Електрични мрежи

Заменски шеми и параметри на елементите на електроенергетските мрежи

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2018

Општо за моделирањето на ЕЕС (1)

- Модел претставува упростен приказ на еден физички систем или појава. Тој служи за симулација на разните појави и процеси коишто се случуваат во моделираниот систем со цел тие да се проучуваат за да може да се предвиди неговото поведение во иднина.
- Постојат математички и физички модели.
  - Кај математичките модели појавите се опишуваат со математички релации или равенки.
  - Физичкиот модел претставува уред или систем со редуцирани димензии којшто е сосема сличен на моделираниот систем.
- Од физичките модели во анализите на ЕЕС некогаш, пред продорот на компјутерите во инженерството, се користеле т.н. „мрежни анализатори“.
- Не постојат универзални модели наменети за целосна анализа на некој систем иако се тежи тие да бидат што е можно погенерални.
  - За моделите е важно колку се тие точни, т.е. колку се реален одраз на набљудуваниот систем.
  - Еден научник рекол: „Не постојат егзактни модели. Некои од нив се и употребливи“.
  - Намената на моделите е овозможат да се дојде до некои сознанија за набљудуваниот објект на индиректен начин зашто тоа е полесно и поедноставно. Освен тоа за некои експерименти (како што се на пример кусите врски во ЕЕС) тешко би се добила дозвола да се изведуваат во практиката.

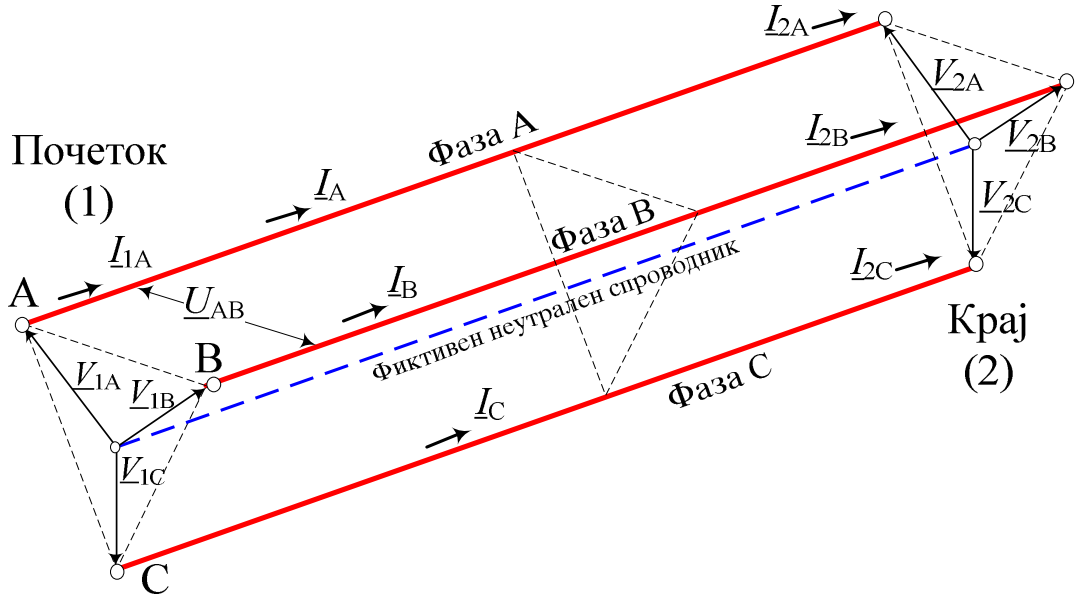
Општо за моделирањето на ЕЕС (2)

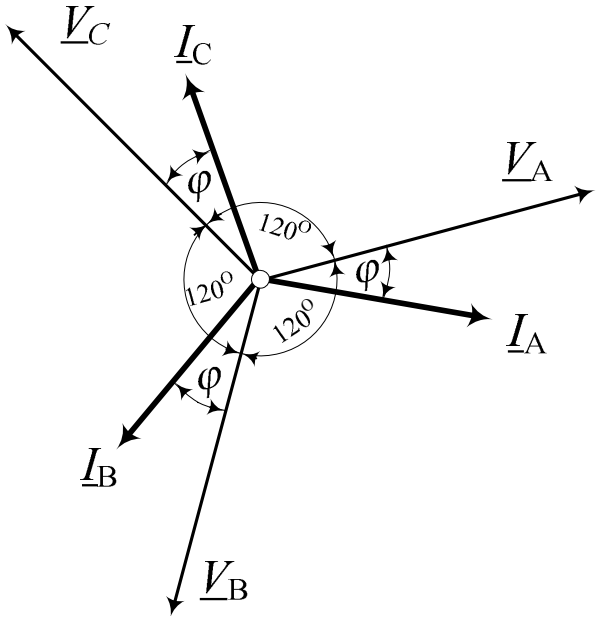
- Постојат разни поделби на моделите: линеарни и нелинеарни, статички и динамички, детерминистички и стохастички, итн.
- ЕЕС во основа претставуваат линеарни системи за коишто важи принципот на суперпозиција. При решавањето на разните работни режими во стационарна состојба ќе се применуваат статички линеарни детерминистички модели.

> Денешните научници ги заменија експериментите со математика и тие талкаат од една до друга равенка за на крајот да изградат структура која нема врска со реалноста.
>
> Никола Тесла, 1934.

Трифазни системи

Производството, пренесувањето и распределбата на ел. енергија се прави со трифазни системи. Ретко се користат еднофазни системи во нисконапонски мрежи за мали моќности.





Трите фазни струи и напони во било кој елемент од системот образуваат трифазен симетричен систем со директен редослед на фазите.

Решавањето може да се упрости така што наместо да решаваме трифазно коло доволно е преку воведувањето на „еднофазни“ заменски шеми да ги определиме приликите во само една од фазите, додека решението во другите две е изместено за 120°.

Модел на двожичен вод

Двоспроводен вод составен од идентични спроводника со радиуси r_p, поставени паралелно во воздух на меѓусебно растојание D.

$$L = \frac{\mu_0}{\pi}\left(\ln\frac{D}{r_p} + \frac{\mu_r}{4}\right); \quad \mu = \mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-4}\ \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{km}}$$

$$x_{\text{контура}} = \omega L = \frac{\omega\mu_0}{\pi}\left(\ln\frac{D}{r_p} + \frac{1}{4}\right)$$

Реактанцијата x по единица должина на едниот од двата спроводника е

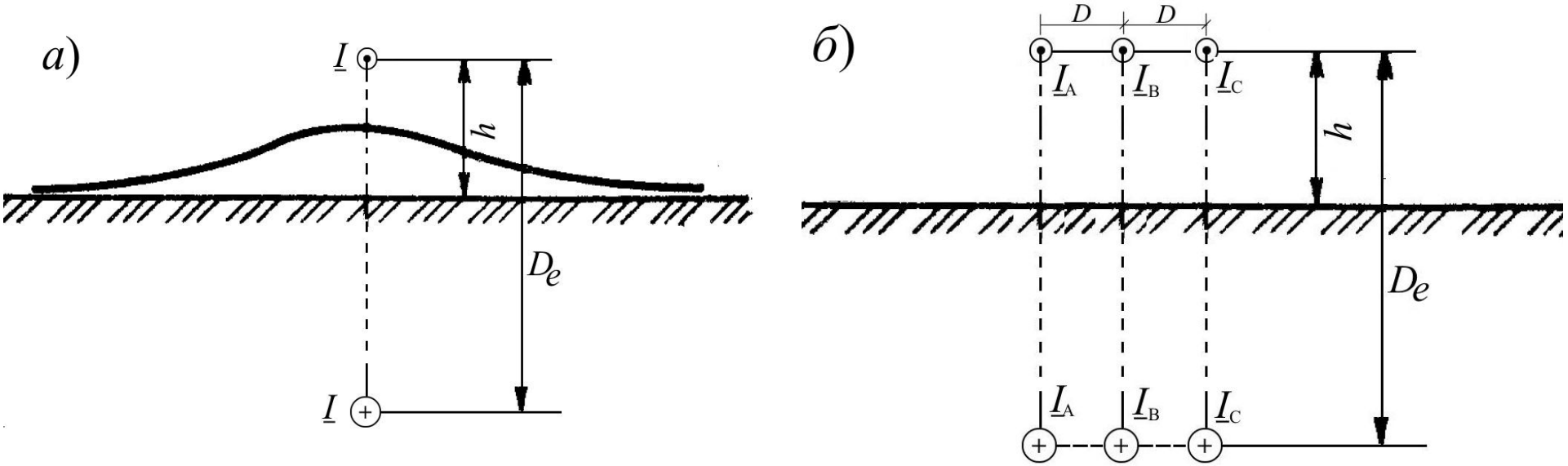
$$x = \frac{x_{\text{контура}}}{2} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi}\cdot\left(\ln\frac{D}{r_p} + \frac{1}{4}\right) = \omega\cdot\left(4,6052\cdot\log\frac{D}{r_p} + \frac{1}{2}\right)\cdot 10^{-4}\,\frac{\Omega}{\mathrm{km}}$$

Сопствената импеданција $\underline{z}$ по единициа должина на двоспроводниот вод за f = 50 Hz ($\omega = 2\pi f = 100\pi$) е

$$\underline{z} = r + jx = r + j\left(0,1445\cdot\log\frac{D}{r_p} + 0,0157\right)\frac{\Omega}{\mathrm{km}}$$

Модел на едноспроводен (двожичен) вод со повратен пат преку земјата

Едноспроводен вод формиран од хоризонтален спроводник на висина h над површината од земјата и самата земја како повратен пат на струјата. Преку овој модел ќе ги изведеме изразите за редна импеданција на трифазните водови.



Карсонов модел за систем спроводник – земја: а) за едноспроводен вод, б) за триспроводен вод.

