ kV; $S_{T1} = 3330$ MVA; $X_d^* = X_i^* = X_d^*$; $X_d^* = 1,1 \cdot X_i^*$

Сите водови имаат ист пресек и исти поделжани параметри: $x = 0,4 \Omega/\text{km}$; $x_0 = 3x = 1,2 \Omega/\text{km}$.



Слика П.4.7.2

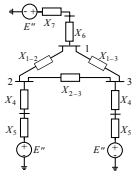
Решение:

Струјата I_k низ заземувачот од трансформаторот T_1 е еднаква на збирот од струите во сите три фази (слика П.4.7.2), т.е. таа изнесува:

$$I_k = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = 3 \cdot I_{L0}$$

Значи, за да ја одредиме струјата I_k низ заземувачот од T_1 , потребно е да ги одредиме фазните струи низ T_1 , односно нултата компонента I_{L0} на струјата низ трансформаторот T_1 .

а) **Еднофазна куса арса кај собиралиците "1"**



Слика П.4.7.3

Еквивалентната шема на директниот систем за суптранзитниот период е прикажана на сликата П.4.7.3. EES во шемата за директниот систем се претставува со соодветната суптранзитна реактанција (X_1) и со ем с E'' над неа. Субтранзитната реактанција X_2 на EES се претставува врз основа на суптранзитната моќност на трифазна куса арса X_{23} на EES.

$$X_1 = \frac{U_n^2}{S_{T1}} = \frac{220^2}{3330} = 14,534 \Omega$$

Сведена на 110 kV страна, таа изнесува:

$$X_2 = 14,534 \left(\frac{110}{231} \right)^2 = 3,3 \Omega$$

Реактанциите на останатите елементи во системот лесно ќе ги пресметаме со помош на поимните релации. Сведени на 110 kV страна, тие изнесуваат: $X_{1-2} = X_{1-3} = 50,04 = 20 \Omega$; $X_{2-3} = 60,04 = 24 \Omega$; $X_4 = 16,53 \Omega$; $X_5 = 16,53 \Omega$ и $X_6 = 9,68 \Omega$.

Е.м.ска E'' , согласно на горе кажаното (неоптоварен систем пред настанување на кусата арса), изнесува:

$$E'' = 1 \cdot U_{op} = 110 / \sqrt{3} = 63,51 \text{ kV}$$

Шемата од сликата П.4.7.3 можеме да ја поедноставиме, ако триаголникот 1-2-3 го трансфигурираме во ѕвезда (слика П.4.7.4). Параметрите на ѕвездата X_1 , X_2 и X_3 ќе бидат:

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

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



Слика П.4.7.4

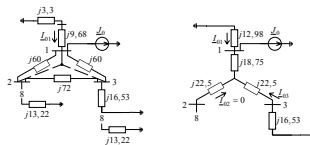
Сега лесно ќе ја одредиме импеданцијата на директниот систем Z_d . Таа претставува влезна импеданција во директниот систем, гледана од повредениот јазел, т.е. од местото на кусата арса. Во случајов, таа изнесува:

$$Z_d = j(X_1 + X_2) \parallel [j(X_3 + X_4 + X_5) \parallel j(X_6 + X_7)] = j8,714 \Omega$$

На сличен начин се добива и реактанцијата Z_n на инверзниот систем. Во конкретниот случај таа е еднаква на директната, т.е.

$$Z_n = Z_d = j8,714 \Omega$$

Еквивалентната шема за нулти систем е прикажана на сликата П.4.7.5 а, а на сликата П.4.7.5 б е дадена истата шема во упростен облик. Импеданцијата на нултиот систем Z_0 претставува влезна импеданција во нултиот систем, гледана од јазелот "1" и таа изнесува (слика П.4.7.5 б):



Слика П.4.7.5 а

Слика П.4.7.5 б

$$Z_0 = j12,9881 \parallel j(22,5 + 18,75 + 16,63) = j10,602$$

Глава IV. Куца арса во електрически системи

Симетричните компоненти на струјата на местото на куцата арса ќе бидат ($k=1, Z(k) = Z_0 + Z_1$)

$$I_{d0} = I_d = I_{d1} = \frac{E''}{Z_0 + Z_1} = \frac{E''}{j28,03} = -j2,266 \text{ kA}$$

Нултата компонента на струјата I_{d0} низ трансформаторот T_1 лесно се одредува од шемата за нултиот систем (слика П.4.7.5 б) со помош на Карофовите закони:

$$I_{d0} = \frac{Z_1 I_d}{Z_1 + j12,98} = \frac{j10,6(-j2,266)}{j12,98} = -j1,880 \text{ kA}$$

Ефективната вредност на највисоката компонента на струјата I_d низ заземувачот од трансформаторот T_1 ќе биде:

$$I_1 = 3 \cdot I_{d0} = 5,55 \text{ kA}$$

Симетричните компоненти на фазните напони кај повредениот јазел "1", ги одредуваме со помош на општите равенки:

$$\begin{aligned} U_{1f} &= E'' - Z_0 I_{d0} = 43,764 \text{ kV} & U_{1f0} &= 0 \\ U_{1f1} &= 0 - Z_1 I_{d1} = -19,746 \text{ kV} & \Rightarrow U_{1f1} &= 65,75 \angle 236,8^\circ \text{ kV} \\ U_{1f2} &= 0 - Z_2 I_{d2} = -24,02 \text{ kV} & U_{1f2} &= 65,75 \angle 123,2^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

б) Еднофазна куца арса кај собириците "2"

Решението во овој случај гласи:

$$I_2 = 1,608 \text{ kA}, \quad U_{2f0} = 0, \\ U_{2f1} = U_{2f2} = (-58,319 \cdot j55) \text{ kV} = 80,164 \angle 223,3^\circ \text{ kV}$$

Како што гласаме, во овој случај напоните на здравите фази се поголеми од номиналниот фазен напон ($U_{f0} = 110 \sqrt{3} = 63,51 \text{ kV}$). Во конкретниот случај тоа покажување на местото на куцата арса изнесува околу 26%.

Глава IV. Куца арса во електрически системи

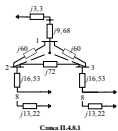
Пример 4.8. Колкави ќе бидат фазните напони на повредениот јазел "2" во суптранзитниот период, за случај на еднофазна куца арса кај собириците "2" во системот од претходната задача, ако звездичното од трансформаторот T_2 е директно заземено. Пред настанување на куцата арса системот бил практично неотворен.

Решение:

Со оглед на фактот дека еквивалентните шемат за директен и инверзен систем не зависат од спиргите на трансформаторите, импеданциите Z_0 и Z_1 ќе ги одредиме со помош на сликите П.4.7.3 и П.4.7.4 од претходната задача:

$$Z_0 = Z_0 = j(X_0 + X_1) \parallel j(X_2 + X_3 + X_4 + X_5) \parallel j(X_1 + X_4 + X_5) = j12,67 \Omega$$

Меѓутоа, еквивалентната шема за нулти систем во споредба со претходната задача сега ќе се измени (слика П.4.8.1), поради тоа што звездичното од трансформаторот T_2 во овој случај е директно заземено. Затоа и влезната импеданција во нултиот систем гласана од местото на куцата арса, т.е. импеданцијата на нултиот систем Z_0 , во овој случај ќе биде помала. Неа ја добиваме од сликата П.4.8.1 и таа изнесува $Z_0 = j11,7 \Omega$.



Симетричните компоненти на фазните напони на местото на куцата арса ќе бидат:

$$\begin{aligned} U_{2f0} &= E'' - Z_0 I_{d0} = (Z_0 + Z_1) \cdot E'' / (Z_0 + Z_1 + Z_2) = 41,782 \text{ kV} \\ U_{2f1} &= -Z_1 I_{d1} = -Z_1 \cdot E'' / (Z_0 + Z_1 + Z_2) = -21,727 \text{ kV} \\ U_{2f2} &= -Z_2 I_{d2} = -Z_2 \cdot E'' / (Z_0 + Z_1 + Z_2) = -20,055 \text{ kV} \end{aligned}$$

Фазните напони во повредениот јазел изнесуваат:

$$\begin{aligned} U_{2f1} &= U_{2f0} + U_{2f1} + U_{2f2} = 0 \text{ kV} \\ U_{2f2} &= a^2 \cdot U_{2f0} + a \cdot U_{2f1} + U_{2f2} = 62,7 \angle 241,3^\circ \text{ kV} \\ U_{2f3} &= a \cdot U_{2f0} + a^2 \cdot U_{2f1} + U_{2f2} = 62,7 \angle 118,7^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

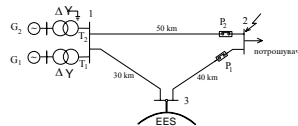
Ако извршиме споредување со резултатите што ги добивме во претходната задача под б), ќе заклучиме дека со заземјување на звездичното на трансформаторот T_2 напоните на здравите фази во режимот на куцата арса значително се намалила и тие се сега приближно слични на номиналниот напон. Тоа и треба да се очекува, бидејќи со намалување на факторот на заземјување $k_f = Z_0 / Z_1$ се намалуваат и напоните во здравите фази при еднофазната куца арса. Кај вредност со исклучива неутрална точка ($Z_0 \rightarrow \infty$) фазните напони во здравите фази можат да бидат слични на линиските (меѓуфазните) напони, т.е. за 73% поголеми од U_{f0} .

Глава IV. Куца арса во електрически системи

Пример 4.9. За системот прикажан на сликата П.4.9.1 да се димензионираат прекинувачите P_1 и P_2 според суптранзитната струја на:

а) трифазна куца арса; б) еднофазна куца арса,

во случај куцата арса да настане кај потрошувачите, приклучени во јазелот "2". Да се претпостави вршно мезоволем случај (номинално неотворен систем пред настанувањето на куцата арса).



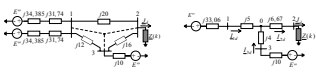
Слика П.4.9.1

Податоци за елементите:
 $-G_1 = G_2 = 50 \text{ MVA}; 10,5 \text{ kV}; X_1'' = X_2'' = 13\%; X_0 = 8\%$
 $-T_1 = T_2 = 50 \text{ MVA}; 10,5/115 \text{ kV}; u_k = 12\%$
 $-EES: U_f = 110 \text{ kV}; S_f = 1210 \text{ MVA}; X_f'' = X_f / 2$

-Водови: Сите водови имаат исти пресеци и исти подолжни параметри:
 $z = (0,12 + j0,4) \Omega/\text{km}; x_0 = 1,3 \Omega/\text{km}$ (реактиванција за нулти систем)

Решение:

Еквивалентната шема на мрежата за директен систем, сведена на 110 kV страна, е прикажана на сликата П.4.9.2 а. Истата нема можеме да ја упростиме ако триголкуваме 1-2-3 го трансфигурираме во звезда (слика П.4.9.2 б) и ако извршиме извесни упростувања.



Слика П.4.9.2 а

Слика П.4.9.2 б

Глава IV - Куса арса во електрическиот систем

а) Трифазна куса арса при собиралице "2"

Во случај на трифазна куса арса, импеданцијата на кусата арса ќе биде $Z(k) = Z(3) = 0$. Внатрешната импеданција на директниот систем Z_d , гледана од местото на кусата арса (јаза "2"), ќе биде:

$$Z_d = j6,67 + j(4+10)\pi j(5+33,06) = j16,9 \Omega$$

Директната компонента I_d на струјата на кусата арса сега ќе биде:

$$I_d = E^* (Z_d + Z(k)) = E^* / Z_d = 1,1 \cdot 110 \cdot \sqrt{3} / j16,9 = -j4,133 \text{ kA};$$

$$I_d = I_{d0} = 0$$

Симетричните компоненти на напонот во точката "2" во режимот на трифазна куса арса се еднакви на нула, т.е.:

$$U_{2d} = U_{21} = U_{20} = 0$$

Согласно со шемата прикажана на сликата П.4.9.2 б, напонот во јазелот "0" ќе биде:

$$U_{0d} = U_{2d} + j6,67 \cdot I_{d0} = j6,67 \cdot I_d = 27,555 \text{ kV}; \quad U_{00} = U_{0d} = 0 \text{ kV}$$

Од истата шема следуваат и односите:

$$I_{1d} + I_{2d} + I_{3d} = I_{d0} = -j4,133 \text{ kA} \Rightarrow I_{1d} = -j1,111 \text{ kA}$$

$$E^* - j(33,06+5) \cdot I_{1d} = E^* - j(4+10) \cdot I_{2d} \Rightarrow I_{2d} = -j3,022 \text{ kA}$$

Сега можеме да ги одредиме и напоните U_{1d} и U_{2d} во јазлите "1" и "3":

$$U_{1d} = U_{0d} + j5 \cdot I_{1d} = 33,11 \text{ kV};$$

$$U_{2d} = U_{0d} + j4 \cdot I_{2d} = 39,643 \text{ kV}$$

Директната компонента на струјата низ водот 1-2 (сл. П.4.9.2 а) ќе биде:

$$I_{1-2d} = (U_{1d} - U_{2d}) / j20 = U_{1d} / j20 = -j1,655 \text{ kA}$$

Слично за водот 3-2:

$$I_{1-2d} = (U_{1d} - U_{2d}) / j16 = U_{1d} / j16 = -j2,478 \text{ kA}$$

Бидејќи трифазната куса арса претставува симетричен режим, фазните напони и струи во било кој елемент од системот се исти во ефективна вредност и временски се поместени за по $T/3$, т.е.:

$$I_{1-2a} = I_{1-2b} = I_{1-2c} = I_{1-2d} = 1,655 \text{ kA}, \text{ и}$$

$$I_{1-2a} = I_{1-2b} = I_{1-2c} = I_{1-2d} = 2,478 \text{ kA}$$

Расклопната моќност на прекинувачот P₁ се дефинира како производ од номиналниот напон на прекинувачот и расклопната струја на прекинувачот I_{11} (струја што тој треба да ја прекине), т.е.:

Глава IV - Куса арса во електрическиот систем

$$S_{d1} = \sqrt{3} \cdot U_{11} \cdot I_{11} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1,655 = 315,34 \text{ MVA}$$

Слично, за прекинувачот P₂:

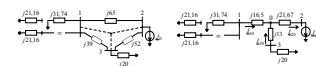
$$S_{d2} = \sqrt{3} \cdot U_{12} \cdot I_{12} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2,478 = 472,12 \text{ MVA}$$

б) Еднофазна куса арса кај собиралице "2"

За одредување на фазните струи низ водите 1-2 и 2-3 во случајот на еднофазна куса арса, најпрво ќе ги одредиме приликите во поврзениот јаза 2. За таа цел, потребно е да ги одредиме импеданциите Z_d , Z_0 и Z_1 на соодветните симетрични системи.

