

УНИВЕРЗИТЕТ СВ. “КИРИЛ И МЕТОДИЈ” СКОПЈЕ

ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА
И ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ

Ристо Ачковски

РЕШЕНИ ПРИМЕРИ И ЗАДАЧИ
ПО ВИСОКОНАПОНСКИ МРЕЖИ
И СИСТЕМИ



ЕТФ - Скопје, 2015 г.

I) ПРИМЕРИ И ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА ПРЕНОС НА МОЌНОСТ СО ДОЛГИ ТРИФАЗНИ ВОДОВИ

Пример 1.1. Со примена на преносните равенки да се пресметаат приликите на почетокот од водот кој е на крајот оптоварен со потрошувач чијашто моќност изнесува $\underline{S}_2 = (P_2 + jQ_2) = (100 + j32,876) \text{ MVA}$ ($\cos\varphi = 0,95$) при напон $U_2 = 215 \text{ kV}$. Познати се следните податоци за водот: должина $l = 300 \text{ km}$; $\underline{z} = (r + jx) = (0,078 + j0,40) \Omega/\text{km}$; $\underline{y} = j \cdot b = j2,9 \mu\text{S}/\text{km}$.

Решение:

Параметрите на водот ќе бидат:

$$\underline{z} = (0,078 + j0,40) = 0,4075 \cdot e^{j78,96} \Omega/\text{km}; \quad \underline{y} = jb = j2,9 \cdot 10^{-6} \text{ S}/\text{km}.$$

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{0,4075}{2,9 \cdot 10^{-6}}} \cdot e^{j\frac{78,96-90}{2}} = 374,85 \cdot e^{-j5,52^\circ} \Omega;$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \sqrt{0,4075 \cdot 2,9 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{j\frac{78,96+90}{2}} = 1,087 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j84,48^\circ} = (0,1045 + j1,0819) \cdot 10^{-3} \text{ 1/km}.$$

$$\underline{\gamma} = (\alpha + j\beta) = (0,1045 + j1,0819) \cdot 10^{-3} \text{ 1/km}; \quad \underline{\gamma} \cdot l = (\alpha l + j\beta l) = (0,03136 + j0,3245),$$

$$\text{ch } \underline{\gamma} l = (\text{ch } \alpha l \cdot \cos \beta l + j \text{sh } \alpha l \cdot \sin \beta l) = (0,94826 + j0,0099) = 0,9483 \cdot e^{j0,6^\circ};$$

$$\text{sh } \underline{\gamma} l = (\text{sh } \alpha l \cdot \cos \beta l + j \text{ch } \alpha l \cdot \sin \beta l) = (0,029723 + j0,3189) = 0,3203 \cdot e^{j84,67^\circ}.$$

Ќе го поставиме напонот $\underline{U}_2$ на фазната оска, т.е. $\underline{U}_2 = 215 \text{ e}^{j0} \text{ kV}$. Во тој случај, согласно со релацијата (2.7), за природната моќност $\underline{S}_{N2}$ ќе добиеме:

$$\underline{S}_{N2} = \frac{\underline{U}_2^2}{\underline{Z}_C^*} = \frac{215^2}{374,85} \cdot e^{-j5,52^\circ} = 123,316 \cdot e^{-j5,52^\circ} \text{ MVA}..$$

За моќноста на крајот од водот ќе имаме:

$$\underline{S}_2 = (100 + j32,867) = 105,263 \cdot e^{j18,2^\circ} \text{ MVA}.$$

Понатаму, согласно релациите (2.8) ќе имаме:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left(\text{ch } \underline{\gamma} l + \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{S}_{N2}^*} \cdot \text{sh } \underline{\gamma} l \right);$$

$$\underline{U}_1 = 215 \cdot \left(0,9483 \cdot e^{j0,6^\circ} + \frac{105,263 \cdot e^{-j18,2^\circ}}{123,316 \cdot e^{j5,52^\circ}} \cdot 0,3203 \cdot e^{j84,67^\circ} \right) = 238,493 \cdot e^{j12,97^\circ} \text{ kV}$$

Слично, за струјата на почетокот добиваме:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_C} \left(\text{sh } \underline{\gamma} l + \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{S}_{N2}^*} \cdot \text{ch } \underline{\gamma} l \right) = 0,25642 \cdot e^{j5,6^\circ} \text{ kA}.$$

Моќноста на почетокот од водот $\underline{S}_1$ ќе биде:

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 238,493 \cdot 0,25642 \cdot e^{j(12,97-5,6)^\circ} = 105,922 \cdot e^{j7,37^\circ};$$

$$\underline{S}_1 = (105,047 + j13,583) \text{ MVA}.$$

Загубите на моќност во преносот ќе бидат:

$$\Delta \underline{S} = (\Delta P + j\Delta Q) = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 = (5,047 - j19,284) \text{ MVA}.$$

Факторот на моќност $\cos\varphi_1$ на почетокот од водот ќе биде:

$$\varphi_1 = \arg\{\underline{U}_1\} - \arg\{\underline{I}_1\} = 12,97 - 5,6 = 7,37^\circ \Rightarrow \cos\varphi_1 = \cos 7,37^\circ = 0,992.$$

□ □ □

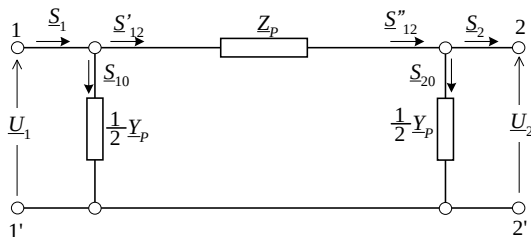
Пример 1.2. Да се пресметаат параметрите $\underline{Z}_P$ и $\underline{Y}_P$ на точната π -заменска шема на водот разгледуван во претходната задача. Потоа, користејќи ја добиената точна π -заменска шема, да се пресметаат приликите на почетокот од водот $\underline{U}_1$, I_1 и $\underline{S}_1$.

Решение:

Во согласност со релациите (2.35) и (2.36), за параметрите на точната π -заменска шема на водот добиваме:

$$\underline{Z}_P = \underline{Z}_C \cdot \operatorname{sh}\gamma l = 374,85 \cdot e^{-j5,52} \cdot 0,3203 \cdot e^{j84,67} = 120,064 \cdot e^{j79,15^\circ} = (22,6 + j117,917)\Omega;$$

$$\frac{\underline{Y}_P}{2} = \frac{\operatorname{ch}\gamma l - 1}{\underline{Z}_C \cdot \operatorname{sh}\gamma l} = \frac{0,94826 + j0,00999 - 1}{120,064 \cdot e^{j79,15^\circ}} = 438,8 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j89,92^\circ} \text{ S} \approx j438,8 \mu\text{S}.$$



Слика 1.2.1

Понатаму, во согласност со сликата 1.2.1 имаме:

$$\underline{S}_2 = (100 + j32,867) = 105,263 \cdot e^{j18,2^\circ} \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{20} = \underline{U}_2^2 \cdot \underline{Y}_P^* / 2 = 215^2 \cdot (-j439 \cdot 10^{-6}) = -j20,283 \text{ Mvar};$$

$$\underline{S}_{12}'' = \underline{S}_2 + \underline{S}_{20} = (100 + j12,583) \text{ MVA};$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta U_d + j\Delta U_q$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \frac{P_{12}'' \cdot R_P + Q_{12}'' \cdot X_P}{U_2} + j \frac{P_{12}'' \cdot X_P - Q_{12}'' \cdot R_P}{U_2}$$

$$\Delta U_d = \frac{P_{12}'' \cdot R_P + Q_{12}'' \cdot X_P}{U_2} = \frac{100 \cdot 22,6 + 12,583 \cdot 117,917}{215} = 17,416 \text{ kV}$$

$$\Delta U_q = \frac{P_{12}'' \cdot X_P - Q_{12}'' \cdot R_P}{U_2} = \frac{100 \cdot 117,917 - 12,583 \cdot 22,6}{215} = 53,538 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_1 = 215 + (17,416 + j53,538) = (232,416 + j53,538) = 238,5 \cdot e^{j12,97^\circ} \text{ kV}.$$

Загубите на моќност $\Delta \underline{S}_{12} = (\Delta P_{12} + j\Delta Q_{12})$ во редната гранка $\underline{Z}_P$ ќе бидат:

$$\Delta \underline{S}_{12} = 3 \cdot \underline{Z}_P \cdot \underline{I}_{12}^2 = \underline{Z}_P \cdot \frac{\underline{S}_{12}''^2}{U_2^2} = \frac{P_{12}''^2 + Q_{12}''^2}{U_2^2} \cdot (R_P + jX_P) = \frac{100^2 + 12,583^2}{215^2} \cdot (22,6 + j117,917) =$$

$$= (4,969 + j25,927) \text{ MVA}; \quad \underline{S}_{12}' = \underline{S}_{12}'' + \Delta \underline{S}_{12} = (104,969 + j38,51) \text{ MVA}.$$

$$\underline{S}_{10} = \underline{U}_1^2 \cdot \underline{Y}_P^* / 2 = 238,5^2 \cdot (-j438,8 \cdot 10^{-6}) = -j24,96 \text{ Mvar};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{12}' + \underline{S}_{10} = (104,969 + j13,55) = 105,902 \cdot e^{j7,35^\circ} \text{ MVA}.$$

Споредувајќи ги овие резултати за приликите на почетокот од водот со резултатите добиени во претходната задача, се заклучува дека тие се практично идентични и дека обата начина на пресметување се, во поглед на точноста, рамноправни.

□ □ □

Пример 1.3. 400 kV надземен вод со должина $l = 400$ km и подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx) = (0,031+j0,327) \Omega/\text{km}$ и $\underline{y} = jb = j3,48 \mu\text{S}/\text{km}$ е приклучен на ЕЕС во точка со напон $U_1 = 400$ kV. Водот работи во режим на празен од. Да се пресмета напонот на крајот од водот $U_2 = ?$ и моќноста на почетокот од водот $S_1 = ?$

Решение:

Бидејќи се работи за „долг“ вод ($l > 250$ km), задачата ќе ја решиме со примена на преносните равенки, и тоа на два начина – егзактно, без какво и да е занемарување и приближно, третирајќи го водот како идеален.

а) Егзактно решавање на задачата

Постапувајќи на начин како и во задачата 1.1, во овој случај се добива:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{0,32846}{3,48 \cdot 10^{-6}}} \cdot e^{j \frac{84,58-90}{2}} = 307,22 \cdot e^{-j2,71^\circ} \Omega;$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \sqrt{0,32846 \cdot 3,48 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{j \frac{84,58+90}{2}} = 1,0691 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j87,29^\circ} 1/\text{km};$$

$$\underline{\gamma} \cdot l = (\alpha l + j\beta l) = (0,02020321 + j0,427178853)$$

$$\text{ch } \underline{\gamma} l = (\text{ch } \alpha l \cdot \cos \beta l + j \text{sh } \alpha l \cdot \sin \beta l) = (0,9103 + j0,0084) = 0,91036 \cdot e^{j0,527^\circ};$$

$$\text{sh } \underline{\gamma} l = (\text{sh } \alpha l \cdot \cos \beta l + j \text{ch } \alpha l \cdot \sin \beta l) = (0,0184 + j0,4144) = 0,4148 \cdot e^{j87,46^\circ}.$$

Ќе го поставиме напонот $\underline{U}_1$ на фазната оска, т.е. $\underline{U}_1 = U_1 \cdot e^{j0} = 400$ kV. Понатаму, со оглед дека е $\underline{S}_2 = 0$ (празен од), врз основа на релациите (2.8) ќе имаме:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left(\text{ch } \underline{\gamma} l + \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{S}_{N2}^*} \cdot \text{sh } \underline{\gamma} l \right) = \underline{U}_2 \text{ch } \underline{\gamma} l \Rightarrow \underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\text{ch } \underline{\gamma} l} = \frac{400}{0,91036 \cdot e^{j0,527^\circ}} = 439,336 \cdot e^{-j0,527^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_C} \left(\text{sh } \underline{\gamma} l + \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{S}_{N2}^*} \cdot \text{ch } \underline{\gamma} l \right) = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_C} \cdot \text{sh } \underline{\gamma} l = \frac{439,336 \cdot e^{-j0,527^\circ}}{\sqrt{3} \cdot 307,22 \cdot e^{-j2,71^\circ}} = 0,3425 \cdot e^{j89,64^\circ} \text{ kA}.$$

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = 256,045 \cdot e^{-j89,58^\circ} = (1,491 - j237,3) = 237,294 \cdot e^{-j89,64^\circ} \text{ MVA}.$$

б) Приближно решавање на задачата, третирајќи го водот како идеален

Во овој случај ($r = g = 0$) ќе имаме:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{0,327}{3,48 \cdot 10^{-6}}} = 306,537 \Omega;$$

$$\underline{\gamma} \cdot l = j\beta \cdot l = j\sqrt{x \cdot b} = j0,4267 \text{ rad/km} = j24,448^\circ;$$

$$\text{ch } \underline{\gamma} l = \cos \beta l = \cos 0,4267 = 0,9103; \quad \text{sh } \underline{\gamma} l = j \sin \beta l = j \sin 0,4267 = j0,4138;$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\cos \beta l} = \frac{400}{0,9103} = 439,4 \text{ kV}; \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_C} \cdot \text{sh } \underline{\gamma} l = j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_C} \cdot \sin \beta l = j0,3424 \text{ kA};$$

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,3424 \cdot e^{-j90^\circ} = -j237,22 \text{ MVA}.$$

Очигледно е дека, во случајов, со идеализирањето на водот се добија резултати со задоволителна точност, но на многу поедноставен и побрз начин.

□ □ □

Пример 1.4. Се посматра 400 kV надземен вод од претходниот Пример 1.3. Напонот на почетокот од водот изнесува $U_1 = 400$ kV а на крајот од водот е приклучен потрошувач чија што моќност е $S_2 = S_{N2}$, или, како што се вели, водот пренесува природна моќност. Да се пресметаат напонот на приемниот крај U_2 и моќноста на отпремниот крај S_1 .

Решение:

Врз основа на релациите (2.24), помеѓу напоните $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$ во ваквиот режим важат следните релации:

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = e^{\gamma l} = e^{\alpha l} \cdot e^{j\beta l}.$$

од каде што се добива:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \cdot e^{-\alpha l} = 400 \cdot e^{-0,0216} = 0,9876 \cdot 400 = 391,453 \text{ kV}$$

Сега, со познатиот напон на крајот, лесно ќе ги добиеме најнапред струјата $\underline{I}_2$ и моќноста S_2 , а потоа и струјата $\underline{I}_1$ и бараната моќност S_1 .

За таа цел најнапред ќе усвоиме $\underline{U}_2 = U_2 \cdot e^{j0} = 391,453 \text{ kV}$. Тогаш за напонот $\underline{U}_1$ ќе имаме:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot e^{\gamma l} = 400 \cdot e^{j\beta l} = 400 \cdot e^{j0,4566 \text{ rad}} = 400 \cdot e^{j26,161^\circ} \text{ kV}.$$

Бидејќи импеданцијата на потрошувачот е еднаква на брановата импеданција на водот, т.е. $\underline{Z}_P = \underline{Z}_C = 307,22 \cdot e^{-j2,71^\circ} \Omega$, ќе биде:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_C} = \frac{391,453}{\sqrt{3} \cdot 307,22 \cdot e^{-j2,71^\circ}} = 0,7356742 \cdot e^{j2,71^\circ} \text{ kA}$$

$$S_2 = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* = \sqrt{3} \cdot 391,453 \cdot 0,7356742 \cdot e^{-j2,71^\circ} = 498,781 \cdot e^{-j2,71^\circ} = (498,223 - j23,583) \text{ MVA}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cdot e^{\gamma l} = 0,7356742 \cdot e^{j2,71^\circ} \cdot e^{0,0216} \cdot e^{j26,161^\circ} = 0,751738 \cdot e^{j28,872^\circ} \text{ kA}.$$

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot e^{j26,161^\circ} \cdot 0,751738 \cdot e^{-j28,872^\circ} = 520,819 \cdot e^{-j2,71^\circ} \text{ MVA, или:}$$

$$S_1 = (520,819 - j24,597) \text{ MVA}.$$

□ □ □

Пример 1.5. Се посматра 220 kV надземен вод од примерот 1.1 ($l=300$ km; $\underline{z} = (r+jx) = (0,078+j0,40) \Omega/\text{km}$; $\underline{y} = j \cdot b = j2,9 \mu\text{S}/\text{km}$). Водот е на крајот оптоварен со потрошувач чијашто моќност изнесува $S_2=(P_2+jQ_2) = (100+j32,867) \text{ MVA}$ ($\cos\varphi_2=0,95$). Со примена на преносните равенки да се пресмета напонот на крајот U_2 ако на почетокот од водот напонот се одржува на вредноста $U_1=238,5 \text{ kV}$. (Истиот овој режим е разгледуван во задачите 1.1 и 1.2).

Решение:

Во задачата 1.1 беа пресметани следните параметри за овој вод:

$$\underline{\gamma} = (\alpha + j\beta) = (0,1045 + j1,0819) \cdot 10^{-3} \text{ 1/km; } \underline{\gamma} \cdot l = (\alpha l + j\beta l) = (0,03136 + j0,3245),$$

$$\text{ch } \underline{\gamma} l = (\text{ch } \alpha l \cdot \cos \beta l + j \text{sh } \alpha l \cdot \sin \beta l) = (0,94826 + j0,0099) = 0,9483 \cdot e^{j0,6^\circ};$$

$$\text{sh } \underline{\gamma} l = (\text{sh } \alpha l \cdot \cos \beta l + j \text{ch } \alpha l \cdot \sin \beta l) = (0,029723 + j0,3189) = 0,3203 \cdot e^{j84,67^\circ}.$$

Врз основа на преносните равенки чијшто облик е даден со релациите (2.2), можеме да пишуваме:

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

Ќе го поставиме напонот на крајот од водот на фазната оска, т.е. $\underline{U}_2 = U_2 \cdot e^{j0}$. Во тој случај ќе биде $\underline{U}_1 = U_1 \cdot e^{j\theta} = 238,5 \cdot e^{j\theta}$ kV. Понатаму, за струјата на крајот од водот $\underline{I}_2$ важи:

$$\underline{S}_2 = (100 + j32,867) = 105,263 \cdot e^{j18,2^\circ} \text{ MVA}$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{S}_2^*}{\sqrt{3} \underline{U}_2} = \frac{105,263 \cdot e^{j-18,2^\circ}}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{60,7737 \cdot e^{j-18,2^\circ}}{U_2}.$$

Со замена на оваа вредност на струјата во претходната релација се добива:

$$238,5 \cdot e^{j\theta} = U_2 \cdot 0,9483 \cdot e^{j0,6^\circ} + \sqrt{3} \cdot \frac{60,7737 \cdot e^{-j18,2^\circ}}{U_2} \cdot 0,3203 \cdot e^{j84,67^\circ},$$

$$238,5 \cdot e^{j\theta} = 0,94826 \cdot U_2 + j0,0099 \cdot U_2 + \frac{\sqrt{3} \cdot 3542,551}{U_2} + j \frac{\sqrt{3} \cdot 6379,11}{U_2}.$$

или:

$$238,5^2 = (0,94826 \cdot U_2 + \frac{\sqrt{3} \cdot 3542,551}{U_2})^2 + (0,0099 \cdot U_2 + \frac{\sqrt{3} \cdot 6379,11}{U_2})^2.$$

По средувањето на последната релација по непознатата U_2 се добива следната биквадратна равенка:

$$0,899197 \cdot U_2^4 - 45026,665 \cdot U_2^2 + 159728136 = 0.$$

чијшто решенија гласат:

$$1) U_2 = 215,02 \text{ kV}; \quad 2) U_2 = -215,02 \text{ kV}; \quad 3) U_2 = 61,99 \text{ kV}; \quad 4) U_2 = -61,99 \text{ kV}.$$

Од сите 4 решенија единствено логично и прифатливо е првото решение, т.е.

$$U_2 = 215,02 \text{ kV}.$$

Гледаме дека вредноста на ова решение се совпаѓа со решението од задачите 1.1 и 1.2.

Истата задача можеме да ја решиме и приближно, но на многу поедноставен начин, со примена на π -заменската шема на водот (слика 1.2.1 од задачата 1.2). За неа важи:

$$\underline{Z}_P = (R_P + jX_P) = 120,064 \cdot e^{j79,15^\circ} = (22,6 + j117,917) \Omega; \quad \frac{\underline{Y}_P}{2} = j \frac{B_P}{2} = j438,8 \mu\text{S}.$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta U_d + j\Delta U_q \approx \underline{U}_2 + \Delta U_d = \underline{U}_2 + \frac{P_2 \cdot R_P + (Q_2 - Q_{20}) \cdot X_P}{U_2}.$$

Со занемарување на попречната компонента на падот на напон ΔU_q , што е обично прифатливо кај водовите со напон $U_n < 220 \text{ kV}$, значи, се добива една алгебарска равенка во која единствена непозната е напонот на крајот U_2 . Понатаму, бидејќи е $Q_{20} = U_2^2 \cdot (Y_P / 2)$ следи:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_2 \cdot R_P + Q_2 \cdot X_P}{U_2} - \frac{Y_P \cdot X_P}{2} \cdot U_2, \text{ или}$$

$$(1 - \frac{X_P \cdot Y_P}{2}) \cdot U_2^2 - U_1 \cdot U_2 + (P_2 \cdot R_P + Q_2 \cdot X_P) = 0, \text{ т.е.}$$

$$(1 - 117,917 \cdot 438,8 \cdot 10^{-6}) \cdot U_2^2 - 238,5 \cdot U_2 + (100 \cdot 22,6 + 32,867 \cdot 118,917) = 0, \text{ или}$$

$$0,948258 \cdot U_2^2 - 238,5 \cdot U_2 + 6168,445 = 0$$

Решенијата на оваа квадратна равенка гласат: 1) $U_2 = 210,745 \text{ kV}$ и 2) $U_2 = 27,755 \text{ kV}$. Од двете решенија единствено логично е првото, т.е. решението на проблемот гласи:

$$U_2 = 210,745 \text{ kV}.$$

Бидејќи точното решение (коешто е веќе пресметано во претходниот дел од задачата) гласи $U_2 = 215 \text{ kV}$, произлегува дека грешката во добиениот резултат изнесува:

$$g\% = \frac{U_{2,\text{приближно}} - U_{2,\text{точно}}}{U_{2,\text{точно}}} \cdot 100 = \frac{210,745 - 215}{215} \cdot 100 = -1,98\%.$$

Од примеров гледаме дека, и покрај големата должина на водот ($l = 300 \text{ km}$), занемарувањето на попречната компонента на падот на напон е донекаде оправдано бидејќи со тоа се добива резултат со прифатлива точност, но на многу поедноставен начин.

Забелешка. Секое приближно решение, добиено на било какво начин, може да се утврди. Доколку се инсистира на повисока точност можно е вака добиеното приближно решение да го утврдиме. За таа цел ќе постапиме на следниот начин. Најнапред, со тукушто пресметаната вредност за напонот U_2 , ќе ги пресметаме реактивната моќност Q_{20} генерирана од попречната гранка на крајот од водот, а потоа и подолжната и попречната компонента на падот на напон ΔU_d и ΔU_q :

$$Q_{20} = U_2^2 \cdot (B_p / 2) = 210,745^2 \cdot 438,8 \cdot 10^{-6} = 19,489 \text{ Mvar}.$$

$$\Delta U_d = \frac{P_2 \cdot R_p + (Q_2 - Q_{20}) \cdot X_p}{U_2} = \frac{100 \cdot 22,6 + (32,867 - 19,489) \cdot 117,917}{210,745} = 18,209 \text{ kV}$$

$$\Delta U_q = \frac{P_2 \cdot X_p - (Q_2 - Q_{20}) \cdot R_p}{U_2} = \frac{100 \cdot 117,917 - (32,867 - 19,489) \cdot 22,6}{210,745} = 54,518 \text{ kV}$$

Со вака пресметаните вредности на компонентите ΔU_d и ΔU_q на падот на напон се добива новата, коригирана, вредност на напонот U_2 :

$$U_1 = (U_2 + \Delta U_d) + j\Delta U_q \Rightarrow U_2 = \sqrt{U_1^2 - \Delta U_q^2} - \Delta U_d,$$

$$U_2 = \sqrt{238,5^2 - 54,518^2} - 18,209 = 213,98 \text{ kV}.$$

Вака коригираното решение веќе може да се смета за сосема прифатливо, бидејќи тоа се разликува од точното за само 0,48%.

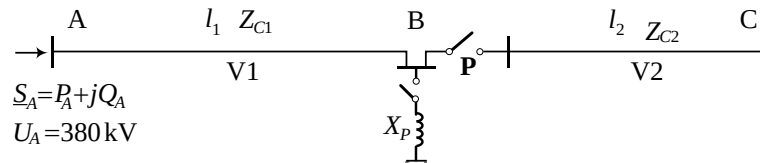
Постапката за корекција може да се изведе произволен пати, итеративно. Притоа, во секоја нова итерација, за пресметка на величините Q_{20} , ΔU_d и ΔU_q , се оперира со вредноста за напонот U_2 добиена во претходната итерација.

За добивање на “точното” решение за напонот U_2 теориски е потребен бесконечен број итерации, но во практиката доволни се само 2 до 3 итерации за да се стигне доволно блиску до точното решение.

□ □ □

Пример 1.6. Се посматра 380 kV преносна мрежа составена од 2 вода V1 и V2 со идентични карактеристики [$z = (r+jx) = (0,032+j0,315) \Omega/\text{km}$; $y = jb=j3,492 \mu\text{S}/\text{km}$; $Z_V = 310 \Omega$] и со должини $l_1 = 150 \text{ km}$ и $l_2 = 150 \text{ km}$. Мрежата работи во режим на празен од при што напонот во напојната точка А се одржува на константна вредност $U_A = U_n = 380 \text{ kV} = \text{const}$. Реакторот X_p , приклучен во точката В, е исклучен. Третирајќи ги водовите како идеални ($r = 0$) да се пресмета:

- а) Колкав е напонот $U_B = ?$ и моќноста $S_A = P_A + jQ_A = ?$ на почетокот од водот V1 за случајот кога прекинувачот P е исклучен.
- б) Колкави се напоните U_B и U_C како и моќноста $S_A = P_A + jQ_A$ за случајот кога прекинувачот P е вклучен.
- в) Се посматра режим на празен од со вклучен прекинувач P. Со цел да се елиминира генерираната реактивна моќност на празен од Q_A , се предвидува поставување на реактор во постројката B чијашто реактанција изнесува $X_P = 950 \Omega$. Колкава ќе биде струјата I_P низ реакторот? Колкави се напоните U_B и U_C во тој случај и колкава моќност S_A ќе повлече водот од напојната точка "A" во тој случај.



Слика 1.6.1. 380 kV преносна мрежа во празен од

Решение:

а) Решавање на водот V1

Во задачата 2.2. беше покажано дека кога е водот V1 во празен од, ќе важат следните релации:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 = \underline{z} \cdot l_1 \approx jx \cdot l_1 = j0,315 \cdot 150 = j47,25 \Omega;$$

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 = \underline{y} \cdot l_1 = jb \cdot l_1 = j3,492 \cdot 150 = j523,8 \mu S; .$$

$$\underline{U}_B = \frac{\underline{U}_A}{1 + \underline{Z} \cdot (\underline{Y}/2)}; \quad \underline{I}_A = \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{2 + \underline{Z} \cdot (\underline{Y}/2)}{1 + \underline{Z} \cdot (\underline{Y}/2)} \cdot \underline{U}_A$$

На тој начин добиваме:

$$\underline{Z} \cdot \underline{Y} / 2 = j47,25 \cdot j523,8 \cdot 10^{-6} = -0,012374,$$

$$\underline{U}_B = \frac{\underline{U}_A}{1 - 0,012374} = \frac{\underline{U}_A}{0,987626} = \frac{380}{0,987626} = 384,76 \text{ kV}, \quad (U_B > U_A).$$

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{2 - 0,012374}{1 - 0,012374} = j0,11564 \text{ kA} \equiv j115,64 \text{ A}.$$

Моќноста S_A што ја „влече“ водот во режимот на празен од ќе биде:

$$S_A = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot (j0,11564)^* = (0 - j76,111) \text{ MVA}.$$

Значи, водот V1 во празен од влече чисто капацитивна струја и соодветно на тоа влече негативна реактивна моќност. Тоа значи дека тој всушност “генерира” реактивна моќност во износ од 76,111 Mvar.

б) Решавање на мрежата составена од водовите водот V1 и V2

Кога прекинувачот P е вклучен, се формира радијална мрежа од два редно (сериски) поврзани вода V1 и V2. Бидејќи обата вода се со идентични карактеристики, тие можат да се третираат како еден единствен вод V со должина $l = l_1 + l_2 = 150 + 150 = 300 \text{ km}$. Понатаму,

постапувајќи на сосема ист начин како и во случајот под а) може да се реши и водот V којшто работи во режим на празен од. На тој начин добиваме:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = j47,5 + j47,5 = j95 \Omega; \quad \underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = j523,8 + j523,8 = j1047,6 \mu S.$$

$$\underline{U}_C = \frac{\underline{U}_A}{1 + \underline{Z} \cdot \underline{Y} / 2} = 399,8 \text{ kV}; \quad \underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{2 + \underline{Z} \cdot \underline{Y} / 2}{1 + \underline{Z} \cdot \underline{Y} / 2} = j0,2358 \text{ kA} \equiv j235,8 \text{ A}.$$

$$\underline{S}_A = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot (j0,2358)^* = (0 - j155,5) \text{ MVA}.$$

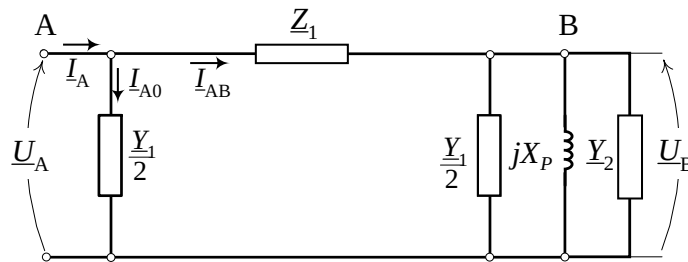
Бидејќи точката В претставува почеток на водот V2, којшто работи во режим на празен од, неговата вредност $\underline{U}_B$ ќе ја добиеме на ист начин како и во случајот под а), тргнувајќи од врската што постои помеѓу напонот на почетокот и напонот на крајот од еден вод во празен од. На тој начин добиваме:

$$\underline{Z}_2 = \underline{z} \cdot l_2 \approx jx \cdot l_2 = j0,315 \cdot 150 = j47,25 \Omega;$$

$$\underline{Y}_2 = \underline{y} \cdot l_2 = jb \cdot l_2 = j3,492 \cdot 150 = j523,8 \mu S;$$

$$\underline{U}_C = \frac{\underline{U}_B}{1 + \underline{Z}_2 \cdot (\underline{Y}_2 / 2)} \Rightarrow \underline{U}_B = \underline{U}_C \cdot [1 + \underline{Z}_2 \cdot (\underline{Y}_2 / 2)] = 394,79 \text{ kV}.$$

в) Состојба во мрежата со вклучен реактор X_P



Слика 1.6.2. Работа на мрежата со вклучен реактор

Во согласност со заклучоците изведени во задачата 2.2, водот V2 во празен од можеме, со доволна точност, да го еквивалентираме со својата влезна адмитанција (импеданција) $\underline{Y}_{vl.2} \cong \underline{Y}_2$. Истовремено водот V1 ќе го претставиме со неговата π -заменска шема, составена од редната гранка $\underline{Z}_1$ и двете напречни гранки $\underline{Y}_1/2$ и $\underline{Y}_1/2$, како што е тоа прикажано на сликата 2.7.2. И конечно, во точката В е приклучен и реакторот $X_P = 950 \Omega$.

Ако паралелната врска составена од трите гранки приклучени во јазолот В ги еквивалентираме со една еквивалентна $\underline{Z}_{ek}$, ќе добиеме:

$$\underline{Z}_{ek} = jX_P \Pi(2/\underline{Y}_1) \Pi(1/\underline{Y}_2) = j950 \Pi(-j3818,25) \Pi(-j1909,13) = j3746,3 \Omega.$$

Понатаму, струите $\underline{I}_{AB}$, $\underline{I}_{A0}$ и $\underline{I}_A$ (слика 2.9.2) ќе ги добиеме на следниот начин:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{Af}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ek}} = \frac{\underline{U}_A / \sqrt{3}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ek}} = \frac{380 / \sqrt{3}}{j47,5 + j3746,3} = -j57,833 \cdot 10^{-3} \text{ kA};$$

$$\underline{U}_B = \sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{I}_{AB} = \frac{\underline{Z}_{ek}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ek}} \cdot \underline{U}_A = 0,9875 \cdot \underline{U}_A = 375,27 \text{ kV},$$

$$\underline{I}_{A0} = \frac{\underline{Y}_1}{2} \cdot \underline{U}_{Af} = \frac{j523,8 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \frac{380}{\sqrt{3}} = j57,459 \cdot 10^{-3} \text{ kA} \equiv j57,459 \text{ A},$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A0} + \underline{I}_{AB} = j57,459 - j57,83 = -j0,37 \text{ A} \approx 0.$$

Значи со приклучувањето на реакторот X_P се изврши практично целосна компензација на капацитивната струја што ја генерираат водовите V1 и V2 во режимот на празен од. Значи мрежата вака компензирана нема да влече практично никаква струја, односно моќност.

Овој резултат е сосема логичен бидејќи вредноста $X_P = 950 \Omega$ е избрана така што приближно важи:

$$\frac{1}{Y_1 + Y_2} = \frac{10^6}{523,8 + 523,8} = 954,6 \Omega \approx X_P = 950 \Omega.$$

Лесно се покажува дека напонот $\underline{U}_C$ на крајот од водот V2 во случајов ќе биде:

$$\underline{U}_C = 379,95 \text{ kV} \approx \underline{U}_A.$$

И конечно, струјата $\underline{I}_P$ низ реакторот како и реактивната моќност $\underline{S}_P = jQ_P$ што реакторот ја троши во посматраниот режим ќе бидат:

$$I_P = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot X_P} = \frac{375,27}{\sqrt{3} \cdot 950} = 0,228 \text{ kA}; \quad Q_P = \sqrt{3} \cdot U_B \cdot I_P = 148,24 \text{ Mvar}.$$

□ □ □

Задача 1.1. Трифазен вод со должина $l = 310 \text{ km}$ и подолжни параметри $\underline{z} = (0,03 + j0,33) \Omega/\text{km}$ и $\underline{y} = j3,22 \mu\text{S}/\text{km}$ напојува потрошувач со моќност $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = (500 + j100) \text{ MVA}$ при напон $U_2 = 390 \text{ kV}$. Да се пресметаат приликите на почетокот од водот $\underline{U}_1$, $\underline{I}_1$ и $\underline{S}_1$:

- со помош на преносните равенки;
- со помош на точната π -заменска шема;
- со помош на упростената π -заменска шема.

□ □ □

Задача 1.2. Идеален трифазен вод со должина $l = 400 \text{ km}$ и карактеристична импеданција $\underline{Z}_C = 310 \Omega$ има напон на почетокот $\underline{U}_1 = 380 \text{ kV}$. Да се определи:

- напонот на крајот $\underline{U}_2$ како и струјата $\underline{I}_1$ и реактивната моќност Q_1 на почетокот од водот кога водот работи во режим на празен од;
- колкава треба да биде реактанцијата X_P на реакторот приклучен на крајот од водот во тој режим за да се изврши целосно поништување на капацитивната струја на почетокот од водот, т.е. да биде $\underline{I}_1 = 0$;
- законот на промена на напонот по должината од водот $U(x)$ за разни вредности на параметрот X_P . Колкава треба да биде реактанцијата X_P за да биде задоволен условот $\underline{U}_1 = \underline{U}_2$.

$$\text{а) } \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j\sqrt{3}Z_C \underline{I}_2 \sin \beta l; \quad \underline{I}_2 = 0;$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l; \quad \beta l = 0,06 \cdot 400 = 24^\circ;$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\cos \beta l} = \frac{380}{\cos 24^\circ} = 415,962 \text{ kV}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cos \beta l + j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}Z_C} \sin \beta l = j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}Z_C} \sin \beta l = j \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 310} \sin 24^\circ = j0,288 \text{ kA}$$

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3} \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot (-j0,288) = -j189,461 \text{ MVA}; \quad Q_1 = 189,461 \text{ Mvar}.$$

$$\text{б) } \underline{I}_1 = 0; \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}(jX_p)}; \underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cos \beta l + j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}Z_C} \sin \beta l = -j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}X_p} \cos \beta l + j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}Z_C} \sin \beta l = 0$$

$$-\frac{\cos \beta l}{X_p} + \frac{\sin \beta l}{Z_C} = 0;$$

$$X_p = \frac{Z_C \cos \beta l}{\sin \beta l} = \frac{Z_C}{\operatorname{tg} \beta l} = \frac{310}{\operatorname{tg} 24^\circ} = 693,3 \, \Omega$$

$$\text{в) } \underline{U}_1 = \underline{U}_2; \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{j\sqrt{3} \cdot X_p};$$

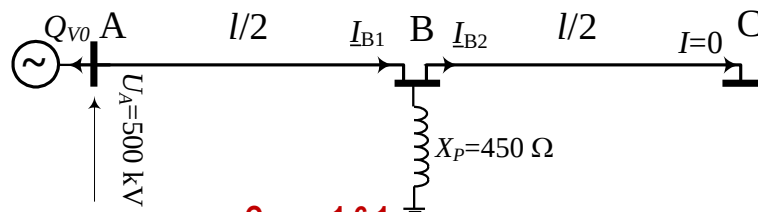
$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j\sqrt{3}Z_C \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}(jX_p)} \sin \beta l = \underline{U}_2 \left(\cos \beta l + \frac{Z_C}{X_p} \sin \beta l \right);$$

$$\left(\cos \beta l + \frac{Z_C}{X_p} \sin \beta l \right) = 1; X_p = \frac{Z_C \sin \beta l}{1 - \cos \beta l} = \frac{310 \cdot \sin 24^\circ}{1 - \cos 24^\circ} = 1458,4 \, \Omega.$$

□ □ □

Пример 1.6. Идеален трифазен вод со должина $l = 1000 \, \text{km}$ и карактеристична импеданција $Z_C = 310 \, \Omega$ работи во режим на празен од. Напонот на почетокот од водот (точка А) се одржува на константна вредност $U_A = 500 \, \text{kV} = \text{const}$. За да се намали реактивната моќност Q_{V0} , генерирана од водот во режимот на празен од, како и за да се ограничат вредностите на напонот по должината на водот, предвидено е на средината од водот ($x = l/2$) да се приклучи реактор чијашто реактанција изнесува $X_p = 450 \, \Omega$.

