

Přenos a rozvod elektrické energie **(A1M15PRE)**

Témata:

- Elektrické parametry prvků ES
- Ustálené chody ES, numerické metody
- Proudová zatížitelnost vedení
- Elektromagnetické pole, hluk vedení
- Zařízení FACTS, HVDC
- Mechanika vedení
- Ochrany vedení
- Složkové soustavy
- Nesymetrické a nelineární zátěže
- Synchronní stroj v ustáleném a poruchovém stavu
- Stabilita

Elektrické parametry prvků ES

4 základní (primární) el. parametry

- činný odpor (rezistance) R_1 (Ω/km)
- provozní indukčnost L_1 (H/km)
- svod (konduktance) G_1 (S/km)
- provozní kapacita C_1 (F/km)

1. Venkovní vedení

a) Rezistance (činný odpor)

$$R_1 = R_{\text{DC01}} \cdot k_T \cdot k_S \cdot k_p \quad (\Omega \cdot \text{m}^{-1}; \Omega \cdot \text{m}^{-1}, -)$$

- R_{DC01} z katalogu
- vliv teploty, AC napájení, průhybu
- svazky – vodiče paralelně

Hodnoty

- AlFe 35 - $R_1 \approx 0,78$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
- AlFe 70 - $R_1 \approx 0,43$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
- AlFe 150 - $R_1 \approx 0,2$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
- AlFe 350 - $R_1 \approx 0,085$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
- AlFe 450 - $R_1 \approx 0,065$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
- AlFe 670 - $R_1 \approx 0,042$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)

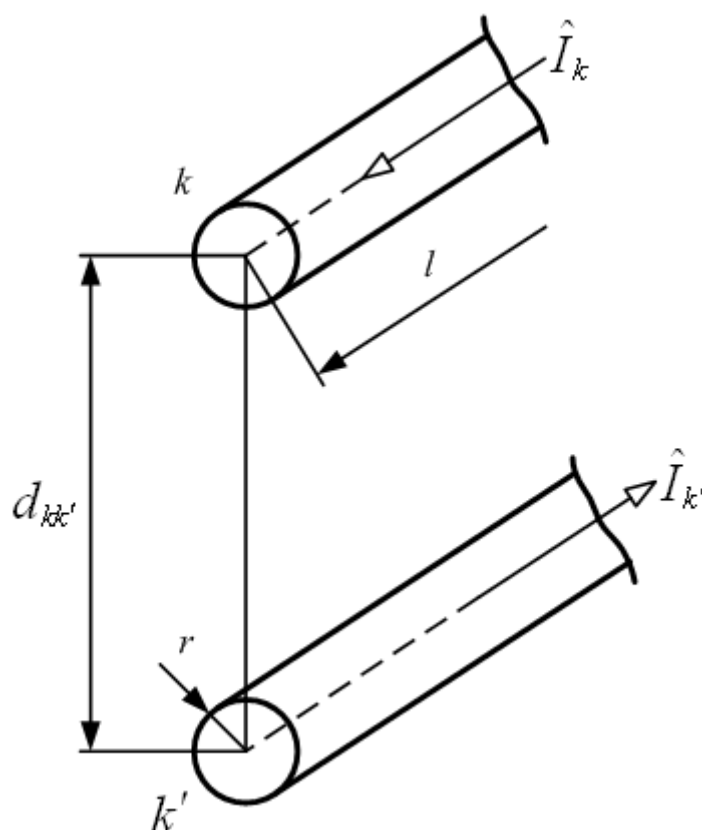
b) Konduktance (svod)

- příčné ztráty přes izolátory, korónou (nejvíce)
- lze respektovat se od 110 kV

$$G_1 \approx 10^{-8} \text{ S} \cdot \text{km}^{-1} \quad \times \quad B_1 \approx 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}$$

c) Indukčnost a podélná impedance

Indukčnost a impedance ve smyčce



$$r \ll d \ll l \quad d_{kk'} = d \quad \hat{I}_k = -\hat{I}_{k'}$$

Vlastní indukčnost

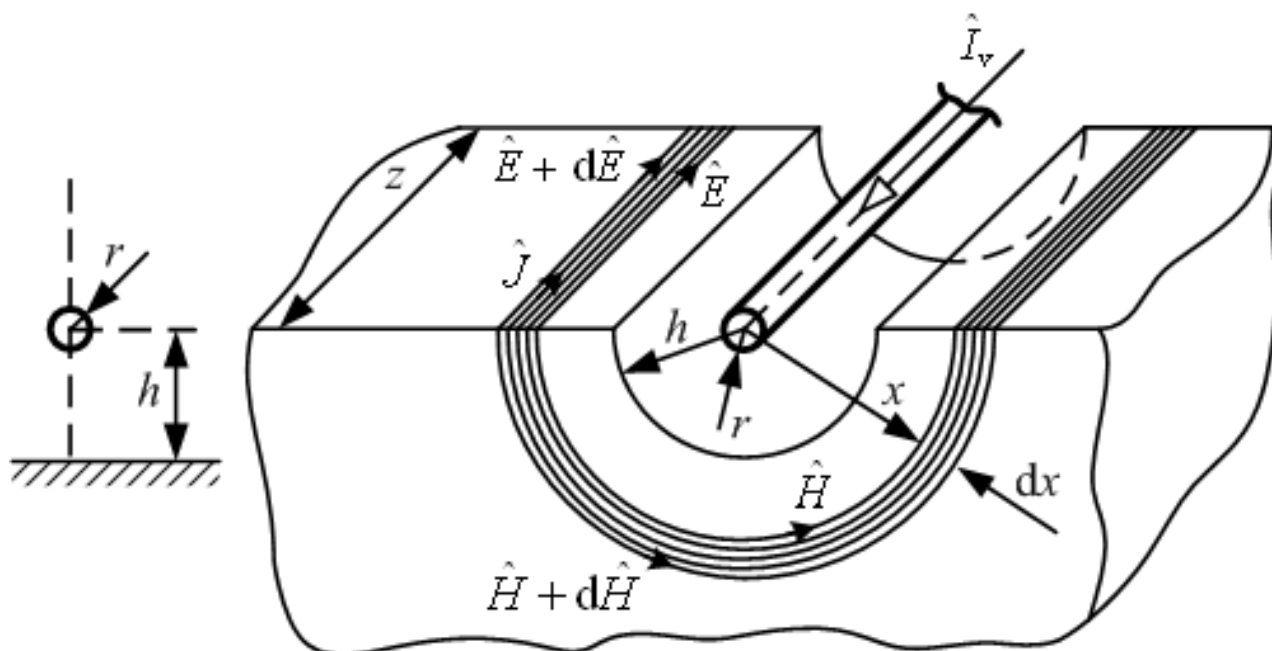
$$L_{vk} = 0,46 \log \frac{d}{\xi r} \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}; \text{m}, \text{m})$$

Impedance jednoho vodiče ve smyčce 2 vodičů

$$\hat{Z}_{kv} = R_k + j\omega \cdot 0,46 \cdot 10^{-6} \cdot \log \frac{d}{\xi r} \quad (\Omega \cdot m^{-1})$$