Еквивалентната шема за директниот систем (слика 4.8.2 а) не зависи од видот на кусата арса и затоа е илустрирана исто како и во претходниот случај. Единствената разлика е импеданцијата на кусата арса $Z(k)$ која во случајот ($k=1$) изнесува:

$$Z(k) = Z(1) = Z_0 + Z_1$$



Слика П.4.9.3 а Слика П.4.9.3 б

На сликата П.4.9.3 а е прикажана еквивалентната шема на нултиот систем, а на сликата П.4.9.3 б истата шема, но во упростен облик, од која можеме да ги одредиме и импеданцијата на нултиот систем Z_0 :

$$Z_0 = j21,67 + j(13+20)\pi j(16,5+31,74) = j41,265 \Omega$$

Приликите на местото на кусата арса ги одредуваме од веќе познатите равенки:

$$I_d = \frac{E^*}{(Z_d + Z(1))} = \frac{E^*}{(Z_d + Z_0 + Z_1)} = \frac{11 \cdot 110}{j\sqrt{3} \cdot (16,9 + 16,9 + 41,265)} = -j0,931 \text{ kA}$$

Притоа е земено дека $Z_1 = Z_2$, што може јасно да се види и од податоците за параметрите на елементите. Исто така, треба да се има на ум дека еквивалентната шема за инверзниот систем е илустрирана исто со еквивалентната шема за директниот систем. Бидејќи во режимот на еднофазна куса арса важи $I_d = I_{d0} = I_{d1}$, тоа значи дека струите низ сите граници во директниот и во инверзниот систем ќе бидат еднакви. Нив ќе ги одредиме користејќи ја сликата П.4.9.2 б:

$$I_{2d} = I_d = -j0,931 \text{ kA};$$

$$I_{1d} = (E^* - U_{2d}) / j(4+10);$$

$$U_{0d} = (j6,67 + Z(0)) \cdot I_d = 60,361 \text{ kV}$$

Глава IV - Куса арса во електрическиот систем

$$I_{1d} = (69,86 - 60,361) / j14 = -j0,678 \text{ kA};$$

$$I_{2d} = I_{1d} - I_{d0} = -j0,253 \text{ kA}$$

$$U_{1-2d} = j5 \cdot I_{1d} + j6,67 \cdot I_{2d} = 7,475 \text{ kV}$$

$$I_{1-2d} = U_{1-2d} / j20 = -j0,374 \text{ kA}$$

$$I_{1-2d} = j4 \cdot I_{2d} + j6,67 \cdot I_{1d} = 8,922 \text{ kV}$$

$$I_{1-2d} = U_{1-2d} / j16 = -j0,577 \text{ kA}$$

Бидејќи шемите за директен и инверзен систем се исти, исти ќе бидат и струите низ границите, т.е.:

$$I_{1-2a} = -j0,374 \text{ kA}; \quad I_{1-2b} = -j0,577 \text{ kA}$$

Нив останува уште да ги одредиме, на ист начин, и струите низ границите во нултиот систем. Според сликата П.4.9.3 б имаме:

$$I_{20} = I_d = -j0,931 \text{ kA};$$

$$I_{10} = (j21,67 \cdot I_{20} - j41,265 \cdot I_{d0}) / j(13+20) = -j0,553 \text{ kA};$$

$$I_{10} = I_{20} - I_{d0} = -j0,378 \text{ kA}$$

$$I_{1-20} = j16,5 \cdot I_{10} + j21,67 \cdot I_{20} = -j0,406 \text{ kA};$$

$$I_{1-20} = j13 \cdot I_{10} + j21,67 \cdot I_{20} = -j0,526 \text{ kA}$$

Фазните струи низ водот 1-2 ќе бидат:

$$I_{1-2a} = I_{1-2d} + I_{1-20} = -j0,374 - j0,374 - j0,406 = -j1,154 \text{ kA}$$

$$I_{1-2b} = a^2 \cdot I_{1-2d} + a \cdot I_{1-20} + I_{1-20} = (a^2 + a) \cdot (-j0,374) - j0,406 = -j0,032 \text{ kA}$$

$$I_{1-2c} = a \cdot I_{1-2d} + a^2 \cdot I_{1-20} + I_{1-20} = (a + a^2) \cdot (-j0,374) - j0,406 = -j0,032 \text{ kA}$$

Фазните струи низ водот 3-2 ќе бидат:

$$I_{1-2a} = I_{1-2d} + I_{1-20} = -j0,374 - j0,557 = -j0,931 \text{ kA}$$

$$I_{1-2b} = a^2 \cdot I_{1-2d} + a \cdot I_{1-20} + I_{1-20} = (a^2 + a) \cdot (-j0,577) - j0,526 = -j0,031 \text{ kA}$$

$$I_{1-2c} = a \cdot I_{1-2d} + a^2 \cdot I_{1-20} + I_{1-20} = (a + a^2) \cdot (-j0,577) - j0,526 = -j0,031 \text{ kA}$$

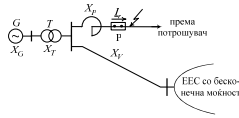
Расклопната моќност на прекинувачите P₁ и P₂ ќе биде:

$$S_{d1} = \sqrt{3} \cdot U_{11} \cdot I_{11} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1,154 = 219,9 \text{ MVA}$$

$$S_{d2} = \sqrt{3} \cdot U_{12} \cdot I_{12} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1,64 = 312,5 \text{ MVA}$$

Пресметките покажуваат дека во случајот меродавна за димензионирање на прекинувачите P₁ и P₂ е струјата на трифазната куса арса.

Пример 4.10. На сликата е прикажан 220 kV прееносен систем. Познати се реактансите на поедините елементи (сведени на 220 kV страна): $X_G = 10\Omega$; $X_T = 10\Omega$; $X_V = 7,87\Omega$. Потребно е да се одреди реактанцијата X_P на предлошката, приклучена во страната со прекинувачот P така што прекинувачот да биде способен да ја исклучи струјата на трифазната куца врска, настаната зад прекинувачот, ако тој има номинална расклопна моќност $S_P = 5000$ MVA. Притоа да се претпостави дека пред настанување на куцата врска системот бил номинално оттоварен и дека куцата врска се исклучува во суптраинвентниот период.



Слика 4.9.1

Решение:

Во случај на трифазна куца врска, фазните струи низ прекинувачот P се еднакви по ефективна вредност и изнесуваат:

$$I_A = I_B = I_C = I_f = E' / Z_d,$$

каде што импеданцијата на директниот систем изнесува:

$$Z_d = j(X_G + X_T + X_V) \parallel (X_V + X_{ЕЕС}).$$

Бидејќи електроенергетскиот систем ЕЕС е систем со бесконечна моќност, неговата реактанција ќе биде $X_{ЕЕС} = 0$ и соодветно на тоа:

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

Расклопната струја на прекинувачот P ќе биде:

$$I_f = I_A = \frac{E'}{Z_d} = 1,1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d},$$

и соодветно, расклопната моќност:

$$S_P = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_f = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d} = \frac{1,1 \cdot U_n^2}{Z_d}.$$

За да биде прекинувачот P, чија номинална расклопна моќност изнесува $S_P = 5000$ MVA, способен да ја исклучи куцата врска, потребно е да биде задоволен условот: $S_P \leq S_{Pn}$, т.е.:

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

од каде што следува:

$$Z_d \geq 1,1 \cdot U_n^2 / S_{Pn}, \text{ т.е.}$$

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

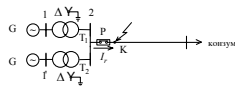
Оттука се добива релацијата:

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

$$X_P \geq 1,1 \cdot 220^2 / 5000 - 7,87 \cdot 20 / (7,87 + 5) = 5 \Omega$$

Значи: $X_P \geq 5 \Omega$.

Пример 4.11. Да се одреди расклопната струја и расклопната моќност на прекинувачот P за случај на еднофазна куца врска во точката "K" (сл. П4.11.1). Прекинувачот ја исклучува куцата врска во суптраинвентниот период. За колку ќе се намали расклопната струја на еднофазната куца врска, ако заведиштето на трансформаторот T₂ не е заземлено (спрета ΔY). Да се претпостави дека пред настанувањето на куцата врска системот бил номинално оттоварен.



Слика П4.11.1

Податоци за елементите:

- G: 100 MVA; 10,5 kV; $X_G' = X_G'' = 13\%$; $X_G = 8\%$

- T₁ = T₂: 100 MVA; 10,5/115 kV; $u_k = 12\%$

Решение:

Реактантите на елементите ќе бидат:

$$X_G' = X_G'' = \frac{X_G' \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{13}{100} \cdot \frac{10,5^2}{100} = 17,19 \Omega$$

$$X_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{12}{100} \cdot \frac{115^2}{100} = 15,87 \Omega$$

Еквивалентната импеданција (влезната импеданција) на директниот систем Z_d' , сведена на 110 kV страна, ќе биде:

$$Z_d' = (X_G' + X_T) \parallel (X_G'' + X_T) = (17,19 + 15,87) / 2 = 16,53 \Omega. \text{ Слично:}$$

$$Z_1 = (X_{G1} + X_T) / 2 = (17,19 + 15,87) / 2 = 16,53 \Omega,$$

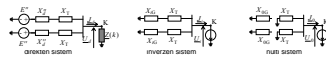
$$\text{и } Z_0 = X_T \parallel X_T = X_T / 2 = 7,935 \Omega.$$

Е.м.с. E' во суптраинвентниот период (уважувајќи го и предпоставувањето во системот) ќе биде:

$$E' = 1,1 \cdot U_n / \sqrt{3} = 1,1 \cdot 110 / \sqrt{3} = 69,86 \text{ kV}.$$

Директната компонента на струјата на куцата врска I_d' ќе биде:

Глава IV. Куца врски на електричните системи



Слика П.4.11.2. Замески шемат за директен, инверзиен и нулта систем

$$\underline{I}_f = \frac{E''}{Z_d + Z_f(k)} = \frac{E''}{Z_d + (Z_0 + Z_0)} = \frac{69,86}{j16,53 + j(16,53 + 7,935)} = -j1,704 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_f = p_1 \cdot \underline{I}_f = 1 \cdot \underline{I}_f = -j1,704 \text{ kA}; \underline{I}_f = q_1 \cdot \underline{I}_f = \underline{I}_f = -j1,704 \text{ kA}$$

Фазните струи низ прекинувачот P ќе бидат:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_f + \underline{I}_f + \underline{I}_f = -j5,112 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_f = -j1,704 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_f = -j1,704 \text{ kA};$$

Расклопната струја низ прекинувачот ќе биде:

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

додека расклопната моќност ќе изнесува:

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

Ако ѕвездицата на трансформаторот T₂ не е заземјена, неговата реактивна импеданција за нултиот систем ќе биде бесконечна и во тој случај импеданцијата на нултиот систем Z₀ ќе се зголеми на вредноста Z₀ = jX₀ = j15,87 Ω. Останатите импеданции Z_d и Z_f нема да се променат, бидејќи импеданцијата на T₂ во директниот и во инверзниот систем не зависи од спрегата на соединување на трансформаторот. Затоа во овој случај струјата на еднофазната куца врски ќе се намали, т.е. ќе имаме:

$$\underline{I}_f = \frac{E''}{Z_d + Z_0 + Z_f} = \frac{69,86}{j16,53 + j16,53 + j15,87} = -j1,428 \text{ kA},$$

и соодветно:

$$I_f = I_A = 3 \cdot I_f = 4,283 \text{ kA};$$

$$S_f = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_f = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 4,283 = 816 \text{ MVA}.$$

Гледаме дека расклопната струја и расклопната моќност на прекинувачот се намалила за 16,2% со тоа што ѕвездицата (неутралната точка) на трансформаторот T₂ не е заземјена. Тоа е и една од мерките за намалување на струите на куца врски, бидејќи во голем број случаи струјата на еднофазна куца врски е доста голема, зурн и постоена (како што е во овој случај) од струјата на трифазна куца врски и како таква може да биде меродавна при изборот (димензионирањето) на опремата.

Високонапонски мрежи и системи

Стабилност на работа на 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

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 1 / 62

Вовед

- Електромеханички преодни процеси при промена на режимот на работа на ЕЕС
 - ▶ Нормални мали промени кои постојано се случуваат поради промени на оптоварувањето или промени во регулацијата на генераторите – **статичка стабилност**
 - ▶ Нагли значителни промени на режимот на работа на системот поради појава на куси врски или испад на потрошувач, генератор или елемент од мрежата – **динамичка стабилност**
- Преодни процеси → диференцијални равенки
- Анализите на стабилноста на ЕЕС овде ќе имаат „инженерски“ карактер, што значи дека ќе правиме разни занемарувања и упростувања, но такви, кои квалитативно нема да ја изменат сликата на посматраните појави
- Упростувањата ќе ни овозможат примена на познати практични математички методи и постапки, коишто на доволно брз и едноставен начин ќе ни дадат резултати со задоволителна точност

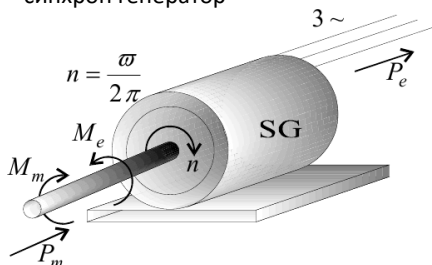
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 2 / 62

Равенка на движење на синхрон агрегат

Синхрон агрегат претставува машинска група која се состои од турбина и синхрон генератор



$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_e$$
$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad \text{нелинеарност: } \omega \frac{d\omega}{dt}$$
$$\omega \approx \omega_o = 2\pi f$$
$$J\omega_o \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e$$

Време на залет T_J – време за кое што агрегатот ќе се залета од $\omega = 0$ до $\omega = \omega_o$ под дејство на константен момент $M_n = S_n / \omega_o$ (момент при $P = S_n$ и $\cos \varphi = 1$)

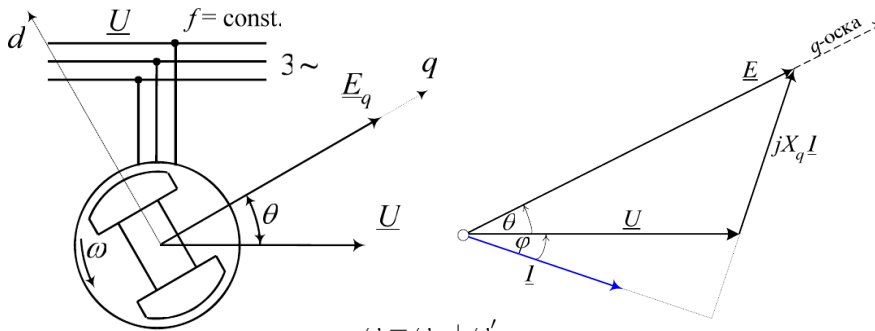
$$T_J = \frac{J\omega_o^2}{S_n} \Rightarrow J\omega_o = \frac{S_n T_J}{\omega_o}$$
$$\frac{S_n T_J}{\omega_o} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 3 / 62

Агол на изместување



$$\begin{aligned}\omega &= \omega_o + \omega' \\ \theta &= \theta_o + \omega' t \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega' = \omega - \omega_o \\ \omega &= \omega_o + \frac{d\theta}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{d^2\theta}{dt^2}\end{aligned}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 4 / 62

Агол на изместување

Замената на брзината ω со аголот на изместување θ во равенката на движење ја вршине затоа што електричната моќност P_e што синхронизираниот генератор ја оддава во мрежата може да се изрази во зависност аголот θ и од величините E_q и U .

$$\frac{S_n T_J}{\omega_o} \frac{d^2\theta}{dt^2} = P_m - P_e(\theta)$$

турбогенератори $X_d = X_q$

$$P_e = \frac{E_q U}{X_d} \sin \theta = P_M \sin \theta$$

хидрогенератори $X_d > X_q$

$$P_e = \frac{E_q U}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\theta$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 5 / 62

Асинхрона моќност

Се јавува во случајот кога постои релативно движење на роторот и вртливото магнетно поле, т.е. кога е $\omega \neq \omega_o$ и се стреми да ги израмни брзините ω и ω_o

$$P_a = K_p \frac{d\theta}{dt}$$

$$\begin{aligned}\frac{S_n T_J}{\omega_o} \frac{d^2\theta}{dt^2} + K_p \frac{d\theta}{dt} &= P_m - P_e(\theta) \\ M \frac{d^2\theta}{dt^2} + K_p \frac{d\theta}{dt} &= P_m - P_e(\theta)\end{aligned}$$

константа на инерција

$$M = \frac{S_n T_J}{\omega_o} \left[\frac{\text{MW} \cdot \text{s}^2}{\text{rad}} \right] \quad \text{или} \quad M = \frac{S_n T_J}{360f} \left[\frac{\text{MW} \cdot \text{s}^2}{\text{el}} \right]$$

за турбоагрегати $T_j = 4 \div 12 \text{ s}$

за хидроагрегати $T_j = 4 \div 9 \text{ s}$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 6 / 62

Еквивалентирање на група од k агрегати

Повеќе агрегати приклучени на заеднички собирници

$$M_e = M_1 + M_2 + \dots + M_k = \sum_{i=1}^k M_i$$
$$S_e = S_{n1} + S_{n2} + \dots + S_{nk} = \sum_{i=1}^k S_{ni}$$
$$T_{Je} = \frac{S_{n1} T_{J1} + S_{n2} T_{J2} + \dots + S_{nk} T_{Jk}}{S_e} = \frac{\sum_{i=1}^k S_{ni} T_{Ji}}{S_e}$$

идентични агрегати

$$M_e = k \cdot M$$

$$S_e = k \cdot S_n$$

$$T_{Je} = T_J$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

7 / 62

Упростувања

- **Занемарување на придушниот момент $K_p d\theta/dt$**
Без придушување осцилациите во преодниот режим ќе траат бесконечно долго време. Доколку за решението добиеме дека има осцилаторен карактер тоа ќе значи дека системот е стабилен.
- **Занемарување на дејството на турбинскиот регулатор**
Турбинскиот регулатор делува за 0,5 до 1 s од почетокот на преодниот режим. Но тој нема да ја измени сликата на проблемот, бидејќи прашањето дали системот е стабилен или не е веќе решено во периодот кога турбинскиот регулатор сè уште не проработил.
- **Занемарување на испакнатоста на половите кај хидрогенераторите**

$$\frac{E_q U}{X_d} \sin \theta \gg \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\theta \Rightarrow P_e = \frac{E_q U}{X_d} \sin \theta$$

Амплитудата на вториот хармоник изнесува обично само 10%-15% од амплитудата на основната синусоида и има многу мало влијание на преодните процеси.

