

MODELÝ PRVKOV
ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY

I	MODELY PRVKOV ES	5
I-1	ELEKTRICKÉ VEDENIA	7
I-1.1	ELEKTRICKÉ PARAMETRE VZDUŠNÝCH VEDENÍ	7
I-1.1.1	<i>Rezistencia (elektrický odpor) vonkajších vedení</i>	7
I-1.1.2	<i>Indukčnosť resp. indukčná reaktancia</i>	7
I-1.1.2.1	Zem ako vodič stacionárneho striedavého prúdu	10
I-1.1.2.2	Trojfázové vedenie bez uzemňovacích lán	12
I-1.1.2.3	Transpozícia (zákrut) trojfázového vedenia	15
I-1.1.2.4	Dvojité trojfázové vedenie s dvoma uzemňovacími lanami	16
I-1.1.2.5	Transpozícia dvojitých trojfázových vedení	17
I-1.1.3	<i>Konduktancia vzdušných vedení</i>	18
I-1.1.4	<i>Kapacita resp. kapacitná susceptancia vonkajších vedení</i>	18
I-1.1.4.1	Kapacity jednoduchého trojfázového vedenia	21
I-1.1.4.2	Kapacita dvojitého trojfázového vedenia s dvoma uzemňovacími lanami	22
I-1.2	ELEKTRICKÉ PARAMETRE KÁBELOVÝCH VEDENÍ	23
I-1.2.1	<i>Rezistencia kábelových vedení</i>	24
I-1.2.2	<i>Indukčnosť resp. indukčná reaktancia kábelových vedení</i>	24
I-1.2.3	<i>Konduktancia (zvod – vodivosť) kábelových vedení</i>	24
I-1.2.4	<i>Kapacita resp. kapacitná susceptancia kábelových vedení</i>	25
I-1.3	ZÁKLADNÉ ROVNICE	33
I-1.3.1	<i>Odvodenie základných rovníc</i>	33
I-1.4	MODELY ELEKTRICKÝCH VEDENÍ	38
I-1.4.1	<i>Γ článok</i>	38
I-1.4.2	<i>Π článok</i>	39
I-1.4.3	<i>T článok</i>	40
I-1.4.4	<i>Steinmetzov článok</i>	40
I-2	TLMIVKY V TROJFÁZOVEJ SÚSTAVE	47
I-2.1	TLMIVKY POZDĹŽNE (SÉRIOVÉ)	47
I-2.2	TLMIVKY PARALELNÉ (PRIEČNE)	49
I-2.3	TLMIVKY UZLOVÉ	50
I-3	KONDENZÁTORY	51
I-3.1	SÉRIOVÉ (POZDĹŽNE) KONDENZÁTORY	51
I-3.2	PARALELNÉ (PRIEČNÉ) KONDENZÁTORY	51
I-4	TROJFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY	53
I-4.1	DVOJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY	53
I-4.2	TROJFÁZOVÝ REGULAČNÝ TRANSFORMÁTOR	54
I-4.3	TROJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY	56
I-4.4	AUTOTRANSFORMÁTOR	58
I-4.5	IMPEDANCIA ZLOŽKOVÝCH SÚSTAV SÚMERNÝCH ZLOŽIEK	59
I-5	FILTRE VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH POUŽITÝCH V ELEKTRICKOM ROZVODE	63
I-5.1	PÁSMOVÁ ZÁDRŽ	63
I-5.2	PÁSMOVÁ PRIEPUSŤ	64
I.6	NÁHRADNÁ SCHÉMA SYNCHRÓNNEHO STROJA	65
I.7	MOTORY	67
I-7.1	SYNCHRÓNNE MOTORY	67
I-7.2	ASYNCHRÓNNE MOTORY	67
I.8	PARAMETRE ZÁŤAŽE (ODBERU)	68
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	72

I MODELY PRVKOV ES

Jednotlivé prvky ES (vedenia, transformátory, generátory, motory, odbery a pod) sa pre určenie ustáleného stavu (výkonové, napätové a prúdové pomery v sieti) alebo pre výpočet prechodných javov v ES (skratové pomery, prepätia) nahradzujú náhradnými schémami so svojimi elektrickými parametrami.

Elektrické parametre, ktorými sa nahradzujú jednotlivé zariadenia ES, sú: **rezistancia** R, **indukčnosť** L, resp. **indukčná reaktancia** X_L , **konduktancia** G, **kapacita** C, resp. **kapacitná susceptancia** B.

Keď je porušená symetria sústavy, prúdy v obvodoch a napätia medzi fázami sa dostávajú do nevyváženého stavu. Popis týchto dejov sa stáva zložitým a neprehľadným. Z toho dôvodu sa využíva pri výpočte rozloženie nesúmerného deja do niekoľko jednoduchších dejov, ktoré podľa princípu superpozície môžeme opäť spojiť do celkového deja. Naznačené metódy je možné použiť iba pre lineárne obvody, teda pre lineárne závislosti.

Teória zložkových sústav spočíva v tom, že akýkoľvek fázor trojfázovej sústavy je možné rozložiť do troch nových fázorov. Niektoré zo zložkových metód sú:

- metóda súmerných zložiek (C.L. Fortescue, 1918)
- metóda diagonálnych zložiek α , β , 0 (E. Clarková, 1938)
- metóda zložiek S, D, Z (W. Kimbark, 1939)
- metóda zložiek R, S, T (N. Koga, 1956)

V praxi sa najviac využíva **metóda súmerných zložiek**. Metóda spočíva v tom, že akákoľvek nesúmerná trojfázová sústava ($\bar{U}_{L1}, \bar{U}_{L2}, \bar{U}_{L3}$) môže byť rozdelená do troch súmerných sústav – **súslednej** \bar{U}_1 , **spätnej** \bar{U}_2 a **netočivej** \bar{U}_0 . Medzi týmito sústavami platia nasledujúce vzťahy:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= \frac{\bar{U}_{L1} + \bar{a}\bar{U}_{L2} + \bar{a}^2\bar{U}_{L3}}{3} \\ \bar{U}_2 &= \frac{\bar{U}_{L1} + \bar{a}^2\bar{U}_{L2} + \bar{a}\bar{U}_{L3}}{3} \\ \bar{U}_0 &= \frac{\bar{U}_{L1} + \bar{U}_{L2} + \bar{U}_{L3}}{3}\end{aligned}$$
$$\begin{aligned}\bar{U}_{L1} &= \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ \bar{U}_{L2} &= \bar{a}^2\bar{U}_1 + \bar{a}\bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ \bar{U}_{L3} &= \bar{a}\bar{U}_1 + \bar{a}^2\bar{U}_2 + \bar{U}_0\end{aligned}$$

kde \bar{a} je operátor, pre ktorý platí:

$$\bar{a} = 1 \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \qquad \bar{a}^2 = 1 \angle -120^\circ = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Prvky ES vzhľadom na ich elektrické parametre a náhradné schémy v jednotlivých zložkových sústavách je možné rozdeliť do troch skupín:

1. Statické (netočivé) zariadenie bez magnetických väzieb medzi fázami

Impedancia týchto zariadení nezávisí od sledu fáz pripojeného napätia. Elektrické parametre jednotlivých zložiek (súslednej, spätnej a netočivej) sú rovnaké. Takéto zariadenia sú napr. reaktory (vzduchové tlmivky) na obmedzenie skratových prúdov.

$$R_1 = R_2 = R_0; X_1 = X_2 = X_0; \bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_0$$

2. Statické zariadenia s magnetickými väzbami medzi fázami

Impedancia a jej zložky pre tieto zariadenia sú rovnaké pre súslednú a spätnú zložku, pretože vzájomné indukčnosti medzi fázami sú rovnaké.

$$R_1 = R_2; X_1 = X_2; \bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$$

Netočivá impedancia a jej zložky sú závislé od konštrukcie zariadenia a od spôsobu uzemnenia uzla. Medzi takéto zariadenia patria transformátory a vedenia.

3. Točivé elektrické stroje

Tretiu skupinu zariadení ES tvoria točivé elektrické stroje, v ktorých vzniká točivé magnetické pole. Následkom toho sa jednotlivé zložky impedancie nerovnajú (sú odlišné). Závisia od konštrukcie stroja a od zapojenia vinutí.

$$R_1 \neq R_2 \neq R_0; X_1 \neq X_2 \neq X_0; \bar{Z}_1 \neq \bar{Z}_2 \neq \bar{Z}_0$$

I-1 ELEKTRICKÉ VEDENIA

I-1.1 ELEKTRICKÉ PARAMETRE VZDUŠNÝCH VEDENÍ

Základnými primárnymi parametrami sú rezistancia (činný odpor), indukčnosť (prípadne indukčná reaktancia), konduktancia (vodivosť – zvod) a kapacita (prípadne kapacitná vodivosť - susceptancia). Spravidla sa určujú na jednotku dĺžky vedenia.

I-1.1.1 Rezistancia (elektrický odpor) vonkajších vedení

Rezistancia R tvorí reálnu zložku pozdĺžnej impedancie. Vonkajšie vedenie pozostáva z drôtov alebo z lán z jedného alebo z dvoch materiálov. Pri ustálenom jednosmernom prúde platí pre odpor vodiča o priereze S a mernom odpore ρ_0 pri teplote ϑ_0 na jednotku dĺžky vzťah:

$$R_{js} = \rho_0 \cdot \frac{1}{S} \quad [\Omega \cdot \text{m}^{-1}; \Omega \cdot \text{m}, \text{m}^2] \quad (1.1)$$

Pre určenie rezistancie v prevádzke je potrebné vziať do úvahy:

- materiál a jeho čistotu
- teplotu
- povrchový jav – skinefekt
- krútenie lán
- priehyb vodiča
- vplyv nerovnomernosti prierezu vodiča a spojky

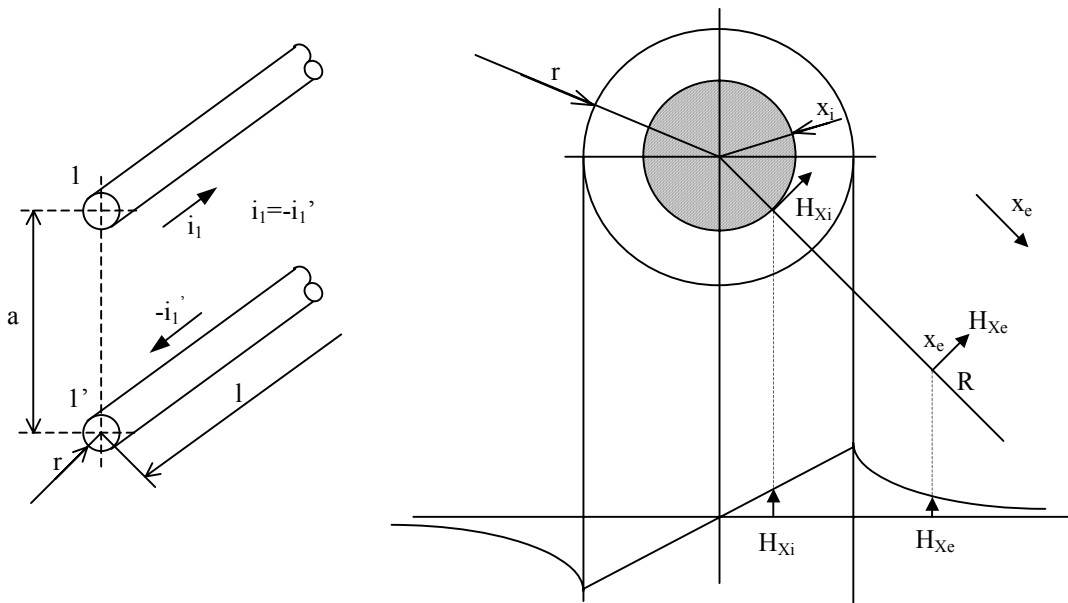
I-1.1.2 Indukčnosť resp. indukčná reaktancia

Indukčná reaktancia X_L tvorí imaginárnu zložku pozdĺžnej impedancie. Konkrétnym cieľom je vytvoriť matematický model širokej použiteľnosti. Sústava skutočných vodičov, ktoré sú rovnobežné jednak s rovinou povrchu ideálnej zeme (pri zanedbaní priehybu) a jednak medzi sebou navzájom, sa doplní sústavou fiktívnych vodičov, rovnobežných so skutočnými vodičmi. Namiesto usporiadania vodiča a roviny zeme, dostávame usporiadanie dvojíc vodičov navzájom rovnobežných, rešpektujúcich existenciu povrchu zeme, tak i zem samotnú.

U vedení rozlišujeme vlastnú indukčnosť L_v a vzájomnú indukčnosť M (od vplyvu susedných vodičov). Vlastná indukčnosť L_v pozostáva z vnútornej indukčnosti L_i (interná – od magnetického toku a prúdu vo vnútri vodiča) a z vonkajšej indukčnosti L_e (externej – od celého prúdu a magnetického toku ním vyvolaného okolo vodiča).

Pri odvodení základných vzťahov sa vychádza z predpokladu, že sa uvažuje slučka tvorená dvoma rovnobežnými vodičmi kruhového prierezu.

Predpokladá sa : $r \ll a \ll l$



Obr.1.1 Dvojvodičové vedenie a priebeh intenzity magnetického poľa

a) vnútorná indukčnosť, rešpektujúca magnetický tok na jednotku dĺžky vodiča je podľa odvedenia poznatkov z teórie elektromagnetického poľa na jednotku dĺžky vodiča daná:

$$L_i = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{8 \cdot \pi} \cdot \alpha \quad (1.2)$$

kde: μ_0 je permeabilita vákuua

μ_r je pomerná permeabilita materiálu vodiča

α je činiteľ rešpektujúci nerovnomerné rozdelenie prúdu v priereze vodiča vplyvom skinefektu a prípadne rôznych materiálov lana (AlFe)

b) vonkajšia indukčnosť na jednotku dĺžky vodiča je daná:

$$L_e = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \ln \frac{R}{r} \quad (1.3)$$

Rešpektuje magnetický tok okolo vodiča. Vzďalenosť $R \gg a$ má neurčenú vzdialenosť, ale konečnú hodnotu. Pomerná permeabilita vzduchu μ_r (obklopuje vodič) je rovná 1.

Časť magnetického toku druhého vodiča, reprezentujúca vzájomnú indukčnosť je rovná:

$$M = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \ln \frac{R}{a} \quad (1.4)$$

Pre indukované napätie vo vodiči platí vzťah:

$$-U_i = (L_i + L_e) \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_1'}{dt} = [(L_i + L_e) - M] \frac{di_1}{dt} = L \frac{di_1}{dt} \quad (1.5)$$

Celková indukčnosť vodiča je potom daná:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \alpha}{8 \cdot \pi} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \ln \frac{R}{r} - \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \ln \frac{R}{a} \quad (1.6)$$

Po dosadení za $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$, zavedením dekadických logaritmov a po úpravách dostávame:

$$L = 0,05 \mu_r \cdot \alpha + 0,46 \log \frac{a}{r} \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}; \text{m}, \text{m}] \quad (1.7)$$

Zavedením: $0,05 \mu_r \cdot \alpha = 0,46 \log \frac{1}{\xi} \Rightarrow \xi = 10^{\frac{0,05 \cdot \mu_r \cdot \alpha}{0,46}}$

Po úprave:

$$L = 0,46 \log \frac{a}{\xi \cdot r} \quad (1.8)$$

Tabuľka 1.1 Korekčný činiteľ pre rôzne typy vodičov

Typ vodiča		ζ
masívny vodič kruhového prierezu		0,779
lano z jedného materiálu	7 dielčích vodičov	0,726
	19	0,758
	37	0,768
	61	0,772
	91	0,774
	127	0,776
lana AlFe	v 2 vrstvách 26 dielčích vodičov	0,809
	v 2 vrstvách 30	0,826
	v 3 vrstvách 54	0,810
s jednou vrstvou vodičov Al		0,55÷0,70
vodič obdĺžnikového profilu so stranami a, b		0,2235.(a+b)

Korekčný činiteľ ζ závisí jednak od činiteľa α , ktorý rešpektuje odchýlku od rovnomerného rozdelenia prúdu v priereze vodiča a jednak od permeability materiálu vodiča μ_r . Hodnoty činiteľa ζ sú udané v tab.1.1.

Podľa doteraz uvedených skutočností impedancia jedného vodiča slučky dvoch rovnobežných vodičov na jednotku dĺžky bude:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \mathbf{L} = \mathbf{R} + \mathbf{j} \cdot \omega \cdot 0,46 \log \frac{a}{\xi \cdot r} \quad (1.9)$$

I-1.1.2.1 Zem ako vodič stacionárneho striedavého prúdu

V blízkosti vstupu, alebo je výstupu zo zeme závisia pomery predovšetkým od usporiadaní zemničov a elektrickom odpore prechodových vrstiev zeme, ktorá sú obecné nehomogénne. V priestore pozdĺž vedenia v postačujúcej vzdialenosti od zemničov (viac ako 30 m) prechádza ustálený prúd tak širokým pričným prierezom, že výsledný odpor cesty zemou je nepatrný a technicky zanedbateľný. V dôsledku javu, ktorý je analogicky s povrchovým javom, je hustota striedavého prúdu v zemi nerovnomerná. Pre výpočet tohto prúdu je viacero koncepcií, spoločne však dochádzajú k záveru, že striedavý prúd v zemi sleduje presne trasu vodičov nad zemou, pričom jeho najväčšia hustota je priamo pod vedením a rýchle klesá ako do strán tak do hĺbky.

Matematicky najjednoduchšia koncepcia je Rudenbergova, ktorá vychádza z nasledovných predpokladov:

- rezistivita zeme je konštantná, má konečnú hodnotu
- skutočné usporiadanie zeme a vodiča vo výške „h“ nad zemou sa nahradzuje tak, aby sa neuplatnil vplyv zemničov
- prúd vo vodiči má sínusový priebeh bez vyšších harmonických
- zanedbá sa vplyv posuvného prúdu, ktorý prechádza vzduchom medzi vodičom a zemou

Vlastnú impedanciu slučky vodič - zem je možné rozložiť na tri zložky:

- rezistanciu R_1 rešpektujúcu straty výkonu vo vodiči nad zemou na jednotku dĺžky
- reaktanciu X_1 rešpektujúcu zložku magnetického toku spriahnutého s vodičom a uzatvárajúci sa vo vodiči a vo vzduchu
- impedanciu Z_{1g} rešpektujúcu zložku magnetického toku v zemi

Impedancia zeme Z_{1g} pozostáva z rezistancie R_{1g} a z indukčnej reaktancie X_{1g} .
Rezistencia zeme na jednotku dĺžky je daná vzťahom:

$$R_{1g} = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \text{ [} \Omega \cdot \text{km}^{-1}; \text{ Hz]} \quad (1.10)$$

Pre $f = 50 \text{ Hz}$ je $R_{1g} \cong 0,05 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Podľa tohto vzťahu je rezistencia zeme závislá len od frekvencie, nezávisí na výške vodiča nad zemou, ani na mernom odpore zeminy.

Indukčná reaktancia zeme X_{1g} na jednotku dĺžky, ktorá rešpektuje magnetický tok v zemi platí:

$$X_{1g} = \omega \cdot 0,46 \log \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{h \cdot \sqrt{f}} \text{ [} \Omega \cdot \text{km}^{-1}; \text{ s}^{-1}, \Omega \cdot \text{m}, \text{ m, Hz]} \quad (1.11)$$

Pre vyšetrenie reaktancie X_1 sa rozdelí magnetický tok na časť vo vnútri vodiča a okolo vodiča (ako v predchádzajúcom prípade pri prúdovej slučke tvorenej dvoma vodičmi – kap I-1.1.2 podľa vzťahov 1.2 a 1.3). Príslušným matematickým modelom je sústava „n“ dvojíc vodičov, z ktorých je jeden skutočný a druhý fiktívny, rešpektujúci spätný prúd prechádzajúci zemou.

Indukčnosť vo vnútri vodiča (interná) je daná:

$$L_i = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{8 \cdot \pi} \cdot \alpha = 0,46 \log \frac{1}{\xi} \quad (1.12)$$

Indukčnosť okolo vodiča (externá) je daná (pre $R = h$):

$$L_e = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \ln \frac{R}{r} = 0,46 \log \frac{h}{r} \quad (1.13)$$

Reaktancia X_1 je potom daná (rešpektuje magnetický tok nad zemou):

$$X_1 = \omega (L_i + L_e) = \omega \cdot 0,46 \left(\log \frac{1}{\xi} + \log \frac{h}{r} \right) \quad (1.14)$$

Podľa predchádzajúcich úvah pre slučku vodič - zem je možné písať (podľa vzťahu 1.11 a 1.14):

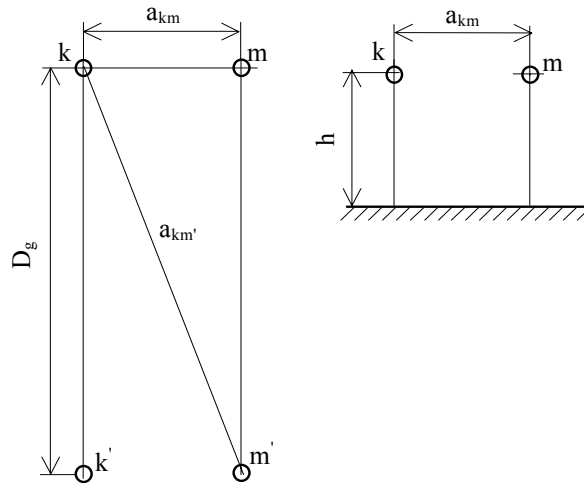
$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_1 &= R_1 + j \cdot X_1 + \mathbf{Z}_{1g} = R_1 + R_{1g} + j(X_1 + X_{1g}) = R_{11g} + j \cdot \omega \cdot 0,46 \cdot \log \frac{h \cdot 0,178 \cdot \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{\xi \cdot r \cdot h \sqrt{f}} = \\ &= R_{11g} + j \cdot \omega \cdot 0,46 \cdot \log \frac{D_g}{\xi \cdot r} = R_{11g} + j \cdot \omega \cdot L_{11g} \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\text{kde: } D_g = \frac{0,178 \cdot \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{\sqrt{f}} \quad (1.16)$$

Porovnaním imaginárnych častí vzťahov pre výpočet impedancie vodiča pre prípad slučky vodič – vodič a vodič – zem (vzťahy 1.9 a 1.15) môžeme povedať, že $D_g = a$. To znamená, že hodnota D_g predstavuje vzdialenosť fiktívneho vodiča v zemi od skutočného, ktorý (fiktívny) nahrádza magnetické účinky prúdu prechádzajúceho zemou. Hodnota D_g sa často v literatúre označuje ako „hlbka fiktívneho vodiča v zemi“ – pozri obr.1.2.

Podobne môžeme určiť zo vzájomnej indukčnosti (vzťah 1.4) vzájomnú impedanciu slučky vodič – zem:

$$\mathbf{Z}_{1m} = R_{1g} + j \cdot \omega \cdot M = R_{1g} + j \cdot \omega \cdot \log \frac{D_g}{a} \quad (1.17)$$



Obr.1.2 Dvojvodičové vedenie a jeho model

Pre obecný prípad si zvolíme matematický model sústavy „n“ dvojíc vodičov. Pre všeobecný maticový zápis platí:

$$\Delta U = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} \quad (1.18)$$

Pre „k“-tý vodič v sústave:

$$\Delta U_k = \sum_m^n Z_{km} \cdot I_m = \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{I}_k \quad ; \quad \mathbf{Z}_k = \frac{\sum_m^n Z_{km} \cdot I_m}{I_k} \quad (1.19)$$

kde: ΔU_k je úbytok napätia v „k“-tom vodiči na 1 km dĺžky vodiča spôsobený magnetickými účinkami všetkých vodičov. V maticovom zápise je to matica typu (n,1).

\mathbf{Z} je symetrická matica impedancií typu (n,n), kde hlavné prvky diagonály \mathbf{Z}_{kk} sú vlastné impedancie, vedľajšie prvky $\mathbf{Z}_{km} = \mathbf{Z}_{mk}$ pre $m \neq k$ vzájomné impedancie.