Země jako vodič stacionárního střídavého proudu
– Rüdenbergova koncepce

- hustota střídavého proudu v zemi je nerovnoměrná, největší přímo pod vedením



Vlastní impedance smyčky vodič-zem

3 složky:

- a) R_{1k} - rezistance respektující ztráty výkonu ve vodiči
- b) X_{1k} – reaktance respektující složku mag. toku spřaženého s vodičem a uzavírajícího se ve vodiči a ve vzduchu
- c) Z_{1g} – impedance respektující složku mag. toku v zemi v záběru s vodičem

Vlastní impedance smyčky

$$\hat{Z}_{kk} = R_{kk} + jX_{kk} = R_{1k} + jX_{1k} + R_{1g} + jX_{1g}$$

Výsledně

$$\hat{Z}_{kk} = R_{1k} + \pi^2 f \cdot 10^{-4} + j\omega \cdot 10^{-3} \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{\xi \cdot r}$$
$$(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$$

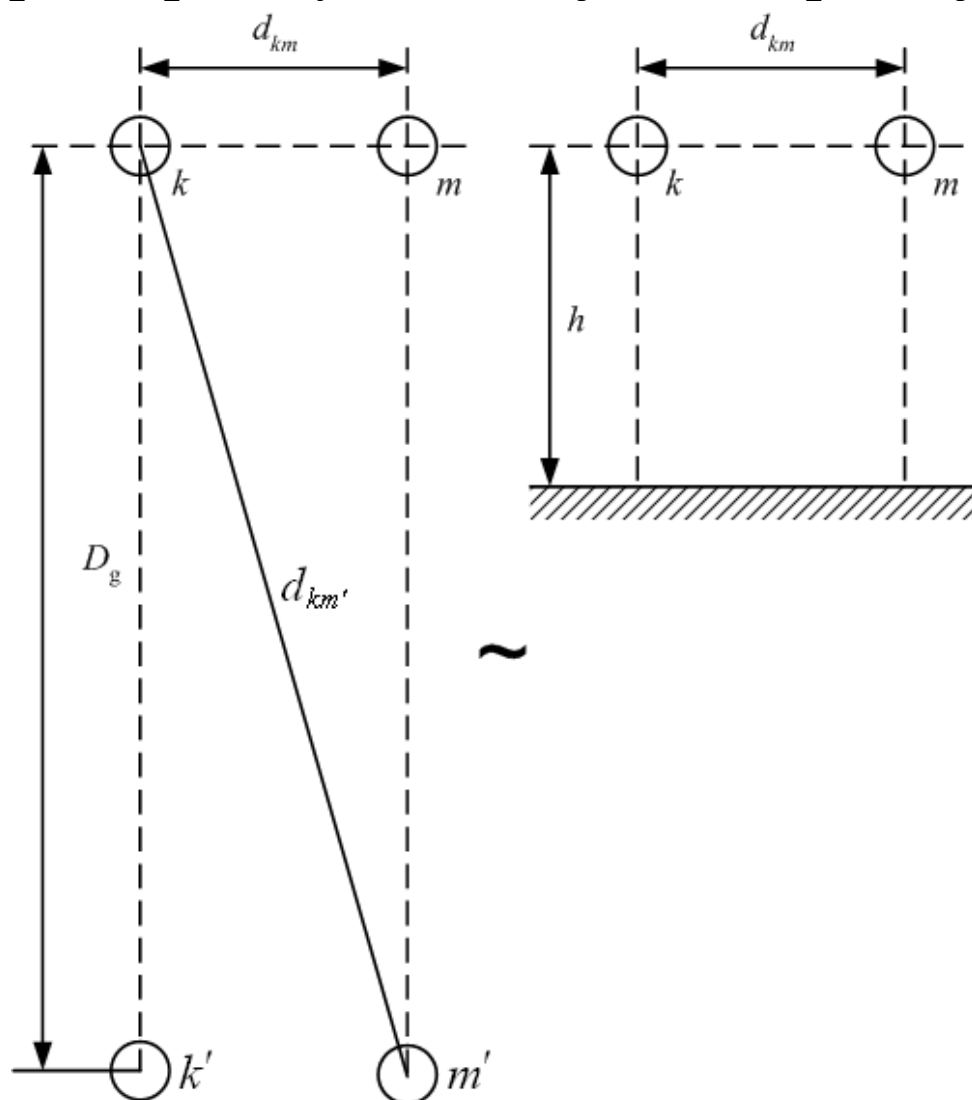
kde

$$D_g = \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{\sqrt{f}} \quad (\text{m}; \Omega \cdot \text{m}, \text{Hz})$$

D_g – hloubka fiktivního vodiče v zemi, který svými účinky nahrazuje proud v zemi

Vzájemná impedance 2 smyček vodič-zem

- dvouvodičové jednofázové vedené $d_{km} \leq h$
- zpětné proudy se navzájem kompenzují



$D_g \gg d_{km} \rightarrow$ výsledné elmag. působení zpětných proudů ve vodičích k' , m' na skutečné vodiče k , m je téměř nulové

$$\hat{Z}_{km} = \hat{Z}_{kk} - \hat{Z}_{kv} = R_{lg} + j\omega \cdot 10^{-3} \cdot 0,461 \log \frac{D_g}{d_{km}}$$

$$(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$$

Soustava n vodičů

Vlastní impedance smyčky (k – k')

$$\hat{Z}_{kk} = R_{kk} + j\omega L_{kk} = R_{1k} + R_{1g} + j0,1445 \log \frac{D_g}{\xi \cdot r_k} \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$$

Vzájemná impedance mezi smyčkami (k – k') a (m – m')

$$\hat{Z}_{km} = \hat{Z}_{mk} = R_{km} + j\omega L_{km} = R_{1g} + j0,1445 \log \frac{D_g}{d_{km}} \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$$

Výsledné působení proudů všech smyček na uvažovaný vodič

$$\Delta \hat{U}_k = \sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m$$

V maticovém zápisu pro celý systém

$$(\Delta \hat{U}) = (\hat{Z}) \cdot (\hat{I})$$

Provozní impedance (dána provozním stavem)

$$\Delta \hat{U}_k = \sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m = \hat{Z}_k \hat{I}_k \rightarrow \hat{Z}_k = \frac{\sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m}{\hat{I}_k}$$

Svazky

- ekvivalentní poloměr a činitel ξ
- zmenšují L (X)

Hodnoty

- 750 kV - $X_1 \approx 0,25 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$
- 400 kV - $X_1 \approx 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$
- 110 kV, 220 kV - $X_1 \approx 0,4 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$
- 22 kV - $X_1 \approx 0,35 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$
- 0,4 kV - $X_1 \approx 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$

Netočivé reaktance

- Fe zemnicí lana - $X_0 \approx (3,5 \div 5,5) X_1$
- AlFe zemnicí lana - $X_0 \approx (2 \div 4) X_1$