МТ (ПЕЕС)

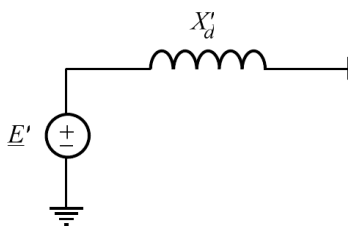
ВНМС

Скопје, 2019

8 / 62

Модел на синхрон генератор при анализите на динамичка стабилност

Во преодните режими, со оглед на кусото времетраење на суптранзиентниот период, за сето време додека трае преодниот процес ќе можеме да сметаме дека реактанцијата на синхронниот генератор е еднаква на транзиентната реактанција X'_d .



МТ (ПЕЕС)

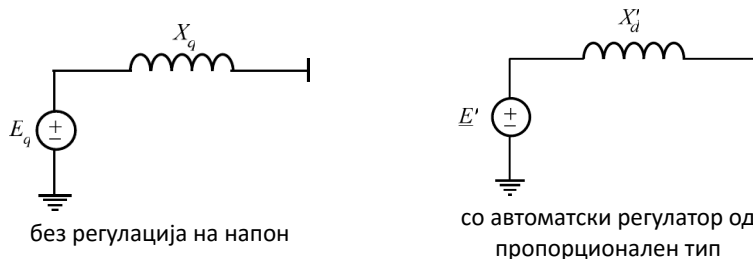
ВНМС

Скопје, 2019

9 / 62

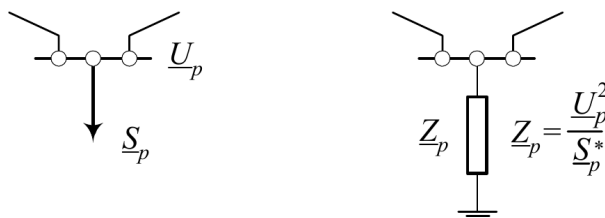
Модел на синхрон генератор при анализите на статичка стабилност

Моделот што зависи не само од параметрите на синхроната машина, туку и од начинот на регулација на возбудата во роторската намотка.



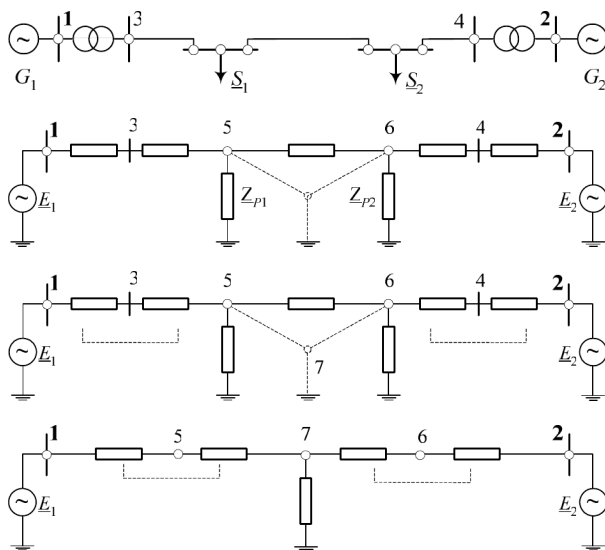
Ако генератор има **брз автоматски регулатор на возбудата**, при анализите на статичката стабилност тој се моделира со **идеален напонски генератор** ($E = U$).

Еквивалентирање на потрошувачите

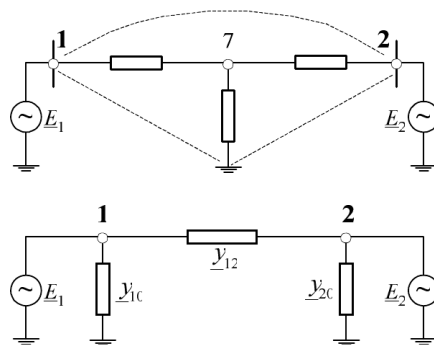


- Потрошувачите се еквивалентираат со константна импеданција.
- Потрошувачите ги третираме како „дел од мрежата“, така што нивните импеданции ќе ги „вградиме“ во мрежата со што потрошувачките јазли стануваат пасивни.
- Со редукција на матрицата на адмитанции на мрежата можеме да ги елиминираме сите пасивни јазли со што ќе оперираме само со „генераторските јазли“.

Редукција на јазли во мрежата



Редукција на јазли во мрежата



$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{10} + y_{12} & -y_{12} \\ -y_{12} & y_{20} + y_{12} \end{bmatrix}$$

Аглови карактеристики на моќност

Прво ги пресметуваме струите што генераторите ги инјектираат во мрежата

$$\underline{I} = \underline{Y} \cdot \underline{E}$$

каде што \underline{Y} е матрицата на адмитанции за генераторските јазли, а \underline{E} е вектор со електромоторните сили на генераторите

$$\underline{E}_i = E_i \cdot e^{j\theta_i}$$

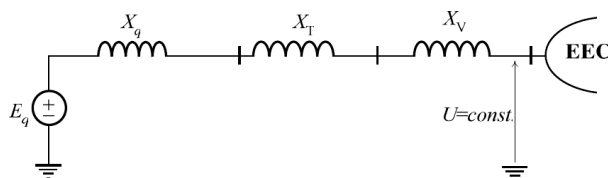
Модулот на електромоторната сила E_i е познат од состојбата пред да настане пореметувањето, а нејзиниот фазен агол θ_i е променлив.

$$P_{e,i} = \text{real}(\underline{E}_i \cdot \underline{I}_i^*)$$

Случај со 2 генератора

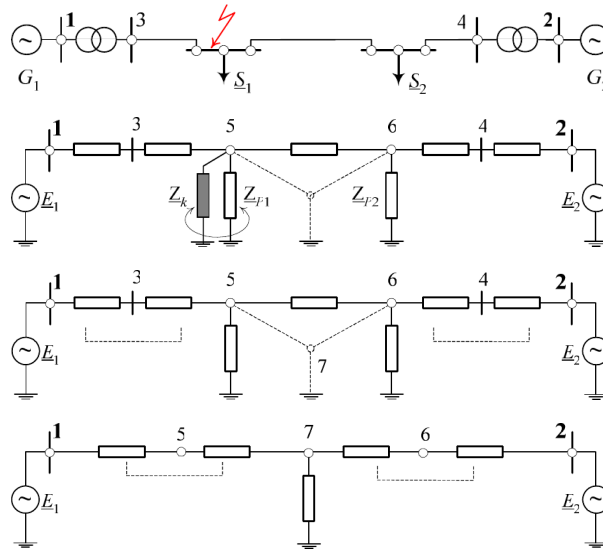
$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{Y}_{11} E_1 e^{j\theta_1} + \underline{Y}_{12} E_2 e^{j\theta_2} \\ P_{e,1} &= \text{real} [E_1 e^{j\theta_1} \cdot (\underline{Y}_{11}^* E_1 e^{-j\theta_1} + \underline{Y}_{12}^* E_2 e^{-j\theta_2})] \\ P_{e,1} &= \text{real} [E_1^2 \underline{Y}_{11}^* + E_1 E_2 \underline{Y}_{12}^* e^{j(\theta_1 - \theta_2)}] \end{aligned}$$

Генератор на крута мрежа



$$\begin{aligned} X &= X_q + X_T + X_V \\ \underline{Y}_{11} &= -j/X \quad \underline{Y}_{12} = j/X \quad \theta_2 = 0 \\ P_{e,1} &= \text{real} [E_1^2 \underline{Y}_{11}^* + E_1 E_2 \underline{Y}_{12}^* e^{j(\theta_1 - \theta_2)}] \\ P_{e,1} &= \text{real} [jE_q^2/X - jE_q U/X \cdot (\cos \theta_1 + j \sin \theta_1)] \\ P_{e,1} &= \frac{E_q U}{X} \sin \theta_1 \end{aligned}$$

Редукција на јазли во мрежата при куца врска

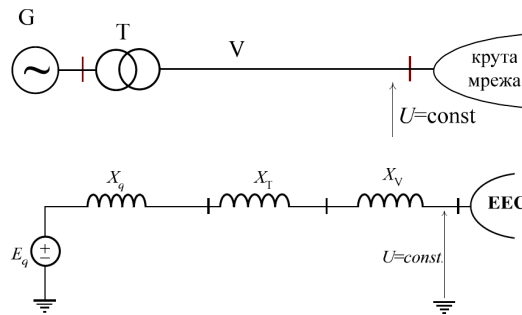


MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 16 / 62

Статичка стабилност на генератор



$$X = X_q + X_T + X_V$$

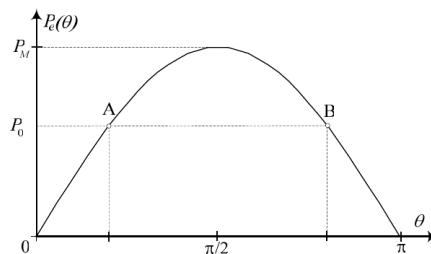
$$P_e = \frac{E_q U}{X} \sin \theta = P_M \sin \theta$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 17 / 62

Статичка стабилност на генератор



$$P_o = P_M \sin \theta_o$$

$$\theta = \theta_o + \Delta\theta$$

$$P_e = P_M \sin(\theta_o + \Delta\theta)$$

$$\Delta P = P_m - P_e = P_M \sin \theta_o - P_M \sin(\theta_o + \Delta\theta)$$

$$\sin(\theta_o + \Delta\theta) = \sin \theta_o + \cos \theta_o \cdot \Delta\theta - \sin \theta_o \cdot \frac{\Delta\theta}{2} + \dots \approx \sin \theta_o + \cos \theta_o \cdot \Delta\theta$$

$$\Delta P = -P_M \cos \theta_o \cdot \Delta\theta$$

MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 18 / 62

Статичка стабилност на генератор

$$\Delta P = -P_M \cos \theta_o \cdot \Delta \theta$$

$$\Delta P = - \left. \frac{dP}{d\theta} \right|_o \cdot \Delta \theta = -P_s \Delta \theta$$

$$P_s = \left. \frac{dP}{d\theta} \right|_o = P_M \cos \theta_o \quad \text{синхронизациона моќност}$$

$$M \frac{d^2 \theta}{dt^2} = P_m - P_e = -P_s \Delta \theta$$

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{P_s}{M} \Delta \theta = 0$$

$$\frac{d^2 \Delta \theta}{dt^2} + \frac{P_s}{M} \Delta \theta = 0$$

$$\Delta \theta(t) = K_1 e^{r_1 t} + K_2 e^{r_2 t}$$

$$r^2 + P_s/M = 0$$

$$r_{1,2} = \pm \sqrt{-P_s/M}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

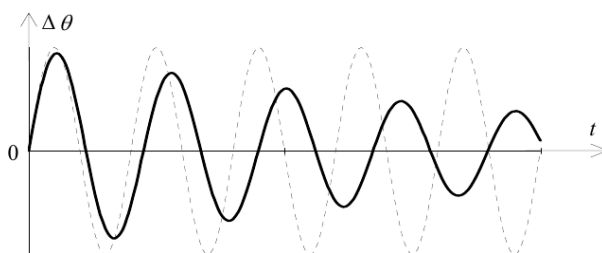
19 / 62

Статичка стабилност на генератор

Ако е $P_s > 0$

$$r_{1,2} = \pm j\omega_n \quad \omega_n = \sqrt{P_s/M} = \sqrt{P_M \cos \theta_o / M}$$

$$\Delta \theta(t) = K_1 e^{j\omega_n t} + K_2 e^{-j\omega_n t} = K \sin(\omega_n t + \varphi)$$



генераторот е стабилен

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

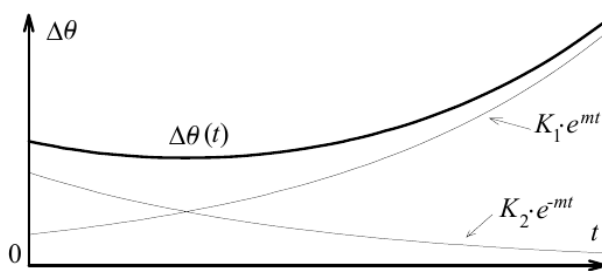
20 / 62

Статичка стабилност на генератор

Ако е $P_s < 0$

$$r_{1,2} = \pm \sqrt{P_s/M} = \pm m$$

$$\Delta \theta(t) = K_1 e^{mt} + K_2 e^{-mt}$$



генераторот не е стабилен

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

21 / 62

Метод на мали осцилации

Линеаризација на диференцијалните равенки

$$M_i \frac{d^2 \theta_i}{dt^2} = \Delta P_i \approx \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \right|_o \cdot \Delta \theta_j$$

$$M_i \frac{d^2 \Delta \theta_i}{dt^2} \approx \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \right|_o \cdot \Delta \theta_j$$

$$\Delta \theta_1'' + A_{11} \Delta \theta_1 + A_{12} \Delta \theta_2 + \dots + A_{1n} \Delta \theta_n = 0$$

$$\Delta \theta_2'' + A_{21} \Delta \theta_1 + A_{22} \Delta \theta_2 + \dots + A_{2n} \Delta \theta_n = 0$$

⋮

$$\Delta \theta_n'' + A_{n1} \Delta \theta_1 + A_{n2} \Delta \theta_2 + \dots + A_{nn} \Delta \theta_n = 0$$

$$A_{ij} = \frac{1}{M_i} \cdot \left. \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \right|_o$$

$$\Delta \theta_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} e^{r_j t}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

22 / 62

Метод на мали осцилации

$$\Delta \theta_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} e^{r_j t}$$

За решението да биде осцилаторно или придушено осцилаторно (системот е стабилен) треба сите r_j да се комплексни броеви со реални делови помали или еднакви на нула.

Вредностите r_j се сопствени вредности на матрицата

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & A_{n3} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}$$

Решение во Matlab

```
r = eig(A)
```

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

23 / 62

Динамичка стабилност на ЕЕС

Анализи на преодните електромеханички процеси до кои доаѓа при големи пореметувања

- Нагли вклучувања или исклучувања на големи потрошувачи
- Промените во конфигурацијата на мрежата: вклучувања или исклучувања на поважни водови или трансформатори
- Наглите испади на големи генераторски единици
- Сите видови на куси врски во ЕЕС

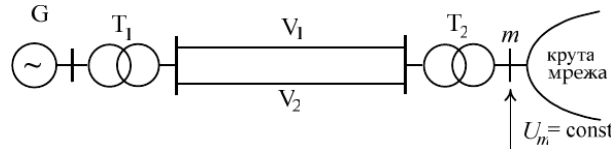
МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

24 / 62

Генератор и крута мрежа



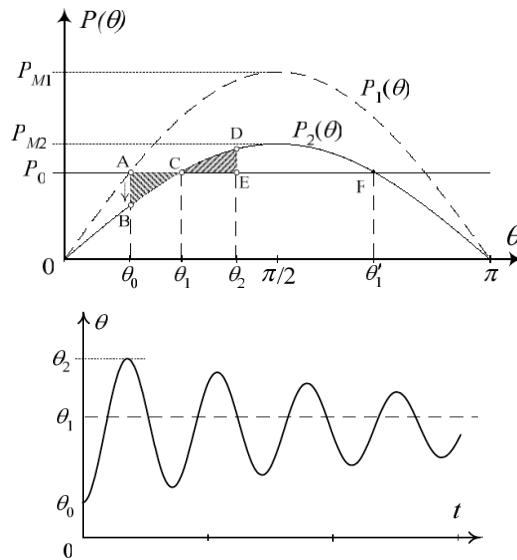
$$P_1(\theta) = \frac{E' U_m}{X_{\Sigma 1}} \sin \theta = \frac{E' U_m}{X'_d + X_{T1} + X_{V1} || X_{V2} + X_{T2}} \sin \theta = P_{M1} \sin \theta$$

нагло исклучување на водот V1

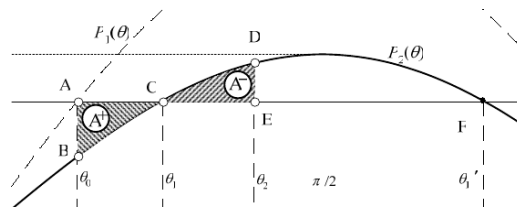
$$P_2(\theta) = \frac{E' U_m}{X_{\Sigma 2}} \sin \theta = \frac{E' U_m}{X'_d + X_{T1} + X_{V2} + X_{T2}} \sin \theta = P_{M2} \sin \theta$$

$$P_{M2} < P_{M1}$$

Генератор и крута мрежа



Правило на еднакви површини



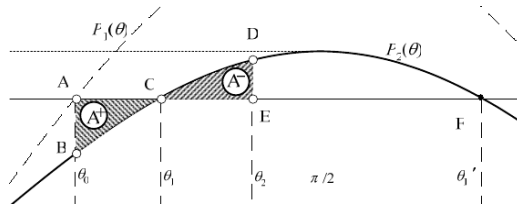
забрзување од θ_0 до θ_1 – прираст на кинетичката енергија на роторот

$$\Delta W_k = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \Delta M(\theta) d\theta = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{\Delta P(\theta)}{\omega} d\theta \approx \frac{1}{\omega_0} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \Delta P(\theta) d\theta$$