\mathbf{I} je matica prúdov v skutočných vodičoch typu (n,1).

\mathbf{Z}_k je prevádzková impedancia „k“-tého vodiča na 1 km dĺžky vodiča ($\mathbf{Z}_k = \mathbf{R}_k + j \cdot \omega \cdot \mathbf{L}_k$).

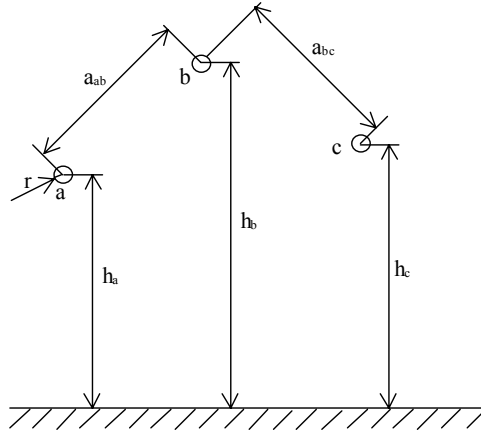
I-1.1.2.2 Trojfázové vedenie bez uzemňovacích lán

Vedenie pozostáva z troch navzájom a s povrchom zeme rovnobežných vodičov. Vodiče sú v obecnej polohe. Predpokladá sa, že vodiče majú rovnakú rezistanciu.

Pre fázory prúdov platí:

$$\mathbf{I}_a = I_a \quad ; \quad \mathbf{I}_b = b \cdot I_a \perp \beta \quad ; \quad \mathbf{I}_c = c \cdot I_a \perp \quad (1.20)$$

Ak sa rozpíše rovnica (1.18), pre úbytky napätí je možné napísať:



Obr.1.3 Trojfázové vedenie

$$\begin{vmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{Z}_{aa}, \mathbf{Z}_{ab}, \mathbf{Z}_{ac} \\ \mathbf{Z}_{ba}, \mathbf{Z}_{bb}, \mathbf{Z}_{bc} \\ \mathbf{Z}_{ca}, \mathbf{Z}_{cb}, \mathbf{Z}_{cc} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} \quad (1.21)$$

Podľa predchádzajúcich úvah je možné pre jeden hlavný prvok (napr. b) písať:

$$\mathbf{Z}_{bb} = R_{bb} + j.X_{bb} = R_b + R_{lg} + j.\omega.0,46 \log \frac{D_g}{\xi.r} \quad (1.22)$$

Pre vedľajší prvok:

$$\mathbf{Z}_{ab} = R_{ab} + j.X_{ab} = R_{lg} + j.\omega.0,46 \log \frac{D_g}{a_{ab}} \quad (1.23)$$

Pre prevádzkovú impedanciu jednej fáze podľa rovnice (1.19)

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_a &= \frac{(Z_{aa} \cdot I_a + Z_{ab} \cdot I_b + Z_{ac} \cdot I_c)}{I_a} = (R_{aa} + j.X_{aa}) + (R_{ab} + j.X_{ab}) \cdot b \cdot (\cos \beta + j.\sin \beta) + \\ &+ (R_{ac} + j.X_{ac}) \cdot c \cdot (\cos \gamma + j.\sin \gamma) = \mathbf{Z}_{aa} + b \cdot \mathbf{Z}_{ab} \angle \beta + c \cdot \mathbf{Z}_{ac} \angle \gamma \\ \mathbf{Z}_b &= \frac{(Z_{ba} \cdot I_a + Z_{bb} \cdot I_b + Z_{bc} \cdot I_c)}{I_b} = \frac{1}{b} \cdot \mathbf{Z}_{ba} \angle -\beta + \mathbf{Z}_{bb} + \frac{c}{b} \cdot \mathbf{Z}_{bc} \angle \gamma - \beta \\ \mathbf{Z}_c &= \frac{(Z_{ca} \cdot I_a + Z_{cb} \cdot I_b + Z_{cc} \cdot I_c)}{I_c} = \frac{1}{c} \cdot \mathbf{Z}_{ca} \angle -\gamma + \frac{b}{c} \cdot \mathbf{Z}_{cb} \angle \beta - \gamma + \mathbf{Z}_{cc} \end{aligned} \quad (1.24)$$

Vyčíslenie rovníc (1.24) by ukázalo, že prevádzkové impedancie majú rôzne ako reálne, tak imaginárne časti. Ani súmernosť prúdov, ktoré je možné vyjadriť rovnicami

$$\mathbf{I}_a = I_a \quad , \quad \mathbf{I}_b = \mathbf{a}^2 \cdot I_a \quad , \quad \mathbf{I}_c = \mathbf{a} \cdot I_a \quad , \quad \text{kde } \mathbf{a} = e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad (1.25)$$

nespôsobí rovnosť prevádzkových impedancií.

Nerovnomernosť prevádzkových impedancií jednotlivých fáz spôsobí nesymetriu napätí, rozdielne straty a tým i výkonu medzi fázami.

Rovnaké hodnoty prevádzkových impedancií (ich súmernosť) okrem toho, že budú platiť rovnice (1.25), zabezpečí ešte navyše geometrická súmernosť usporiadania vodičov

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_{ab} = \mathbf{a}_{ac} = \mathbf{a}_{bc}$$

potom bude platiť:

$$\mathbf{Z}_{aa} = \mathbf{Z}_{bb} = \mathbf{Z}_{cc} = R_1 + R_{1g} + j \cdot \omega \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{\xi \cdot r} \quad (1.26)$$

$$\mathbf{Z}_{ab} = \mathbf{Z}_{bc} = \mathbf{Z}_{ac} = \mathbf{Z}' = R_{1g} + j \cdot \omega \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{a} \quad (1.27)$$

Prevádzkové impedancie všetkých fáz budú rovnaké, ak preukážeme aplikácie rovníc (1.25), (1.26) a (1.27) na rovnicu (1.19). Pre operátor \mathbf{a} platí: $1 + \mathbf{a} + \mathbf{a}^2 = 0$; $\mathbf{a}^3 = 1$;

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_a &= \frac{\mathbf{Z} \cdot I_a + \mathbf{Z}' \cdot \mathbf{a}^2 \cdot I_a + \mathbf{Z}' \cdot \mathbf{a} \cdot I_a}{I_a} = \mathbf{Z} - \mathbf{Z}' \quad (\mathbf{Z}' \cdot \mathbf{a}^2 + \mathbf{Z}' \cdot \mathbf{a} = -\mathbf{Z}') \\ \mathbf{Z}_b &= \frac{\mathbf{Z}' \cdot I_a + \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a}^2 \cdot I_a + \mathbf{Z}' \cdot \mathbf{a} \cdot I_a}{\mathbf{a}^2 \cdot I_a} = \mathbf{Z} - \mathbf{Z}' \quad \left(\frac{\mathbf{Z}'}{\mathbf{a}^2} + \frac{\mathbf{Z}'}{\mathbf{a}} = -\mathbf{Z}' \right) \\ \mathbf{Z}_c &= \frac{\mathbf{Z}' \cdot I_a + \mathbf{Z}' \cdot \mathbf{a}^2 \cdot I_a + \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a} \cdot I_a}{\mathbf{a} \cdot I_a} = \mathbf{Z} - \mathbf{Z}' \quad \left(\frac{\mathbf{Z}'}{\mathbf{a}} + \mathbf{Z}' \cdot \mathbf{a} = -\mathbf{Z}' \right) \end{aligned} \quad (1.28)$$

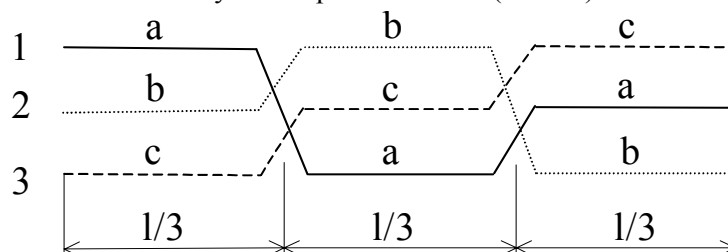
Takže: $\mathbf{Z}_a = \mathbf{Z}_b = \mathbf{Z}_c = \mathbf{Z}_1$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_1 &= \mathbf{Z} - \mathbf{Z}' = R_1 + R_{1g} + j \cdot \omega \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{\xi \cdot r} - R_{1g} - j \cdot \omega \cdot \log \frac{D_g}{a} \\ \mathbf{Z}_1 &= R_1 + j \cdot \omega \cdot 0,46 \log \frac{a}{\xi \cdot r} = R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 = R_1 + j \cdot X_1 \quad (\text{ako vzťah 1.9}) \end{aligned} \quad (1.29)$$

V rovnici (1.29) sa nevyskytuje rezistencia zeme, pretože pri súmernosti zemou neprechádza žiadny prúd. V praxi pri všeobecnom usporiadaní vodičov je možné dosiahnuť symetriu tzv. symetrizáciou vedenia - zákutom, transpozíciou vodičov.

I-1.1.2.3 Transpozícia (zákrut) trojfázového vedenia

Symetrizáciu je možné dosiahnuť výmenou polôh vodičov (obr.1.4).



Obr.1.4 Transpozícia vodičov

Pri úplnom zákrote sa dostanú vodiče do svojich pôvodných polôh. Pre jednotlivé polohy sú pridelené indexy „ 1, 2, 3 „, fázam „ a, b, c „. Pre úbytky napätia vo fázach, pre jednotlivé úseky, na 1 km dĺžky vedenia bude:

$$\begin{vmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \left\{ \begin{vmatrix} \mathbf{Z}_{11}, \mathbf{Z}_{12}, \mathbf{Z}_{13} \\ \mathbf{Z}_{12}, \mathbf{Z}_{22}, \mathbf{Z}_{23} \\ \mathbf{Z}_{13}, \mathbf{Z}_{23}, \mathbf{Z}_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{Z}_{33}, \mathbf{Z}_{13}, \mathbf{Z}_{23} \\ \mathbf{Z}_{13}, \mathbf{Z}_{11}, \mathbf{Z}_{12} \\ \mathbf{Z}_{23}, \mathbf{Z}_{12}, \mathbf{Z}_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{Z}_{22}, \mathbf{Z}_{23}, \mathbf{Z}_{12} \\ \mathbf{Z}_{23}, \mathbf{Z}_{33}, \mathbf{Z}_{13} \\ \mathbf{Z}_{12}, \mathbf{Z}_{13}, \mathbf{Z}_{11} \end{vmatrix} \right\} \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{Z}, \mathbf{Z}', \mathbf{Z}' \\ \mathbf{Z}', \mathbf{Z}, \mathbf{Z}' \\ \mathbf{Z}', \mathbf{Z}', \mathbf{Z} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} \quad (1.30)$$

Hlavné prvky impedančných matíc transponovaného vedenia sú vlastné impedancie vodiča a sú rovné:

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{3} (\mathbf{Z}_{11} + \mathbf{Z}_{22} + \mathbf{Z}_{33}) = R_1 + R_{1g} + j \cdot \omega \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{\xi \cdot r} \quad (1.31)$$

Vedľajšie prvky (mimo hlavnej diagonály) predstavujú vzájomné impedancie:

$$\mathbf{Z}' = \frac{1}{3} (\mathbf{Z}_{12} + \mathbf{Z}_{13} + \mathbf{Z}_{23}) = R_{1g} + j \cdot \omega \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{a} \quad (1.32)$$

kde: $a = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} = a_{STR}$ sa nazýva stredná vzdialenosť vodičov. (1.33)

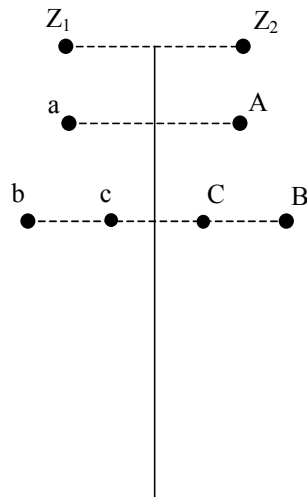
Transpozícia vodičov okrem vplyvu na pozdĺžnu impedanciu (indukčnosť), vplýva resp. uplatňuje sa i pri priečnej admitancii (kapacite) vedenia.

Staršie predpisy (do roku 1957) doporučovali jeden zákutový stožiar na každých 10 km dĺžky vedenia, takže úplná transpozícia bola po každých 30 km. Neskorší predpis (STN 33 3300) požaduje zákut len u vedení s napätím 400 kV a vyšším s úplným zákutom do 300 km dĺžky vedenia.

Pre vedenia s nižšími napätiami sa zákrut nevyžaduje. Dôvodom sú nesymetrie odberu, vzdialenosť medzi rozvodňami 400 kV nepresahuje 200 km a nové zaust'ovania do rozvodní narušujú pravidelnosť zákrut. Nehovoriac o tom, že zákrutové stožiare sú drahšie a vzhľadom ku zložitosti izolátorovej výzbroje i poruchovejšie, ako stožiare v bežnej trase.

I-1.1.2.4 Dvojité trojfázové vedenie s dvoma uzemňovacími lanami

Na obr.1.5 je znázornená jedna z možných usporiadaní fázových vodičov a uzemňovacích lán.



Obr.1.5 Usporiadanie dvojitého trojfázového vedenia s dvoma uzemňovacími lanami

Fázové vodiče prvého vedenia sa označia s indexmi „a, b, c“, druhého vedenia „A, B, C“ a uzemňovacie laná sa označia „Z₁, Z₂“.

Uzemňovacie lano má niekoľko funkcií (úloh):

- zabraňuje priamemu zásahu blesku do fázových vodičov (ochranný uhol cca 20°) resp. znižuje pravdepodobnosť zásahu
- znižuje indukované elektrostatické prepätia
- znižuje krokové a dotykové napätia pri poruchách so spoluúčasťou zeme
- znižujú vplyv na vedenia v súbahu

U starších vedení sa ako uzemňovací vodič používa pozinkovaná oceľ (FeZn), v súčasnosti kombinovaný vodič (AlFe). Je vodivo spojený so stožiarom a cez konštrukciu stožiara a zemnič spojený so zemou (max. odpor 15 Ω).

Okrem uzemňovacích vodičov sa používajú aj zemné vodiče, ktoré sú uložené v zemi sledujúc vedenie - pozdĺž trasy vedenia (niekedy len v určitých úsekoch). Zemné laná majú za úlohu znížiť odpor uzemnenia stožiara, prípadne dotykové a krokové napätia v okolí stožiara.

Pre terajší prípad sa upraví rovnica (1.18 resp. 1.19) a v maticovej forme bude platiť:

$$\begin{vmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \\ \Delta U_A \\ \Delta U_B \\ \Delta U_C \\ \Delta U_{Z1} \\ \Delta U_{Z2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{Z}_{aa}, \mathbf{Z}_{ab}, \mathbf{Z}_{ac} & \mathbf{Z}_{aA}, \mathbf{Z}_{aB}, \mathbf{Z}_{aC} & \mathbf{Z}_{aZ1}, \mathbf{Z}_{aZ2} \\ \mathbf{Z}_{ba}, \mathbf{Z}_{bb}, \mathbf{Z}_{bc} & \mathbf{Z}_{bA}, \mathbf{Z}_{bB}, \mathbf{Z}_{bC} & \mathbf{Z}_{bZ1}, \mathbf{Z}_{bZ2} \\ \mathbf{Z}_{ca}, \mathbf{Z}_{cb}, \mathbf{Z}_{cc} & \mathbf{Z}_{cA}, \mathbf{Z}_{cB}, \mathbf{Z}_{cC} & \mathbf{Z}_{cZ1}, \mathbf{Z}_{cZ2} \\ \mathbf{Z}_{Aa}, \mathbf{Z}_{Ab}, \mathbf{Z}_{Ac} & \mathbf{Z}_{AA}, \mathbf{Z}_{AB}, \mathbf{Z}_{AC} & \mathbf{Z}_{AZ1}, \mathbf{Z}_{AZ2} \\ \mathbf{Z}_{Ba}, \mathbf{Z}_{Bb}, \mathbf{Z}_{Bc} & \mathbf{Z}_{BA}, \mathbf{Z}_{BB}, \mathbf{Z}_{BC} & \mathbf{Z}_{BZ1}, \mathbf{Z}_{BZ2} \\ \mathbf{Z}_{Ca}, \mathbf{Z}_{Cb}, \mathbf{Z}_{Cc} & \mathbf{Z}_{CA}, \mathbf{Z}_{CB}, \mathbf{Z}_{CC} & \mathbf{Z}_{CZ1}, \mathbf{Z}_{CZ2} \\ \mathbf{Z}_{Z1a}, \mathbf{Z}_{Z1b}, \mathbf{Z}_{Z1c} & \mathbf{Z}_{Z1A}, \mathbf{Z}_{Z1B}, \mathbf{Z}_{Z1C} & \mathbf{Z}_{Z1Z1}, \mathbf{Z}_{Z1Z2} \\ \mathbf{Z}_{Z2a}, \mathbf{Z}_{Z2b}, \mathbf{Z}_{Z2c} & \mathbf{Z}_{Z2A}, \mathbf{Z}_{Z2B}, \mathbf{Z}_{Z2C} & \mathbf{Z}_{Z2Z1}, \mathbf{Z}_{Z2Z2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_{Z1} \\ I_{Z2} \end{vmatrix} \quad (1.34)$$

Ak $v \rightarrow (a, b, c)$ a $V \rightarrow (A, B, C)$ potom:

$$\begin{vmatrix} \Delta U_v \\ \Delta U_V \\ \Delta U_Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{Z}_{vv}, \mathbf{Z}_{vV}, \mathbf{Z}_{vZ} \\ \mathbf{Z}_{Vv}, \mathbf{Z}_{VV}, \mathbf{Z}_{VZ} \\ \mathbf{Z}_{Zv}, \mathbf{Z}_{ZV}, \mathbf{Z}_{ZZ} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_v \\ I_V \\ I_Z \end{vmatrix} \quad (1.35)$$

V impedančnej matici (1.34) sú prvky v diagonále vlastné impedancie slučiek vodič - zem (1.15), prvky mimo hlavnej diagonály vzájomné impedancie slučiek (1.17), obe uvažované na 1 km dĺžky vedenia.

V impedančnej matici (1.35) diagonálny blok \mathbf{Z}_{vv} je typu (3, 3) a má prvky vlastnej a vzájomnej impedancie vedenia s indexmi „a, b, c“. Diagonálny blok \mathbf{Z}_{vV} je typu (3, 3) a má prvky vlastnej a vzájomnej impedancie s indexmi „A, B, C“ a posledný diagonálny blok \mathbf{Z}_{ZZ} je typu (2, 2) a obsahuje prvky vlastnej a vzájomnej impedancie uzemňovacích lán.

Bloky $\mathbf{Z}_{vV}^T = \mathbf{Z}_{Vv}$ typu (3, 3) majú prvky vzájomnej impedancie medzi oboma vedeniami. Bloky $\mathbf{Z}_{vZ}^T = \mathbf{Z}_{Zv}$ typu (2, 3) obsahujú vzájomné impedancie medzi vodičmi vedenia „a, b, c“ a uzemňovacími lanami. Analogický je blok $\mathbf{Z}_{VZ}^T = \mathbf{Z}_{ZV}$ so vzájomnými impedanciami medzi vodičmi vedenia „A, B, C“ a uzemňovacími lanami.

Nakoľko uzemňovacie laná sú vodivo spojené so zemou, napätia na nich sú nulové:

$$\Delta U_{Z1} = \Delta U_{Z2} = 0 \Rightarrow \Delta U_Z = 0$$

I-1.1.2.5 Transpozícia dvojítych trojfázových vedení

Podobne ako u jednoduchých trojfázových vedení je vhodné symetrizovať tiež dlhé dvojité trojfázové vedenia. Transpozíciu je možné urobiť dvoma spôsobmi. Prvý spôsob tzv. dokonale, je taký, pri ktorom sa vymieňa poloha vodičov jedného vedenia trikrát častejšie ako druhého a navyše v opačnom zmysle. V tomto prípade sa vedenia indukčne vôbec neovplyvňujú a pre prevádzkovú impedanciu jedného vodiča platia vzťahy podľa (1.35). Pri druhom spôsobe tzv. kompromisom sa vymieňajú polohy vodičov oboch vedení rovnako často, ale v opačnom zmysle. Ušetrí sa zákrutových stožiarov oproti „dokonalej“ transpozícii, pričom sa ale úplne neodstráni vzájomný indukčný vplyv vedení. Pre prevádzkovú impedanciu jednej fáze vedenia na 1 km dĺžky potom platí:

$$Z_1 = R_1 + j \cdot \omega \cdot 0,46 \log \frac{a \cdot a'_N}{\xi \cdot r \cdot a_N} \quad (1.36)$$

kde:

$a'_N = a'_{STRN} = \sqrt[3]{a_{aB} \cdot a_{aC} \cdot a_{bC}}$ je stredná vzdialenosť vodičov vedení v nie rovnakej polohe

$a_N = a_{STRN} = \sqrt[3]{a_{aA} \cdot a_{bB} \cdot a_{cC}}$ je stredná vzdialenosť vodičov vedení v rovnakej polohe

I-1.1.3 Konduktancia vzdušných vedení

Konduktancia (zvod) G tvorí reálnu zložku priečnej admitancie. Spôsobuje straty činného výkonu (tzv. priečne straty), ktoré nezávisia od zaťaženia, ale hlavne od napätia a klimatických podmienok. Nedajú sa vyjadriť presnými matematickými vzorcami - skôr sa určia meraním. Sú tvorené nedokonalosťou izolantov (zvod cez izolátor, neexistuje dokonalý izolant), povrchovými cestami na izolátoroch (znečistenie povrchu izolátorov, závislé od vlhkosti, exhalátov a pod.) a korónou.

Zvodom nazývame prevrátenu hodnotu izolačného odporu vedenia:

$$G = \frac{1}{R_i} \quad [\text{S} \cdot \text{km}^{-1}; \Omega \cdot \text{km}] \quad (1.37)$$

Zvodový prúd je vo fáze s napätím, ktorý ho vyvolá t.j. medzi vodičmi od U_s a medzi vodičom a zemou od U_f . Zvodový prúd voči zemi je rovný:

$$I_G = \frac{U_f}{R_i} = U_f \cdot G \quad [\text{A} \cdot \text{km}^{-1}; \text{V}, \text{S} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.38)$$

Ak vedenie má konduktanciu G [S.km⁻¹] straty výkonu na jednu fázu a 1 km dĺžky vedenia budú:

$$\Delta P_G = U_f \cdot I_G = U_f \cdot U_f \cdot G = U_f^2 \cdot G \quad [\text{W} \cdot \text{km}^{-1}; \text{V}, \text{S} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.39)$$

Na celé vedenia – všetky tri fázy:

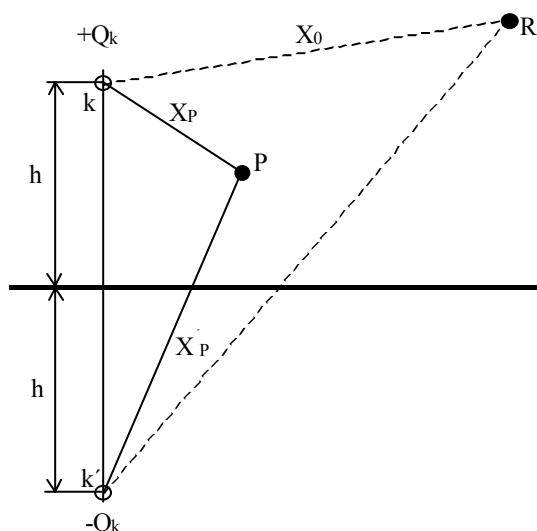
$$\Delta P_G = 3 \cdot U_f^2 \cdot G = U_s^2 \cdot G \quad (1.40)$$

I-1.1.4 Kapacita resp. kapacitná susceptancia vonkajších vedení

Kapacitná susceptancia B tvorí imaginárnu zložku priečnej admitancie.