Да се определат напоните U_B и U_C на средината и на крајот од водот пред и после приклучувањето на реакторот. Колкави се реактивните моќности на почетокот од водот во споменатите два случаја.

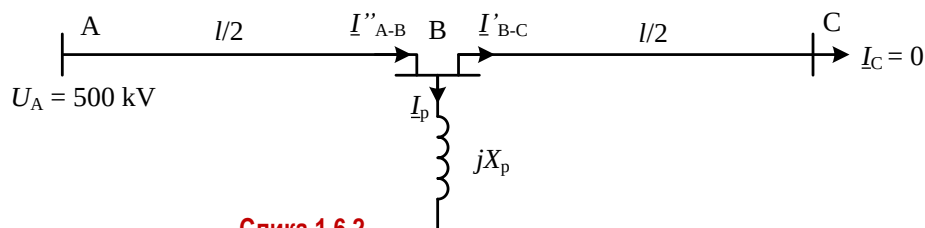


Слика 1.6.1

$$\text{а) вод А-С: } \underline{U}_A = \underline{U}_C \cos \beta l; \underline{U}_C = \frac{\underline{U}_A}{\cos \beta l} = \frac{500}{\cos(0,06 \cdot 1000)} = 1000 \, \text{kV}$$

$$\text{вод В-С: } \underline{U}_B = \underline{U}_C \cos \beta \frac{l}{2} = 1000 \cos(0,06 \cdot 500) = 866,025 \, \text{kV};$$

б) вод В-С



Слика 1.6.2

$$\underline{U}_B = \underline{U}_C \cos \beta \frac{l}{2} \Rightarrow \underline{U}_C = \frac{\underline{U}_B}{\cos \beta \frac{l}{2}};$$

$$\underline{I}_{B-C}' = j \frac{\underline{U}_C}{\sqrt{3}Z_C} \sin \beta \frac{l}{2} = j \frac{\underline{U}_B}{\sqrt{3}Z_C \cos \beta \frac{l}{2}} \sin \beta \frac{l}{2} = j \frac{\underline{U}_B}{\sqrt{3}Z_C} \operatorname{tg} \beta \frac{l}{2};$$

$$\underline{Z}_{vl(B-C)} = \frac{\underline{U}_B}{\sqrt{3}\underline{I}_{B-C}'} = \frac{\underline{U}_B}{\sqrt{3} \cdot j \frac{\underline{U}_B}{\sqrt{3}Z_C} \operatorname{tg} \beta \frac{l}{2}} = \frac{Z_C}{j \operatorname{tg} \beta \frac{l}{2}} = -j \frac{310}{\operatorname{tg} 30^\circ} = -j536,936 \Omega.$$



Слика 1.6.3

$$\underline{Z}_e = \frac{jX_p \cdot \underline{Z}_{vl}}{jX_p + \underline{Z}_{vl}} = \frac{j450 \cdot (-j536,936)}{j450 + (-j536,936)} = j2779,306 \Omega;$$

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B \cos \beta \frac{l}{2} + j\sqrt{3}Z_C \underline{I}_{A-B}'' \sin \beta \frac{l}{2}; \quad \underline{I}_{A-B}'' = \frac{\underline{U}_B}{\sqrt{3}\underline{Z}_e};$$

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B \cos \beta \frac{l}{2} + j\sqrt{3}Z_C \frac{\underline{U}_B}{\sqrt{3}\underline{Z}_e} \sin \beta \frac{l}{2} = \underline{U}_B \left(\cos \beta \frac{l}{2} + j \frac{Z_C}{\underline{Z}_e} \sin \beta \frac{l}{2} \right);$$

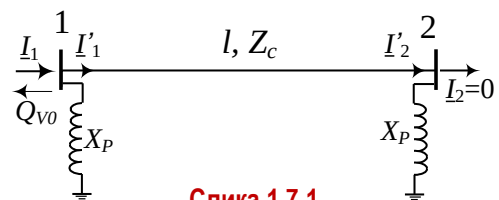
$$\underline{U}_B = \frac{\underline{U}_A}{\cos \beta \frac{l}{2} + j \frac{Z_C}{\underline{Z}_e} \sin \beta \frac{l}{2}} = \frac{500}{\cos 30^\circ + j \frac{310}{j2779,306} \sin 30^\circ} = 542,42 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_C = \frac{\underline{U}_B}{\cos \beta \frac{l}{2}} = \frac{542,42}{\cos 30^\circ} = 626,333 \text{ kV}.$$

□ □ □

Пример 1.7. Даден е идеален трифазен вод со должина $l = 500 \text{ km}$ и со карактеристична импеданција $\underline{Z}_c = 300 \Omega$. Водот работи во режим на празен од. За да се изврши компензација на произведуваната реактивна моќност Q_{v0} и елиминираат познатите проблеми што се јавуваат во таквиот режим, се предвидува поставување на два напдно идентични реактора, првиот на неговиот почеток, а вториот на неговиот крај (слика 1.7.1). Реакторите имаат реактанции $X_{P1} = X_{P2} = 1200 \Omega$. Да се пресмета:

- напонот U_2 и струјата I_2' на крајот од водот;
- струјата $I_{l/2}$ на средината од водот ($x=l/2$);
- напонот U_1 и струјата I_1' на почетокот од водот;
- струјата I_1 и моќноста Q_{v0} на почетокот од водот;



Слика 1.7.1

$$a) \underline{I}_2' = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot jX_p};$$

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

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j\sqrt{3}Z_C \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot jX_p} \sin \beta l;$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left(\cos \beta l + \frac{Z_C}{X_p} \sin \beta l \right);$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\cos \beta l + \frac{Z_C}{X_p} \sin \beta l} = \frac{400}{\cos 30^\circ + \frac{300}{1200} \sin 30^\circ} = 403,622 \text{ kV};$$

$$\underline{I}_2' = \frac{403,622}{\sqrt{3} \cdot j1200} = -j0,194 \text{ kA}.$$

$$б) \underline{I}_{l/2} = \underline{I}_2' \cos \beta \frac{l}{2} + j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}Z_C} \sin \beta \frac{l}{2} = -j0,194 \cdot \cos 15^\circ + j \frac{403,622}{\sqrt{3} \cdot 300} \cdot \sin 15^\circ = j0,013 \text{ kA}$$

$$в) \underline{I}_1' = \underline{I}_2' \cos \beta l + j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}Z_C} \sin \beta l = -j0,194 \cdot \cos 30^\circ + j \frac{403,622}{\sqrt{3} \cdot 300} \cdot \sin 30^\circ = j0,220 \text{ kA}$$

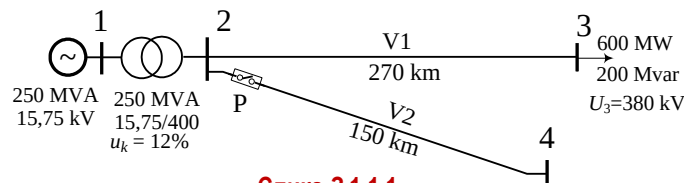
$$г) \underline{I}_1 = \underline{I}_1' + \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} \cdot jX_p} = j0,220 + \frac{400}{\sqrt{3} \cdot j1200} = j0,028 \text{ kA};$$

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3} \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot (-j0,028) = -j19,232 \text{ MVA}.$$

□ □ □

Задача 1.3. На сликата 3.1.3 е прикажана 400 kV мрежа. Водовите V1 и V2 се со идентични карактеристики $Z_{C1} = Z_{C2} = Z_C = 310 \Omega$ и во пресметките можат да се третираат како идеални. Во прикажаниот режим на работа потрошувачот приклучен во јазелот 3 зема моќност $\underline{S}_3 = (P_3 + jQ_3) = (600 + j200) \text{ MVA}$ при напон $U_3 = 380 \text{ kV}$, додека водот V2 е исклучен. Притоа генераторот G го одржува напонот на собирниците 1 на константна вредност. Да се пресмета:

- напонот U_2 како и моќноста $\underline{S}_2$ на почетокот од водот V1 со помош на преносните равенки;
- напонот U_1 како и моќноста $\underline{S}_G$ што ја произведува генераторот G во тој режим;
- за колку проценти (%) односно kV ќе порасне напонот во точката 2 ако во прикажаниот режим, со помош на прекинувачот “P”, го вклучиме и водот V2 кој е неоптоварен. Колкава реактивна моќност Q_{V20} ќе генерира овој вод во тој случај. Колкава ќе биде моќноста $\underline{S}_G$ што ја произведува генераторот G во овој режим.



Слика 3.1.1.1

□ □ □

Задача 1.4. 400 kV преносен вод, долг $l = 200$ km, е изведен на портални столбови (хоризонтален распоред на фазните спроводници) со $n = 3$ спроводници по фаза. Спроводниците во снопот се јажиња $Al/\wedge 490/65$ поставени во темињата на рамностран триаголник со страна $a = 40$ cm. Растојанието меѓу секои два соседни снопа изнесува $D = 10$ m.

Напонот на почетокот од водот изнесува $U_1 = 400$ kV а на крајот од водот (точка 2) е приклучен потрошувач со моќност $\underline{S}_2 = (500+j15)$ MVA. На крајот од водот е приклучен и синхрон компензатор SK кој има задача напонот во токата 2 да го одржува на константна вредност $U_2 = 400$ kV. За дадениот режим на работа да се пресмета:

- подолжните параметри на водот r , x и b како и карактеристичната импеданција Z_c ($g = 0$).
- параметрите на приближната π -заменска шема, уточнети со помош на Кенелиевите коефициенти;
- Колкава реактивна моќност Q_{SK} ќе произведува синхронизираниот компензатор во дадениот режим на работа и колкава е моќноста $\underline{S}_1 = (P_1+jQ_1)$ на почетокот од водот. Решавањето на задачата под в) да се изведе со помош на преносните равенки, третирајќи го водот како идеален.

Податоци за јажето . Ном. пресек $490,3/63,6$ mm²; пречник: $d_p = 2r_p = 30,6$ mm.

□ □ □

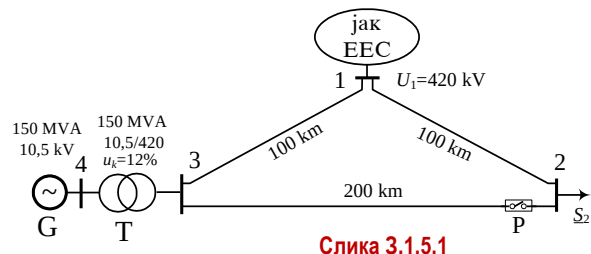
Задача 1.5. На сликата 3.1.5.1 е прикажан еден 400 kV систем. Водовите се со идентични карактеристики и имаат карактеристична импеданција $Z_c = 310 \Omega$. Напонот при собирниците 1, на кои е приклучен моќен ЕЕС со голема инсталирана моќност, се одржува на константна вредност $U_1=420$ kV = const., независно од режимот на работа. Прекинувачот Р е отворен. Генераторот G притоа произведува моќност $\underline{S}_G = (120+j0)$ MVA, а потрошувачот во јазелот 2 прима моќност $\underline{S}_2 = (250+j80)$ MVA. Да се пресметаат напоните U_2 и U_3 . Задачата да се реши приближно, третирајќи ги водовите како идеални.

Податоци за елементите од системот:

G: 150 MVA; 10,5 kV; $x_d'' = x_i = 12\%$; $x_d' = 20\%$;

T: 150 MVA; 10,5/420 kV; $u_k\% = 12\%$; спрега ΔYz ;

водови: $x = 0,34 \Omega/\text{km}$; $x_0 = 2,15 \cdot x$; $Z_c = 310 \Omega$.



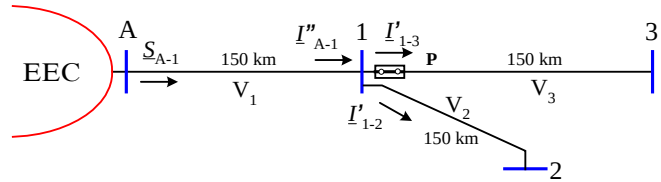
Слика 3.1.5.1

□ □ □

Пример 1.8. На сликата 1.8.1 е прикажана една 400 kV мрежа. Сите водови од мрежата имаат исти подолжни параметри и иста карактеристична импеданција $Z_c = 300 \Omega$. Во посматраниот режим на работа, со вклучен прекинувач „Р“, напонот во јазелот 3 изнесува $U_3 = 410$ kV, а системот работи во режим на празен од. Да се пресмета:

- напоните U_A , U_1 и U_2 во преостанатите јазли, како и моќноста $\underline{S}_{A-1}$ на почетокот од водот V_1 .
- напоните U_1 и U_2 како и моќноста $\underline{S}_{A-1}$ на почетокот од водот V_1 , за режим кога прекинувачот „Р“ е исклучен.

Во пресметките сите водови да се третираат како идеални. Да се претпостави дека напонот во напојната точка „А“ е константен и независен од режимот на работа на мрежата, $U_A = \text{const.}$



Слика 1.8.1

Решение:

а) Пресметка на напоните U_A , U_1 и U_2 и моќноста $\underline{S}_{A-1}$ на почетокот од водот V_1 .

$$\beta l = 0,06 \cdot 150 = 9^\circ$$

Вод 1 – 3:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_3 \cos \beta l = 410 \cos 9^\circ = 404,952 \text{ kV};$$

$$\underline{I}_{1-3}' = j \frac{\underline{U}_3}{\sqrt{3} Z_C} \sin \beta l = j \frac{410}{\sqrt{3} \cdot 300} \sin 9^\circ = j0,123 \text{ kA}.$$

Вод 1 – 2:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l \Rightarrow \underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\cos \beta l} = \underline{U}_3 = 410 \text{ kV}; \quad \underline{I}_{1-2}' = \underline{I}_{1-3}'.$$

Вод А – 1:

$$\underline{I}_{A-1}'' = \underline{I}_{1-2}' + \underline{I}_{1-3}' = j0,247 \text{ kA};$$

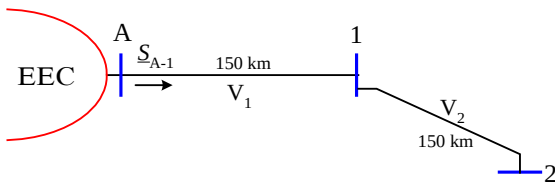
$$\underline{U}_A = \underline{U}_1 \cos \beta l + j\sqrt{3} Z_C \underline{I}_{A-1}'' \sin \beta l;$$

$$\underline{U}_A = 404,952 \cos 9^\circ + j\sqrt{3} \cdot 300 \cdot j0,247 \cdot \sin 9^\circ = 379,9 \text{ kV};$$

$$\underline{I}_{A-1}' = \underline{I}_{A-1}'' \cos \beta l + j \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_C} \sin \beta l = j0,247 \cos 9^\circ + j \frac{404,952}{\sqrt{3} \cdot 300} \sin 9^\circ = j0,366 \text{ kA};$$

$$\underline{S}_{A-1} = \sqrt{3} \underline{U}_A \underline{I}_{A-1}'^* = \sqrt{3} \cdot 379,9 \cdot (-j0,366) = -j240,7 \text{ MVA}.$$

б) Пресметка на напоните U_1 и U_2 како и моќноста $\underline{S}_{A-1}$ на почетокот од водот V_1 ,



Вод А – 2:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_2 \cos 2\beta l \Rightarrow \underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_A}{\cos 2\beta l} = \frac{379,9}{\cos 18^\circ} = 399,45 \text{ kV}.$$

Вод 1 – 2:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l = 399,5 \cos 9^\circ = 394,532 \text{ kV}.$$

$$\underline{I}_{A-1}' = j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}Z_C} \sin 2\beta l = j \frac{399,45}{\sqrt{3} \cdot 300} \sin 18^\circ = j0,238 \text{ kA};$$

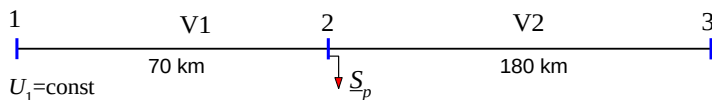
$$\underline{S}_{A-1} = \sqrt{3} \underline{U}_A \underline{I}_{A-1}'^* = \sqrt{3} \cdot 379,9 \cdot (-j0,238) = -j156,3 \text{ MVA}.$$

□ □ □

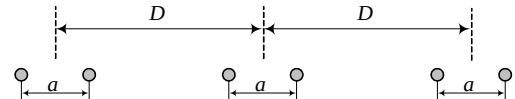
Задача 1.5. На сликата 3.1.5.1 е прикажана 400 kV преносна мрежа која се состои од два вода V1 и V2 со должини $l_1 = 70 \text{ km}$ и $l_2 = 180 \text{ km}$ – респективно. Обата вода се изведени на ист начин, според скицата од сликата 1.14.2 и имаат исти подолжни параметри и исти карактеристики: спроводници: 2xAl/Fe 490/65; $a=35 \text{ cm}$; $D = 8,4 \text{ m}$.

Во посматраниот режим водот V2 работи во режим на празен од, додека потрошувачот приклучен во јазелот 2 прима моќност $\underline{S}_p = (P_p + jQ_p) = (400 + j100) \text{ MVA}$ при напон $\underline{U}_2 = 400 \text{ kV}$. Да се пресмета:

- а) колкав ќе биде напонот $\underline{U}_3$ и реактивната моќност Q_{V2} што ја генерира водот V2. во посматраниот режим.
- б) колкави ќе бидат напонот $\underline{U}_1$ и моќноста $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$ на почетокот од водот V1.
- в) колкави ќе бидат напоните $\underline{U}_2$ и $\underline{U}_3$ како и моќноста $\underline{S}_1$ за режимот со исклучен потрошувач ($\underline{S}_p=0$) доколку се смета дека напонот во напојната точка 1 се држи на константна вредност, независно од режимот на работа на мрежата.



Слика 3.1.5.1



Слика 3.1.5.2

Напомена: Задачата под а) и под в) да се реши приближно, третирајќи ги водовите V1 и V2 како идеални. За решавање на задачата под б) водот V1 да се претстави со помош на приближната π -заменска шема.

□ □ □

Пример 1.9. Напоните на почетокот и крајот на еден идеален вод изнесуваат 400 kV, при што напонот на неговиот крај фазно заостанува за 5° . Водот е долг 600 km и има карактеристична импеданција $Z_C = 300 \Omega$. Да се пресметаат:

- привидната моќност на почетокот на водот $\underline{S}_1$;
- привидната моќност на крајот на водот $\underline{S}_2$;
- напонот на средината на водот $\underline{U}_3$;

Решение:

$$\underline{U}_1 = 400 \text{ kV}; \underline{U}_2 = 400 \cdot e^{-j5^\circ} \text{ kV}; \beta l = 0,06 \cdot 600 = 36^\circ;$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j\sqrt{3}Z_C \underline{I}_2 \sin \beta l \Rightarrow \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2 \cos \beta l}{j\sqrt{3}Z_C \sin \beta l};$$

$$\underline{I}_2 = \frac{400 - 400e^{-j5^\circ} \cdot \cos 36^\circ}{j\sqrt{3} \cdot 300 \cdot \sin 36^\circ} = (0,092 - j0,254) \text{ kA};$$

$$\underline{S}_2 = \sqrt{3} \underline{U}_2 \underline{I}_2^* = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot e^{-j5^\circ} \cdot (0,092 + j0,254) = (79,082 + j169,838) \text{ MVA}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cos \beta l + j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_C} \sin \beta l = (0,092 - j0,254) \cdot \cos 36^\circ + j \frac{400 \cdot e^{-j5^\circ}}{\sqrt{3} \cdot 300} \sin 36^\circ ;$$

$$\underline{I}_1 = (0,114 + j0,245) \text{ kA} ;$$

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3} \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot (0,114 - j0,245) = (79,082 - j169,838) \text{ MVA} ;$$

$$\underline{U}_3 = \underline{U}_2 \cos \frac{\beta l}{2} + j \sqrt{3} Z_C \underline{I}_2 \sin \frac{\beta l}{2} ;$$

$$\underline{U}_3 = 400 \cdot e^{-j5^\circ} \cdot \cos 18^\circ + j \sqrt{3} \cdot 300 \cdot (0,092 - j0,254) \cdot \sin 18^\circ = (419,785 - j18,328) \text{ kV} ;$$

$$U_3 = 420,185 \text{ kV} .$$

□ □ □

II) ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА РЕГУЛАЦИЈА НА НАПОНИ

Пример 2.1. Се посматра 220 kV надземен вод со следните параметри: $l=100$ km; $\underline{z} = (r+jx) = (0,1+j0,40) \Omega/\text{km}$; $\underline{y} = j \cdot b = j2,7 \mu\text{S}/\text{km}$ (слика 2.1.1). Напонот на почетокот од водот изнесува $U_1 = 228$ kV = const. Водот е на крајот оптоварен со потрошувач чијашто моќност изнесува $\underline{S}_p = (P_p+jQ_p) = (90+j50)$ MVA ($\cos\varphi_2=0,874$). На крајот од водот е приклучен синхрон компензатор SK кој има задача напонот на крајот да го одржува на вредност $U_2 = 215$ kV (слика 2.1.1).

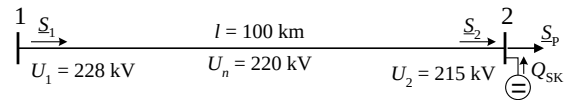
- да се пресмета реактивната моќност Q_{SK} што ја произведува компензаторот во дадениот режим.
- колкава треба да биде реактивната моќност Q_{SK} на компензаторот ако напонот на почетокот од водот е $U_1 = 220$ kV а напонот на крајот повторно треба да биде $U_2 = 215$ kV.

Решение:

Водот ги има следните параметри:

$$\underline{Z} = (R + jX) = \underline{z} \cdot l = (10 + j40) \Omega;$$

$$\underline{Y}/2 = jB/2 = j135 \mu\text{S}.$$



Слика 2.1.1

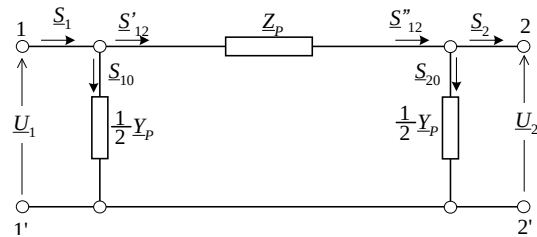
Врз основа на сликите 2.1.1 и 2.1.2 можеме да пишуваме:

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_p - jQ_{SK} \Rightarrow P_2 = P_p; Q_2 = Q_p - Q_{SK},$$

$$Q_{20} = (B/2) \cdot U_2^2 = 135 \cdot 10^{-6} \cdot 215^2 = 6.24 \text{ Mvar}$$

$$\underline{S}_{12}'' = \underline{S}_2 - jQ_{20} = [90 + j(43,76 - Q_{SK})] \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{12}'' = (P_{12}'' + jQ_{12}'').$$



Слика 2.1.2

Ќе го поставиме напонот $\underline{U}_2$ на фазната оска, т.е: $\underline{U}_2 = U_2 \cdot e^{j0} = (215 + j0)$ kV. Врз основа на сликата 2.1.2 можеме да ја напишеме напонската равенка за четворополот:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \frac{P_{12}'' \cdot R + Q_{12}'' \cdot X}{U_2} + j \frac{P_{12}'' \cdot X - Q_{12}'' \cdot R}{U_2}$$

Со замена на познатите вредности за поедините величини се добива:

$$228 \cdot e^{j\theta} = 215 + \frac{90 \cdot 10 + 40 \cdot Q_{12}''}{215} + j \frac{90 \cdot 40 - Q_{12}'' \cdot 10}{215}$$

$$\Rightarrow 228^2 = (215 + \frac{900 + 40 \cdot Q_{12}''}{215})^2 + (\frac{3600 - 10 \cdot Q_{12}''}{215})^2.$$

Со средување на последниот израз се добива една квадратна равенка по непознатата Q_{12}'' чии решенија гласат: $Q_{12}'' = 44,85$ MVA и $Q_{12}'' = -2221$ MVA. Бидејќи второто решение е нелогично останува единствено првото решение, т.е. $Q_{12}'' = 44,85$ MVA.

Сега лесно ќе се пресметаат и останатите барани величини:

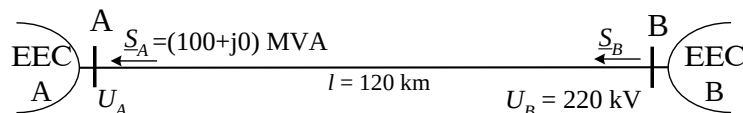
$$Q_2 = Q_{12}'' + Q_{20} = 44,85 + 6,24 = 51,09 \text{ MVA и}$$

$$Q_2 + Q_{SK} = Q_p \Rightarrow Q_{SK} = Q_p - Q_2 = 50 - 51,09 = -1,09 \text{ MVA}.$$

На напoлно ист начин се решава задачата под б) кога напoнот на почетокот од водот изнесува $U_1 = 220 \text{ kV}$. Во тој случај за одржување на напoнот на крајот на вредноста $U_2 = 215 \text{ kV}$ синхронизираниот компензатор ќе мора да дава $Q_{SK} = 42,8 \text{ Mvar}$.

□ □ □

Пример 2.2. Два електроенергетски система (ЕЕС) „А“ и „В“ (слика 2.2) се поврзани со еден 220 kV вод со параметри: $l = 120 \text{ km}$; $\underline{z} = (0,1 + j0,4) \Omega/\text{km}$; $\underline{Z} = (R + jX) = (12 + j48) \Omega$. Да се пресмета колкава е моќноста $\underline{S}_B$ што ја предава системот В на водот ако напoнот на собирниците В изнесува $U_B = 220 \text{ kV}$ а моќноста што пристигнува на собирниците А изнесува $\underline{S}_A = (100 + j0) \text{ MVA}$. Во пресметките да се занемари капацитивноста на водот ($B/2 \approx 0$).



Слика 2.2

Решение:

Нека е $\underline{U}_A = U_A \cdot e^{j0}$. Тогаш напoнот за $\underline{U}_B = U_B \cdot e^{j\theta}$ може да се напише следната равенка:

$$\underline{U}_B = U_A + \frac{P_A \cdot R + Q_A \cdot X}{U_A} + j \frac{P_A \cdot X - Q_A \cdot R}{U_A},$$

$$220 \cdot e^{j\theta} = U_A + \frac{100 \cdot 12 + 0 \cdot 48}{U_A} + j \frac{100 \cdot 48 - 0 \cdot 12}{U_A} \Rightarrow 220^2 = \left(U_A + \frac{1200}{U_A}\right)^2 + \left(\frac{4800}{U_A}\right)^2,$$

$$U_A^4 - 46000 \cdot U_A^2 + 24480000 = 0 \Rightarrow (U_A)_{1,2} = \pm 213,217 \text{ kV}; (U_A)_{3,4} = \pm 23,21 \text{ kV}.$$

Од сите 4 решенија единствено логично е првото, т.е: $U_A = 213,217 \text{ kV}$.

Сега можеме да ги пресметаме загубите $\Delta \underline{S}$ во редната гранка од водот:

$$\Delta \underline{S} = \frac{P_A^2 + Q_A^2}{U_A^2} \cdot (R + jX) = \frac{100^2 + 0^2}{213,217^2} \cdot (12 + j48) = (2,639 + j10,558) \text{ MVA}.$$

Моќноста $\underline{S}_B$ што ја испраќа системот В на системот А ќе биде:

$$\underline{S}_B = \underline{S}_A + \Delta \underline{S} = (100 + j0) + (2,639 + j10,558) = (102,639 + j10,558) \text{ MVA}.$$

□ □ □

Пример 2.3. Напoнот на почетокот од еден 220 kV далекувод изнесува $U_1 = 220 \text{ kV} = \text{const.}$ додека моќноста на потрошувачот, приклучен на крајот од водот изнесува $\underline{S}_P = (P_P + jQ_P) = (110 + j80) \text{ MVA}$. На крајот од водот е инсталиран синхрон компензатор кој има задача напoнот на крајот U_2 да го одржува на константна вредност $U_2 = 210 \text{ kV}$. Да се пресмета колкава треба да биде моќноста на синхронизираниот компензатор Q_{SK} во опишаниот режим. Задачата да се реши со примена на преносните равенки. Познати се следните податоци за водот:

$$l = 200 \text{ km}; \underline{z} = (r + jx) = (0,1 + j0,4) \Omega/\text{km}; \underline{y} = jb = j2,8 \cdot 10^{-6} \text{ S/km};$$

$$\text{ch } \underline{\gamma} l = 0,978 \cdot e^{j0,35^\circ}; \underline{Z}_C \cdot \text{sh } \underline{\gamma} l = 0,9925 \cdot e^{j0,1^\circ}$$

Решение:

Струјата I_P што ќе ја влече потрошувачот во дадениот режим ќе биде:

$$\underline{U}_2 = U_2 \cdot e^{j0} = 210 \text{ kV};$$

$$I_P = \frac{S_P^*}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_2} = \frac{100 - j80}{\sqrt{3} \cdot 210} = (0,30243 - j0,21994) = 0,37395 \cdot e^{-j36,03^\circ} \text{ kA}$$

Струјата I_2 на крајот од водот ќе биде збир од струјата на потрошувачот I_P и струјата на синхронизираниот компензатор $I_{SK} = jI_{SK}$, т.е.

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_P + jI_{SK} = 0,32043 + j(I_{SK} - 0,21994).$$

Врз основа на преносните равенки пишуваме:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cosh \gamma l + \sqrt{3} \cdot \underline{I}_2 \cdot Z_C \cdot \sinh \gamma l.$$

Со замена на познатите вредности, последната комплексна равенка се претвора во релација во која единствена непозната е модулот на струјата на компензаторот I_{SK} :

$$225 \cdot e^{j\theta} = 210 \cdot 0,978 \cdot e^{j0,35^\circ} + \sqrt{3} \cdot [(0,32043 + j(I_{SK} - 0,21994))] \cdot 0,9925 \cdot e^{j0,1^\circ}.$$

По средовањето се добива:

$$I_{SK}^2 - 3,2478 \cdot I_{SK} + 0,5535 = 0 \Rightarrow I_{SK,1} = 0,180448 \text{ kA}; \quad I_{SK,2} = 3,0675 \text{ kA}.$$

Второто решение е нереално големо (му соодветствува моќност $Q_{SK} = 1116 \text{ MVA}$), па затоа се усвојува првото решение, т.е. $I_{SK} = 0,180448 \text{ kA}$. Во тој случај моќноста на компензаторот ќе биде:

$$Q_{SK} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{SK} = \sqrt{3} \cdot 210 \cdot 0,180448 = 65,635 \text{ Mvar}.$$

Значи, за да биде напонот на крајот $U_2 = 210 \text{ kV}$ компензаторот ќе треба да произведува реактивна моќност од $65,635 \text{ Mvar}$.

□ □ □

Пример 2.4. Во една трансформаторска станица за снижување на напонот е инсталиран трансформатор со следните карактеристики: $U_{n1}/U_{n2} = (110 \pm 7 \times 2\%) / 35 \text{ kV/kV}$; 40 MVA ; $u_k\% = 12\%$; $\Delta P_{Cun} = \Delta P_k = 225 \text{ kW}$. Се посматраат двата карактеристични режима во текот на денот:

- а) режим на максимално оптоварување и
- б) на минимално оптоварување.

Податоците за овие два режима се дадени во табелата 2.4.

Да се избере позицијата на регулационата преклопка во обата режима така што напонот на секундарната (СН) страна биде $36,5 \text{ kV}$ во max. режим и $35,5 \text{ kV}$ во min. режим.

Табела 2.4. Податоци за карактеристичните режими

Режим на	U_1 (kV)	P_2 (MW)	Q_2 (Mvar)	$\cos \varphi_2$	U_{2o} (kV)
max. оптоварување	110,0	30,0	22,50	0,80	36,5
min. оптоварување	116,0	9,0	6,75	0,80	35,5

Решение:

1) Параметри на трансформаторот:

$$Z_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{11}{100} \cdot \frac{110^2}{40} = 33,275 \Omega;$$

$$R_T = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} = 0,225 \cdot \frac{110^2}{40^2} = 1,7 \Omega; \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 33,23 \Omega.$$

а) Режим на максимално оптоварување.

Ќе ги процениме најнапред приближно, пресметани со номиналниот напон, загубите ΔS_T во редната гранка на трансформаторот, а потоа ќе ги пресметаме компонентите ΔU_d и ΔU_q на падот на напон:

$$\Delta S_T = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_n^2} \cdot (R_T + jX_T) = \frac{30^2 + 22,5^2}{110^2} \cdot (1,7 + j33,23) = (0,197 + j3,862) \text{ MVA};$$

$$S_1 = S_2 + \Delta S = (30 + j22,5) + 0,197 + j3,862 = (30,197 + j26,362) \text{ MVA}.$$

$$\Delta U_d = \frac{P_1 \cdot R_T + Q_1 \cdot X_T}{U_1} = \frac{30,197 \cdot 1,7 + 26,362 \cdot 33,23}{110} = 8,43 \text{ kV};$$

$$\Delta U_q = \frac{P_1 \cdot X_T - Q_1 \cdot R_T}{U_1} = \frac{30,197 \cdot 33,23 - 26,362 \cdot 1,7}{110} = 8,715 \text{ kV}.$$

$$(*) U'_2 = \sqrt{U_1^2 - \Delta U_q^2} - \Delta U_d = \sqrt{110^2 - 8,715^2} - 8,43 = 101,224 \text{ kV}.$$

Потребниот коефициент на трансформација, значи, ќе биде:

$$k_{To} = \frac{U'_2}{U_{2o}} = \frac{101,224}{36,5} = 2,7733; \quad k_{To} = k_{Tn} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_o}{100}\right);$$

$$\Rightarrow \alpha_o = \left(\frac{k_{To}}{k_{Tn}} - 1\right) \cdot 100 = \left(\frac{2,7733}{3,14286} - 1\right) \cdot 100 = -11,76\%$$

Ако со $u\%$ го означиме чекорот на регулација на трансформаторот, тогаш позицијата на преклопката $m_{\max}$ во режимот на максималното оптоварување ќе биде:

$$m_{\max} = \text{nint}(a_o / u\%) = \text{nint}(-11,76 / 2) = -6.$$

Во тој случај за коефициентот на трансформација k_T и за напонот на секундарот U_2 добиваме:

$$k_T = k_{Tn} \cdot (1 + m_{\max} \cdot u\% / 100) = 0,88 \cdot k_{Tn} = 2,76571; \quad U_2 = U'_2 / k_T = 36,6 \text{ kV}$$

б) Режим на минимално оптоварување. На сосема ист начин, за режимот на минимално оптоварување се добива:

$$U'_{2o} = 113,86 \text{ kV}; \quad k_{To} = \frac{U'_{2o}}{U_{2o}} = \frac{113,86}{35,5} = 3,20732 \Rightarrow \alpha_o = 2,05\% \Rightarrow m_{\min} = 1.$$

Според тоа, за коефициентот на трансформација k_T и за напонот на секундарот U_2 во мин. режим добиваме:

$$k_T = k_{Tn} \cdot (1 + m_{\min} \cdot u\% / 100) = 1,02 \cdot k_{Tn} = 3,20571; \quad U_2 = U'_2 / k_T = 35,52 \text{ kV}.$$

(*) **Забелешка.** Вака добиената вредност за напонот U'_2 е сепак приближна, но доволно блиску до својата точна вредност, која изнесува $U'_2 = 101,224 \text{ kV}$ ($\Delta P_T = 0,233 \text{ MW}$ и $\Delta Q_T = 4,561 \text{ Mvar}$).

□ □ □

Пример 2.5. Познати се следните податоци за еден регулационен трансформатор:

$$(110 \pm 12 \times 1,25\%) / 10,5 \text{ kV/kV}; 20 \text{ MVA}; u_k\% = 12\%; X_T/R_T = 25$$

Трансформаторот работи со променлив товар $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$ во текот на целиот ден. Напонот U_1 на високонапонската страна (ВН) од трансформаторот исто така се менува во текот на денот. Во задачата ќе се посматраат два карактеристични режима: режимот на максимално и режимот на минимално оптоварување. За нив е познато следното:

- режим на максимално оптоварување: $U_1 = 108 \text{ kV}; P_2 = 15 \text{ MW}; Q_2 = 10 \text{ Mvar};$
- режим на минимално оптоварување: $U_1 = 113 \text{ kV}; P_2 = 9 \text{ MW}; Q_2 = 6 \text{ Mvar}.$

Трансформаторот е снабден со автоматски регулатор на напонот (АРН) кој има задача напонот на нговиот секундар да го одржува на вредноста $U_{20} = 10,5 \text{ kV}$ преку целиот ден. За режимот на максимално оптоварување да се пресметаат:

- а) позицијата на која АРН ќе ја постави регулационата преклопка;
 - б) преносниот однос k_T на трансформаторот во тој случај како и напонот на секундарот U_2 .
- Истите пресметки да се повторат и за режимот на минимално оптоварување.

Решение

$$\text{а) } Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{12}{100} \cdot \frac{110^2}{20} = 72,6 \, \Omega; \quad X_T = 25R_T; \quad Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} = \sqrt{1^2 + 25^2} = 25,02 \cdot R_T$$

$$R_T = \frac{72,6}{25,02} = 2,902 \, \Omega; \quad X_T = 25 \cdot 2,902 = 72,542 \, \Omega$$

$$\Delta S_T = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_n^2} \cdot (R_T + jX_T) = \frac{15^2 + 10^2}{110^2} \cdot (2,902 + j72,542) = (0,078 + j1,948) \text{ MVA}$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P_T = 15,078 \text{ MW}; \quad Q_1 = Q_2 + \Delta Q_T = 11,948 \text{ Mvar}$$

$$\Delta U_d = \frac{P_1 R_T + Q_1 X_T}{U_1} = \frac{15,078 \cdot 2,902 + 11,948 \cdot 72,542}{108} = 8,430 \text{ kV}$$

$$\Delta U_q = \frac{P_1 X_T - Q_1 R_T}{U_1} = \frac{15,078 \cdot 72,542 - 11,948 \cdot 2,902}{108} = 10,225 \text{ kV}$$

$$U_2' = \sqrt{U_1^2 - \Delta U_q^2} - \Delta U_d = \sqrt{108^2 - 10,225^2} - 8,430 = 99,085 \text{ kV}$$

$$k_T = \frac{U_2'}{U_2} = \frac{99,085}{10,5} = 9,437; \quad k_{Tn} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{110}{10,5} = 10,476;$$

$$\alpha = \left(\frac{k_T}{k_{Tn}} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{9,437}{10,476} - 1 \right) \cdot 100 = -9,92 \%; \quad m = \frac{-9,92}{1,25} = -7,94; \quad m = -8;$$

$$k_T = 10,476 \cdot \left(1 + \frac{-8 \cdot 1,25}{100} \right) = 9,428$$

$$U_2 = \frac{U_2'}{k_T} = \frac{99,085}{9,428} = 10,510 \text{ kV}$$

□ □ □

Пример 2.6. Регулационен трансформатор Т напојува среднонапонска (СН) мрежа, според шемата од сликата 2.6. Регулаторот на напон има задача напонот на СН собирници да го одржува на константна вредност $U_2 = 10,5 \text{ kV}$. Во посматраниот режим вкупното оптоварување на потрошувачите на СН страна изнесува $\underline{S} = 25 \text{ MW}$, $\cos\varphi = 0,9$, додека напонот на ВН собирници изнесува $U_1 = 108 \text{ kV}$. Да се пресмета:

- со кој преносен однос ќе работи трансформаторот Т во прикажаниот режим.
- за колкави процентуални износи $\Delta U_3\%$ и $\Delta U_4\%$ ќе се покачат напоните при потрошувачите $\underline{S}_3$ и $\underline{S}_4$ доколку во јазелот 4 се инсталира кондензаторска батерија со моќност $Q_{KB4} = 300 \text{ kvar}$.
- за колкави процентуални износи $\Delta U'_3\%$ и $\Delta U'_4\%$ ќе се покачат напоните при потрошувачите $\underline{S}_3$ и $\underline{S}_4$ доколку наместо да се инсталира во јазелот 4 една батерија од 300 kvar , истовремено ќе се инсталираат две кондензаторски батерии од по 150 kvar во јазлите 3 и 4.