успорување од θ_1 до θ_2 – опаѓање на кинетичката енергија на роторот при $\theta = \theta_2$ вкупната промена на кинетичката енергија е 0

$$\frac{1}{\omega_0} \int_{\theta_0}^{\theta_2} \Delta P(\theta) d\theta = \frac{1}{\omega_0} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \Delta P(\theta) d\theta + \frac{1}{\omega_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \Delta P(\theta) d\theta = 0$$

Правило на еднакви површини



$$\frac{1}{\omega_o} \int_{\theta_o}^{\theta_1} \Delta P(\theta) d\theta + \frac{1}{\omega_o} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \Delta P(\theta) d\theta = 0$$

$$A^+ = \int_{\theta_o}^{\theta_1} \Delta P(\theta) d\theta \quad A^- = \int_{\theta_1}^{\theta_2} -\Delta P(\theta) d\theta$$

$$A^+ = A^-$$

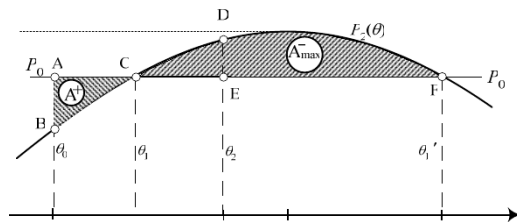
површина на забрзување A^+
површина на успорување A^-

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 28 / 62

Правило на еднакви површини



$$A_{\max}^- = \int_{\theta_1}^{\theta_1'} -\Delta P(\theta) d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_1'} (P_{M2} \sin \theta - P_o) d\theta$$

за да биде преодниот процес осцилаторен, т.е. за системот да биде динамички стабилен, потребно е

$$A_{\max}^- > A^+$$

коефициент на динамичка резерва

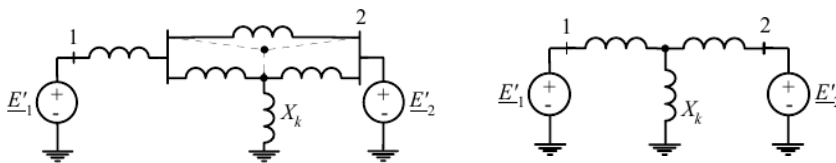
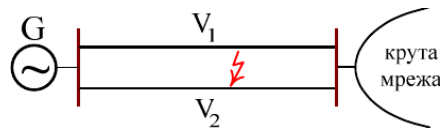
$$k_d = \frac{A_{\max}^-}{A^+} > 1$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 29 / 62

Трајна куса врска на вод

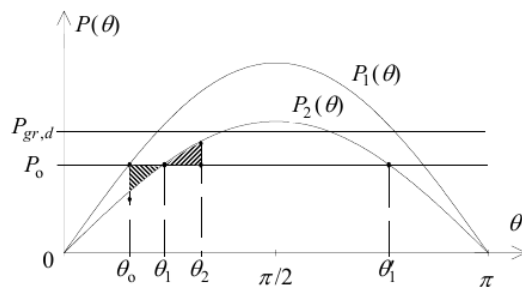


МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 30 / 62

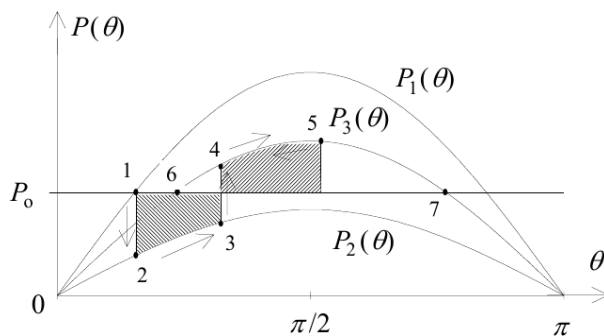
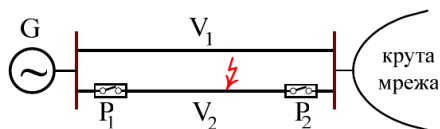
Трајна куса врска на вод



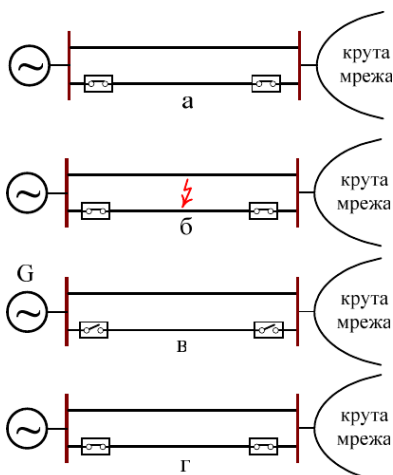
Со помош на правилото на еднакви површини можеме да ја одредиме граничната динамичка моќност $P_{gr,d}$ што генераторот може да ја оддава во претходниот режим, а по кусата врска се уште да биде динамички стабилен.

Во тој случај без истражување на преодниот процес ќе знаеме дали во една конкретна ситуација системот ќе биде динамички стабилен (ако е $P_o \leq P_{gr,d}$) или нестабилен (ако е $P_o > P_{gr,d}$).

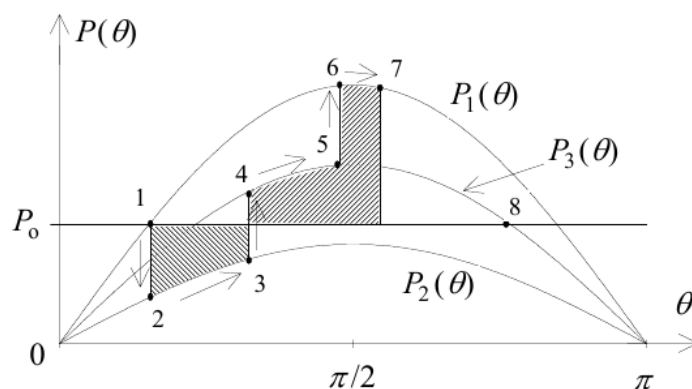
Куса врска со исклучување на повредениот вод



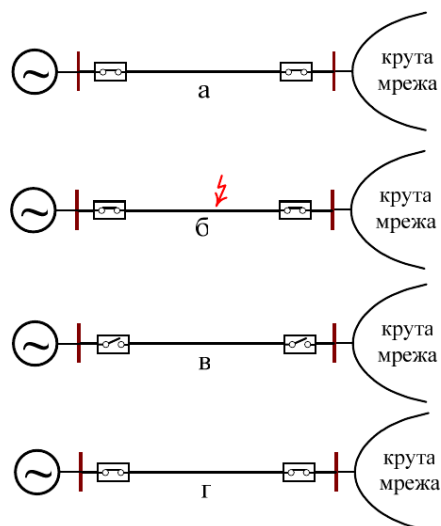
Куса врска со исклучување и со автоматско повторно вклучување (АПВ)



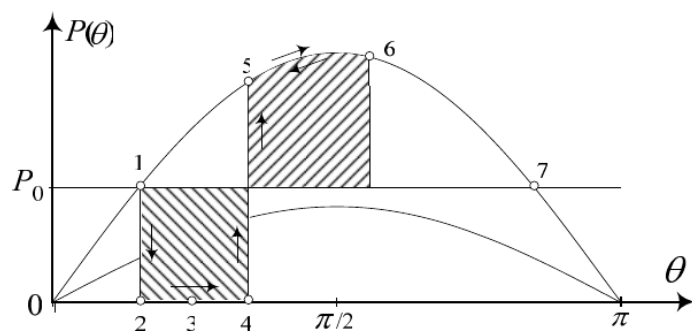
Куса врска со исклучување и со автоматско повторно вклучување (АПВ)



Куси врски во преносен систем со еден вод



Куси врски во преносен систем со еден вод



Нумеричко решавање на диференцијални равенки

- Во ЕЕС решенијата на диференцијалните равенки, се функции со кои што е дадена временската промена на напон, струја, агол на роторот на генератор итн.
- Егзактното решавање на диференцијалните равенки ги дава овие функции во аналитички облик со сложени изрази од независната променлива (време).
- Инженерскиот пристап кон добивањето на решението е поинаков затоа е сосема доволно да го познаваме решението дадено во нумерички облик од кој што можеме да ги извлечеме сите потребни заклучоци.
- Нумеричкото решение е дадено во вектори кои што содржат нумерички вредности на функциите кои што ги бараме за одредени вредности на независната променлива (одредени временски моменти).
- Во Matlab постојат повеќе методи за нумеричко решавање на системи диференцијални равенки од прв ред како што се ode23, ode45, ode113, ode15s, ode23s, ode23t и ode23tb.

Општ облик на равенките

Решавање на системи диференцијални равенки од прв ред од следниот облик

$$\begin{aligned}\frac{dy_1}{dt} &= f_1(t, y_1, y_2, \dots, y_n), \\ \frac{dy_2}{dt} &= f_2(t, y_1, y_2, \dots, y_n), \\ &\vdots \\ \frac{dy_n}{dt} &= f_n(t, y_1, y_2, \dots, y_n),\end{aligned}$$

Диференцијалните равенки треба да бидат така што од левата страна ќе бидат дадени првите изводи на зависните променливи y_1, y_2, \dots, y_n , додека од десната страна може да има изрази од произволен облик кој што може да ги содржи сите зависни променливи како и за независната променлива t .

Пример 1

Го разгледуваме следниот едноставен систем од 2 диференцијални равенки од прв ред

$$\begin{aligned}\frac{dy_1}{dt} &= 2 \cdot y_1 - 0,001 \cdot y_1 \cdot y_2, \\ \frac{dy_2}{dt} &= -10 \cdot y_2 + 0,002 \cdot y_1 \cdot y_2,\end{aligned}$$

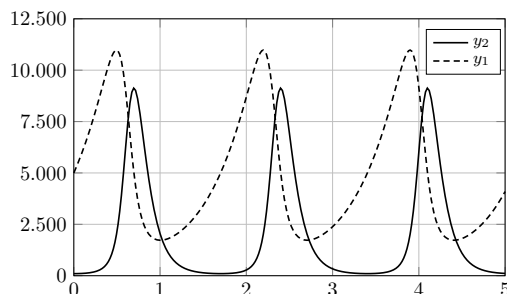
со почетни услови $y_1(0) = 5000$ и $y_2(0) = 100$. При тоа, ќе ги определеме функциите $y_1(t)$ и $y_2(t)$, како и нивните максимални вредности.

Пример 1

programi/primer_ode45.m

```
1 clc; clear
2 f = @(t,y) [2*y(1) - 0.001*y(1)*y(2); -10*y(2) + 0.002*y(1)*y(2)];
3 [t, y] = ode45(f,[0 5],[5000 100]);
4 plot(t,y);
5 ymax = max(y)
```

```
>> primer_ode45
ymax =
1.0e+04 *
1.0978 0.9126
```



МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

40 / 62

Метод на Ојлер

Методот на Ојлер нема практична примена и тој само ќе ни послужи да го илустрираме концептот за нумеричко решавање на диференцијални равенки.

$$y' = f(t, y)$$

интервалот $[a, b]$ го делиме на n подинтервали

$$t_i = a + i \cdot h, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n,$$

чекорот е $h = (b - a)/n$

развијање на функцијата во Тајлоров ред

$$y(t_0 + h) = y(t_0) + h \cdot y'(t_0) + \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot y''(t_0) + O(h^3).$$

ги занемариме членовите од втор и повисок ред и пишуваме $y_1 = y(t_0 + h)$ и $y_0 = y(t_0)$

$$y_1 = y_0 + h \cdot f(t_0, y_0).$$

$$t_{i+1} = t_i + h, \quad y_{i+1} = y_i + h \cdot f(t_i, y_i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, n.$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

41 / 62

Пример 2

Со методот на Ојлер ќе пробаме да ја решиме диференцијалната равенка

$$y' = y, \quad y(0) = 1,$$

во интервалот $[0, 4]$, при што ќе користиме $n = 8$ подинтервали ($h = 0,5$). За оваа равенка го знаеме аналитичкото решение $y = e^t$.

Во овој случај имаме $y_{i+1} = y_i + h \cdot y_i$, според тоа постапката за решавање на равенката е следната

$$\begin{aligned} t_0 = 0 & & y_0 = 1 \\ t_1 = 0,5 & & y_1 = 1 + 0,5 \cdot 1 = 1,5 \\ t_2 = 1 & & y_2 = 1,5 + 0,5 \cdot 1,5 = 2,25 \\ t_3 = 1,5 & & y_3 = 2,25 + 0,5 \cdot 2,25 = 3,375 \\ t_4 = 2 & & y_4 = 3,375 + 0,5 \cdot 3,375 = 5,0625 \\ t_5 = 2,5 & & y_5 = 5,0625 + 0,5 \cdot 5,0625 = 7,59375 \\ t_6 = 3 & & y_6 = 7,59375 + 0,5 \cdot 7,59375 = 11,39062 \\ t_7 = 3,5 & & y_7 = 11,39062 + 0,5 \cdot 11,39062 = 17,08594 \\ t_8 = 4 & & y_8 = 17,08594 + 0,5 \cdot 17,08594 = 25,62891 \end{aligned}$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019

42 / 62

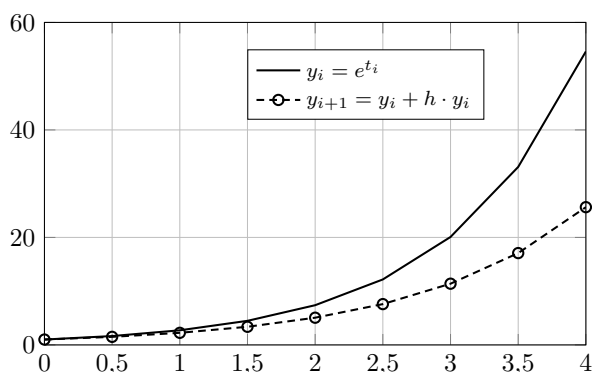
Пример 2

Од резултатите гледаме дека последната вредност $y_8 = 25,62891$ се разликува од точната вредност $e^4 = 54,59815$ за $-53,1\%$ што е многу голема грешка.

Ако сакаме да постигнеме поголема точност треба да го зголемиме бројот на точки. На пример за $n = 1000$ грешката кај y_8 изнесува $-0,8\%$.

```
programi/ojler_primer1.m
1 clc; clear;
2 y(1) = 1; t(1) = 0; n = 8; h = 4/n;
3 for i = 1:n
4     t(i+1) = t(i) + h;
5     y(i+1) = y(i) + h * y(i);
6     fprintf('%i %.1f %8.5f\n', i, t(i+1), y(i+1));
7 end
8 greska = (y(n+1)/exp(t(n+1)) - 1) * 100
9 plot(t, y, '--ko', t, exp(t), 'k');
```

Пример 2



Модифициран метод на Ојлер

- Првиот чекор е идентичен со чекорот кај претходно опишаниот метод на Ојлер. Со тоа се добива апроксимација за $y_{i+1}^{(1)}$.
- Во вториот чекор се пресметува нова апроксимација $y_{i+1}^{(2)}$ во која се користи средна вредност од изводот на почетокот на подинтервалот i и на апроксимираната вредност на изводот на крајот од подинтервалот добиена во првата фаза.

$$t_{i+1} = t_i + h,$$
$$y_{i+1}^{(1)} = y_i + h \cdot f(t_i, y_i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, n,$$
$$y_{i+1} = y_i + h \cdot \frac{f(t_i, y_i) + f(t_i, y_{i+1}^{(1)})}{2}.$$

Модифициран метод на Ојлер

```
programi/ojler.m
1 function [t, y] = ojler(f,a,b,y0,n)
2 h = (b - a) / n;
3 y(1,:) = y0;
4 t(1) = a;
5 for i = 1:n
6     t(i+1,1) = t(i) + h;
7     y1 = y(i,:) + h * f(t(i), y(i,:));
8     y(i+1,:) = y(i,:) + h * (f(t(i), y(i,:)) + f(t(i), y1))'/2;
9 end
```

Со функцијата ојлер можеме да ја решиме диференцијалната равенка $y' = y$ при почетен услов $y(0) = 1$ на следниот начин

```
programi/ojler_primer2.m
1 clc; clear;
2 f = @(t, y) y;
3 [t, y] = ojler(f,0,4,1,35);
4 greska = (y(end)/exp(t(end)) - 1) * 100
5 plot(t, y, '-ko', t, exp(t), 'k');
```

со $n = 35$ со модифицираниот метод на Ојлер се добива грешка од $-0,8\%$

Метод на Рунге-Кута

Едноставниот чекор кој се користи во секој подинтервал i според методот на Ојлер може да се употреби како „пробен“ чекор до средината на подинтервалот. Потоа, пресметаната вредност во средната точка може да се искористи за пресметка на „вистинскиот“ чекор за целиот подинтервал.