Dve elektródy, ktoré majú rôzne napätie a sú oddelené dielektrikom, tvoria kondenzátor. V prípade elektrického vedenia sú elektródami jednak vodiče medzi sebou a jednak medzi vodičmi a zemou. Dielektrikom je vzduch ($\epsilon_r = 1$). Na základe toho poznáme kapacitu medzi vodičmi (vzájomná – C'), medzi vodičmi a zemou (čiastočná – C) a prevádzkovú (celková – C_1).

Pre určenie potenciálu v bode „P“ od vodiča sa použije princíp zrkadlenia (obr.1.6)



Obr.1.6 Dvojica odpovedajúcich vodičov – princíp zrkadlenia

Pre “k” – tý vodič platí:

$$U_P = U_{Pk} + U_{Pk''} = \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{x'_P}{x_P} \quad (\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r) \quad (1.41)$$

Ak sa bude uvažovať s bodom P na povrchu vodiča, potom $x_P = r$ a $x'_P = 2 \cdot h$ a vzťah (1.41) sa upraví:

$$U_P = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2 \cdot h}{r} \cdot Q_k \quad (1.42)$$

Pre potenciál prvého vodiča od vlastného (prvého) vodiča môžeme písať:

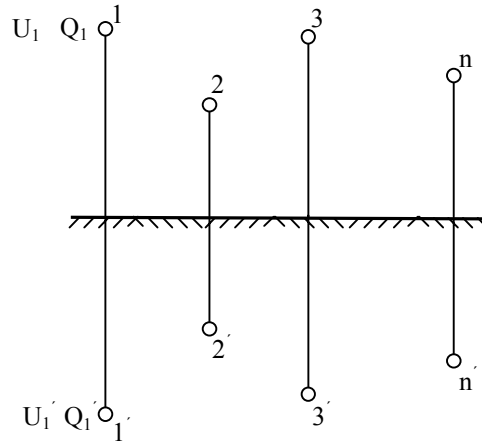
$$U_{11} = \delta_{11} \cdot Q_1 \quad (1.42)$$

kde:

$$\delta_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2 \cdot h}{r} \text{ je vlastný potenciálový koeficient [km.F}^{-1} \text{]} \quad (1.43)$$

$$\text{Obecne v maticovom zápise : } \mathbf{U} = \mathbf{\delta} \cdot \mathbf{Q} \quad (1.44)$$

V sústaveobecne s “n” vodičmi platí pre potenciál vodiča od ostatných vodičov vzťah určený na princípe superpozície (obr.1.7).



Obr.1.7 Sústava vodičov a ich zrkadlových obrazov

$$\begin{aligned}
 U_1 &= U_{11} + U_{12} + U_{13} + \dots + U_{1n} = \delta_{11} \cdot Q_1 + \delta_{12} \cdot Q_2 + \delta_{13} \cdot Q_3 + \dots + \delta_{1n} \cdot Q_n = \\
 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{x_{11'}}{x_{11}} \cdot Q_1 + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{x_{12'}}{x_{12}} \cdot Q_2 + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{x_{13'}}{x_{13}} \cdot Q_3 + \dots + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{x_{1n'}}{x_{1n}} \cdot Q_n
 \end{aligned} \quad (1.45)$$

kde: δ_{1n} je vzájomný potenciálový koeficient medzi prvým a "n" – tým vodičom.

Obecný výraz pre potenciálový koeficient, ktorý vyjadruje vzťah medzi nábojom na "k" – tom vodiči a potenciálom na "j" – tom vodiči platí:

$$\delta_{jk} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{x_{jk'}}{x_{jk}} \quad (1.46)$$

a pre potenciál:

$$U_j^k = \delta_{jk} \cdot Q_k \quad (1.47)$$

Náboj j - tého vodiča a jemu odpovedajúci dielektrický tok je možné rozdeliť na časť voči zemi – Q_{j0} – a voči vodičom s indexom „k“ – Q_{JK} . Potom je možné písať:

$$Q_J = Q_{J0} + \sum_{K=1}^n Q_{JK} = C_{J0} \cdot U_J + \sum_{K=1}^n C_{JK} (U_J - U_K) \quad (1.48)$$

Pre dva vodiče jednofázovej sústavy je možné písať:

$$Q_1 = C_{10} \cdot U_1 + C_{12} (U_1 - U_2)$$

Ak platí, že $U_1 = -U_2$, potom ($C_{10} = C$; $C_{12} = C'$):

$$Q_1 = C_{10} \cdot U_1 + 2 \cdot C_{12} \cdot U_1 \Rightarrow C_1 = C_{10} + 2 \cdot C_{12} \Rightarrow C_1 = C + 2 \cdot C'$$

Pre tri vodiče trojfázovej sústavy je možné písať ($C_{10} = C$; $C_{12} = C_{13} = C'$):

$$Q_1 = C_{10}.U_1 + C_{12}(U_1 - U_2) + C_{13}(U_1 - U_3)$$

Ak platí, že $U_1 + U_2 + U_3 = 0$, potom ($U_1 = -U_2 - U_3$):

$$Q_1 = C.U_1 + 2.C'.U_1 - C'.U_2 - C'.U_3 \Rightarrow C_1 = C + 3.C'$$

Rovnice je možné rozpísať do sústavy "n" rovníc a dať im maticový tvar:

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\delta}.\mathbf{Q} \quad (1.48)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}.\mathbf{U} \quad (1.49)$$

Kde: \mathbf{U} je stĺpcová matica typu (n, 1) potenciálov resp. napätí voči zemi

\mathbf{Q} je stĺpcová matica typu (n, 1) nábojov

$\boldsymbol{\delta}$ je štvorcová symetrická matica typu (n, n) potenciálových koeficientov

\mathbf{C} je štvorcová symetrická matica kapacít typu (n, n)

I-1.1.4.1 Kapacity jednoduchého trojfázového vedenia

Predpokladá sa vedenie usporiadané podľa obr.1.3. Rovnice (1.48) a (1.49) po rozpísaní budú mať tvar:

$$\begin{vmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta_{aa}, \delta_{ab}, \delta_{ac} \\ \delta_{ab}, \delta_{bb}, \delta_{bc} \\ \delta_{ac}, \delta_{bc}, \delta_{cc} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{vmatrix} \quad \text{resp.} \quad \begin{vmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_{aa}, C_{ab}, C_{ac} \\ C_{ab}, C_{bb}, C_{bc} \\ C_{ac}, C_{bc}, C_{cc} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{vmatrix} \quad (1.50)$$

Pri všeobecnom usporiadaní vodičov jednak navzájom medzi sebou a jednak medzi vodičmi a zemou, dochádza k rozdielnym hodnotám kapacít vedenia a tým aj k prúdovej nesymetrii. Symetrizácia sa dá dosiahnuť, ako už bolo spomínané pri indukčnosti, transpozíciou vodičov. Rovnica (1.50) sa pri použití transpozície upraví:

$$\boldsymbol{\delta} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} \delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{13} \\ \delta_{12}, \delta_{22}, \delta_{23} \\ \delta_{13}, \delta_{23}, \delta_{33} \end{vmatrix} + \frac{1}{3} \begin{vmatrix} \delta_{33}, \delta_{13}, \delta_{23} \\ \delta_{13}, \delta_{11}, \delta_{12} \\ \delta_{23}, \delta_{12}, \delta_{22} \end{vmatrix} + \frac{1}{3} \begin{vmatrix} \delta_{22}, \delta_{23}, \delta_{12} \\ \delta_{23}, \delta_{33}, \delta_{13} \\ \delta_{12}, \delta_{13}, \delta_{11} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta, \delta', \delta' \\ \delta', \delta, \delta' \\ \delta', \delta', \delta \end{vmatrix} \quad (1.51)$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{1}{3}(\delta_{11} + \delta_{22} + \delta_{33}) = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{2.h_1}{r} + \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{2.h_2}{r} + \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{2.h_3}{r} \right) = \\ &= \frac{1}{3} \left(\frac{3}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{2^3.h_1.h_2.h_3}{r^3} \right) = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{2.h_{STR}}{r} \end{aligned} \quad (1.52)$$

kde: $h_{STR} = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}$ je stredná výška vodičov.

$$\delta' = \frac{1}{3}(\delta_{12} + \delta_{13} + \delta_{23}) = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{\sqrt{(2h_1)^2 + a_{12}^2}}{a_{12}} + \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{\sqrt{(2h_2)^2 + a_{13}^2}}{a_{13}} + \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{\sqrt{(2h_3)^2 + a_{23}^2}}{a_{23}} \right) = \quad (1.53)$$

$$= \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{\sqrt{(2h_{STR})^2 + a_{STR}^2}}{a_{STR}}$$

kde: $a_{STR} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}$ je stredná vzdialenosť medzi vodičmi.

Na základe predchádzajúcich tvrdení je možné odvodiť nasledujúce vzťahy pre jednotlivé kapacity vedenia:

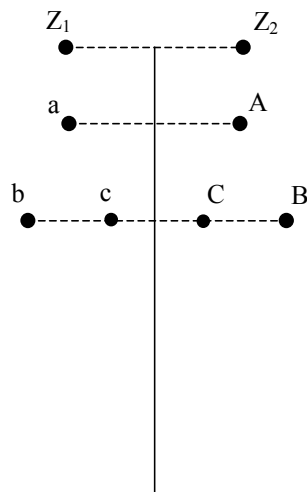
Celková (prevádzková) kapacita je rovná: $C_1 = C + 3 \cdot C' = \frac{1}{\delta - \delta'} \quad (1.54)$

Kapacita medzi vodičom a zemou: $C = \frac{1}{\delta + 2 \cdot \delta'} \quad (1.55)$

Kapacita medzi vodičmi (čiastková): $C' = \frac{\delta'}{(\delta - \delta')(\delta + 2 \cdot \delta')} \quad (1.55)$

1-1.1.4.2 Kapacita dvojitého trojfázového vedenia s dvoma uzemňovacími lanami

Obecne je vedenie na obr.1.8, pričom sa predpokladá, že obidve vedenia patria do tej istej elektrizačnej sústavy.



Obr.1.8 Usporiadanie dvojitého vedenia s dvoma uzemňovacími lanami

Rovnice (1.48) a (1.49) budú mať tvar:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ \dots \\ U_A \\ U_B \\ U_C \\ \dots \\ U_{Z1} \\ U_{Z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{aa}, \delta_{ab}, \delta_{ac} : \delta_{aA}, \delta_{aB}, \delta_{aC} : \delta_{aZ1}, \delta_{aZ2} \\ \delta_{ab}, \delta_{bb}, \delta_{bc} : \delta_{bA}, \delta_{bB}, \delta_{bC} : \delta_{bZ1}, \delta_{bZ2} \\ \delta_{ac}, \delta_{bc}, \delta_{cc} : \delta_{cA}, \delta_{cB}, \delta_{cC} : \delta_{cZ1}, \delta_{cZ2} \\ \dots \\ \delta_{aA}, \delta_{bA}, \delta_{cA} : \delta_{AA}, \delta_{AB}, \delta_{AC} : \delta_{AZ1}, \delta_{AZ2} \\ \delta_{aB}, \delta_{bB}, \delta_{cB} : \delta_{AB}, \delta_{BB}, \delta_{BC} : \delta_{BZ1}, \delta_{BZ2} \\ \delta_{aC}, \delta_{bC}, \delta_{cC} : \delta_{AC}, \delta_{BC}, \delta_{CC} : \delta_{CZ1}, \delta_{CZ2} \\ \dots \\ \delta_{aZ1}, \delta_{bZ1}, \delta_{cZ1} : \delta_{AZ1}, \delta_{BZ1}, \delta_{CZ1} : \delta_{Z1Z1}, \delta_{Z1Z2} \\ \delta_{aZ2}, \delta_{bZ2}, \delta_{cZ2} : \delta_{AZ2}, \delta_{BZ2}, \delta_{CZ2} : \delta_{Z1Z2}, \delta_{Z2Z2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ \dots \\ Q_A \\ Q_B \\ Q_C \\ \dots \\ Q_{Z1} \\ Q_{Z2} \end{bmatrix} \quad (1.56)$$

Po rozpísaní do blokov, ak $v \rightarrow (a, b, c)$ a $V \rightarrow (A, B, C)$:

$$\begin{bmatrix} U_v \\ U_V \\ U_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{vv}, \delta_{vV}, \delta_{vZ} \\ \delta_{Vv}, \delta_{VV}, \delta_{VZ} \\ \delta_{Zv}, \delta_{ZV}, \delta_{ZZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_v \\ Q_V \\ Q_Z \end{bmatrix} \quad (1.57)$$

Význam jednotlivých blokov je daný tým, že napr. blok δ_{vZ} má prvky potenciálových súčiniteľov rešpektujúcich vzájomný vplyv vodičov A, B, C (označených indexom "V") a uzemňovacích lán Z_1 a Z_2 (označených indexom "Z").

Ak vytvoríme k matici potenciálových koeficientov $[\delta]$ typu (8, 8) maticu inverznú, môžeme pomocou nej vypočítať jednotlivé dielčie kapacity vedenia (prevádzkovú, vzájomnú aj čiastočnú).

Na záver je možné konštatovať, že uzemňovacie lano nemá vplyv na prevádzkovú kapacitu, ale zväčšuje kapacitu voči zemi (uzemňovacím lanom sa priblíži zem k vodičom) a súčasne znižuje kapacity medzi vodičmi.

Poznámka:

1. Za výšku vodiča nad zemou sa považuje výška ťažiska reťazovky. Ak je "H" výška závesného bodu, "f_m" je priehyb vodiča, potom $h = H - 0,7 \cdot f_m$.
2. Kovové stožiare zväčšujú kapacitu voči zemi oproti vypočítaným hodnotám. Činiteľ zväčšenia je od 1,065 po 1,03 v závislosti od napätia.

I-1.2 ELEKTRICKÉ PARAMETRE KÁBELOVÝCH VEDENÍ

Na prenos elektrickej energie sa používajú aj kábelové vedenia. Káble s menovitým napätím do 22 kV sa bežne používajú v mestských a priemyselných rozvodoch. S vyšším napätím vo väčších mestách a pre zvláštne účely. Investičné náklady na rozdiel od prevádzkových, sú pri kábelových vedeniach vyššie ako u vzdušných.

Káble do 35 kV sa väčšinou používajú ako trojfázové, s jedným plášťom, alebo trojplášťové. Pre vyššie napätia sa spravidla používajú jednožilové káble.

I-1.2.1 Rezistencia kábelových vedení

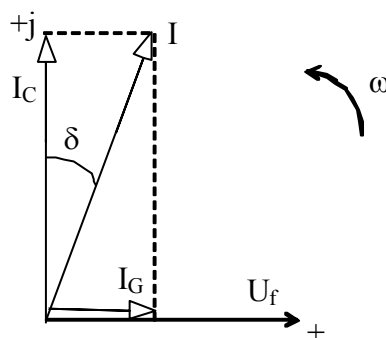
Rezistencia kábelových vedení sa určí podobne ako u vzdušných vedení. Neuvažuje sa ale s prieťahom vodiča a naopak, zväčšenie rezistancie kábelových vedení sa prejavuje v prípade použitia kovového plášťa vplyvom vírivých prúdov, hysterézie a javom blízkosti (proximity efekt). Túto prídavnú rezistanciu - ΔR - je matematicky ťažko určiť, udáva sa meraním, resp. skúsenosťami tabuľkovou formou. Je závislá (rastie) od prierezu vodiča a jeho konštrukcie (typu kábla). Pohybuje sa v intervale od 0,0003 až 0,014 $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$.

I-1.2.2 Indukčnosť resp. indukčná reaktancia kábelových vedení

Pre výpočet indukčnosti je možné použiť rovnaké vzorce ako pre vzdušné vedenia. Vzhľadom k tomu, že u káblov nie je splnená podmienka $a \gg r$ ("a" je vzdialenosť osí vodičov a "r" je ich polomer), sú vypočítané hodnoty menej presné ako u vzdušných vedení. Pre technické účely sú ale plne použiteľné. Vzhľadom k menšej vzdialenosti vodičov medzi sebou pri kábelových vedeniach (rádovo metre pri vzdušných vedeniach a centimetre pri kábelových) je indukčnosť a tým aj indukčná reaktancia kábelových vedení asi 1/3 z hodnôt vzdušných vedení. Pri krátkych vedeniach a vedeniach s malým prierezom vodičov (hlavne rozvody nn) je možné vplyv indukčnej reaktancie zanedbať. Presné určenie indukčnosti resp. indukčnej reaktancie je možné získať meraním.

I-1.2.3 Konduktancia (zvod – vodivosť) kábelových vedení

Pri kábelových vedeniach je zvod spôsobený nedokonalosťou izolácie, súvisia s dielektrickými stratami v izolácii káblov, ktoré sú elektricky namáhané. Má na ne vplyv starnutie, teplota a vlhkosť. Izolačný stav kábelových vedení je závislý na tzv. stratovom uhle - δ - charakteristický údaj pre určenie kvality izolácie (obr. 1.9).



Obr.1.9 Prúdy tečúce dielektrikom

Stratový uhol vyjadruje veľkosť wattových (ohmických) strát v kábli. Kábelové vedenie predstavuje kondenzátor (žila – plášť). Pri ideálnom kondenzátore (bezstratový) by tiekol kapacitný posuvný prúd (I_C) predbiehajúci napätie U_f o 90° . Následkom nedokonalosti izolácie tečie zvodový (wattový) prúd (I_G) vo fáze s napätím U_f . Vzťah medzi zvodovým prúdom a kapacitným prúdom ideálneho kondenzátora udáva stratový uhol δ .

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_G}{I_C} \Rightarrow I_G = I_C \cdot \operatorname{tg} \delta = X_C \cdot U_f \cdot \operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_1 \cdot U_f \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1.58)$$

Zvod a straty následkom zvodu sú dané:

$$G = \frac{1}{R_i} = \frac{I_G}{U_f} = \frac{\omega \cdot C_1 \cdot U_f \cdot \operatorname{tg} \delta}{U_f} = \omega \cdot C_1 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad [S \cdot km^{-1}, s^{-1}, F \cdot km^{-1}] \quad (1.59)$$

$$\Delta P_G = I_G \cdot U_f = I_C \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot U_f = \omega \cdot C_1 \cdot U_f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot U_f = \omega \cdot C_1 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot U_f^2 = G \cdot U_f^2 \quad [W \cdot km^{-1}, s^{-1}, F \cdot km^{-1}, V] \quad (1.60)$$

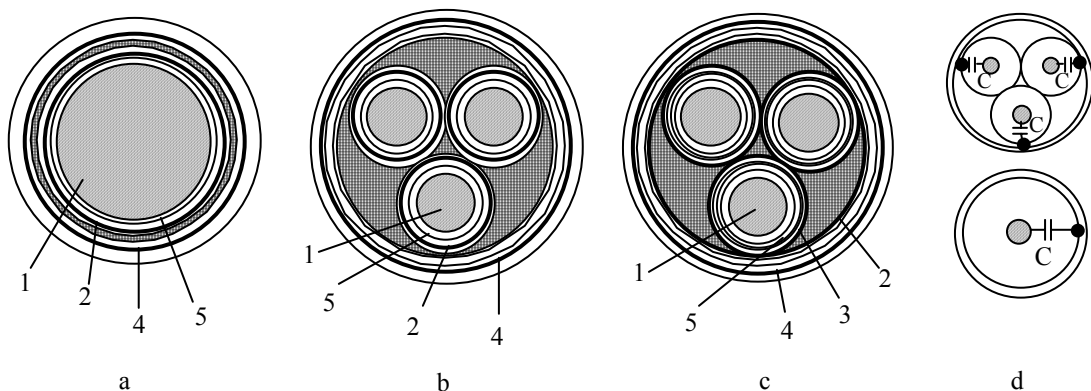
I-1.2.4 Kapacita resp. kapacitná susceptancia kábelových vedení

Vzdialenosť medzi vodičmi sú pri kábelových vedeniach značne menšie ako u vzdušných vedení, taktiež $\epsilon_r > 1$. Preto celková, prevádzková kapacita je v prípade kábelových vedení väčšia ako u vzdušných vedení. Býva asi 0,2 až 0,9 $\mu F \cdot km^{-1}$ pre káble oproti 0,01 $\mu F \cdot km^{-1}$ pre vzdušné vedenia.

Rozlišujú sa dve skupiny káblov:

- jednožilové a viacžilové s kovovými plášťami pre každú žilu
- viacžilové so spoločným kovovým plášťom pre všetky žily

a) jednožilové a viacžilové káble s kovovými plášťami pre každú žilu



Obr.1.10 Typy káblov

a) jednožilový, b) trojplášťový, c) tienový, d) kapacity týchto káblov

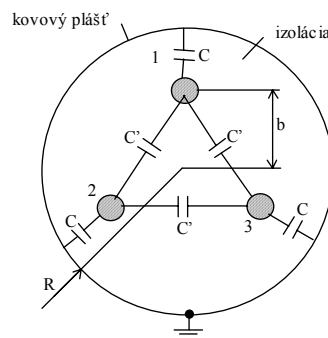
Káble podľa bodu a) delíme na jednožilové (obr.1.10a), trojplášťové (obr.1.10b) a tienené (obr.1.10c). Majú len jednu kapacitu, a to kapacitu proti zemi (plášťu), ktorá je zároveň kapacita prevádzková (celková). Elektrické pole tohoto kábla je radiálne, kapacita sa počíta ako kapacita súosých valcov:

$$C_1 = C_{10} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{R}{r}} = \frac{0,0242 \cdot \epsilon_r}{\log \frac{R}{r}} \quad [\mu F \cdot km^{-1}, cm, cm] \quad (1.61)$$

kde: ϵ_r je pomerná permitivita (dielektrická konštanta) izolácie
 r je polomer vodiča
 R je vnútorný polomer kovového plášťa (kovovej obálky)

1) viacžilové káble so spoločným kovovým plášťom pre všetky žily

U týchto káblov sú elektrostatické pomery podobné ako u vonkajších vedení s tým rozdielom, že je treba počítať s $\epsilon_r \neq 1$. Okrem prevádzkovej (celkovej) kapacity sa vyskytujú ďalšie kapacity, a to vzájomná (medzi vodičmi) a čiastočná (medzi vodičom a uzemneným kovovým plášťom – zemou) pre všetky fázy rovnaké s ohľadom na geometrickú súmernosť kábelových vedení. Elektrické pole nie je radiálne (obr.1.11).



Obr.1.11 Kapacity trojžilového kábla so spoločným plášťom

Výrazy pre výpočet jednotlivých kapacít sú:

$$\delta = \frac{\log \frac{R^2 - b^2}{Rr}}{0,0242 \cdot \epsilon_r} \quad [\text{km} \cdot \mu\text{F}^{-1}] \quad ; \quad \delta' = \frac{\log \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R}{b}\right)^2 + \left(\frac{b}{R}\right)^2}{3}}}{0,0242 \cdot \epsilon_r} \quad [\text{km} \cdot \mu\text{F}^{-1}] \quad (1.62)$$

Pre výpočet C_1 , C a C' platia tie isté vzťahy ako pri vzdušných vedeniach.

Výpočet kapacít kábelových vedení je závislý od pomernej dielektrickej konštanty ϵ_r . Táto však závisí od akosti a zloženia izolačných vrstiev a preto je ju veľmi ťažko určiť, aj z dôvodu, že sa okrem toho mení s teplotou.