Бројни податоци:

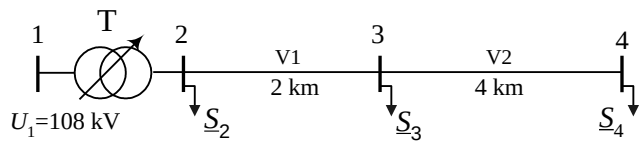
Трансформатор Т:

31,5 MVA (110+15x1%)/10,5 kV/kV

$u_k\% = 12\%$, $\Delta P_{Cun} = 160 \text{ kW}$

Вод V1: $L_1 = 2 \text{ km}$ $\underline{z}_1 = (0,6 + j0,35) \Omega/\text{km}$.

Вод V2: $L_2 = 4 \text{ km}$ $\underline{z}_2 = (0,6 + j0,35) \Omega/\text{km}$.



Слика 2.6

Решение

$$a) \quad R_T = \Delta P_{Cun} \frac{U_n^2}{S_n^2} = 0,16 \cdot \frac{110^2}{31,5^2} = 1,951 \Omega; \quad Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{12}{100} \cdot \frac{110^2}{31,5} = 46,095 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 46,054 \Omega$$

$$\Delta S_T = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_n^2} \cdot (R_T + jX_T) = \frac{25^2 + 12,108^2}{110^2} \cdot (1,951 + j46,054) = (0,124 + j2,937) \text{ MVA}$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P_T = 25,124 \text{ MW}; \quad Q_1 = Q_2 + \Delta Q_T = 15,045 \text{ Mvar}$$

$$\Delta U_d = \frac{P_1 R_T + Q_1 X_T}{U_1} = \frac{25,124 \cdot 1,951 + 15,045 \cdot 46,054}{108} = 6,869 \text{ kV}$$

$$\Delta U_q = \frac{P_1 X_T - Q_1 R_T}{U_1} = \frac{25,124 \cdot 46,054 - 15,045 \cdot 1,951}{108} = 10,442 \text{ kV}$$

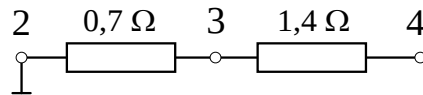
$$U_2' = \sqrt{U_1^2 - \Delta U_q^2} - \Delta U_d = \sqrt{108^2 - 10,442^2} - 6,869 = 100,625 \text{ kV}$$

$$k_T = \frac{U_2'}{U_2} = \frac{100,625}{10,5} = 9,583; \quad k_{Tn} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{110}{10,5} = 10,476;$$

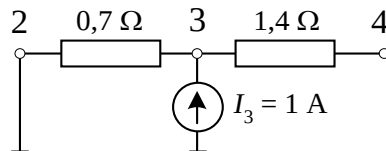
$$\alpha = \left(\frac{k_T}{k_{Tn}} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{9,583}{10,476} - 1 \right) \cdot 100 = -8,52 \%;$$

$$m = -9; \quad k_T = 10,476 \cdot \left(1 + \frac{-9 \cdot 1}{100} \right) = 9,533$$

$$U_2 = \frac{U_2'}{k_T} = \frac{100,625}{9,533} = 10,555 \text{ kV}$$

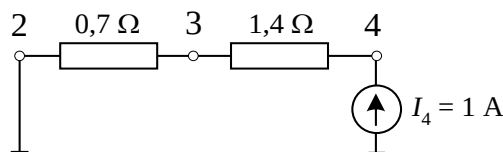


I начин на одредување на елементите на матрицата на реактанции:



За да ги одредиме влезната реактанција во јазелот 3 и меѓусебната помеѓу јазелот 4 и 3, во јазелот 3 поставуваме струен генератор со струја $I_3 = 1\text{ A}$. Во тој случај, реактанциите X_{33} и X_{43} се еднакви на напоните на јазлите 3 и 4 поделени со струјата I_3 . За колото од претходната слика тие напони изнесуваат: $U_3 = 0,7\text{ V}$ и $U_4 = 0,7\text{ V}$. Според тоа за бараните реактанции можеме да напишеме:

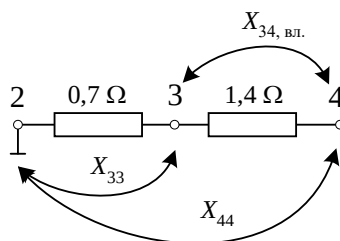
$$X_{33} = \frac{U_3}{I_3} = \frac{0,7}{1} = 0,7\ \Omega \text{ и } X_{43} = \frac{U_4}{I_3} = \frac{0,7}{1} = 0,7\ \Omega.$$



За да ги одредиме влезната реактанција во јазелот 4 и меѓусебната помеѓу јазелот 3 и 4, во јазелот 4 поставуваме струен генератор со струја $I_4 = 1\text{ A}$. Во тој случај, реактанциите X_{44} и X_{34} се еднакви на напоните на јазлите 4 и 3 поделени со струјата I_4 . За колото од претходната слика тие напони изнесуваат: $U_3 = 0,7\text{ V}$ и $U_4 = 2,1\text{ V}$. Според тоа за бараните реактанции можеме да напишеме:

$$X_{44} = \frac{U_4}{I_4} = \frac{2,1}{1} = 2,1\ \Omega \text{ и } X_{34} = \frac{U_3}{I_4} = \frac{0,7}{1} = 0,7\ \Omega.$$

II начин на одредување на елементите на матрицата на реактанции:



Влезните реактанции во јазлите 3 и 4 можеме да ги одредиме како еквивалентни реактанции на колото мерени од јазлите 3 и 4 спрема земјата како што тоа е прикажано на сликата. За нив важи:

$$X_{33} = 0,7\ \Omega \text{ и } X_{44} = 0,7 + 1,4 = 2,1\ \Omega.$$

Меѓусебните реактанции се пресметуваат со следниот израз:

$$X_{34} = X_{43} = \frac{X_{33} + X_{44} - X_{34, \text{вл.}}}{2},$$

каде што $X_{34, \text{вл.}}$ е еквивалентна влезна реактанција помеѓу јазлите 3 и 4, која во овој случај изнесува $X_{34, \text{вл.}} = 1,4 \, \Omega$.

Според тоа за меѓусебните реактанции имаме:

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

III начин на одредување на елементите на матрицата на реактанции:

Матрицата на адмитанции на јазлите е:

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

Матрицата на реактанции се добива како инверзна матрица од матрицата Y . Иверзна матрица на матрица од втор ред се добива така што дијагоналните елементи си ги менуваат местата, а вондијагоналните елементи си го менуваат знакот. Потоа така трансформираната матрица се дели со детерминантата од оргиналната матрица која во овој случај е:

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

$$X = \frac{1}{1,02} \cdot \begin{bmatrix} 0,714 & 0,714 \\ 0,714 & 2,143 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,7 & 0,7 \\ 0,7 & 2,1 \end{bmatrix}$$

б) $Q_{C3} = 0$; $Q_{C4} = 300 \text{ kvar}$

$$\Delta U_3 = X_{34} \cdot \frac{Q_{C4}}{U_4} = 0,7 \cdot \frac{300}{10} = 21 \text{ V} \quad 0,21 \%$$

$$\Delta U_4 = X_{44} \cdot \frac{Q_{C4}}{U_4} = 2,1 \cdot \frac{300}{10} = 63 \text{ V} \quad 0,63 \%$$

в) $Q_{C3} = 150 \text{ kvar}$; $Q_{C4} = 150 \text{ kvar}$

$$\Delta U_3 = X_{33} \cdot \frac{Q_{C3}}{U_3} + X_{34} \cdot \frac{Q_{C4}}{U_4} = 0,7 \cdot \frac{150}{10} + 0,7 \cdot \frac{150}{10} = 21 \text{ V} \quad 0,21 \%$$

$$\Delta U_4 = X_{43} \cdot \frac{Q_{C3}}{U_3} + X_{44} \cdot \frac{Q_{C4}}{U_4} = 0,7 \cdot \frac{150}{10} + 2,1 \cdot \frac{150}{10} = 42 \text{ V} \quad 0,42 \%$$

□ □ □

Пример 2.7. На сликата 2.7 е прикажана 35 kV мрежа преку која се напојуваат два потрошувачи $\underline{S}_1 = (6+j3) \text{ MVA}$ и $\underline{S}_2 = (4+j3) \text{ MVA}$. Познати се слените податоци за елементите од мрежата:

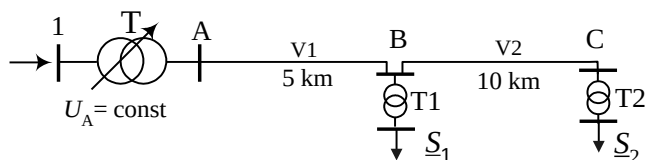
$$V1: \underline{z} = (0,32+j0,40) \, \Omega/\text{km}; l_1 = 5 \text{ km}; \quad V2: \underline{z} = (0,32+j0,40) \, \Omega/\text{km}; l_2 = 10 \text{ km};$$

$$T1: 8 \text{ MVA}; 35/10,5 \text{ kV/kV}; u_k\% = 7\%; \Delta P_{Cun} = 54 \text{ kW}; \quad T2 = T1.$$

За да се намалат загубите на моќност и енергија во мрежата, предвидено е вградување на кондензаторски батерии (КБ) кај секој од потрошувачите. Потребно е да се определи:

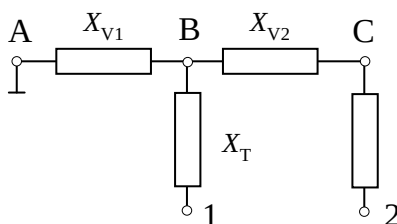
а) за колку % ќе се зголемат напоните U_1 и U_2 ако се инсталира КБ од 3 Мвар при потрошувачот 1.

б) за колку % ќе се зголемат напоните U_1 и U_2 ако при обата потрошувача се инсталираат КБ од по 3 Мвар.



Слика 2.7

Решение

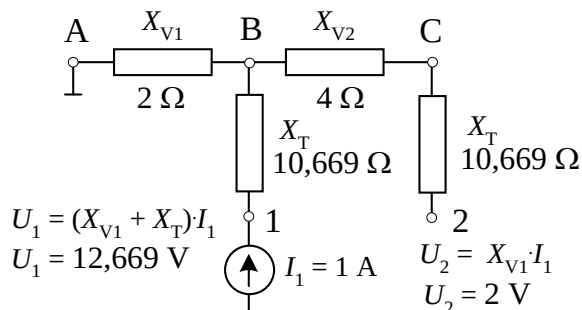


$$X_{v1} = 0,4 \cdot 5 = 2 \, \Omega; \quad X_{v2} = 0,4 \cdot 10 = 4 \, \Omega$$

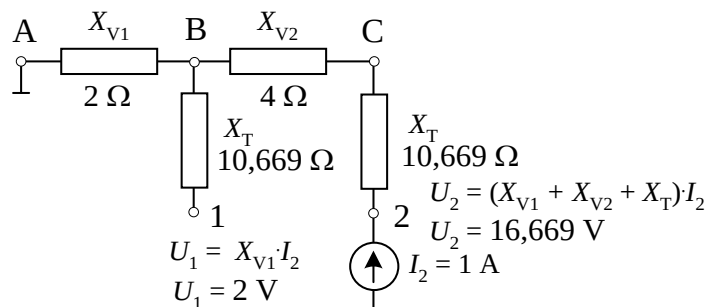
$$R_T = \Delta P_{\text{Cun}} \frac{U_n^2}{S_n^2} = 0,054 \cdot \frac{35^2}{8^2} = 1,034 \, \Omega; \quad Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{7}{100} \cdot \frac{35^2}{8} = 10,719 \, \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 10,669 \, \Omega$$

I начин на одредување на елементите на матрицата на реактанции:

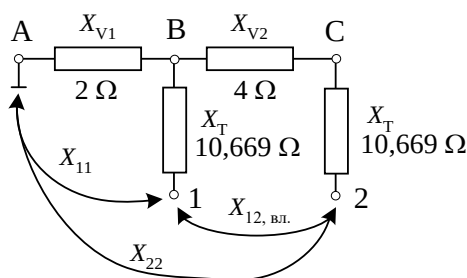


$$X_{11} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{12,669}{1} = 12,669 \, \Omega \text{ и } X_{21} = \frac{U_2}{I_1} = \frac{2}{1} = 2 \, \Omega.$$



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

II начин на одредување на елементите на матрицата на реактанции:

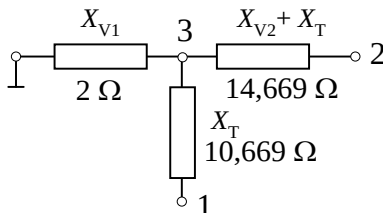


$$X_{11} = 2 + 10,669 = 12,669 \Omega; X_{22} = 2 + 4 + 10,669 = 16,669 \Omega$$

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

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

III начин на одредување на елементите на матрицата на реактанции:



$$Y_{1,1} := \frac{1}{X_T} \quad Y_{1,3} := \frac{-1}{X_T}$$

$$Y_{2,2} := \frac{1}{X_T + X_{V2}} \quad Y_{2,3} := \frac{-1}{X_T + X_{V2}}$$

$$Y_{3,3} := \frac{1}{X_T} + \frac{1}{X_{V1}} + \frac{1}{X_T + X_{V2}} \quad Y_{3,1} := \frac{-1}{X_T} \quad Y_{3,2} := \frac{-1}{X_T + X_{V2}}$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0.094 & 0 & -0.094 \\ 0 & 0.068 & -0.068 \\ -0.094 & -0.068 & 0.662 \end{pmatrix} \text{ S} \quad Z := Y^{-1} \quad Z = \begin{pmatrix} 12.669 & 2 & 2 \\ 2 & 16.669 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \end{pmatrix} \Omega$$

или

$$Y_{12} = \begin{pmatrix} 0.094 & 0 \\ 0 & 0.068 \end{pmatrix} \text{ S} \quad Y_{\text{kolona}} = \begin{pmatrix} -0.094 \\ -0.068 \end{pmatrix} \text{ S} \quad Y_{\text{redica}} = (-0.094 \ -0.068) \text{ S}$$

$$Y_{12} := Y_{12} - \frac{Y_{\text{kolona}} Y_{\text{redica}}}{Y_{3,3}} \quad Y_{12} = \begin{pmatrix} 0.08 & -9.653 \times 10^{-3} \\ -9.653 \times 10^{-3} & 0.061 \end{pmatrix} \text{ S}$$

$$Z_{12} := Y_{12}^{-1} \quad Z_{12} = \begin{pmatrix} 12.669 & 2 \\ 2 & 16.669 \end{pmatrix} \Omega$$

а) $Q_1 = 3 \text{ Mvar}; Q_2 = 0$

$$\Delta U_1' = X_{11} \cdot \frac{Q_1}{U_n} = 12,669 \cdot \frac{3}{35} = 1,086 \text{ kV}; \Delta U_1 = \Delta U_1' \cdot \frac{10,5}{35} = 0,326 \text{ kV}$$

$$\Delta U_2 = X_{21} \cdot \frac{Q_1}{U_n} = 2 \cdot \frac{3}{35} = 0,171 \text{ kV}; \Delta U_2 = \Delta U_2' \cdot \frac{10,5}{35} = 0,051 \text{ kV}$$

в) $Q_1 = 3 \text{ Mvar}; Q_2 = 3 \text{ Mvar}$

$$\Delta U_1' = X_{11} \cdot \frac{Q_1}{U_n} + X_{12} \cdot \frac{Q_2}{U_n} = 12,669 \cdot \frac{3}{35} + 2 \cdot \frac{3}{35} = 1,257 \text{ kV}; \Delta U_1 = \Delta U_1' \cdot \frac{10,5}{35} = 0,377 \text{ kV}$$

$$\Delta U_2' = X_{21} \cdot \frac{Q_1}{U_n} + X_{22} \cdot \frac{Q_2}{U_n} = 2 \cdot \frac{3}{35} + 16,669 \cdot \frac{3}{35} = 1,600 \text{ kV}; \Delta U_1 = \Delta U_1' \cdot \frac{10,5}{35} = 0,480 \text{ kV}$$

□ □ □

Пример 2.8. Се посматра 220 kV надземен вод со следните параметри: $l=100 \text{ km}$; $\underline{z} = (r+jx) = (0,1+j0,40) \Omega/\text{km}$; $\underline{y} = j \cdot b = j2,7 \mu\text{S}/\text{km}$ (слика 2.1.1 од Примерот 2.1). Напонот на почетокот од водот изнесува $U_1 = 220 \text{ kV} = \text{const}$. Водот е на крајот оптоварен со потрошувач чијашто моќност изнесува $\underline{S}_P = (P_P + jQ_P) = (90 + j50) \text{ MVA}$ ($\cos\varphi_2=0,874$). На крајот од водот е приклучен синхрон компензатор SK кој има задача напонот на крајот да го одржува на вредност $U_2 = 215 \text{ kV}$. Колкава треба да биде реактивната моќност Q_{SK} на компензаторот ако напонот на почетокот од водот е $U_1 = 220 \text{ kV}$ а напонот на крајот повторно треба да биде $U_2 = 215 \text{ kV}$.

Решение:

Во овој случај проблемот од примерот 2.1 б ќе го решиме со итеративна постапка. Водот ги има следните параметри:

$$\underline{Z} = (R + jX) = \underline{z} \cdot l = (10 + j40) \Omega; \underline{Y}/2 = jB/2 = j135 \mu\text{S}.$$

Врз основа на сликата 2.8 можеме да пишуваме:

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_P - jQ_{SK} \Rightarrow P_2 = P_P; Q_2 = Q_P - Q_{SK},$$

$$Q_{20} = -(B/2) \cdot U_2^2 = 135 \cdot 10^{-6} \cdot 215^2 = 6,24 \text{ Mvar}$$

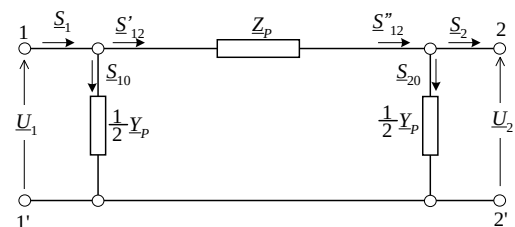
$$\underline{S}_{12}'' = \underline{S}_2 - jQ_{20} = [90 + j(43,76 - Q_{SK})] \text{ MVA} = (P_{12}'' + jQ_{12}'')$$

Ќе го поставиме напонот $\underline{U}_2$ на фазната оска, т.е: $\underline{U}_2 = U_2 \cdot e^{j0} = (215 + j0) \text{ kV}$. Врз основа на сликата 2.8.2 можеме да ја напишеме напонската равенка за четворополот:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta U_d + j\Delta U_q = \frac{P_{12}'' \cdot R + Q_{12}'' \cdot X}{U_2} + j \frac{P_{12}'' \cdot X - Q_{12}'' \cdot R}{U_2} \Rightarrow \Delta U_d = \sqrt{U_1^2 - \Delta U_q^2} - U_2.$$

Во последната комплексна равенка единствена непозната е пренесуваната реактивна моќност Q_{12}'' . За нејзиното определување ќе примениме итеративна постапка, но за тоа ќе биде потребно да имаме некакво почетно решение. Почетното решение ќе го добиеме врз основа на следната приближна напонска равенка:

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_d = U_2 + \frac{P_{12}'' \cdot R + Q_{12}'' \cdot X}{U_2} \Rightarrow Q_{12}'' = \frac{(U_1 - U_2) \cdot U_2 - P_{12}'' \cdot R}{X} = 4,375 \text{ Mvar}.$$



Слика 2.8.1

Со оваа вредност на најнапред ја пресметуваме уточнетата вредност на попречната компонента ΔU_q , а потоа, врз основа на напонската равенка, пресметка на подолжната компонента на падот на напон ΔU_d :

$$\Delta U_q = \frac{90 \cdot 40 - 4,375 \cdot 10}{215} = 16,541 \text{ kV}; \quad \Delta U_d = \sqrt{U_1^2 - \Delta U_q^2} - U_2 = 4,377 \text{ kV};$$

$$Q_{12}'' = \frac{U_2 \cdot \Delta U_d - P_{12}'' \cdot R}{X} = 1,028 \text{ Mvar}$$

После само уште едно уточнување го добиваме практично конечниот резултат: $Q_{12}'' = 0,96 \text{ Mvar}$.

Според тоа бараната моќност на СК ќе биде: $Q_{SK} = Q_P - Q_{20} - Q_{12}'' = 42,8 \text{ Mvar}$.

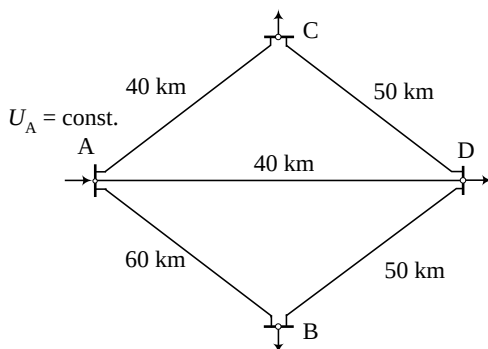
□ □ □

Пример 2.9 На сликата 2.9.1 е прикажана 110 kV преносна мрежа направена од надземни водови со надолжна реактанција $x = 0,4 \Omega/\text{km}$. Должините на водовите се дадени на самата слика, а моќностите на потрошувачите се дадени во табелата 2.9.1. Во јазелот А е приклучен генератор кој го контролира напонот и го држи на константна вредност од $U_A = 110 \text{ kV}$. Да се определи:

- матрицата на импеданции на краткоспоената мрежа,
- за колку ќе се променат напоните на јазлите во мрежата ако во јазелот D се инјектира реактивна моќност со вредност 10 Mvar?
- колкави реактивни моќности треба да се инјектираат во јазлите B, C и D за да напоните во тие три јазли се зголемат за по 1 kV?

Табела 2.9.1

Јазел	P (MW)	Q (Mvar)
B	40	20
C	30	15
D	50	25



Слика 2.9.1

Решение:

И начин

Задачата ќе ја решиме со примена на Mathcad. Матрицата на реактанции на кратоспоената мрежа ќе ја добиеме како инверзна матрица на матрицата на адмитанции на јазлите: $\underline{Z} = \underline{Y}^{-1}$. Како што е познато за елементите на матрицата на адмитанции на јазлите $\underline{Y}$ важат следните правила:

- дијагоналниот елемент во редицата i е еднаков на сумата на адмитанциите на сите гранки кои го содржат јазелот i ;

- вондијагоналниот елемент во редицата i и колоната j е еднаков на негативната сума на адмитанциите на сите гранки кои едновременно ги содржат јазлите i и j (директни врски меѓу јазлите i и j).

Ако јазлите A, B, C и D ги означиме со индексите 1, 2, 3 и 4 соодветно, во Mathcad имаме:

$$z := (0 + j \cdot 0.4) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\text{IP} := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \text{IQ} := \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix} \quad \text{LGR} := \begin{pmatrix} 60 \\ 40 \\ 40 \\ 50 \\ 50 \end{pmatrix} \text{ km} \quad \text{ZGR} := z \cdot \text{LGR} \quad \text{ZGR} = \begin{pmatrix} 24j \\ 16j \\ 16j \\ 20j \\ 20j \end{pmatrix} \Omega$$

$$\text{ORIGIN} := 1$$

$$n := \max(\text{IP}, \text{IQ}) \quad m := \text{rows}(\text{IP}) \quad i := 1..n \quad j := 1..n \quad Y_{i,j} := 0$$

$$n = 4 \quad m = 5$$

$$k := 1..m$$

$$Y_{\text{IP}_k, \text{IP}_k} := Y_{\text{IP}_k, \text{IP}_k} + \frac{1}{\text{ZGR}_k} \quad Y_{\text{IQ}_k, \text{IQ}_k} := Y_{\text{IQ}_k, \text{IQ}_k} + \frac{1}{\text{ZGR}_k}$$

$$Y_{\text{IP}_k, \text{IQ}_k} := Y_{\text{IP}_k, \text{IQ}_k} - \frac{1}{\text{ZGR}_k} \quad Y_{\text{IQ}_k, \text{IP}_k} := Y_{\text{IQ}_k, \text{IP}_k} - \frac{1}{\text{ZGR}_k}$$

Бидејќи напонот во јазелот A е константен, мрежата во тој јазел треба да биде краткоспоена со референтниот јазел (земјата). Тоа во Mathcad ќе го симулираме со додавање на импеданција од $j10^{-6} \Omega$ (адмитанција од $-j10^{-6} \text{ S}$) во јазелот 1:

$$Y_{1,1} := -j \cdot 10^6 \text{ S}$$

Како резултат за матрицата на адмитанции на јазлите добиваме:

$$Y = \begin{pmatrix} -j \times 10^6 & 0.042j & 0.063j & 0.063j \\ 0.042j & -0.092j & 0 & 0.05j \\ 0.063j & 0 & -0.113j & 0.05j \\ 0.063j & 0.05j & 0.05j & -0.163j \end{pmatrix} \text{ S}$$

а за матрицата на импеданции на јазлите:

$$Z = \begin{pmatrix} 0j & 0j & 0j & 0j \\ 0j & 13.542j & 2.145j & 4.827j \\ 0j & 2.145j & 10.637j & 3.933j \\ 0j & 4.827j & 3.933j & 8.849j \end{pmatrix} \Omega$$

Ако со векорот Q ги означиме инјекциите на реактивни моќности во јазлите, во случајот кога само во јазелот D инјектираме 10 Mvar тој вектор изнесува:

$$Q := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 10 \end{pmatrix} \text{ Mvar}$$

Прирастите на напоните изнесуваат:

$$U_n := 110 \text{ kV} \quad \Delta U := Z \cdot \frac{Q}{U_n} \quad \Delta U = \begin{pmatrix} 0j \\ 0.439j \\ 0.358j \\ 0.804j \end{pmatrix} \text{ kV}$$

За да ги одредиме инјекциите во јазлите В, С и D за да напоните во тие јазли се зголемат за по 1 kV ја формираме матрицата на импеданции на јазлите В, С и D која е всушност подматрица од матрицата $\underline{Z}$:

$$Z_{BCD} := \text{submatrix}(Z, 2, 4, 2, 4)$$

Со што добиваме:

$$Z_{BCD} = \begin{pmatrix} 13.542j & 2.145j & 4.827j \\ 2.145j & 10.637j & 3.933j \\ 4.827j & 3.933j & 8.849j \end{pmatrix} \Omega$$

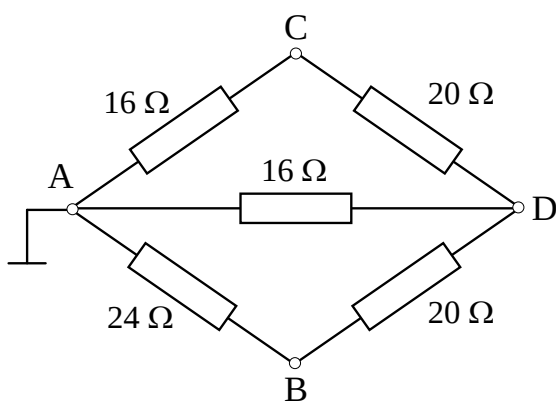
Посакуваните прирасти на напоните се:

$$\Delta U := \begin{pmatrix} j \cdot 1 \\ j \cdot 1 \\ j \cdot 1 \end{pmatrix} \text{ kV}$$

Со што за бараните инјекции на реактивни моќности добиваме:

$$Q := Z_{BCD}^{-1} \cdot \Delta U \cdot U_n \quad Q = \begin{pmatrix} 4.583 \\ 6.875 \\ 6.875 \end{pmatrix} \text{ Mvar}$$

II начин



$$X_{DD} = 16 \Pi 36 \Pi 44 = \frac{1}{\frac{1}{16} + \frac{1}{36} + \frac{1}{44}} = 8,849 \Omega$$

$$X_{CC} = 16 \Pi (20 + 16 \Pi 44) = 16 \Pi \left(20 + \frac{16 \cdot 44}{16 + 44} \right)$$

$$X_{CC} = 16 \Pi (20 + 11,733) = 16 \Pi 31,733 = 10,637 \Omega$$

$$X_{CC, \text{вл.}} = 20 \Pi (16 + 16 \Pi 44) = 20 \Pi (16 + 11,733)$$

$$X_{CC, \text{вл.}} = 20 \Pi 27,733 = 11,620 \Omega$$

$$X_{CD} = \frac{X_{CC} + X_{DD} - X_{CD, \text{вл.}}}{2}$$

$$X_{CD} = \frac{10,637 + 8,849 - 11,620}{2} = 3,933 \Omega$$

$$X_{BB} = 24 \Pi (20 + 16 \Pi 36) = 24 \Pi (20 + 11,077) = 24 \Pi 31,077 = 13,542 \Omega$$

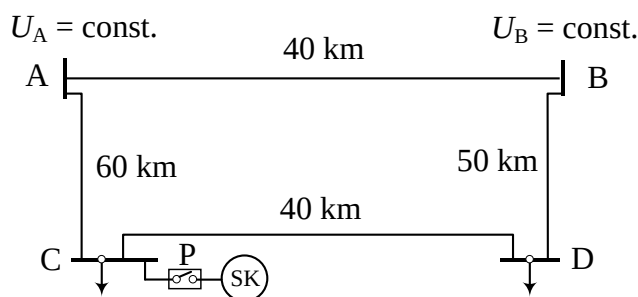
$$X_{BD, \text{вл.}} = 20 \Pi (24 + 16 \Pi 36) = 20 \Pi (24 + 11,077) = 20 \Pi 35,077 = 12,737 \Omega$$

$$X_{BD} = \frac{X_{BB} + X_{DD} - X_{BD, \text{вл.}}}{2} = \frac{13,542 + 8,849 - 12,737}{2} = 4,827 \Omega$$

□ □ □

Задача 2.10. На сликата 2.10.1 е прикажана 110 kV преносна мрежа направена од надземни водови со надолжна реактанција $x = 0,4 \Omega/\text{km}$. Должините на водовите се дадени на самата слика, а моќностите на потрошувачите се дадени во табелата 2.10.1. Во мрежата постои можност за приклучување на синхрон компензатор преку прекинувачот P во јазелот C. Напоните на јазлите A и B се одржуваат на константни вредности кои изнесуваат $U_A = U_B = 110 \text{ kV}$. Во случај кога прекинувачот P е отворен напоните на јазлите C и D изнесуваат $U_C = 103,918 \text{ kV}$ и $U_D = 103,682 \text{ kV}$. Со затворање на прекинувачот P синхронизираниот компензатор инјектира реактивна моќност во мрежата, така што напонот на јазелот C се покачува на вредност $U_C = 110 \text{ kV}$. Да се определи:

- реактивната моќност на синхронизираниот компензатор,
- напонот на јазелот D.

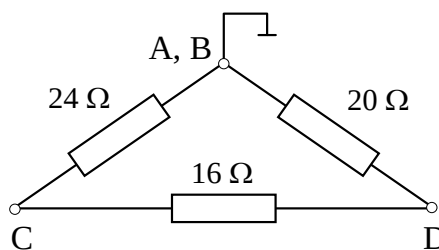
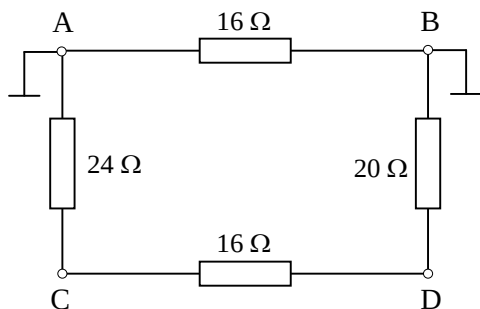


Слика 2.10.1

Табела 2.10.1

Јазел	P (MW)	Q (Mvar)
C	40	20
D	80	40

Решение:



$$X_{DD} = 20 \Pi (24 + 16) = \frac{20 \cdot 40}{20 + 40} = 13,333 \, \Omega ;$$

$$X_{CC} = 24 \Pi (20 + 16) = \frac{24 \cdot 36}{24 + 36} = 14,4 \, \Omega ;$$

$$X_{CD, \text{вл.}} = 16 \Pi (24 + 20) = \frac{16 \cdot 44}{16 + 44} = 11,733 \, \Omega ;$$

$$X_{CD} = \frac{X_{CC} + X_{DD} - X_{CD, \text{вл.}}}{2} = \frac{13,333 + 14,4 - 11,733}{2} = 8 \, \Omega ;$$

$$\Delta U_C = X_{CC} \frac{Q_C}{U_C} \Rightarrow Q_C = \frac{\Delta U_C \cdot U_C}{X_{CC}} = \frac{(110 - 103,918) \cdot 103,918}{14,4} = 43,891 \, \text{MVA} ;$$

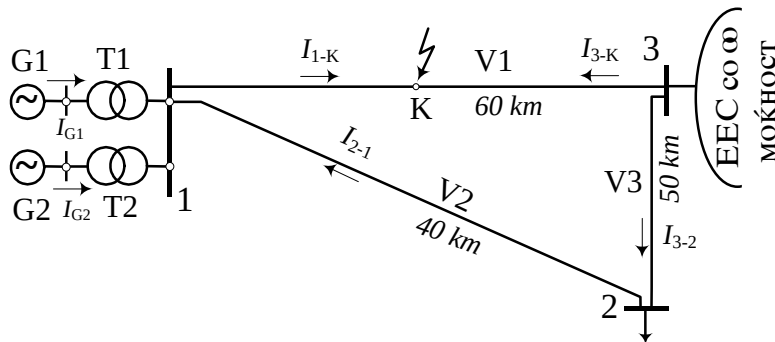
$$\Delta U_D = X_{DC} \frac{Q_C}{U_C} = 8 \cdot \frac{43,891}{103,918} = 3,379 \, \text{kV} ;$$

$$U_{D(\text{нов})} = U_D + \Delta U_D = 103,682 + 3,379 = 107,061 \, \text{kV} ;$$

□ □ □

III) ПРИМЕРИ И ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА КУСИ ВРСКИ ВО ЕЕС

Пример 3.1. На сликата 3.1.1 е прикажана 110 kV мрежа составена од три вода V1, V2 и V3 со должини $l_1=60$ km; $l_2=40$ km; и $l_3=50$ km – респективно. Сите водови имаат исти карактеристики и исти подолжни параметри: $z = (r+jx) = 0,123+j0,40$ Ω /km; $x_0/x = 3,5$. Мрежата е приклучена на ЕЕС со бесконечна моќност. Истовремено, на мрежата работи и една електрана во која има инсталирано два идентични блока генератор-трансформатор (G–TR) од по 50 MVA.



Слика 3.1.1

Се посматра режим на куса врска во суптранзиентниот период, настаната на средината од водот V1 (локација „К“). Пред настанувањето на кусата врска системот бил практично неоптоварен. Да се пресмета:

- распределбата на струите во гранките од мрежата и во блоковите G–TR како и фазните напони на собирниците “2” за случај на трифазна куса врска;
- струите што течат низ водот V1 кон местото на грешката „К“ како и фазните напони на местото на грешката за случај на еднофазна куса врска на локацијата „К“.

Податоци за параметрите на елементите од мрежата:

G1: 50 MVA; 10,5 kV; $\cos\varphi_n = 0,8$;

$X_d'' = X_i = 12\%$; $X_d' = 30\%$; $X_d = 140\%$; G2 $\equiv$ G1;

T1: 50 MVA; 10,5/115,5 kV/kV; $u_k\% = 12\%$; спрега ΔY со заземјено звездиште;

T2 = T1; спрега ΔY со незаземјено звездиште.