$$\begin{aligned}t_{i+1} &= t_i + h \\k_1 &= h \cdot f(t_i, y_i) \\k_2 &= h \cdot f\left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_1}{2}\right) \\y_{i+1} &= y_i + k_2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n.\end{aligned}$$

Метод на Рунге-Кута

Постапката со „пробно“ движење низ подинтервалот во повеќе мали чекори може да продолжи и понатаму, со што се добиваат методи од класата на Рунге-Кута од повисок ред. Најпознат од тие методи е методот на Рунге-Кута од 4 ред.

$$\begin{aligned}t_{i+1} &= t_i + h, \\k_1 &= h \cdot f(t_i, y_i), \\k_2 &= h \cdot f\left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_1}{2}\right), \\k_3 &= h \cdot f\left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_2}{2}\right), \\k_4 &= h \cdot f(t_i + h, y_i + k_3), \\y_{i+1} &= y_i + \frac{k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4}{6}.\end{aligned}$$

Метод на Рунге-Кута

programi/rk4.m

```
1 function [t, y] = rk4(f,a,b,y0,n)
2 h = (b - a) / n;
3 y(1,:) = y0;
4 t(1) = a;
5 for i = 1:n
6     k1 = h * f(t(i), y(i,:));
7     k2 = h * f(t(i) + h/2, y(i,:) + k1/2);
8     k3 = h * f(t(i) + h/2, y(i,:) + k2/2);
9     k4 = h * f(t(i) + h, y(i,:) + k3);
10    t(i+1,1) = t(i) + h;
11    y(i+1,:) = y(i,:) + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)/6;
12 end
```

Решението на диференцијалната равенка $y' = y$ при почетен услов $y(0) = 1$ можеме да го добиеме со функцијата rk4 на следниот начин

programi/rk4_primer1.m

```
1 clc; clear;
2 f = @(t, y) y;
3 [t, y] = rk4(f,0,4,1,8);
4 greska = (y(end)/exp(t(end)) - 1) * 100;
5 plot(t, y, '-ko', t, exp(t), 'k');
```

само со 8 точки, $n = 8$, добиваме грешка од $-0,1\%$

Navigation icons

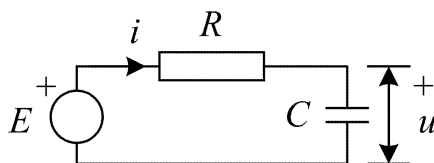
MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 49 / 62

Пример 3

Разгледуваме RC коло кое што е приклучено на генератор со константен напон E . Потребно е да го определиме и нацртаме временскиот тек на напонот $u(t)$ за следните бројни вредности $R = 1000 \Omega$, $C = 100 \mu\text{F}$ и $E = 12 \text{ V}$. Кондензаторот на почетокот бил празен.



$$E = u + Ri \quad i = C \frac{du}{dt}$$

$$E = u + RC \frac{du}{dt}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{E - u}{RC}$$

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

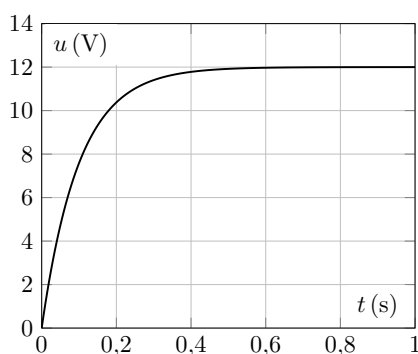
ВНМС

Скопје, 2019 50 / 62

Пример 3

programi/rk_primer1.m

```
1 clc; clear;
2 R = 1000; C = 100e-6; E = 12;
3 RC = @(t,y) (E - y) / (R*C);
4 [t, y] = rk4(RC, 0, 1, 0, 200);
5 plot(t, y);
```



Navigation icons

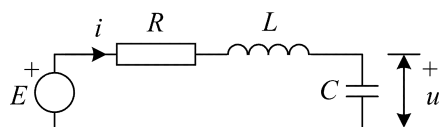
MT (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 51 / 62

Пример 4

Разгледуваме RLC коло кое што е приклучено на генератор со константен напон E . Потребно е да ги определиме и нацртаме временскиот тек на напонот $u(t)$ и струјата $i(t)$ за следните бројни вредности $R = 3,6 \Omega$; $L = 0,57 \text{ H}$; $C = 100 \mu\text{F}$ и $E = 12 \text{ V}$. Кондензаторот на почетокот бил празен, а струјата во калемот била еднаква на нула.



$$E = u + Ri + L \frac{di}{dt} \quad i = C \frac{du}{dt}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{E - Ri - u}{L}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{C}$$

$$\frac{dy_1}{dt} = \frac{E - Ry_1 - y_2}{L},$$

$$\frac{dy_2}{dt} = \frac{y_1}{C}$$

$$y_1 = i \quad \text{и} \quad y_2 = u$$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 52 / 62

Пример 4

programi/rk_primer2.m

```
1 clc; clear
2 R = 3.6; L = 0.57; C = 100e-6; E = 12;
3 RLC = @(t,y) [(E - R*y(1) - y(2))/L; y(1)/C];
4 [t, y] = rk4(RLC, 0, 1, [0 0], 1000);
5 plot(t,y);
```

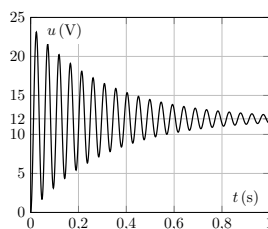
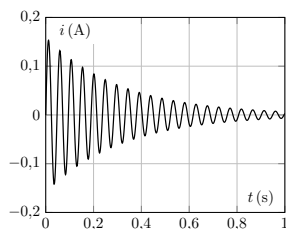
```
>> [ymax, ind_max] = max(y)
```

```
ymax =
    0.1531    23.1264
```

```
ind_max =
    13     25
```

```
>> t(ind_max)
```

```
ans =
    0.0120
    0.0240
```



МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 53 / 62

Пример 4

максимална брзина на менување на напонот

```
>> [ymax, ind_max] = max(y(:,1)/C)
```

```
ymax =
    1.5305e+03
```

```
ind_max =
```

```
    13
```

```
>> t(ind_max)
```

```
ans =
    0.0120
```

напонот најбрзо се менува во $t = 0,012 \text{ s}$ со стапка на промена од $1.530,5 \text{ V/s}$

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 54 / 62

Пример 5

Го разгледуваме системот од задачата 5.5 од учебникот. Во тој систем настанала трифазна куса врска на еден од водовите во непосредна близина на прекинувачот P_2 . Во задачата се разгледуваат три различни режими на работа на генераторот и соодветно на тоа имаме три аглови карактеристики на моќност $P_e(\theta) = P_{Mi} \cdot \cos \theta$

1. нормален работен режим со $P_{M1} = 2,26$ pu,
2. режим на трифазна куса врска со $P_{M2} = 0$,
3. режим на работа по исклучувањето на кусата врска, кога повредениот вод е исклучен $P_{M3} = 1,603$ pu.

Да се нацртаат кривите $\theta(t)$ и $f(t) = 50 + \Delta\omega(t)/18.000$ за следните два случаја

- a) кусата врска се исклучува по 0,15 s,
- b) кусата врска се исклучува по 0,17 s.

За генераторот е познато дека пред настанувањето на кусата врска работел со моќност $P_0 = P_{meh} = 1$ pu. Исто така, е позната константата на инерција $M = 3,7 \cdot 10^{-4}$ pu.

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 55 / 62

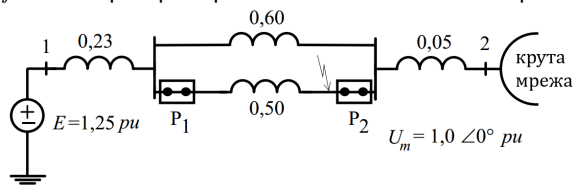
Пример 5

За анализата да се користи наједноставниот механички модел на генератор кој е даден со следните две диференцијални равенки.

$$\frac{d(\Delta\omega)}{dt} = \frac{P_m - P_e(\theta)}{M},$$
$$\frac{d\theta}{dt} = \Delta\omega,$$

каде што со $\Delta\omega$ е означена промената на аголната брзина на вртење во однос на номиналната.

Забелешка: $\Delta f = \Delta\omega/18.000$ затоа што во задачата аглите се изразени во електрични степени, а не во радијани (инаку би било $\Delta f = \Delta\omega/(2\pi)$) – при $f = 50$ Hz роторот прави $50 \cdot 360 = 18.000$ електрични степени во секунда.



МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 56 / 62

Пример 5a

programi/rk_primer3.m

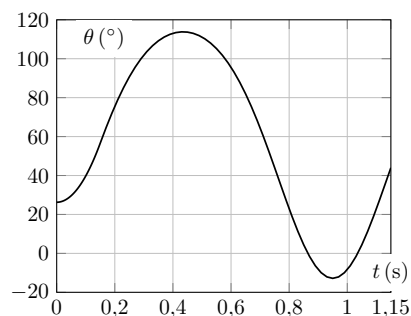
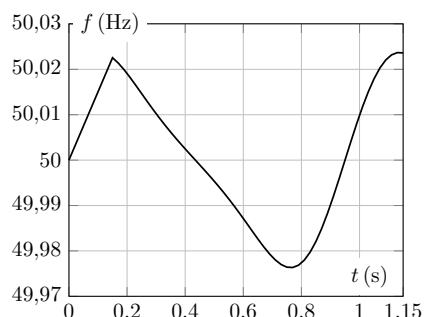
```
1 clc; clear
2 Pmeh = 1; Pm1 = 2.26; Pm2 = 0; Pm3 = 1.603; M = 3.7e-4;
3 t_iskl = 0.15;
4 % y(1) = omega e izrazena vo elektricni stepeni vo sekunda
5 % y(2) = teta e izrazena vo elektricni stepeni
6 % rabota so rezim na kusa vrska od 0 do t_iskl
7 f = @(t,y) [Pmeh/M; y(1)];
8 [t, y1] = rk4(f, 0, t_iskl, [0 asin(Pmeh/Pm1)/pi*180], 50);
9 % rabota so isklucen vod od 0 do 1 sekunda
10 f = @(t,y) [(Pmeh - Pm3*sin(y(2)/180*pi))/M; y(1)];
11 [t1, y1] = rk4(f, 0, 1, y(end,:), 50);
12 % dvete resenija staveni posledovatelno
13 t = [t; t1 + t_iskl];
14 y = [y; y1];
15 figure; plot(t, 50 + y(:, 1)/18000);
16 figure; plot(t, y(:, 2));
```

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 57 / 62

Пример 5а

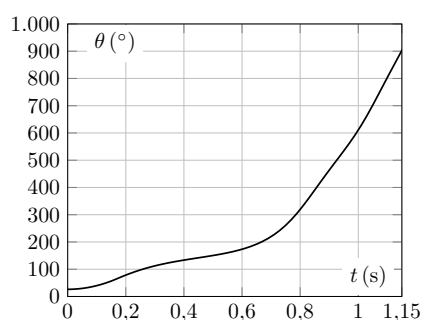
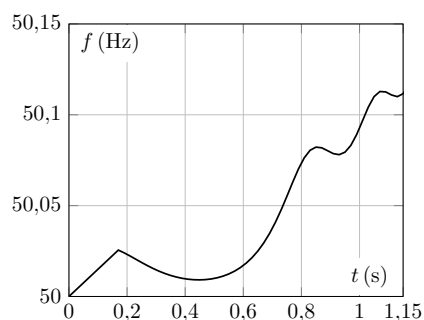


МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 58 / 62

Пример 5б



МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 59 / 62

Пример 6

Да се реши претходната задача така што во системот ќе се земе предвид и автоматско повторно вклучување на водот кај кој настанала кусата врска. Во тој случај, по настанувањето на кусата врска, симулацијата на системот да се направи во следните три работни режими

1. режим на трифазна куса врска кога е $P_{M2} = 0$ во траење од 0, 17 s,
2. режим на работа по исклучувањето на кусата врска, кога повредениот вод е исклучен при што е $P_{M3} = 1, 603$ pu во траење од 0, 2 s,
3. нормален работен режим по автоматско повторно вклучување на водот кога е $P_{M1} = 2, 26$ pu во траење од 1 s.

Да се нацртаат кривите $\theta(t)$ и $f(t) = 50 + \Delta\omega(t)/18.000$.

МТ (ПЕЕС)

ВНМС

Скопје, 2019 60 / 62

Пример 6

programi/rk_primer4.m

```
1 clc; clear
2 Pmeh = 1; Pm1 = 2.26; Pm2 = 0; Pm3 = 1.603; M = 3.7e-4;
3 t_iskl = 0.17; t_apv = 0.2;
4 % y(1) = omega e izrazena vo elektricni stepeni vo sekunda
5 % y(2) = teta e izrazena vo elektricni stepeni
6 % rabota so rezim na kusa vrska od 0 do t_iskl
7 f = @(t,y) [Pmeh/M; y(1)];
8 [t, y1] = rk4(f, 0, t_iskl, [0 asin(Pmeh/Pm1)/pi*180], 50);
9 % rabota so isklucen vod od 0 do t_apv
10 f = @(t,y) [(Pmeh - Pm3*sin(y(2)/180*pi))/M; y(1)];
11 [t1, y1] = rk4(f, 0, t_apv, y(end,:), 50);
12 % rabota vo normalen rezim od 0 do 1 sekunda
13 f = @(t,y) [(Pmeh - Pm1*sin(y(2)/180*pi))/M; y(1)];
14 [t2, y2] = rk4(f, 0, 1, y1(end,:), 50);
15 % trite resenija staveni posledovatelno
16 t = [t; t1 + t_iskl; t2 + t_iskl + t_apv];
17 y = [y1; y2];
18 figure; plot(t, 50 + y(:, 1)/18000);
19 figure; plot(t, y(:, 2));
```

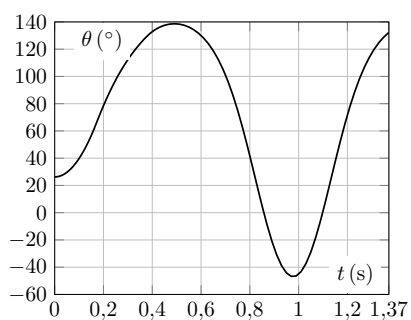
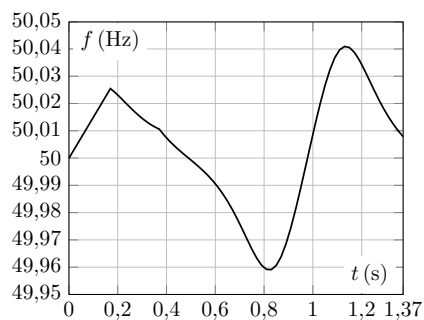
Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (PEEC)

BHMC

Kronje, 2019 61 / 62

Пример 6



Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (PEEC)

BHMC

Kronje, 2019 62 / 62

5.7. ПРИМЕРИ

Пример 5.1. Синхрон генератор е прислучен на крута мрежа и работи на карактеристиката $P(\theta) = P_n \sin(\theta) = 170 \sin(\theta)$. Колкави ќе бидат периодот T_n и фреквенцијата f_n на слободните осцилации, предизвикани од мали пореметувања во работата на генераторот за следните два случаја:

- а) генераторот ја оддава номиналната активна моќност $P = P_n = 85 \text{ MW}$;
- б) генераторот оддава 50% од номиналната активна моќност, т.е. $P = 42,5 \text{ MW}$.

Податоци за генераторот: $S_n = 100 \text{ MVA}$; $\cos\phi_n = 0,85$; $T_J = 6 \text{ s}$.

Решение:

Константата на инерција M на зададениот агрегат ќе изнесува:

$$M = \frac{S_n \cdot T_J}{\omega_n} = \frac{100 \cdot 6}{2\pi \cdot f} = \frac{600}{100 \cdot \pi} = 1,91 \frac{\text{MW} \cdot \text{s}^2}{\text{rad}}$$

а) Генераторот оддава моќност во мрежата: $P = P_n = 85 \text{ MW}$.

Работниот агол θ ќе го добиеме од условот $P = P_n \sin(\theta)$, од каде што следува:

$$\theta = \arcsin(P/P_n) = \arcsin(85/170) = 30^\circ$$

Синхронизациската моќност P_s во овој случај ќе изнесува:

$$P_s = P_n \cos\theta = 170 \cos(30^\circ) = 147,2 \text{ MW}$$

Понатаму, периодот T_n и фреквенцијата f_n на сопствените осцилации на нивото на генераторот при мали пореметувања, кога тој работи во посматраној режим, ќе биде:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi}{\sqrt{P_s/M}} = \frac{2\pi}{\sqrt{147,2/1,91}} = 0,717 \text{ s}; \quad f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{1}{0,717} = 1,4 \text{ Hz}$$

б) Генераторот оддава моќност во мрежата: $P = P_n/2 = 42,5 \text{ MW}$.