Jednoduché symetrické (transponované) vedení bez zemnicích lan

$$d_{ab} = d_{ac} = d_{bc} = d$$

$$\hat{Z}_{ab} = \hat{Z}_{ac} = \hat{Z}_{bc} = Z' = R_{1g} + j0,1445 \log \frac{D_g}{d}$$

$$\hat{Z}_{aa} = \hat{Z}_{bb} = \hat{Z}_{cc} = Z = R_1 + R_{1g} + j0,1445 \log \frac{D_g}{\xi r}$$

Z - vlastní impedance smyčky

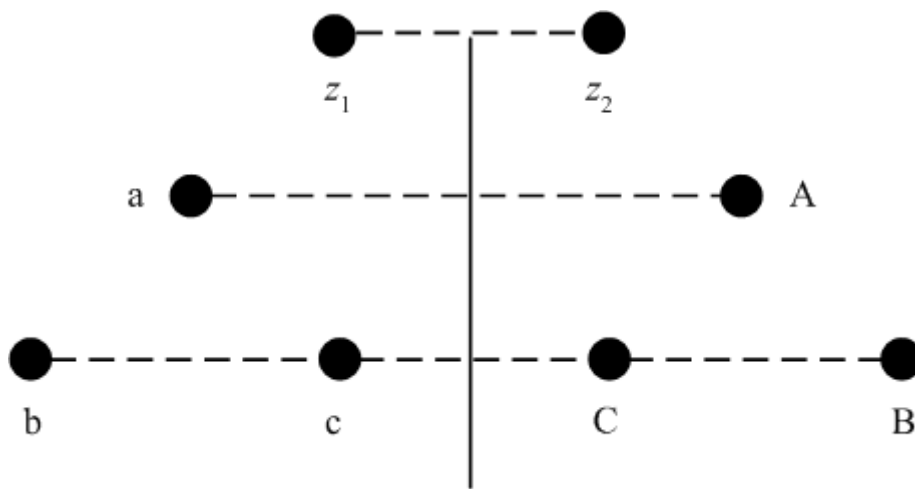
Z' - vzájemná impedance smyček

$$\begin{pmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{Z} & \hat{Z}' & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z} & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z}' & \hat{Z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{pmatrix}$$

- provozní impedance všech fází stejné

$$\hat{Z}_1 = \hat{Z} - \hat{Z}' = R_1 + j0,1445 \log \frac{d}{\xi \cdot r} \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$$

Dvojité vedení se dvěma zemnicími lany



Dvojité vedení lze popsat rovnicemi

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \\ \Delta \hat{U}_A \\ \Delta \hat{U}_B \\ \Delta \hat{U}_C \\ \Delta \hat{U}_{z1} \\ \Delta \hat{U}_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \hat{Z}_{aA} & \hat{Z}_{aB} & \hat{Z}_{aC} & \hat{Z}_{az1} & \hat{Z}_{az2} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \hat{Z}_{bA} & \hat{Z}_{bB} & \hat{Z}_{bC} & \hat{Z}_{bz1} & \hat{Z}_{bz2} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \hat{Z}_{cA} & \hat{Z}_{cB} & \hat{Z}_{cC} & \hat{Z}_{cz1} & \hat{Z}_{cz2} \\ \hat{Z}_{Aa} & \hat{Z}_{Ab} & \hat{Z}_{Ac} & \hat{Z}_{AA} & \hat{Z}_{AB} & \hat{Z}_{AC} & \hat{Z}_{Az1} & \hat{Z}_{Az2} \\ \hat{Z}_{Ba} & \hat{Z}_{Bb} & \hat{Z}_{Bc} & \hat{Z}_{BA} & \hat{Z}_{BB} & \hat{Z}_{BC} & \hat{Z}_{Bz1} & \hat{Z}_{Bz2} \\ \hat{Z}_{Ca} & \hat{Z}_{Cb} & \hat{Z}_{Cc} & \hat{Z}_{CA} & \hat{Z}_{CB} & \hat{Z}_{CC} & \hat{Z}_{Cz1} & \hat{Z}_{Cz2} \\ \hat{Z}_{z1a} & \hat{Z}_{z1b} & \hat{Z}_{z1c} & \hat{Z}_{z1A} & \hat{Z}_{z1B} & \hat{Z}_{z1C} & \hat{Z}_{z1z1} & \hat{Z}_{z1z2} \\ \hat{Z}_{z2a} & \hat{Z}_{z2b} & \hat{Z}_{z2c} & \hat{Z}_{z2A} & \hat{Z}_{z2B} & \hat{Z}_{z2C} & \hat{Z}_{z2z1} & \hat{Z}_{z2z2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \\ \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \\ \hat{I}_{z1} \\ \hat{I}_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Z}_{vv} \\ \hat{Z}_{Vv} \\ \hat{Z}_{zV} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \hat{Z}_{vV} \\ \hat{Z}_{VV} \\ \hat{Z}_{zV} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \hat{Z}_{vz} \\ \hat{Z}_{Vz} \\ \hat{Z}_{zz} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_v \\ \hat{I}_V \\ \hat{I}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_v \\ \Delta \hat{U}_V \\ \Delta \hat{U}_z \end{bmatrix}$$

Po úpravách lze napsat

(předpoklad spojitého uzemnění zemnicích lan)

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{vV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{vz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{Vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{Vz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_z \end{bmatrix}$$

⇒ proudy v zemnicích lanech

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_z \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \hat{Z}_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} \hat{Z}_{zv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_V \end{bmatrix} \right)$$

Pro modifikované vedení

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_v \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \hat{Z}_{vv} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{Z}_{vz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zv} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \hat{I}_v \end{bmatrix} + \\ + \left(\begin{bmatrix} \hat{Z}_{vV} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{Z}_{vz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zV} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \hat{I}_V \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_V \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \hat{Z}_{Vv} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{Z}_{Vz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zv} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \hat{I}_v \end{bmatrix} + \\ + \left(\begin{bmatrix} \hat{Z}_{VV} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{Z}_{Vz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{Z}_{zV} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \hat{I}_V \end{bmatrix}$$

- jedná se o pomyslné vedení bez zemnicích lan, které by se chovalo jako skutečné vedení se zemnicími lany
- pro převod impedancí do souměrných složek

d) Kapacity

Soustavy rovnic

$$(\hat{U}) = (\delta)(\hat{Q}) \quad \text{a} \quad (\hat{Q}) = (k)(\hat{U})$$

δ ... potenciálové součinitele

k ... kapacitní součinitele

- dílčí kapacity k zemi
- dílčí kapacity vzájemné

Metoda zrcadlení

Povrch země je ekvipotenciální plocha s nulovým potenciálem ($d_{zk} = d_{zk'}$)

Potenciál v libovolném bodě P (superpozice)

$$\hat{U}_P = \sum_{k,k'=1}^n (\hat{U}_{Pk} + \hat{U}_{Pk'}) = \sum_{k,k'=1}^n \frac{\hat{Q}_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{Pk'}}{d_{Pk}}$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