Решение:

1) Параметри на елементите од системот (сведени на 110 kV страна)

$$G1, G2: X_d'' = \frac{x_d''}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \cdot k_{T1n}^2 = \frac{12}{100} \frac{10,5^2}{50} \cdot \frac{115,5^2}{10,5^2} = 32,0166 \Omega; X_i = X_d''; E'' = \frac{1,0 \cdot U_n}{\sqrt{3}} = 63,50853 \text{ kV}.$$

$$T1: X_d = \frac{u_k\%}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{12}{100} \frac{115,5^2}{50} = 32,0166 \Omega; X_0 = X_d = 32,0166 \Omega; T2: X_d = 32,0166 \Omega; X_0 = \infty.$$

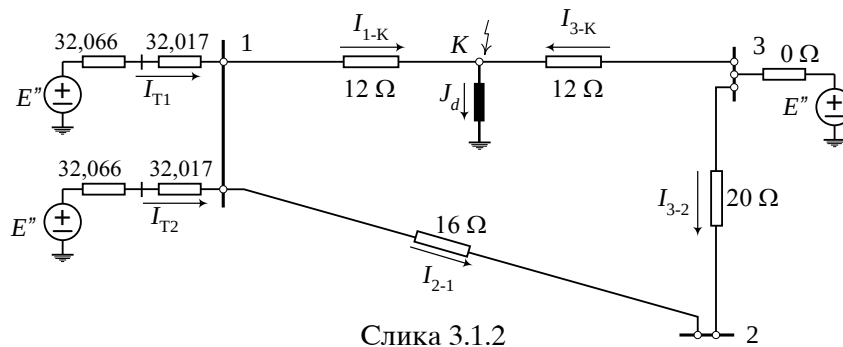
$$V1-K: X_{1-K,d} = X_{1-K,i} = x \cdot l_{1-K} = 0,4 \cdot 30 = 12 \Omega; X_{1-K,0} = x_0 \cdot l_{1-K} = 1,4 \cdot 30 = 42 \Omega;$$

$$V3-K: X_{3-K,d} = X_{3-K,i} = x \cdot l_{3-K} = 0,4 \cdot 30 = 12 \Omega; X_{3-K,0} = x_0 \cdot l_{3-K} = 1,4 \cdot 30 = 42 \Omega;$$

$$V1-2: X_{1-2,d} = X_{1-2,i} = x \cdot l_{1-2} = 0,4 \cdot 40 = 16 \Omega; X_{1-2,0} = x_0 \cdot l_{1-2} = 1,4 \cdot 40 = 56 \Omega;$$

$$V2-3: X_{2-3,d} = X_{2-3,i} = x \cdot l_{2-3} = 0,4 \cdot 50 = 20 \Omega; X_{2-3,0} = x_0 \cdot l_{2-3} = 1,4 \cdot 50 = 70 \Omega.$$

2. Формирање на заменската шема за директен редослед



Слика 3.1.2

3. Пресметување на еквивалентните (влезни) импеданции за одделните редоследи

$$\underline{Z}_d = jX_{K-3,d}\Pi[jX_{1-K,d} + j(X_{1-2,d} + X_{2-3,d})\Pi]j(X''_{G2,d} + X_{T2,d})\Pi]j(X''_{G1,d} + X_{T1,d})] = jZ_d$$

$$Z_d = 12\Pi[12 + 36\Pi(32,0166 + 32,0166)\Pi(32,0166 + 32,0166)] = 8,48316 \Omega.$$

$$\underline{Z}_i = jX_{K-3,i}\Pi[jX_{1-K,i} + j(X_{1-2,i} + X_{2-3,i})\Pi j(X_{G1,i} + X_{T1,i})\Pi j(X_{G2,i} + X_{T2,i})] = jZ_i$$

$$Z_i = 12\pi[12 + 36\pi(32,0166 + 32,0166)\pi(32,0166 + 32,0166)] = 8,48316 \Omega.$$

$$\underline{Z}_0 = jX_{K-3,0}\Pi[jX_{1-K,0} + j(X_{1-2,0} + X_{2-3,0})\Pi jX_{T1,0}]= jZ_0$$

$$Z_0 = 42\pi[42 + 126\pi(32, 0166)] = 25,89476 \Omega.$$

4. Пресметување на приликите во директниот систем за случајот под а)

Во случајот под 1) станува збор за трифазна куса врска настаната на средината од водот V1 (локација K). Бидејќи за трифазните куси врски постои само директниот систем на струи и напони, а импеданцијата на кусата врска е $\underline{Z}_k = 0$, се добиваат следните односи за местото на кусата врска:

$$\underline{Z}_K=0; \quad J_d = \frac{E''}{Z_{d+Z_K}} = \frac{63,50853}{8,48316+0} = 7,48642 \text{ kA.} \quad U_d = U_{K,d} = Z_K \cdot J_d = 0.$$

Понатаму, врз основа на сликата 2 можеме да пишуваме:

$$U_{3,d} = E'' = 63,50853 \text{ kV}; .$$

$$I_{3-K,d} = \frac{(U_{3,d} - U_{K,d})}{X_{3-K,d}} = \frac{63,50853 - 0}{12} = 5,29238 \text{ kA}$$

$$I_{1-K.d} = J_d - I_{3-K.d} = 7,48642 - 5,29238 = 2,19404 \text{ kA};$$

$$U_{1,d} = U_{K,d} + X_{1-K,d} \cdot I_{1-K,d} = 0 + 12 \cdot 2,19404 = 26,32848 \text{ kV};$$

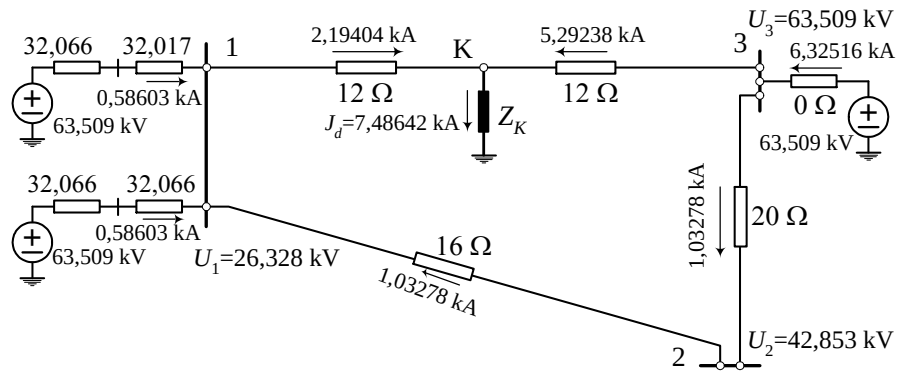
$$I_{3-2,d} = I_{2-1,d} = \frac{U_{3,d} - U_{1,d}}{X_{3-2,d} + X_{2-1,d}} = \frac{63,50853 - 26,32848}{20 + 16} = 1,03278 \text{ kA};$$

$$I_{G1,d} = I_{T1,d} = \frac{E'' - U_{1,d}}{X_{G1,d} + X_{T1,d}} = \frac{63,50853 - 26,32848}{32,0166 + 32,0166} = 0,58063 \text{ kA};$$

$$I_{G2,d} = I_{T2,d} = \frac{E'' - U_{1,d}}{X_{G2,d} + X_{T2,d}} = \frac{63,50853 - 26,32848}{32,0166 + 32,0166} = 0,58063 \text{ kA.}$$

За проверка на точноста на добиените резултати можат да ни послужат II Кирхофов закон за контурата како и важноста на I Кирхофов закон за јазелот 1.

На сликата 3.1.3 е прикажана распределбата на напони и струи во директниот систем.



Слика 3.1.3

б) Решавање на режимот на еднофазна куса врска

Пресметка на приликите на местото на кусата врска

За случајот на еднофазна куса врска ќе имаме:

$$\underline{Z}_K = \underline{Z}_i + \underline{Z}_0 = j(\underline{Z}_d + \underline{Z}_0) = j\underline{Z}_K = j34,37792 \Omega;$$

$$J_d = J_i = J_0 = \frac{E''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_K} = \frac{E''}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} = \frac{63,50853}{8,48316 + 34,37792} = 1,48173 \text{ kA};$$

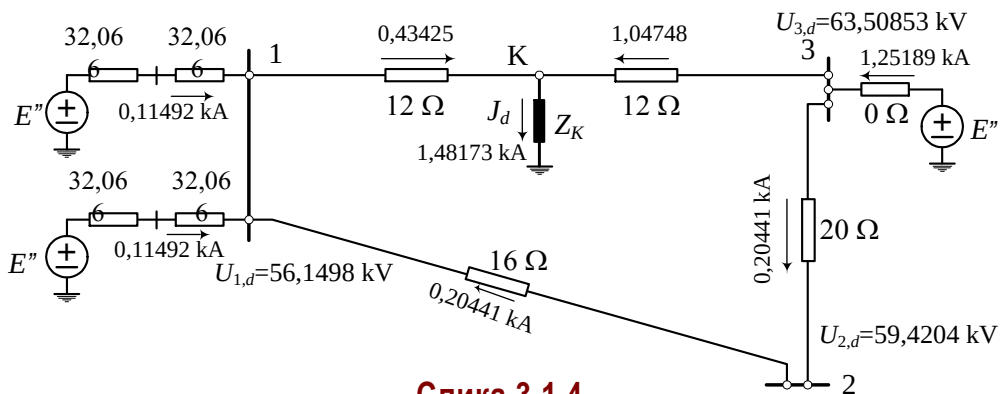
$$U_d = E'' - \underline{Z}_d \cdot J_d \equiv \underline{Z}_K \cdot J_d = 34,37792 \cdot 1,48173 = 50,93880 \text{ kV}; \quad U_{K,d} = U_d = 50,93880 \text{ kV};$$

$$U_i = -\underline{Z}_i \cdot J_i = 8,48316 \cdot 1,48173 = -12,56975 \text{ kV}; \quad U_{K,i} = -12,56975 \text{ kV};$$

$$U_0 = -\underline{Z}_0 \cdot J_0 = -25,89476 \cdot 1,48173 = -38,36904 \text{ kV}; \quad U_{K,0} = -38,36904 \text{ kV}.$$

Пресметка на приликите во директниот систем (слика 3.1.4)

Врз основа на сликата 3.1.4, со примена на Кирхофовите закони ги добиваме следните релации:



Слика 3.1.4

$$U_{3,d} = E'' = 63,50853 \text{ kV};$$

$$I_{3-K,d} = \frac{U_{3,d} - U_{K,d}}{X_{3-K,d}} = \frac{E'' - U_{K,d}}{X_{3-K,d}} = \frac{63,50853 - 50,93880}{12} = 1,04748 \text{ kA};$$

$$I_{1-K,d} = J_d - I_{3-K,d} = 1,48173 - 1,04748 = 0,43425 \text{ kA};$$

$$U_{1,d} = U_{K,d} + X_{1-K,d} \cdot I_{1-K,d} = 50,93880 + 12 \cdot 0,43425 = 56,14980 \text{ kV};$$

$$I_{3-2,d}=I_{2-1,d}=\frac{U_{3,d}-U_{1,d}}{X_{3-2,d}+X_{2-1,d}}=\frac{63,50853-56,14980}{20+16}=0,20441\text{ kA};$$

$$U_{2,d} = U_{3,d} - X_{3-2,d} \cdot I_{3-2,d} = 63,50853 - 20 \cdot 0,20441 = 59,42035 \text{ kV};$$

$$I_{T1,d} = \frac{I_{1-K,d} - I_{2-1,d}}{2} = \frac{0,43425 - 0,20441}{2} = 0,11492 \text{ kA}; \quad I_{G1,d} = I_{T1,d};$$

$$I_{T2,d} = \frac{I_{1-K,d} - I_{2-1,d}}{2} = \frac{0,43425 - 0,20441}{2} = 0,11492 \text{ kA}; \quad I_{G2,d} = I_{T2,d};$$

$$I_{EES.d} = I_{3-K.d} + I_{3-2.d} = 1,04748 + 0,20441 = 1,25189 \text{ kA.}$$

Пресметка на приликите во инверзниот систем (слика 3.1.5)

Врз основа на сликата 5, со примена на Кирхофовите закони ги добиваме следните релации:

$$U_{3,i} = 0 \text{ kV}; \quad I_{3-K,i} = \frac{U_{3,i} - U_{K,i}}{X_{3-K,i}} = \frac{0 + 12,56975}{12} = 1,04748 \text{ kA};$$

$$I_{1-K,j} = J_j - I_{3-K,j} = 1,48173 - 1,04748 = 0,43425 \text{ kA};$$

$$U_{1,i} = U_{K,i} + X_{1-K,i} \cdot I_{1-K,i} = -12,56975 + 12 \cdot 0,43425 = -7,35875 \text{ kV};$$

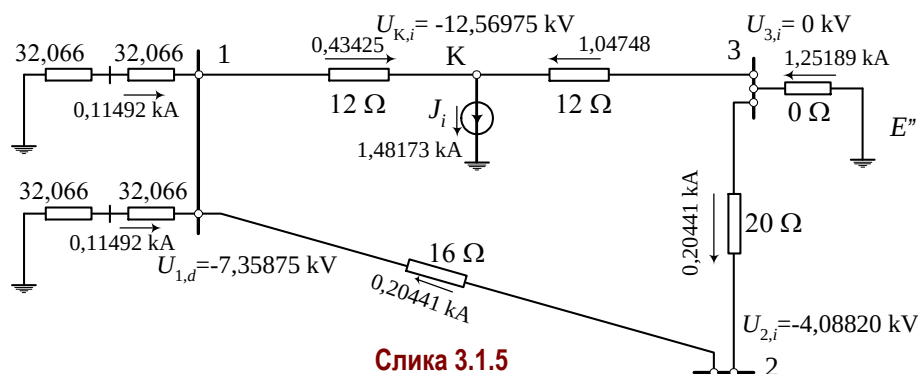
$$I_{3-2,i}=I_{2-1,i}=\frac{U_{3,i}-U_{1,i}}{X_{3-2,i}+X_{2-1,i}}=\frac{0+7,35875}{20+16}=0,20441\text{ kA};$$

$$U_{2,i} = U_{3,i} - X_{3-2,i} \cdot I_{3-2,i} = 0 - 20 \cdot 0,20441 = -4,08820 \text{ kV};$$

$$I_{T1,i} = \frac{I_{1-K,i} - I_{2-1,i}}{2} = \frac{0,43425 - 0,20441}{2} = 0,11492 \text{ kA}; \quad I_{G1,i} = I_{T1,i};$$

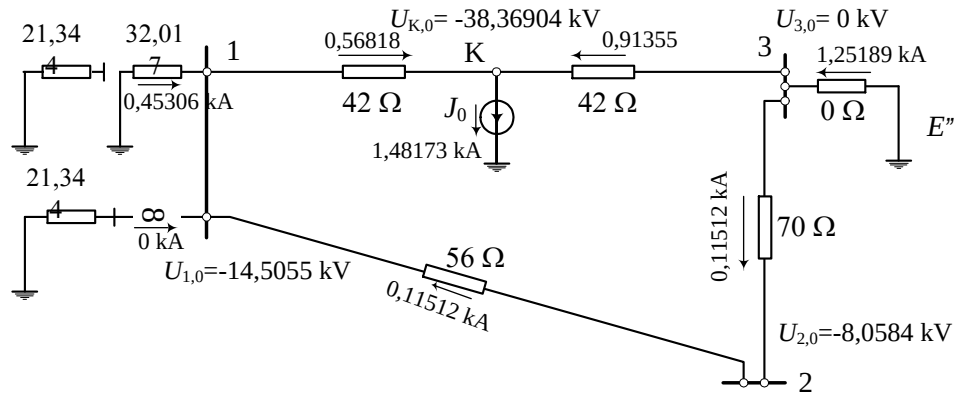
$$I_{T2,i} = \frac{I_{1-K,i} - I_{2-1,i}}{2} = \frac{0,43425 - 0,20441}{2} = 0,11492 \text{ kA}; \quad I_{G2,i} = I_{T2,i};$$

$$I_{FFS,j} = I_{3-K,j} + I_{3-2,j} = 1,04748 + 0,20441 = 1,25189 \text{ kA.}$$



Пресметка на приликите во нултиот систем (слика 3.1.6)

На напълно ист начин се пресметуваат и приликите во нултиот систем. Резултатите од пресметките се претставени на сликата 3.1.6.



Слика 3.1.6

Пресметка на фазните напони на местото на кусата врска

$$\underline{U}_{K,A} = \underline{U}_d + \underline{U}_i + \underline{U}_0 = 50,93880 - 12,56975 - 38,36904 = 0 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{K,B} = a^2 \underline{U}_d + a \cdot \underline{U}_i + \underline{U}_0 = (-19,18452 - j55,0) = 58,25 \cdot e^{j270,8^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{K,C} = a \cdot \underline{U}_d + a^2 \cdot \underline{U}_i + \underline{U}_0 = (-19,18452 + j55,0) = 58,25 \cdot e^{j90,8^\circ} \text{ kV}.$$

– Пресметка на фазните струи на местото на кусата врска

$$\underline{J}_A = \underline{J}_d + \underline{J}_i + \underline{J}_0 = 3 \cdot \underline{J}_d = 4,44519 \text{ kA};$$

$$\underline{J}_B = a^2 \underline{J}_d + a \cdot \underline{J}_i + \underline{J}_0 = 0;$$

$$\underline{J}_C = \underline{J}_B = a \cdot \underline{J}_d + a^2 \underline{J}_i + \underline{J}_0 = 0.$$

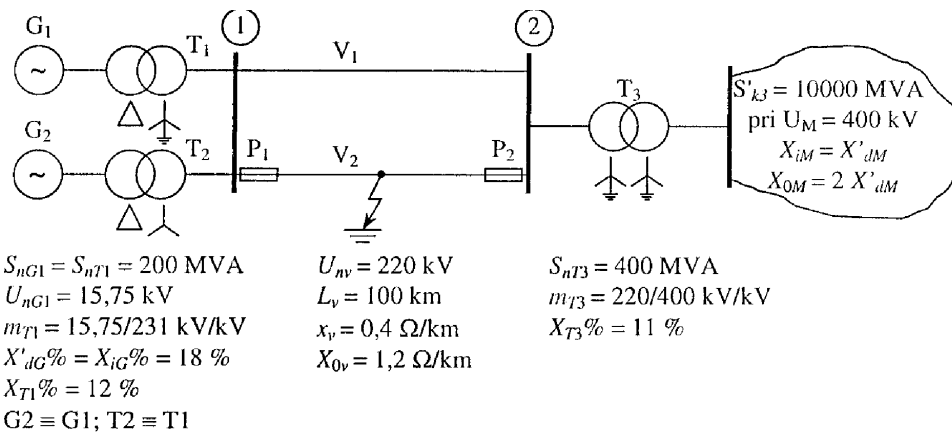
□ □ □

Задача 3.1. На сликата е прикажан едноставен ЕЕС. За случај на еднофазна куса врска на средината од водот V1 во транзиентниот период да се пресмета:

а) Струјата на грешката J на местото на кусата врска;

б) Струите што течат низ прекинувачите P1 и P2 во фазата со грешка.

Да се претпостави дека пред настанувањето на кусата врска системот работел во режим на празен од и дека напонот на местото на грешката притоа изнесувал $U = \sqrt{3} \cdot U_f = 220 \text{ kV}$.

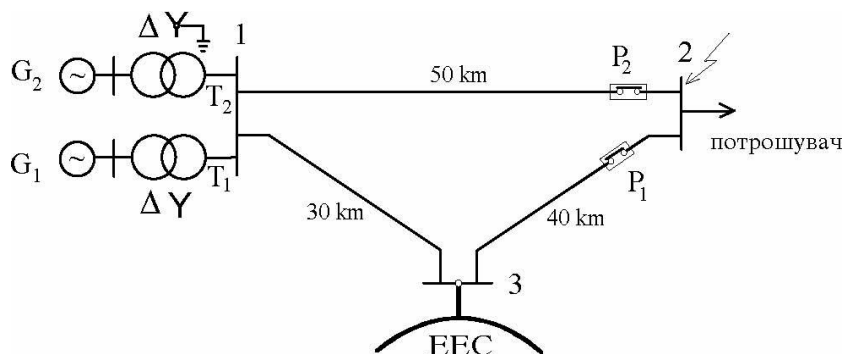


□ □ □

Пример 3.2 (од Учебникот). За системот од слика 3.2.1, прикажан во Примерот 4.9 во Учебникот, да се димензионираат прекинувачите P_1 и P_2 според суптранзиентната струја на:

- а) трифазна куса врска; б) еднофазна куса врска,

во случај кога кусата врска настанува кај потрошувачите, приклучени во јазелот „2“. Да се претпостави крајно неповолен случај (номинално оптоварен систем пред настанувањето на кусата врска).



Слика 3.2.1

Податоци за елементите:

$G1 \equiv G2$: 50 MVA; 10,5 kV; $X_d'' = X_i = 13\%$; $X_0 = 8\%$

$T1 \equiv T2$: 50 MVA; 10,5/115 kV; $u_k = 12\%$

EEC: $U_n = 110$ kV; $S_{k3}'' = 1210$ MVA; $X_d'' = X_i = X_0/2$

Водови: сите водови имаат ист пресек и исти подолжни параметри: $z = (0,12 + j0,4) \Omega/\text{km}$; $x_0 = 1,3 \Omega/\text{km}$ (реактанција за нулти систем).

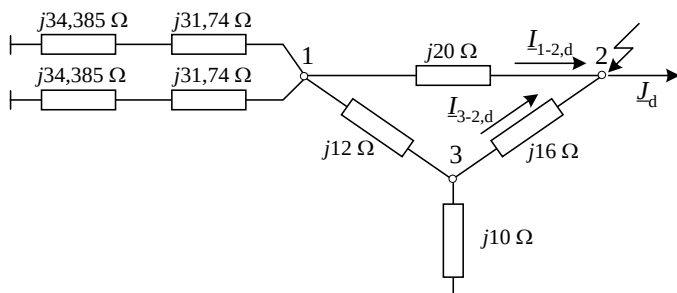
Решение:

I начин

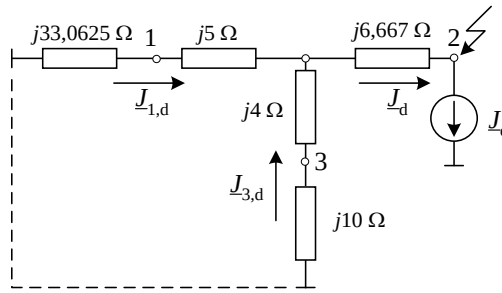
видете го решението во книгата на страницата 129 од Учебникот.

II начин

а) Еквивалентното коло за директниот систем е дадено на сликата 3.2.2. Со еквивалентирање на двете паралелни гранки приклучени во јазелот 1 со една еквивалентна импеданција и со трансформирање на триаголникот 1-2-3 во звезда се добива еквивалентното коло од сликата 3.2.3.



Слика 3.2.2



Слика 3.2.3

Според сликата 3.2.3, за влезната импеданција во јазелот 2 можеме да напишеме:

$$\underline{Z}_{22,d} = j[6,667 + (33,0625 + 5)\Pi(10 + 4)] = j16,902 \, \Omega;$$

а за струјата на куса врска во директниот систем имаме:

$$\underline{J}_d = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_{22,d}} = \frac{1,1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{\underline{Z}_{22,d}} = \frac{1,1 \cdot \frac{110}{\sqrt{3}}}{j16,902} = -j4,133 \, \text{kA};$$

Со примена на правилото за струен делител за струите во двете паралелни гранки од сликата 3.2.3 добиваме:

$$\underline{J}_{1,d} = -j4,133 \cdot \frac{(4+10)}{(33,0625+5)+(4+10)} = -j1,111 \, \text{kA};$$

$$\underline{J}_{3,d} = \underline{J}_d - \underline{J}_{1,d} = -j3,022 \, \text{kA}$$

За да ги пресметаме струите во гранките 1-2 и 2-3 потребни ни се напоните на јазлите 1, 2 и 3. Нив ќе ги пресметуваме со принципот на суперпозиција. Тие се добиваат како збир од напонот кој владее на јазелот пред настанување на кусата врска (напони од идеалните напонски генератори) и напоните кои се појавуваат поради дејството на струјниот генератор со струја $\underline{J}_d$ (слика 2). Напоните кои постојат пред кусата врска се за сите јазли еднакви и изнесуваат $\underline{E}''$, а напоните поради струјниот генератор ги добиваме со решавање на колото од сликата 2, така на пример напонот на јазелот 1 изнесува $-\underline{J}_{1,d} \cdot j33,0625$ (знакот е минус поради насоката на струјата), со што за вкупната вредност на напонот на јазелот 1 добиваме:

$$\underline{U}_{1,d} = \underline{E}'' - \underline{J}_{1,d} \cdot j33,0625 = 69,859 + j1,111 \cdot j33,0625 = 33,112 \, \text{kV};$$

$$\underline{U}_{2,d} = 0 \text{ (при трифазна куса врска напонот на јазелот со кусата врска секогаш е нула);}$$

На сличен начин како за јазелот 1, за јазелот 3 добиваме.

$$\underline{U}_{3,d} = \underline{E}'' - \underline{J}_{3,d} \cdot j10 = 69,859 + j3,022 \cdot j10 = 39,642 \, \text{kV}.$$

Познавајќи ги напоните на јазлите, за струите во гранките можеме да напишаме:

$$\underline{I}_{1-2,d} = \frac{\underline{U}_{1,d} - \underline{U}_{2,d}}{j20} = \frac{33,112 - 0}{j20} = -j1,656 \, \text{kA};$$

$$\underline{I}_{3-2,d} = \frac{\underline{U}_{3,d} - \underline{U}_{2,d}}{j16} = \frac{39,642 - 0}{j16} = -j2,478 \, \text{kA};$$

За фазните струи во гранките важи:

$$\underline{I}_{1-2,A} = \underline{I}_{1-2,d}, \underline{I}_{1-2,B} = a^2 \cdot \underline{I}_{1-2,d}, \underline{I}_{1-2,C} = a \cdot \underline{I}_{1-2,d},$$

$$\underline{I}_{3-2,A} = \underline{I}_{3-2,d}, \underline{I}_{3-2,B} = a^2 \cdot \underline{I}_{3-2,d}, \underline{I}_{3-2,C} = a \cdot \underline{I}_{3-2,d},$$

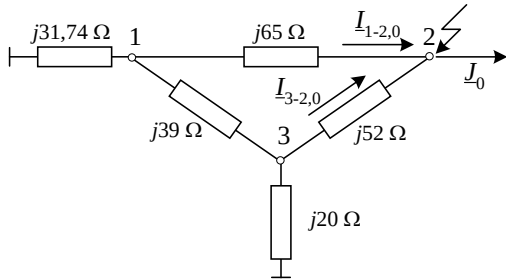
но бидејќи нас не интересираат само ефективните вредности на струите (не и нивните фазни агли) имајќи предвид дека модулот на a и a^2 изнеудува 1 можеме да напишаме:

$$I_{1-2,A} = I_{1-2,B} = I_{1-2,C} = I_{1-2,d} = 1,656 \, \text{kA},$$

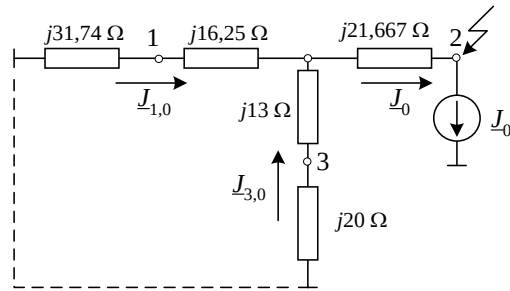
$$I_{3-2,A} = I_{3-2,B} = I_{3-2,C} = I_{3-2,d} = 2,478 \, \text{kA}.$$

б) При пресметување на струи на еднофазна куса врска е потребно да се земат предвид сите три системи. Но бидејќи кај генераторите, во оваа задача, важи $X_d'' = X_i$ инверзниот систем ќе

има исти параметри како и директниот и за нив ќе важат еквивалентните шеми од сликите 1 и 2. Еквивалентната шема за нултиот систем е дадена на сликата 3 и таа се разликува од еквивалентната шема од сликата 1 по тоа што тука од јазелот 1 кон земјата е поврзана само реактанцијата на едниот трансформатор кој има заземјено свездиште. Бидејќи и двата трансформатори од страната на генераторите имаат врска на намотките во триаголник, во нултиот систем нивната реактанција е бесконечна и таа на сликата 3 не е нацртана. Во овој случај реактанциите на водовите се различни од директниот и инверзниот систем и нивните вредности се прикажани на сликата. Со трансформирање на триаголникот 1-2-3 во звезда се добива еквивалентната шема од сликата 3.2.5.



Слика 3.2.4



Слика 3.2.5

Според сликата 3.2.5, за влезната импеданција во јазелот 2 можеме да напишеме:

$$\underline{Z}_{22,0} = j[21,667 + (31,74 + 16,25)\Pi(13 + 20)] = j41,221 \Omega$$

а за струјата на куса врска во директниот систем имаме:

$$\underline{J}_d = \frac{1,1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{\underline{Z}_{22,d} + \underline{Z}_{22,i} + \underline{Z}_{22,0}} = \frac{1,1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{2 \cdot \underline{Z}_{22,d} + \underline{Z}_{22,0}} = \frac{1,1 \cdot \frac{110}{\sqrt{3}}}{2 \cdot j16,902 + j41,221} = -j0,931 \text{ kA}.$$

Струјата во нултиот систем на местото на кусата врска е еднаква со струјата во директниот систем па според тоа имаме:

$$\underline{J}_0 = -j0,931 \text{ kA}.$$

Со примена на правилото за струен делител за струите во двете паралелни гранки од сликата 4 добиваме:

$$\underline{J}_{1,d} = -j0,931 \cdot \frac{(4+10)}{(33,0625+5)+(4+10)} = -j0,250 \text{ kA}; \quad \underline{J}_{3,d} = \underline{J}_d - \underline{J}_{1,d} = -j0,681 \text{ kA}$$

За напоните во директниот систем, на иденитчен начин како под а), но со друга вредност на струјата на куса врска добиваме:

$$\underline{U}_{1,d} = \underline{E}'' - \underline{J}_{1,d} \cdot j33,0625 = 69,859 + j0,250 \cdot j33,0625 = 61,581 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{2,d} = \underline{E}'' - \underline{J}_{1,d} \cdot (j33,0625 + j5) - \underline{J}_d \cdot j6,667;$$

$$\underline{U}_{2,d} = 69,859 + j0,250 \cdot j38,0625 + j0,931 \cdot j6,667 = 54,121 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{3,d} = \underline{E}'' - \underline{J}_{3,d} \cdot j10 = 69,859 + j0,681 \cdot j10 = 63,052 \text{ kV}.$$

За струите во гранките 1-2 и 3-2 во овој случај добиваме:

$$\underline{I}_{1-2,d} = \frac{\underline{U}_{1,d} - \underline{U}_{2,d}}{j20} = \frac{61,581 - 54,121}{j20} = -j0,373 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{3-2,d} = \frac{\underline{U}_{3,d} - \underline{U}_{2,d}}{j16} = \frac{63,052 - 54,121}{j16} = -j0,558 \text{ kA} ;$$

Со примена на правилото за струен делител за струите во двете паралелни гранки од сликата 3.2.5 добиваме:

$$\underline{I}_{1,0} = -j0,931 \cdot \frac{(13+20)}{(31,74+16,25)+(13+20)} = -j0,379 \text{ kA} ; \underline{I}_{3,0} = \underline{I}_0 - \underline{I}_{1,0} = -j0,552 \text{ kA} .$$

Напоните на јазлите во нултиот систем зависат само од струјата на струјниот генератор $\underline{I}_0$ прикажан на сликата 3.2.5. Тука нема потреба од примена на принципот на суперпозиција како кај директниот систем, затоа што во нултиот систем на постојат напонски генератори како кај директниот систем. Според сликата 3.2.5 за напоните на јазлите можеме да напишеме:

$$\underline{U}_{1,0} = -\underline{I}_{1,0} \cdot j31,74 = j0,379 \cdot j31,74 = -12,042 \text{ kV} ;$$

$$\underline{U}_{2,0} = -\underline{I}_{1,0} \cdot (j31,74 + j16,25) - \underline{I}_0 \cdot j21,667 = -38,383 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{3,0} = -\underline{I}_{3,0} \cdot j20 = j0,552 \cdot j20 = -11,035 \text{ kV} ;$$

За струите во гранките 1-2 и 3-2 во нултиот систем добиваме:

$$\underline{I}_{1-2,0} = \frac{\underline{U}_{1,0} - \underline{U}_{2,0}}{j65} = \frac{-12,042 + 38,383}{j65} = -j0,405 \text{ kA} ;$$

$$\underline{I}_{3-2,0} = \frac{\underline{U}_{3,0} - \underline{U}_{2,0}}{j52} = \frac{-11,035 + 38,383}{j52} = -j0,526 \text{ kA} ;$$

За фазните струи во гранките важи:

$$\underline{I}_{1-2,A} = \underline{I}_{1-2,d} + \underline{I}_{1-2,i} + \underline{I}_{1-2,0} = 2 \cdot \underline{I}_{1-2,d} + \underline{I}_{1-2,0} = 2 \cdot (-j0,373) - j0,405 = -j1,151 \text{ kA} ,$$

$$\underline{I}_{1-2,B} = a^2 \cdot \underline{I}_{1-2,d} + a \cdot \underline{I}_{1-2,i} + \underline{I}_{1-2,0} = (a^2 + a) \cdot \underline{I}_{1-2,d} + \underline{I}_{1-2,0} = -\underline{I}_{1-2,d} + \underline{I}_{1-2,0} ;$$

$$\underline{I}_{1-2,B} = j0,373 - j0,405 = -j0,032 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{1-2,C} = a \cdot \underline{I}_{1-2,d} + a^2 \cdot \underline{I}_{1-2,i} + \underline{I}_{1-2,0} = (a + a^2) \cdot \underline{I}_{1-2,d} + \underline{I}_{1-2,0} ;$$

$$\underline{I}_{1-2,C} = -\underline{I}_{1-2,d} + \underline{I}_{1-2,0} = j0,373 - j0,405 = -j0,032 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{3-2,A} = \underline{I}_{3-2,d} + \underline{I}_{3-2,i} + \underline{I}_{3-2,0} = 2 \cdot \underline{I}_{3-2,d} + \underline{I}_{3-2,0} ;$$

$$\underline{I}_{3-2,A} = 2 \cdot (-j0,558) - j0,526 = -j1,642 \text{ kA} ;$$

$$\underline{I}_{3-2,B} = a^2 \cdot \underline{I}_{3-2,d} + a \cdot \underline{I}_{3-2,i} + \underline{I}_{3-2,0} = (a^2 + a) \cdot \underline{I}_{3-2,d} + \underline{I}_{3-2,0} = -\underline{I}_{3-2,d} + \underline{I}_{3-2,0} ;$$

$$\underline{I}_{3-2,B} = j0,557 - j0,526 = j0,032 \text{ kA} ;$$

$$\underline{I}_{3-2,C} = a \cdot \underline{I}_{3-2,d} + a^2 \cdot \underline{I}_{3-2,i} + \underline{I}_{3-2,0} = (a + a^2) \cdot \underline{I}_{3-2,d} + \underline{I}_{3-2,0} ;$$

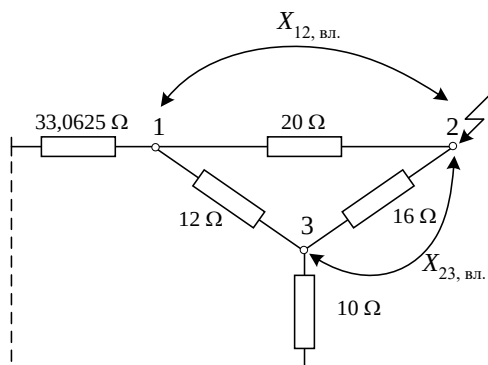
$$\underline{I}_{3-2,C} = -\underline{I}_{3-2,d} + \underline{I}_{3-2,0} = j0,557 - j0,526 = j0,032 \text{ kA} .$$

За димензионирање на прекинувачите меродавни ќе бидат најголемите ефективни вредности на струите во било која од фазите. Во случајов тие се: $\underline{I}_{1-2,A} = 1,151 \text{ kA}$ и $\underline{I}_{3-2,A} = 1,642 \text{ kA}$.

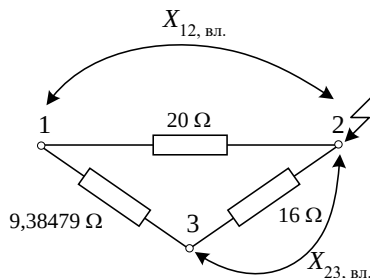
III начин

Принципот на решавање според третиот начин ќе го илустрираме само на случајот под б) со еднофазна куса врска, кој е пообеман за пресметки. Во овој случај ќе ја користиме матрицата

X на кусоврзаната мрежа, како што тоа го правевме во областа на регулација на напоните во висконапонските мрежи. Еквивалентното коло за директен систем е дадено на сликата 3.2.6, од каде што со еквиваленција на паралелната врска 12 П ($33,0625 + 10$) = $9,38479$ е добиено еквивалентното коло од сликата 3.2.7.



Слика 3.2.6



Слика 3.2.7

Од сликата 3.2.7 можеме да напишеме:

$$X_{12, \text{вл.}} = 20 \text{ П} (9,38479 + 16) = 11,18647 \Omega,$$

$$X_{23, \text{вл.}} = 16 \text{ П} (9,38479 + 20) = 10,35934 \Omega.$$

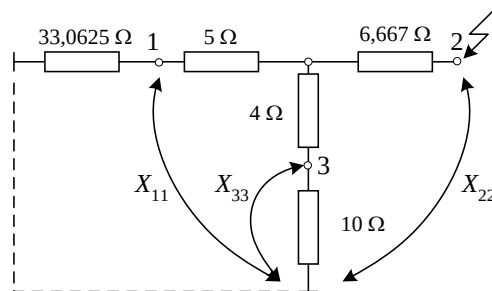
Со еквиваленција на триаголникот 1-2-3 во звезда го добиваме еквивалентното коло од сликата 3.2.8.