Vzhľadom k týmto okolnostiam je najlepšie určiť kapacitu káblov meraním:

$$U_f = X_C \cdot I_C = \frac{I_C}{\omega \cdot C_1 \cdot l} \quad [\text{V} ; \text{A}, \text{s}^{-1}, \text{F} \cdot \text{km}^{-1}, \text{km}] \quad (1.63)$$

z toho

$$C_1 = \frac{I_C}{\omega \cdot l \cdot U_f} \quad [\text{F} \cdot \text{km}^{-1} ; \text{A}, \text{s}^{-1}, \text{km}, \text{V}] \quad (1.64)$$

kde: I_C – nabijací prúd pri meraní v stave naprázdno

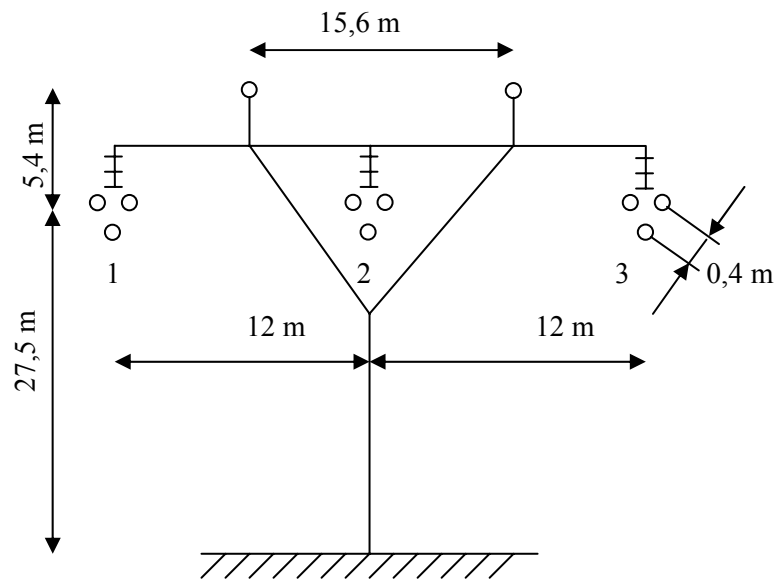
Indukčnosť jednožilových káblov a ich prevádzková kapacita sú viazané vzťahom:

$$L_1 \cong 1,11 \frac{10^{-2} \cdot \varepsilon_r}{C_1} + 0,05 \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1} ; \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.65)$$

Ako už bolo spomenuté kapacitný prúd kábelových vedení je vyšší ako u vzdušných vedení. Preto spôsobuje pri kábelových vedeniach väčšie problémy. Pri určitej tzv. kritickej dĺžke kábla tento prúd zaťažuje vodiče až po dovolenú hranicu, takže ďalšie zaťažovanie kábla nie je možné, alebo je obmedzené. Tým je obmedzená použiteľná dĺžka kábelových vedení. Pre 110 kV kábel je asi 80 km. V opačnom prípade treba použiť kompenzáciu.

Príklad 1.1

Výpočet parametrov jednoduchého transponovaného 400 kV vedenia s dvomi uzemňovacími lanami, ktorého dĺžka je $l = 200$ km. Vodiče každej fázy sú usporiadané v rovnostrannom trojuholníku (vo vzdialenosti 400 mm – zväzkový vodič). Fázové vodiče sú AlFe 350/59 s priemerom vodiča $d_v = 26,39$ mm, maximálny priehyb $f_{mv} = 8$ m. Uzemňovacie laná sú AlFe 185/31 s priemerom lana $d_v = 19,08$ mm, maximálny priehyb $f_{mz} = 7$ m, vzdialenosť susedných fáz - $a = 12$ m.



Obr.1.12 Jednoduché 400 kV vedenie

Pre transponované vedenie stredné geometrické vzdialenosti vodičov a ekvivalentný polomer zväzkového vodiča platí:

$$a_{\text{str}} = \sqrt[3]{a \cdot a \cdot 2a} = a \cdot \sqrt[3]{2} = 12 \cdot \sqrt[3]{2} = 15,12 \text{ m}$$

$$r_e = \sqrt[3]{r \cdot d_{12} \cdot d_{13}} = \sqrt[3]{13,195 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \cdot 0,4} = 0,1283 \text{ m}$$

a) výpočet indukčnosti a indukčnej reaktancie vodiča

$$L_1 = 0,46 \cdot \log \frac{a_{\text{str}}}{r_e} + \frac{0,05}{n} = 0,46 \cdot \log \frac{15,12}{0,1283} + \frac{0,05}{3} = 0,969 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

Indukčná reaktancia na 1 km vedenia je potom daná:

$$X_{L1} = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0,969 \cdot 10^{-3} = 0,304 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Pre celú dĺžku vedenia:

$$X_L = X_{L1} \cdot l = 0,304 \cdot 200 = 60,88 \text{ } \Omega$$

b) výpočet kapacity vedenia bez uvažovania uzemňovacieho lana

Pre transponované vedenie sa uvažuje so strednou výškou vodičov nad zemou:

$$h_{\text{str}} = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} = h = 21,9 \text{ m}$$

pričom sa rešpektuje priehyb vodiča ($H_v = 27,5 \text{ m}$, $f_{mv} = 8 \text{ m}$):

$$h = h_1 = h_2 = h_3 = H_v - 0,7 \cdot f_v = 27,5 - 0,7 \cdot 8 = 21,9 \text{ m}$$

Vlastný potenciálový koeficient vodiča je daný vzťahom:

$$\delta = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2 \cdot h_{\text{str}}}{r_e} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2 \cdot 21,9}{0,1283} = 104,68 \text{ km} \cdot \mu\text{F}^{-1}$$

Vzájomný potenciálový koeficient vodičov je daný:

$$\begin{aligned} \delta' &= \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot h_{\text{str}}^2 + a_{\text{str}}^2}}{a_{\text{str}}} = \\ &= \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 21,9^2 + 15,12^2}}{15,12} = 20,098 \text{ km} \cdot \mu\text{F}^{-1} \end{aligned}$$

Podľa tabuľky 1.2 pre zlúčené potenciálové koeficienty platí:

$$N = \delta \quad N' = \delta'$$

Celková (prevádzková) kapacita vedenia podľa:

$$C_1 = \frac{1}{N - N'} = \frac{1}{104,68 - 20,098} = 11,823 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

Pre kapacity medzi vodičmi a zemou (C) a medzi vodičmi (C') platia vzťahy:

$$C = \frac{1}{N + 2 \cdot N'} = \frac{1}{104,68 + 2 \cdot 20,098} = 6,902 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$C' = C_1 \cdot C \cdot N' = 11,823 \cdot 10^{-3} \cdot 6,902 \cdot 10^{-3} \cdot 20,098 = 1,64 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

Pre celkovú (prevádzkovú) kapacitu vedenia platí aj vzťah:

$$C_1 = C + 3 \cdot C' = 6,902 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 1,64 \cdot 10^{-3} = 11,822 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

c) výpočet kapacity vedenia s uvažovaním uzemňovacieho lana

Vzdialenosti vodičov od uzemňovacích lán sú dané:

$$a_{1z1} = \sqrt{(12 - 7,8)^2 + 5,4^2} = 6,841 \text{ m}$$

$$a_{2z1} = \sqrt{7,8^2 + 5,4^2} = 9,487 \text{ m}$$

$$a_{3z1} = \sqrt{(12 + 7,8)^2 + 5,4^2} = 20,523 \text{ m}$$

$$a_{1z2} = \sqrt{(12 + 7,8)^2 + 5,4^2} = 20,523 \text{ m}$$

$$a_{2z2} = \sqrt{7,8^2 + 5,4^2} = 9,487 \text{ m}$$

$$a_{3z2} = \sqrt{(12 - 7,8)^2 + 5,4^2} = 6,841 \text{ m}$$

Ich stredná vzdialenosť od uzemňovacích vodičov:

$$a_{zv} = \sqrt[6]{a_{1z1} \cdot a_{2z1} \cdot a_{3z1} \cdot a_{1z2} \cdot a_{2z2} \cdot a_{3z2}} = \\ = \sqrt[6]{6,841 \cdot 9,487 \cdot 20,523 \cdot 20,523 \cdot 9,487 \cdot 6,841} = 11,003 \text{ m}$$

Pre výšku uzemňovacieho lana od zeme s uvažovaním jeho priehybu a stredná vzdialenosť všetkých vodičov (fázových aj uzemňovacích) od zeme je daná vzťahmi:

$$h_z = H_z - 0,7 \cdot f_z = 32,9 - 0,7 \cdot 7 = 28 \text{ m}$$

$$h_{zs} = \sqrt{h_z \cdot h_{str}} = \sqrt{21,9 \cdot 28} = 24,763 \text{ m}$$

Potenciálový koeficient medzi vodičmi a uzemňovacími lanami je daný:

$$\delta_{zv} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot h_{zs}^2 + a_{zv}^2}}{a_{zv}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 24,763^2 + 11,003^2}}{11,003} = 27,429 \text{ km} \cdot \mu\text{F}^{-1}$$

Vlastný potenciálový koeficient uzemňovacieho lana:

$$\delta_{z0} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2 \cdot h_{zs}}{r_z} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2 \cdot 28}{9,54 \cdot 10^{-3}} = 155,729 \text{ km} \cdot \mu\text{F}^{-1}$$

Vzájomný potenciálový koeficient uzemňovacích lán:

$$\delta_{zz} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot h_{zz}^2 + a_{zz}^2}}{a_{zz}} =$$

$$= \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 28^2 + 15,6^2}}{15,6} = 23,607 \text{ km} \cdot \mu\text{F}^{-1}$$

$h_{zz} = h_z$ pretože je rovnaká výška uzemňovacích lán

$a_{zz} = 2 \cdot 7,8 = 15,6 \text{ m}$ vzdialenosť medzi uzemňovacími lanami

Stredný potenciálový koeficient :

$$\delta_s = \frac{2 \cdot \delta_{zv}^2}{\delta_{z0} + \delta_{zz}} = \frac{2 \cdot 27,429^2}{155,729 + 23,607} = 8,39 \text{ km} \cdot \mu\text{F}^{-1}$$

Zlúčené potenciálové koeficienty podľa tab.1.2:

$$N = \delta - \delta_s = 104,68 - 8,39 = 96,29 \text{ km} \cdot \mu\text{F}^{-1}$$

$$N' = \delta' - \delta_s = 20,098 - 8,39 = 11,708 \text{ km} \cdot \mu\text{F}^{-1}$$

Pre jednotlivé kapacity platia vzťahy :

$$C_1 = \frac{1}{N - N'} = \frac{1}{96,29 - 11,708} = 11,823 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$C = \frac{1}{N + 2 \cdot N'} = \frac{1}{96,29 + 2 \cdot 11,708} = 8,354 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$C' = C_1 \cdot C \cdot N' = 11,823 \cdot 10^{-3} \cdot 8,354 \cdot 10^{-3} \cdot 11,708 = 1,156 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

Taktiež platí:

$$C_1 = C + 3 \cdot C' = 8,354 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 1,156 \cdot 10^{-3} = 11,823 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

Kapacitná vodivosť (susceptancia) vodiča:

$$B = \omega \cdot C_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 11,823 \cdot 10^{-3} = 3,71 \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$$

Kapacitný nabíjaci prúd a nabíjaci výkon vedenia je:

$$I_c = U_f \cdot \omega \cdot C_1 \cdot l = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 11,823 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 200 = 171,67 \text{ A}$$

$$Q_{c3f} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_c = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3 \cdot 171,67 = 118,94 \text{ MVar}$$

Na jeden kilometer dĺžky vedenia

$$I_c = 858,36 \text{ mA} \cdot \text{km}^{-1}, \text{ resp. } Q_{c3f} = 594,68 \text{ kVAr} \cdot \text{km}^{-1}$$

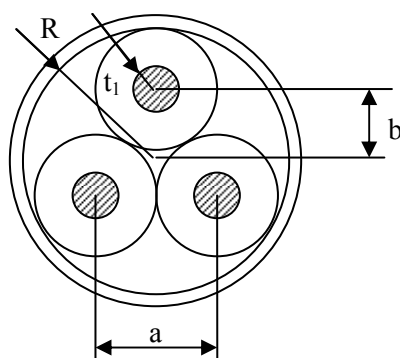
Tabuľka 1.2 Zlúčené potenciálové koeficienty pre jednotlivé typy elektrických vedení

Celková prevádzková kapacita ($\mu\text{F}/\text{km}$)	Kapacita vodiča voči zemi ($\mu\text{F}/\text{km}$)		Vzájomná kapacita medzi vodičmi ($\mu\text{F}/\text{km}$)
$C_1 = 1/(N - N')$	$C = 1/(N + 2N')$		$C' = N'/(N - N')(N + 2N')$
Vedenie	Bez uzemňovacieho lana	S jedným uzemňovacím lanom	S dvomi uzemňovacími lanami
Jednoduché	$N = \delta$ $N' = \delta'$	$N = \delta - \delta_s$ $N' = \delta' - \delta_s$	$N = \delta - \delta_s$ $N' = \delta' - \delta_s$
Dvojité	$N = \delta + \delta_N$ $N' = \delta' + \delta_N'$	$N = \delta + \delta_N - 2\delta_s$ $N' = \delta' + \delta_N' - 2\delta_s$	$N = \delta + \delta_N - 2\delta_s$ $N' = \delta' + \delta_N' - 2\delta_s$

Príklad 1.2

Výpočet parametrov trojžilového kábla 6-AYKCY3x240 mm². Jedná sa o 6 kV kábel s hliníkovými žilami, s izoláciou z mäkkého polyvinylchloridu (MPVC) a s medeným plášťom.

- prierez vodiča $S = 240 \text{ mm}^2$
- hrúbka izolácie vodiča $t_1 = 3,75 \text{ mm}$
- relatívna permitivita izolácie $\epsilon_r = 4,2$



Obr.1.13 Trojžilový kábel

Z geometrických rozmerov kábla je možné určiť:

$$S = \pi \cdot r^2 \Rightarrow r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{240}{\pi}} = 8,74 \text{ mm}$$

$$a = 2 \cdot t_1 + 2 \cdot r = 7,5 + 17,48 = 24,98 \text{ mm}$$

$$\cos 30^\circ = \frac{\frac{a}{2}}{b} \Rightarrow b = \frac{\frac{a}{2}}{\cos 30^\circ} = \frac{12,49}{0,866} = 14,42 \text{ mm}$$

$$R = b + r + t_1 = 14,42 + 8,74 + 3,75 = 26,91 \text{ mm}$$

R je polomer kábla, r polomer vodiča, b vzdialenosť vodiča od stredu kábla, a vzdialenosť osí žíl.

a) výpočet indukčnosti a indukčnej reaktancie kábla

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{a}{r} + 0,05 = 0,46 \cdot \log \frac{24,98}{8,74} + 0,05 = 0,2598 \text{ mH.km}^{-1}$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,2598 \cdot 10^{-3} = 0,08158 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

b) výpočet kapacít kábla

Určí sa vlastný a vzájomný potenciálový koeficient:

$$\delta = \frac{1}{0,0242 \cdot \varepsilon_r} \log \frac{R^2 - b^2}{R \cdot r} = \frac{1}{0,0242 \cdot 4,2} \log \frac{26,91^2 - 14,42^2}{26,91 \cdot 8,74} = 3,359 \text{ km} \cdot \mu\text{F}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \delta' &= \frac{1}{0,0242 \cdot \varepsilon_r} \log \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R}{b}\right)^2 + \left(\frac{b}{R}\right)^2}{3}} = \\ &= \frac{1}{0,0242 \cdot 4,2} \cdot \log \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{26,91}{14,42}\right)^2 + \left(\frac{14,42}{26,91}\right)^2}{3}} = 0,991 \text{ km} \cdot \mu\text{F}^{-1} \end{aligned}$$

Následne sa určia jednotlivé kapacity:

$$C_1 = \frac{1}{\delta - \delta'} = \frac{1}{3,359 - 0,991} = 0,422 \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$C = \frac{1}{\delta + 2 \cdot \delta'} = \frac{1}{3,359 + 2 \cdot 0,991} = 0,187 \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$C' = \delta' \cdot C_1 \cdot C = 0,991 \cdot 0,422 \cdot 0,187 = 0,0782 \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

Kapacitná vodivosť (susceptancia) kábla:

$$B = \omega \cdot C_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,422 = 132,51 \text{ } \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$$

I-1.3 ZÁKLADNÉ ROVNICE

Pri presných výpočtoch sa zohľadňujú všetky štyri elektrické parametre – R , L , G , C . V praktických výpočtoch je možné niektorý parameter zanedbať – závisí to od menovitého napätia a druhu vedenia (vzdušné, kábelové).

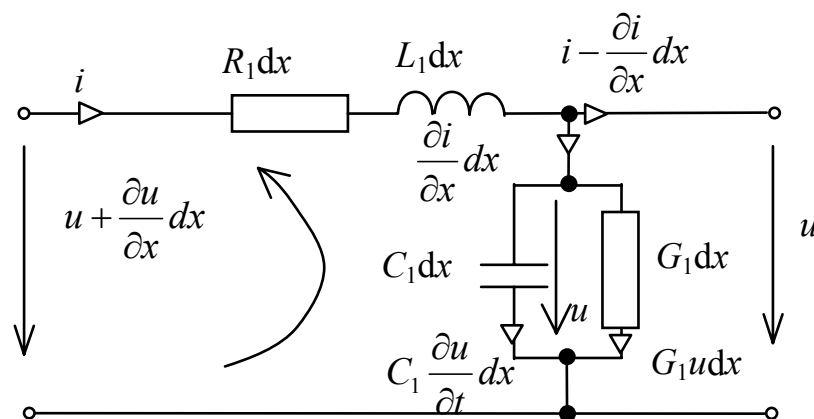
Na skutočnom elektrickom vedení vznikajú straty energie v štyroch formách:

1. straty na ohmickom odpore – RI^2
2. straty prúdom odtekajúcim do zeme v dôsledku zvodu (koróna, nedokonalosť izolácie, znečistenie) – GU^2
3. straty, ktoré sú potrebné na vytvorenie elektrického poľa – $\frac{1}{2}CU^2$
4. straty, ktoré sú potrebné na vytvorenie magnetického poľa – $\frac{1}{2}LI^2$

I-1.3.1 Odvodenie základných rovníc

Predpokladajme, že vedenie je homogénne, t.j. parametre sú rovnomerne rozložené pozdĺž vedenia a symetrické, t.j. parametre sú rovnaké vo všetkých fázach.

Zvolíme si základný element vedenia s rozloženými parametrami v tvare Γ článku, kvôli určeniu základných rovníc.



Obr.1.14 Základný element vedenia

Vedenie má parametre R_l , L_l , C_l , G_l na jednotku dĺžky.

Pozdĺžna impedancia je rovná:
$$\mathbf{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (1.66)$$

Priečna admitancia je rovná: $\mathbf{Y}_1 = G_1 + j\omega C_1$ (1.67)

Podľa obr.1.14 a na základe prvého a druhého Kirchhoffového zákona platí:

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u - iR_1 dx - L_1 \frac{\partial \tilde{a}}{\partial t} dx = 0 / : dx \quad (1.68)$$

$$i - \left(i - \frac{\partial \tilde{a}}{\partial x} dx \right) - uG_1 dx - C_1 \frac{\partial u}{\partial t} dx = 0 / : dx \quad (1.69)$$

Odvodí sa základná rovnica pre napätie. Analogicky postup je pre rovnicu prúdu.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = iR_1 + L_1 \frac{\partial \tilde{a}}{\partial t} \quad / \text{derivujeme podľa „}x\text{“} \quad (1.70)$$

$$\frac{\partial \tilde{a}}{\partial x} = G_1 u + C_1 \frac{\partial u}{\partial t} \quad / \text{derivujeme podľa „}t\text{“} \quad (1.71)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R_1 \frac{\partial \tilde{a}}{\partial x} + L_1 \frac{\partial^2 \tilde{a}}{\partial x \partial t} \quad (1.72)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{a}}{\partial x \partial t} = G_1 \frac{\partial u}{\partial t} + C_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.73)$$

Dosadením $\frac{\partial \tilde{a}}{\partial x}$ z rovnice (1.71) a $\frac{\partial^2 \tilde{a}}{\partial x \partial t}$ z rovnice (1.73) do rovnice (1.72) dostávame:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R_1 \left(G_1 u + C_1 \frac{\partial u}{\partial t} \right) + L_1 \left(G_1 \frac{\partial u}{\partial t} + C_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (1.74)$$

a po úprave

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (L_1 G_1 + R_1 C_1) \frac{\partial u}{\partial t} + R_1 G_1 u \quad (1.75)$$

Analogicky derivovaním rovnice (1.70) podľa „ t “ a rovnice (1.71) podľa „ x “ dostávame:

$$\frac{\partial^2 \tilde{a}}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 \tilde{a}}{\partial t^2} + (L_1 G_1 + R_1 C_1) \frac{\partial \tilde{a}}{\partial t} + R_1 G_1 \tilde{a} \quad (1.76)$$

Rovnice (8.10) a (8.11) sú parciálne diferenciálne rovnice druhého stupňa – tzv. **telegrafné rovnice**.

Riešením telegrafných rovníc získame vzťahy pre vyjadrenie napätia a prúdu ako funkcie času a vzdialenosti od začiatku alebo konca vedenia.

Pri riešení telegrafných rovníc predpokladáme harmonický priebeh prúdu a napätia. Riešenie sa dosiahne pomocou symbolicko – komplexnej metódy, a to ako pre rovnicu napätia, tak analogicky aj pre rovnicu prúdu.

$$u = U_m \cos \omega t = \operatorname{Re}\{U_m e^{j\omega t}\} = \operatorname{Re}\{U_m\} \quad (1.77)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = j\omega U_m e^{j\omega t} = j\omega U_m \quad (1.78)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 U_m \quad (1.79)$$

Po matematických úpravách môžeme pomocou efektívnych hodnôt napätia písať:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\omega^2 L_1 C_1 U + j\omega(L_1 G_1 + R_1 C_1)U + R_1 G_1 U \quad (1.80)$$

a úprave:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = (R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)U = \gamma^2 U \quad (1.81)$$

Analogicky pre rovnicu prúdu:

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \gamma^2 I \quad (1.82)$$

kde: γ je koeficient šírenia vln, je to komplexná veličina, frekvenčne závislá a je rovná:

$$\gamma = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} = \sqrt{Z_1 Y_1} = \beta + j\alpha \quad (1.83)$$

Jej reálna a imaginárna zložka predstavuje:

β – koeficient tlmenia (útlm amplitúdy na jednotku dĺžky) (Neper.km⁻¹); pre vzdušné vedenia je v intervale 1.10⁻⁴ až 7.10⁻⁴ Np.km⁻¹; pre kábelové vedenia je cca 3.10⁻³ Np.km⁻¹.

α – koeficient fázy (fázový posuv vlny na jednotku dĺžky) (rad.km⁻¹); pre vzdušné vedenia je v intervale 1.10⁻³ až 3.10⁻³ rad.km⁻¹; pre kábelové vedenia je cca 4.10⁻³ rad.km⁻¹. Pre vzdušné vedenia je natočenie fázora približne 6° na 100 km, t.j. natočenie o 360° bude asi po 6000 km. Pre kábelové vedenia natočenie o 360° bude asi pri polovičnej dĺžke vzdušných vedení, t.j. asi po 3000 km.

Rovnice (1.81) a (1.82) sú lineárne diferenciálne rovnice druhého stupňa s konštantnými koeficientmi a ich všeobecné riešenie má tvar:

$$U = K_1 e^{\gamma x} + K_2 e^{-\gamma x} \quad (1.84)$$

$$I = K_3 e^{\gamma x} + K_4 e^{-\gamma x} \quad (1.85)$$

kde: K_1 až K_4 sú komplexné integračné konštanty.

Pri určovaní konštant sa vychádza z pomerov na konci vedenia, teda zo známych hodnôt U_2 , I_2 a $\cos\varphi_2$ (je možné vychádzať aj zo známych hodnôt na začiatku vedenia U_1 , I_1 , $\cos\varphi_1$).