Модел на едноспроводен (двожичен) вод со повратен пат преку земјата

- Теориските и експерименталните истражувања во 20-тите години на минатиот век од Риденберг (Rüdenberg) и Карсон (Carson) покажале дека системот спроводник – земја може да се сведе на двоспроводен вод.
- Вториот спроводник е замислен повратен спроводник со радиус од 1 m кој се наоѓа во земјата закопан на длабочина D_e.

$$D_e = 658,5 \cdot \sqrt{\rho/f} \quad \mathrm{m}.$$

Почва	Камените	Сува	Влажна	Морска вода
Спец. отпорност ρ (Ωm)	10000	1000	100	1
Екв. длабочина D_e (m)	9380	2960	938	94

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_p} + 0,0157 \ \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

Загуби на активна моќност во повратниот пат, $r_z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \approx 0,05\,\Omega/\mathrm{km}$

$$\underline{z}_s = (r + r_z) + j\left(0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_p} + 0,0157\right) \frac{\Omega}{\mathrm{km}}$$

Модел на трифазен вод со повратен пат

- Трифазните водови можат да се замислат како три парови спроводник – земја. Со оглед на тоа дека $D_e \gg h_i$ и $D_e \gg D_{ij}$ сосема е сеедно дали спроводниците имаат хоризонтален или друг распоред.
- Покрај сопствените импеданции ќе се појават и меѓусебни импеданции помеѓу секои парови контури со коишто се моделираат одделните двоспроводни водови.

$$\underline{z}_{ij} = r_z + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{D_{ij}} \ \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

- Сопствените $\underline{z}_s$ и меѓусебните подолжни импеданции $\underline{z}_m$ помеѓу фазните спроводници од трифазниот вод се

$$\underline{z}_s = (r + r_z) + j \cdot \left(0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_p} + 0,0157\right) \ \frac{\Omega}{\mathrm{km}},$$

$$\underline{z}_m = \frac{\underline{z}_{\mathrm{AB}} + \underline{z}_{\mathrm{AC}} + \underline{z}_{\mathrm{BC}}}{3} = r_z + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{D_m} \ \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

Средно-геометриско растојание помеѓу фазните спроводници

$$D_m = \sqrt[3]{D_{\mathrm{AB}} \cdot D_{\mathrm{AC}} \cdot D_{\mathrm{BC}}}.$$

За хоризонтален распоред на фазните спроводници е

$$D_m = \sqrt[3]{D \cdot 2D \cdot D} = D \cdot \sqrt[3]{2} = 1,26 \cdot D.$$

Модел на трифазен вод со повратен пат

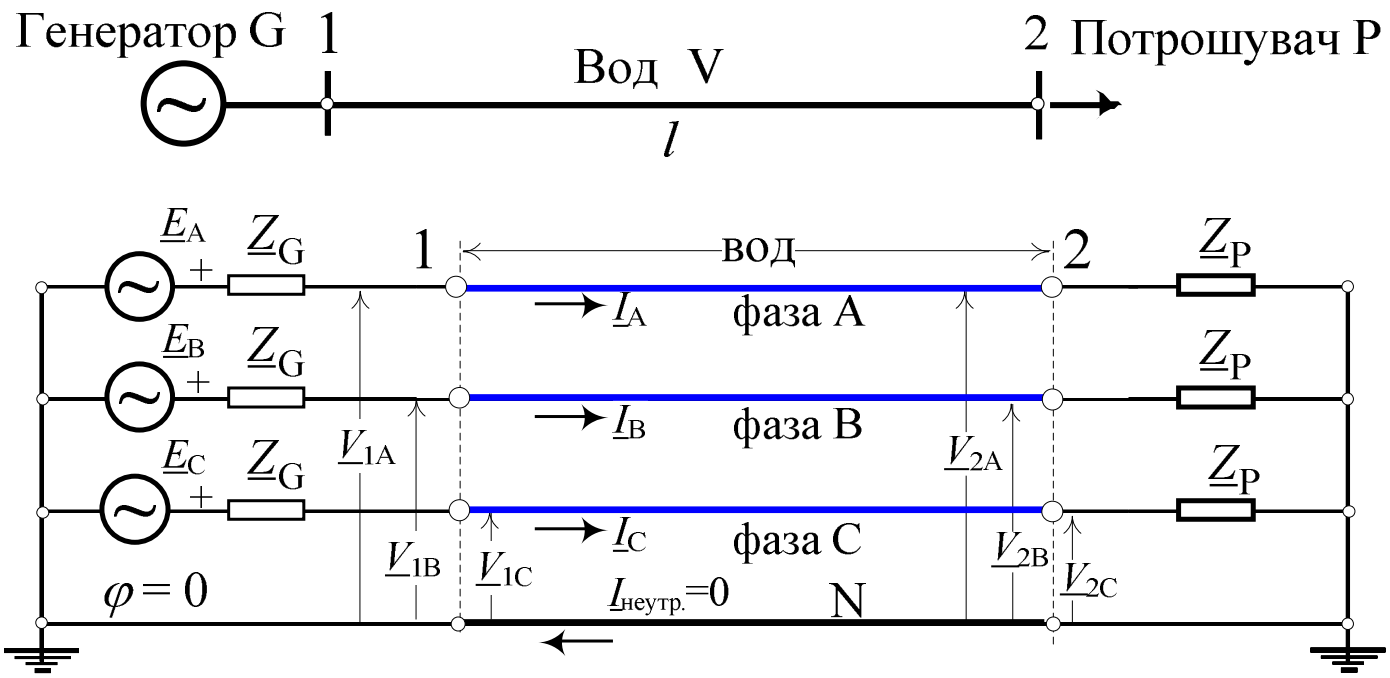
Разликата помеѓу сопствената и меѓусебната импеданција се нарекува погонска надолжна импеданција на трифазниот вод.

$$\underline{z} = \underline{z}_s - \underline{z}_m = r + jx = r + j \cdot (0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{r_p} + 0,0157) \ \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

Пресметката на состојбите кај надземните водови во една мрежа за симетричен и урамнотежен работен режим се врши со помош на нивните погонски импеданции.

Погонска импеданција

Трифазна мрежа (коло) со трифазен генератор (G) со намотки врзани во ѕвезда, трифазен преносен вод (V) со должина l и симетричен трифазен потрошувач (P).



Бидејќи системот е симетричен важи $\underline{I}_{\text{неутр.}} = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$, што значи ѕвездиштата кај генераторот и потрошувачот ќе бидат на ист потенцијал за кој што ќе усвоиме $\varphi = 0 \Rightarrow$ неутралниот спроводник можеме да го отстраниме.

Погонска импеданција

Врска помеѓу напоните на двата краја од водот

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{1\mathrm{A}} \\ \underline{V}_{1\mathrm{B}} \\ \underline{V}_{1\mathrm{C}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{V}_{2\mathrm{A}} \\ \underline{V}_{2\mathrm{B}} \\ \underline{V}_{2\mathrm{C}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{I}_{\mathrm{A}} \\ \underline{I}_{\mathrm{B}} \\ \underline{I}_{\mathrm{C}} \end{bmatrix}.$$

$$\underline{Z}_s = \underline{z}_s \cdot l = (r + r_z) \cdot l + j \cdot \left(0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_p} + 0,0157\right) \cdot l \, \frac{\Omega}{\mathrm{km}},$$

$$\underline{Z}_m = \underline{z}_m \cdot l = r_z \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \left(\log \frac{D_e}{D_m}\right) \cdot l \, \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

$$\underline{V}_{1\mathrm{A}} = \underline{V}_{2\mathrm{A}} + \underline{Z}_s \underline{I}_{\mathrm{A}} + \underline{Z}_m \underline{I}_{\mathrm{B}} + \underline{Z}_m \underline{I}_{\mathrm{C}} = \underline{V}_{2\mathrm{A}} + \underline{Z}_s \underline{I}_{\mathrm{A}} + \underline{Z}_m (\underline{I}_{\mathrm{B}} + \underline{I}_{\mathrm{C}}),$$

$$\underline{I}_B + \underline{I}_C = -\underline{I}_A,$$

$$\underline{V}_{1\mathrm{A}} = \underline{V}_{2\mathrm{A}} + \underline{Z}_s \underline{I}_{\mathrm{A}} - \underline{Z}_m \underline{I}_{\mathrm{A}} = \underline{V}_{2\mathrm{A}} + (\underline{Z}_s - \underline{Z}_m) \underline{I}_{\mathrm{A}} = \underline{V}_{2\mathrm{A}} + \underline{Z} \underline{I}_{\mathrm{A}},$$

Поради симетријата приликите во фазата А можат да се искажат како односи само помеѓу фазните напони и струи во таа фаза. Исто важи и за фазите В и С.

Погонска импеданција

$$\underline{V}_{1\mathrm{A}} = \underline{V}_{2\mathrm{A}} + \underline{Z}\underline{I}_{\mathrm{A}}$$
$$\underline{V}_{1\mathrm{B}} = \underline{V}_{2\mathrm{B}} + \underline{Z}\underline{I}_{\mathrm{B}}$$
$$\underline{V}_{1\mathrm{C}} = \underline{V}_{2\mathrm{C}} + \underline{Z}\underline{I}_{\mathrm{C}}$$

Величината $\underline{Z} = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m$ којашто фигурира во релациите се нарекува **редна погонска импеданција** на трифазниот вод. Таа претставува вештачка, математички воведена, величина која нема физичка позадина и не може да се измери.

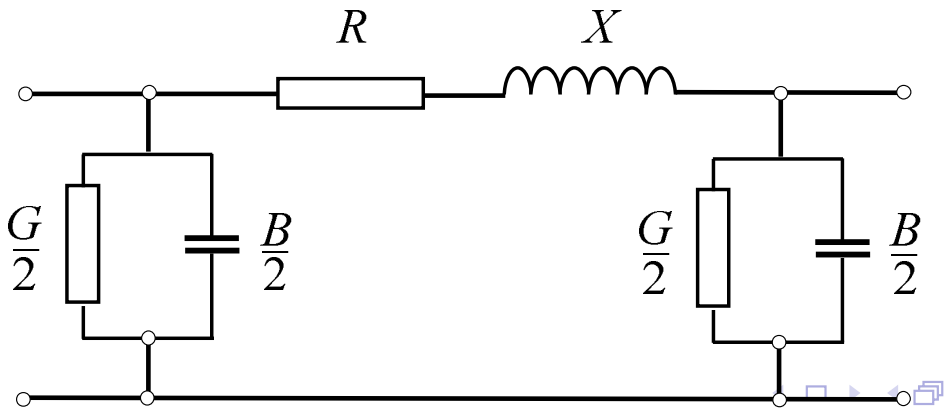
Заменски шеми на трифазните водови

Заменските шеми за трифазни симетрични водови се еднофазни.
По должината на водовите рамномерно се распределени нивните подолжни погонски параметри

- редната активна отпорност r,
- редната индуктивна отпорност x,
- напречната активна одводност g и
- напречната капацитивна проводност b.