Во овој случај работниот агол θ ќе изнесува:

$$\theta = \arcsin(P/P_n) = \arcsin(42,5/170) = 14,5^\circ$$

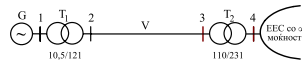
па соодветно на тоа, ќе имаме:

$$P_s = P_n \cos\theta = 170 \cos(14,5^\circ) = 164,6 \text{ MW};$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi}{\sqrt{P_s/M}} = \frac{2\pi}{\sqrt{164,6/1,91}} = 0,68 \text{ s}; \quad f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{1}{0,68} = 1,5 \text{ Hz}$$

Пример 5.2. За системот претставен на сликата, да се определи максималната моќност P_n што може да се пренесува преку него, како и да се

определи границата на статичката стабилност. Синхронниот генератор е без автоматска регулација на возбуда (АРВ) и работи со номинална возбуда. Напонот U_n на крутата мрежа се одржува на константна вредност $U_n = 225 \text{ kV} = \text{const}$.



Слика П.5.2.1. Физички дијаграм

Податоци за параметрите на елементите:

- Генератор G: $S_n = 80 \text{ MVA}$; $\cos\phi_n = 0,9$; $U_n = 10,5 \text{ kV}$; $x_n\% = x_g\% = 160\%$; $T_J = 8 \text{ s}$;
- Трансформатор T1: $S_n = 80 \text{ MVA}$; $U_1/U_2 = 10,5/121 \text{ kV/kV}$; $u_n\% = 12\%$; $R_{T1} = 0$;
- Вод V: $z = (0,1 + j0,42) \text{ Ohm/km}$; $l = 50 \text{ km}$;
- Трансф. T2: $S_n = 80 \text{ MVA}$; $U_1/U_2 = 110/231 \text{ kV/kV}$; $u_n\% = 12\%$; $R_{T2} = 0$.

Решение:

Поради малите вредности на активните отпорности на елементите од преносниот систем, ќе работиме само со нивните реактивности. За таа цел најлесно ќе ги пресметаме реактивностите на поедините елементи (сведени на 110 kV напонско ниво), а потоа ќе ја пресметаме и сумарната реактивност на преносниот систем X_{Σ} .

$$X_g = x_g\% \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{160}{100} \frac{10,5^2}{80} = 2,1 \Omega$$

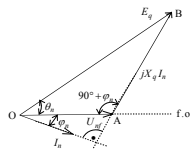
$$X_V = z \cdot l = 0,42 \cdot 50 = 21 \Omega$$

$$X_{T1} = u_{T1}\% \frac{U_2^2}{S_n} = \frac{12}{100} \frac{121^2}{80} = 21,5 \Omega$$

$$X_{T2} = u_{T2}\% \frac{U_2^2}{S_n} = \frac{12}{100} \frac{110^2}{80} = 18,2 \Omega$$

$$X_{\Sigma} = X_g + X_{T1} + X_V + X_{T2} = 2,1 + 21,5 + 21 + 18,2 = 62,8 \Omega$$

Внатрешната е.м. сила која што одговара на режимот кога генераторот работи со номиналната возбуда ќе ја добиеме со помош на физичкиот дијаграм за овој режим, прикажан на сликата П.5.2.2. Ако ја примениме косинусната теорема на триаголникот ΔOAB , ќе добиеме:



Слика П.5.2.2. Физички дијаграм

$$E_g^2 = U_g^2 + X_g^2 I_a^2 - 2U_g (X_g I_a) \cos(90 + \phi_n)$$

$$E_g = \sqrt{U_g^2 + X_g^2 I_a^2 - 2U_g (X_g I_a) \cos(90 + \phi_n)}$$

$$= U_g \sqrt{1 + X_g^2 (I_a/U_g)^2 - 2X_g (I_a/U_g) \cos(90 + \phi_n)}$$

Со оглед на релациите:

$$U_g/I_a = Z_g; \quad X_g(I_a/U_g) = X_g/Z_g = X_{g,\mu} = x_n\%/100;$$

$$\cos(90 + \phi_n) = -\sin\phi_n,$$

добиваме:

$$E_g = U_g \sqrt{1 + X_{g,\mu}^2 + 2 \cdot X_{g,\mu} \sin\phi_n \times \sqrt{3}}$$

или:

$$E_g = U_g \sqrt{1 + X_{g,\mu}^2 + 2 \cdot X_{g,\mu} \sin\phi_n}$$

Според тоа ќе имаме:

$$E_g = 10,5 \sqrt{1 + 1,6^2 + 2 \cdot 1,6 \cdot 0,436} = 23,37 \text{ kV}$$

Сведени на 110 kV страна, е.м. сила E_n и напонот U_n ќе изнесуваат:

$$E_n = 23,37 \cdot (121/10,5) = 269,35 \text{ kV};$$

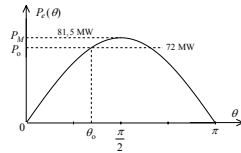
$$U_n = 225 \cdot (110/231) = 107,15 \text{ kV}$$

Според тоа, максималната моќност P_n што генераторот би можел да ја испорача на ЕЕС изнесува:

$$P_n = \frac{E_n \cdot U_n}{X_{\Sigma}} = \frac{269,35 \cdot 107,15}{353,5} = 81,5 \text{ MW}$$

Значи, во дадените услови на работа генераторот ќе работи на карактеристиката на моќност (сл. П.5.2.3):

Глава V. Стабилност на работата на EEC



Слика П.5.2.3. Карактеристика на моќноста

$$P(\theta) = 81.5 \sin(\theta)$$

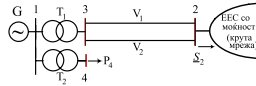
За случајот кога $e P_p = P_{p0} = S_p \cos \theta_0 = 72 \text{ MW}$, работниот агол на изметување ќе биде:

$$\theta_0 = \arcsin(P_p/P_{p0}) = 62^\circ$$

Бидејќи границата на статичката стабилност во овој случај е дефинирана со условот $dP/d\theta > 0$, следува дека максималниот (граничниот) агол на изметување, на кој системот ќе биде со узрете статички стабилен, изнесува $\theta < 90^\circ$. Значи, кога генераторот работи со номинална волујада, системот ќе биде статички стабилен за секоја произведена моќност $P_p < P_{p0}$.

Глава V. Стабилност на работата на EEC

Пример 5.3. На сликата е прикажан еден EEC. Да се испита системот на статичка стабилност и да се определи коефициентот на статичка резерва k_s .



Слика П.5.3.1

- Податоци за параметрите на елементите од EEC:
- Генератор G: 130 MVA; 10.5 kV; $x_d = 120\%$; $x_q = 75\%$; (без APB);
 - Трансформатор T1: 100 MVA; 10.5/110 kV/kV; $u_k\% = 10.5\%$;
 - Трансформатор T2: 20 MVA; 10.5/35 kV/kV; $u_k\% = 6\%$;
 - Водови (V_1, V_2): $z = (r + jx) = (0.17 + j0.398) \Omega/\text{km}$; $b = 2.79 \mu\text{S}/\text{km}$; $l = 130 \text{ km}$;
 - Одадена моќност на мрежата: $S_2 = (90 + j30) \text{ MVA}$; $\cos \phi_2 = 0.95$;
 - $U_2 = 110 \text{ kV}$;
 - Потрошувач P_p : $P_p = 16 \text{ MW}$; $Q_p = 12 \text{ Mvar}$; $\cos \phi_p = 0.8$; $U_1 = U_2 = 35 \text{ kV}$.

Решение:

Проблемот ќе го решиме со примена на единичните (π) величини. За базис величини ќе ги усвоиме следните:

$$U_{10}/U_{20}/U_{30} = 10.5/35/110 \text{ kV/kV/kV}; S_{B1}/S_{B2}/S_{B3} = S_B = 100 \text{ MVA}$$

Со оглед на тоа соодветните базис импеданции ќе бидат:

$$Z_{B1} = U_{10}^2/S_{B1} = 1.025 \Omega; Z_{B2} = U_{20}^2/S_{B2} = 12.25 \Omega \text{ и } Z_{B3} = U_{30}^2/S_{B3} = 121 \Omega$$

Понатаму, сите електрични величини во наредниот дел ќе ги изразуваме во релативни единици, а ознаката (π) ќе ја користиме, во што, величините ќе ги означуваме со малите букви од латиницата.

Потрошувачот P_p , приклучен во јазолот "4" ќе го претставиме во шемата со соодветната импеданција Z_{p4} чија природна вредност изнесува:

$$Z_{p4} = U_1^2 / (S_{p4}^* - U_1^2 / (P_p - jQ_p)) = (49 + j36.75) \Omega$$

додека нејзината (π) вредност ќе биде:

$$z_{p4} = Z_{p4}/Z_{B4} = (49 + j36.75)/12.25 = (4 + j3) \pi$$

Понатаму имаме:

Глава V. Стабилност на работата на EEC

$$x_{T1} = \frac{x_d\%}{100} \frac{U_1^2}{S_B} \frac{S_B}{U_{10}^2} = \frac{10.5}{100} \frac{110^2}{100 \cdot 110^2} = 0.105 \pi$$

$$x_{T2} = \frac{x_d\%}{100} \frac{U_2^2}{S_B} \frac{S_B}{U_{20}^2} = \frac{6}{100} \frac{35^2}{100 \cdot 20^2} = 0.3 \pi$$

$$z_{V1} = \frac{z}{Z_{B1}} = \frac{(0.17 + j0.398) \cdot 130}{121} = (0.183 + j0.428) \pi$$

$$\frac{b_{V1}}{2} = \frac{b \cdot l/2}{Z_{B1}} = \frac{2.79 \cdot 130}{121} = 21.279 \cdot 10^{-6} = 0.0219 \pi$$

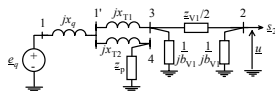
$$x_{gq} = \frac{x_q}{Z_{B1}} = \frac{1}{100} \frac{x_q\%}{100} \frac{U_1^2}{S_B} = \frac{1}{100} \frac{75}{100} \frac{10.5^2}{100 \cdot 130} = 0.577 \pi$$

На тој начин ги одредивме параметрите на заменската шема, прикажана на сликата П.5.3.2.

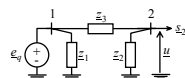
По пат на разни трансформации може да се елиминираат пасивните јазли "1", "3" и "4" и на тој начин мрежата меѓу јазлите "1" и "2" да се претстави како еден π -четворпоп, прикажан на сликата П.5.3.3. Параметрите на овој еквивалентен четворпоп се следните:

$$z_1 = (11.468 + j10.643) = 15.646 \angle 42.86^\circ \pi$$

$$z_2 = (10.406 - j0.745) = 10.433 \angle -4.1^\circ \pi$$



Сл. П.5.3.2. Еднофазна заменска шема на системот од примерот П.5.3



Слика П.5.3.3. Колото од сликата П.5.3.2 заменето со еквивалентен π -четворпоп

$$z_3 = (0.068 + j0.920) = 0.922 \angle 85.77^\circ \pi$$

Глава V. Стабилност на работата на ЕЕС

Од дефиницијата на сопствените и меѓусебните адмитанци на редуцираната мрежа следуваат следните релации:

$$\begin{aligned} \underline{z}_{11} &= \underline{z}_{11} = (1/\underline{Y}_{11}) = \underline{z}_{11} \Pi \underline{z}_{11} = \underline{z}_{11} \cdot \underline{z}_{11} / (\underline{z}_{11} + \underline{z}_{11}) = 0,882 \angle 83,6^\circ \text{ pu}; \alpha_1 = 6,4^\circ; \\ \underline{z}_{22} &= \underline{z}_{22} = (1/\underline{Y}_{22}) = \underline{z}_{22} \Pi \underline{z}_{22} = \underline{z}_{22} \cdot \underline{z}_{22} / (\underline{z}_{22} + \underline{z}_{22}) = 0,918 \angle 80,7^\circ \text{ pu}; \alpha_2 = 9,3^\circ; \\ \underline{z}_{12} &= (\underline{Y}_{21}) = (\underline{Y}_{12}) = \underline{z}_{12} \Pi \underline{z}_{21} = \underline{z}_{12} \cdot \underline{z}_{21} / (\underline{z}_{12} + \underline{z}_{21}) = -0,922 \angle 85,7^\circ \text{ pu}; \alpha_{12} = 4,3^\circ. \end{aligned}$$

Елиптичните (pu) вредности на напонот \underline{U}_i и моќноста $\underline{S}_i = (P_i + jQ_i)$ при јазолот "2" ќе бидат:

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 &= \underline{U}_2 \angle 0^\circ = 110 \angle 0^\circ; \quad \underline{U}_2 = \underline{U}_2 / \underline{U}_n = (110 + j0) / 110 = (1 + j0) \text{ pu}, \\ \underline{S}_2 &= \underline{S}_2 \angle 0^\circ = (90 + j30) / 100 = (0,9 + j0,3) \text{ pu}. \end{aligned}$$

Триаголникот од познатиот напон \underline{U}_2 и познатата моќност \underline{S}_2 со решавање на козлот прикажано на сликата П15.3.4 лесно се добива pu вредноста на внатрешната е.м. сила на генераторот во рагледуваниот режим. Таа изнесува: $\underline{E}_2 = 1,606 \angle 33,9^\circ \text{ pu}$.

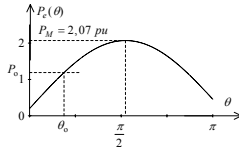
Сега можеме да ја пресметаме аголовата карактеристика на моќноста на која ќе работи генераторот G:

$$p(\theta) = E_2^2 \cdot Y_{11} \cdot \sin \alpha_1 + E_2 \cdot U_2 \cdot Y_{12} \cdot \sin(\theta - \alpha_{12}) \text{ pu},$$

$$p(\theta) = 0,328 + 1,742 \cdot \sin(\theta - 4,3^\circ) \text{ pu}.$$

За вредноста на аголот $\theta = 94,3^\circ$ ќе добиеме:

$$p = p_m = 0,328 + 1,742 = 2,07 \text{ pu}.$$



Слика П15.3.4. Аголова карактеристика на моќноста $p(\theta)$ (pu)

Во посматраној режим на работа аголот на измествување изнесува $\theta = \theta = 33,9^\circ$, на според тоа, генераторот G ќе одава моќност:

$$p_0 = 0,328 + 1,742 \sin(33,9^\circ - 4,3^\circ) = 1,19 \text{ pu}.$$

Коэффициентот на статичка резерва k_s во дадениот режим ќе изнесува:

$$k_s = \frac{P_{max} - P_0}{P_0} = \frac{2,07 - 1,19}{1,19} = 0,74.$$

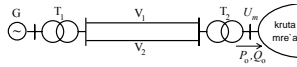
Глава V. Стабилност на работата на ЕЕС

Табелката: Доколку проблемот го решиме со занемарување на попречните граници, за коэффициентот на статичка резерва ќе добиеме вредност $k_s = 0,755$, што е за околу 2% повеќе од неговата тоа вредност. Значи, попречните граници не влијаат многу на конечниот резултат, па затоа, заради намалување на обемот на пресметките, при анализите на статичката стабилност на ЕЕС тие многу често и се занемаруваат.

Од друга страна, занемарувањето на активните отпорности на елементите од ЕЕС дава секогаш поповољна слика за статичката стабилност на системот, но сета пати резултатите не се занемарливи. Затоа, доколку се бара точен резултат, пожелно е да се укинуваат во секој случај активните отпорности на сите елементи од системот, а пред сè, на водоните.

Пример 5.4. Во ЕЕС прикажан на сликата дојда до неочекувано исклучување на еден од водоните. Пред исклучувањето на водот, режимот во кој што работел системот ги имал следните параметри (изразени во релативни единици pu при базна моќност $S_b = 220 \text{ MVA}$ и базен напон $U_b = 210 \text{ kV}$):

$$\begin{aligned} P_g &= 1 \text{ pu}, \quad Q_g = 0,2 \text{ pu}, \quad U_g = 1 \text{ pu}, \quad x'_g = 0,298 \text{ pu}, \quad x_{11} = 0,138 \text{ pu}; \\ x_{22} &= 0,122 \text{ pu}, \quad x_{12} = x_{21} = x_{12} = 0,488 \text{ pu}. \end{aligned}$$



Слика П15.4.1

За генераторот G се познати следните податоци: $S_g = 1,0 \text{ pu}$, $T_g = 8,18 \text{ s}$.

Да се утврди дали е системот динамички стабилен и со помош на правалото на сланици површина да се пресмета максималниот агол на нишаве θ_c .