Од сликата 7 можеме да напишеме:

$$X_{11, d} = 33,0625 \text{ П} (10 + 4 + 5) = 12,06603 \Omega,$$

$$X_{22, d} = 6,667 + (33,0625 + 5) \text{ П} (10 + 4) = 16,902 \Omega,$$

$$X_{33, d} = 10 \text{ П} (33,0625 + 4 + 5) = 8,07923 \Omega,$$



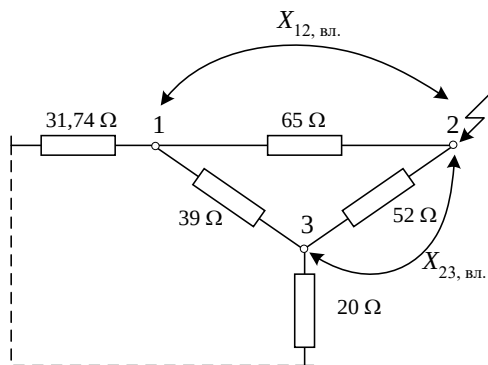
Слика 3.2.8

Понатаму за меѓусебните реактанции добиваме:

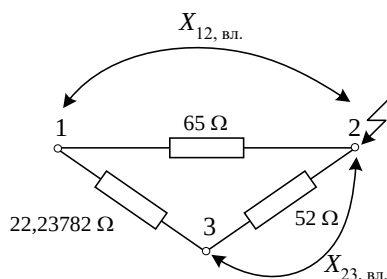
$$X_{12, d} = \frac{X_{11, d} + X_{22, d} - X_{12, \text{вл.}}}{2} = \frac{12,06603 + 16,90196 - 11,18647}{2} = 8,89076 \Omega,$$

$$X_{32, d} = \frac{X_{33, d} + X_{22, d} - X_{23, \text{вл.}}}{2} = \frac{8,07923 + 16,90196 - 10,35934}{2} = 7,31092 \Omega.$$

Слично се постапува и за нултиот систем, за кој еквивалентите шеми се дадени на сликите 3.2.9, 3.2.10 и 3.2.11:



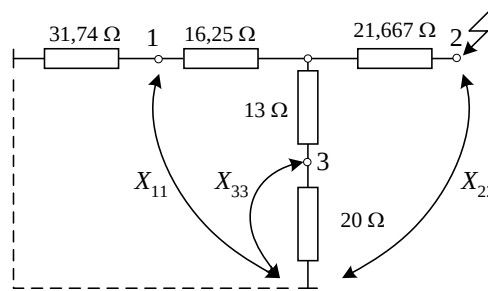
Слика 3.2.9



Слика 3.2.10

$$X_{12, \text{вл.}} = 65 \text{ П } (22,23782 + 52) = 34,65623 \text{ } \Omega,$$

$$X_{23, \text{вл.}} = 52 \text{ П } (22,23782 + 65) = 32,57999 \text{ } \Omega.$$



Слика 3.2.11

$$X_{11,0} = 31,74 \text{ П } (13 + 20 + 16,25) = 19,30109 \text{ } \Omega,$$

$$X_{22,0} = 21,667 + (31,74 + 16,25) \text{ П } (13 + 20) = 41,22056 \text{ } \Omega,$$

$$X_{33,0} = 20 \text{ П } (13 + 16,25 + 31,74) = 15,06112 \text{ } \Omega.$$

$$X_{12,0} = \frac{X_{11,0} + X_{22,0} - X_{12, \text{вл.}}}{2} = \frac{19,30109 + 41,22056 - 34,65623}{2} = 12,93271 \text{ } \Omega,$$

$$X_{32,0} = \frac{X_{33,0} + X_{22,0} - X_{23, \text{вл.}}}{2} = \frac{15,06112 + 41,22056 - 32,57999}{2} = 11,85085 \text{ } \Omega.$$

За струите на куса врска имаме:

$$\underline{I}_d = \frac{1,1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{2 \cdot jX_{22,d} + jX_{22,0}} = \frac{1,1 \cdot \frac{110}{\sqrt{3}}}{2 \cdot j16,902 + j41,221} = -j0,931 \text{ kA}; \underline{I}_0 = -j0,931 \text{ kA}.$$

Напоните на јазлите изнесуваат:

$$\underline{U}_{1,d} = \underline{E}'' - jX_{12,d} \cdot \underline{I}_d = 69,859 - j8,891 \cdot (-j0,931) = 61,581 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{2,d} = \underline{E}'' - jX_{22,d} \cdot \underline{I}_d = 69,859 - j16,902 \cdot (-j0,931) = 54,121 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{3,d} = \underline{E}'' - jX_{32,d} \cdot \underline{I}_d = 69,859 - j7,311 \cdot (-j0,931) = 63,052 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{1,0} = -jX_{12,0} \cdot \underline{I}_0 = -j12,933 \cdot (-j0,931) = -12,042 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{2,0} = -jX_{22,0} \cdot \underline{I}_0 = -j41,221 \cdot (-j0,931) = -38,383 \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{3,0} = -jX_{32,0} \cdot \underline{I}_0 = -j11,851 \cdot (-j0,931) = -11,035 \text{ kV}.$$

За струите во гранките 1-2 и 3-2 во директниот систем добиваме:

$$\underline{I}_{1-2,d} = \frac{\underline{U}_{1,d} - \underline{U}_{2,d}}{j20} = \frac{61,581 - 54,121}{j20} = -j0,373 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{3-2,d} = \frac{\underline{U}_{3,d} - \underline{U}_{2,d}}{j16} = \frac{63,052 - 54,121}{j16} = -j0,558 \text{ kA};$$

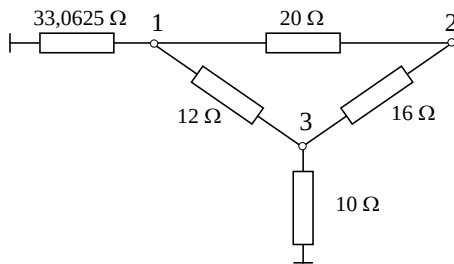
а за нултиот систем имаме:

$$I_{1-2,0} = \frac{U_{1,0} - U_{2,0}}{j65} = \frac{-12,042 + 38,383}{j65} = -j0,405 \text{ kA} ;$$

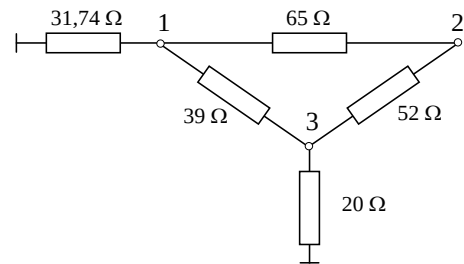
$$I_{3-2,0} = \frac{U_{3,0} - U_{2,0}}{j52} = \frac{-11,035 + 38,383}{j52} = -j0,526 \text{ kA} .$$

IV начин

И во овој случај ќе ја користиме матрицата X на кусоврзаната мрежа но тука неа ќе ја добиеме како инверзна матрица од матрицата на адмитанции на јазлите Y . Еквивалентите шеми за директен и нулти систем се дадени на сликите 3.2.12 и 3.2.13. Од сликите веднаш можеме да ги формираме матриците на адмитанции за двата система.



Слика 3.2.12



Слика 3.2.13

$$Y_d = \begin{bmatrix} \frac{1}{33,0625} + \frac{1}{20} + \frac{1}{12} & -\frac{1}{20} & -\frac{1}{12} \\ -\frac{1}{20} & \frac{1}{20} + \frac{1}{16} & -\frac{1}{16} \\ -\frac{1}{12} & -\frac{1}{16} & \frac{1}{10} + \frac{1}{12} + \frac{1}{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,164 & -0,05 & -0,083 \\ -0,05 & 0,113 & -0,063 \\ -0,083 & -0,063 & 0,246 \end{bmatrix} \text{ S},$$

$$Y_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{31,74} + \frac{1}{65} + \frac{1}{39} & -\frac{1}{65} & -\frac{1}{39} \\ -\frac{1}{65} & \frac{1}{65} + \frac{1}{52} & -\frac{1}{52} \\ -\frac{1}{39} & -\frac{1}{52} & \frac{1}{20} + \frac{1}{39} + \frac{1}{52} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,073 & -0,015 & -0,026 \\ -0,015 & 0,035 & -0,019 \\ -0,026 & -0,019 & 0,095 \end{bmatrix} \text{ S},$$

$$X_d = Y_d^{-1} = \begin{bmatrix} 12,066 & 8,891 & 6,351 \\ 8,891 & 16,902 & 7,311 \\ 6,351 & 7,311 & 8,079 \end{bmatrix} \Omega,$$

$$X_0 = Y_0^{-1} = \begin{bmatrix} 19,301 & 12,933 & 7,838 \\ 12,933 & 41,221 & 11,851 \\ 7,83 & 11,851 & 15,061 \end{bmatrix} \Omega.$$

Бидејќи кусата врска е на јазелот 2, за овој случај од интерес е втората колона од двете матрици. Ако ги погледнеме броевите во таа колона се забележува дека тие се еднакви на реактанциите кои ги пресметавме во третиот начин за решавање на задачата. Од како ги

имаме добиено реактанциите можеме да продолжиме со пресметките на идентичен начин како и во претходниот начин.

Знаејќи ги матриците X_d и X_d можеме да пресметаме струи на куси врски, напони на јазлите и распределба на струите во гранките од мрежата и за куси врски на останатите јазли (1 и 3) со едноставно селектирање на првата или третата колона од матриците, наместо втората како што е тука случајот.

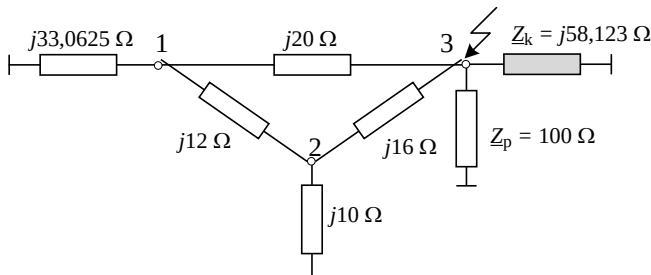
Формирање на матрица на адмитанции на генераторските јазли

Матрицата на адмитанции на генераторските јазли се користи за пресметување на моќностите кои ги оддаваат генераторите во мрежата при пресметките на нивното однесување во проблемите од динамичка стабилност на мрежата. При анализата на стабилноста на електроенергетските системи сите потрошувачи се заменуваат со константни импеданции чии вредности се пресметуваат од нивните моќности користејќи номинална вредност за напонот. Овде, вообичаено е прво да се нумерираат генераторските јазли, а потоа потрошувачките. Во нашиот пример, бидејќи има два генератори, генераторските јазли ќе имаат индекси 1 и 2, а потрошувачкиот јазел ќе има индекс 3 (во однос на претходно индексите на јазлите 2 и 3 си ги менуваат местата). Нека претпоставиме дека во јазелот 3 е приклучен потрошувач со моќност $\underline{S}_p = (121 + j0)$ MVA. Тој потрошувач ќе го претставиме со импеданција која изнесува:

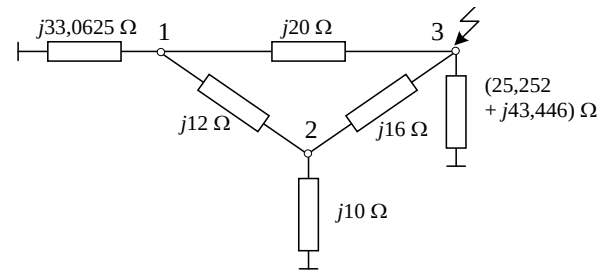
$$\underline{Z}_p = \frac{U_n^2}{S_p^*} = \frac{110^2}{121} = 100 \Omega.$$

Исто така, постоењето на куси врски во мрежата се симулира со додавање на импеданциите на куса врска во јазелот каде настанала кусата врска. Во нашиот случај, за задачата под б) импеданцијата на куса врска изнесува $\underline{Z}_k = \underline{Z}_{22,i} + \underline{Z}_{22,0} = \underline{Z}_{22,d} + \underline{Z}_{22,0} = j58,123 \Omega$.

Според тоа еквивалентната шема за директен систем ќе изгледа како на сл. 3.2.14 и 3.2.15.

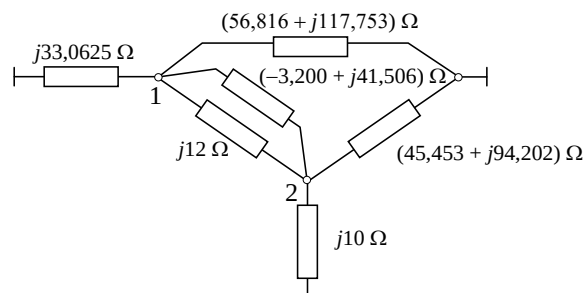


Слика 3.2.14



Слика 3.2.15

Ако свездата составена од импеданциите $j20$, $j16$ и $(25,252 + j43,446)$ ја претвориме во триаголник ќе ја добиеме еквивалентната шема од сликата 15.



Слика 3.2.16

Според сликата 3.2.16, можеме да ја формираме матрицата на адмитанции за јазлите 1 и 2:

$$Y_{gen} = \begin{bmatrix} \frac{1}{j33,0625} + \frac{1}{j12} + \frac{1}{-3,200 + j41,506} + \frac{1}{56,816 + j117,753} & \frac{-1}{-3,200 + j41,506} + \frac{-1}{j12} \\ \frac{-1}{-3,200 + j41,506} + \frac{-1}{j12} & \frac{1}{j10} + \frac{1}{j12} + \frac{1}{-3,200 + j41,506} + \frac{1}{45,453 + j94,202} \end{bmatrix}$$

односно

$$Y_{gen} = \begin{pmatrix} 0.001477 - 0.144418i & 0.001847 + 0.107284i \\ 0.001847 + 0.107284i & 0.002308 - 0.215895j \end{pmatrix}$$

До истиот резултат можеме да дојдеме и на друг начин без да правиме трансфигурации во мрежата. На почетокот ја формираме матрицата на адмитанции за директен систем за целата мрежа:

$$Y := -j \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{33.0625} + \frac{1}{20} + \frac{1}{12} & \frac{-1}{12} & \frac{-1}{20} \\ \frac{-1}{12} & \frac{1}{10} + \frac{1}{12} + \frac{1}{16} & \frac{-1}{16} \\ \frac{-1}{20} & \frac{-1}{16} & \frac{1}{20} + \frac{1}{16} \end{pmatrix},$$

а потоа во матрицата на адмитанции ги додаваме импеданциите со кои ги претставуваме потрошувачите и кусата врска:

$$Y_{3,3} := Y_{3,3} + \frac{1}{Z_p} + \frac{1}{Z_k},$$

со што за матрицата на адмитанции добиваме:

$$Y = \begin{pmatrix} -0.164j & 0.083j & 0.050j \\ 0.083j & -0.246j & 0.063j \\ 0.050j & 0.063j & 0.010 - 0.130j \end{pmatrix}$$

На крајот останува од матрицата на адмитанции да го елиминираме третиот јазел кој е потрошувачки. Тоа се прави со помош на Кроновата редукција на матрицата која се изведува на следниот начин:

1. Дефинираме матрица колона која ги содржи сите колони кои се однесуваат на потрошувачките јазли (во овој случај тоа е само колоната 3),

$$Y_{kol} := \text{submatrix}(Y, 1, 2, 3, 3) \quad Y_{kol} = \begin{pmatrix} 0.050j \\ 0.063j \end{pmatrix}$$

2. Дефинираме матрица редица која ги содржи сите редици кои се однесуваат на потрошувачките јазли (во овој случај тоа е само редицата 3),

$$Y_{red} := \text{submatrix}(Y, 3, 3, 1, 2) \quad Y_{red} = (0.050j \ 0.063j)$$

3. Дефинираме квадратна матрица која го содржи горниот лев агол од матрицата на адмитанции за редиците и колоните кои се однесуваат на генераторските јазли,

$$Y_{22} := \text{submatrix}(Y, 1, 2, 1, 2)$$

$$Y_{22} = \begin{pmatrix} -0.164j & 0.083j \\ 0.083j & -0.246j \end{pmatrix}$$

4. Дефинираме квадратна матрица која го содржи долниот десен агол од матрицата на адмитанции за редиците и колоните кои се однесуваат на потрошувачките јазли (во овој случај тоа е само елементот Y_{33}),

$$Y_{33} := \text{submatrix}(Y, 3, 3, 3, 3)$$

$$Y_{33} = (0.010 - 0.130j)$$

Со помош на вака дефинираните матрици за матрицата на адмитанции на генераторските јазли се добива:

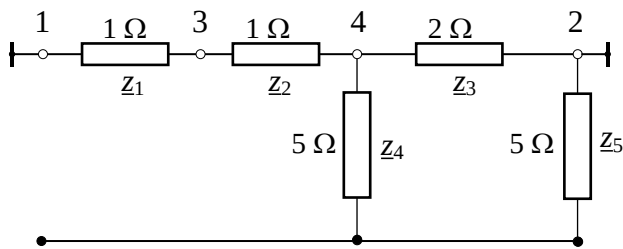
$$Y_{\text{gen}} := Y_{22} - Y_{\text{kol}} Y_{33}^{-1} \cdot Y_{\text{red}}$$

$$Y_{\text{gen}} = \begin{pmatrix} 0.001477 - 0.144418j & 0.001847 - 0.107284j \\ 0.001847 - 0.107284j & 0.002308 - 0.215895j \end{pmatrix}$$

□ □ □

IV) ПРИМЕРИ И ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА СТАБИЛНОСТ НА ЕЕС

Пример 4.1. За мрежата прикажана на сликата 4.1.1 да се пресмета матрицата Y на редуцираната мрежа во којашто ќе бидат елиминирани јазлите број „3“ и „4“. Да се пресметаат и импеданциите на гранките од соодветното π -образно заменско коло со коешто може да се претстави самата редуцирана мрежа.



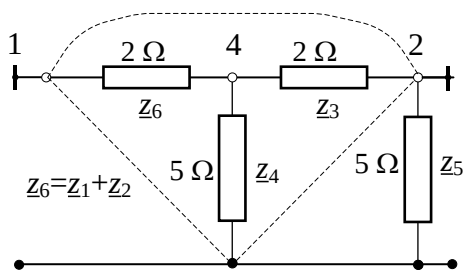
Слика 4.1.1

Решение:

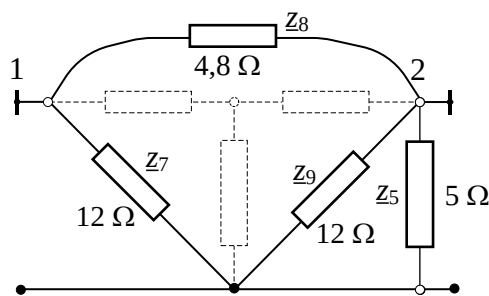
Задаата ќе ја решиме на три начини. Првиот начин се состои во постепена елиминација на „пасивните“ јазли по пат на разни трансфигурации и еквиваленирања на елементите од мрежата, а другите два се матрични постапки.

1. Начин. Примена на трансфигурации и еквиваленции

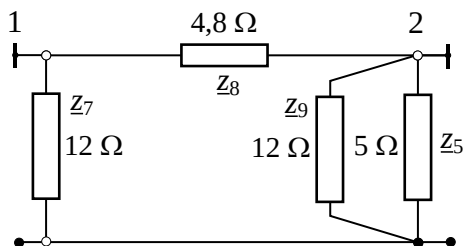
Најнапред ќе го елиминираме јазелот „3“ со редно врзување на импеданциите z_1 и z_2 ($z_6 = z_1 + z_2$) како што е тоа прикажано на сликата 4.1.2. Потоа следува елиминација на јазелот бр. „4“ по пат на трансфигурација на свездата составена од импеданциите z_6 , z_3 и z_4 во триаголник ($z_7 = z_6 + z_4 + z_6 \cdot z_4 / z_3 = 12 \Omega$; $z_8 = z_6 + z_3 + z_6 \cdot z_3 / z_4 = 4,8 \Omega$; $z_9 = z_3 + z_4 + z_3 \cdot z_4 / z_6 = 12 \Omega$, слика 4.1.3). На тој начин го добиваме колото од сликата 4.1.4, во коешто се елиминирани пасивните јазли бр. „3“ и „4“. И конечно, со еквивалентирање на паралелната комбинација од импеданциите z_9 и z_5 ($z_{10} = z_9 \parallel z_5 = 3,5294 \Omega$) се добива крајниот резултат - бараниото π -образно заменско коло на мрежата (слика 4.1.5).



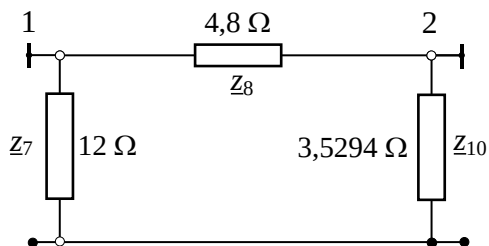
Слика 4.1.2



Слика 4.1.3



Слика 4.1.4



Слика 4.1.5

Матрицата $\underline{Y}$ на редуцираната мрежа сега лесно ќе ја добиеме од самата шема од сликата 4.1.5, тргнувајќи од нејзината дефиниција:

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} z_7^{-1} + z_8^{-1} & -z_8^{-1} \\ -z_8^{-1} & z_8^{-1} + z_{10}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2917 & -0,2083 \\ 0,2083 & 0,4917 \end{bmatrix}.$$

Напомена. Доколку во мрежата од сликата 4.1.1 не постоеја напречните гранки z_4 и z_5 соодветното π -еквивалентно коло се добива многу едноставно, со просто сумирање на сите импеданции на редно поврзаните елементи од мрежата со што, всушност, се врши елиминација на пасивните јазли бр. „3“ и „4“.. Значи, во тој случај ќе имаме:

$$z_{1-0} = \infty; \quad z_{1-2} = \Sigma z = 1+1+2=4\Omega \quad \text{и} \quad z_{2-0} = \infty,$$

додека матрицата на адмитанции на редуцираната мрежа ќе биде

$$[\underline{Y}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\Sigma z & -1/\Sigma z \\ -1/\Sigma z & 1/\Sigma z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,25 & -0,25 \\ -0,25 & 0,25 \end{bmatrix} \text{ S.}$$

2. Начин. Примена на матрична инверзија

Во овој случај најнапред, со инспекција на изворната мрежа од сликата 4.1.1, ќе ја формираме матрицата на адмитанции на нередуцираната мрежа $\underline{YN}$.

$$\underline{YN} = \begin{bmatrix} z_1^{-1} & 0 & -z_1^{-1} & 0 \\ 0 & z_3^{-1} + z_5^{-1} & 0 & -z_3^{-1} \\ -z_1^{-1} & 0 & z_1^{-1} + z_2^{-1} & -z_2^{-1} \\ 0 & -z_3^{-1} & -z_2^{-1} & z_2^{-1} + z_3^{-1} + z_4^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & -0,5 \\ -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & -0,5 & -1 & 1,7 \end{bmatrix} \text{ S}$$

Потоа вршиме нејзина инверзија ($\underline{ZN} = \underline{YN}^{-1}$)

$$\underline{ZN} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & -0,5 \\ -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & -0,5 & -1 & 1,7 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 4,9167 & 2,0833 & 3,9167 & 2,9167 \\ 2,0833 & 2,9167 & 2,0833 & 2,0833 \\ 3,9167 & 2,0833 & 3,9167 & 2,9167 \\ 2,9167 & 2,0833 & 2,9167 & 2,9167 \end{bmatrix} \Omega.$$

и од инверзната матрица $\underline{ZN}$ ги одвојуваме оние редици и колони коишто им припаѓаат на „активните“ јазли бр. „1“ и „2“, додека редиците и колоните коишто им припаѓаат на преостаните, пасивни, јазли „3“ и „4“ ги испуштаме.

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} 4,9167 & 2,0833 \\ 2,0833 & 2,9167 \end{bmatrix}$$

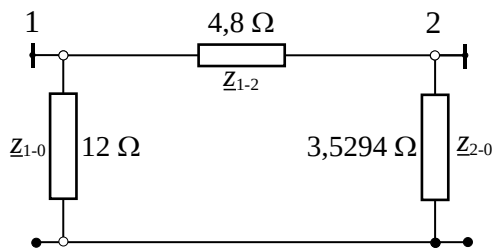
На тој начин ја добиваме матрицата на импеданции на редуцираната мрежа $\underline{Z}$ којашто е всушност инверзна матрица од бараната матрица на адмитанции на редуцираната мрежа $\underline{Y}$.

$$\underline{Y} = \underline{Z}^{-1} = \begin{bmatrix} 4,9167 & 2,0833 \\ 2,0833 & 2,9167 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0,2917 & -0,2083 \\ -0,2083 & 0,4917 \end{bmatrix} \text{ S,}$$

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2917 & -0,2083 \\ -0,2083 & 0,4917 \end{bmatrix} \text{ S,}$$

а тоа е истиот резултат што го добивме и со претходниот начин.

Нека со y_{1-0} , y_{1-2} и y_{2-0} ги означиме адмитанциите на гранките од π -еквивалентно заменско коло со коешто може да се претстави самата редуцирана мрежа (слика 4.1.6). Тогаш во согласност со дефиницијата на матрицата на адмитанции $\underline{Y}$, можеме да пишуваме



Слика 4.1.6

$$Y_{11} = y_{1-0} + y_{1-2} = 0,2917 \text{ S}$$

$$Y_{12} = -y_{1-2} = -0,2083 \text{ S}$$

$$Y_{22} = y_{2-0} + y_{1-2} = 0,4917 \text{ S}$$

Решението на системот равенки гласи:

$$y_{1-2} = -Y_{12} = 0,2083 \text{ S} \Rightarrow z_{1-2} = 1/y_{1-2} = 4,8 \text{ Ohms}$$

$$y_{1-0} = Y_{11} + Y_{12} = 0,0833 \text{ S} \Rightarrow z_{1-0} = 1/y_{1-0} = 12 \text{ Ohms}$$

$$y_{2-0} = Y_{22} + Y_{12} = 0,2833 \text{ S} \Rightarrow z_{2-0} = 1/y_{2-0} = 3,5294 \text{ Ohms}.$$

3. Начин. Елиминација на пасивните јазли со примена на Кронова редуција

Според овој начин нумерацијата на јазлите од мрежата се врши така што најнапред се нумерираат „активните“ јазли, а потоа оние јазли коишто треба да бидат елиминирани, т.е т.н. „пасивни“ јазли. Потоа матрицата на адмитанции на нередуцираната мрежа $\underline{Y}_N$ се дели на 4 блока: $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$ $\underline{D}$:

$$\underline{Y}_N = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix},$$

Бараната матрица на адмитанции на редуцираната мрежа $\underline{Y}$ сега ќе се добие со помош на следната матрична релација

$$\underline{Y} = \underline{A} - \underline{B} \times \underline{D}^{-1} \times \underline{C}.$$

Во конкретниот случај, за колото од сликата 4.1.1 ќе имаме

$$\underline{Y}_N = \begin{bmatrix} z_1^{-1} & 0 & -z_1^{-1} & 0 \\ 0 & z_3^{-1} + z_5^{-1} & 0 & -z_3^{-1} \\ -z_1^{-1} & 0 & z_1^{-1} + z_2^{-1} & -z_2^{-1} \\ 0 & -z_3^{-1} & -z_2^{-1} & z_2^{-1} + z_3^{-1} + z_4^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & -0,5 \\ -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & -0,5 & -1 & 1,7 \end{bmatrix} \text{ S}$$

$$\underline{Y}_N = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix}; \underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0,7 \end{bmatrix}; \underline{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -0,5 \end{bmatrix}; \underline{C} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -0,5 \end{bmatrix}; \underline{D} = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 1,7 \end{bmatrix}.$$

$$\underline{A} - \underline{B} \times \underline{D}^{-1} \times \underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0,7 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -0,5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,7083 & 0,4167 \\ 0,4167 & 0,8333 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -0,5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2917 & -0,2083 \\ -0,2083 & 0,4917 \end{bmatrix}$$

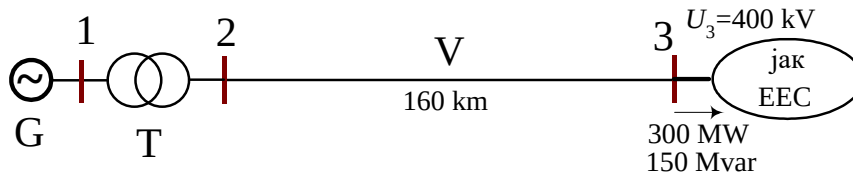
$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 0,2917 & -0,2083 \\ -0,2083 & 0,4917 \end{bmatrix}.$$

Очигледно е дека и на третиот начин го добивме истиот резултат за проблемот.

□ □ □

Пример 4.2. Турбогенератор G со познати карактеристики, преку блок-трансформатор T и преносен вод V ја предава произведуваната енергија на јак ЕЕС (крута мрежа). Во посматраниот режим на работа ЕЕС прима моќност $\underline{S}_3 = P_3 + jQ_3 = (300 + j150)$ MVA при напон $\underline{U}_3 = U_3 \cdot e^{j0^\circ} = 400$ kV (слика 4.2.1). Потребно е да се пресмета:

- а) напонот $\underline{U}_G = \underline{U}_1$ и моќноста $\underline{S}_G = S_1$ што ја произведува генераторот во дадениот режим
 б) внатрешната е.м.с. на генераторот $\underline{E}'$, активната електрична моќност P_0 што агрегатот ја оддава во системот во набљудуваниот режим како и агловата карактеристика на моќност $P_1(\theta)$ на којашто тој работи;



Слика 4.2.1. Систем генератор - крута мрежа

Бројни вредности:

G : $S_n = 420$ MVA; $U_n = 15,75$ kV; $X'_d = 30\%$; $T_J = 6$ s.
 T : $S_n = 420$ MVA; $U_{n1}/U_{n2} = 15,75/400$ kV/kV; $u_k = 12,5$ %
 V : $\underline{z} = (0,03 + j0,34) \Omega/\text{km}$; $b = 3,23 \mu\text{S}/\text{km}$; $l = 160$ km.

Решение:

а) Пресметка на напонот и моќноста на генераторот

Најнапред ќе ги пресметаме приликите на почетокот од водот а веднаш потоа и е.м.с. на генераторот $\underline{E}'$ зад транзиентната реактанција која ни е неопходна за решавање на останатиот дел од задачата. Притоа ќе ги уважуваме реактивните моќности Q_{C1} и Q_{C2} генерирани од попречените (капацитивни) гранки на водот V .

Импеданцијата на редната гранка од водот V ќе биде:

$$\underline{Z}_V = \underline{z} \cdot l = (0,03 + j0,34) \cdot 160 = (4,8 + j54,4) \Omega,$$

додека неговата вкупна капацитивна спроводност ќе биде:

$$\underline{Y}_C = j \cdot B = j \cdot b \cdot l = j \cdot 3,23 \cdot 10^{-6} \cdot 160 = j516,8 \cdot 10^{-6} \text{ S}.$$

Реактивната моќност Q_{C2} генерирана од попречната гранка на крајот од водот ќе биде:

$$Q_{C2} = B / 2 \cdot U_3^2 = b \cdot l / 2 \cdot U_3^2 = 3,23 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot 400^2 = 41,34 \text{ Mvar}; \quad (\underline{U}_3 = 400 \cdot e^{j0^\circ} \text{ kV});$$

Моќноста на крајот од редната гранка на водот $\underline{S}_{23}''$ ќе биде:

$$\underline{S}_{23}'' = \underline{S}_3 - jQ_{C2} = (300 + j150) - j41,34 = (300 + j108,66) \text{ MVA}.$$

Загубата на моќност $\Delta \underline{S}_Z$ и загубата на напон $\Delta \underline{U}$ во редната гранка на водот $\underline{Z}_V$ ќе бидат:

$$\Delta \underline{S}_Z = \frac{P_3^2 + (Q_3 - Q_{C2})^2}{U_3^2} \cdot (R_V + jX_V) = \frac{300^2 + 108,66^2}{400^2} \cdot (4,8 + j54,4) = (3,054 + j34,614) \text{ MVA}$$

$$\Delta U = \Delta U_d + j \Delta U_q = \frac{P_3 \cdot R_V + (Q_3 - Q_{C2}) \cdot X_V}{U_3} + j \frac{P_3 \cdot X_V - (Q_3 - Q_{C2}) \cdot R_V}{U_3} = (18,377 + j39,496) \text{ kV}$$

$$\underline{U}_2 = U_3 + \Delta \underline{U} = (418,377 + j39,496) = 420,237 \cdot e^{j5,393^\circ} \text{ kV.}$$

Реактивната (капацитивна) моќност што ја генерира напречната гранка на почетокот од водот ќе биде:

$$Q_{C1} = B / 2 \cdot U_2^2 = 45,633 \text{ kV}$$

Според тоа, моќноста $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$ на почетокот од водот ќе биде:

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{23} + \Delta \underline{S}_2 - jQ_{C1} = (300 + j108,66) + (3,05 + j34,614) - j45,633;$$

$$\underline{S}_2 = (303,05 + j97,65) \text{ MVA.}$$

Реактанциите X'_d и X_T на генераторот G и на трансформаторот T, сведени на 400 kV напонско ниво, ќе бидат:

$$X'_d = \frac{X'_d \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \left(\frac{400}{15,75} \right)^2 = \frac{30}{100} \cdot \frac{400^2}{420} = 114,29 \Omega;$$

$$X_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{12,5}{100} \cdot \frac{400^2}{420} = 47,62 \Omega.$$

Напонот на клемите на генераторот $\underline{U}_G = \underline{U}_1$ ќе биде:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + jX_T \cdot (\underline{S}_2 / \underline{U}_2)^* = (418,377 + j39,496) + j47,62 \cdot \frac{303,05 - j97,65}{418,377 - j39,496}$$

$$\underline{U}_1 = (426,16 + j74,776) = 432,671 \cdot e^{j9,952^\circ} \text{ kV.}$$

Вистинската вредност на напонот на клемите на генераторот ќе се доби со сведување на вредноста на напонот $\underline{U}_1$ кон примарната страна од трансформаторот T1:

$$\underline{U}_{G, \text{вист}} = k_T \cdot \underline{U}_1 = (15,75 / 400) \cdot 432,671 \cdot e^{j9,952^\circ} = 17,036 \cdot e^{j9,952^\circ} \text{ kV.}$$

Моќноста $\underline{S}_G = \underline{S}_1$ што генераторот ја инјектира во собирниците „1“ ќе биде:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \Delta \underline{S}_T = \underline{S}_2 + jX_T \cdot \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} = 303,05 + j97,65 + j27,409 = (303,054 + j125,059) \text{ MVA.}$$

Сега можеме да ја пресметаме внатрешната е.м.с на генераторот $\underline{E}'$. Притоа ќе имаме:

$$\underline{E}' = \underline{U}_1 + \frac{Q_1 \cdot X'_d}{U_1^*} + j \frac{P_1 \cdot X'_d}{U_1^*} = (444,85 + j \cdot 159,28) = 472,51 \cdot e^{j19,7^\circ} \text{ kV.}$$

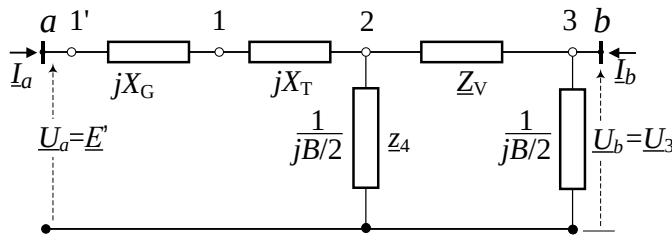
Значи:

$$\underline{E}' = E' \cdot e^{j\theta} \text{ и притоа е: } E' = 472,51 \text{ kV и } \theta = 19,7^\circ.$$

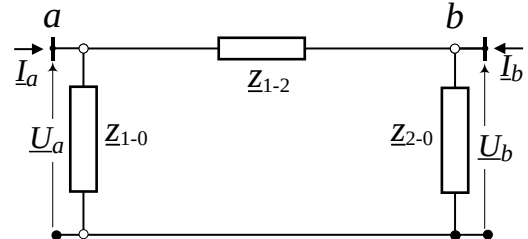
б) Аглова карактеристика на моќност $P_1(\theta)$.

Останува уште да ја определиме агловата карактеристика на моќност $P_1(\theta)$ на која што работи генераторот во набљудуваниот режим на работа. За таа цел ќе биде потребно да ја пресметаме матрицата на адмитанции $\underline{Y}$ на редуцираната мрежа, во којашто се елиминирани сите јазли освен двата генераторски, со редни броеви „a≡1“ и „b≡3“, за да можеме да ги определиме пааметрите $\underline{Z}_{1-0}$, $\underline{Z}_{1-2}$ и $\underline{Z}_{2-0}$ на соодветното π -еквивалентно коло со коешто може да се претстави целата редуцирана мрежа од сликата 4.2.1.

Не е тешко да се покаже (на пример со елиминација на јазлите „1“ и „2“ по пат на трансфигурација, на начин којшто е применет во претходниот Пример 4.1), дека мрежата од сликата 4.2.2, посмтрена во однос на јазлите „a≡1“ и „b≡3“ може да се еквивалентира со π -еквивалентното коло од сликата 4.2.3.



Слика 4.2.2



Слика 4.2.3

Притоа имаме:

$$z_{1-0} = (1,0084 - j15,137) \cdot 10^3 \Omega = 15,17 \cdot e^{-j86,19^\circ} \cdot 10^3 \Omega ;$$

$$z_{1-2} = (4,5992 - j214,03) \Omega = 214,0783 \cdot e^{j88,77^\circ} \Omega ;$$

$$z_{2-0} = -(0,11 + j5,116) \cdot 10^3 \Omega = 5,117 \cdot e^{-j91,23^\circ} \cdot 10^3 \Omega .$$

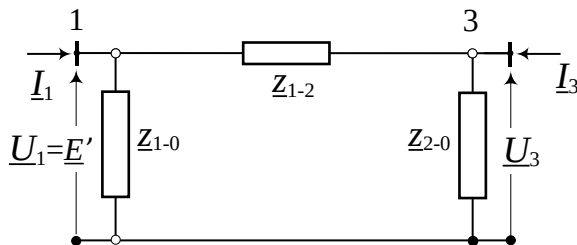
Следува формирање на матрицата $\underline{Y}$ на адмитанции на редуцираната мрежа:

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} z_{1-0}^{-1} + z_{1-2}^{-1} & -z_{1-2}^{-1} \\ -z_{1-2}^{-1} & z_{2-0}^{-1} + z_{1-2}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1047 - j4,6043 & -0,1004 + j4,6701 \\ -0,1004 + j4,6701 & 0,0962 - j4,2163 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \text{ S} ,$$

или

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} \cdot e^{j\psi_{11}} & Y_{12} \cdot e^{j\psi_{12}} \\ Y_{21} \cdot e^{j\psi_{21}} & Y_{22} \cdot e^{j\psi_{22}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,6055 \cdot e^{-j88,7^\circ} & 4,6712 \cdot e^{j91,231^\circ} \\ 4,6712 \cdot e^{j91,231^\circ} & 4,2174 \cdot e^{-j88,7^\circ} \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \text{ S} .$$

Од самата дефиниција на матрицата $\underline{Y}$ произлегуваат следните релации за струите $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$ што се инјектираат во јазлите „1“ и „3“ (слика 4.2.4):



Слика 4.2.4

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ -\underline{I}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{E}' \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} ,$$

Моќноста $\underline{S}_1$ што соодветствува на струјата $\underline{I}_1$ ќе изнесува:

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \underline{E}' \cdot \underline{I}_1^* = \underline{E}' \cdot (\underline{Y}_{11} \cdot \underline{E}' + \underline{Y}_{12} \cdot \underline{U}_3)^*$$

или

$$\underline{S}_1 = E'^2 \cdot Y_{11}^* + \underline{E}' \cdot \underline{U}_3^* \cdot Y_{12}^* ,$$

$$P_1 = \text{Real}(\underline{S}_1) = E'^2 \cdot Y_{11} \cdot \cos(-\psi_{11}) + E' \cdot U_3 \cdot Y_{12} \cdot \cos(\theta - \psi_{12}) \equiv P_1(\theta) ,$$

$$P_1(\theta) = E'^2 \cdot Y_{11} \cdot \sin(\alpha_{11}) + E' \cdot U_3 \cdot Y_{12} \cdot \sin(\theta - \alpha_{12}) \equiv P_{11} + P_{12} \cdot \sin(\theta - \alpha_{12}) ,$$

каде што се:

$$\alpha_{11} = 90 - \psi_{11} = 1,3^\circ ; \alpha_{12} = 90 - \psi_{12} = -1,231^\circ ;$$

$$P_{11} = 472,51^2 \cdot 4,6055 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(1,3^\circ) = 23,384 \text{ MW} ,$$

$$P_{12} = 472,51 \cdot 400 \cdot 4,6712 \cdot 10^{-3} = 882,867 \text{ MW} .$$

Според тоа бараната агловата карактеристика на моќност на која што работи генераторот G ќе биде:

$$P_1(\theta) = 23,384 + 882,867 \cdot \sin(\theta + 1,231^\circ) \text{ MW} .$$

Моќноста P_0 што ја произведува генераторот во дадениот режим ($\theta=19,7^\circ$) ќе биде:

$$P_0 = P_1(19,7^\circ) = 23,384 + 882,867 \cdot \sin(19,7^\circ + 1,231^\circ) = 303,054 \text{ MW}.$$

Добиениот резултат за моќноста P_0 е всушност проверка на точноста на пресметките.