За надземни водови со $l \leq 250$ km и за кабелски водови со $l \leq 50$ km, распределените параметри можат да се заменат со концентрирани

$$R = r \cdot l, \quad X = x \cdot l, \quad G = g \cdot l \quad \text{и} \quad B = b \cdot l$$



Редна активна отпорност

- Редната активна отпорност r на спроводниците со напречни пресеци што се користат во практика и $f = 50$ Hz е практично еднаква на нивната активна отпорност при еднонасочна струја. При 20°C таа е

$$r_{20} = \frac{1000}{34 \cdot A} = \frac{29,4}{A}\ \Omega/\mathrm{km}$$

каде што A е површината на напречниот пресек на алуминиумскиот дел од јажето, изразена во mm^2.

- При температура различна од 20°C активната отпорност е

$$r_\theta = r_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - 20)].$$

Температурниот коефициент на промена на отпорот (за Al и Cu) приближно изнесува $\alpha = 0,004 \quad 1/°\mathrm{C}$.

- Работната температура на спроводниците обично се движи помеѓу 30 и 40°C, затоа се користи релацијата

$$r = \frac{1000}{32 \cdot A} = \frac{31,25}{A}\ \Omega/\mathrm{km}.$$

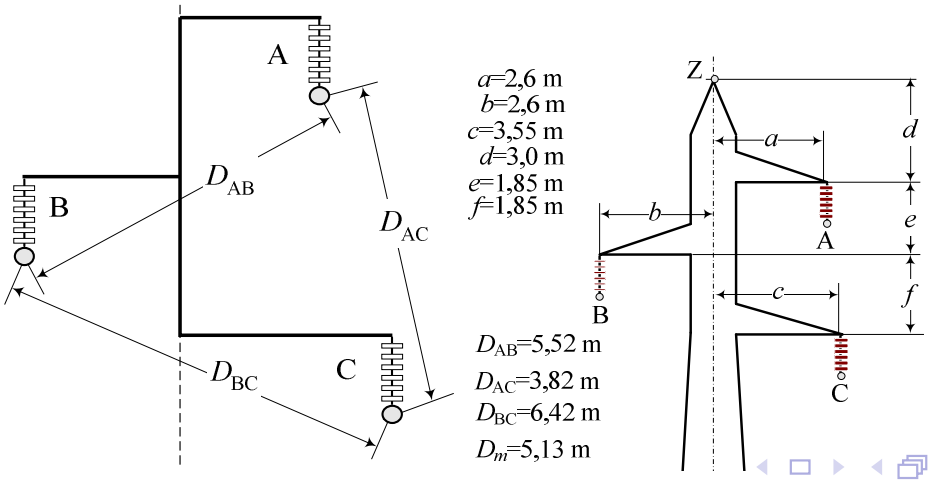
Погонската редна индуктивна отпорност

- Погонската редна индуктивна отпорност x на зависи од растојанијата меѓу спроводниците на водот и од нивните радиуси

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{r_p} + 0,0157\,\Omega/\mathrm{km},$$

  - r_p радиус на спроводникот
  - D_m средногеометриско растојание меѓу фазните спроводници

$$D_m = \sqrt[3]{D_{\mathrm{AB}} \cdot D_{\mathrm{AC}} \cdot D_{\mathrm{BC}}}.$$



Погонската редна индуктивна отпорност

- Равенката за x може да се напише во следниот облик

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s},$$

каде што D_s се нарекува сопствено средногеометриско растојание.

- За масивни спроводници или спроводници изведени во форма на јажиња од еднороден материјал

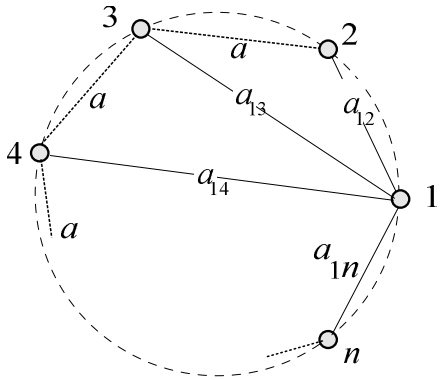
$$D_s = r'_p = e^{-\frac{1}{4}} \cdot r_p = 0,7788 \cdot r_p.$$

- За алучел-јажињата (Al/Č) со однос на пресеците $\varepsilon = A_{\mathrm{Al}}/A_{\mathrm{Fe}} = 6:1$ приближно важи

$$D_s \approx 0,81 \cdot r_p.$$

Спроводници во сноп

- За пренесување на големи моќности со надземните водови се користат високи напони и големи пресеци на фазните спроводници кои се направени со повеќе спроводници по фаза, односно со спроводници во сноп. Рамностран многуаголник со страна a од 30 до 50 cm.



Еквивалентен спроводник со сопствено средногеометриско растојание

$$D_s = \sqrt[n]{r'_p \cdot \prod_{i=2}^{n} a_{1i}} = \sqrt[n]{r'_p \cdot a_{12} \cdot a_{13} \cdot \ldots \cdot a_{1n}}.$$

$$n = 2: \; D_s = \sqrt{r'_p \cdot a} \quad n = 3: \; D_s = \sqrt[3]{r'_p \cdot a^2} \quad n = 4: \; D_s = \sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r'_p \cdot a^3}$$

Спроводници во сноп

- Со спроводниците во сноп се намалува x. Кај сноп од два спроводника x е помало за 15 до 20% во споредба со случајот со еден спроводник по фаза. Ако пак снопот има три спроводници тогаш x се намалува за 25 до 30%.
- Ако на едни исти столбови се поставени две тројки на спроводници (двосистемски вод) x се намалува за 15 до 20%.
- Погонските реактанции x на надземните водови се неколку пати поголеми отколку реактанциите на трифазните кабли.

Вид на водот	$x(\Omega/\mathrm{km})$
Надземен, до 1 kV	0,34
Надземен, 6 - 10 kV	0,38
Надземен, 20 kV, 35 kV, 110 kV	0,40
Надземен, 220 kV	0,41
Надземен, 380 kV	0,34
Кабелски, до 1 kV	0,06
Кабелски, 6 - 10 kV	0,08
Кабелски, 20 kV	0,11
Кабелски, 35 kV	0,13

Напречната активна одводност

- Се определува врз основа на загубите на активна моќност во изолацијата на водот. Загубите се сосема мали затоа обично е $g \approx 0$.
- Кај високонапонските водови со номинален напон 110 kV и повисок во определени услови се јавува празнење околу спроводниците наречено корона. Таа е особено интензивна при влажно време кога загубите се за 10 па и повеќе пати поголеми од вообичаените. Најефикасен начин за смалување на загубите на моќност поради короната е примена на спроводници во сноп.
- Најмали дозволени пресеци кај надземните водови заради намалување на ефектот на корона

Номинален напон на водот (kV)	Најмал дозволен пресек на Al/Č–јаже
110 kV	70/12
220 kV	240/40
380 kV	2×490/65

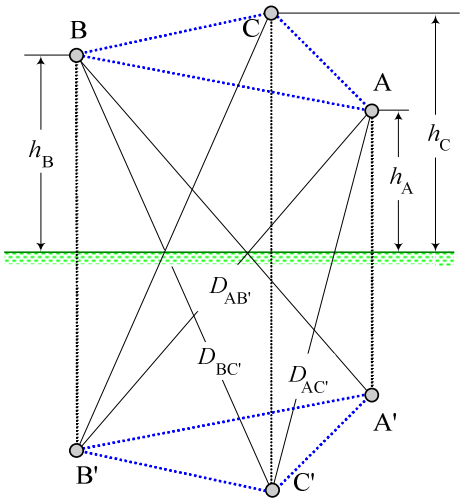
- Загубите поради короната изнесуваат околу 1 kW/km за 110 kV надземни водови, односно неколку kW/km за надземни водови со повисок напон. Кај надземните водови со напон 500 kV и 750 kV при лошо време загубите поради короната можат да достигнат и вредности преку 100 kW/km.

Погонска напречна капацитивна спроводност

- Погонската капацитивност по единица должина C'_p на трифазен вод е

$$C'_p = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \dfrac{2H_s \cdot D_m}{H_m \cdot r_p}},$$

  - r_p - радиус на спроводниците
  - $H_s = \sqrt[3]{h_{\mathrm{A}} \cdot h_{\mathrm{B}} \cdot h_{\mathrm{C}}}$
  - $D_m = \sqrt[3]{D_{\mathrm{AB}} \cdot D_{\mathrm{AC}} \cdot D_{\mathrm{BC}}}$
  - $H_m = \sqrt[3]{D_{\mathrm{AB'}} \cdot D_{\mathrm{AC'}} \cdot D_{\mathrm{BC'}}}$



Погонска напречна капацитивна спроводност

$$b = \omega \cdot C_p' = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{2H_s \cdot D_m}{H_m \cdot r_p}}, \ \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{km}}.$$

Кај реалните водови обично е $2H_s \approx H_m$ па може да се напише

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_m}{r_p}} \ \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{km}}.$$

Кога не е позната геометријата на фазните спроводници за b може да се користат следните вредности

- b = 2,6 – 2,8 μS/km за водови 110 kV и 220 kV, со еден спроводник по фаза;
- b = 3,3 μS/km за водови 380 kV, со два спроводника по фаза.