Решение:

а) Режимски параметри пред исклучување на водот:

Ќе го поставиме фазорот на напонот \underline{U}_m на фазната оск, т.е:

$$\underline{U}_m = U_m \angle 0^\circ = (1 + j0) \text{ pu}. \text{ След:}$$

$$X'_{21} = X'_g + X_{11} + 0,5 \cdot X_V + X_{12} = 0,779 \text{ pu},$$

$$E' = (U_m + \frac{Q_g X'_{21}}{U_m}) + j \frac{P_g X'_{21}}{U_m} = (1,16 + j0,799) = 1,41 \angle 34,5^\circ \text{ pu}$$

$$\Rightarrow E' = 1,41 \text{ pu и } \theta_0 = 34,5^\circ (\theta = 0,602 \text{ rad}).$$

Карактеристиката на моќноста на која што ќе работи генераторот G, значи, ќе биде:

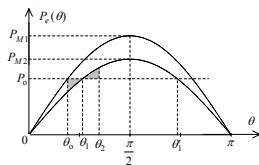
Глава V. Стабилност на работата на ЕЕС

$$P_{M1} = \frac{E' \cdot U_m}{X'_{21}} = \frac{1,41 \cdot 1,0}{0,799} = 1,765 \text{ pu}; \quad P_1(\theta) = P_{M1} \cdot \sin(\theta).$$

б) Работа на системот по исклучувањето на водот:

После исклучувањето на еден од водоните дојда до промена на еквивалентната реактанција X'_g и до работа на генераторот на нова аголова карактеристика. Значи, по исклучувањето на водот ќе имаме:

$$X'_{22} = X'_g + X_{11} + X_V + X_{12} = 1,043 \text{ pu},$$



Слика П15.4.2. Аголови карактеристики на моќноста

$$P_{M2} = \frac{E' \cdot U_m}{X'_{22}} = \frac{1,41 \cdot 1,0}{1,043} = 1,35 \text{ pu}; \quad P_2(\theta) = P_{M2} \cdot \sin(\theta).$$

Значи по исклучувањето на водот генераторот ќе премине да работи на карактеристиката $P_2(\theta)$ (види сликата П15.4.2), па системот ќе биде динамички стабилен ако површината на забрзување A' е помала од расположивата површина за успорување A''_{max} . Според тоа, во склад со сликата П15.4.2 ќе имаме:

$$\theta_1 = \arcsin(P_2/P_{M2}) = \arcsin(1/1,35) = 47,8^\circ, \text{ или}$$

$$\theta_1 = 0,834 \text{ rad}, \quad \theta_2 = 180^\circ - \theta_1 = 132,2^\circ = 2,307 \text{ rad}.$$

Системот ќе биде динамички стабилен доколку површината на забрзување A' е помала од расположивата површина за успорување (којнење) A''_{max} . Според тоа, ќе имаме:

$$A' = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \Delta P(\theta) \cdot d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (P_0 - P_{M2} \sin(\theta)) \cdot d\theta =$$

$$= P_0 \cdot (\theta_2 - \theta_1) + P_{M2} \cdot (\cos \theta_2 - \cos \theta_1),$$

$$A' = 1 \cdot (0,834 - 0,602) + 1,35 \cdot (\cos 47,8^\circ - \cos 34,5^\circ) = 0,0278 \text{ pu},$$

Глава V. Стабилност на работата на EEC

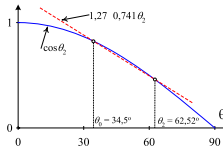
$A_{\text{min}} = \int_0^{\theta_0} -\Delta P(\theta) d\theta = \int_0^{\theta_0} [P_{M2} \sin(\theta) - P_1] d\theta = P_1 \cdot (\theta_0 - \theta_1) + P_{M2} \cdot (\cos \theta_1 - \cos \theta_0)$
 $A_{\text{min}} = 1 \cdot (0.834 - 0.602) + 1.35 \cdot (\cos 47.8^\circ - \cos 132.2^\circ) = 0.341 \text{ pu}$
 Значи, коефициентот на динамичка резерва во овој случај ќе биде:
 $k_d = A_{\text{min}} / A = 0.341 / 0.0278 = 12.3$
 Бидејќи е $k_d > 1$, тоа ќе значи дека за разгледуваното пореметување системот ќе биде динамички стабилен.

Максималниот агол θ_0 што роторот на генераторот ќе го земе во однос на референтната вртлива оска (односно во однос на фазорот на напонот на мрежата \underline{U}_m) ќе го пресметаме со примена на критериумот на еднакви површини, според кој важи: $A^+ = A_{\text{min}}$, т.е.:

$$\int_0^{\theta_0} (P_1 - P_{M2} \sin \theta) \cdot d\theta = \int_0^{\theta_0} (P_{M2} \sin \theta - P_1) \cdot d\theta;$$

$$P_1 \cdot (\theta_0 - \theta_1) + P_{M2} \cdot (\cos \theta_1 - \cos \theta_0) = P_1 \cdot (\theta_0 - \theta_1) - P_{M2} \cdot (\cos \theta_1 - \cos \theta_0),$$

од каде се добива:



Слика П.5.4.3. Графичко решение на равенката $\cos \theta_2 = 1.27 - 0.741 \theta_2$

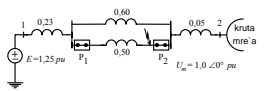
$\cos \theta_2 = \cos \theta_0 + \frac{P_1}{P_{M2}} (\theta_0 - \theta_2)$, или
 $\cos \theta_2 = 1.27 - 0.741 \theta_2$

Како што гледаме, последната равенка, која го дава бараното решение за θ_2 е трансцендентна. Затоа неа ќе ја решиме по графички пат, како што е тоа прикажано на сликата П.5.4.3. Од сликата П.5.4.3 се гледа дека таа има две решенија, од кои едниот е веќе познатиот $\theta_2 = \theta_1 = 34.5^\circ$, а второто решение, добиено во пресекот на кривата $\cos \theta_2$ и правата $1.27 - 0.741 \theta_2$, приближно изнесува: $\theta_2 = 62.52^\circ$.

Глава V. Стабилност на работата на EEC

* Ова решение може да се добие и на поинаков начин, на пример со примена на некои итеративни постапки. Притоа, осемна добра промена за почетното решение θ_2 да има резултат: $\theta_{2p} = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1)$. Во конкретниот случај, со помош на оваа релација, за почетното решение на трансцендентната равенка добиваме $\theta_{2p} = 61.1^\circ$, а тоа е сосема близу до точното решение.

Пример 5.5. Да се пресмета граничниот агол на исклучување за случај на трифазна куса врска на еден од водите, настаната во непосредна близина на пресекувачот V_2 . Претпоставуваме на кусата врска, генераторот работел со внатрешна с.м. сила $E = 1.25 \text{ pu}$ и произведувал активна моќност $P = 1 \text{ pu}$.
 Податоците за параметрите на елементите од системот (изразени во pu) се прикажани на сликата П.5.5.1.



Слика П.5.5.1. Замесна шема на разгледуваното EEC

Решение:

Во задава се разгледуваме три различни режими на работа на генераторот, и соодветно на тоа ќе имаме три различни карактеристики на моќност: 1. нормален режим; 2. режим на трифазна куса врска и 3. режим на работа по исклучувањето на кусата врска, кога повредениот вод е исклучен.

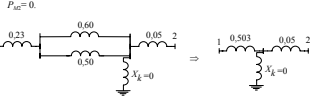
1. Нормален режим на работа

Во нормалниот режим на работа генераторот работи на карактеристиката $P_1(\theta) = P_{M1} \sin \theta$. Тогаш имаме (види сл. П.5.5.1):
 $X_{12} = X_{21} = 0.23 + 0.50 \parallel 0.60 + 0.05 = 0.553 \text{ pu}$;
 $P_{M1} = E \cdot U / X_{12} = 1.25 \cdot 1.0 / 0.553 = 2.26 \text{ pu}$.

2. Режим на работа со трифазна куса врска

Во режимот со трифазна куса врска на крајот од еден од водите ќе имаме состојба како што е тоа прикажано на сликата П.5.5.2. Вршејќи еквивалентирање на редно-паралелните реактансии, се добива Т-замесна шема на EEC, од каде потоа следуваат релациите:
 $X_1 = 0.23 + 0.50 \parallel 0.60 = 0.503 \text{ pu}$; $X_2 = 0$; $X_3 = X_{12} = 0.503 \cdot 0.05 / X_{12} = \infty \Rightarrow$

Глава V. Стабилност на работата на EEC

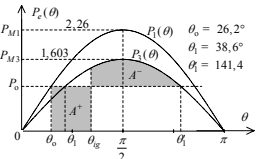


Слика П.5.5.2. Работа на EEC во режим на к. врска

Значи, во овој режим генераторот ќе работи на карактеристиката на моќност $P_2(\theta) = 0$, т.е. нема да одава никаква моќност во системот.

3. Режим на работа кога повредениот вод е исклучен

Во овој режим повредениот вод е исклучен, поради што еквивалентната реактанција на делот од мрежата помеѓу с.м. сила E и соборната "F" ќе биде: $X_1' = 0.23 + 0.50 = 0.73 \text{ pu}$. Потоа имаме:
 $X_{12}' = X_{21}' = 0.733 + 0.05 = 0.78 \text{ pu} \Rightarrow P_{M1}' = E \cdot U / X_{12}' = 1.25 \cdot 1.0 / 0.78 = 1.603 \text{ pu}$.
 Според тоа, во овој режим, генераторот ќе работи на карактеристиката $P_3(\theta) = P_{M1}' \sin \theta$.



Слика П.5.5.3. Аглови карактеристики на моќност

Почетниот агол θ_g , аголот на новата рамнотежна состојба θ_1 , како и критичниот агол θ_2 ќе ги добиеме со помош на сликата П.5.5.3, преку следните релации:
 $P_1 = P_{M1} \sin(\theta) \Rightarrow \theta_1 = \arcsin(P_1 / P_{M1}) = \arcsin(1.0 / 2.26) = 26.2^\circ (0.437 \text{ rad})$;
 $P_3 = P_{M1}' \sin(\theta) \Rightarrow \theta_2 = \arcsin(P_3 / P_{M1}') = \arcsin(1.0 / 1.603) = 38.6^\circ (0.674 \text{ rad})$.

Глава V. Стабилност на работата на EEC

$$\theta_0^* = 180^\circ - \theta_0 = 141,4^\circ \text{ (2,47 рад)}$$

Граничниот агол на исклучување θ_0^* ќе го добиеме со помош на правилото на еднакви површини. Применувајќи го ова правило, во сообразност со сликата П1.5.5.3, добиваме:

$$A^* = P_n \cdot (\theta_0^* - \theta_0); A_{\max}^* = \int_{\theta_0}^{\theta_0^*} (P_{M1} \cdot \sin \theta - P_n) \cdot d\theta$$

Од условот $A^* = A_{\max}^*$ ја добиваме следната релација:

$$P_n \cdot (\theta_0^* - \theta_0) = P_n \cdot (\theta_0^* - \theta_0) + P_{M1} \cdot (\cos \theta_0 - \cos \theta_0^*),$$

од каде што се добива:

$$\cos \theta_0^* = \cos \theta_0 + \frac{P_n}{P_{M1}} \cdot (\theta_0^* - \theta_0), \text{ т.е.}$$

$$\cos \theta_0^* = 0,7815 + (1/1,603) \cdot (2,47 - 0,457) = 0,4743;$$

$$\theta_0^* = \arccos 0,4743 = 61,7^\circ.$$

Забелешка: За останатите врсти на куси врски, поставата за пресметување на граничниот агол на исклучување θ_0^* е слична на овозможетата. Може да се покаже дека граничниот агол θ_0^* , во општ случај, се пресметува со помош на следната релација:

$$\cos \theta_0^* = \frac{P_n}{P_{M1}} \cdot (\theta_0^* - \theta_0) + \cos \theta_0$$

Според тоа, за равни врсти на куси врски ќе ја имаме следната ситуација во поглед на големината на граничниот агол θ_0^* :

- еднофазна куса врска ($k=1$): $X_k = 0,0891 \text{ pu}$; $P_{M1} = 1,497 \text{ pu}$ ($A^* < A^*_{\max}$ соопшени);
- двофазна куса врска ($k=2$): $X_k = 0,0443 \text{ pu}$; $P_{M1} = 1,116 \text{ pu}$; $\theta_0^* = 121,4^\circ$;
- двофазна к. врска со земја ($k=2z$): $X_k = 0,0224 \text{ pu}$; $P_{M1} = 0,746 \text{ pu}$; $\theta_0^* = 84,1^\circ$.

Глава V. Стабилност на работата на EEC

Пример 5.6. Се посматра повторно проблемот од примерот 5.5. Со примена на методот "чекор по чекор" да се пресмета граничното време на исклучување t_{cr} и да се нацрта кривата $\theta(t)$ за случајот кога кусата врска бидејќи се исклучила врска да се достигне граничниот агол на исклучување θ_0 . Пресметките да се вршат со временски чекор $\Delta t = 0,05 \text{ s}$. За генераторот се познати следните дополнителни податоци: номинална привидна моќност $S_n = 1 \text{ pu}$, време на залет $T_J = 6,66 \text{ s}$.

Решение:

Константата на инерција на агрегатот (изразена во пу) ќе биде:

$$M = S_n T_J / \omega_0 = 1,666/18,000 = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ pu}$$

По настанувањето на кусата врска ќе се јави дебаланс на моќностите ΔP (и моментите) кај генераторот, при што, веднаш на почетокот, дебалансот ΔP_n ќе изнесува:

$$t = 0: P_n = P_m = \text{const.}; P_J(0) = 0; \Delta P_n = \Delta P(0) = P_n - P_J(0) = P_n$$

На крајот на првиот временски интервал ($t = \Delta t$), релативната аголната брзина на вртење на роторот на генераторот ω ќе изнесува:

$$\omega_1^* = \omega_0 + \alpha_1 (\Delta t/2) = \omega_0 + P_n / M (\Delta t/2) = 0 + 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,025 = 67,5 \text{ (}^\circ\text{cl/s)}$$

додека прирестот на аголот на изместување што ќе се оствари во текот на првиот временски интервал $\Delta \theta_1$ ќе биде:

$$\Delta \theta_1 = \omega_1^* \Delta t = 67,5 \cdot 0,05 = 3,375^\circ = 3,4^\circ$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \Delta \theta_1 = 26,2^\circ + 3,375^\circ = 29,6^\circ$$

Апсолутно забрзување α_1 што ќе се има на крајот на првиот временски интервал, и со кое ќе работиме во наредниот временски интервал, ќе биде:

$$\alpha_1 = \alpha_{n-1} = \Delta P_{n-1} / M = (P_n - P_{M1} \sin \theta_1) / M = P_n / M = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ (}^\circ\text{cl/s}^2\text{)}$$

На крајот на вториот интервал, т.е. во моментот $t = 2 \Delta t$ ќе имаме:

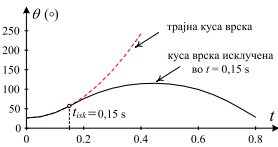
$$\omega_2^* = \omega_1^* + \alpha_1 \Delta t = 67,5 + 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,05 = 202,5 \text{ (}^\circ\text{cl/s)}$$

$$\Delta \theta_2 = \omega_2^* \Delta t = 202,5 \cdot 0,05 = 10,125^\circ \text{ и } \theta_2 = \theta_1 + \Delta \theta_2 = 39,7^\circ$$

На ист начин се поставува и за секој нареден интервал и така се добива решението $\theta(t)$ во форма на нива дискретни вредности за $t = \Delta t, 2 \Delta t, 3 \Delta t, \dots$ итн. Податоците за вредностите на аголот на изместување θ и неговите прирести $\Delta \theta$ се прикажани во табелата П1.5.6.1. Врз основа на оваа табела е добиена и графичката зависност $\theta = \theta(t)$ за случајот кога генераторот работи на карактеристиката $P_J(\theta) = 0$, т.е. кога кусата врска е уште не е исклучена.

Графичката зависност $\theta = \theta(t)$ за овој случај е прикажана со подна линија на сликата П1.5.6.1 и од неа, по графички пат, се отчитува граничното време на исклучување на кусата врска t_{cr} , т.е. она време, за кое аголот на изместување θ ја добива својата гранична вредност θ_0 . Решението добиено на тој начин гласи: $\theta_0 = 61,9^\circ$ и $t_{cr} = 0,16 \text{ s}$.