□ □ □

Пример 4.3. Се посматра системот од претходниот Пример 4,2 којшто работи во истиот работен режим ($\underline{E}' = E' \cdot e^{j\theta} = 472,51 \cdot e^{j19,7^\circ}$ kV; $P_1(\theta) = 23,384 + 882,867 \cdot \sin(\theta + 1,231^\circ)$ и $P_0 = 303,054$ MW). Во еден момент при собирниците 2 доаѓа до вклучување на чисто активен потрошувач со моќност $P_p = 200$ MW.

а) Да се определи новата аглова карактеристика на моќност $P_2(\theta)$ на која ќе работи генераторот по вклучување на потрошувачот.

г) Применувајќи го методот „чекор по чекор“ да се определи временскиот тек $\theta(t)$ на нишањето на роторот на турбогенераторот во текот на првите 0,5 s од електромеханичкиот преоден процес, предизвикан од вклучувањето на потрошувачот. Пресметките да се изведат со временски чекор $\Delta t = 0,1$ s.

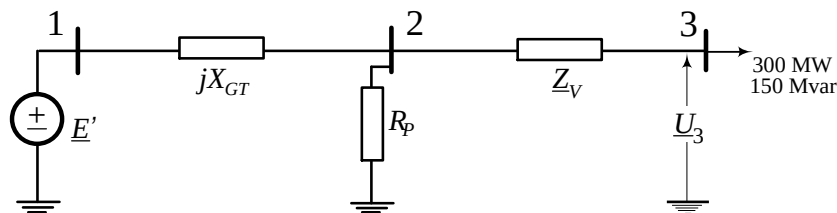
Решение:

в) Пресметка на работната (аглова) карактеристика $P_2(\theta)$ по вклучување на потрошувачот

Потрошувачот $\underline{S}_p = P_p + jQ_p$ којшто се приклучува на собирниците 2 ќе го симулираме со неговата импеданција $\underline{Z}_p = R_p + jX_p$. Нејзината вредност ќе ја пресметаме со помош на познатиот напон U_2 ($U_2 = 422,237$ kV, пресметан во Задачата 4.2) и познатата моќност на потрошувачот $\underline{S}_p = (200 + j0)$ MVA:

$$\underline{Z}_p = \frac{U_2^2}{\underline{S}_p^*} = \frac{420,237^2}{200 - j0} = 883 \Omega; \Rightarrow R_p = 883 \Omega; X_p = 0,$$

Сега можеме да пристапиме кон определувањето на сопствените и меѓусебните импеданции (адмитанции) на мрежата и определувањето на новата работна карактеристика на којашто ќе работи генераторот G после приклучувањето на потрошувачот. Пресметките на агловата карактеристика $P_2(\theta)$, во овој случај, ќе ги вршиме упростено, со занемарување на попречните гранки во мрежата. Во тој случај се добива следната шема (слика 4.3.1).



Слика 4.3.1

Ќе ја воведеме ознаката:

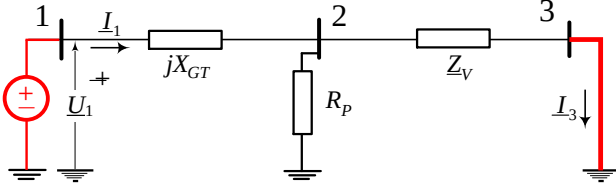
$$X_{GT} = X'_d + X_T = 114,29 + 47,62 = 161,91 \Omega.$$

Понатаму имаме (види задача 4.2):

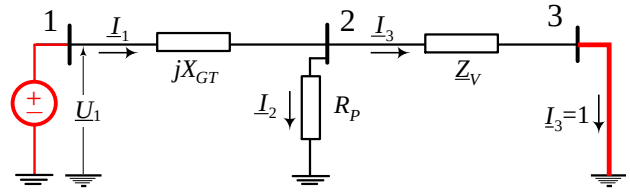
$$\underline{Z}_V = \underline{z} \cdot l = (0,03 + j0,34) \cdot 160 = (4,8 + j54,4) \Omega.$$

Елементот $\underline{Y}_{11}$ од матрицата на адмитанции на редуцираната мрежа е всушност влезна адмитанција ($\underline{Y}_{11} = \underline{I}_1 / \underline{U}_1$) во јазел „1“ од изворната мрежа кога сите активни јазли, освен првиот, се заземјат (слика 4.3.2).

Од друга страна елементот $\underline{Y}_{12}$ од матрицата на адмитанции на редуцираната мрежа претставува однос помеѓу струјата $\underline{I}_3$ што се одведува од заземјениот активен јазел и напонот $\underline{U}_1$, т.е. $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = \underline{I}_3 / \underline{U}_1$ истата изворна „кусо-врзана“ мрежа.



Слика 4.3.2



Слика 4.3.3

Во согласност со сликата 4.3.2, за влезната импеданција $\underline{Z}_{11} = \underline{U}_1 / \underline{I}_1$, ќе имаме:

$$\underline{Z}_{11} = 1 / \underline{Y}_{11} = jX_{GT} + R_p \parallel \underline{Z}_V = 304,663 \cdot e^{j86,7^\circ} \Omega,$$

$$\underline{Y}_{11} = 1 / \underline{Z}_{11} = 3,282 \cdot e^{-j86,7^\circ} \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

За да ја прсметаме меѓусебната адмитанција $\underline{Y}_{12}$ ќе постапиме на следниот начин. Нека претпоставиме дека струјата $\underline{I}_3$ што истекува во земјата ни е позната (нпр. $\underline{I}_3 = 1 + j0$). Тогаш напонот во јазелот „2“ ќе биде $\underline{U}_2 = \underline{Z}_V \underline{I}_3$, додека струјата на потрошувачот ќе биде $\underline{I}_2 = \underline{U}_2 / R_p = \underline{Z}_V / R_p \cdot \underline{I}_3$. Тогаш струјата $\underline{I}_1$ што тече во гранката jX_{GT} ќе биде: $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = (1 + \underline{Z}_V / R_p) \cdot \underline{I}_3$ додека напонот во јазелот „1“ ќе изнесува $\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + jX_{GT} \underline{I}_1 = \underline{Z}_V \cdot \underline{I}_3 + jX_{GT} \cdot (1 + \underline{Z}_V / R_p) \cdot \underline{I}_3$, или

$$\underline{U}_1 = (jX_{GT} + \underline{Z}_V + jX_{GT} \cdot \underline{Z}_V / R_p) \cdot \underline{I}_3 = \underline{Z}_{12} \cdot \underline{I}_3,$$

каде што

$$\underline{Z}_{12} = \left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_3} \right)_{\underline{U}_3=0} = jX_{GT} + \underline{Z}_V + jX_{GT} \cdot \underline{Z}_V / R_p = 217,247 \cdot e^{j91,365^\circ} \Omega, \text{ и}$$

$$\underline{Y}_{12} = 1 / \underline{Z}_{12} = 4,603 \cdot e^{-j91,365^\circ} \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

Според тоа добиваме:

$$\underline{Z}_{11} = 304,663 \Omega; \psi_{11} = 86,696^\circ; \alpha_{11} = 90 - \psi_{11} = 3,304^\circ;$$

$$\underline{Z}_{12} = 217,247 \Omega; \psi_{12} = 91,365^\circ; \alpha_{12} = 90 - \psi_{12} = -1,365^\circ.$$

Сега можеме да ја прсметаме агловата карактеристика на моќност $P_2(\theta)$ за овој режим

$$P_2(\theta) = \frac{E'^2}{\underline{Z}_{11}} \cdot \sin \alpha_{11} + \frac{E' \cdot U_3}{\underline{Z}_{12}} \cdot \sin(\theta - \alpha_{12}).$$

или

$$P_2(\theta) = 42,236 + 870 \cdot \sin(\theta + 1,365) \text{ MW.}^1$$

Електричната моќност $P_e = P_2(\theta)$ што генераторот ќе ја оддава во мрежата по вклучувањето на потрошувачот сега ќе се промени поради промената на работната карактеристика. Нејзината вредност веднаш непосредно после промената ќе биде:

$$P_e = P(\theta_0) = 42,236 + 870 \cdot \sin(19,7 + 1,365) = 354,94 \text{ MW}.$$

¹ Доколку прсметките ги правевме без какво и да е занемарување, ќе се добиеше следниот резултат: $P_{11} = 39,524 \text{ MW}$; $P_{12} = 879,174 \text{ MW}$; $\alpha_{12} = 1,436^\circ$; $P_0 = P_2(\theta_0) = P_{11} + P_{12} \cdot \sin(\theta_0 - \alpha_{12}) = 356,523 \text{ MW}$

т.е. таа ќе порасне за 51,89 MW. Поради тоа на оската од агрегатот ќе се јави негативен дебаланс $\Delta P = P_m - P_e(0^+) = 303,054 - 354,94 = -51,89$ MW а тоа ќе предизвика успорување на роторот и почеток на процесот на нишање на агрегатот.

в) Пресметка на временскиот тек $\theta(t)$ за време на нишањето на генераторот G

Зависноста $\theta(t)$ на аголот на изместување на емс $\underline{E}'$ во однос на напонот на крутата мрежа $\underline{U}_3$ за време на нишањето на агрегатот ќе ја пресметуваме нумерички, со помош на методот „чекор по чекор“.

Од досегашните пресметки произлезе дека во периодот пред вклучувањето на потрошувачот ($t \leq 0$) аголот на изместување изнесувал $\theta = \theta_0 = 19,7^\circ$, додека механичката моќност на турбината P_m и електричната моќност $P_e = P_G$ што генераторот ја оддавал во мрежата биле еднакви т.е. $P_m = P_e = 303,05$ MW. Значи дебалансот на моќност ΔP^- за $t < 0$ изнесува $\Delta P^- = 303,05 - 303,05 = 0$ додека дебалансот ΔP^+ непосредно после промената, во $t = 0^+$, изнесува $\Delta P^+ = 303,05 - 354,94 = -51,89$ MW.

Алгоритмот според којшто се пресметуваат аголот на изместување θ и неговите прирасти $\Delta\theta$, во даден момент $t = i \Delta t$, како што е познато, е опишан со следната равенка:

$$\Delta\theta_i = \Delta\theta_{i-1} + K \cdot \Delta P_{i-1}; \quad i=1, 2, \dots$$

каде што е $\Delta\theta_0 = 0$; $K = (\Delta t / M) = \Delta t \cdot \omega_0 / (S_n \cdot T_J)$. Притоа $\Delta P_{i-1} = P_m - P_{e,i-1}$ е дебалансот на моќноста за време на претходниот интервал, додека во точките на нагли промени (динамички удари) величината ΔP_{i-1} претставува средна вредност на дебалансот непосредно пред и после промената, т.е. $\Delta P_{i-1} = \Delta P_{i-1}^{sr} = (\Delta P_{i-1}^- + \Delta P_{i-1}^+) / 2$. На тој начин добиваме:

$$\Delta t = 0,1s; \quad M = \frac{S_n \cdot T_J}{\omega_0} = \frac{420 \cdot 6}{18\,000} = 0,14 \frac{s^2}{^\circ}; \quad K = \frac{\Delta t^2}{M} = \frac{1}{14} \frac{^\circ}{MW}$$

$$t=0 \quad \theta = \theta_0 = 19,7^\circ; \quad \Delta P_0 = \Delta P_0^{cp} = (\Delta P_0^- + \Delta P_0^+) / 2 = (0 - 51,89) / 2 = -25,945 \text{ MW}$$

$$i = 1; \quad t = 0,1s \quad \Delta\theta_1 = 0 + K \cdot \Delta P_0 = -25,945 / 14 = -1,85^\circ;$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \Delta\theta_1 = 19,7 - 1,85 = 17,85^\circ$$

$$P_2(\theta_1) = 42,236 + 870 \cdot \sin(17,85 + 1,365) = 328,57 \text{ MW}.$$

$$\Delta P_1 = P_m - P_2(\theta_1) = 303,05 - 328,57 = -25,52 \text{ MW};$$

$$i = 2; \quad t = 0,2s \quad \Delta\theta_2 = \Delta\theta_1 + K \cdot \Delta P_1 = -1,85 - 25,52 / 14 = -3,67^\circ;$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta_2 = 17,85 - 3,67 = 14,18^\circ.$$

$$\Delta P_2 = P_m - P_2(\theta_2) = 303,05 - 275,39 = 27,66 \text{ MW};$$

$$i = 3; \quad t = 0,3s \quad \Delta\theta_3 = \Delta\theta_2 + K \cdot \Delta P_2 = -3,67 + 27,66 / 14 = -1,69^\circ;$$

$$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta_3 = 14,18 - 1,69 = 12,49^\circ.$$

$$\Delta P_3 = P_m - P_2(\theta_3) = 303,05 - 250,51 = 52,54 \text{ MW};$$

$$i = 4; \quad t = 0,4s \quad \Delta\theta_4 = \Delta\theta_3 + K \cdot \Delta P_3 = -1,69 + 52,54 / 14 = 2,06^\circ;$$

$$\theta_4 = \theta_3 + \Delta\theta_4 = 12,49 + 2,06 = 14,55^\circ$$

$$\Delta P_4 = P_m - P_2(\theta_4) = 303,05 - 280,85 = 22,2 \text{ MW}$$

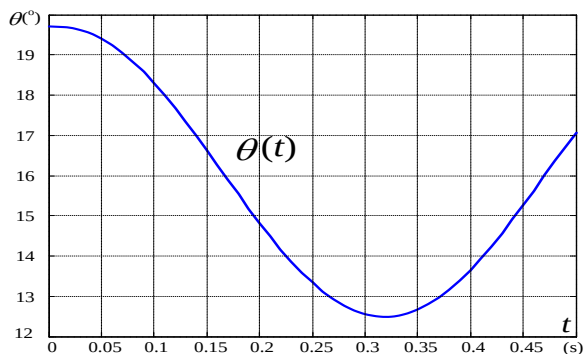
$$i = 5; t = 0,5s \quad \Delta\theta_5 = \Delta\theta_4 + K \cdot \Delta P_4 = 2,06 + 22,2/14 = 3,65^\circ;$$

$$\theta_5 = \theta_4 + \Delta\theta_5 = 14,55 + 3,65 = 18,2^\circ$$

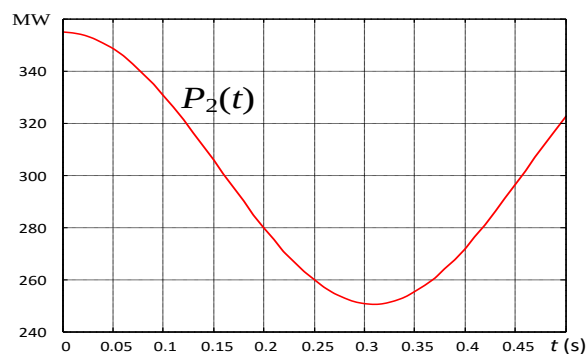
Во табелата 4.3.1 е даден табеларен приказ на зависноста $\theta(t)$ додека на сликите 4.3.4 и 4.3.5 е даден графички приказ на зависностите $\theta(t)$ и $P_2(t)$ за оддаваната моќност во мрежата..

Табела 4.3.1. Табеларен приказ на зависноста $\theta = \theta(t)$

t (s)	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
$\theta(^{\circ})$	19,70	17,85	14,18	12,49	14,55	18,20



Слика 4.3.4. Зависност $\theta(t)$



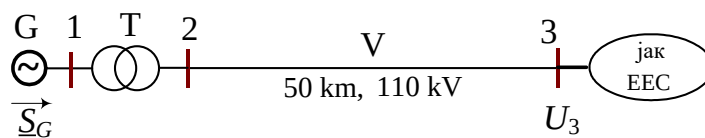
Слика 4.3.5. Зависност $P_2(t)$

□ □ □

Пример 4.4. Турбогенератор G преку трансформатор T и преносен вод V оддава моќност на крута мрежа. Напонот на крутата мрежа изнесува $U_3 = 110 \text{ kV} = \text{const.}$ и тој не зависи од режимот на работа на генераторот. Во дадениот режим на работа генераторот G оддава моќност $\underline{S}_G = (P_G + jQ_G) = (80 + j20) \text{ MVA}$ при напон $U_G = U'_1 = 10,563 \text{ kV}$ ($U_1 = k_T \cdot U'_1 = 116,193 \text{ kV}$).

Во моментот $t = 0$ доаѓа до појава на трифазна куса врска на средината на водот. Во моментот $t_1 = 0,1 \text{ s}$ доаѓа до исклучување на обата прекинувача на водот а во $t_2 = 0,3 \text{ s}$ до нивно повторно вклучување при што се претпоставува дека во меѓувреме причината за кусата врска исчезнала.

Да се утврди дали генераторот ќе остане во синхронизам со крутата мрежа.



Слика 4.4.1

Бројни вредности:

G: $S_n = 100 \text{ MVA}$; $U_n = 10,5 \text{ kV}$; $X''_d = X_i = 12\%$; $X'_d = 30\%$; $X_d = 120\%$; $T_J = 6 \text{ s}$.

T: $S_n = 100 \text{ MVA}$; $U_{n1}/U_{n2} = 10,5/115,5 \text{ kV/kV}$; $u_k = 12 \%$

V: $x = 0,4 \Omega/\text{km}$; $x_0 = 1,2 \Omega/\text{km}$; $l = 50 \text{ km}$.

Решение:

Задачата ќе ја решиме со примена на методот на единични (pu) величини. Ќе усвоиме $S_B = S_{nG} = 100 \text{ MVA}$ и $U_{B1}/U_{B2} = 10,5/115,5 \text{ kV/kV}$. На тој начин добиваме:

$$x'_d = \frac{X'_d}{Z_B} = \frac{X_d \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{30}{100} \cdot \frac{10,5^2}{100} \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,3 \text{ pu}.$$

Слично се добива $x_T = 0,12 \text{ pu}$; $x_V = 0,15 \text{ pu}$.

Понатаму имаме:

$$u_G = \frac{U_G}{U_{B1}} = \frac{10,563}{10,5} = 1,006 \text{ pu}; \quad u_3 = \frac{U_3}{U_{B1}} = \frac{110}{115,5} = 0,952 \text{ pu};$$

$$\underline{s}_G = \frac{\underline{S}_G}{S_B} = \frac{80 + j60}{100} = (0,8 + j0,6) \text{ pu}$$

$$\underline{e}_G = \underline{u}_G + jx_d \cdot (\underline{s}_G / \underline{u}_G)^* = 1,006 + j0,3 \cdot (0,8 - j0,6) / 1,006;$$

$$\underline{e}_G = (1,066 + j0,238) = 1,092 \cdot e^{j12,58^\circ} \text{ pu}.$$

$$\underline{z}_{11} = \underline{z}_{12} = jx_\Sigma = j(x'_d + x_T + x_V) = j(0,3 + 0,12 + 0,15) = j0,57 \text{ pu} \Rightarrow \alpha_{11} = \alpha_{12} = 0.$$

$$p_1(\theta) = \frac{e_G \cdot u_3}{x_\Sigma} \cdot \sin(\theta) = \frac{1,092 \cdot 0,952}{0,57} \cdot \sin(\theta) = 1,824 \cdot \sin(\theta) \text{ pu};$$

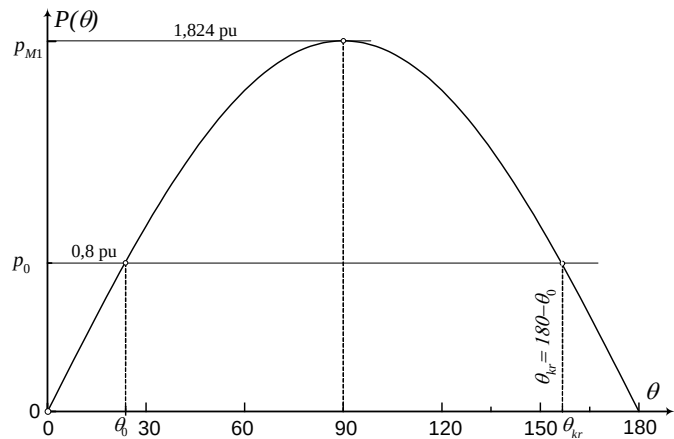
$$p_{M1} = 1,824 \text{ pu}; \quad p_0 = p_G = 0,8 \text{ pu}.$$

Понатаму, во согласност со сликата 4.4.2 имаме:

$$\theta_0 = \arcsin \frac{p_0}{p_{M1}} = \arcsin \frac{0,8}{1,824} = 26^\circ.$$

$$\theta_{kr} = 180 - \theta_0 = 156^\circ$$

После настанатата куса врска, работната карактеристика на којашто ќе работи генераторот G ќе биде $p_2(\theta) = 0$ ($p_{M2} = 0$ pu), така што за цело време додека трае кусата врска дебалансот Δp односно забрзувањето $\alpha = \Delta p / M$ ќе бидат константни: $\Delta p = p_0 = 0,8 \text{ pu} = \text{const}$. Истото важи и за периодот $t_1 \leq t \leq t_2$ кога е исклучен преносниот вод V.



Слика 4.4.2

Во случајот кога дебалансот Δp е константен и не зависи од променливата θ , диференцијалната равенка на движење на синхронизираниот агрегат може да се реши аналитички, во затворена форма. Во тој случај зависноста $\theta(t)$ ќе биде опишана со следната релација:

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{\alpha \cdot t^2}{2} = \theta_0 + \frac{\Delta p}{M} \cdot \frac{t^2}{2};$$

$$M = \frac{S_n \cdot T_J}{\omega_0} = \frac{1 \cdot 6}{18000} = \frac{1}{3000} \text{ pu}.$$

Применувајќи го правилото на еднакви површини може да се пресмета граничниот агол на исклучување θ_{ig} за кој се постигнува максималниот агол на нишање да ја достигне критичната вредност $\theta_{kr} = 156^\circ$:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_{ig}} (p_0 - 0) \cdot d\theta = \int_{\theta_{ig}}^{\theta_{gr}} [p_{M1} \sin(\theta) - p_0] \cdot d\theta.$$

Од последната релација следи изразот:

$$\cos \theta_{ig} = \frac{p_0 \cdot (\theta_{kr} - \theta_0) - p_{M1} \cdot \cos \theta_0}{p_{M1}} \Rightarrow \theta_{ig} = 85,38^\circ.$$

Значи, доколку аголот θ_2 што ќе се достигне во моментот на успешното АПВ е помал од вредноста на θ_{ig} , тогаш генераторот G ќе остане во синхронизам со мрежата и во тој случај велиме дека системот е динамички стабилен. Вредноста θ_2 на аголот на изместување што се достигнува во $t_2 = 0,3$ s ќе биде:

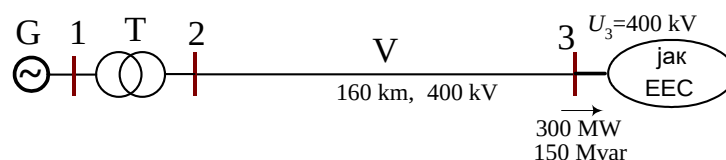
$$\theta_2 = \theta(t = t_2) = \theta_0 + \frac{\Delta p}{M} \cdot \frac{t_2^2}{2} = 26 + 0,8 \cdot 3000 \cdot \frac{0,3^2}{2} = 134^\circ.$$

Бидејќи $\theta_2 > \theta_{ig}$ произлегува дека генераторот ќе го изгуби синхронизмот со мрежата. Лесно може да се покаже дека за да остане системот динамички стабилен потребно е времето на АПВ да биде $t_2 \leq 0,222$ s.

□ □ □

Задача 4.1. Турбогенератор G со познати карактеристики, преку блок-трансформатор T и преносен вод V ја предава произведуваната енергија на јак ЕЕС (крута мрежа). Во посматраниот режим на работа ЕЕС прима моќност $\underline{S}_3 = P_3 + jQ_3 = (300 + j150)$ MVA при напон $U_3 = 400$ kV. Потребно е:

- Да се пресметаат приликите на почетокот од водот P_2 , Q_2 и U_2 ;
- Во моментот $t = 0$ при собирниците 2 доаѓа до вклучување на чисто активен потрошувач со моќност $P_p = 200$ MW. Да се определи новата аглова карактеристика на моќност на која ќе работи генераторот по вклучување на потрошувачот.
- Применувајќи го методот “чекор по чекор” да се определи временскиот тек $\theta(t)$ на нишањето на роторот на турбогенераторот во текот на првите 0,5 s од електромеханичкиот преоден процес, предизвикан од вклучувањето на потрошувачот. Пресметките да се изведат со временски чекор $\Delta t = 0,05$ s.



Бројни вредности:

G: $S_n = 420$ MVA; $U_n = 15,75$ kV; $X'_d = 30\%$; $T_J = 6$ s.

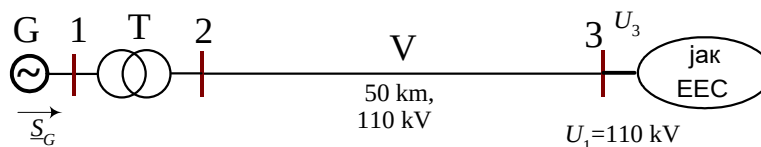
T: $S_n = 420$ MVA; $U_{n1}/U_{n2} = 15,75/400$ kV/kV; $u_k = 12,5\%$

V: $\underline{z} = (0,03 + j0,34)$ Ω/km ; $b = 3,23$ $\mu\text{S}/\text{km}$; $l = 160$ km.

□ □ □

Задача 4.2. Турбогенератор G преку трансформатор T и преносен вод V оддава моќност на крута мрежа. Напонот на крутата мрежа изнесува $U_3 = 110 \text{ kV} = \text{const.}$ и тој не зависи од режимот на работа на генераторот. Во дадениот режим на работа генераторот G оддава моќност $\underline{S}_G = (P_G + jQ_G) = (80 + j20) \text{ MVA}$ при напон $U_G = U'_1 = 10,563 \text{ kV}$ ($U_1 = k_T \cdot U'_1 = 116,193 \text{ kV}$). Во моментот $t = 0$ доаѓа до појава на трифазна куса врска на средината на водот. Во моментот $t_1 = 0,1 \text{ s}$ доаѓа до исклучување на обата прекинувача на водот а во $t_2 = 0,3 \text{ s}$ до нивно повторно вклучување при што се претпоставува дека во меѓувреме причината за кусата врска исчезнала.

Да се утврди дали генераторот ќе остане во синхронизам со крутата мрежа.



Бројни вредности:

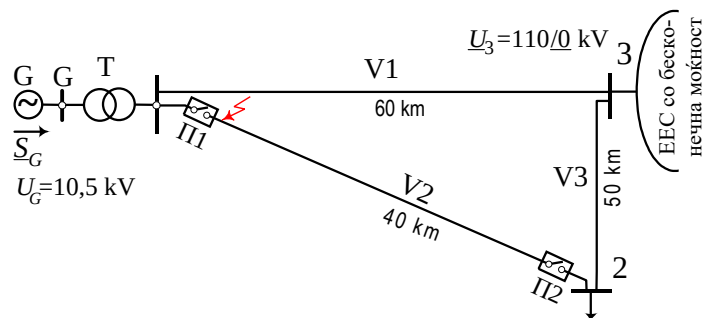
G: $S_n = 100 \text{ MVA}$; $U_n = 10,5 \text{ kV}$; $X''_d = X_i = 12\%$; $X'_d = 30\%$; $X_d = 120\%$; $T_J = 6 \text{ s}$.

T: $S_n = 100 \text{ MVA}$; $U_{n1}/U_{n2} = 10,5/115,5 \text{ kV/kV}$; $u_k = 12\%$

V: $x = 0,4 \Omega/\text{km}$; $x_0 = 1,2 \Omega/\text{km}$; $l = 50 \text{ km}$.

□ □ □

Пример 4.5. Во системот прикажан на сликата 4.5.1 генераторот G работи со својот номинален напон $U_G = 10,5 \text{ kV}$ и оддава номинална моќност во мрежата $\underline{S}_G = \underline{S}_n = (40 + j30) \text{ MVA}$. Напонот на собраниците 3 кај крутата мрежа изнесува $U_3 = 110 \cdot e^{j0} \text{ kV}$. Аголот θ помеѓу фазорите $\underline{U}_G$ и $\underline{U}_3$ притоа изнесува $\theta_G = 1,9^\circ$.



Слика 4.5.1

Во еден момент настанува трифазна куса врска на почетокот од водот V2, веднаш зад прекинувачот P1. Таа трае вкупно $t_{iskl} = 0,1 \text{ s}$ а се елиминира со истовремено исклучување на прекинувачите P1 и P2. После тоа системот продолжува да работи но без исклучениот вод V2. Да се пресмета максималниот агол на $\theta_{\max}$ нишање на роторот од генераторот G. Пресметките да се направат со занемарување на активната отпорност на водовите.

Податоци за параметрите на елементите од системот:

G: 50 MVA ; $10,5 \text{ kV}$; $\cos \varphi_n = 0,8$; $X''_d = X_i = 12\%$; $X'_d = 30\%$; $X_d = 140\%$; $X_q = 80\%$; $T_J = 6 \text{ s}$;

T: 50 MVA ; $10,5/115,5 \text{ kV/kV}$; $u_k = 12\%$;

Сите водови имаат исти подолжни параметри $\underline{z} = (r + jx) = 0,123 + j0,40 \Omega/\text{km}$.

Решение:

а) Пресметка на е.м.с. на генераторот $\underline{E}'$

Најнапред ќе ја пресметаме внатрешната е.м.с. на генераторот E' и нејзиниот аргумент θ во однос на кругата мрежа. За таа цел фазорот $\underline{U}_G$ привремено ќе го поставиме на фазната оска, т.е. усвојуваме $\underline{U}_G = U_G \cdot e^{j0^\circ}$. Понатаму имаме:

$$X'_d = \frac{X'_d \% U_n^2}{100 S_n} = \frac{30}{100} \cdot \frac{10,5^2}{50} = 0,6615 \Omega.$$

$$\underline{E}' = \underline{U}_G + \frac{Q_G X'_d}{\underline{U}_G} + j \frac{P_G X'_d}{\underline{U}_G},$$

$$\underline{E}' = 10,5 + \frac{30 \cdot 0,6615}{10,5} + j \frac{40 \cdot 0,6615}{10,5} = 12,644 \cdot e^{j11,5^\circ} \text{ kV}.$$

Сведено на 110 kV страна, се добива: $E' = 139,1 \text{ kV}$.

Бидејќи фазорот $\underline{U}_G$ е изместен за агол $\theta_G = 1,9^\circ$ во однос на напонот $\underline{U}_3$, тогаш аголот θ_0 што постоел помеѓу фазорите $\underline{E}'$ и $\underline{U}_3$ во режимот што му претходел на пореметувањето ќе биде:

$$\theta_0 = 11,5 + 1,9 = 13,4^\circ.$$

б) Пресметка на работните карактеристики $P_1(\theta)$ $P_2(\theta)$ за време на кусата врска и за време на преодниот режим, по исклучувањето на кусата врска.

Бидејќи се работи за трифазна куса врска настаната практично на собирниците во самата електрана, моќноста што ќе ја оддава генераторот во мрежата за време на кусата врска ќе биде еднаква на нула, т.е. $P_1(\theta) = 0$.

По исклучувањето на повредениот вод, се елиминира кусата врска и системот продолжува да работи, но сега на нова карактеристика $P_2(\theta)$ која ќе зависи од реактанциите X'_d , X_T и X_V . Нивните вредности, сведени на 110 kV страна ќе бидат:

$$X'_d = 0,6615 \cdot k_T^2 = 0,6615 \cdot (115,5/10,5)^2 = 80,042 \Omega;$$

$$X_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{12}{100} \cdot \frac{115,5^2}{50} = 32 \Omega; \quad X_V = x \cdot l = 0,4 \cdot 60 = 24 \Omega.$$

$$X'_\Sigma = X'_d + X_T + X_V = 80,042 + 32 + 24 = 136,042 \Omega.$$

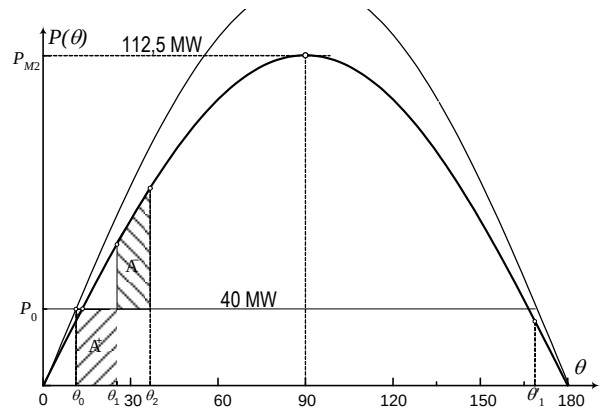
$$P_{M2} = \frac{E \cdot U_3}{X'_\Sigma} = \frac{139,1 \cdot 110}{136,042} = 112,5 \text{ MW}.$$

$$P_2(\theta) = P_{M2} \cdot \sin \theta = 112,5 \cdot \sin \theta.$$

За време на кусата врска аголот θ ќе се менува по законот:

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{\Delta P}{M} \cdot \frac{t^2}{2} = \theta_0 + \frac{P_0}{M} \cdot \frac{t^2}{2}.$$

$$P_0 = P_G = 40 \text{ MW}; \quad M = \frac{S_n \cdot T_J}{\omega_0} = \frac{5 \cdot 6}{18.000} = \frac{1}{60} (\text{°el/s}) \Rightarrow \theta(t) = 13,4 + 1200 \cdot t^2 (\text{°el}).$$



Слика 4.5.2

За $t = t_{iskl} = 0,1$ s ќе го добиеме аголот $\theta_1 = \theta_{iskl}$:

$$\theta_1 = 13,4 + 1200 \cdot 0,1^2 = 13,4 + 12 = 25,4^\circ.$$

Сега останува уште да го пресметаме максималниот агол на нишање $\theta_{\max} = \theta_2$ (слика 4.5.2). Применувајќи го правилото на еднакви површини, врз основа на сликата 4.5.1 можеме да пишуваме:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_1} P_0 \cdot d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (P_{M2} \cdot \sin \theta - P_0) \cdot d\theta;$$

од каде што, по средувањето се добива следната нелинеарна равенка по непознатата θ_2 :

$$\cos \theta_2 = \cos \theta_1 - \frac{P_0}{P_{M2}} \cdot (\theta_2 - \theta_0), \text{ или:}$$

$$f(\theta_2) \equiv \cos \theta_2 + 0,35558 \cdot \theta_2 - 0,98649 = 0.$$

Решението на оваа равенка гласи: $\theta_2 = \theta_{\max} = 44,98^\circ$.

□ □ □

Пример 4.6. Да се пресмета граничниот агол на исклучување на кусата врска θ_{ig} во случајот анализиран во претходната задача 4.5, а потоа и граничното време на исклучување на трифазната куса врска t_{ig} .

Решение:

Граничен агол на исклучување на кусата врска θ_{ig} е оној агол за којшто се добива $A^+ = A_{\max}^-$. Значи неговата вредност можеме да ја пресметаме тргнувајќи од условот за еднаквост на површините на забрзување A^+ и на успорување $A_{\max}^-$, во согласност со сликата 4.6.1.

$$\int_{\theta_0}^{\theta_{ig}} (P_0 - 0) \cdot d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta'1} [P_{M2} \sin(\theta) - P_0] \cdot d\theta$$

Доколку кусата врска се исклучи точно во моментот кога аголот на нишање θ ја достигнал вредноста θ_{ig} тогаш во фазата на успорување тој

ќе дојде до критичната вредност $\theta'1$ што одговара на случајот кога е $A^+ = A_{\max}^-$. Од тука произлегува заклучокот дека за секој агол на исклучување $\theta < \theta_{ig}$ ќе биде $A^+ < A_{\max}^-$, т.е. генераторот ќе остане во синхронизам со мрежата, а системот ќе биде динамички стабилен.

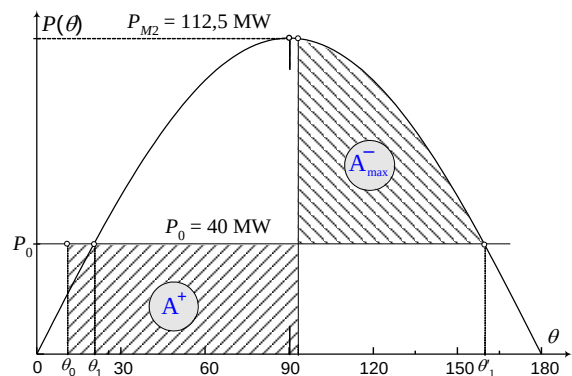
Од последната релација која што произлегува од примената на правилото на еднакви површини следи изразот:

$$P_0 \cdot (\theta_{ig} - \theta_0) = P_0 \cdot (\theta_{ig} - \theta'1) + P_{M2} \cdot (\cos \theta_{ig} - \cos \theta'1) \Rightarrow \cos \theta_{ig} = \cos \theta'1 + \frac{P_0}{P_{M2}} \cdot (\theta'1 - \theta_0).$$

Со замена на конкретните вредности ќе добиеме:

$$\theta_1 = 180 - \theta_1 = 154,6^\circ;$$

$$\cos \theta_{ig} = \cos(154,6^\circ) + \frac{40}{112,5} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot (154,6 - 13,4) = -0,0271 \Rightarrow \theta_{ig} = 91,553^\circ.$$



Слика 4.6.1

Во претходната задача утврдиме дека за време на кусата врска аголот θ ќе се менува по законот:

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{\Delta P}{M} \cdot \frac{t^2}{2} = \theta_0 + \frac{P_0}{M} \cdot \frac{t^2}{2}.$$

Според тоа граничното време на исклучување t_{ig} ќе го добиеме со помош на последната формула, бидејќи за $t = t_{ig}$ ќе биде $\theta = \theta_{ig}$. Од таму следи:

$$t_{ig} = \sqrt{\frac{2M}{P_0} \cdot (\theta_{ig} - \theta_0)} = \sqrt{\frac{2}{60 \cdot 40} \cdot (91,553 - 13,4)} = 0,255 \text{ s}.$$

Овој резултат е во согласност со заклучокот изведен во претходната задача.

□ □ □

Пример 4.7. Да се пресмета максималниот агол на нишање $\theta_{\max} = \theta_2$ во случајот анализиран во претходните Примери 4.5 и 4.6 преку решавање на равенката на движење на синхрониот агрегат. Пресметките да се вршат со временски чекор $\Delta t = 0,05 \text{ s}$.