Кај кабелските водови вредностите на погонската капацитивна спроводност по единица должина b се значително поголеми.

Погонска напречна капацитивна спроводност

Ако претпоставиме дека напонот долж водот е константен (не е сосема така) капацитивната струја на водот е

$$I_C = V \cdot b \cdot l = B \cdot V,$$

каде што V е фазниот напон.
Капацитивната моќност на водот Q_C е

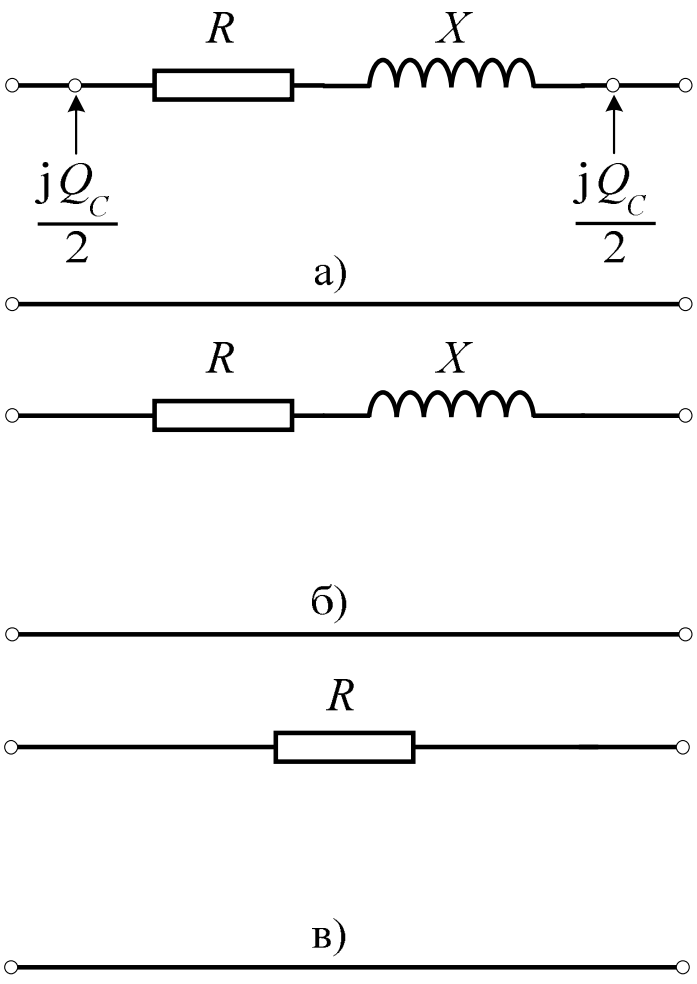
$$Q_C = 3 \cdot V \cdot I_C = 3 \cdot B \cdot V^2 = B \cdot U^2,$$

каде U е меѓуфазниот напон на водот ($U = \sqrt{3} \cdot V$).

Номинален напон на водот U_n (kV)	Генерирана реактивна моќност Q_C (Mvar/100 km)
110	3,3
220	13,0
380	50,0

Трижилен кабел за напон 20 kV, со пресек 150 mm^2 и со должина 100 km, при номинален напон би генерирал околу 5,6 Mvar. Ако кабелот би го сочинувале три едножилни кабли тој би генерирал околу 3,3 Mvar на 100 km ($\approx$30 пати повеќе од еден 20 kV надземен вод).

Разни облици на заменска шема на вод



а) упростен облик на заменската шема со земање предвид на Q_C, б) заменска шема за СН и НН надземни водови и кабли, в) заменска шема за НН вод со мал пресек

Погонска бранова импеданција

- Загуби на реактивна моќност во редната индуктивна отпорност

$$Q_X = 3 \cdot X \cdot I^2,$$

- Генерирање реактивна моќност во погонскиот капацитет на водот

$$Q_C = 3 \cdot B \cdot V^2.$$

- Ако водот струјно го оптовариме така што ќе се биде $Q_C = Q_X$ за односот помеѓу напонот и струјата важи

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{X}{B}} = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{L'_p}{C'_p}} = Z_V$$

  Z_V е погонска бранова импеданција на водот
- Ако на крајот од водот е приклучен чисто активен потрошувач чијашто отпорност е точно еднаква на Z_V тогаш водот пренесува природна моќност P_N. Во тој случај напонот и струјата насекаде долж водот се константни по модул и се во фаза.

$$Z_V = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \ln \frac{D_m}{r_p}$$

$$Z_V = 60 \cdot \ln \frac{D_m}{r_p} = 138 \cdot \log \frac{D_m}{r_p}$$

Пример 1

110 kV надземни водови во Република Македонија се главно изградени со челично-решеткасти столбови од типот „S“, производ на ЕМО-Охрид и со спроводници од алучел-јаже Al/Č 240/40 mm^2 произведени според стандардот МКС.Н.Ц1.351. Да се пресметаат подолжните параметри r, x и b на овие водови. Колкава е нивната бранова импеданција Z_V и колкава е нивната природна моќност P_N. Колкаво е струјното оптоварување на водот I_N во режим на пренос на природна моќност, во (A) и во (%) од неговото трајно дозволено оптоварување кое за летни услови изнесува I_d = 530 A.

Од табела отчитуваме податоци за јажето: пресек на ауминиумовиот плашт A = 243,0 mm^2; пречник $d_p = 2r_p$ = 21,9 mm.

$$r = \frac{31,25}{A} = \frac{31,25}{243,0} = 0,129\ \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

$$D_m = \sqrt[3]{5,52 \cdot 3,82 \cdot 6,42} = 5,13\ \mathrm{m},$$

$$x = 0,1445 \cdot \log\left(\frac{D_m}{D_s}\right) = 0,1445 \cdot \log\left(\frac{5,13}{0,81 \cdot 10,95 \cdot 10^{-3}}\right) = 0,399\ \frac{\Omega}{\mathrm{km}},$$

Пример 1

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(D_m/r_p)} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(5,13/0.01095)} = 2,84 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{km}}.$$

$$Z_V = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{0,399}{2,84 \cdot 10^{-6}}} = 375\ \Omega.$$

$$I_N = \frac{V_\mathrm{n}}{Z_V} = \frac{U_\mathrm{n}}{\sqrt{3} \cdot Z_V} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 375} = 0,169\ \mathrm{kA},$$

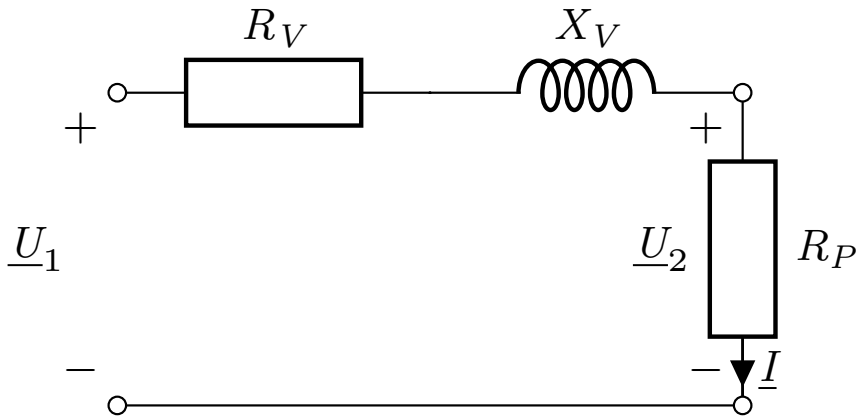
$$I_N(\%) = 100 \cdot \frac{I_N}{I_d} = 100 \cdot \frac{169}{530} = 32\ \%,$$

$$P_N = 3 \cdot V_\mathrm{n} \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot U_\mathrm{n} \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 0,169 = 32,26\ \mathrm{MW}.$$

Значи кога водот пренесува природна моќност тој е оптоварен само со околу 1/3 од неговата најголема трајно дозволена струја.

Пример 2

Водот од претходниот пример има должина $l = 50\,\mathrm{km}$ и на неговиот крај е приклучен потрошувач кој е претставен со отпорник $R_P = 250\,\Omega$. Познати се неговите параметри $r = 0,129\,\Omega/\mathrm{km}$ и $x = 0,399\,\Omega/\mathrm{km}$. Да се смета дека е $b = 0$. Напонот на почетокот на водот е $U_1 = 112\,\mathrm{kV}$. Да се пресмета напонот на крајот од водот, струјата во водот и моќноста на потрошувачот.



$$R_V = r \cdot l = 0,129 \cdot 50 = 6,45\,\Omega \qquad X_V = x \cdot l = 0,399 \cdot 50 = 19,95\,\Omega$$

$$\underline{U}_2 = \frac{R_P}{R_P + R_V + jX_V} \cdot \underline{U}_1 = \frac{250}{250 + 6,45 + j19,95} \cdot 112 = (108,5263 - j8,4426)\,\mathrm{kV}$$