Vodiče mají poloměr r_k ($r_k \ll d_{km}$), položíme-li bod P na povrch m -tého vodiče, bude potenciál roven

$$\hat{U}_m = \sum_{k,k'=1}^n \frac{\hat{Q}_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{km'}}{d_{km}} \quad (d_{kk} = r_k)$$

Z geometrického uspořádání určíme potenciálové součinitele

$$\hat{U}_m = \sum_{k=1}^n \delta_{km} \hat{Q}_k$$

Vlastní potenciálový součinitel

$$\delta_{mm} = \frac{\ln \frac{2h_m}{r_m}}{2\pi\epsilon}$$

Vzájemný potenciálový součinitel

$$\delta_{mm} = \frac{\ln \frac{\sqrt{4h_m h_k + d_{km}^2}}{d_{km}}}{2\pi\epsilon} \quad m \neq k$$

Náboj m -tého vodiče v systému o n vodičích

$$\hat{Q}_m = \hat{Q}_{m0} + \sum_{k=1, k \neq m}^n \hat{Q}_{km} = c_{m0} \hat{U}_m + \sum_{k=1, k \neq m}^n c_{km} (\hat{U}_m - \hat{U}_k)$$

Zavedeme kapacitní součinitele

$$\hat{Q}_m = \left(c_{m0} + \sum_{k=1, k \neq m}^n c_{km} \right) \hat{U}_m + \sum_{k=1, k \neq m}^n (-c_{km}) \hat{U}_k$$

$$\hat{Q}_m = k_{mm} \hat{U}_m + \sum_{k=1, k \neq m}^n k_{km} \hat{U}_k$$

Platí

$$(\mathbf{k}) = (\delta)^{-1} \text{ (regulární, symetrické)}$$

Dílčí kapacity určíme podle vztahů

$$c_{km} = -k_{km} \quad c_{m0} = k_{mm} + \sum_{k=1, k \neq m}^n k_{km}$$

Provozní kapacita jednoho vodiče

$$\hat{c}_m = \frac{c_{m0} \hat{U}_m + \sum_{k=1, k \neq m}^n c_{km} (\hat{U}_m - \hat{U}_k)}{\hat{U}_m} = \frac{\hat{Q}_m}{\hat{U}_m}$$

Obecně je tato kapacita komplexní číslo.

Jednoduché transponované vedení

$$\delta = \frac{1}{3} (\delta_{11} + \delta_{22} + \delta_{33}) = \frac{\log \frac{2h}{r}}{0,0242}$$

$$\delta' = \frac{1}{3} (\delta_{12} + \delta_{13} + \delta_{23}) = \frac{\log \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d}}{0,0242}$$

Kde $h = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3}$ je střední výška a $d = \sqrt[3]{d_{12} d_{23} d_{13}}$ je střední vzájemná vzdálenost vodičů.

Po inverzi určíme kapacity

$$\begin{pmatrix} \delta & \delta' & \delta' \\ \delta' & \delta & \delta' \\ \delta' & \delta' & \delta \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} k & k' & k' \\ k' & k & k' \\ k' & k' & k \end{pmatrix}$$

Potom vzájemná kapacita je stejná mezi všemi fázemi a je dána výrazem

$$c' = -k' = \frac{\delta'}{(\delta - \delta')(\delta + 2\delta')}$$

Kapacita k zemi je také stejná pro všechny fáze a je dána výrazem

$$c_0 = k + 2k' = \frac{1}{\delta + 2\delta'}$$

Provozní kapacita C jedné fáze transponovaného vedení, které bude mít symetrická napětí k zemi

$$\hat{U}_a = U_a \quad \hat{U}_b = \hat{a}^2 U_a \quad \hat{U}_c = \hat{a} U_a$$

$$C = c_0 + 3c' = \frac{1}{\delta - \delta'}$$

Hodnoty

- 400 kV - $B_1 \approx (3,5 \div 4,5) \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$
- 110, 220 kV - $B_1 \approx (2,5 \div 3) \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$
- 22 kV - $B_1 \approx 1,4 \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$