Решение:

Равенката на движење на синхрониот агрегат:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e(\theta)}{M} \equiv \frac{\Delta P}{M}.$$

Ќе ја решиме со примена на нумеричката постапка наречена “метод чекор по чекор”. Притоа, покрај пресметувањето на аголот на изместување $\theta(t)$ ќе ја пресметуваме и релативната кружна брзина на вртење на роторот ω' , според следниот алгоритам:

$$\Delta\omega'_k = \alpha_{k-1} \cdot \Delta t; \quad \omega'_k = \omega'_{k-1} + \Delta\omega'_k = \omega'_{k-1} + \alpha_{k-1} \cdot \Delta t;$$

$$\Delta\theta_k = \omega'_k \cdot \Delta t; \quad \theta_k = \theta_{k-1} + \Delta\theta_k; \quad k=1,2,3,\dots$$

За почетните услови, согласно изложеното во примерот 4.5, ќе имаме:

$$\text{за } t = 0; \quad \theta(0) = \theta_0 = 13,4^\circ \text{ и } \omega'_0 = \omega(0) - \omega_0 = 0.$$

Со $t = 0$ ќе го означиме моментот на настанување на кусата врска, т.е. почетокот на посматрањето на преодниот процес. Бидејќи во тој момент ќе имаме дисконтинуитет, т.е. нагла промена на дебалансот на агрегатот $\Delta P = P_m - P_e$, вредноста на забрзувањето α_0 со која ќе го пресметуваме прирастот $\Delta\omega'_1$ на релативната брзина на вртење за првиот интервал Δt , ќе го добиеме како средна вредност од забрзувањето α_0^- пред и забрзувањето α_0^+ непосредно по настанувањето на кусата врска, т.е. $\alpha_0 = (\alpha_0^- + \alpha_0^+)/2$. Бидејќи дебалансот на моќности пред настанувањето на кусата врска бил $\Delta P_{0-} = [P_m - P_e(0^-)] = P_m - P_m = 0$, тогаш и соодветното аголно забрзување ќе биде $\alpha_0^- = \Delta P_{0-}/M = 0$. Но по појавата на кусата врска електричната моќност што ја оддава генераторот во мрежата нагло ќе се промени (т.е. намали на нула) поради што ќе се јави позитивен дебаланс на моќностите. За дебалансот ΔP_{0+} непосредно по настаната куса врска ќе имаме:

$$\Delta P_{0+} = [P_m - P_e(0^+)] = P_m - 0 = P_m = 40 \text{ MW}.$$

Поради тоа на оската од роторот на синхрониот агрегат ќе се јави позитивно аголно забрзување чија вредност во $t = 0^+$ (а и подоцна, за цело време додека трае кусата врска) ќе биде:

$$\alpha_{0^+} = \Delta P_{0+} / M = 40 \cdot 60 = 2400 \text{ }^\circ/\text{s}^2.$$

Во согласност со напред реченото, за средното забрзување α_0 се добива:

$$\alpha_0 = (\alpha_0^- + \alpha_0^+) / 2 = (0 + 2400) / 2 = 1200 \text{ }^\circ/\text{s}^2.$$

Според тоа, за првиот временски интервал ќе имаме:

➤ **$k = 1$; $t = 1 \cdot \Delta t = 0,05 \text{ s}$:**

$$\Delta\omega'_1 = \alpha_0 \cdot \Delta t = 1200 \cdot 0,05 = 60 \text{ }^\circ/\text{s};$$

$$\omega'_1 = \omega'_0 + \Delta\omega'_1 = 0 + 60 = 60 \text{ }^\circ/\text{s}.$$

$$\Delta\theta_1 = \omega'_1 \cdot \Delta t = 60 \cdot 0,05 = 3^\circ;$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \Delta\theta_1 = 13,4 + 3 = 16,4^\circ.$$

Понатаму следи вториот интервал во кој нема дисконтиунитет, т.е. нагла промена на електричната моќност на генераторот. Поради тоа аголно забрзување α_1 со кое што ќе го пресметуваме прирастот на релативната брзина $\Delta\omega'$ во овој интервал ќе се добие со пресметка на дебалансот на почетокот на овој интервал, во $t = 0,05 \text{ s}$, т.е.:

$$P_{e1} = P_{M1} \cdot \sin(\theta_1) = 0 \cdot \sin(16,4^\circ) = 0.$$

$$\Delta P_1 = P_m - P_{e1} = 40 \text{ MW}; \quad \alpha_1 = \Delta P_1 / M = 40 \cdot 60 = 2400 \text{ }^\circ/\text{s}^2.$$

Сега можеме да ги пресметаме прирастите $\Delta\omega'$ и $\Delta\theta$ во овој интервал:

➤ **$k = 2$; $t = 2 \cdot \Delta t = 0,10 \text{ s}$:**

$$\Delta\omega'_2 = \alpha_1 \cdot \Delta t = 2400 \cdot 0,05 = 120 \text{ }^\circ/\text{s}; \quad \omega'_2 = \omega'_1 + \Delta\omega'_2 = 60 + 120 = 180 \text{ }^\circ/\text{s}.$$

$$\Delta\theta_2 = \omega'_2 \cdot \Delta t = 180 \cdot 0,05 = 9^\circ; \quad \theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta_2 = 16,4 + 9 = 25,4^\circ.$$

Бидејќи во $t = t_{iskl} = 0,1 \text{ s}$ доаѓа до исклучување на повредениот вод заедно со кусата врска, веднаш на почетокот од следниот временски интервал ќе настане нов дисконтиунитет а генераторот ќе продолжи да работи на карактеристиката $P_2(\theta) = P_{M2} \cdot \sin(\theta) = 112,5 \cdot \sin(\theta)$. Значи иако во периодот $0 < t \leq t_{iskl}$, до моментот на исклучувањето на кусата врска, тој не оддавал никаква електричка моќност во мрежата, во $t = 0,1^+$ тој ќе почне да дава електричка моќност чија вредност, на почетокот, ќе биде $P_e(0,1^+) = P_2 = P_{M2} \cdot \sin(\theta_2) = 112,5 \cdot \sin 25,4^\circ = 48,26 \text{ MW}$. На оваа моќност одговара негативен дебаланс чија што вредност ќе биде:

$$\Delta P_2 = P_m - P_2 = 40 - 48,26 = -8,26 \text{ MW}; \quad \Rightarrow \quad \alpha_2^+ = \Delta P_2 / M = -8,26 \cdot 60 = -495,4 \text{ }^\circ/\text{s}^2.$$

Поради тоа пресметката на забрзувањето α_2 со кое ќе го определиме прирастот $\Delta\omega'_3$ ќе ја извршиме на наполно ист начин како и при пресметката на забрзувањето α_0 за моментот на дисконтиунитет $t = 0$, како средна вредност од забрзувањата пред и по исклучувањето на повредениот вод, т.е.:

$$\alpha_2 = (\alpha_2^- + \alpha_2^+) / 2 = (2400 - 495,4) / 2 = 952,3 \text{ }^\circ/\text{s}^2.$$

Според тоа, за третиот временски интервал ќе имаме:

➤ **$k = 3$; $t = 3 \cdot \Delta t = 0,15 \text{ s}$:**

$$\Delta\omega'_3 = \alpha_2 \cdot \Delta t = 952,3 \cdot 0,05 = 47,62 \text{ }^\circ/\text{s}; \quad \omega'_3 = \omega'_2 + \Delta\omega'_3 = 180 + 47,62 = 227,62 \text{ }^\circ/\text{s}.$$

$$\Delta\theta_3 = \omega'_3 \cdot \Delta t = 227,62 \cdot 0,05 = 11,38^\circ; \quad \theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta_3 = 25,4 + 11,38 = 36,78^\circ.$$

За потребите на наредниот чекор, ќе ја пресметаме вредноста на дебалансот ΔP_3 и аголното забрзување α_3 на крајот од третиот, односно почетокот од четвртиот интервал:

$$\Delta P_3 = P_m - P_{M2} \cdot \sin \theta_3 = 40 - 112,5 \cdot \sin 36,78^\circ = 40 - 67,36 = -27,36 \text{ MW};$$

$$\alpha_3 = \Delta P_3 / M = -27,36 \cdot 60 = -1641^\circ/\text{s}^2.$$

➤ $k = 4; t = 4 \cdot \Delta t = 0,20 \text{ s};$

$$\Delta \omega'_3 = \alpha_2 \cdot \Delta t = 952,3 \cdot 0,05 = 47,62^\circ/\text{s}; \quad \omega'_3 = \omega'_2 + \Delta \omega'_3 = 180 + 47,62 = 227,62^\circ/\text{s}.$$

$$\Delta \theta_3 = \omega'_3 \cdot \Delta t = 227,63 \cdot 0,05 = 11,38^\circ; \quad \theta_3 = \theta_2 + \Delta \theta_3 = 25,4 + 11,38 = 36,78^\circ \text{ итн.}$$

Вредностите на пресметаните величини за преостанатите временски моменти од преодниот процес се прикажани во табелата 4.7.1. Од неа отчитуваме дека максималниот агол на нишање изнесува $\theta_{\max} = 45,6^\circ$ што е сосема блиску до „егзактната“ вредност $\theta_{\max} = 44,98^\circ$, пресметана аналитички во примерот 4.5. Разликата се должи на фактот што применетиот метод „чекор по чекор“ е нумерички и како таков тој секогаш ќе дава приближно решение.

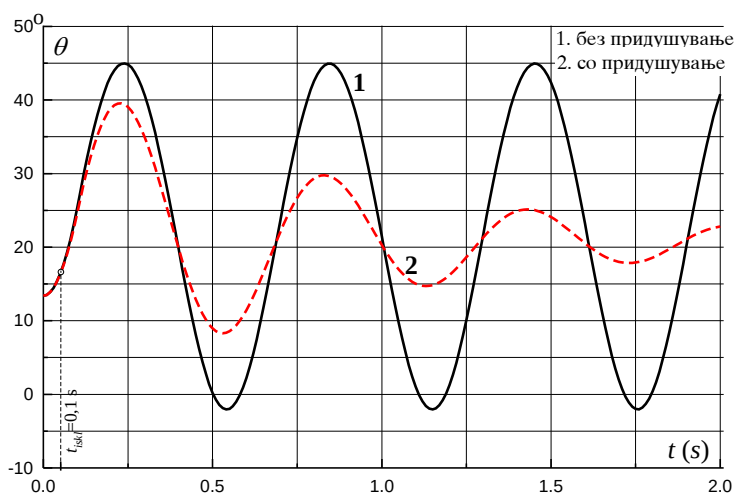
Табела 4.7.1. Приказ на решението на преодниот процес

k	t_k	$\Delta \omega'_k$	ω'_k	$\omega'_k \%$	$\Delta \theta_k$	θ_k	$Pe(\theta_k)$	α_{k-1}
/1/	/2/	/3/	/4/	/5/	/6/	/7/	/8/	/9/
	0.00 ⁻	/	0.00	0.00	/	13.40	40.00	0.0
	0.00 ⁺	/	0.00	0.00	/	13.40	0.00	2400.0
0	0.00	/	0.00	0.00	/	13.40	/	$\alpha_{sr}=1200$
1	0.05	60.00	60.00	0.33	3.00	16.40	0.00	2400.0
	0.10 ⁻		180.00	1.00		25.40	0.00	2400.0
	0.10 ⁺		180.00	1.00		25.40	48.26	-495.3
2	0.10	120.00	180.00	1.00	9.00	25.40	/	$\alpha_{sr}=952.3$
3	0.15	47.62	227.62	1.26	11.38	36.78	67.36	-1641.6
4	0.20	-82.08	145.54	0.81	7.28	44.06	78.23	-2293.8
5	0.25	-114.69	30.85	0.17	1.54	45.60	80.38	-2422.7
6	0.30	-121.13	-90.29	-0.50	-4.51	41.09	73.93	-2036.0
7	0.35	-101.80	-192.09	-1.07	-9.60	31.48	58.75	-1125.0
8	0.40	-56.25	-248.34	-1.38	-12.42	19.06	36.75	195.3
9	0.45	9.76	-238.57	-1.33	-11.93	7.14	13.97	1561.5
10	0.50	78.08	-160.50	-0.89	-8.02	-0.89	-1.75	2504.8
11	0.55	125.24	-35.26	-0.20	-1.76	-2.65	-5.21	2712.4
12	0.60	135.62	100.36	0.56	5.02	2.37	4.64	2121.4
13	0.65	106.07	206.43	1.15	10.32	12.69	24.71	917.5
14	0.70	45.88	252.30	1.40	12.62	25.30	48.08	-484.9
15	0.75	-24.25	228.06	1.27	11.40	36.71	67.24	-1634.5
16	0.80	-81.72	146.34	0.81	7.32	44.02	78.18	-2290.8
17	0.85	-114.54	31.80	0.18	1.59	45.61	80.39	-2423.7
18	0.90	-121.18	-89.39	-0.50	-4.47	41.14	74.02	-2041.0
19	0.95	-102.05	-191.44	-1.06	-9.57	31.57	58.90	-1133.9
20	1.00	-56.70	-248.14	-1.38	-12.41	19.16		

Легенда: /1/ реден број; /2/ момент на посматрање (s) ($t_k = k \cdot \Delta t$); /3/ прираст на релативната кружна брзина на вртење на роторот за време на k -тиот интервал ($^\circ/\text{s}$); /4/ релативна кружна брзина на вртење на роторот во моментот t_k ($^\circ/\text{s}$); /5/ лизгање, т.е. релативна кружна брзина на вртење на роторот во моментот t_k , изразена во (%) од синхроната брзината на вртење ω_0 ; /6/ прираст на аголот на роторот за време на k -тиот интервал ($^\circ$); /7/ агол на изместување на роторот во моментот $t_k = k \cdot \Delta t$ ($^\circ$); /8/ електрична моќност што генераторот ја оддава мо мрежата во моментот $t_k = k \cdot \Delta t$ (MW); /9/ аголно забрзување на роторот од агрегатот на крајот на $k-1$ интервал, во $t_{k-1} = (k-1) \cdot \Delta t$, т.е. на почетокот на следниот, k -ти интервал.

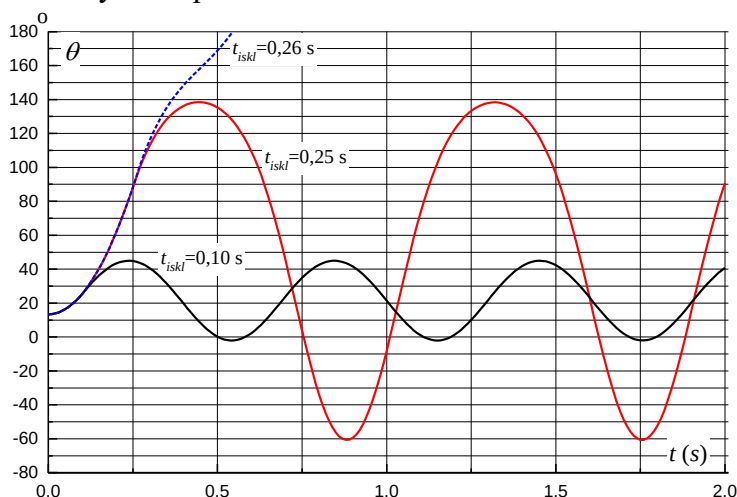
Резултатите од табелата 4.7.1. се прикажани и графички, на сликата 4.7.1. На неа се прикажани две криви, 1 и 2. Кривата 1 се однесува на случајот кога во пресметките не е земе-

но предвид постоењето на придушниот (асинхрониот) момент којшто се должи на индуцираните струи во придушната намотка за време на преодниот процес. Кривата 2 го преставува временскиот тек на нишањето на агрегатот $\theta(t)$ кога во пресметките е уважено постоењето на асинхрониот (придушниот) момент. Притоа се сметало дека асинхрониот момент е линеарно зависен од лизгањето на роторот s и дека тој ја достигнува вредноста на номиналниот момент на генераторот M_n при „номинално“ лизгање $s_n = 7\%$, т.е. кога релативната брзина на вртење на роторот е $\omega' = 1,07 \cdot \omega_0$ или $\omega' = 0,93 \cdot \omega_0$. Од табелата 4.7.1 (колони 5/) гледаме дека најголемото лизгање што се постигнало во текот на преодниот процес изнесува само 1,4% во моментот $t = 0,7$ s, во фазата на забрзување. На ова лизгање му одговара асинхрон момент, односно асинхрона моќност, од 20% од соодветните номинални вредности, што иако не претставува голема вредност, сепак е доволно осцилациите брзо да се придушат.



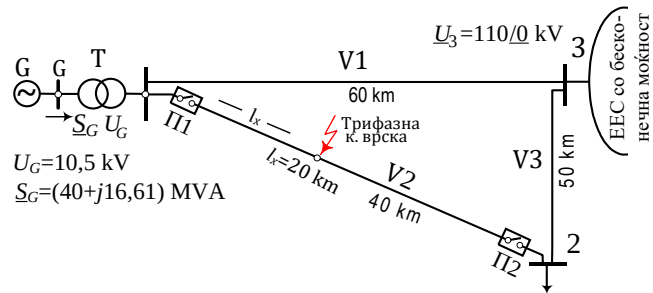
Слика 4.7.1. Нишање на агрегатот кога времето на исклучување на кусата врска е $t_{iskl} = 0,1$ s. 1) без уважување на придушниот момент; 2) со негово уважување

На сликата 4.7.2 се прикажани временските текови на нишање $\theta(t)$ на агрегатот за разни времиња на исклучување на кусата врска.



Слика 4.7.2. Нишање на агрегатот за разни времиња на исклучување на кусата врска

Пример 4.8. Се посматра ситуација кога во системот од Примерот 4.5 трифазната куса врска настанала на средината од водот V2 (слика 4.8.1). Таа трае вкупно $t_{iskl} = 0,1$ s а се елиминира со истовремено исклучување на прекинувачите П1 и П2. После тоа системот продолжува да работи но без исклучениот вод V2.



Слика 4.8.1

Потребно е:

- Да се пресмета максималниот агол на θ_{max} нишање на роторот од генераторот G;
- Да се пресмета граничниот агол θ_{ig} како и граничното време на исклучување на трифазната куса врска t_{ig} настаната на наведената локација. Пред појавата на кусата врска генераторот работел во својот номинален напон $U_G = 10,5$ kV ($U'_G = 115,5$ kV), и оддавал моќност $S_G = (40+j16,61)$ MVA додека напонот на собирниците „3“ на крутата мрежа изнесувал 110 kV.

Пресметките и овој пат да се извршат со занемарување на активните отпорности на елементите од системот.

Решение:

За решавање на овој проблем ќе биде неопходно да се анализираат три различни режими на работа на системот: 1) појдовниот, стационарен режим на работа; 2) режимот со трифазна куса врска настаната на растојание $l_x = 20$ km, сметано од почетокот на водот V2 и 3) режим со исклучен вод V2.

1) Пресметка на појдовниот, стационарен, режим Определување на карактеристиката $P_1(\theta)$

Нека напонот на крутата мрежа $\underline{U}_3 = \underline{U}_m$ го поставиме на референтната оска, т.е. $\underline{U}_m = U_m \cdot e^{j0} = 110$ kV. Пресметките на појдовниот, стационарен, режим покажуваат дека внатрешната е.м. сила на генераторот, сведена кон 110 kV страна, изнесува:

$$\underline{E} = E \cdot e^{j\theta_0} = 130 \cdot e^{j20,71^\circ} \text{ kV}; \quad E = 130 \text{ kV}; \quad \theta_0 = 20,71^\circ; \quad P_0 = P_G = 40 \text{ MW}.$$

Работната карактеристика $P_1(\theta)$ на која ќе работи генераторот во овој режим изнесува:

$$P_1(\theta) = \frac{E \cdot U_m}{X_{\Sigma 1}} \cdot \sin(\theta) = P_{M1} \cdot \sin(\theta) :$$

каде што е:

$$X_{\Sigma 1} = X'_d + X_T + X_{V1} \Pi(X_{V2} + X_{V3}) = 80,04 + 32,02 + \frac{24 \cdot (16 + 20)}{24 + 16 + 20} = 126,458 \, \Omega.$$

$$P_{M1} = \frac{E \cdot U_m}{X_{\Sigma 1}} = \frac{130 \cdot 110}{126,458} = 113,087 \text{ MW}.$$

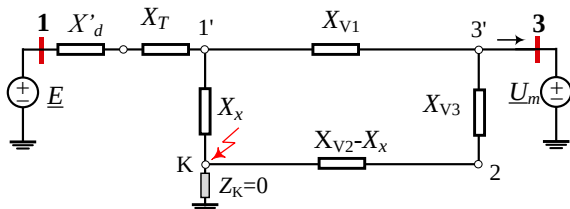
2) Пресметка на режимот со куса врска. Определување на карактеристиката $P_2(\theta)$

Определувањето на агловата карактеристика $P_2(\theta)$ за овој режим ќе го вршиме со помош на шемата од слика 4.8.2 во која кусата врска е моделирана со импеданцијата на куса врска $\underline{Z}_K = jX_K = 0$, поставена напречно, на местото на грешката. После трансфигурацијата на „свездата“ во еквивалентен триаголник, се добива шемата од слика 4.8.3. Од неа е јасно дека реактанцијата $X_{\Sigma 2}$ на т.н. „трансфер“ импеданција којашто директно ги поврзува генераторс-

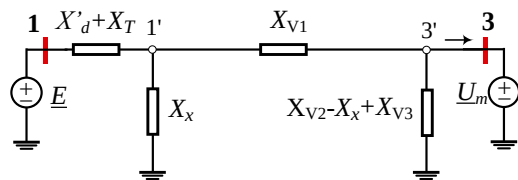
ките јазли „1“ и „3“ и која што се добива со уште една трансфигурација „свезда – триаголик“, изнесува:

$$X_{\Sigma 2} = X'_d + X_T + X_{V1} + \frac{(X'_d + X_T) \cdot X_{V1}}{X_x} = 80,04 + 32,02 + 24 + \frac{112,06 \cdot 24}{8} = 472,232 \, \Omega.$$

$$P_{M2} = \frac{E \cdot U_m}{X_{\Sigma 2}} = \frac{130 \cdot 110}{472,232} = 30,283 \, \text{MW}; \quad P_{M2} = 30,283 \, \text{MW}.$$



Слика 4.8.2



Слика 4.8.3

3) Определување на карактеристиката $P_3(\theta)$ со исклучен вод V2

По исклучувањето на водот V2 работната карактеристика $P_3(\theta)$ на која ќе работи генераторот во овој режим ќе биде:

$$P_3(\theta) = \frac{E \cdot U_m}{X_{\Sigma 3}} \cdot \sin(\theta) = P_{M3} \cdot \sin(\theta)$$

каде што е:

$$X_{\Sigma 3} = X'_d + X_T + X_{V1} = 80,04 + 32,02 + 24 = 136,06 \, \Omega.$$

$$\Rightarrow P_{M3} = \frac{E \cdot U_m}{X_{\Sigma 3}} = \frac{130 \cdot 110}{136,06} = 105,108 \, \text{MW}.$$

4) Пресметка на максималниот агол на нишање на роторот од генераторот $\theta_{\max}$

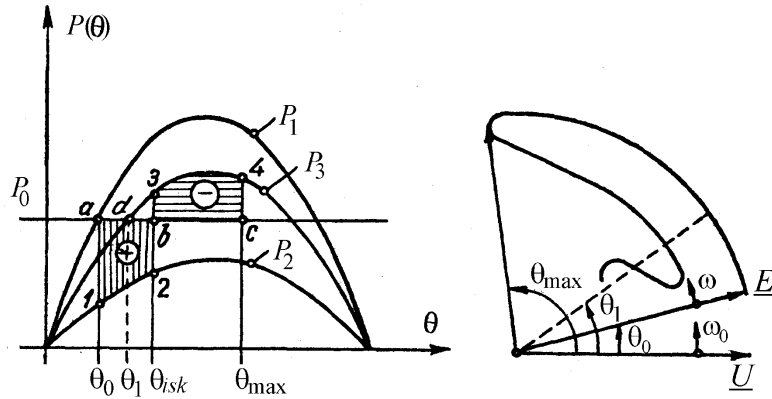
Пресметката на максималниот агол на нишање на роторот за време на преодниот процес може да се изврши на два начина: 1) со примена на правилото на еднакви површини, слично како што е тоа направено во Примерот 4.5 и 2) со директно решавање на диференцијалната равенка на движење на синхронизираниот агрегат и определување на зависноста $\theta(t)$, применувајќи ја, на пример, нумеричката постапка „чекор по чекор“, како што е тоа направено во Примерот 4.7. Во случајот тоа ќе го направиме на првиот начин.

Најнапред ќе го пресметаме аголот $\theta = \theta_{isk}$ што се постигнал во моментот на исклучувањето на кусата врска ($t = t_{isk} = 0,1 \, \text{s}$). За таа цел ќе ја примениме нумеричката постапка „чекор по чекор“, со помош на која ќе ја определиме зависноста $\theta(t)$ при забрзувањето на роторот на генераторот за време на трајна трифазна куса врска во тоќката „К“, кога генераторот работи на карактеристиката $P_2(\theta) = P_{M2} \cdot \sin(\theta)$ (слика 4.8.4). Таа зависност за анализираниот случај е пресметана, а резултатите се дадени во табелата 4.8.1.

Табела 4.8.1. Зависност $\theta(t)$ на аголот на изместување на е.м. сила

$t \, (\text{s})$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\theta (^{\circ})$	20,71	22,90	29,29	39,44	52,71	68,36	85,82	104,79	125,40	148,37	175,01

Од оваа табела гледаме дека аголот θ во моментот на исклучувањето ($t = t_{isk} = 0,1$ s) ја достигнал вредноста $\theta_{isk} = 29,29^\circ \equiv 0,5112$ rad. Сега веќе можеме, со примена на правилото на еднакви површини, да ја пресметаме и бараната вредност θ_{max} што ќе ја постигне аголот на изместување во моментот која тој сета своја кинетичка енергија што ја добил во фазата на забрзување (пропорционална на површината на забрзување а-1-2-b-a од сликата 4.8.4), ја вратил во системот (површина на успорување b-3-4-c-b) и започнува да се враќа кон точката на рамнотежа „d“ која што лежи на конечната работна карактеристика $P_3(\theta)$.



Слика 4.8.4. Нишање на роторот за време на кусата врска и по нејзиното исклучување

Од сликата 4.8.4 се добива:

$$\sin(\theta_1) = P_0 / P_{M3} ; \quad \theta_1 = \arcsin(P_0 / P_{M3}) = \arcsin(40 / 105,108) = 0,3904 \text{ rad } (22,37^\circ) ,$$

$$A^+ = \int_{\theta_0}^{\theta_{isk}} [P_0 - P_{M2} \cdot \sin(\theta)] \cdot d\theta = P_{M2} \cdot [\cos(\theta_{isk}) - \cos(\theta_0)] + P_0 \cdot (\theta_{isk} - \theta_0)$$

$$A^- = \int_{\theta_{isk}}^{\theta_{max}} [P_{M3} \cdot \sin(\theta) - P_0] \cdot d\theta = P_{M3} \cdot [\cos(\theta_{isk}) - \cos(\theta_{max})] + P_0 \cdot (\theta_{isk} - \theta_{max})$$

Од условот $A^+ = A^-$ којшто произлегува од правилото на еднакви површини произлегува следната релација во којашто единствена непозната е бараниот агол θ_{max} .

$$\cos \theta_{max} + \frac{P_0}{P_{M3}} \cdot \theta_{max} - \left(\frac{P_{M3} - P_{M2}}{P_{M3}} \cdot \cos \theta_{isk} + \frac{P_0 \cdot \theta_0 + P_{M2} \cdot \cos \theta_0}{P_{M3}} \right) = 0.$$

Со решавање на горната трансцедентна равенка добиваме:

$$\cos \theta_{max} + 0,38056 \cdot \theta_{max} - 1,02793 = 0 \Rightarrow \theta_{max} = 0,7107 \text{ rad } (40,72^\circ).$$

Не е на одмет да кажеме дека доколку оваа задача ја решевме на вториот начин, со нумеричко решавање на зависноста $\theta(t)$, ќе добиевме дека максималниот агол на нишање изнесува $\theta_{max} = 40,82^\circ$ и, како што е видно од сликата 4.9.7, тој се постигнува во $t = 0,22$ s, што претставува практично целосно совпаѓање на добиените резултати на двата различни начина.

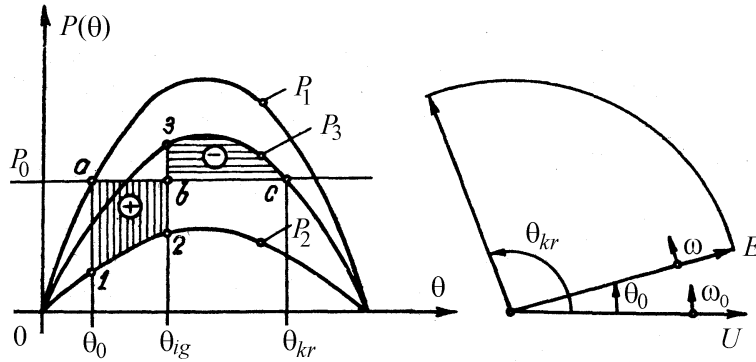
5) Пресметка на граничниот агол на исклучување на кусата врска θ_{ig}

За да го пресметаме граничниот агол на исклучување на кусата врска ќе го примениме правилото на еднакви површини (слика 4.8.5). Од сликата 4.8.5 се добива:

$$\sin(\theta_{kr}) = \frac{P_0}{P_{M3}} \Rightarrow \theta_{kr} = \pi - \arcsin\left(\frac{P_0}{P_{M3}}\right) = \pi - \arcsin\left(\frac{40}{105,108}\right) = 2,7512 \text{ rad } (157,63^\circ) .$$

$$A^+ = \int_{\theta_0}^{\theta_{ig}} [P_0 - P_{M2} \cdot \sin(\theta)] \cdot d\theta = P_{M2} \cdot [\cos(\theta_{ig}) - \cos(\theta_0)] + P_0 \cdot (\theta_{ig} - \theta_0)$$

$$A^- = \int_{\theta_{ig}}^{\theta_{kr}} [P_{M3} \cdot \sin(\theta) - P_0] \cdot d\theta = P_{M3} \cdot [\cos(\theta_{ig}) - \cos(\theta_{kr})] + P_0 \cdot (\theta_{ig} - \theta_{kr}).$$



Слика 4.8.5. Дефиниција на граничното време на исклучување на кусата врска. Случај кога максималниот агол на нишање ја добил критичната вредност θ_{kr}

Од условот $A^+ = A^-$ којшто произлегува од правилото на еднакви површини произлегува следната релација во којашто единствена непозната е бараниот агол θ_{ig} .

$$\cos(\theta_{ig}) = \frac{P_0}{P_{M3} - P_{M2}} \cdot (\theta_{kr} - \theta_0) + \frac{P_{M3} \cdot \cos \theta_{kr} - P_{M2} \cdot \cos \theta_0}{P_{M3} - P_{M2}}.$$

Решението на проблемот гласи: $\theta_{ig} = 1,9824 \text{ rad} \equiv 113,59^\circ$.

6) Пресметка на граничното време на исклучување на кусата врска t_{ig}

Моментот кога аголот на изместување помеѓу е.м. сила на генераторот G и напонот на крутата мрежа ќе ја достигне вредноста $\theta = \theta_{ig}$, добиена претходно, се нарекува гранично време на исклучување. Во случајот кога агловата карактеристика $P_2(\theta) = P_{M2} \cdot \sin(\theta)$, на којашто работи генераторот за време на кусата врска, е еднаква на нула ($P_{M2} = 0$), проблемот може да се реши нумерички, како во Примерот 4.6, бидејќи во тој случај зависноста $\theta(t)$ може да се добие аналитички. Но сега тоа не е можно, туку ќе биде потребно таа зависност да се добие нумерички, решавајќи ја диференцијалната равенка на движење на синхрониот агрегат. Во случајов таа зависност е веќе пресметана и прикажана во табелата 4.8.1. Оваа зависност е графички прикажана на сликата 4.8.6, а на истата слика е прикажан и графичкиот начин на определување на бараното гранично време на исклучување на кусата врска.

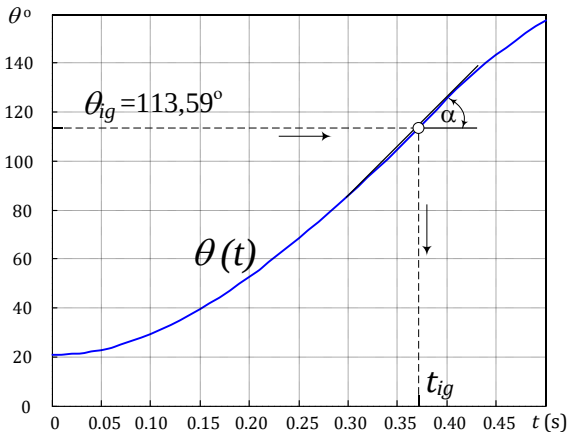
Доколку сакаме бараното време t_{ig} да го пресметаме нумерички, ќе постапиме на следниот начин. Од табелата 4.8.1 се гледа дека вредноста граничното време на исклучување се наоѓа во интервалот $0,35 \text{ s} < t_{ig} < 0,40 \text{ s}$. Применувајќи ја постапката на линеарна интерполација на кривата $\theta(t)$ во овој интервал, добиваме:

$$\theta_{0,35} = \theta(t)_{t=0,35\text{s}} = 104,79^\circ; \quad \theta_{0,40} = \theta(t)_{t=0,40\text{s}} = 125,40^\circ; \quad \theta_{ig} = 113,59^\circ;$$

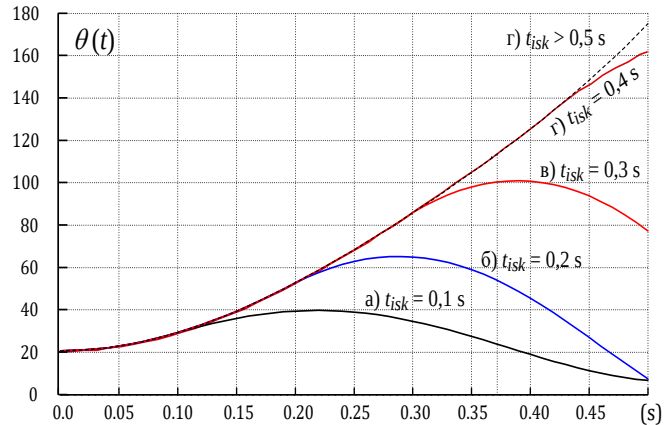
$$\frac{\theta_{ig} - \theta_{0,35}}{t_{ig} - 0,35} = \frac{\theta_{0,40} - \theta_{0,35}}{0,40 - 0,35} = \text{tg} \alpha = 412,2;$$

$$t_{ig} = 0,35 + \frac{\theta_{ig} - \theta_{0,35}}{\operatorname{tg} \alpha} = 0,35 + \frac{\theta_{ig} - \theta_{0,35}}{\theta_{0,40} - \theta_{0,35}} \cdot (0,40 - 0,35) = 0,35 + \frac{113,59 - 104,79}{412,2} = 0,371 \text{ s.}$$

На сликата 4.8.7 е прикажана зависноста $\theta(t)$ на аголот на роторот од генераторот од времето за неколку случаја, и тоа: а) кога кусата врска се исклучува во $t_{isk} = 0,1 \text{ s}$; б) кога кусата врска се исклучува во $t_{isk} = 0,2 \text{ s}$; в) кога кусата врска се исклучува во $t_{isk} = 0,3 \text{ s}$ г) кога кусата врска се исклучува во $t_{isk} = 0,4 \text{ s}$ и д) кога кусата врска воопшто не се исклучува во набљудуваниот временски интервал.



Слика 4.8.6. Графички приказ на зависноста $\theta(t)$ при трајна трифазна к. врска



Слика 4.8.7. Графички приказ на зависноста $\theta(t)$ за разни времиња на исклучување на к. врска

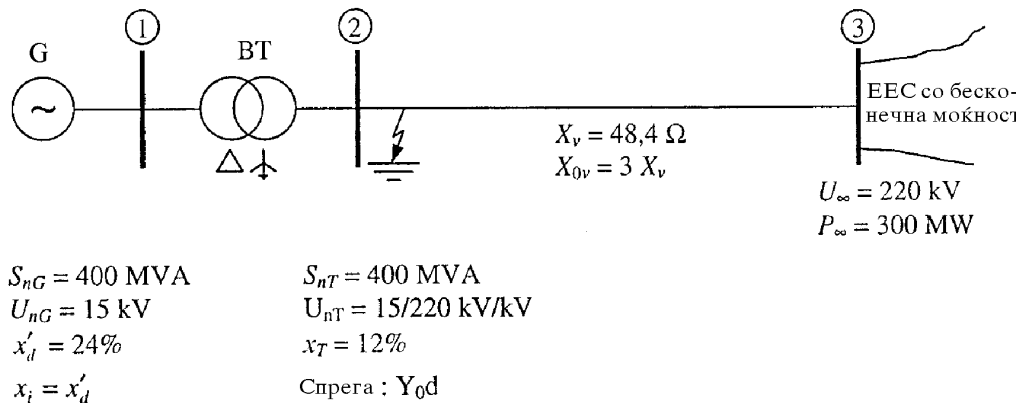
Ако го споредиме резултатот добиен за граничното време на исклучување во Примерот 4.6 ($t_{ig} = 0,255 \text{ s}$) и овде ($t_{ig} = 0,371 \text{ s}$), ќе забележиме дека постои извесна разлика. Таа разлика се должи главно на локацијата на кусата врска. Локацијата на трифазната куса врска од Примерот 4.6 е најнеповолна бидејќи во тој случај агловата карактеристика на моќност $P_2(\theta) = P_{M2} \cdot \sin(\theta)$ на која што работи генераторот за време на кусата врска е најмала ($P_{M2} = 0$). Како илустрација на овде кажаното ќе ни послужи табелата 4.8.2 во која се прикажани вредностите на амплитудата P_{M2} (MW) и на граничното време на исклучување на трифазната куса врска t_{ig} (s) во зависност од растојанието l_x (km) на местото на кусата врска сметано во однос на почетокот од водот V2.

Табела 4.8.2. Влијание на локацијата на кусата врска врз граничното време на исклучување

l_x (km)	0	5	10	15	20	25	30	35	39	40
P_{M2} (MW)	0,0	9,66	17,69	24,48	30,283	35,31	39,71	43,58	46,36	47,02
θ_{ig} (°)	90,9	96,40	101,99	107,69	113,59	119,76	126,34	133,53	139,97	141,71
t_{ig} (s)	0,242	0,269	0,299	0,333	0,371	0,420	0,484	0,582	0,739	inf.