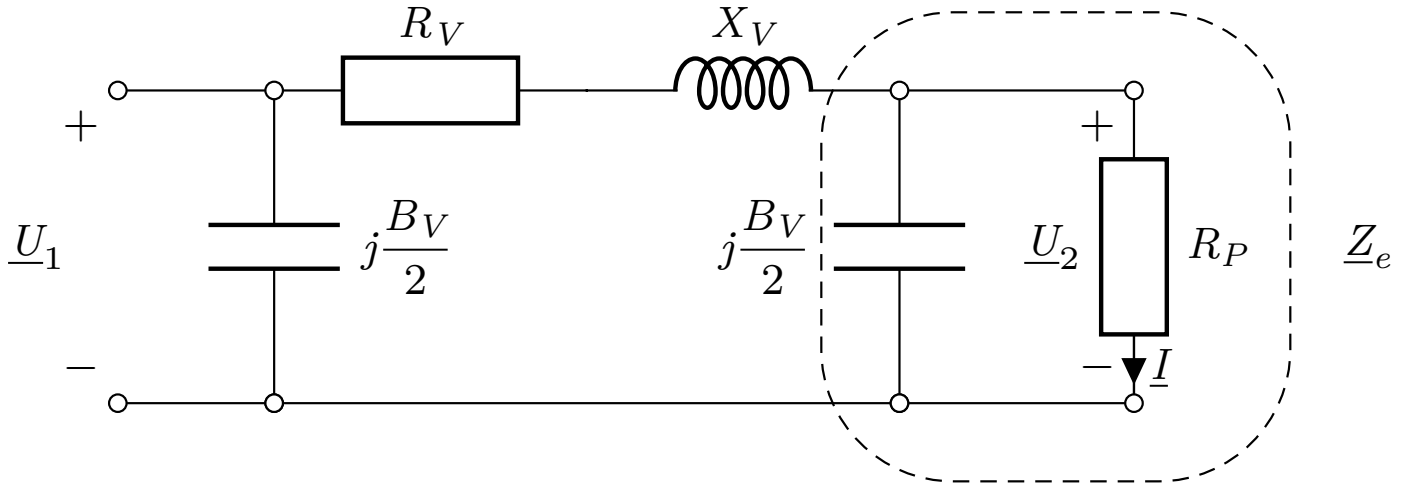
$$U_2 = 108,8542\,\mathrm{kV} \qquad \theta_2 = -4,448^\circ$$

$$P_P = \frac{U_2^2}{R_P} = \frac{108,8542^2}{250} = 47,397\,\mathrm{MW}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}R_P} = \frac{108,5263 - j8,4426}{\sqrt{3} \cdot 250} = (0,2506 - j0,0195)\,\mathrm{kA} \qquad I = 0,2514\,\mathrm{kA} = 251,4\,\mathrm{A}$$

Пример 3

Да се пресмета напонот на крајот на водот од претходниот пример со уважување на капацитетот на водот преку параметарот $b = 2,84 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{S/km}$.



$$B_V = b \cdot l = 2,84 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 142 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{S}$$

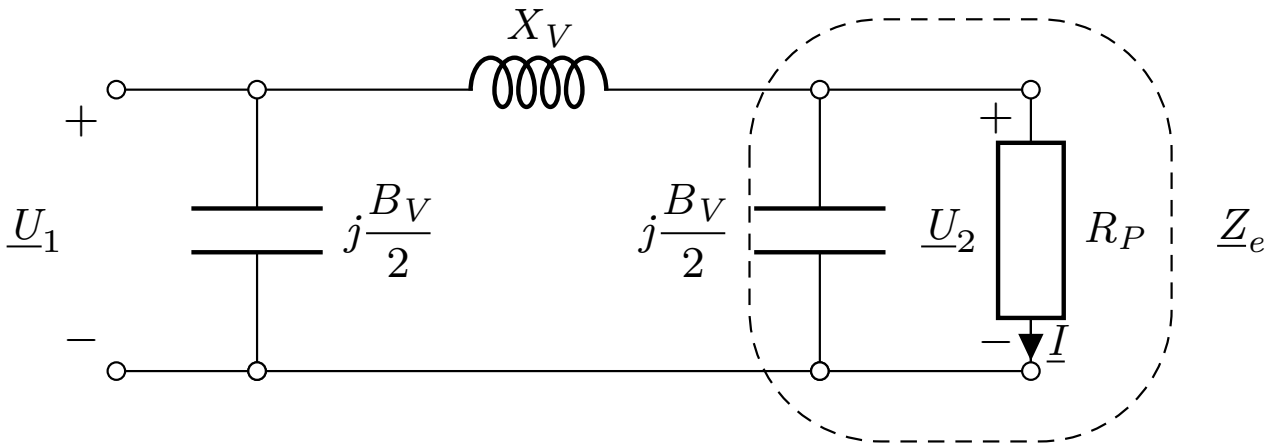
$$\underline{Z}_e = \frac{R_P \cdot \dfrac{2}{jB_V}}{R_P + \dfrac{2}{jB_V}} = \frac{2 \cdot R_P}{2 + jB_V \cdot R_P} = \frac{2 \cdot 250}{2 + j \cdot 142 \cdot 10^{-6} \cdot 250} = (249,9213 - j4,4361)\,\Omega$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{Z}_e}{\underline{Z}_e + R_V + jX_V} \cdot \underline{U}_1 = \frac{249,9213 - j4,4361}{249,9213 - j4,4361 + 6,45 + j19,95} \cdot 112$$

$$\underline{U}_2 = (108,6670 - j8,5138)\,\mathrm{kV} \qquad U_2 = 109\,\mathrm{kV} \qquad \theta_2 = -4,478^\circ$$

Пример 4

Водот од примерот 1 има должина $l = 50\,\mathrm{km}$ и на неговиот крај е приклучен потрошувач кој е претставен со отпорник $R_P = Z_V = \sqrt{x/b} = 375\,\Omega$. Да се смета дека е $r = 0$, $x = 0,399\,\Omega/\mathrm{km}$ и $b = 2,84 \cdot 10^{-6}\,\Omega/\mathrm{km}$. Напонот на почетокот на водот е $U_1 = 112\,\mathrm{kV}$. Да се пресмета напонот на крајот од водот.



$$X_V = x \cdot l = 0,399 \cdot 50 = 19,95\,\Omega \qquad B_V = b \cdot l = 2,84 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 142 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{S}$$

$$\underline{Z}_e = \frac{R_P \cdot \dfrac{2}{jB_V}}{R_P + \dfrac{2}{jB_V}} = \frac{2 \cdot R_P}{2 + jB_V \cdot R_P} = \frac{2 \cdot 375}{2 + j \cdot 142 \cdot 10^{-6} \cdot 375} = (374,7344 - j9,9773)\,\Omega$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{Z}_e}{\underline{Z}_e + jX_V} \cdot \underline{U}_1 = \frac{374,7344 - j9,9773}{374,7344 - j9,9773 + j19,95} \cdot 112$$

$$\underline{U}_2 = (111,8414 - j5,9584)\,\mathrm{kV} \qquad U_2 = 112\,\mathrm{kV} \qquad \theta_2 = -3,05^\circ$$

Пример 5

Да се реши преходниот пример за случај кога должината на водот изнесува $l = 100\,\mathrm{km}$.

$$X_V = x \cdot l = 0,399 \cdot 100 = 39,9\,\Omega \qquad B_V = b \cdot l = 2,84 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 284 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{S}$$

$$\underline{Z}_e = \frac{R_P \cdot \dfrac{2}{jB_V}}{R_P + \dfrac{2}{jB_V}} = \frac{2 \cdot R_P}{2 + jB_V \cdot R_P} = \frac{2 \cdot 375}{2 + j \cdot 284 \cdot 10^{-6} \cdot 375} = (373,940 - 19,912)\,\Omega$$

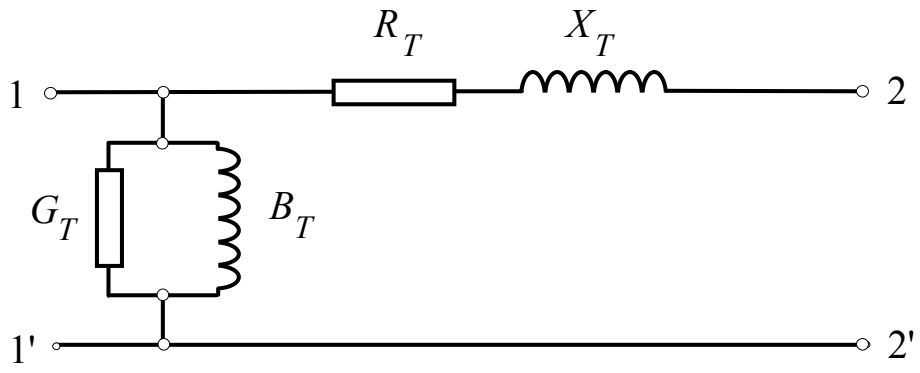
$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{Z}_e}{\underline{Z}_e + jX_V} \cdot \underline{U}_1 = \frac{373,940 - 19,912}{373,940 - 19,912 + j39,9} \cdot 112$$

$$\underline{U}_2 = (111,363 - 11,917)\,\mathrm{kV} \qquad U_2 = 112\,\mathrm{kV} \qquad \theta_2 = -6,10^\circ$$

Ефективната вредност на напонот на водот не зависи од должината. Фазниот агол е негативен и се менува за $6^\circ/100\,\mathrm{km}$.

Двонамотни трифазни трансформатори

Независно од тоа како им се поврзани фазните намотки, двонамотните трифазни трансформатори најчесто ги претставуваме со заменската Г-шема.



Заменската Г-шема на еден двонамотен трифазен трансформатор се карактеризира со 4 параметри

- активна отпорност R_T и реактивна отпорност X_T на намотките на трансформаторот ($X_T \gg R_T$)
- активна спроводност G_T и реактивна спроводност B_T на гранката на магнетизирање ($B_T \gg G_T$)
- параметрите ги определуваме од податоците за струјата I_0 и загубите ΔP_0 од обидот на празен и од напонот на куса врска U_k и загубите ΔP_k од обидот на куса врска.

Двонамотни трифазни трансформатори

$$\Delta P_0 \approx \Delta P_{\mathrm{Fe}}.$$
$$\Delta P_0 = \Delta P_{\mathrm{Fe}} = 3G_T \cdot V_{\mathrm{n}}^2 = G_T \cdot U_{\mathrm{n}}^2,$$
$$G_T = \frac{\Delta P_0}{U_{\mathrm{n}}^2}.$$

- Струјата на празен од I_0 изнесува од 0,1% до 3% од номиналната струја на трансформаторот
- Активната компонента е за 4 до 6 пати помала од реактивната компонента, поради што адмитанцијата на магнетизирање $\underline{Y}_T = G_T + jB_T$ е по модул приближно еднаква на реактивната компонента, т.е. $|\underline{Y}_T| \approx |B_T|$

$$|\underline{Y}_T| \cdot U_{\mathrm{n}} = \sqrt{3} \cdot \frac{i_0\%}{100} \cdot I_{\mathrm{n}} = \frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot I_{\mathrm{n}}}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_{\mathrm{n}}}{U_{\mathrm{n}}},$$
$$B_T \approx -|\underline{Y}_T| = -\frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_{\mathrm{n}}}{U_{\mathrm{n}}^2}.$$

Знакот минус укажува на индуктивниот карактер на гранката.