2. Kabelová vedení

R, X - výpočet obdobně jako u venkovního vedení

G - souvisí s dielektrickými ztrátami v izolaci

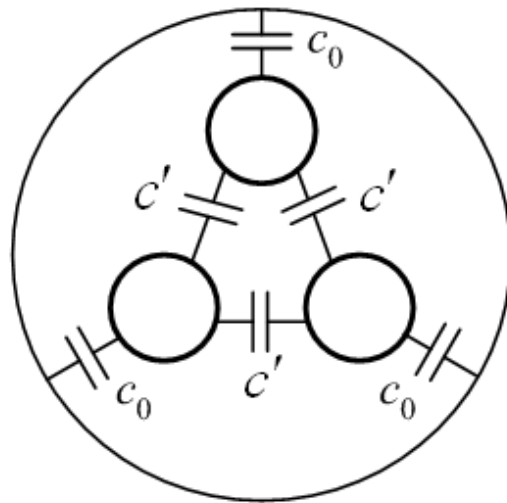
C – podle pláště

a) vlastní kovový obal na každé žíle

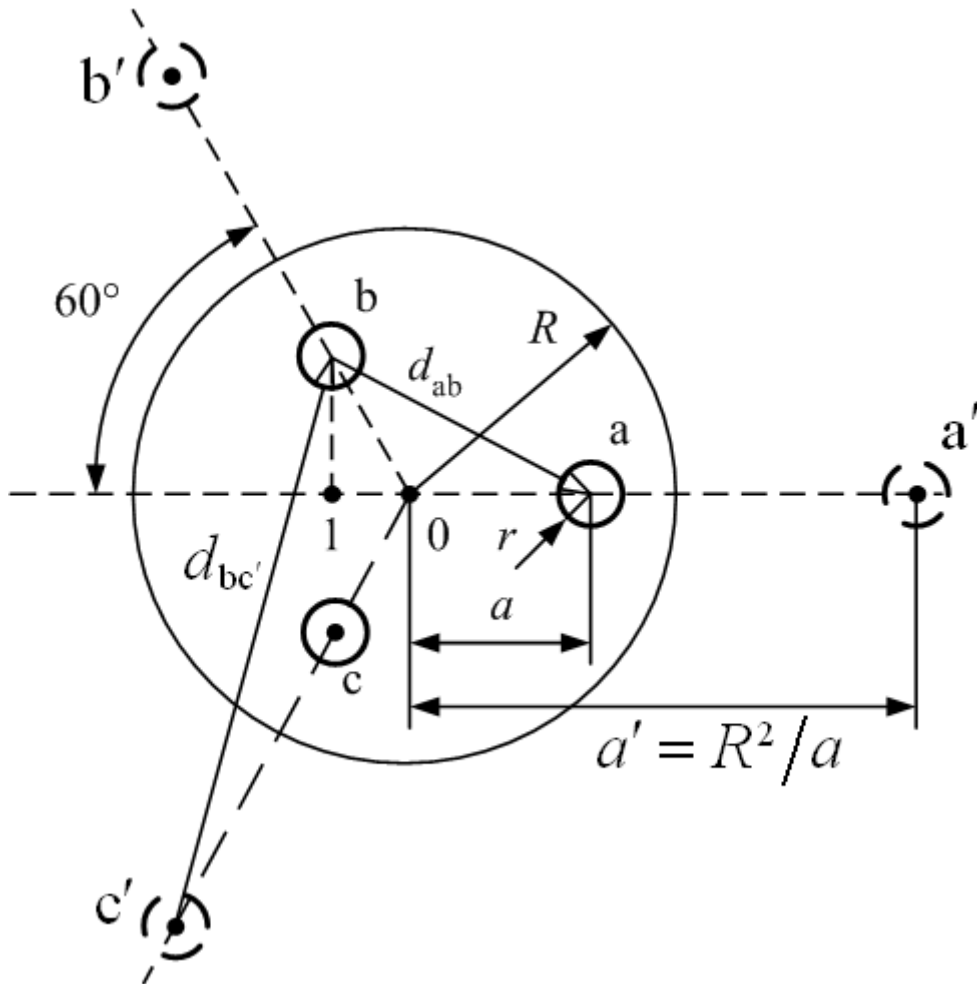
Jediná kapacita: provozní, proti plášti

$$C = c_{k0} = \frac{0,0242\varepsilon_r}{\log \frac{r_2}{r_1}} \left(\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right)$$

b) společný kovový plášť pro všechny žíly



a)



Metoda zrcadlení – povrch pláště ekvipotenciální plocha

Vlastní potenciálový součinitel se určí

$$\delta_{kk}^{\chi} = \delta = \frac{\log \frac{R^2 - a^2}{Rr}}{0,0242\epsilon_r} \left(\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right)$$

Vzájemný potenciálový součinitel se určí

$$\delta_{km}^{\chi} = \delta' = \frac{\log \sqrt{\frac{1 + \frac{R^2}{a^2} + \frac{a^2}{R^2}}{3}}}{0,0242\epsilon_r} \left(\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right)$$

Dílčí kapacita c_0 vodiče k plášti

$$c_0 = \frac{1}{\delta + 2\delta'}$$

Dílčí vzájemná kapacita c'

$$c' = \frac{\delta'}{(\delta - \delta')(\delta + 2\delta')}$$

Kapacita provozní C

$$C = c_0 + 3c' = \frac{1}{\delta - \delta'}$$

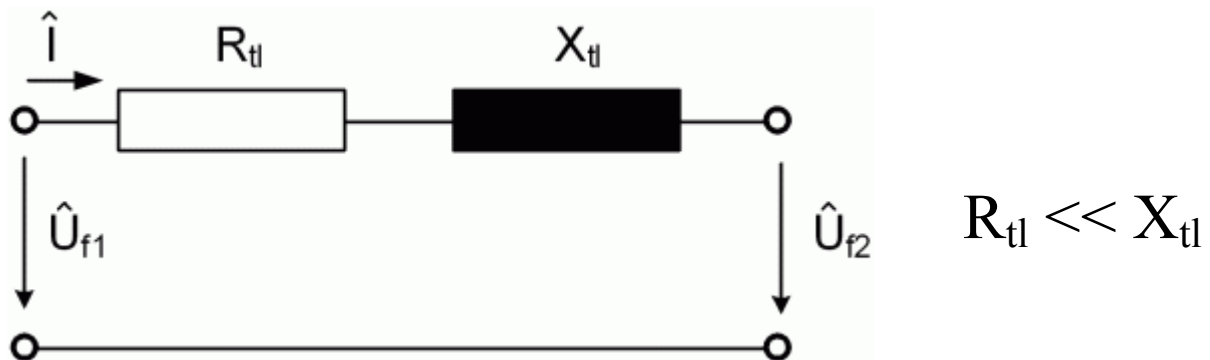
Kapacity vyšší než pro venkovní vedení.

- 22kV - $B_1 \approx (70 \div 90) \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$

3. Tlumivky a kondenzátory

a) Tlumivky podélné (sériové)

- reaktory
- pro omezení zkratových proudů
- v sítích do 35 kV, jednofázové ($I_n > 200\text{A}$) nebo trojfázové ($I_n < 200\text{A}$), obvykle vzduchové



- zadává se: $X_{tl\%}, S_{tl}, U_n, I_n$

- výpočet: $S_{tl} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n$

$$X_{tl} = \frac{X_{t\%} \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{X_{t\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{tl}}$$

$$\Delta \hat{U}_f = \hat{U}_{f1} - \hat{U}_{f2} = (R_t + jX_t) \hat{I} = \hat{Z}_t \hat{I}$$

$$[\hat{Z}_{tabc}] = [\hat{Z}_{t012}] = \hat{Z}_t \cdot [E] - 3f \text{ tlumivka}$$

- v bezporuchovém stavu může být tlumivka přemostěna s pojistkou, jinak větší úbytek napětí

b) Tlumivky příčné (paralelní)

- v soustavách $U_N > 220$ kV, olejové chlazení
- pro kompenzaci kapacitních (nabíjecích) proudů vedení při chodu naprázdno a malých zatíženích:

$$X_{tl} = \frac{U_{tl n}}{\sqrt{3} \cdot I_{tl n}} = \frac{U_{tl n}^2}{Q_{tl n}} \quad \hat{Z}_{tl} = \hat{Z}_{tl1} = \hat{Z}_{tl2}, Z_{tl0} \rightarrow \infty$$