Na konci vedenia bude $x = 0$ (na začiatku vedenia potom $x = l$), teda:

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 \quad (1.86)$$

Rovnice (1.70) a (1.71) v zmysle komplexnej symboliky je možné napísať v tvare:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = (R_1 + j\omega L_1)\mathbf{I} \quad (1.87)$$

$$\frac{\partial \tilde{a}}{\partial x} = (G_1 + j\omega C_1)\mathbf{U} \quad (1.88)$$

Rovnicu (1.84) zderivujeme podľa „ x “ a porovnáme s rovnicou (1.87) pre stav na konci vedenia:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \gamma(\mathbf{K}_1 e^{\gamma x} - \mathbf{K}_2 e^{-\gamma x}) = (R_1 + j\omega L_1)\mathbf{I}_2 \quad (1.89)$$

Pre $x = 0$ bude:

$$\gamma(\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2) = \mathbf{Z}_V \mathbf{I}_2 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{I}_2 = \frac{1}{\mathbf{Z}_V}(\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2)$$

Z rovníc (1.76) a (1.79) je možné určiť integračné konštanty \mathbf{K}_1 a \mathbf{K}_2 :

$$\mathbf{K}_1 = \frac{\mathbf{U}_2 + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_V}{2} \quad (1.90)$$

$$\mathbf{K}_2 = \frac{\mathbf{U}_2 - \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_V}{2} \quad (1.91)$$

Kde \mathbf{Z}_V je vlnová impedancia vedenia. Jej veľkosť pre vzdušné vedenie je asi 300 až 500 Ω ; pre kábelové vedenia kvôli menšej indukčnosti a väčšej kapacite voči vzdušným vedeniam je asi 1/10 tejto hodnoty \rightarrow 30 až 50 Ω .

V matematickom vyjadrení je rovná:

$$\mathbf{Z}_V = \sqrt{\frac{\mathbf{Z}_1}{\mathbf{Y}_1}} = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} \quad (1.92)$$

Analogicky sa odvodí integračné konštanty \mathbf{K}_3 a \mathbf{K}_4 .

Rovnicu (1.85) zderivujeme podľa „ x “ a porovnáme s rovnicou (1.88) pre stav na konci vedenia:

$$\frac{\partial \tilde{a}}{\partial x} = \gamma(\mathbf{K}_3 e^{\gamma x} - \mathbf{K}_4 e^{-\gamma x}) = (G_1 + j\omega C_1)\mathbf{U} \quad (1.93)$$

Pre $x = 0$ bude:

$$\gamma(\mathbf{K}_3 - \mathbf{K}_4) = \mathbf{Y}_1 \mathbf{U}_2 \quad (1.94)$$

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{Z}_V (\mathbf{K}_3 - \mathbf{K}_4) \quad (1.95)$$

Z rovníc (1.85) (pre $x = 0$ bude $\mathbf{I}_2 = \mathbf{K}_3 + \mathbf{K}_4$) a (1.95) je možné určiť integračné konštanty \mathbf{K}_3 a \mathbf{K}_4 :

$$\mathbf{K}_3 = \frac{\mathbf{U}_2 + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_V}{2 \mathbf{Z}_V} \quad (1.96)$$

$$\mathbf{K}_4 = -\frac{\mathbf{U}_2 - \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_V}{2 \mathbf{Z}_V} \quad (1.97)$$

Potom rovnice (1.84) a (1.85) prejdú do tvaru:

$$\mathbf{U} = \frac{\mathbf{U}_2 + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_V}{2} e^{\gamma x} + \frac{\mathbf{U}_2 - \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_V}{2} e^{-\gamma x} \quad (1.98)$$

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{U}_2 + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_V}{2 \mathbf{Z}_V} e^{\gamma x} - \frac{\mathbf{U}_2 - \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_V}{2 \mathbf{Z}_V} e^{-\gamma x} \quad (1.99)$$

Rovnice je možné prepísať pomocou hyperbolických funkcií:

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_2 \cosh \gamma x + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_V \sinh \gamma x \quad (1.100)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{U}_2 \frac{1}{\mathbf{Z}_V} \sinh \gamma x + \mathbf{I}_2 \cosh \gamma x \quad (1.101)$$

Rovnice (1.100) a (1.101) je možné napísať aj v tvare pomocou tzv. Blondelových konštánt. Sú to komplexné konštanty, označované ako \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} (uvedené pre neznáme hodnoty na začiatku vedenia):

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{A} \mathbf{U}_2 + \mathbf{B} \mathbf{I}_2 \quad (1.102)$$

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{C} \mathbf{U}_2 + \mathbf{D} \mathbf{I}_2 \quad (1.103)$$

$$\text{Kde: } \mathbf{A} = \cosh \gamma x; \quad \mathbf{B} = \mathbf{Z}_V \sinh \gamma x; \quad \mathbf{C} = \frac{1}{\mathbf{Z}_V} \sinh \gamma x; \quad \mathbf{D} = \mathbf{A} = \cosh \gamma x \quad (1.104)$$

Rovnice (1.102) a (1.103) predstavujú symetrický štvorpól pre ktorý platí:

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}; \quad \mathbf{A}^2 - \mathbf{B} \mathbf{C} = 1$$

Ak by sa základné rovnice odvádzali tak, že na začiatku vedenia je $x = 0$ a na konci $x = 1$ (zo známych hodnôt na začiatku vedenia U_1, I_1 a $\cos \varphi_1$), potom sa rovnice (1.102) a (1.103) upravujú:

$$U_2 = AU_1 - BI_1 \quad (1.105)$$

$$I_2 = -CU_1 + DI_1 \quad (1.106)$$

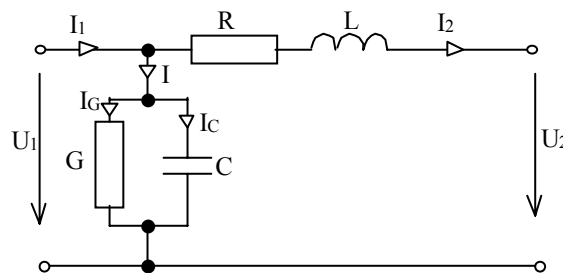
I-1.4 MODELÝ ELEKTRICKÝCH VEDENÍ

V praxi sa používa niekoľko druhov náhradných článkov vedení, a to podľa usporiadania. Poznáme Γ, Π, T (sú odvodené od písmen, ktoré znázorňujú) a STEINMETZOV článok.

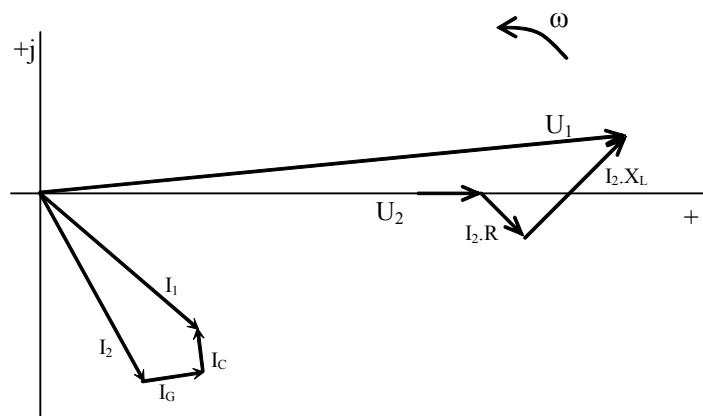
I-1.4.1 Γ článok

Tento článok vykazuje najmenšiu presnosť. Postačuje pre výpočty vzdušných vedení do cca 100 km, kábelových vedení do cca 25 km.

Celková priečna admitancia je sústredená na začiatku vedenia a celková pozdĺžna impedancia na konci vedenia.



Obr.1.15 Náhradná schéma Γ článku



Obr.1.16 Fázorový diagram Γ článku

Pre určenie napäťových a prúdových pomerov na elektrických vedeniach, resp. na náhradných článkoch je možné určiť nasledovné rovnice:

$$U_1 = A.U_2 + B.I_2 \quad (1.107)$$

$$I_1 = C.U_2 + D.I_2 \quad (1.108)$$

Z takto určených rovníc sa vychádza zo známych napäťových a prúdových pomerov (U_2, I_2, φ_2) na konci vedenia a určujú sa pomery na jeho začiatku (U_1, I_1, φ_1) resp. v ľubovoľnom inom mieste.

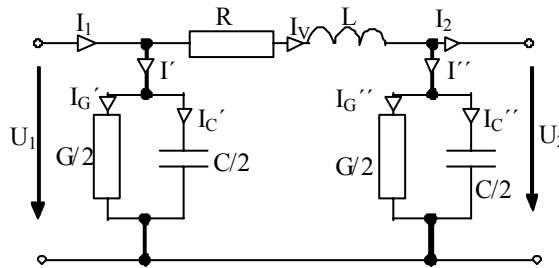
Pre Γ článok sú Blondelove konštanty rovné:

$$A = 1, B = Z, C = Y, D = 1 + Z.Y \quad (1.109)$$

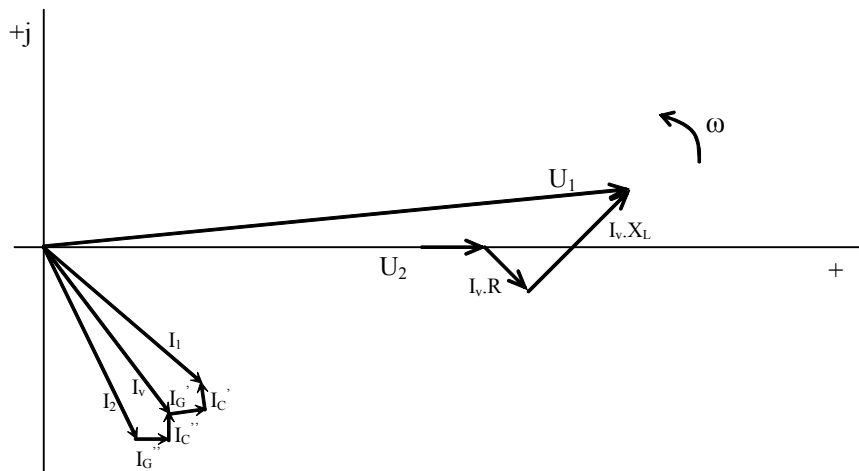
I-1.4.2 Π článok

Článok poskytuje dostatočne presné výpočty pre vzdušné vedenia do 300 km a kábelové vedenia do 100 km.

Celková pozdĺžna impedancia je sústredená v strede vedenia a polovice priečnej impedancie na začiatku a konci vedenia.



Obr.1.17 Náhradná schéma Π článku



Obr.1.18 Fázorový diagram Π článku

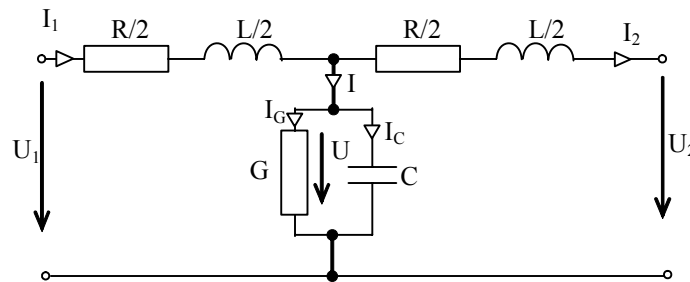
Pre Π článok sú Blondelove konštanty rovné:

$$A = 1 + \frac{Z \cdot Y}{2}, \quad B = Z, \quad C = Y \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4} \right), \quad D = A \quad (1.110)$$

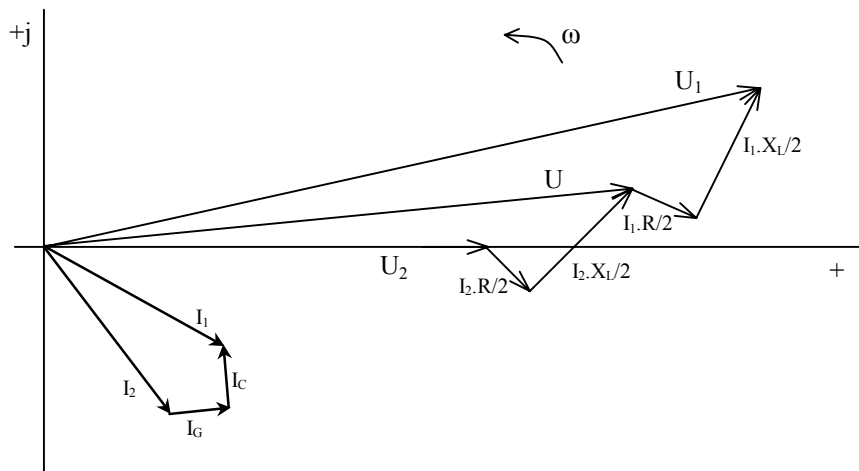
I-1.4.3 T článok

Použitie tohto článku je také isté ako u Π článku.

Polovica pozdĺžnej impedancie je sústredená na začiatku a konci vedenia a celá priečna admitancia je sústredená v strede vedenia.



Obr.1.19 Náhradná schéma T článku



Obr.1.20 Fázorový diagram T článku

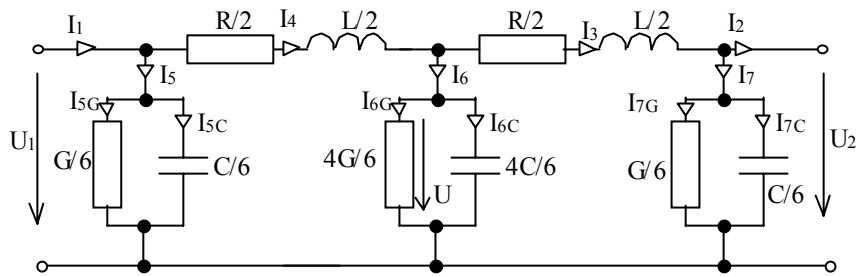
Pre T článok sú Blondelove konštanty rovné:

$$A = 1 + \frac{Z \cdot Y}{2}, \quad B = Z \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4} \right), \quad C = Y, \quad D = A \quad (1.111)$$

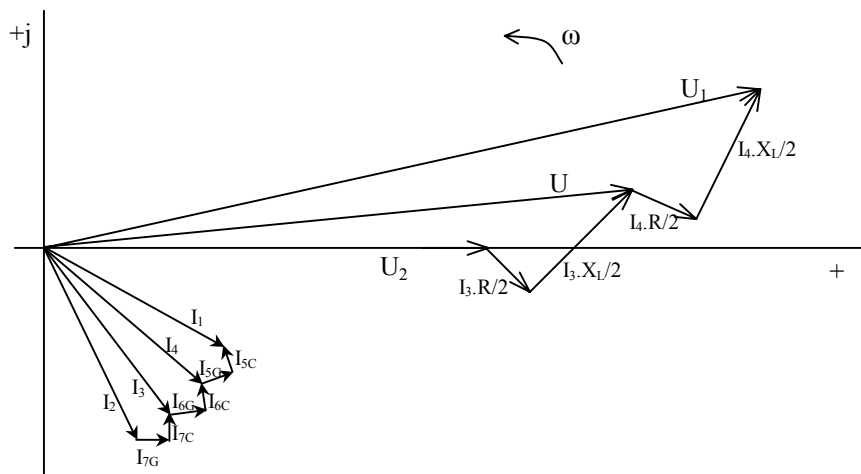
I-1.4.4 Steinmetzov článok

Tento článok prakticky vzniká spojením článkov Γ a Π . Poskytuje dostatočné presné výsledky pre vzdušné vedenia do 500 km a kábelové vedenia do 150 – 200 km.

Polovica pozdĺžnej impedancie je sústredená na začiatku a konci vedenia, šestina priečnej admittance na konci a začiatku vedenia a dve tretiny priečnej admittance v strede vedenia.



Obr.1.21 Náhradná schéma Steinmetzovho článku



Obr.1.22 Fázorový diagram Steinmetzovho článku

Pre Steinmetzov článok sú Blondelove konštanty rovné:

$$\mathbf{A} = \mathbf{1} + \frac{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}{2} + \frac{\mathbf{Z}^2 \cdot \mathbf{Y}^2}{36}, \quad \mathbf{B} = \mathbf{Z} \left(1 + \frac{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}{6} \right) \quad (1.112)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{Y} \left(1 + \frac{5}{36} \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y} + \frac{\mathbf{Z}^2 \cdot \mathbf{Y}^2}{216} \right), \quad \mathbf{D} = \mathbf{A}$$

Príklad 1.3

Vedením 400 kV sa má dodávať výkon $P_2 = 500 \text{ MW}$ s účinníkom $\cos \varphi_2 = 0,95$. Presným riešením je potrebné vypočítať napätie, prúd, výkon a účinník na začiatku vedenia, ak sa predpokladá, že na konci vedenia je napätie $U_{2S} = 400 \text{ kV}$, ($U_{2f} = 230,94 \text{ kV}$).

Zadané hodnoty:

$$R_1 = 0,0293 \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \quad L_1 = 0,9645 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}, \quad G_1 = 0, \quad C_1 = 12,25 \text{ nF} \cdot \text{km}^{-1}, \quad l = 400 \text{ km}.$$

a) výpočet vlnovej impedancie vedenia Z_V a koeficienta šírenia vln γ :

$$Z_V = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{j\omega C_1}}$$

$$Z_V = \sqrt{\frac{0,0293 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,9645 \cdot 10^{-3}}{j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 12,25 \cdot 10^{-9}}} = \sqrt{\frac{0,0293 + j303,007 \cdot 10^{-3}}{j3,8485 \cdot 10^{-6}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,3044e^{j84,47^\circ}}{3,8485 \cdot 10^{-6} e^{j90^\circ}}} = 281,2397e^{-j2,77^\circ}$$

$$\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1) \cdot j\omega C_1} = \sqrt{(0,0293 + j0,303) \cdot j3,8485 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= \sqrt{-1,1661 \cdot 10^{-6} + j0,1128 \cdot 10^{-6}} = \sqrt{1,1715 \cdot 10^{-6} e^{j174,475^\circ}} =$$

$$= \sqrt{1,1715 \cdot 10^{-6} e^{j174,475^\circ}} = 1,0823 \cdot 10^{-3} e^{j87,238^\circ}$$

$$\gamma = \beta + j\alpha = 52,1531 \cdot 10^{-6} + j1,081 \cdot 10^{-3}$$

$$\gamma \cdot l = 0,0209 + j0,4324$$

$$\alpha \cdot l = 0,4324 \text{ rad.km}^{-1} = 24,7747^\circ$$

b) výpočet záťažného prúdu na konci vedenia I_2 :

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi_2} = \frac{500 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 759,6714e^{-j18,195^\circ}$$

c) výpočet hyperbolických funkcií:

$$\sinh \gamma l = \sinh(\beta l + j\alpha l) = \sinh \beta l \cdot \cosh j\alpha l + \cosh \beta l \cdot \sinh j\alpha l =$$

$$= \sinh \beta l \cdot \cos \alpha l + j \cosh \beta l \cdot \sin \alpha l =$$

$$= \sinh 0,0209 \cdot \cos 2407747 + j \cosh 0,0209 \cdot \sin 24,7747 =$$

$$= 0,01898 + j0,4191 = 0,4195e^{j87,407^\circ}$$

$$\cosh \gamma l = \cosh(\beta l + j\alpha l) = \cosh \beta l \cdot \cosh j\alpha l + \sinh \beta l \cdot \sinh j\alpha l =$$

$$= \cosh \beta l \cdot \cos \alpha l + j \sinh \beta l \cdot \sin \alpha l =$$

$$= \cosh 0,0209 \cdot \cos 24,7747 + j \sinh 0,0209 \cdot \sin 24,7747 =$$

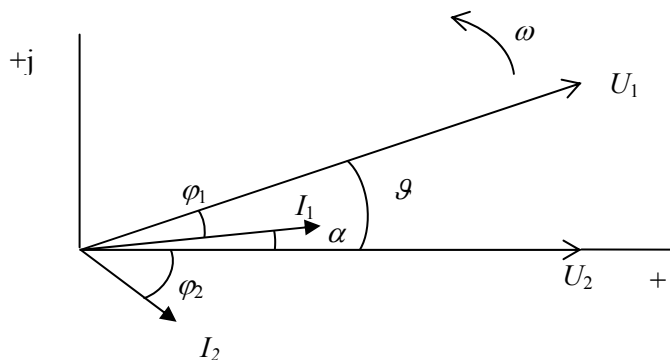
$$= 0,9082 + j0,00876 = 0,9082e^{j0,553^\circ}$$

d) výpočet napätia a prúdu na začiatku vedenia

$$\begin{aligned} U_1 &= AU_2 + BI_2 & U_1 &= U_2 \cosh \gamma l + I_2 Z_V \sinh \gamma l \\ I_1 &= CU_2 + DI_2 & I_1 &= \frac{U_2}{Z_V} \sinh \gamma l + I_2 \cosh \gamma l \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{2f} \cosh \gamma l + I_2 Z_V \sinh \gamma l = \\ &= \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 0,9082 e^{j0,553^\circ} + 759,6714 e^{-j18,195^\circ} \cdot 281,2397 e^{-j2,77^\circ} \cdot \\ &\cdot 0,4195 e^{j87,407^\circ} = \\ &= 0,209739 \cdot 10^6 e^{j0,553^\circ} + 89,6261 \cdot 10^3 e^{j66,442^\circ} = \\ &= 209,73 \cdot 10^3 + j 2,024 \cdot 10^3 + 35,8215 \cdot 10^3 + j 82,1563 \cdot 10^3 = \\ &= 245,5515 \cdot 10^3 + j 84,1803 \cdot 10^3 = 259,58 e^{j18,923^\circ} \text{ kV} \\ U_{1f} &= 259,58 \text{ kV } (\vartheta = 18,923^\circ), U_{1s} = 449,6057 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 \cosh \gamma l + \frac{U_2}{Z_V} \sinh \gamma l = \\ &= 759,6714 e^{-j18,195^\circ} \cdot 0,9082 e^{j0,553^\circ} + \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 281,2397 e^{-j2,77^\circ}} \cdot \\ &\cdot 0,4195 e^{j87,407^\circ} = \\ &= 689,9335 e^{-j17,642^\circ} + 344,4726 e^{j90,177^\circ} = 656,4208 + j 135,3739 = \\ &= 670,2346 e^{j11,652^\circ} \text{ A} \\ \alpha &= 11,652^\circ \end{aligned}$$



Obr.1.23 Fázorový diagram prenosu

d) výpočet účinníka $\cos \varphi_1$ a výkonu P_1 na začiatku vedenia

$$\varphi_1 = \vartheta - \alpha = 18,923^\circ - 11,652^\circ = 7,27^\circ$$

$$\cos \varphi_1 = \cos 7,27^\circ = 0,992$$

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1S} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \cdot 449,6057 \cdot 10^3 \cdot 670,234 \cdot 0,992 = 517,762 \text{ MW}$$

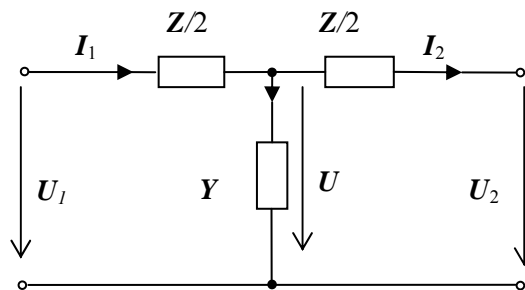
Príklad 1.4

Vedením 220 kV, dĺžky 100 km je zásobovaný odberateľ s výkonom

$P_2 = 100 \text{ MW}$, $\cos \varphi_2 = 0,85$ indukčného charakteru. Je potrebné vypočítať potrebný výkon P_1 na začiatku vedenia, ak sú známe parametre :

$$Z_1 = 0,085 + j 0,43 \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \quad Y_1 = j 2,685 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}$$

Riešenie pomocou náhradného "T" článku.