Двонамотни трифазни трансформатори

- При обидот на куса врска секундарната намотка од трансформаторот кусо се спојува, а на примарната намотка се носи напонот U_k при кој во намотките од трансформаторот ќе течат номинални струи. Загубите на активна моќност во намотките (бакарот) и во железото ќе ги означиме со ΔP_k.
- Бидејќи U_k е мал (од 4% до 12% од номиналниот) магнетската индукција во јадрото трансформаторот е мала така што загубите во железото се безначајни во однос на загубите во бакарот.

$$\Delta P_{\mathrm{Cun}} \approx \ \Delta P_k = 3 \cdot R_T I_{\mathrm{n}}^2 = 3 \cdot R_T \cdot I_{\mathrm{n}}^2 \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{U_{\mathrm{n}}^2} = R_T \cdot \frac{S_{\mathrm{n}}^2}{U_{\mathrm{n}}^2}$$

$$R_T = \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2}.$$

- Напонот на куса врска U_k обично се изразува во проценти од номиналниот напон на трансформаторот и тогаш се означува со $u_k\%$ или само со u_k.

$$U_k = \frac{u_k\%}{100} \cdot U_{\mathrm{n}} = \sqrt{3} \cdot Z_T \cdot I_{\mathrm{n}},$$

$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}}.$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}.$$

Пример 6

Дистрибутивен трансформатор за снижување на напонот тип TD400, производ на ЕМО-Охрид, ги има следните номинални податоци: номинален преносен однос $U_{1\mathrm{n}}/U_{2\mathrm{n}}$ = 10/0,4 kV/kV; S_{n} = 400 kVA; напон на куса врска u_k = 4%; струја на празен од i_0 = 2,1%; загуби во бакар (загуби поради оптоварување) ΔP_{Cun} = 4600 W; загуби во празен од (загуби во железо) ΔP_{Fe} = 930 W. Да се пресметаат параметрите R_T, X_T, G_T и B_T на неговата Г-заменска шема, сведени кон 10 kV страна.

$$G_T = \frac{\Delta P_0}{U_{\mathrm{n}}^2} = \frac{930}{10000^2} = 9,3\ \mu\mathrm{S}.$$

$$|\underline{Y}_T| = \frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_{\mathrm{n}}}{U_{\mathrm{n}}^2} = \frac{2,1}{100} \cdot \frac{400 \cdot 10^3}{10000^2} = 84\ \mu\mathrm{S}.$$

$$B_T = -\sqrt{Y_T^2 - G_T^2} = -\sqrt{84^2 - 9,3^2} = -83,5\ \mu\mathrm{S}.$$

$$\underline{Y}_T = G_T + jB_T = (9,3 - j83,5)\ \mu\mathrm{S}.$$

Пример 6

$$R_T = \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2} = 4600 \cdot \frac{10000^2}{400000^2} = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10^2}{0,4^2} = 2,875\ \Omega,$$

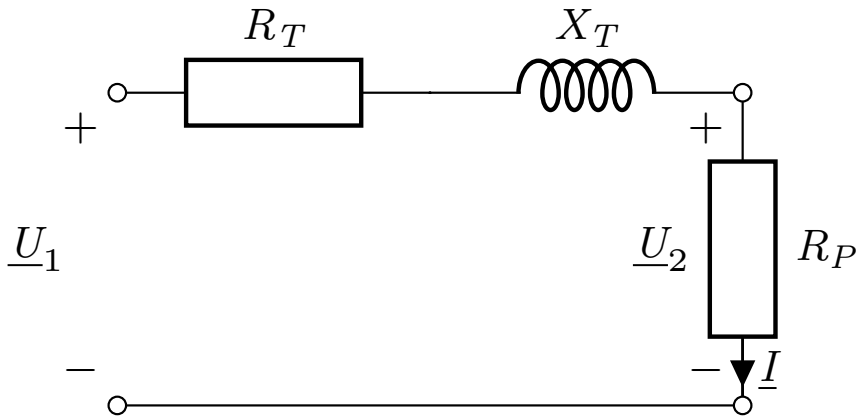
$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{10^2}{0,4} = 10\ \Omega.$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{10^2 - 2,875^2} = 9,58\ \Omega.$$

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = (2,875 + j9,58)\ \Omega.$$

Пример 7

На секундарот на трансформаторот од претходниот пример е приклучен потрошувач кој е претставен со отпорник $R_P = 300\,\Omega$. Да се смета дека е $G_T = 0$ и $B_T = 0$. Напонот на примарот на трансформаторот е $U_1 = 10,5\,\mathrm{kV}$. Да се пресмета напонот на секундарот на трансформаторот, струјата во трансформаторот и моќноста на потрошувачот.



$$R_T = 2,875\,\Omega \qquad X_T = 9,58\,\Omega$$

$$\underline{U}_2 = \frac{R_P}{R_P + R_T + jX_T} \cdot \underline{U}_1 = \frac{300}{300 + 2,875 + j9,58} \cdot 10,5 = (10,3899 - j0,3286)\,\mathrm{kV}$$

$U_2 = 10,395\,\mathrm{kV}$ $\Rightarrow$ Проблем: $U_2 \gg U_{2n} \Longleftrightarrow U_2 = 25,987 \cdot U_{2n}$ $\qquad \theta_2 = -1,812^\circ$

$$P_P = 3 \cdot \frac{\left(U_2/\sqrt{3}\right)^2}{R_P} = \frac{U_2^2}{R_P} = \frac{10,395^2}{300} = 0,3602\,\mathrm{MW} = 360,2\,\mathrm{kW}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot R_P} = \frac{10,3899 - j0,3286}{\sqrt{3} \cdot 300} = (0,01999 - j0,00063)\,\mathrm{kA} \qquad I = 0,02\,\mathrm{kA} = 20\,\mathrm{A}$$

Пример 7– сведување

- Пресметаните параметри на трансформаторот важат за напонското ниво на примарот (во формулите е користено $U_n = 10\,\mathrm{kV}$)
- Од напонско ниво 10 kV сакаме да се префрлиме на напонско ниво 0,4 kV – коефициентот на пренос е $k = 0,4/10 = 0,04$: пресметаниот напон на секундарот треба да се помножи со k, струјата да се подели со k, импеданциите да се помножат со k^2, моќноста останува иста

$$U_2'' = k \cdot U_k = 0,04 \cdot 10,395 = 0,4158\,\mathrm{kV} = 415,8\,\mathrm{V}$$

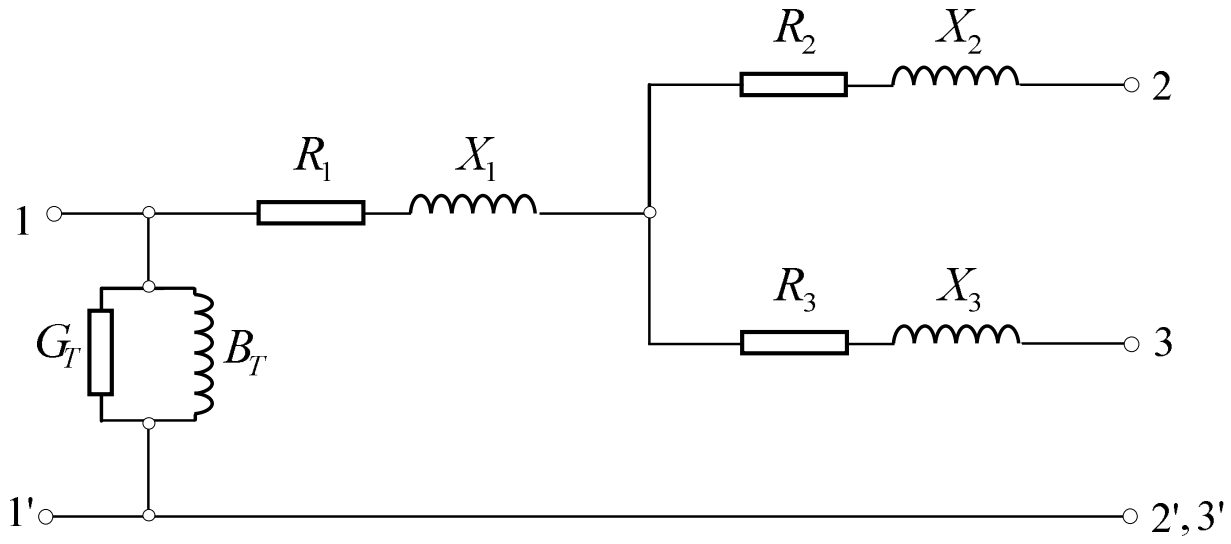
$$I'' = I/k = 20/0,04 = 500\,\mathrm{A}$$

$$R_P'' = k^2 \cdot R_P = 0.04^2 \cdot 300 = 0,48\,\Omega$$

$$P_P = \frac{\left(U_2''\right)^2}{R_P''} = \frac{0,4158^2}{0,48} = 0,3602\,\mathrm{MW} = 360,2\,\mathrm{kW}$$

- Бидејќи е $10/0,4 = 25$ горните резултати можеме да ги толкуваме и вака: напонот е 25 пати помал, струјата е 25 пати поголема, импеданцијата е $25^2 = 625$ пати помала, моќноста е иста.

Тринамотни трифазни трансформатори



- Гранката на магнетизирање, како и кај двонамотниот трифазен трансформатор, ќе ја приклучиме на почетокот од примарната намотка (заменска Г-шема). Параметрите ги пресметуваме на истиот начин.
- Активните и реактивните отпорности на намотките се определуваат врз основа на податоците добиени од обидите на куса врска: примар-секундар, примар-терциер, секундар-терциер.