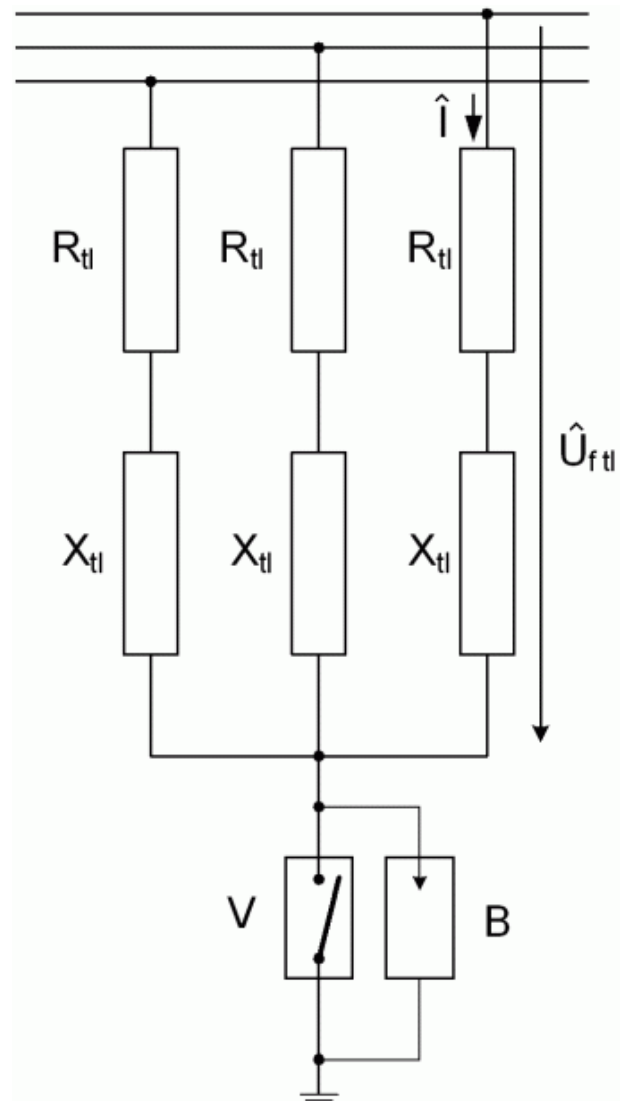
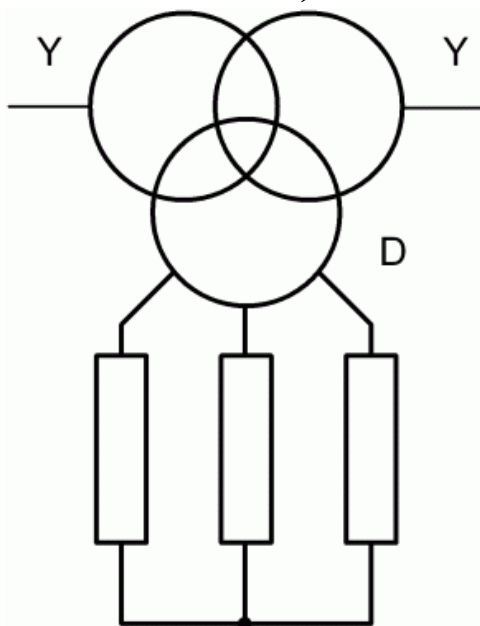
- zapojení do soustavy:

a) galvanické spojení s vedením (kompenzace Q)

- uzel vinutí je zapojen do Y (připojení při zapínání)

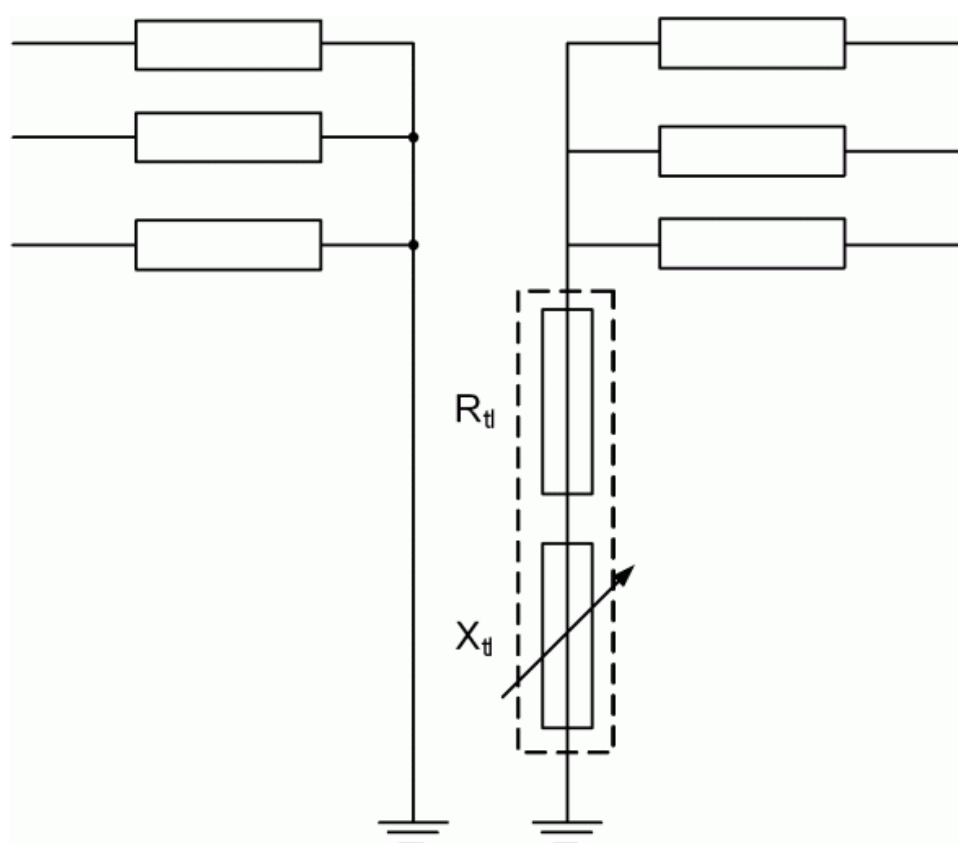
b) zapojení tlumivky do terciáru transformátoru

- problém při vypnutí (čistě indukativní zátěž)



c) Tlumivky uzlové

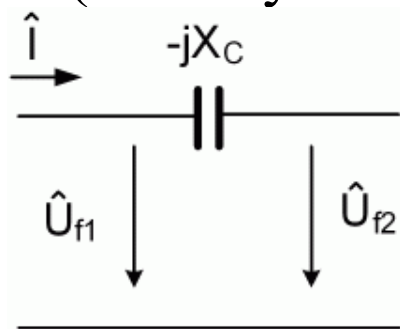
- v sítích s nepřímo uzemněným uzlem
- pro kompenzaci proudů při zemním spojení
- velikost proudu při poruše nezávisí na místě poruchy a je čistě kapacitní
- reaktanci tlumivky X_{tl} tak, aby velikost indukčního proudu byla co do velikosti stejná jako kapacitní proud → zhasnutí oblouku



- od 6 do 35 kV, jednofázová!, olejové chlazení
 - změna velikosti kapacitního proudu (rozsah sítě) → změna indukčnosti (změna velikosti vzduchové mezery v mag. obvodu)
- = kompenzační (zhasací) tlumivka, $X_0 = 3X_{tl}$

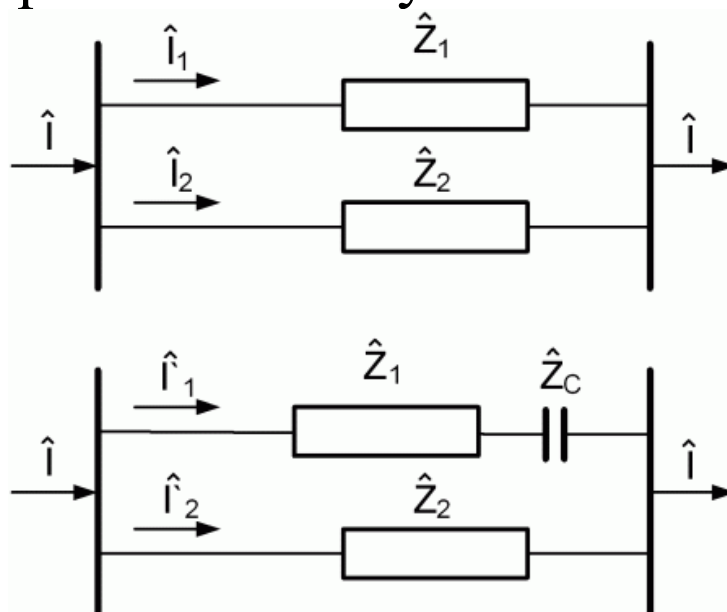
d) Kondenzátory sériové

- pro zlepšení napět'ových poměrů (vn) nebo úpravu parametrů (dlouhá vedení vvn)
- napětí a výkon kond. se mění se zatížením
- při zkratech a nadproudech se na kond. objevuje přepětí (ochrany s velmi rychlým působením)