Obr.1.24 Náhradný článok tvaru „T“

a) výpočet pozdĺžnej impedancie Z a priečnej admitancie Y vedenia:

$$Z = (0,085 + j 0,43) \cdot 100 = (8,5 + j 43) = 43,83 e^{j 78,8^\circ} \Omega$$

$$Y = j 2,685 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = j 2,685 \cdot 10^{-4} \text{ S} = 2,685 \cdot 10^{-4} e^{j 90^\circ} \text{ S}$$

b) výpočet Blondelových konštánt „T“ článku:

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2}, \quad B = Z \cdot \left(1 + \frac{ZY}{4} \right), \quad C = Y$$

$$ZY = (8,5 + j 43) \cdot j 2,685 \cdot 10^{-4} = -0,011546 + j 0,002286$$

$$A = D = 1 + \frac{-0,011546 + j 0,002286}{2} = 0,994227 + j 0,001143 = 0,994227 e^{j 0,066^\circ}$$

$$\left(1 + \frac{ZY}{4} \right) = 1 + \frac{-0,011546 + j 0,002286}{4} = 0,997114 + j 0,005715$$

$$B = Z \cdot (0,997114 + j 0,005715) = 0,997114 e^{j 0,0728^\circ} \cdot 43,83 e^{j 78,8^\circ} = 43,704 e^{j 78,81^\circ}$$

$$C = Y = j 2,685 \cdot 10^{-4}$$

c) výpočet záťažného prúdu I_2 na konci vedenia:

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi_2} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 0,85} = 308,743 \text{ A}$$

$$\varphi_2 = \arccos \varphi_2 = 31,79^\circ$$

$$I_{2w} = I_2 \cdot \cos \varphi = 308,743 \cdot 0,85 = 262,4319 \text{ A}$$

$$I_{2j} = I_2 \cdot \sin \varphi = 308,743 \cdot 0,527 = -j162,6405 \text{ A}$$

d) výpočet napätia a prúdu na začiatku vedenia – U_1, I_1 :

$$U_1 = AU_2 + BI_2$$

$$I_1 = CU_2 + DI_2$$

$$\begin{aligned} U_1 &= AU_2 + BI_2 = 0,994227e^{j0,066} \cdot \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} + 43,704e^{j78,81^\circ} \cdot 308,743e^{-j31,79^\circ} = \\ &= 126283,7 + j145,468 + 9198,759 + j9871,367 = \\ &= 126283,7 + j145,468 + 9198,759 + j9871,367 = \\ &= 135482,46 + j10016,84 = 135852,3e^{j4,23^\circ} \text{ V} \end{aligned}$$

$$U_1 = 135,852e^{j4,23^\circ} \text{ kV} \quad \vartheta = 4,23^\circ$$

$$U_{1s} = \sqrt{3} \cdot U_1 = \sqrt{3} \cdot 135,852 = 235,3 \text{ kV}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= CU_2 + DI_2 = 2,685 \cdot 10^{-4} e^{j90^\circ} \cdot \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} + 0,994227e^{j0,066} \cdot \\ &\cdot 308,743e^{-j31,79^\circ} = 34,104e^{j90^\circ} + 306,961e^{-j31,72^\circ} = \\ &= j34,104 + 261,1095 - j161,3904 = 261,1095 - j127,286 = 290,482e^{-j25,79^\circ} \text{ A} \end{aligned}$$

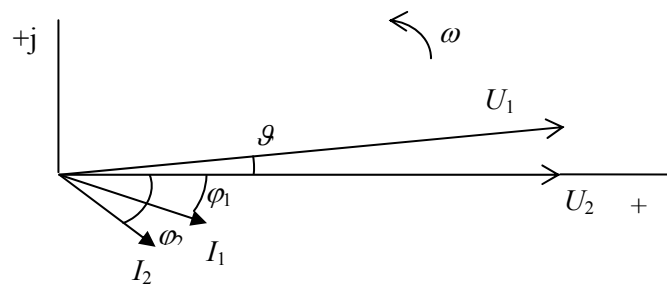
$$\varphi_1 = \langle U_1 \rangle - \langle I_1 \rangle = 4,23 + 25,79 = 30,02^\circ$$

e) výpočet potrebného výkonu na začiatku vedenia:

$$P_1 = 3 \cdot U_{1f} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 135852 \cdot 290,482 \cdot \cos 30,02^\circ = 102,506 \text{ MW}$$

Percentuálne straty výkonu na vedení

$$\Delta p\% = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100 = 2,45\%$$



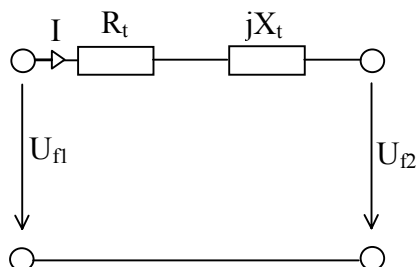
Obr.1.25 Fázorový diagram prenosu

I-2 TLMIVKY V TROJFÁZOVEJ SÚSTAVE

Sú to prístroje s jedným vinutím v každej fáze, prípadne len s jedným vinutím. Spotrebávajú prevažne jalový výkon indukčného charakteru. Spotreba činného výkonu (straty) má byť čo najmenšia. Podľa ich zapojenia v sústave sa rozoznávajú tri základné druhy: pozdĺžne, priečne a uzlové. Ich parametre, ktoré sú v ďalšom uvedené majú platnosť pre stacionárny chod a pre pomaly sa meniace prechodné javy.

I-2.1 TLMIVKY POZDĹŽNE (SÉRIOVÉ)

Používajú sa na obmedzenie skratových prúdov, v napäťových sústavách do 35 kV. Náhradná schéma pre jednu fázu je na obr.2.1.



Obr.2.1 Náhradná schéma sériovej tlmivky

Pri výpočtoch rezistanciu tlmivky je možné zanedbať, nakoľko $R_t \ll X_t$ (pokiaľ sa nejedná o výpočet strát).

Pri sériových tlmivkách sa zadáva percentuálna reaktancia - $x_{t\%}$. Táto hodnota sa vzťahuje na menovité hodnoty, resp. na jej zdanlivý výkon. Skutočná hodnota reaktancie sa potom bude rovnať vzťahu:

$$X_t = \frac{x_{t\%}}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = \frac{x_{t\%}}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_{tN}} \quad [\Omega; \%, \text{ kV, kA}; \quad \Omega; \%, \text{ kV, MVA}] \quad (2.1)$$

Sériové tlmivky musia vydržať tepelné a mechanické namáhania skratovými prúdmi. Pre $I_N \leq 200$ A sa vyrábajú ako trojfázové, pre $I_N > 200$ A ako jednofázové, obvykle s betónovými výstužami. Okrem požadovaného účinku sériové tlmivky spôsobujú úbytok napätia v bezporuchovom stave, ktorý je ale nežiadúci. Vypočíta sa:

$$\Delta U_f = U_{f1} - U_{f2} = (R_t + j \cdot X_t) I_t = Z_t \cdot I_t \approx j \cdot X_t \cdot I_t \quad (2.2)$$

Tým dochádza k väčším zmenám napätia so zmenou zaťaženia ako bez tlmivky.

Sériové tlmivky sa nepoužívajú na kompenzáciu parametrov vedenia - na kompenzáciu pozdĺžnej impedancie, pretože je indukčného charakteru. Zvláštnu konštrukciu má sériová tlmivka pre

vysokofrekvenčné prenosy na vzdušných vedeniach s napätím 110 kV a vyšším, kde vymedzuje prenosový úsek.

Pri riešení trojfázových vedení maticovým počtom pre impedanciu pozdĺžnej (sériovej) trojfázovej tlmivky v sústave s fázami a, b, c platí:

$$Z_{tabc} = \begin{vmatrix} Z_t & 0 & 0 \\ 0 & Z_t & 0 \\ 0 & 0 & Z_t \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} Z_t = Z_t \cdot E \quad (2.3)$$

kde E je jednotková matica tretieho radu. Z tohto výrazu je možné určiť vlastnú a vzájomnú impedanciu tlmivky:

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z_t \quad \text{resp.} \quad Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{bc} = 0 \quad (2.4)$$

Maticový zápis umožní jednoduchý prechod do sústavy súmerných zložiek, ktoré sa používajú pri nesymetrických stavoch v trojfázovej sústave.

Ak platí: $Z_{t120} = T^{-1} \cdot Z_{tabc} \cdot T = Z_{tabc} = Z_t \cdot E$

kde

$$T = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} \quad \text{resp.} \quad T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \quad \text{resp.} \quad a = e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad (2.5)$$

Potom:

$$Z_{t012} = \begin{vmatrix} Z_t & 0 & 0 \\ 0 & Z_t & 0 \\ 0 & 0 & Z_t \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix} \quad (2.6)$$

Takže vlastná impedancia netočivej, súslednej a spätnej zložky sú rovnaké:

$$Z_{00} = Z_{11} = Z_{22} = Z_t \quad (2.7)$$

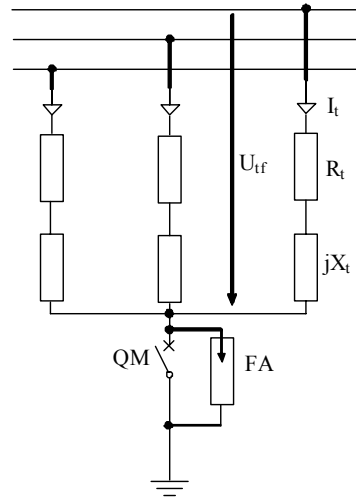
Pre vzájomnú impedanciu platí:

$$Z_{01} = Z_{02} = Z_{10} = Z_{20} = Z_{12} = Z_{21} = 0 \quad (2.8)$$

Rozbor ukazuje, že vlastné impedancie v zložkových sústavách súmerných zložiek (0, 1, 2) a v pôvodnej sústave s fázami a, b, c majú rovnaké hodnoty.

I-2.2 TLMIVKY PARALELNÉ (PRIEČNE)

Najčastejšie sa používa v sieťach s napätím $U_N \geq 200$ kV pre kompenzáciu kapacitných (nabíjajúcich) prúdov vedení pri chodu naprázdno, alebo pri malých zaťaženiach. Základná schéma je na obr.2.2



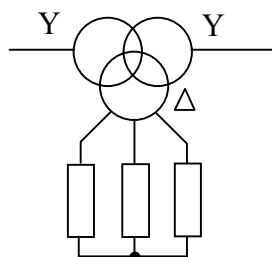
Obr.2.2 Schéma použitia paralelnej tlmivky

Platí, že $R_t \ll X_t$. Pre reaktanciu tlmivky pri zanedbaní rezistancie platí:

$$X_t = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = \frac{U_N^2}{Q_{tN}} \quad [\Omega; \text{kV}, \text{kA}; \text{kV}; \text{MVA}_r] \quad (2.9)$$

V elektrizačnej sústave je možné ju zapojiť dvoma spôsobmi:

- 1) Tlmivka sa galvanicky spojí s vedením, ktorého nabíjací výkon kompenzuje. Potom $U_{tf} = U_N$, kde U_N je menovité napätie siete. Uzol vinutia tlmivky zapojený do hviezdy sa spojuje so zemou pomocou špeciálneho výkonového vypínača QM. Uzol je chránený bleskoistkou FA proti prepätiu. Vinutie tlmivky je dimenzované na izolačné napätie U_N (obr.2.2).
- 2) Tlmivka sa pripojuje do terciálu transformátora. Menovité napätie tlmivky je tým dané menovitým napätím terciálneho vinutia, ktoré sa pohybuje od 10 do 35 kV (obr.2.3).



Obr.2.3 Tlmivka zapojená do terciálneho vinutia transformátora

Tlmivka je potom navrhnutá na nižšie menovité napätie, ako v predchádzajúcom prípade.

Ťažkosti však vznikajú s výkonovým vypínačom, ktorý má vypínať indukčnú záťaž, ktorú tlmivka predstavuje.

Súsledná a spätná zložka impedancie resp. reaktancie je rovnaká. Netočivá zložka impedancie resp. reaktancie je rovná ∞ , nakoľko pri zapojení do hviezdy s izolovaným uzlom nemôže tlmivkou prechádzať prúd netočivej zložky. Potom platí:

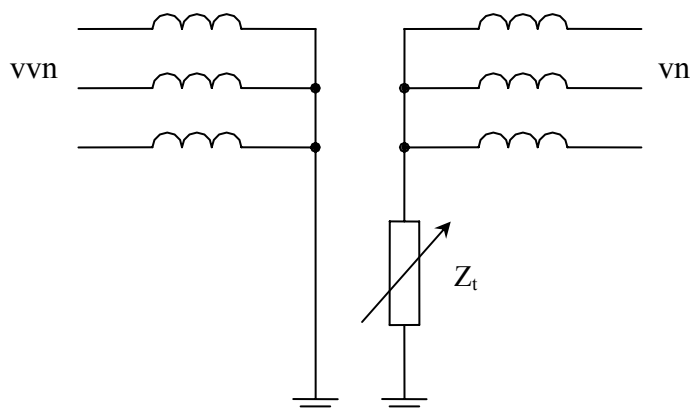
$$Z_t = Z_{t1} = Z_{t2} \quad ; \quad X_t = X_{t1} = X_{t2} \quad ; \quad Z_{t0} \rightarrow \infty \quad ; \quad X_{t0} \rightarrow \infty \quad (2.10)$$

I-2.3 TLMIVKY UZLOVÉ

V trojfázových sieťach vn, ktoré nemajú uzol vinutia transformátora spojený priamo so zemou, sa medzi uzol a zem zapojuje tlmivka (Peterson) na kompenzáciu prúdov pri jednofázových zemných spojeniach (ak sa uzol transformátora spojí so zemou priamo alebo cez rezistor jedná sa o skrat).

Pre tlmivku sa udáva menovitý výkon S_{tN} (jednofázový), menovité napätie siete, prípadne i požadovaný rozsah zmeny indukčnej reaktancie. Výkon tlmivky sa určí podľa kapacitného prúdu siete pri jej najväčšej rozlohe. V bezporuchovej prevádzke tlmivkou nepreteká prúd. Pri zemnom spojení veľkosť pretekajúceho prúdu závisí od fázového napätia, ktoré vznikne medzi uzlom transformátora a zemou, a od jej impedancie, resp. reaktancie.

Tlmivkou prechádza len prúd netočivej zložky, čo znamená, že $3 \cdot X_t = X_0$ (pri zanedbaní rezistancie tlmivky), pretože tlmivkou prechádza trojnásobne väčší prúd než prúd v jednotlivých fázach. Súsledné a spätné zložky sa neuplatňujú.



Obr. 2.4 Uzlová tlmivka

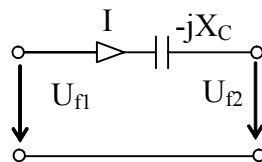
$$X_t = \frac{x_{\%}}{100} \frac{U_N^2}{Q_{tN}} \quad [\Omega; kV, MVA_r] \quad (2.11)$$

I-3 KONDENZÁTORY

Budeme sa zaujímať len o výkonové kondenzátory pre frekvenciu 50 Hz. Spravidla sa používajú batérie kondenzátorov, ktoré vzniknú paralelným, prípadne sériovým zapojením jednotlivých kondenzátorov.

I-3.1 SÉRIOVÉ (POZDĹŽNE) KONDENZÁTORY

Tieto kondenzátory sa používajú buď na zlepšenie napät'ových pomerov (siete do 35 kV), alebo na úpravu parametrov vedenia, (napr. pre zlepšenie stability prenosu - siete nad 220 kV), a to indukčnú reaktanciu vedenia - obr.3.1



Obr.3.1 Reaktancia sériového kondenzátora

Reaktancia kondenzátora je daná:
$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (3.1)$$

Trojfázový výkon kondenzátora je možné určiť (zanedbaním činného výkonu):

$$X_c = \frac{U_{f1} - U_{f2}}{I} = \frac{U_c}{I} \Rightarrow U_c = X_c \cdot I \quad (3.2)$$

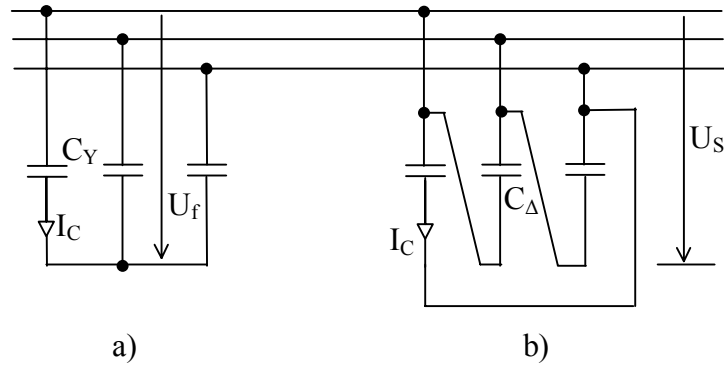
$$S_c = 3 \cdot U_c \cdot I^* = 3 \cdot X_c \cdot I^2 = Q_c \quad (3.3)$$

Ako je vidieť, napätie a výkon kondenzátora sa mení zaťažením. Za menovitý výkon a menovité napätie sa považujú obvykle hodnoty výkonu a napätia, ak prechádza kondenzátorom menovitý prúd vedenia.

V náhradných schémach sa sériový kondenzátor kreslí k rezistancii a indukčnej reaktancii vedenia. Pri nesymetrickom zaťažení je potrebné uvažovať aj s jeho spätnou a netočivou zložkou. Pre sériový kondenzátor platí, že sú rovnaké ($X_c = X_1 = X_2 = X_0$).

I-3.2 PARALELNÉ (PRIEČNÉ) KONDENZÁTORY

Tieto kondenzátory sa používajú v priemyselných sieťach do 1 kV. Základná schéma trojfázového kondenzátora je na obr.3.2



Obr.3.2 Trojfázový kondenzátor
 a) zapojenie do hviezdy b) zapojenie do trojuholníka

Pri zapojení do hviezdy bude jednofázový resp. trojfázový výkon :

$$Q_f = U_f \cdot I_C = U_f^2 \cdot \omega \cdot C_Y \text{ resp. } Q_S = 3 \cdot U_f^2 \cdot \omega \cdot C_Y = U_S^2 \cdot \omega \cdot C_Y \quad (3.4)$$

Pri zapojení do trojuholníka bude jednofázový resp. trojfázový výkon:

$$Q_f = U_S \cdot I_C = U_S^2 \cdot \omega \cdot C_\Delta \text{ resp. } Q_S = 3 \cdot U_S^2 \cdot \omega \cdot C_\Delta \quad (3.5)$$

Pri rovnakom jalovom výkone bude pre oba druhy zapojenia platiť: $C_Y = 3 \cdot C_\Delta$

Pri zapojení do hviezdy je potom kapacita kondenzátora trojnásobná oproti zapojeniu do trojuholníka pre dosiahnutie rovnakého výkonu. Z toho dôvodu, kde je to možné, sa používa zapojenie do trojuholníka. Takéto zapojenie kondenzátora do siete sa používa na zlepšenie účinníka, pretože kondenzátor odoberá zo siete jalový výkon kapacitného charakteru. Zo skutočného a požadovaného účinníka je možné určiť jeho výkon.

Základné parametre pre kondenzátory sú: menovitý trojfázový výkon Q_C , menovité napätie U_N , menovitá frekvencia f_N . Z týchto údajov je možné určiť ich reaktanciu, prípadne admitanciu. Spätá reaktancia paralelného kondenzátora je rovná súslednej. Netočivá zložka je rovná ∞ , čo zapríčiňuje zapojenie paralelného kondenzátora. Sú zapojené do hviezdy s izolovaným uzlom (obr.3.2a) alebo vo väčšine prípadov do trojuholníka (obr.3.2b).

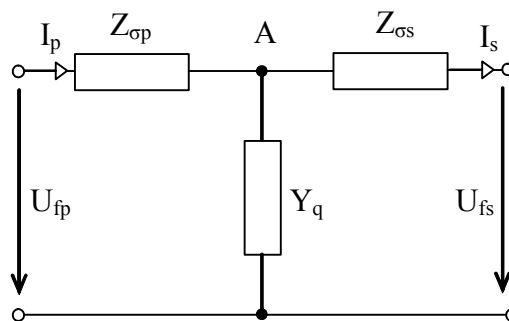
I-4 TROJFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY

V tejto kapitole sa obmedzíme iba na výkonové transformátory v trojfázovej sústave.

Podľa počtu vinutí na jednu fázu rozoznávame dvojvinuťové a trojvinuťové transformátory. Špeciálnou skupinou sú viac ako trojvinuťové a zvláštnu skupinu tvoria autotransformátory.

I-4.1 DVOJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY

Náhradná schéma transformátora je obvykle v tvare článku T (obr.4.1), kde jednotlivé veličiny sú buď pomenované a prepočítané na jedno menovité napätie, alebo sú pomerné, vzťahujúce sa na menovitý výkon a menovité napätie transformátora.



Obr.4.1 Náhradná schéma dvojvinuťového transformátora

kde: $Z_{\sigma p}$, $Z_{\sigma s}$ sú rozptylové impedancie primárneho resp. sekundárneho vinutia
 Y_q je priečna admitancia
 I_p , I_s sú primárne resp. sekundárne prúdy
 U_{fp} , U_{fs} sú primárne resp. sekundárne napätia

Hodnoty jednotlivých veličín sa určia výpočtom a overujú sa na hotovom výrobku meraním naprázdno a nakrátko, ktoré poskytnú hodnoty pre straty výkonu naprázdno (ΔP_0), prúd naprázdno vyjadrený v percentách menovitého prúdu ($i_{0\%}$), straty činného výkonu nakrátko (ΔP_K), impedanciu alebo napätie nakrátko ($Z_{K\%} = u_{K\%}$), vyjadrenú v percentách príslušnej menovitej veličiny.

Pre určenie jednotlivých zložiek impedancií a admitancie platia nasledujúce vzťahy.

Pre určenie jednotlivých pomerných zložiek priečnej vodivosti:

$$y_q = \frac{i_{0\%}}{100} ; \quad g_q = \frac{\Delta P_0}{S_N} \Rightarrow b_q = \sqrt{y_q^2 - g_q^2} \quad (4.1)$$

prípadne:

$$y_q = \frac{\Delta P_0}{S_N} - j \cdot \sqrt{\left(\frac{i_{0\%}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{S_N}\right)^2} = g_q - j \cdot b_q \quad (4.2)$$

Pre prevod pomernej hodnoty admitancie na skutočnú, vyjadrenú v siemensoch, vzťahnutú na menovité napätie platí:

$$Y_q = y_q \cdot \frac{S_N}{U_N^2} = G_q - j \cdot B_q \quad (4.3)$$

Pre pozdĺžnu impedanciu a jej zložky v pomerných hodnotách platí:

$$z_K = \frac{u_{K\%}}{100} \quad ; \quad r_K = \frac{\Delta P_K}{S_N} \Rightarrow x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} \quad (4.4)$$

prípadne:

$$z_K = \frac{\Delta P_K}{S_N} + j \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{K\%}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_K}{S_N}\right)^2} = r_K + j \cdot x_K \quad (4.5)$$

Pre prevod pomernej hodnoty impedancie na skutočnú, vyjadrenú v ohmoch, vzťahnutú na menovité napätie platí:

$$Z_K = z_K \frac{U_N^2}{S_N} = R_K + j \cdot X_K \quad (4.6)$$

Táto impedancia - $Z_K = Z_{\sigma ps} = (R_p + R_s) + j \cdot (X_{\sigma p} + X_{\sigma s})$ - sa rozkladá na dve časti, a to:

$$Z_{\sigma p} = 0,5 Z_{\sigma ps} = Z_{\sigma s} \quad (4.7)$$

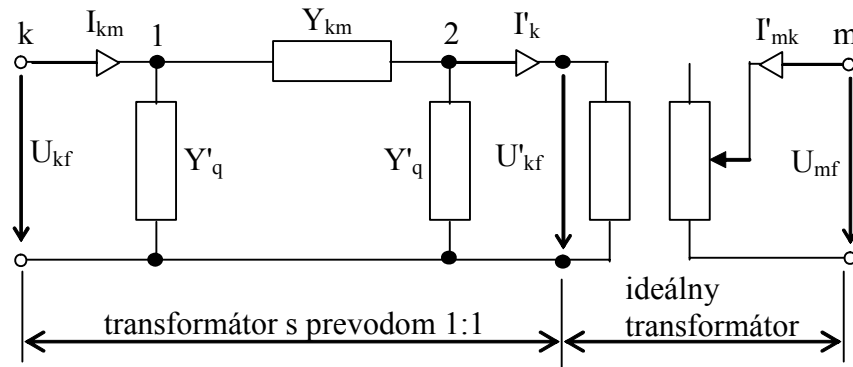
Je treba upozorniť, že toto rozdelenie nie je presné, pretože rozptyly oboch vinutí nie sú rovnaké vzhľadom na polohy ku kostre, a nie sú rovnaké ani rezistancie oboch vinutí po prepočítaní na rovnaké napätie. Spätaná zložka impedancie (reaktancie) je rovná súslednej. Netočivá zložka závisí od zapojenia vinutia transformátora (pozri kap. I-4.5).