Тринамотни трифазни трансформатори

- Обид на куса врска примар-секундар

$$R_1 + R_2 = R_{12} = \Delta P_{k12} \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}12}^2} \quad X_1 + X_2 = X_{12} = \frac{u_{k12}\%}{100} \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}12}}$$

- Обид на куса врска примар-терциер

$$R_1 + R_3 = R_{13} = \Delta P_{k13} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}13}^2} \quad X_1 + X_3 = X_{13} = \frac{u_{k13}\%}{100} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}13}}$$

- Обид на куса врска секундар-терциер

$$R_2 + R_3 = R_{23} = \Delta P_{k23} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}23}^2} \quad X_2 + X_3 = X_{23} = \frac{u_{k23}\%}{100} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}23}}$$

Два системи од по 3 линеарни равенки со 3 непознати за определување на R_1, R_2 и R_3 и за определување на X_1, X_2 и X_3.

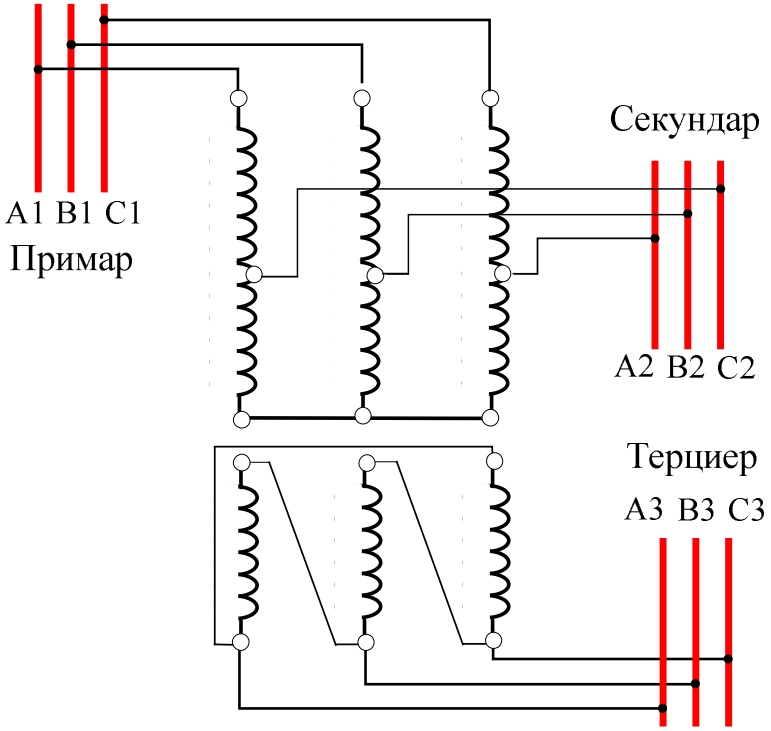
Тринамотни трифазни трансформатори

$$R_1 = (R_{12} + R_{13} - R_{23})/2,$$
$$R_2 = (R_{12} + R_{23} - R_{13})/2,$$
$$R_3 = (R_{13} + R_{23} - R_{12})/2.$$

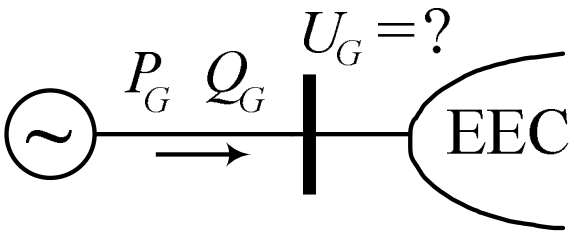
$$X_1 = (X_{12} + X_{13} - X_{23})/2,$$
$$X_2 = (X_{12} + X_{23} - X_{13})/2,$$
$$X_3 = (X_{13} + X_{23} - X_{12})/2.$$

Трифазни автотрансформатори

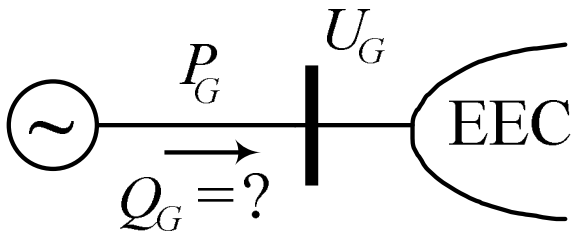
- Низ заедничката намотка тече струја еднаква на разликата на секундарната и примарната струја. Поради тоа спроводниците во заедничката намотка може да имаат и помал напречен пресек во кај двонамотните трансформатори со иста моќност.
- Терциерната намотка е обично врзана во триаголник и е галвански одвоена од примарната и секундарната намотка.
- Начинот на пресметување на параметрите на одделните намотки е сосема ист како и кај тринамотните трансформатори.



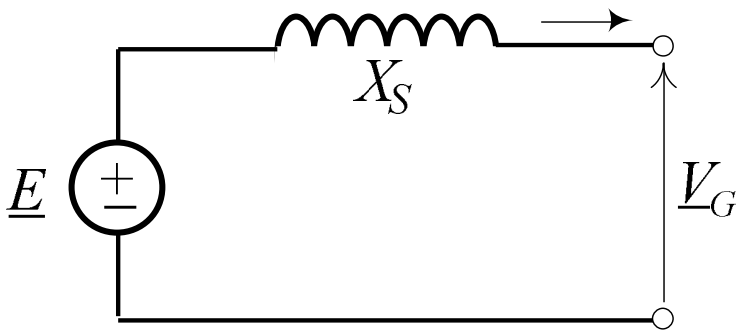
Синхрони генератори



а) Генератор приклучен во PQ јазел

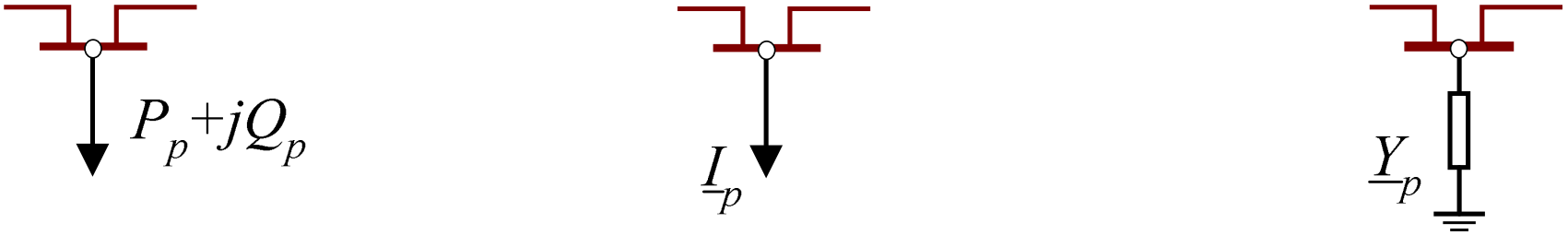


б) Генератор приклучен во PU јазел



$$X_S = \frac{x_s\%}{100} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n}}.$$

Оптоварување на потрошувачите



а) б) в)

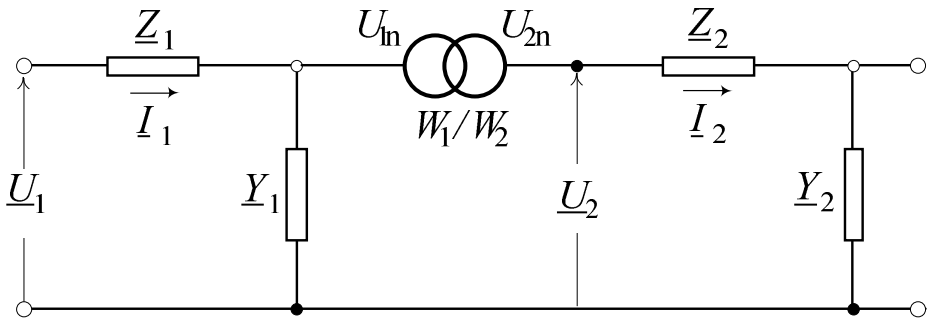
$$\underline{I}_p = \frac{\underline{S}_p^*}{\sqrt{3}\cdot \underline{U}_p^*} = \frac{P_p - jQ_p}{\sqrt{3}\cdot \underline{U}_p^*}.$$

$$\underline{Y}_p = \frac{\underline{S}_p^*}{U_p^2}$$

$$U_p \approx U_n$$

Сведување на параметрите во мрежи со трансформатори

Пред да се пристапи кон решавањето на мрежата, ќе треба да се изврши сведување на сите електрични величини на едно исто напонско ниво.



$$\underline{U}_{\text{сведено}} = k_{\mathrm{T}} \cdot \underline{U} \qquad \underline{I}_{\text{сведено}} = \frac{1}{k_{\mathrm{T}}} \cdot \underline{I}$$

$$\underline{Z}_{\text{сведено}} = k_{\mathrm{T}}^2 \cdot \underline{Z} \qquad \underline{Y}_{\text{сведено}} = \frac{1}{k_{\mathrm{T}}^2} \cdot \underline{Y},$$

каде што k_{T} е актуелниот преносен однос на трансформаторот, дефиниран како однос на бројот на навивки на намотката од онаа страна на трансформаторот на која вршиме сведување и бројот на навивки на намотката на трансформаторот која се наоѓа на страната чии параметри ги сведуваме.