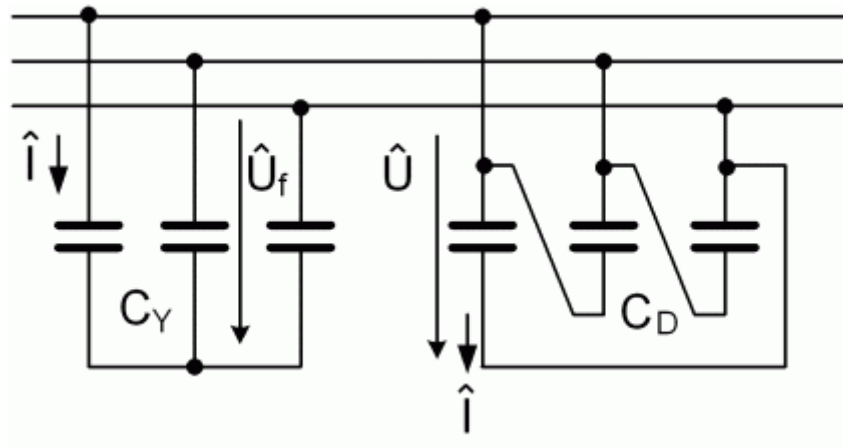
$$\hat{U}_c = -j \frac{1}{\omega C} \hat{I}$$

- kond. se musí izolovat proti zemi (izol. podpěry) – na něm napětí
- nevýhoda – umožňuje vstup harmonických proudů
- lze s nimi dosáhnout rozdělení proudů na paralelní přenosové cesty



e) Kondenzátory paralelní

- v průmyslových sítích do 1 kV
- zapojení do: a) hvězdy Y
b) trojúhelníka D (v sítích nn)



$$Q_f = U \cdot I_C = U^2 \cdot \omega \cdot C_\Delta \quad Q_f = U_f \cdot I_C = U_f^2 \cdot \omega \cdot C_Y$$

$$Q = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_\Delta \quad Q = U^2 \cdot \omega \cdot C_Y$$

při stejném jalovém výkonu

$$3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_\Delta = U^2 \cdot \omega \cdot C_Y \rightarrow C_Y = 3 C_\Delta$$

→ spíše D

- použití pro kompenzaci jalového výkonu
 - a) $Q_C < Q$ podkompenzováno
 - b) $Q_C = Q$ přesná kompenzace
 - c) $Q_C > Q$ překompenzováno
- kompenzace individuální, skupinová

4. Transformátory

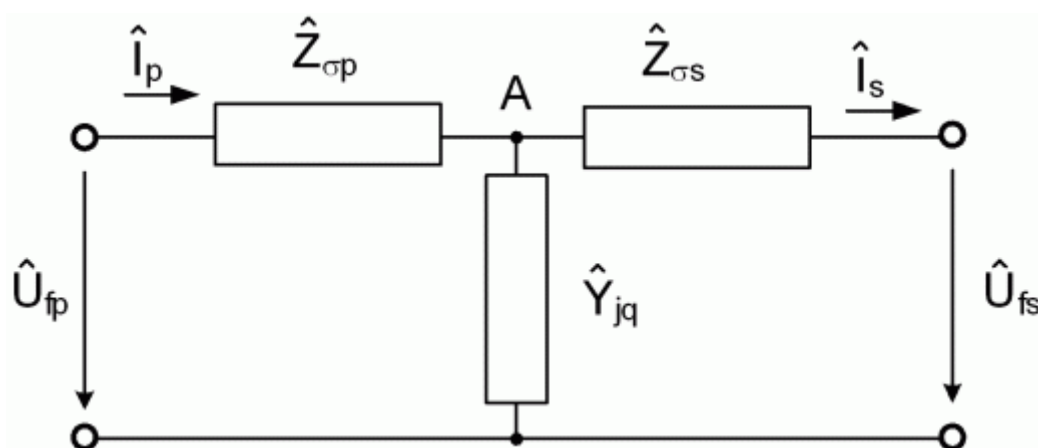
a) Dvojvinut'ové TRF

- zapojení vinutí Y, Yn, D, Z, Zn
- lze uvažovat každou fázi zvlášť (zanedbána nesymetrie)
- náhradní schéma: T – článek

$$\hat{Z}_{\sigma p} = R_p + jX_{\sigma p}, \quad \hat{Z}_{\sigma s} = R_s + jX_{\sigma s}, \quad \hat{Y}_q = G_q - jB_q$$

- hodnoty jednotlivých veličin výpočtem, ověření zkouškou naprázdno a nakrátko:

$$\Delta P_0 \text{ (W)}, \quad i_0 \text{ (\%)}, \quad \Delta P_k \text{ (W)}, \quad z_k = u_k \text{ (\%)}, \quad S_n \text{ (VA)}, \quad U_n \text{ (V)}$$



- příčná větev:

$$g_q = \frac{\Delta P_0}{S_n} \quad y_q = \frac{i_{0\%}}{100} \quad b_q = \sqrt{y_q^2 - g_q^2}$$

$$\hat{y}_q = \frac{\Delta P_0}{S_n} - j \sqrt{\left(\frac{i_{0\%}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{S_n}\right)^2} = g_q - j \cdot b_q$$

$$\hat{Y}_q = \hat{y}_q \frac{S_n}{U_n^2} = \frac{S_n}{U_n^2} \left[\frac{\Delta P_0}{S_n} - j \sqrt{\left(\frac{i_{0\%}}{100} \right)^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{S_n} \right)^2} \right] = G_q - j \cdot B_q$$

- podélná větev:

$$r_k = \frac{\Delta P_k}{S_n} \quad z_k = \frac{u_{k\%}}{100} \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