Nie vždy je zavedenie T článku vhodné, preto sa niekedy používa aj II prípadne Γ článok.

I-4.2 TROJFÁZOVÝ REGULAČNÝ TRANSFORMÁTOR

Pri výpočtoch elektrických sietí sa vyskytujú transformátory, ktorých prevod pri nastavenej odbočke nezodpovedá menovitému prevodu. Pri niektorých transformátoroch dochádza k fázovému posuvu medzi fázormi zodpovedajúcich napätí vstupnej a výstupnej strany. Je to spôsobené vplyvom spojenia vinutí jednotlivých fáz, alebo pôsobením priečnej regulácie.

Matematický model takéhoto transformátora sa vytvorí sériovým radením transformátora s prevodom 1 : 1, pri ktorom rešpektujeme straty činného výkonu, rozptylové toky i magnetizačný prúd, a ideálneho transformátora s pomerným komplexným prevodom t (obr.4.2).



Obr.4.2 Náhradná schéma jednej fáze trojfázového regulačného transformátora

Vstupná strana transformátora nie je regulovaná, kým výstupná je. Na vstupnú stranu sú prepočítané fázory skutočného napätia U_{mfsk} a prúdu I'_{mksk} zo strany výstupnej:

$$U_{mf} = U_{mfsk} \frac{U_{kfN}}{U_{mfN}} \quad ; \quad I'_{mk} = I'_{mksk} \frac{U_{mfN}}{U_{kfN}} \quad (4.8)$$

Pre transformátor s prevodom 1 : 1 platia podľa Kirchhoffovho zákona o prúdoch v uzloch 1 a 2 vzťahy:

$$I_{km} = Y'_{q1} \cdot U_{kf} + Y_{km}(U_{kf} - U'_{kf}) \quad (4.9)$$

$$I'_{k2} = -Y'_{q2} \cdot U'_{kf} + Y_{km} \cdot (U_{kf} - U'_{kf}) \quad (4.10)$$

kde pre pozdĺžnu a priečnu admitanciu platia vzťahy, vzťahnuté na menovité napätie vstupnej strany, podľa vzťahov vyjadrených pri dvojvinutových transformátoroch:

$$Y_{km} = Z_{km}^{-1} = \left(z_k \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \right)^{-1} \quad (4.11)$$

$$Y'_{q} = \frac{1}{2} Y_q = \frac{1}{2} y_q \cdot \frac{S_N}{U_N^2} \quad (4.12)$$

Priečna admitancia Y_q je rovnomerne rozdelená na začiatok a koniec náhradného článku v tvare Π . Hodnoty ΔP_0 , ΔP_K , $u_K\%$, $i_0\%$ sa merajú na skutočnom transformátore pri nastavení odbočky zodpovedajúcej menovitému prevodu.

Pri zavedení definične pomerného prevodu ideálneho transformátora, ktorý je obecné komplexným číslom, platí:

$$t = \frac{U'_{kf}}{U_{mf}} = \frac{p}{p_N} \quad (4.13)$$

kde p je skutočný prevod regulačného transformátora, $p = U'_{kf} / U_{mf}$
 p_N je menovitý prevod, ktorým sa všetky sieťové parametre prepočítavajú na jednotnú napäťovú hladinu, $p_N = U_{kfN} / U_{mfN}$

Pre výkon jednej fáze ideálneho transformátora platí:

$$U'_{kf} \cdot I'_{k*} + U_{mf} \cdot I'_{mk*} = 0 \Rightarrow I'_{k*} = -I'_{mk*} \cdot \frac{U_{mf}}{U'_{kf}} \Rightarrow I'_{k*} = -\frac{I'_{mk*}}{t^*} \quad (4.14)$$

Ak výrazy pre t a t^* dosadíme do rovníc vyjadrujúce Kirchhoffove zákony pre prúdy 1. a 2. uzla dostávame:

$$\begin{aligned} I_{km} &= Y'_q \cdot U_{kf} + Y_{km} (U_{kf} - t \cdot U_{mf}) \\ -\frac{I'_{mk*}}{t^*} &= -Y'_q \cdot t \cdot U_{mf} + Y_{km} (U_{kf} - t \cdot U_{mf}) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Ak druhú rovnicu vynásobíme $-t^*$ a $t \cdot t^* = t^2$, po úpravách dostávame maticu:

$$\begin{bmatrix} I_{km} \\ I'_{mk*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y'_q + Y_{km} & -t \cdot Y_{km} \\ -t^* \cdot Y_{km} & t^2 (Y'_q + Y_{km}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{kf} \\ U_{mf} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

V závislosti od možnosti rôznych hodnôt pomerného prevodu t , môžu nastať tieto prípady:

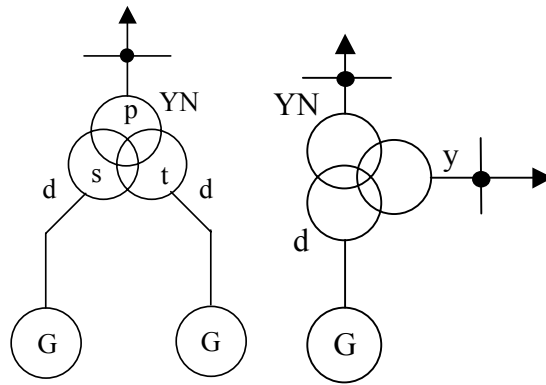
- $t = 1$; v tomto prípade je prevod „p“ reálne číslo a platí návaznosť napätí
- $t = t^* \neq 1$ zodpovedá pozdĺžnej regulácie
- $t \neq t^* \neq 1$ zodpovedá priečnej regulácie

Tým sme si určili matematický model trojfázového regulačného transformátora.

I-4.3 TROJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY

Trojvinuťové transformátory sú stroje s troma vinutiami na fázu, veľkých výkonov, niekedy konštrukčne riešené ako tri jednofázové jednotky. Pre označenie jednotlivých vinutí sa použijú indexy „p“ (primár) pre vstupnú stranu, „s“ (sekundár) pre výstupnú stranu a „t“ (terciál) pre stranu s vyrovnávacím vinutím.

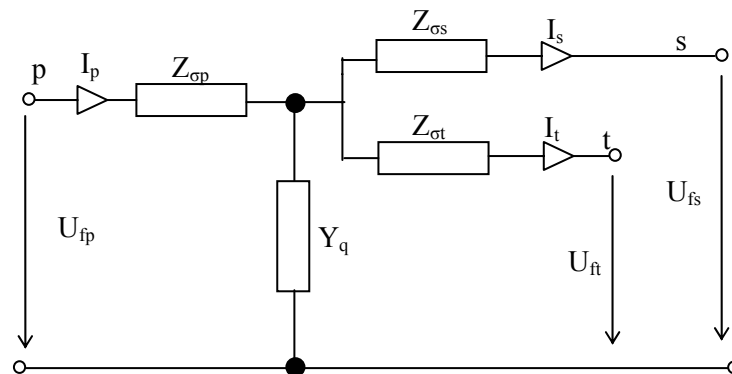
Príklad použitia trojvinuťového transformátora s vyznačením zapojenia jednotlivých vinutí je na obr.4.3.



- a) trojvinuťový transformátor napájaný dvoma alternátormi
 b) napájanie dvoch sietí rôzneho napätia trojvinuťovým transformátorom

Obr.4.3

Náhradná schéma trojvinuťového transformátora je na obr.4.4, kde všetky veličiny sú buď skutočné a vzťahnuté na jedno z menovitých napätí, alebo pomerné, vzťahnuté na menovitý výkon a menovité napätie jedného z vinutí.



Obr.4.4 Náhradná schéma trojvinuťového transformátora

Parametre potrebné pre náhradnú schému sa určia výpočtom pri návrhu a overia skúškami na hotovom výrobku.

Pri skúške naprázdno sa určia straty činného výkonu naprázdno ΔP_0 a prúd naprázdno $i_0\%$ v percentách menovitého prúdu napájacieho vinutia. Skúšky nakrátko sú tri. Pri nich je jedno vinutie napájané, druhé je nakrátko a tretie je ponechané naprázdno. Menovité výkony jednotlivých vinutí nemusia byť rovnaké. Meranie nakrátko sa urobí pri prúde, ktorý zodpovedá menovitému prúdu vinutia s menším výkonom a potom sa prepočíta na najväčší menovitý výkon. Vinutiu s najväčším menovitým výkonom sa priradí index „p“. Ak sú menovité výkony rovnaké, je možnosť voľby označenia. Za vyrovnávacie vinutie sa uvažuje vinutie s najmenším menovitým výkonom.

Zo skúšky naprázdno - ΔP_0 , $i_0\%$ - podobne ako u dvojvinuťového transformátora určíme priečnu admitanciu, jej zložky, a to buď v pomerných alebo skutočných hodnotách:

$$y_q = g_q - j.b_q = \frac{\Delta P_0}{S_{pN}} - j \sqrt{\left(\frac{i_{0\%}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{S_{pN}}\right)^2} \quad (4.17)$$

resp.

$$Y_q = y_q \frac{S_{pN}}{U_{pN}^2} = G_q - j.B_q \quad (4.18)$$

Zo skúšok nakrátko medzi vinutiami p - s, p - t a s - t sa určia podobne ako u dvojvinuťových transformátorov rozptylové impedancie, alebo rozptylové reaktancie.

Napr. pre meranie nakrátko medzi vinutiami p - s:

$$z_{ps} = r_{ps} + j.x_{ps} = \frac{\Delta P_{kps}}{S_{sN}^2} \cdot S_{pN} + j \sqrt{\left(\frac{u_{kps\%}}{100} \cdot \frac{S_{pN}}{S_{sN}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{kps}}{S_{sN}^2} \cdot S_{pN}\right)^2} \quad (4.19)$$

resp.

$$Z_{ps} = z_{ps} \cdot \frac{U_{pN}^2}{S_{pN}} = R_{ps} + j.X_{ps} = \frac{\Delta P_{kps}}{S_{sN}^2} \cdot U_{pN}^2 + j \sqrt{\left(\frac{u_{kps\%}}{100} \cdot \frac{U_{pN}^2}{S_{sN}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{kps}}{S_{sN}^2} \cdot U_{pN}^2\right)^2} \quad (4.20)$$

Rozptylové impedancie jednotlivých vinutí napr. v skutočných hodnotách sú potom dané:

$$\begin{aligned} Z_{\sigma p} &= R_p + j.X_{\sigma p} = 0,5.(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_{\sigma s} &= R_s + j.X_{\sigma s} = 0,5.(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_{\sigma t} &= R_t + j.X_{\sigma t} = 0,5.(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Rozptylové reaktancie a priečna admitancia z predchádzajúcich rovníc sú prvkami náhradnej schémy, ktorá umožňuje študovať napäťové a výkonové pomery trojvinuťových transformátorov.

Okrem menovitých výkonov jednotlivých vinutí sa používa termín „typový výkon“, ktorý sa udáva:

$$S_{typ} = 0,5(S_{pN} + S_{sN} + S_{tN}) \quad (4.22)$$

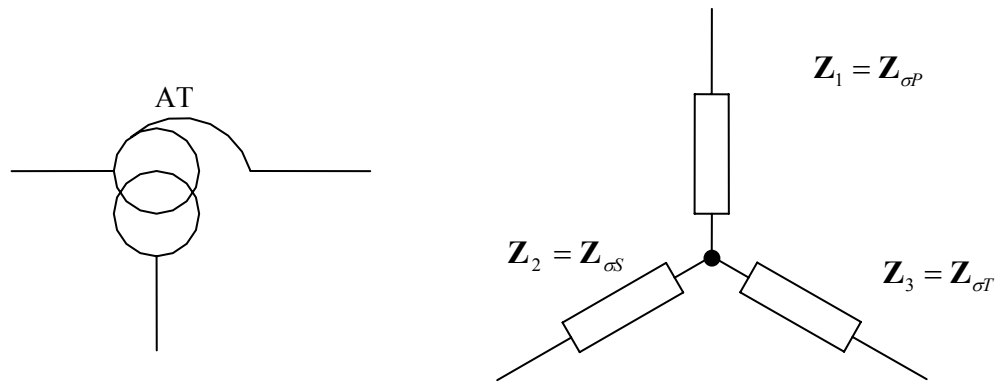
Dvojvinuťový transformátor s menovitým výkonom ako je typový výkon trojvinuťového transformátora má približne rovnaké rozmery a hmotnosť, pričom najvyššie napätie trojvinuťového transformátora a vyššie napätie dvojvinuťového transformátora sa predpokladá, že je rovnaké.

I-4.4 AUTOTRANSFORMÁTOR

Autotransformátory predstavujú špeciálny prípad transformátora s dvoma alebo troma vinutiami. V prípade autotransformátora s dvoma vinutiami sú tieto vinutia spojené nielen magnetickými väzbami ale aj galvanicky. V prípade trojvinuťového transformátora je tretie vinutie spojené len magnetickými väzbami. Náhradné schémy dvoj a trojvinuťového autotransformátora sú na obr.4.5 a obr.4.6.



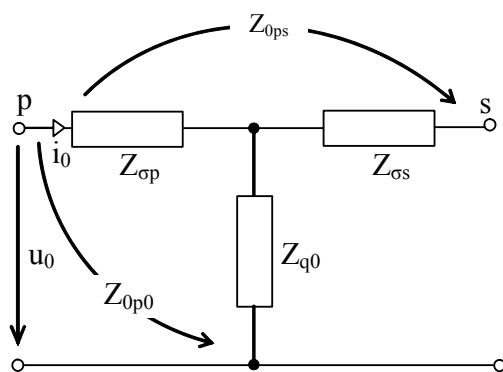
Obr. 4.5 Náhradná schéma dvojvinuťového autotransformátora



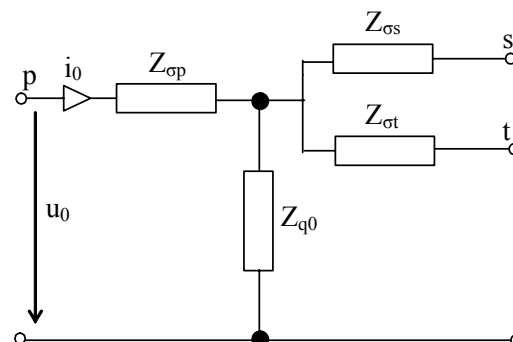
Obr.4.6 Náhradná schéma trojvinuťového autotransformátora

I-4.5 IMPEDANCIA ZLOŽKOVÝCH SÚSTAV SÚMERNÝCH ZLOŽIEK

Pre parametre súsledných a spätných zložiek platia výpočty uvedené v predchádzajúcich kapitolách. Pre analýzu parametrov netočivej zložky sa vychádza z náhradných schém pre dvojvinuťové transformátory (obr.4.7) a trojvinuťové transformátory (obr.4.8).



Obr.4.7 Schéma dvojvinuťového transformátora pre netočivú zložkovú sústavu



Obr.4.8 Schéma trojvinuťového transformátora pre netočivú zložkovú sústavu

Pozdĺžne prvky v náhradných schémach sú rovnaké ako pre súslednú zložkovú sústavu. Prvok v priechnej vetve je na rozdiel od predošlých úvah, kde bola použitá admitancia y_q , uvažovaná impedancia z_{q0} , ktorá je určovaná pre každý prípad zvlášť.

Hodnoty impedancie netočivej zložkovej sústavy sú pre jednotlivé zapojenia vinutí transformátorov udané v tab 4.1.

Jednotlivé spôsoby zapojenia v tab.4.1 je možné skomentovať:

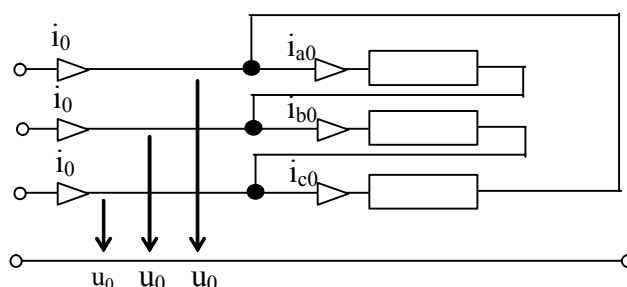
a) Dvojvinuťový transformátor so vstupným vinutím zapojeným do hviezdy s izolovaným uzlom a výstupné vinutie je v ľubovoľnom zapojení. Pre prúdy v uzle vstupného vinutia platí:

$$3 \cdot \dot{i}_0 = 0 \rightarrow \dot{i}_0 = 0$$

Potom:

$$z_0 = \frac{u_0}{i_0} \rightarrow \infty ; \quad z_{0p0} \rightarrow \infty ; \quad z_{0ps} \rightarrow \infty \quad (4.23)$$

b) Dvojvinuťový transformátor so vstupným vinutím zapojeným do trojuholníka a výstupné vinutie je v ľubovoľnom zapojení. Na vstupné svorky priložíme napätie netočivej zložkovej sústavy - u_0 (obr.4.9)



Obr.4.9 Vstupné vinutie zapojené do trojuholníka po priložení napätia u_0

Podľa obr.4.9 predpokladáme, že z je impedancia jednej fáze a jednotlivými fázami tečú prúdy i_{a0} , i_{b0} , i_{c0} . Pre jednotlivé slučky podľa Kirchoffovho zákona platí:

$$\begin{aligned} u_0 - u_0 &= z \cdot i_{a0} \\ u_0 - u_0 &= z \cdot i_{b0} \\ u_0 - u_0 &= z \cdot i_{c0} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Potom: $i_{a0} = i_{b0} = i_{c0} = 0$, takže $i_0 = 0$

$$\text{a potom:} \quad z_{0p0} \rightarrow \infty ; \quad z_{0ps} \rightarrow \infty ; \quad z_0 = \frac{u_0}{i_0} \rightarrow \infty \quad (4.25)$$

c) Dvojvinuťový transformátor so vstupným vinutím zapojeným do hviezdy s priamo uzemneným uzlom, výstupné vinutie ja zapojené do trojuholníka. Prúdy i_0 vo vstupnom vinutí vyvolajú vo výstupnom vinutí prúdy i_0' , čím sa dosiahne magnetická rovnováha na každom jadre. Výstupné prúdy

sa uzatvárajú vo vinutí a nepreniknú do ďalšieho obvodu - podľa Kirchoffovho zákona. Z náhradnej schémy dostávame:

$$\mathbf{z}_{0p0} = \mathbf{z}_{\sigma p} + \mathbf{z}_{q0} ; \quad z_0 = \frac{u_0}{i_0} = z_{\sigma p} + \frac{z_{\sigma} \cdot z_{q0}}{z_{\sigma} + z_{q0}} \quad (4.26)$$

Impedancia \mathbf{z}_{q0} závisí na type transformátora. Pri voľne sa uzatváraných magnetických tokov je $\mathbf{z}_{q0} = \mathbf{y}_q^{-1} \gg \mathbf{z}_{\sigma s}$. Potom je možné zjednodušiť písať $\mathbf{z}_0 \approx \mathbf{z}_{\sigma ps}$ (je potom rozptylovou impedanciou vstupného a výstupného obvodu). Pri viazanom uzatváraní magnetických tokov je $|\mathbf{z}_{q0}| < |\mathbf{y}_q^{-1}|$, pretože časť magnetického toku prechádza cez nádobu, alebo vzduchom. Preto platí:

$$z_0 = (0,7 \text{ až } 0,9) \cdot z_{\sigma ps} ; \quad r_0 = (1,5 \text{ až } 2,5) \cdot r_{ps}$$

kde r_{ps} je pomerná hodnota rezistancie vstupného a výstupného vinutia.

d) Dvojvinuťový transformátor so vstupným vinutím zapojeným do hviezdy, s uzemneným uzlom a s výstupným vinutím tiež zapojeným do hviezdy, ale s izolovaným uzlom. Výstupným vinutím nemôže pretekať prúd netočivej zložky. Z náhradnej schémy je zrejmé, že prúd \mathbf{i}_0 má jalovú zložku magnetizačného prúdu. Obecne bude platiť:

$$|\mathbf{z}_{0ps}| \rightarrow \infty ; \quad \mathbf{z}_0 = \mathbf{z}_{0p0} = \mathbf{z}_{\sigma p} + \mathbf{z}_{q0} \quad (4.27)$$

Transformátory s voľne uzatvárajúcim sa magnetickým tokom majú impedanciu $\mathbf{z}_{q0} = \mathbf{y}_q^{-1}$. Pre transformátory s viazaným magnetickým tokom sa musí impedancia \mathbf{z}_{q0} určiť skúškami.

e) Dvojvinuťový transformátor so vstupným aj výstupným vinutím zapojeným do hviezdy, s priamo uzemneným uzlom. Pre takéto zapojenie platí:

$$\mathbf{z}_{q0} = \mathbf{y}_q^{-1} \quad (4.28)$$

f) Dvojvinuťový transformátor so vstupným vinutím zapojeným do lomenej hviezdy, s priamo uzemneným uzlom a s ľubovoľne zapojeným výstupným vinutím. Je zrejmé, že prúdy \mathbf{i}_0 vo vstupnom vinutí si vytvoria magnetickú rovnováhu na každom jadre a spôsobia výsledné rozptylové toky medzi polovicami vinutí na jadrách. Tomu zodpovedá rozptylová reaktancia, ktorá je menšia ako rozptylová reaktancia pre súslednú zložkovú sústavu. Výsledky merania udávajú nasledovné vzťahy:

$$|\mathbf{z}_{0ps}| \rightarrow \infty ; \quad |\mathbf{z}_{0p0}| = z_0 = (0,1 \text{ až } 0,3) \cdot z_{\sigma ps} ; \quad r_0 = r_p \quad (4.29)$$

kde r_0 je rezistancia netočivej zložky, r_p rezistancia vstupného vinutia, obe v pomerných hodnotách.

g), h) Trojvinuťové transformátory. Pre určenie hodnôt netočivých zložiek impedancií sa využijú poznatky z dvojvinuťových transformátorov. Ak je vstupné vinutie zapojené do hviezdy s izolovaným uzlom, alebo do trojuholníka, je $|\mathbf{z}_{0p0}| \rightarrow \infty$, $|\mathbf{z}_0| \rightarrow \infty$.

Záverom je možné vysloviť tvrdenie: Konečnú hodnotu impedancie netočivej zložky sústavy \mathbf{z}_0 majú transformátory, ktoré na strane, kde je pripojené napätie netočivej zložky \mathbf{u}_0 , majú vinutie

zapojené do hviezdy, alebo lomenej hviezdy s uzemneným uzlom (vstupné vinutie). Impedancia z_0 môže dosiahnuť značných hodnôt.

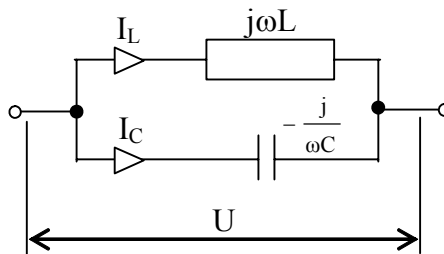
I-5 FILTRE VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH POUŽITÝCH V ELEKTRICKOM ROZVODE

Prvky elektrických zariadení s nelineárnou charakteristikou $u(t) = f(i(t))$ spôsobuje v elektrických sieťach deformáciu pôvodne čisto sínusových priebehov prúdov a napätí. Tieto deformované priebehy prúdov a napätí môžu rušivo pôsobiť na prevádzku ostatných spotrebičov a má i nežiadúci vplyv na napájaciu elektrickú sieť. Harmonickou analýzou je možné zistiť jednotlivé vyššie harmonické, ktorých pôvodcom je prevádzka prvkov so spomínanou nelineárnou charakteristikou. Aby sa zamedzilo ich škodlivému pôsobeniu, osadzujú sa do ich blízkosti filtre. Filtre tvoria tlmivky a kondenzátory, radené paralelne (pásmová zádrž), alebo sériovo (pásmová priepusť).