Глава V. Стабилност на работата на EEC



Слика П1.5.6.1. Графички приказ на решението $\theta(t)$

Табела П1.5.6.1. Решение $\theta(t)$ во режим на трифазна куса врска

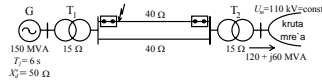
k	t _k	Δθ _k	θ _k
0	0,00	-	26,2
1	0,05	3,4	29,6
2	0,10	10,1	39,7
3	0,15	16,9	56,6
4	0,20	23,6	80,2
5	0,25	30,4	110,6
6	0,30	37,1	147,7
7	0,35	43,9	191,6
8	0,40	50,6	242,2

Нека кусата врска биде исклучена во $t = 0,15 \text{ s}$ (што значи дека системот ќе остане динамички стабилен). Тогаш, со истиот метод, водејќи притоа сметка за дисконитинитетот што настанал во моментот на исклучување на кусата врска ($t = 0,15 \text{ s}$), ќе добиеме нов тек на процесот и нова зависност $\theta = \theta(t)$. Резултатите од пресметките за овој случај се прикажани во табелата П1.5.6.2.

Табела П.5.6.2. Времени тек на електромеханичниот преоден процес кога повредениот вод се исклучува во моментот $t = 0,15$ s

Интервал k	Време t_k (s)	P_e (pu)	$P^* - P_e$ (pu)	Избегаване α (°/s/s)	Δ (°)	θ (°)
0	0,00	0	1,0	2703	/	26,2
1	0,05	0	1,0	2703	3,4	29,6
2	0,10	0	1,0	2703	10,1	39,7
3	0,15*	0	1,0	2703	16,9	56,6
3	0,15*	1,34	-0,34	-919	/	56,6
3	0,15*	1	0,33	906	/	56,6
4	0,20	1,55	-0,55	-1487	19,1	75,7
5	0,25	1,60	-0,60	-1422	15,4	91,1
6	0,30	1,57	-0,57	-1527	11,4	102,5
7	0,35	1,51	-0,51	-1379	1,6	110,1
8	0,40	1,46	-0,46	-1243	4,1	114,2
9	0,45	1,45	-0,45	-1216	1,0	115,2
10	0,50	1,47	-0,47	-1270	-2,0	113,2
11	0,55	1,52	-0,52	-1406	-5,2	108,0
12	0,60	1,58	-0,58	-1588	-8,7	99,4
13	0,65	1,60	-0,60	-1622	-15,6	86,7
14	0,70	1,51	-0,51	-1379	-16,7	70,0
15	0,75	1,23	-0,23	-608	-20,1	49,9
16	0,80	/	/	/	-21,7	28,2

Пример 5.7. Во прикажаниот систем, на почетокот на еден од водите доаѓа до појава на трифазна куса врска. Повредениот вод се исклучува 0,2 s по нејзиното настанување. Да се испита дали системот е динамички стабилен.



Слика П.5.7.1

Решение:

Во режимот пред настанувањето на кусата врска ќе ги имаме следните односи:

$$X_{12} = X_{11} = X_1 + X_{T1} + X_{L1} + X_{T2} + X_{22} = 100 \Omega$$

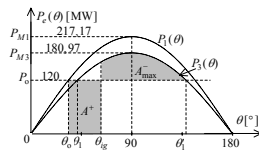
$$E' = U_{1a} + \frac{P_{1a}}{U_{1a}} + j \frac{Q_{1a}}{U_{1a}} = 197,4 \angle 33,5^\circ \text{ kV}$$

Значи, во нормален режим на работа генераторот G работи на карактеристиката:

$$P_1(\theta) = P_{10} \sin(\theta) = 217,2 \sin(\theta)$$

каде што е:

$$P_{10} = E' \cdot U_{1a} / X_{12} = 197,4 \cdot 110 / 100 = 217,2 \text{ MW}$$



Слика П.5.7.2. Главни карактеристики на моќност

Почетниот агол на измествување во случајот ќе биде (види сл. П.5.7.2): $\theta_0 = 33,54^\circ$ ($\theta_0 = 0,585 \text{ rad}$).

Во режимот на куса врска генераторот не отдава никаква електрична моќност и работи на карактеристиката $P_1(\theta) = P_{10} \sin(\theta)$ ($P_{10} = 0$). По исклучувањето на кусата врска генераторот ќе работи на нова работна карактеристика:

$$P_1(\theta) = P_{10} \sin(\theta),$$

и притоа ќе имаме:

$$X_{12} = X_{11} = X_1 + X_{T1} + X_{L1} + X_{T2} = 120 \Omega$$

$$P_{10} = E' \cdot U_{1a} / X_{12} = 181 \text{ MW}$$

Тригониот агол на исклучување на кусата врска θ_0 ќе го добиеме применувајќи го правилото на синуси поворини. Од условот $A = A_{\text{min}}$, односно, во склад со сликата П.5.7.2, добиваме:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_g} (P_1 - 0) \cdot d\theta = \int_{\theta_0}^{\theta_g} (P_{12} \sin \theta - P_1) \cdot d\theta, \text{ или:}$$

$$P_1 \cdot (\theta_g - \theta_0) = P_2 \cdot (\theta_g - \theta_0) + P_{13} \cdot (\cos \theta_g - \cos \theta_0),$$

од каде што се добива:

$$\cos \theta_g = \cos \theta_0 + \frac{P_1}{P_{13}} \cdot (\theta_g - \theta_0)$$

Во склад со сликата П.5.7.2 имаме:

$$\theta_0 = \arcsin(P_1 / P_{10}) = \arcsin(120 / 181) = 41,5^\circ$$

$$\theta_1 = 180^\circ - \theta_0 = 138,5^\circ$$

па, според тоа, добиваме: $\cos \theta_1 = 0,466 \Rightarrow \theta_1 = 62,2^\circ$.

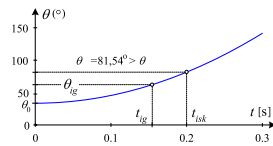
За да испитаме дали системот е динамички стабилен, ќе треба да утврдиме дали аголот на исклучување θ_0 (т.е. аголот θ во моментот на исклучувањето на повредениот вод) ја надминува граничната вредност θ_g . За таа цел, потребно ќе биде да ја знаеме зависноста $\theta = \theta(t)$ во режимот на кусата врска. Таа зависност во општ случај се добива со решавање на равенката на движење на генераторот, т.е. со нумеричка постапка. Во специјален случај, кога дебалансот на моќноста $\Delta P = \text{const}$, неа можеме да ја добиеме и по аналитички пат. Во тој случај диференцијалната равенка на движење може да се реши експлицитно, а резултатот гласи:

$$\theta(t) = \theta(0) + \frac{\Delta P}{M} \cdot t^2 - \theta_0 \cdot \frac{\Delta P}{M} \cdot t^2$$

Во конкретниот случај константата на инерција на агрегатот M ќе биде:

$$M = S \cdot T_j \cdot \omega_0 = 150,6 \cdot 18.000 = 0,05 \text{ (MW} \cdot \text{s}^2/\text{el)}$$

и сега ќе можеме да ја напираме зависноста $\theta = \theta(t)$ (слика П.5.7.3). Од сликата П.5.7.3 ја отчитуваме вредноста на аголот θ во моментот на исклучувањето на повредениот вод: $\theta_{0,2} = 81,5^\circ$.



Слика П.5.7.3. Зависност $\theta = \theta(t)$ во режимот на куца арска

Значи, системот ќе биде динамички стабилен бидејќи куцата арска е исклучена пред да биде достигнат граничниот агол на исклучување θ_k . Гранично време на исклучување на куцата арска t_{ig} ќе го добиеме од условот:

$$\theta_{ig} = \theta_0 + \frac{\Delta P}{M} \frac{t_{ig}^2}{2}$$

од каде што се добива:

$$t_{ig} = \sqrt{\frac{2 \cdot M \cdot (\theta_{ig} - \theta_0)}{\Delta P}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,05 \cdot (62,2 - 33,5)}{120}} = 0,15s.$$

Пример 5.8. Со помош на методот "чекор по чекор" да се одреди временскиот тек $\theta(t)$, т.е. нивњето на аголот на измествување θ во примерот 5.4.

Решение:

Во конкретниот случај имаме (види сл. П.5.8.1):

$$\theta_0 = 34,5^\circ (0,602 \text{ rad}), \quad \theta_1 = 47,8^\circ (0,834 \text{ rad}),$$

$$\theta_2 = 132,2^\circ (2,307 \text{ rad}), \quad P_1(\theta) = 1,765 \sin(\theta),$$

$$P_2(\theta) = 1,350 \sin(\theta), \quad S_1 = 1 \text{ pu}, T_f = 8,18 \text{ s}; P_2 = 1 \text{ pu}.$$

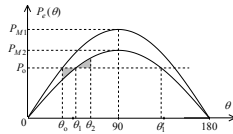
Константата на инерција на агрегатот M , изразена во релативни pu единици ќе биде:

$$M = S_1 T_f^2 \omega_0^2 = 1,8,18^2 / 18.000 = 4,544 \cdot 10^{-4} \text{ s}^2/\text{el}.$$

Нека го воведеме означувањето $k = \Delta P / M$. Ако за временскиот чекор условно вредност $\Delta t = 0,05 \text{ s}$, тогаш за константата k ќе добиеме:

$$k = 0,05^2 / 4,544 \cdot 10^{-4} = 5,5^\circ.$$

Понатаму следи постапката за решавање на преодниот процес:



Слика П.5.8.1. Аглони карактеристики на машината

$$k = 0 \quad t = 0 \quad \theta = \theta_0 = 34,5^\circ \quad \Delta P_0 = P_1 - P_{G0} \sin(\theta_0) = 0,236 \text{ pu},$$

$$\Delta \theta_1 = \alpha_1 \Delta t^2 / 2 = (\Delta P_0 / M) \Delta t^2 / 2 = k (\Delta P_0 / 2) = 0,65^\circ.$$

$$k = 1 \quad t = \Delta t \quad \theta_1 = \theta_0 + \Delta \theta_1 = 34,5 + 0,65 = 35,15^\circ \quad \Delta P_1 = P_1 - P_{G1} \sin(\theta_1) = 0,222 \text{ pu},$$

$$\Delta \theta_2 = \Delta \theta_1 + \alpha_1 \Delta t^2 = \Delta \theta_1 + k \Delta P_1 = 0,65 + 5,5 \cdot 0,222 = 1,87^\circ.$$

$$k = 2 \quad t = 2 \cdot \Delta t \quad \theta_2 = \theta_1 + \Delta \theta_2 = 35,15 + 1,87 = 37,02^\circ \quad \Delta P_2 = P_1 - P_{G2} \sin(\theta_2) = 0,187 \text{ pu},$$

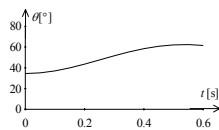
$$\Delta \theta_3 = \Delta \theta_2 + \alpha_1 \Delta t^2 = \Delta \theta_2 + k \Delta P_2 = 1,87 + 5,5 \cdot 0,187 = 2,90^\circ.$$

итн.

Резултатите од понатамошните пресметки се изнесени во табелата П.5.8.1. Врз основа на неа е нацртана и зависноста $\theta = \theta(t)$ (Слика П.5.8.2).

Табела П.5.8.1. Решение на временскиот тек на аголот на измествување $\theta = \theta(t)$

t	t(s)	P_1 (pu)	ΔP (pu)	$\Delta \theta$ (°)	θ (°)
0	0,00	0,764	0,236	/	34,50
1	0,05	0,778	0,222	0,65	35,15
2	0,10	0,813	0,187	1,87	37,02
3	0,15	0,865	0,135	2,90	39,92
4	0,20	0,930	0,070	3,64	43,56
5	0,25	0,997	0,003	4,02	47,58
6	0,30	1,058	-0,057	4,04	51,62
7	0,35	1,109	-0,109	3,72	55,34
8	0,40	1,150	-0,150	3,12	58,46
9	0,45	1,176	-0,176	2,30	60,76
10	0,50	1,192	-0,192	1,33	62,09
11	0,55	1,185	-0,195	0,27	62,36
12	0,60	/	-0,185	-0,80	61,56



Слика П.5.8.2. Графички приказ на зависноста $\theta = \theta(t)$

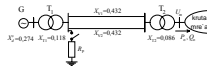
Пример 5.9. Во прикажаното EEC, кај собирниците "2" доаѓа до нагло вклучување на чисто активен потрошувач со моќност $P_2 = 0,172 P_0$. Познати се релативните на параметрите од елементите на EEC:

$$X_1' = 0,274; X_{11}' = 0,118; X_{12}' = X_{21}' = X_2' = 0,432; X_{22}' = 0,086.$$

Режимот во којшто работел EEC пред вклучувањето на потрошувачот се карактеризира со следните режимски параметри, изразени во ри:

$$U_2 = 1; P_2 = 1; Q_2 = 0,485; F = 1,5; \theta_2 = 27,5^\circ$$

Да се пресмета максималниот агол на нивнање θ_1 во преодниот електромеханички процес до кој дојдо по вклучувањето на потрошувачот.



Слика П.5.9.1. Замесна шема на разгледуваниот EEC

Решение

а) Режим на работа на EEC пред вклучување на потрошувачот

Во овој режим преодната реакција на системот X_{11}' и максималната моќност P_{m1} ќе бидат:

$$X_{11}' = X_1' + X_{11}' + X_2'/2 + X_{12}' = 0,694 \text{ ри}; P_{m1} = E' U_2 / X_{11}' = 2,16 \text{ ри.}$$

т.е. генераторот G работел на карактеристиката на моќност:

$$P_1(\theta) = P_{m1} \sin(\theta) = 2,16 \sin(\theta)$$

Еквивалентната реакција X_{22}' на делот од мрежата помеѓу собирниците "2" е собирниците со константен напон U_2 ќе биде:

$$X_{22}' = X_2' / 2 + X_{21}' = 0,302 \text{ ри.}$$

Напонот U_2 при потрошувачот (пред неговото вклучување), во согласност со сликата П.5.9.1, ќе биде:

$$U_2 = \sqrt{(U_m + Q_2 X_{22}' / U_m)^2 + (P_2 X_{22}' / U_m)^2} = 1,186 \text{ ри.}$$

Ако потрошувачот го прикажеме во шемата со неговата импеданција (т.е. во случајот само со неговата активна отпорност), тогаш (приближно, под претпоаствка дека напонот U_2 со тоа не се промени), за неговата активна отпорност R_p ќе добиеме:

$$Z_p = R_p = \frac{U_2^2}{P_p} = \frac{1,186^2}{0,172} = 8,2 \text{ ри.}$$

б) Режим на работа на EEC по вклучувањето на потрошувачот

По вклучување на потрошувачот ќе се променат сопствените и меѓусебните импеданци на системот. Во новонастанатите услови сопствената импеданција Z_{11} и преодната импеданција Z_{12} ќе ги имаат следните вредности:

$$Z_{11} = j(X_1' + X_{11}') + R_p = j(X_1' + X_{11}') + R_p = 0,7 \angle 80,9^\circ \text{ ри}; \alpha_{11} = 9,1^\circ$$

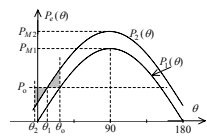
$$Z_{12} = j(X_1' + X_{11}') + j(X_2' / 2 + X_{12}') + j(X_2' + X_{21}') + R_p$$

$$Z_{12} = 0,694 \angle 91,2^\circ \text{ ри}; \alpha_{12} = -1,2^\circ.$$

Карактеристиката на моќност, на којшто сега ќе работи генераторот, ќе биде:

$$P_1(\theta) = \frac{E'^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E' U_2}{Z_{12}} \sin(\theta - \alpha_{12}) = \frac{1,5^2}{0,7} \sin 9,1^\circ + \frac{1,5 \cdot 1}{0,694} \sin(\theta + 1,2^\circ)$$

$$P_1(\theta) = 0,51 + 2,16 \sin(\theta + 1,2^\circ) \text{ ри}$$



Слика П.5.9.2. Аглони карактеристики на моќност

Бидејќи $P_1(\theta) > P_2(\theta)$, како што се гледа од сликата П.5.9.2, тоа ќе значи дека во првиот момент на време, веднаш по вклучувањето на потрошувачот, генераторот G ќе оддава електрична моќност која ќе биде поголема од онаа што ја прима од турбината (истата таа моќност тој ја оддавал пред пореметувањето), ќе се појави дебаланс (кусок) на моќностите и генераторот ќе почне да ја намалува својата брзина.

Значи аголот на изместување θ ќе почне да се намалува и во следниот момент ќе ја достигне својата минимална вредност θ_1 (види слика П.5.9.2). По тоа тој ќе почне да расте и процесот (нишавњето на роторот) ќе се одвива осцилаторно. Вредноста на аголот θ_1 може да се добие со примена на правилото на еднакви површини. Се покажува дека во конкретниот случај тој ќе изнесува $\theta_1 = 3,7^\circ$, а осцилациите на аголот θ ќе се одвиваат во интервалот $-3,7^\circ \leq \theta \leq 27,5^\circ$. По извесно време, осцилациите ќе се придушат и генераторот ќе заеме нова рамнотежна положба на карактеристиката $P_1(\theta)$. Во новата работна точка, аголот на изместување θ ќе изнесува: $\theta = \theta_1 = 11,9^\circ$.