Сведување на параметрите во мрежи со трансформатори

Ако сакаме да вршиме сведување на величините $\underline{U}_1, \underline{I}_1, \underline{Z}_1$ и $\underline{Y}_1$ на страната со номинален напон $U_{2\mathrm{n}}$ и ако нивните сведени вредности ги означиме со индексот ($''$), тогаш ќе имаме

$$k_{\mathrm{T}} = \frac{W_2}{W_1}; \quad \underline{U}_1'' = k_{\mathrm{T}} \cdot \underline{U}_1; \quad \underline{I}_1'' = \frac{\underline{I}_1}{k_{\mathrm{T}}}; \quad \underline{Z}_1'' = k_{\mathrm{T}}^2 \cdot \underline{Z}_1; \quad \underline{Y}_1'' = \frac{\underline{Y}_1}{k_{\mathrm{T}}^2}.$$

Ако сакаме величините $\underline{U}_2, \underline{I}_2, \underline{Z}_2$ и $\underline{Y}_2$ да ги сведеме на напонско ниво $U_{1\mathrm{n}}$, тогаш соодветните сведени вредности ќе бидат

$$k_{\mathrm{T}} = \frac{W_1}{W_2}; \quad \underline{U}_2' = k_{\mathrm{T}} \cdot \underline{U}_2; \quad \underline{I}_2' = \frac{\underline{I}_2}{k_{\mathrm{T}}}; \quad \underline{Z}_2' = k_{\mathrm{T}}^2 \cdot \underline{Z}_2; \quad \underline{Y}_2' = \frac{\underline{Y}_2}{k_{\mathrm{T}}^2}.$$

Единични вредности

- Проблемот на сведувањето на електричните мрежи можеме да го решиме и со примена на единичните величини (pu, per unit).
- Единичната вредност на една величина се дефинира како количник од посматраната величина и една произволно избрана вредност, која има иста димензија како и посматраната величина и која се нарекува базна величина.
- За секоја електрична величина (напон $\underline{U}$, струја $\underline{I}$, моќност $\underline{S}$, импеданција $\underline{Z}$ или адмитанција $\underline{Y}$) се избира по една базна величина: $U_{\mathrm{B}}, I_{\mathrm{B}}, S_{\mathrm{B}}, Z_{\mathrm{B}}$ и Y_{B}.

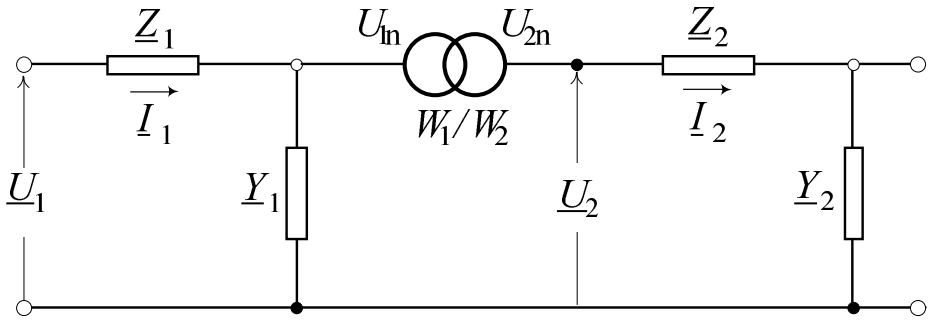
Единични вредности

- Наместо да се одберат сите 5 базни величини независно една од друга, можно е да се изберат само две од нив произволно, додека останатите 3 базни величини ќе можат да се изразат преку усвоените две. Како погодно се покажало да се врши избор на базната моќност S_{B} и базниот напон U_{B}

$$I_{\mathrm{B}} = \frac{S_{\mathrm{B}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{B}}}; \quad Z_{\mathrm{B}} = \frac{U_{\mathrm{B}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\mathrm{B}}} = \frac{U_{\mathrm{B}}^2}{S_{\mathrm{B}}}; \quad Y_{\mathrm{B}} = \frac{1}{Z_{\mathrm{B}}} = \frac{S_{\mathrm{B}}}{U_{\mathrm{B}}^2}.$$

- Кога се работи за мрежи со 2 или повеќе напонски нивоа, е потребно за секое напонско ниво да имаме по еден систем од 5 базни величини. Притоа односот на базните напони задолжително мора да биде усогласен со актуелниот преносен однос (т.е. со односот на бројот на навивките) на трансформаторот со кој се поврзани деловите од мрежата со разни напонски нивоа. Базната моќност S_{B} е насекаде во мрежата иста.

Единични вредности



Ако за делот од мрежата со номинален напон U_{n1} за базниот напон и базната моќност усвоиме одредени вредности U_{B1} и S_{B1}, тогаш останатите базни величини кои се однесуваат на тој дел на мрежата ќе бидат

$$I_{\mathrm{B1}} = \frac{S_{\mathrm{B1}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\mathrm{B1}}}; \quad Z_{\mathrm{B1}} = \frac{U_{\mathrm{B1}}}{\sqrt{3}\cdot I_{\mathrm{B1}}} = \frac{U_{\mathrm{B1}}^2}{S_{\mathrm{B1}}}; \quad Y_{\mathrm{B1}} = \frac{1}{Z_{\mathrm{B1}}} = \frac{S_{\mathrm{B1}}}{U_{\mathrm{B1}}^2}.$$

За делот од мрежата со номинален напон U_{n2} базните величини ќе бидат

$$S_{\mathrm{B2}} = S_{\mathrm{B1}}; \quad U_{\mathrm{B2}} = U_{\mathrm{B1}}\cdot\frac{W_2}{W_1}; \quad I_{\mathrm{B2}} = \frac{S_{\mathrm{B2}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\mathrm{B2}}} \equiv I_{\mathrm{B1}}\cdot\frac{W_1}{W_2},$$

$$Z_{\mathrm{B2}} = \frac{U_{\mathrm{B2}}^2}{S_{\mathrm{B2}}} = Z_{\mathrm{B1}}\cdot\left(\frac{W_2}{W_1}\right)^2; \quad Y_{\mathrm{B2}} = \frac{S_{\mathrm{B2}}}{U_{\mathrm{B2}}^2} = Y_{\mathrm{B1}}\cdot\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2.$$

Единични вредности

$$\underline{U}_{1.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{U}_1}{U_{\mathrm{B1}}}; \quad \underline{I}_{1.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{I}_1}{I_{\mathrm{B1}}}; \quad \underline{Z}_{1.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{Z}_1}{Z_{\mathrm{B1}}}; \quad \underline{Y}_{1.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{Y}_1}{Y_{\mathrm{B1}}},$$

$$\underline{U}_{2.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{U}_2}{U_{\mathrm{B2}}}; \quad \underline{I}_{2.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{I}_2}{I_{\mathrm{B2}}}; \quad \underline{Z}_{2.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{Z}_2}{Z_{\mathrm{B2}}}; \quad \underline{Y}_{2.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{Y}_2}{Y_{\mathrm{B2}}}.$$

Пример 8

На секундарот на еден трансформатор 10/0,4 kV/kV со познати параметри $R_T = 2,875\,\Omega$ и $X_T = 9,58\,\Omega$ пресметани со напонот на примарната е приклучен потрошувач кој е претставен со отпорник $R_P = 0,48\,\Omega$. Напонот на примарот на трансформаторот е $U_1 = 10,5\,\mathrm{kV}$. Да се пресмета напонот на секундарот на трансформаторот, струјата во двете намотки и моќноста на потрошувачот со помош на единечни вредности.

$$S_B = 1\,\mathrm{MVA} \quad U_{B1} = 10\,\mathrm{kV} \quad U_{B2} = 0,4\,\mathrm{kV}$$

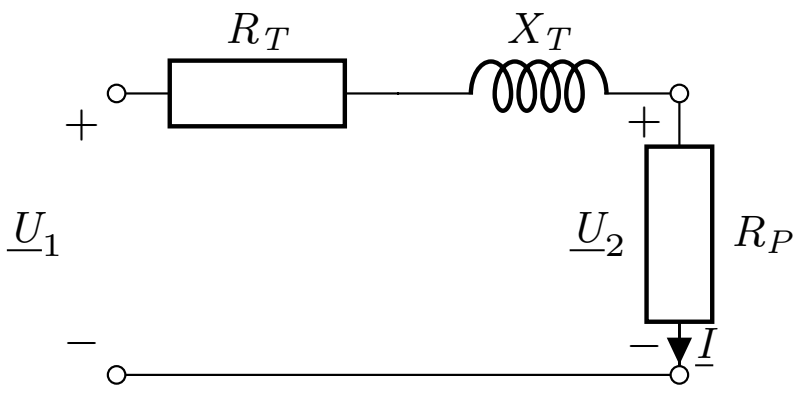
$$Z_{B1} = \frac{U_{B1}^2}{S_b} = \frac{10^2}{1} = 100\,\Omega \quad Z_{B2} = \frac{U_{B2}^2}{S_b} = \frac{0,4^2}{1} = 0,16\,\Omega$$

$$I_{B1} = \frac{S_B}{\sqrt{3}\,U_{B1}} = \frac{1}{\sqrt{3}\cdot 10} = 0,0577\,\mathrm{kA} \quad I_{B2} = \frac{S_B}{\sqrt{3}\,U_{B2}} = \frac{1}{\sqrt{3}\cdot 0,4} = 1,4434\,\mathrm{kA}$$

$$R_T = \frac{2,875}{100} = 0,02875\,\mathrm{pu} \quad X_T = \frac{9,58}{100} = 0,0958\,\mathrm{pu} \quad R_P = \frac{0,48}{0,16} = 3\,\mathrm{pu}$$

$$U_1 = \frac{10,5}{10} = 1,05\,\mathrm{pu}$$

Пример 8



$$\underline{U}_2 = \frac{R_P}{R_P + R_T + jX_T} \cdot \underline{U}_1 = \frac{3}{3 + 0,02875 + j0,0958} \cdot 1,05 = (1,03899 - j0,03286)\,\mathrm{pu}$$

$$U_2 = 1,0395\,\mathrm{pu} = 1,0395 \cdot 0,4\,\mathrm{kV} = 0,4158\,\mathrm{kV} \qquad \theta_2 = -1,812^\circ$$

$$P_P = \frac{U_2^2}{R_P} = \frac{1,0395^2}{3} = 0,3602\,\mathrm{pu} = 0,3602\,\mathrm{MW} = 360,2\,\mathrm{kW}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{R_P} = \frac{1,03899 - j0,03286}{3} = (0,34633 - j0,01096)\,\mathrm{pu} \qquad I = 0,3465\,\mathrm{pu}$$

$$I' = I \cdot I_{B1} = 0,3465 \cdot 0,0577 = 0,02\,\mathrm{kA} \quad I'' = I \cdot I_{B2} = 0,3465 \cdot 1,4434 = 0,5\,\mathrm{kA}$$