I-5.1 PÁSMOVÁ ZÁDRŽ

Pre analýzu pásmovej zádrže uvažujeme, že tlmivka s konštantnou indukčnosťou L a kondenzátor C sú ideálne prvky. Výsledná impedancia zapojenia (obr.5.1) bude pri uhlovej frekvencii ω rovná:

$$Z(\omega) = \frac{\frac{-j}{\omega \cdot C} \cdot j \cdot \omega \cdot L}{j \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)} \Rightarrow Z(\omega) = j \frac{\omega \cdot L}{1 - \omega^2 \cdot L \cdot C} \quad (5.1)$$



Obr.5.1 Pásmová zádrž

Pre rezonančnú uhlovú frekvenciu platí:

$$1 - \omega_r^2 \cdot L \cdot C = 0, \text{ takže: } \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (5.2)$$

Pri rezonančnej uhlovej frekvencii $\omega = \omega_r$ platí:

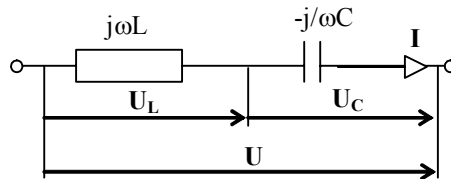
$$Z(\omega_r) \rightarrow \infty$$

t.j. zádrž neprepustí prúdy s rezonančnou uhlovou frekvenciou. Pri uvažovaní reálnej indukčnosti a kondenzátora, hodnota impedancie pri rezonančnej frekvencii nebude nekonečná, ale na druhej strane dostatočne veľká.

I-5.2 PÁSMOVÁ PRIEPUSŤ

Pre kvalitatívny rozbor opäť uvažujeme, že tlmivka i kondenzátor sú ideálne prvky. Výsledná impedancia pre uhlovú frekvenciu ω bude podľa obr.5.2 daná vzťahom:

$$Z(\omega) = j\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right) = j \frac{\omega^2 \cdot L \cdot C - 1}{\omega \cdot C} \quad (5.3)$$



Obr.5.2 Pásmová priepusť

Pri rezonančnej frekvencii má byť $Z(\omega) = 0$. Potom má platiť:

$$\omega_r^2 L \cdot C - 1 = 0 \quad , \quad \text{takže: } \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (5.4)$$

t.j. priepusť s rezonančnou frekvenciou znamená pre prúdy dokonalý skrat. V skutočnom filtri vplyvom rezistancie tlmivky a konduktancie kondenzátora sa nedosiahne nula, ale určitá malá hodnota.

I.6 NÁHRADNÁ SCHÉMA SYNCHRÓNNEHO STROJA

Ako zdroj elektrickej energie sa v ES prevažne využívajú synchronne stroje.

V súslednej sústave (pri symetrickom zaťažení), v závislosti od riešeného stavu synchronného stroja, je možné synchronný stroj nahradiť synchronnou (X_d), prechodnou X_d^l a rázovou reaktanciou (X_d^{\parallel}).

Synchronná reaktancia je reaktancia, ktorou synchronný stroj sa nahrádza v náhradnej schéme v ustálenom stave. Z teórie synchronného stroja vyplýva, že je to súčet reakcie kotvy (X_a) a rozptylovej reaktancie (X_σ). V pozdĺžnej osi rotora je magnetický odpor menší ako v priečnej osi. Preto platí $X_d \neq X_q$. Tento rozdiel reaktancií je pre hydrogenerátory väčší ako pre turbogenerátory, v dôsledku premenlivej vzduchovej medzery.

Prechodná (tranzitná) reaktancia sa uplatňuje pri zmenách prevádzkového stavu (zmena zaťaženia, doznievajúci skrat). Prechodná reaktancia je menšia ako synchronná.

Rázová (subtranzitná) reaktancia sa uplatňuje pri synchronných strojach s tlmiacimi vinutiami a je najmenšia zo všetkých reaktancií.

Náhradné schémy sú kreslené pre riešenie prechodných stavov v sieťach (skraty, problémy stability – obr.6.1 a, b) a ustálených stavov – obr.6.1c.

V spätnej zložkovej sústave sa synchronný stroj nahrádza spätnou reaktanciou X_2 . Pre turbogenerátory platí približne $X_2 \approx X_d^{\parallel}$ a pre hydrogenerátory $X_2 = \frac{X_d^{\parallel} + X_q^{\parallel}}{2}$.

Netočivá zložka reaktancie synchronného stroja závisí od konštrukcie stroja a zapojenia vinutia.

Pomer elektromotorických napätí (vyjadrené ako násobok hodnoty svorkového napätia) je:

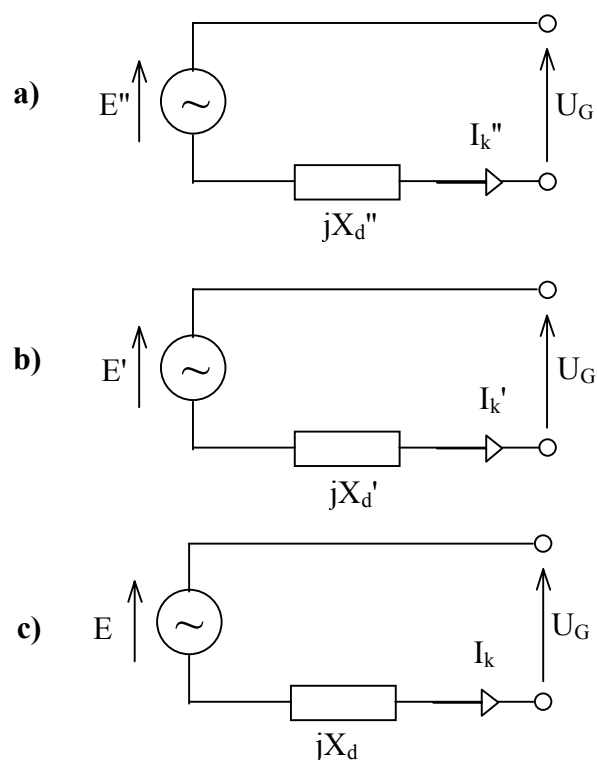
- turbogenerátor $E'' : E' : E = 1,07 : 1,12 : 2,52$
- hydrogenerátor $E'' : E' : E = 1,12 : 1,19 : 1,9$

Rezistencia synchronného stroja je daná rezistanciou vinutia. Vzhľadom na prierezy a materiál vinutia je hodnota rezistancie oproti reaktancii stroja zanedbateľná. Má však vplyv na veľkosť časových konštánt, ktoré určujú čas zanikania prechodných dejov v synchronnom stroji.

Skutočná veľkosť reaktancie sa vypočíta z percentuálnej hodnoty reaktancie stroja prepočítaná na menovité hodnoty:

$$X = \frac{x_{\%}}{100} \frac{U_N^2}{S_N} \quad [\Omega; kV, MVA] \quad (6.1)$$

Náhradná schéma synchronného stroja je na obr.6.1.



Obr.6.1 Náhradná schéma synchronného stroja

V tab. 6.1 sú uvedené hodnoty pomerných reaktancií turbogenerátorov a hydrogenerátorov.

Tab. 6.1 Pomerné hodnoty reaktancií synchronného generátora.

Reaktancia	Turbogenerátor		Hydrogenerátor	
	Približný rozsah	Typová hodnota	Približný rozsah	Typová hodnota
X_d	1,2 ÷ 2,7	1,74	0,7 ÷ 1,4	1,25
X_q	1,1 ÷ 2,2	1,64	0,45 ÷ 0,9	0,75
X'_d	0,15 ÷ 0,29	0,206	0,2 ÷ 0,4	0,40
X''_d	0,09 ÷ 0,22	0,154	0,15 ÷ 0,35	0,19
X''_q	0,1 ÷ 0,22	0,154	0,15 ÷ 0,7	0,20
X_2	0,09 ÷ 0,21	0,162	0,12 ÷ 0,4	0,20
X_0	0,02 ÷ 0,15	0,09	0,03 ÷ 0,15	0,09

Pri presnom výpočte je potrebné rázovú (x_d''), prechodnú (x_d') a ustálenú (x_d) reaktanciu nahradit' impedanciami.

I.7 MOTORY

Uvažuje sa hlavne s motormi väčších výkonov (stovky KW až niekoľko MW). Motory s menšími výkonmi, hlavne na nn strane, pri prechodných dejoch sa neuplatnia.

I-7.1 SYNCHRÓNNE MOTORY

Synchrónny motor sa podobne ako synchrónny generátor, nahradzuje rázovou reaktanciou X_d'' . Pri nesymetrických stavoch sa uplatňuje taktiež spätná a netočivá zložka reaktancie. Jediný rozdiel medzi synchrónnym generátorom a synchrónnym motorom pri poruchových stavoch (skratoch) je v znižovaní otáčok motora. Takýto prechodný dej sa ťažko vyjadruje a pri krátkych vypínacích časoch význam tejto zmeny bude malý. Z toho dôvodu sa pri takýchto stavoch uvažuje u synchrónnych motorov s konštantnými otáčkami.

I-7.2 ASYNCHRÓNNE MOTORY

Pri praktických výpočtoch sa majú používať hodnoty, ktoré udáva výrobca. Ak nie sú k dispozícii, približne je možné skratovú impedanciu vypočítať z hodnoty záberového prúdu I_{zab} .

Impedancia motora je potom daná:

$$Z_M = \frac{U_{NM}}{\sqrt{3}I_{zab}} \quad (\Omega; V, A) \quad (7.1)$$

Na základe merania charakteristík motorov existuje medzi Z_M a prechodnou reaktanciou X_M' vzťah:

$$\frac{Z_M}{X_M'} = 1,2 \div 1,6 \quad (7.2)$$

Malé hodnoty (okolo 1,2) platia pre motory o veľkých výkonoch (rádové MW), väčšie hodnoty (1,6) pre malé motory.

Rázová reaktancia motorov X_M'' z dôvodu veľmi krátkej časovej konštanty (cca 0,003 s) sa neuvažuje.

Rezistencia (činný odpor- R_M) motora má vplyv na normálny, prevádzkový chod asynchrónneho motora. Pri poruchových stavoch (skratoch) je rozhodujúca reaktancia. Praktické merania ukázali, že pomer rezistencie a reaktancie je:

$$\frac{R_M}{X_M'} = 0,04 \div 0,12 \quad (\text{pre praktické výpočty} - 0,08) \quad (7.3)$$

I.8 PARAMETRE ZÁŤAŽE (ODBERU)

Komplexná záťaž zložená z rôznych typov spotrebičov sa mení v priebehu dňa i ročných období. Výpočty rozloženia výkonu v sieťach často priradzujú záťaži konštantný výkon, nezávislý na napätí a frekvencii. Vychádza sa väčšinou zo znalosti predpokladaného nárastu výkonu v definovanom časovom úseku. Ďalší používaný zjednodušujúci prístup modeluje výkon záťaže konštantnou priečnou admitanciou, ktorá sa určí zo zložiek činného a jalového výkonu P_N a Q_N pri menovitom napätí U_N (združenom) a menovitej frekvencii f_N . Platí:

$$Y = \frac{I_N}{U_{jN}} = \frac{3 \cdot U_{jN}^* \cdot I_N}{3 \cdot U_{jN}^* \cdot U_{jN}} = \frac{S_N^*}{U_N^2} = \frac{P_N \pm j \cdot Q_N}{U_N^2} \quad (8.1)$$

Pri zmene napätia pri konštantnej frekvencii bude:

$$Y = \frac{P - j \cdot Q}{U^2} = \frac{P_N - j \cdot Q_N}{U_N^2} \Rightarrow P = P_N \frac{U^2}{U_N^2}; Q = Q_N \frac{U^2}{U_N^2} \quad (8.2)$$

Obe zložky výkonu sa menia kvadraticky s napätím.

Výkon záťaže predstavuje v sieťach nelineárny prvok a obecné je závislý na napätí a frekvencii: $P = P(U, f)$ a $Q = Q(U, f)$. Pre prechodné deje sa uvedené závislosti nazývajú dynamické, pre ustálený chod sústavy statické charakteristiky záťaže. V ďalšom výklade sa obmedzíme na ustálený chod, kde spravidla sa oddelene uvažuje vplyv jednej veličiny pri konštantnej veličine druhej. Platí:

$$P = P(U) \text{ pri } f = \text{konst} \quad \text{a} \quad P = P(f) \text{ pri } U = \text{konst}$$

$$Q = Q(U) \text{ pri } f = \text{konst} \quad \text{a} \quad Q = Q(f) \text{ pri } U = \text{konst}$$

Dostávame tak oddelene statické charakteristiky napäťové a frekvenčné, ktoré zanedbávajú vzájomný vzťah medzi napätím a frekvenciou. Charakteristiky spravidla určujeme meraním (výpočtom je to obtiažne). Charakteristiky sa potom udávajú v pomerných hodnotách, vzťahnuté k menovitému výkonu S_N (prípadne k P_N, Q_N), dosahované pri menovitom napätí U_N a menovitej frekvencii f_N - potom $p_N = 1 = q_N$; $u_N = 1 = f_{pN}$.

a) Charakteristiky záťaže napäťové:

Podľa vyhodnotenia merania je možné pre pomernú hodnotu činného - p - a jalového - q - výkonu písať (pre určený interval napätia):

$$p = p_{ou} + p_u \cdot u \quad ; \quad q = q_{ou} + q_u \cdot u \quad ; \quad q = a + b \cdot u + c \cdot u^2 \quad (8.3)$$

$$u \in (0,9; 1,1) \quad u \in (0,95; 1,05) \quad u \in (0,9; 1,1)$$

Z týchto rovníc pre $u = u_N = 1$ dostávame:

$$p_{ou} + p_u = 1 = q_{ou} + q_u \quad ; \quad p_{ou} = 1 - p_u \quad ; \quad q_{ou} = 1 - q_u$$

$$a + b + c = 1 \quad (8.4)$$

Derivácie zložiek výkonu: $p_u = dp/du$, $q_u = dq/du$ sa nazývajú súčinitele regulačného efektu napätia a umožňujú vyjadriť zmeny jednotlivých zložiek výkonu spôsobené zmenami napätia.

b) Charakteristiky zát'aže frekvenčné:

Pre pomerné hodnoty zložiek výkonu (p , q) na základe merania platí v uvedenom rozsahu pomerných hodnôt frekvencií f_p (index „p“ udáva pomernú hodnotu frekvencie):

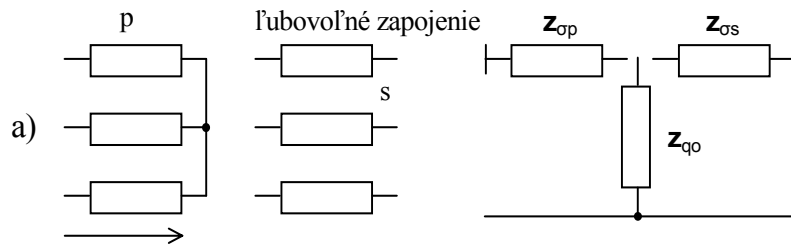
$$p = p_{of} + p_f \cdot f_p \quad ; \quad q = q_{of} + q_f \cdot f_p \quad ; \quad f_p \in (0,92; 1,05) \quad (8.5)$$

Z týchto rovníc pre $f_p = f_{pN} = 1$ dostávame:

$$p_{of} + p_f = 1 = q_{of} + q_f \quad ; \quad p_{of} = 1 - p_f \quad ; \quad q_{of} = 1 - q_f \quad (8.6)$$

Derivácie zložiek výkonu: $p_f = dp/df_p$, $q_f = dq/df_p$ sa nazývajú súčinitele regulačného efektu a umožňujú vyjadriť zmeny jednotlivých zložiek výkonu spôsobené zmenou frekvencie.

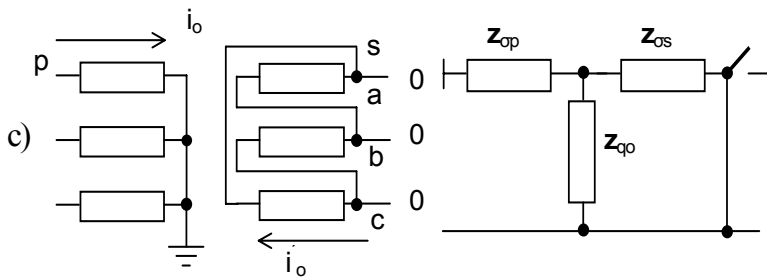
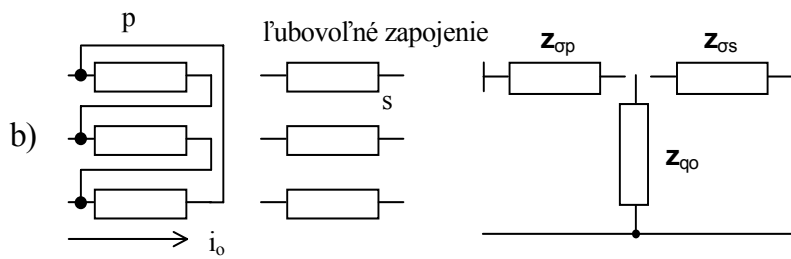
Tabuľka 4.1 Impedancia netočivej zložkovej sústavy



$$|z_{opo}| \rightarrow \infty$$

$$|z_{ops}| \rightarrow \infty$$

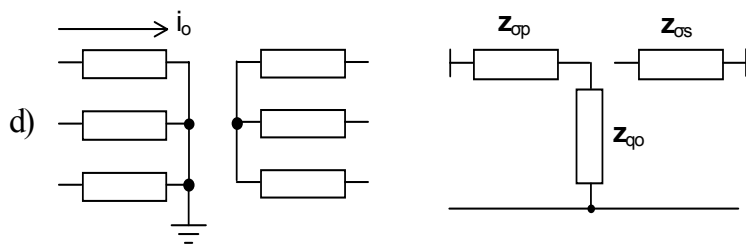
$$|z_o| \rightarrow \infty$$



$$z_{opo} = z_{op} + z_{qo} \quad z_o = z_{op} + \frac{z z_{os} z_{qo}}{z_{os} + z_{qo}}$$

Trojjadroý $z_o = (0,7 \div 0,9) z_{ops}$

Ostatné $z_{qo} \approx y_q^{-1}; z_o \approx z_{ops}$



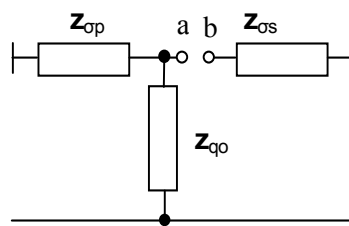
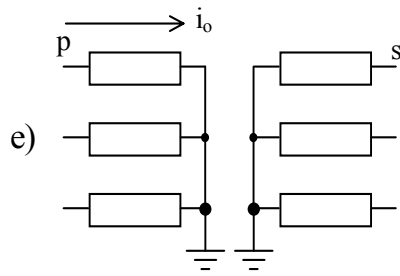
$$|z_{ops}| \rightarrow \infty; z_o = z_{opo} = z_{op} + z_{qo}$$

Trojjadroý $z_o = (0,3 \div 1) / (\pi/3) \div (2\pi/5)$

Ostatné $z_{qo} = y_q^{-1}$ teoreticky

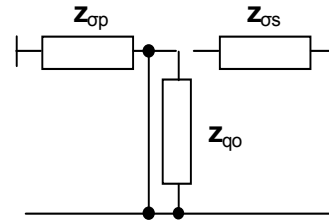
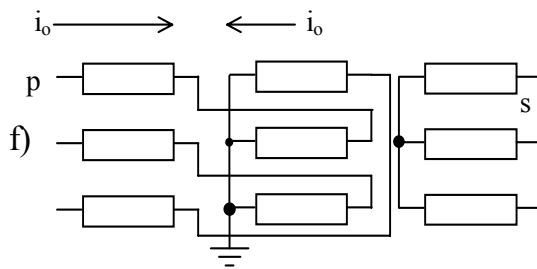
$$|z_o| \rightarrow \infty \text{ prakticky}$$

Tabuľka 4.1 - Pokračovanie



Za výstupným vinutím nasleduje y_n, z_n , zn uzly a, b spojené nakrátko

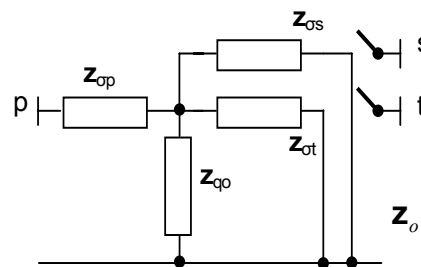
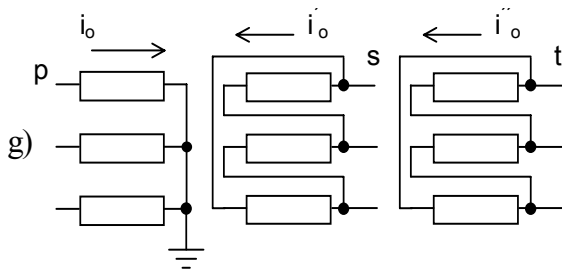
Za výstupným vinutím nasleduje y, z, d uzly a, b rozpojené, takže prechádza na Y N y



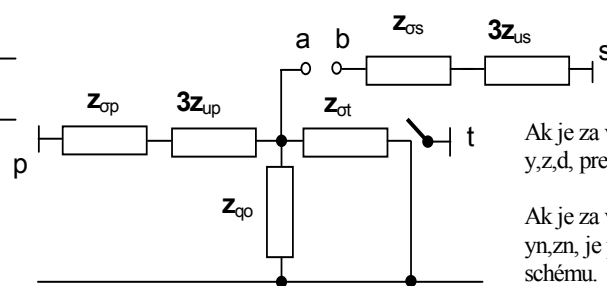
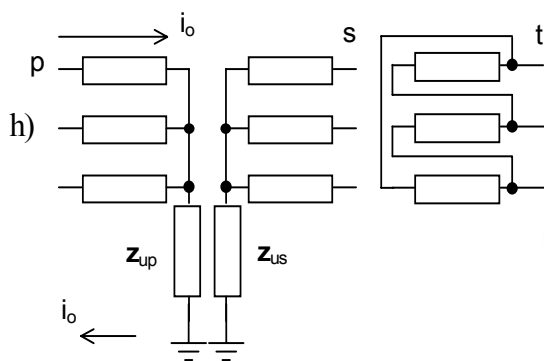
$$|z_{ops}| \rightarrow \infty$$

$$|z_{opo}| = z_o = (0,1 \div 0,3) z_{ops}$$

$$r_o = r_p$$



$$z_o = z_{op} + \frac{1}{z_{qo}^{-1} + z_{os}^{-1} + z_{ot}^{-1}}$$



Ak je za výstupným vinutím y, z, d, prechádza na Y N d.

Ak je za výstupným vinutím y_n, z_n , je potrebné rešpektovať schému.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Hodinka M, - Fecko Š. - Němeček F.: Přenos a rozvod elektrické energie. Praha, SNTL/ALFA 1989.
- [2] Bašta J. - Chládek J. - Mayer I.: Teorie elektrických strojů. Praha SNTL/ALFA 1968.
- [3] Heřman J. a kol.: Příručka silnoproudé elektrotechniky. Praha SNTL 1984.
- [4] Reváková, D. – Beláň, A. – Eleschova, Ž.: Přenos a rozvod elektrické energie. STU Bratislava 2004. ISBN 80-227-2118-2.
- [5] Altus, J.- Novák, M.- Otčenášová, A.- Pokorný, M.: Elektromagnetická kompatibilita elektrizačních systémů, Žilinská univerzita v Žiline, vydal EDIS - vydavatelství ŽU, apríl 2004, ISBN 80-8070-227-6
- [6] Toman, P.- Haluzík, E.: *Určování parametrů netransponovaných vedení vn* In Sborník prací studentů a doktorandů volume V. Sborník prací studentů a doktorandů (1999). Brno: FEI VUT Brno, 1999, s. 59 - 64, ISBN 80-214-1155-4
- [7] Martínek Z.- Ibler, Z.: Příručka energetika - Odborná učebnice. Čez a.s., Praha 1996.
- [8] Ries, L.- Malý, K.- Pavlíček, Z.- Bízík, J.: Teoretická elektroenergetika II, ALFA/SNTL Bratislava 1979.