□ □ □

Задача 4.3. Електрана која е претставена со еден еквивалентен генератор, преку преносен систем којшто се состои од генераторски блок-трансформатор ВТ и преносен вод V, е приклучена на моќна мрежа (слика 3.4.3.1).



Слика 3.4.3.1.

а) Да се определи агловата карактеристика на моќност $P(\theta)$ за нормалниот режим на работа (режим пред кусата врска) како и почетниот агол θ_{10} , ако во посматраниот режим на мрежата и се испорачува моќност $P_\infty = 300 \text{ MW}$ при фактор на моќност $\cos\varphi_\infty = 1$.

б) Ако на почетокот од водот (непосредно зад собирниците VN на блок-трансформаторот) настане еднофазна куса врска, да се определи агловата карактеристика на моќност за режимот со кусата врска.

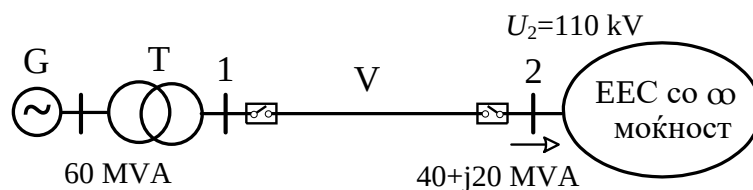
в) Со примена на правилото на еднакви површини да се утврди дали системот и после настанатата куса врска ќе остане стабилен. Решението да се илустрира графички.

Пресметките да се изведат со релативни единици (pu) земајќи притоа за базните величини $S_B = 400 \text{ MVA}$ и $U_B = 220 \text{ kV}$.

□ □ □

Пример 4.8. На сликата 4.8.1 е прикажан систем кој се состои од генератор G, трансформатор T, преносен вод V и ЕЕС со бесконечна моќност. Напонот на собирниците „2“ при ЕЕС е константен, независно од режимот на работа на генераторот G и изнесува $U_2 = 110 \angle 0^\circ \text{ kV}$. Генераторот G работи во режим таков што моќноста што се оддава во ЕЕС изнесува $\underline{S} = (40 + j20) \text{ MVA}$. Познати се уште и следните податоци:

- Вод V: $L = 50 \text{ km}$; $x = 0,4 \Omega/\text{km}$,
- Генератор G: 60 MVA ; $10,5 \text{ kV}$; $x_d'' = x_i = 13\%$; $x_o = 8\%$; $x_d' = 30\%$; $x_d = 160\%$; $T_J = 6 \text{ s}$,
- Трансформатор T: 60 MVA ; $10,5/115 \text{ kV/kV}$; $u_k = 15\%$.



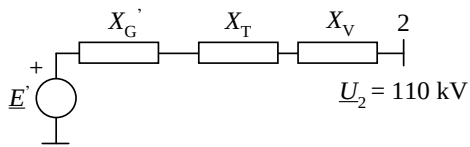
Слика 4.8.1.

Прекинувачите на почетокот и на крајот од преносниот вод V се снабдени со уред за трифазно АПВ со следните карактеристики: време на исклучување на грешката $t_{isk} = 0,12$ s; време на безнапонска пауза $t_{BP} = 0,12$ s. Се посматра состојба на трифазна куса врска настаната на водот V. Кусата врска трае вкупно $t_{isk} = 0,12$ секунди кога обата прекинувача ја исклучуваат, после што следи безнапонска пауза со вкупно времетраење $t_{BP} = 0,12$ s и повторно вклучување на обата прекинувача. Се смета дека кусата врска има минлив карактер и дека за време на безнапонската пауза доаѓа до нејзина елиминација. Потребно е:

- да се утврди дали во дадените услови на работа системот е динамички стабилен;
- доколку времето на безнапонската пауза на прекинувачите се зголеми на вредноста $t_{BP} = 0,24$ s, да се утврди колкаво треба да биде времето на залет на генераторот T_J за да биде системот динамички стабилен.

Решение:

a)



$$X'_G = \frac{x'_d}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{30}{100} \cdot \frac{10,5^2}{60} \cdot \left(\frac{115}{10,5} \right)^2 = 377,857 \, \Omega;$$

$$X_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{15}{100} \cdot \frac{115^2}{60} = 33,063 \, \Omega;$$

$$X_V = 0,4 \cdot 50 = 20 \, \Omega;$$

$$X_e = X_G + X_T + X_V = 430,92 \, \Omega;$$

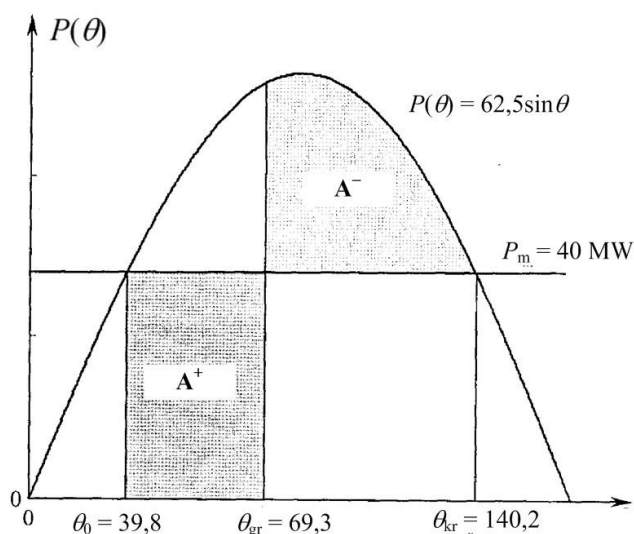
$$\underline{E}' = U_2 + \Delta U_d + j \Delta U_q = U_2 + \frac{Q_2 X_e}{U_2} + j \frac{P_2 X_e}{U_2} = (188,349 + j156,698) \, \text{kV};$$

$$E' = \sqrt{188,349^2 + 156,698^2} = 245,009 \, \text{kV};$$

$$P_M = \frac{E' \cdot U_2}{X_e} = \frac{245,009 \cdot 110}{430,92} = 62,543 \, \text{MW};$$

$$\theta_0 = \arcsin \frac{P_0}{P_M} = 39,759^\circ;$$

$$\theta_{kr} = 180 - \theta_0 = 140,241^\circ;$$



$$A^+ = P_0 (\theta_{gr} - \theta_0) = A^- = \int_{\theta_{gr}}^{\theta_{kr}} (P_M \sin \theta - P_0) d\theta;$$

$$\theta_{gr} = \arccos \left[\frac{P_0 (\theta_{kr} - \theta_0)}{P_M} + \cos \theta_{kr} \right];$$

$$\theta_{gr} = \arccos \left[\frac{40(140,241 - 39,759)}{62,543} \cdot \frac{\pi}{180} + \cos 140,241 \right] = 69,336^\circ;$$

$$M = \frac{S_n T_J}{\omega_0} = \frac{60 \cdot 6}{100 \cdot \pi} = 1,146 \text{ MW} \cdot \text{s}^2;$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{\Delta P}{M} \frac{t^2}{2}; \quad t = 0,24 \text{ s};$$

$$\theta = 39,759 \frac{\pi}{180} + \frac{40}{1,146} \frac{0,24^2}{2} = 1,699 \text{ rad} = 97,355^\circ > \theta_{gr};$$

Значи системот е нестабилен.

$$\text{б) } t = 0,36 \text{ s}; \quad \theta(t) = \theta_{gr};$$

$$M = \frac{\Delta P \cdot t^2}{2(\theta_{gr} - \theta_0)} = \frac{40 \cdot 0,36^2}{2(69,336 - 39,759) \cdot \frac{\pi}{180}} = 5,021 \text{ MW} \cdot \text{s}^2;$$

$$T_J = \frac{M \omega_0}{S_n} = \frac{5,021 \cdot 100 \cdot \pi}{60} = 26,3 \text{ s}$$

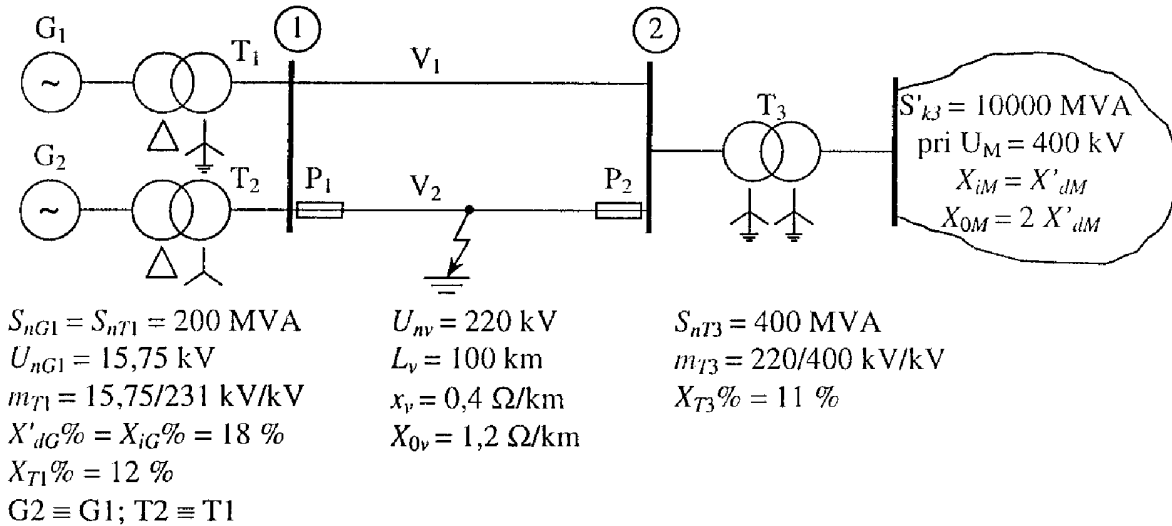
□ □ □

Д О П О Л Н И Т Е Л Н И З А Д А Ч И
ОД ОБЛАСТА НА ВИСОКОНАПОНСКИТЕ МРЕЖИ
преземени од други збирки решени задачи

Na sl. 3.7a prikazan je jednostavan elektroenergetski sistem. Za slučaj jednofaznog kratkog spoja na sredini dalekovoda V_2 odrediti:

- a) Struju kvara.
b) Struje koje teku kroz prekidače P_1 i P_2 u fazi koja je pogođena kvarom na vodu V_2 .

Napon na mestu kvara pre nastanka kvara je iznosio $U_{fr} = 220/\sqrt{3}$ kV. Ostali podaci o sistemu dati su takođe na sl. 3.7a.



Sl. 3.7a Monofazna šema i osnovni podaci sistema iz zadatka 3.7

Rešenje:

Vrednosti parametara mreže svedeni na naponski nivo 220 kV su:

$$X_{G1} = \frac{X_{G1} \% U_{nG1}^2}{100} \frac{1}{S_{nG1} m_{T1}^2} = \frac{18}{100} \frac{15,75^2}{200} \frac{231^2}{15,75^2} = 48,02 \Omega;$$

$$X_{T1} = \frac{X_{T1}}{100} \frac{U_{nT1}^2}{S_{nT1}} = \frac{12}{100} \frac{231^2}{200} = 32,02 \, \Omega;$$

$$X_v = x_v L_v = 0,4 \cdot 100 = 40 \, \Omega;$$

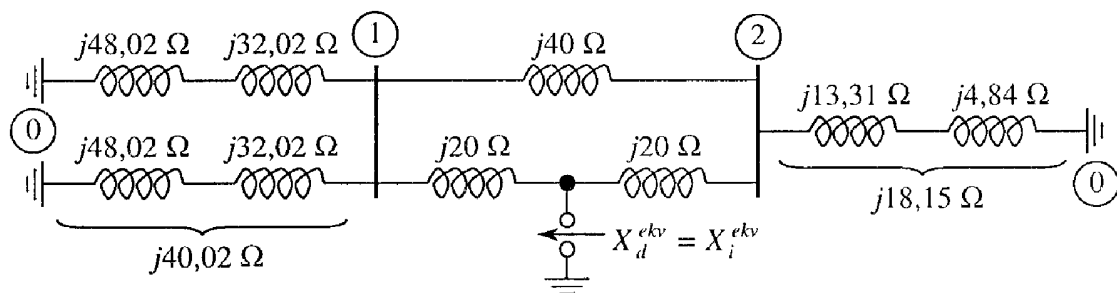
$$X_{0v} = x_{0v} L_v = 1,2 \cdot 100 = 120 \, \Omega;$$

$$X_{T3} = \frac{X_{T3} \%}{100} \frac{U_{nT3}^2}{S_{nT3}} = \frac{11}{100} \frac{220^2}{400} = 13,31 \Omega;$$

$$X'_{dM} = \frac{U_M^2}{S'_{T3}} m_{T3}^2 = \frac{400^2}{10000} \frac{220^2}{400^2} = 4,84 \, \Omega;$$

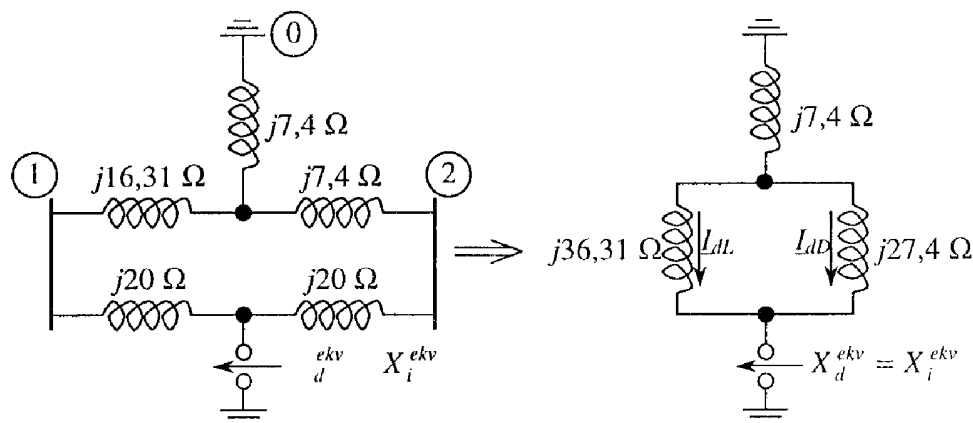
$$X_{0M} = 2 \cdot X'_{dM} = 2 \cdot 4,84 = 9,68 \, \Omega.$$

Ekvivalentna šema impedansi sistema za direktni i inverzni redosled data je na sl. 3.7b.



Sl. 3.7b Ekvivalentna šema impedansi direktnog (inverznog) redosleda sistema sa sl. 3.7a

Daljim pojednostavljenjem šeme sa sl. 3.7b (sažimanjem paralelnih grana i transfiguracijom ugla 1-2-0 u zvezdu) dobijaju se ekvivalentne šeme sistema direktnih (inverznih) impedansi, kazane na sl. 3.7c.

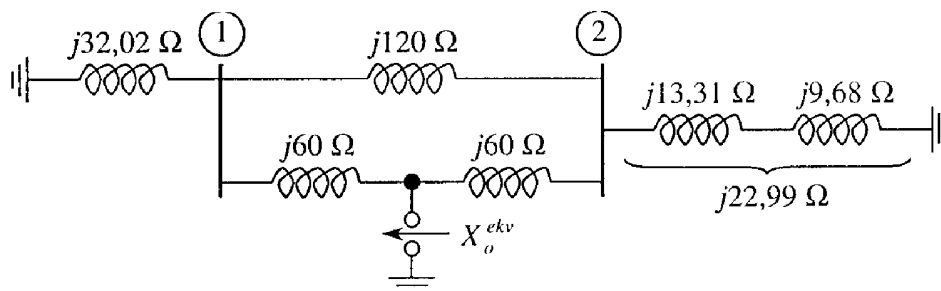


Sl. 3.7c Ekvivalentne šeme direktnih (inverznih) impedansi, posle sažimanja šeme sa sl. 3.7b

Konačno, sa poslednje šeme sa sl. 3.7c, dobija se da su ekvivalentne impedanse direktnog i inverznog redosleda za pretpostavljeno mesto kvara:

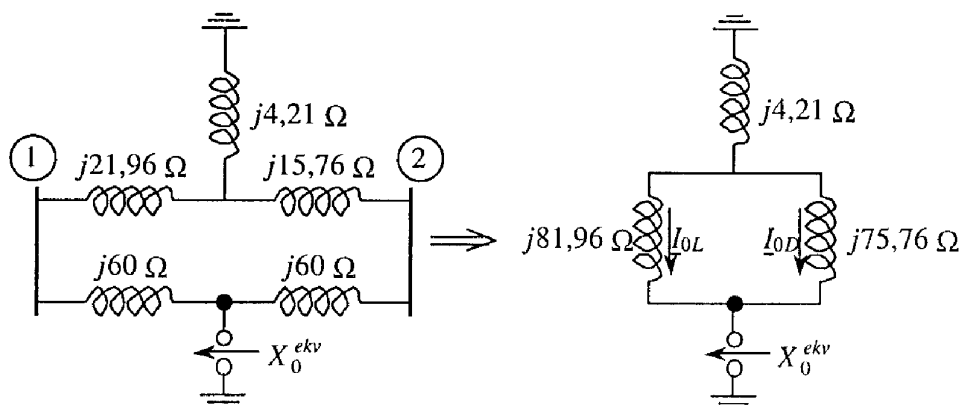
$$X_d^{ekv} = X_i^{ekv} = 23,02 \, \Omega \approx 23 \, \Omega.$$

Ekvivalentna šema impedansi sistema nultog redosleda data je na sl. 3.7d.



Sl. 3.7d Ekvivalentna šema impedansi sistema nultog redosleda sistema sa sl. 3.7a

Srediњanjem šeme sa sl. 3.7d, na sličan način kao što je to učinjeno i kod šeme za direktni i inverzni redosled sa sl. 3.7b, dobijaju se šeme na sl. 3.7e.



Sl. 3.7e Ekvivalentne šeme impedansi nultog redosleda, posle sažimanja šeme sa sl. 3.7d

Sa poslednje šeme sa sl. 3.7e, dobija se da je ekvivalentna impedansa nultog redosleda za pretpostavljeno mesto kvara: $X_0^{ekv} = 43,58 \Omega$.

a) Na osnovu izračunatih podataka proračunava se tražena struja kvara:

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 = \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_0^{ekv}} = \frac{220/\sqrt{3}}{j(2 \cdot 23 + 43,58)} = -j1,418 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_K = \underline{I}_A = \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_0 = 3 \cdot (-j1,418) = -j4,254 \text{ kA}.$$

b) Radi određivanja struje kroz prekidače P_1 i P_2 potrebno je izračunati simetrične komponente struja koje u mesto kvara utiču sa leve (L) i desne strane (D). One se računaju na osnovu konačnih ekvivalentnih šema impedansi za direktni, inverzni i nulti redosled sa sl. 3.7c i sl. 3.7e koristeći pravilo strujnog razdelnika:

$$\underline{I}_{dL} = \frac{27,4}{36,31 + 27,4} \underline{I}_d = 0,43 \cdot (-j1,418) = -j0,61 \text{ kA} = \underline{I}_{iL};$$

$$\underline{I}_{dD} = \frac{36,31}{36,31 + 27,4} \underline{I}_d = 0,57 \cdot (-j1,418) = -j0,808 \text{ kA} = \underline{I}_{iD};$$

$$\underline{I}_{0L} = \frac{75,76}{81,96 + 75,76} \underline{I}_0 = 0,48 \cdot (-j1,418) = -j0,681 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{0D} = \frac{81,96}{81,96 + 75,76} \underline{I}_0 = 0,52 \cdot (-j1,418) = -j0,737 \text{ kA}.$$

Na kraju mogu se izračunati struje koje teku kroz prekidače P_1 i P_2 u fazi pogođenoj kvarom:

$$\underline{I}_{AP_1} = \underline{I}_{dL} + \underline{I}_{iL} + \underline{I}_{0L} = -j0,61 - j0,61 - j0,681 = -j1,901 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{AP_2} = \underline{I}_{dD} + \underline{I}_{iD} + \underline{I}_{0D} = -j0,808 - j0,808 - j0,737 = -j2,353 \text{ kA}$$

□ □ □

Задача 4.16

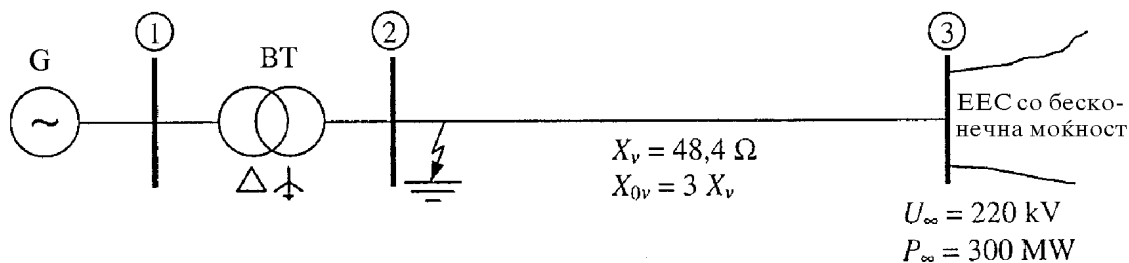
Elektrana predstavljena ekvivalentnim generatorom, vezana je na моћну мрежу посредством генераторског блок-трансформатора и преносног вода, како је то приказано на сл. 4.16a (на којој су такође дати и сви подаци о елементима система).

a) Наћи израз за карактеристiku снага-угао система у нормалном погону (пре квара) и почетни угао δ_{10} , ако се у моћну мрежу испоручује снага $P_{\infty} = 300$ MW, при фактору снаге $\cos \varphi_{\infty} = 1,0$.

b) Ако се на почетку вода (непосредно иза сабирница високог напона блок-трансформатора) догоди једнофазни кратки spoj са земљом, наћи израз за карактеристiku снага-угао после појаве квара и почетни угао снаге δ_{20} .

c) Применом метода једнаких површина утврдити да ли систем после појаве квара остаје стабилан. Решење илустровати графички.

У прорачунима користити релативне јединице са $S_B = 400$ MVA и $U_B = 220$ kV.



$$S_{nG} = 400 \text{ MVA}$$

$$U_{nG} = 15 \text{ kV}$$

$$x'_d = 24\%$$

$$x_i = x'_d$$

$$S_{nT} = 400 \text{ MVA}$$

$$U_{nT} = 15/220 \text{ kV/kV}$$

$$x_T = 12\%$$

$$\text{Спрега : } Y_0d$$

Sl. 4.16a Jednopolna šema i parametri elemenata sistema iz zadatka 4.16

Rešenje:

a) Proračun stanja pre квара:

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{220^2}{400} = 121 \Omega;$$

$$X_G = X'_d = 0,24 \text{ r.j.};$$

$$X_T = 0,12 \text{ r.j.};$$

$$X_v = \frac{48,4}{121} = 0,4 \text{ r.j.}; \quad X_{0v} = 3 X_v = 1,2 \text{ r.j.};$$

$$P = \frac{P}{S_B} = \frac{300}{400} = 0,75 \text{ r.j.};$$

$$X_1^{ekv} = X^{ekv} = X_G + X_T + X_v = 0,24 + 0,12 + 0,4 = 0,76 \text{ r.j.}$$

Indukovana EMS pre kvara je:

$$\underline{E}' = \underline{U}_{\infty} + jX^{ekv} \frac{P}{U_{\infty}} = 1,0 + j0,76 \cdot \frac{0,75}{1,0} = (1 + j0,57) \text{ r.j.} = 1,151 \text{ r.j.} \angle 29,683^{\circ} .$$

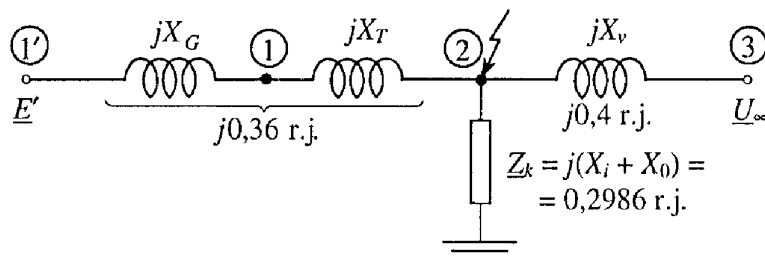
Kriva snaga-ugao pre kvara data je izrazom:

$$P = \frac{E' U_{\infty}}{X^{ekv}} \sin \delta = \frac{1,151 \cdot 1,0}{0,76} \sin \delta = 1,5145 \sin \delta .$$

Početni ugao snage u normalnom režimu je:

$$\delta_{10} = \arcsin \frac{PX^{ekv}}{E' U_{\infty}} = \arcsin \frac{0,75}{1,5145} = 29,683^{\circ} = 0,518 \text{ rad} .$$

b) Stanje za vreme kvara (ekvivalentna šema prikazana je na sl. 4.16b)



Sl. 4.16b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.16a za vreme kvara

U zamenskoj šemi sistema za vreme kvara figuriše otočno priključena impedansa kvara $\underline{Z}_k = j(X_i + X_0)$, koja se sastoji od redno povezanih ekvivalentnih impedansi sistema inverznog i nultog redosleda (gledano sa mesta kvara), čije su vrednosti:

$$X_i = \frac{X_{iv}(X_{iG} + X_{iT})}{X_{iv} + X_{iG} + X_{iT}} = \frac{0,4 \cdot (0,24 + 0,12)}{0,76} = 0,1895 \text{ r.j.};$$

$$X_0 = \frac{X_{0T} X_{0v}}{X_{0T} + X_{0v}} = \frac{0,12 \cdot 1,2}{0,12 + 1,2} = 0,1091 \text{ r.j.}$$

Impedansa kvara je onda:

$$\underline{Z}_k = j(X_i + X_0) = j(0,1895 + 0,1091) = j0,2986 \text{ r.j.}$$

Proračun transfer impedanse za sistem sa sl. 4.16b, vrši se transfiguracijom zvezde, čije su impedanse $\underline{Z}_{12} = j(X_G + X_T) = j0,36 \text{ r.j.}$; $\underline{Z}_{23} = jX_v = j0,4 \text{ r.j.}$ i $\underline{Z}_k = j0,2986 \text{ r.j.}$, tako da je:

$$\underline{Z}_{13}^{\Delta} = j \left(0,36 + 0,4 + \frac{0,4 \cdot 0,36}{0,2986} \right) = j1,242 \text{ r.j.}$$

Kriva snaga-ugao za vreme kvara data je preko izraza:

$$P = \frac{1,151 \cdot 1,0}{1,242} \sin \delta = 0,92673 \sin \delta.$$

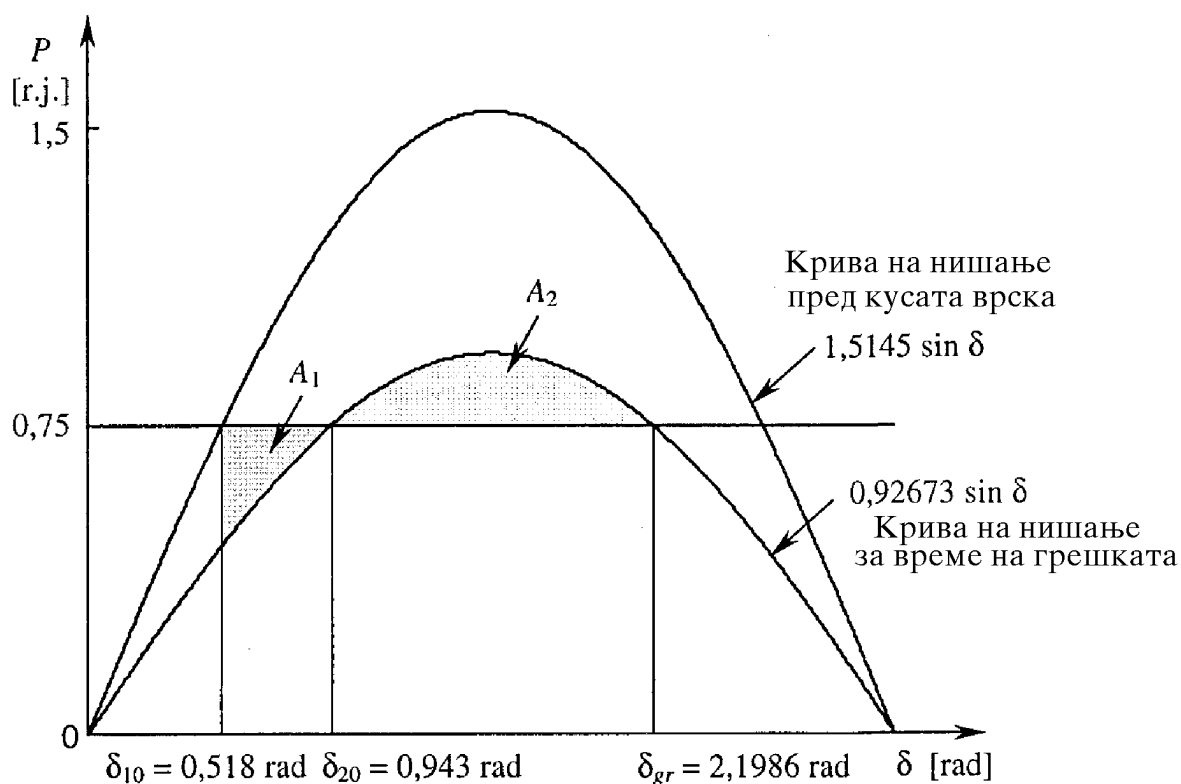
Početni ugao snage na krivoj njihanja za vreme kvara je ($P_m = \frac{300}{400} = 0,75$ r.j.):

$$\delta_{20} = \arcsin \frac{0,75}{0,92673} = 54,03^\circ = 0,943 \text{ rad}.$$

Granični ugao stabilnosti je onda:

$$\delta_{gr} = 180^\circ - \delta_{20} = 180^\circ - 54,03^\circ = 125,97^\circ = 2,1986 \text{ rad}.$$

Karakteristične krive snaga-ugao pre i posle nastanka kvara prikazane su na sl. 4.16c.



4.16c Karakteristike snaga – ugao sistema iz zadatka 4.16, pre nastanka kvara i za vreme kvara

c) Provera stabilnosti metodom jednakih površina: Uslov je da na sl. 4.16c bude $A_2 > A_1$

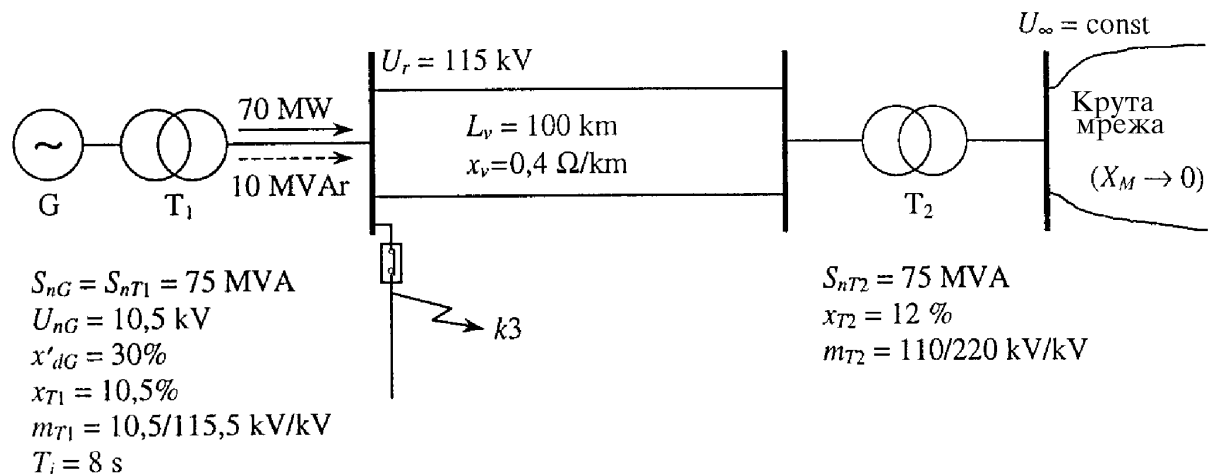
$$A_1 = \int_{\delta_{10}=0,518}^{\delta_{20}=0,943} (0,75 - 0,92673 \sin \delta) d\delta = 0,75 \cdot (0,943 - 0,518) + 0,92673 (0,5874 - 0,8688) = 0,058;$$

$$A_2 = \int_{\delta_{20}=0,943}^{\delta_{gr}=2,1986} (0,92673 \sin \delta - 0,75) d\delta = 0,92673 (0,5874 + 0,5874) - 0,75 \cdot (2,1986 - 0,943) = 0,1469.$$

□ □ □

Задача 4.17

Za dati trofazni jednopolno prikazani elektroenergetski sistem sa sl. 4.17a ispitati tranzijentnu stabilnost generatora za slučaj trolejnog kratkog spoja na početku voda-ogranka neopterećenog pre kvara, ako su ems generatora E' iza podužne tranzijentne reaktanse, kao i napon moćne mreže, konstantni. Trofazni kratki spoj se isključuje posle $t_i = 0,15$ s. Ostali podaci o sistemu su dati na sl. 4.17a.



Sl. 4.17a Jednopolna šema i parametri sistema iz zadatka 4.17

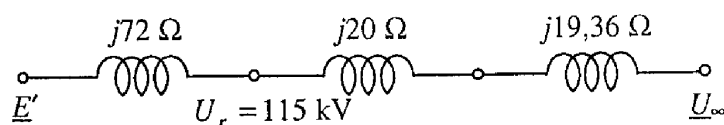
Rešenje:

Parametri ekvivalentne šeme sistema, prikazane na sl. 4.17b su:

$$X'_{dG} + X_{T1} = \frac{40,5}{100} \cdot \frac{115,5^2}{75} = 72 \Omega ;$$

$$X_{T2} = \frac{12}{100} \cdot \frac{110^2}{75} = 19,36 \Omega ;$$

$$X_v^{ekv} = \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 100 = 20 \Omega .$$



Sl. 4.17b Ekvivalentna šema sistema sa sl. 4.17a

Dalje se nalazi:

$$\underline{E}' = 115 + \frac{72 \cdot 10}{115} + j \frac{72 \cdot 70}{115} = 128,94 \text{ kV} \angle 19^\circ 52' ;$$

$$\underline{U}_\infty = 115 - \frac{39,36 \cdot 10}{115} - j \frac{39,36 \cdot 70}{115} = 114,12 \text{ kV} \angle -12^\circ 07' .$$

Ugao koji je ems $\underline{E'}$ zatvarala prema naponu моће мреже пре кvara је:

$$\delta_0 = 19^\circ 52' + 12^\circ 07' = 31^\circ 59' = 31,98^\circ.$$

Dinamička karakteristika radnog stanja пре, identična је sa karakteristikom после isključenja kvara sa sl. 4.17c.

$$P = \frac{E' U_\infty}{X_\Sigma} \sin \delta = \frac{128,94 \cdot 114,12}{111,36} \sin \delta = 132,14 \sin \delta,$$

odakle је

$$70 = 132,14 \sin \delta_0,$$

odnosno:

$$\sin \delta_0 = 0,53;$$

$$\delta_0 = 31,99^\circ \approx 32^\circ;$$

$$\delta_{gr} = 180^\circ - 32^\circ = 148^\circ.$$

Prema formuli:

$$\cos \delta_{ikr} = (\delta_{gr} - \delta_0) \sin \delta_0 + \cos \delta_{gr},$$

odnosno:

$$\cos \delta_{ikr} = 116^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot 0,53 - 0,848 = 0,225,$$

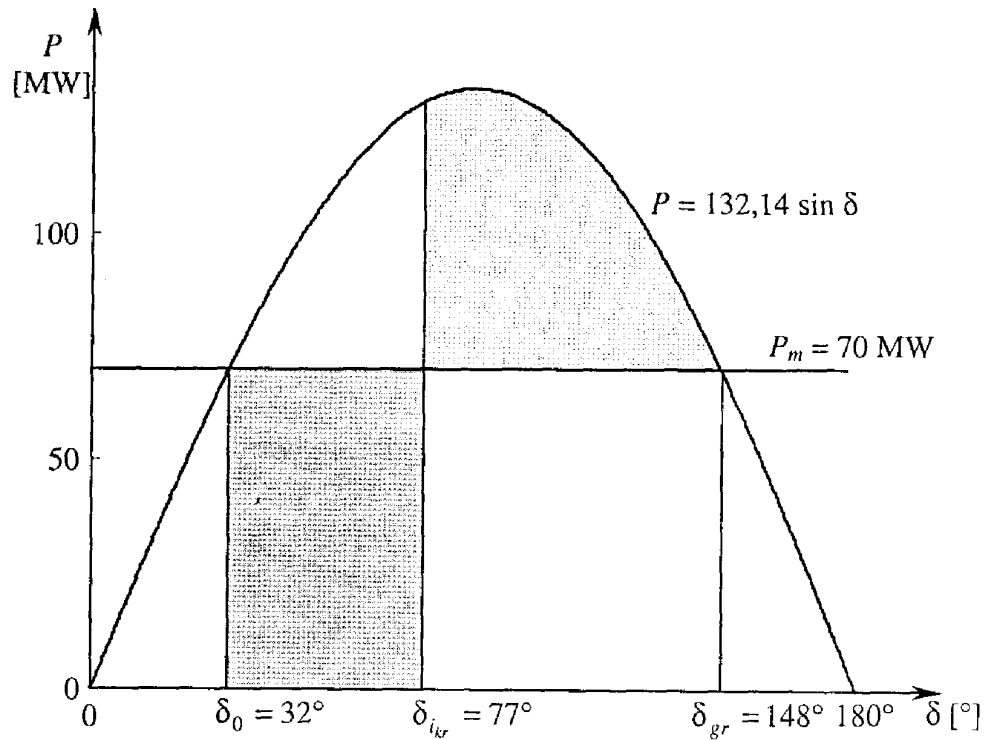
nalazi se kritični ugao isključenja kvara:

$$\delta_{ikr} = 77^\circ.$$

Kako је maksimalno време после koga треба isključiti kvar:

$$t_{max} = \sqrt{\frac{T_i S_{nG} (\delta_{ikr} - \delta_0)}{9000 P_m}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 75 \cdot 45}{9000 \cdot 70}} = 0,207 \text{ s},$$

odnosno $t_{max} > t_i = 0,15 \text{ s}$, то се закључује да је generator tranzijentno stabilan.



Sl. 4.17c Dinamička karakteristika sistema iz zadatka 4.17, sa označenim karakterističnim veličinama

Napomena: pretpostavka da je otočni vod na kome se dešava kvar prethodno neopterećen znači u stvari i najteži slučaj sa gledišta stabilnosti jer tada udaljena elektrana predaje svu snagu moćnoj mreži pa je i početni ugao najveći. Takođe i pretpostavka trolnog kratkog spoja predstavlja najteži slučaj, a s druge strane omogućava prostu metodiku proračuna, bez uzimanja u obzir preostalog dela sistema.

□ □ □