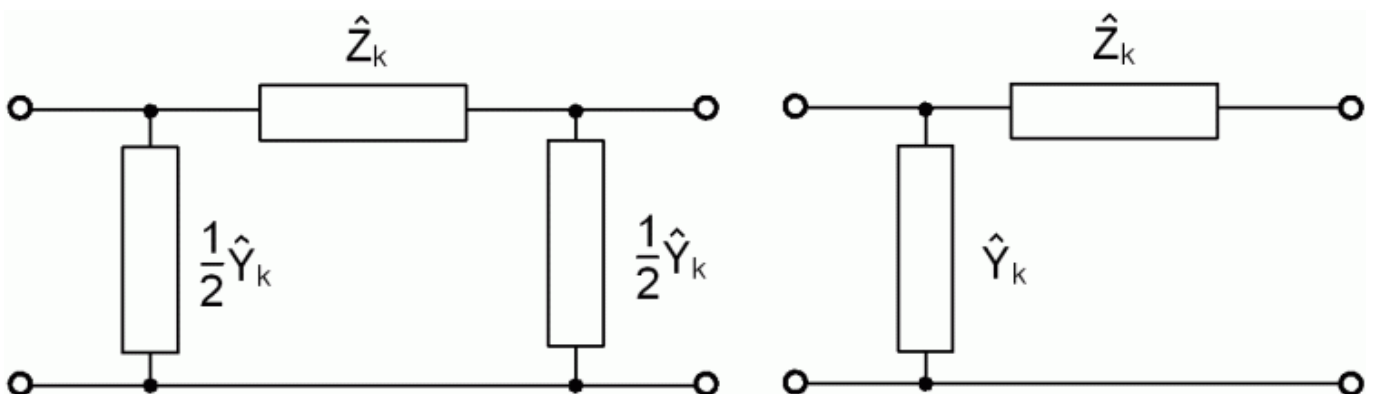
$$\hat{z}_k = \frac{\Delta P_k}{S_n} + j \sqrt{\left(\frac{u_{k\%}}{100} \right)^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_n} \right)^2} = r_k + j \cdot x_k$$

$$\hat{Z}_k = \hat{z}_k \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{U_n^2}{S_n} \left[\frac{\Delta P_k}{S_n} + j \sqrt{\left(\frac{u_{k\%}}{100} \right)^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_n} \right)^2} \right] = R_k + j \cdot X_k$$

$$\hat{Z}_{\sigma ps} = \hat{Z}_k = (R_p + R_s) + j(X_{\sigma p} + X_{\sigma s})$$

$$\text{klademe } \hat{Z}_{\sigma p} = 0,5 \hat{Z}_{\sigma ps} = \hat{Z}_{\sigma s}$$

- fyzikálně toto rozdělení není bez vady (rozdílné rozptylové toky, rozdílné rezistance)
- použití T-článku při výpočtu uzlových sítí někdy není vhodné (zavádí další uzel A)
- proto výpočet použitím π -článku, Γ -článku



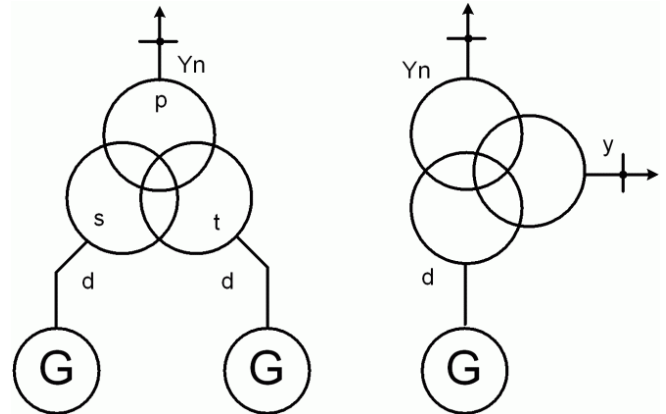
b) Trojvinut'ové TRF

- parametry výpočtem, ověření z měření naprázdno a nakrátko (zkoušky nakrátko 3, vždy 1 vinutí naprázdno, 1 nakrátko a 1 napájíme):

ΔP_0 [W], i_0 [%], ΔP_k [W],

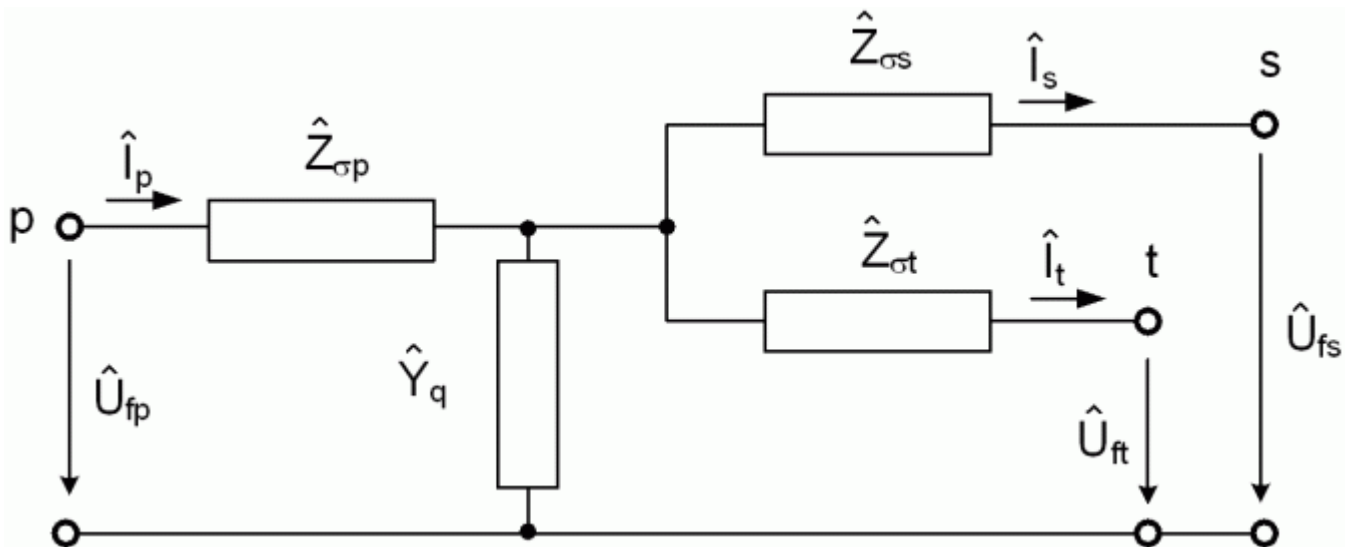
$z_K = u_K$ [%], S_n [VA],

U_n [V]



$$S_{Sn} = S_{Tn} = 0,5 \cdot S_{Pn}$$

- náhradní schéma:



- měření naprázdno:

vztaženo na jmen. výkon primáru S_{Pn} a jmen. napětí primáru U_{PN} (je napájen)

$$\hat{y}_q = g_q - j \cdot b_q = \frac{\Delta P_0}{S_{Pn}} - j \sqrt{\left(\frac{i_{0\%}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{S_{Pn}}\right)^2}$$

pojmenovaná hodnota (S)

$$\hat{Y}_q = \hat{y}_q \frac{S_{Pn}}{U_{Pn}^2} = G_q - j \cdot B_q = \frac{S_{Pn}}{U_{Pn}^2} \left[\frac{\Delta P_0}{S_{Pn}} - j \sqrt{\left(\frac{i_{0\%}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{S_{Pn}}\right)^2} \right]$$

- měření nakrátko: (3x, napájení-zkrat-naprázdko)

za předpokladu: $S_{Pn} \neq S_{Sn} \neq S_{Tn}$

měřeno mezi	P - S	P - T	S - T
ztráty nakrátko [W]	ΔP_{kPS}	ΔP_{kPT}	ΔP_{kST}
napětí nakrátko [%]	u_{kPS}	u_{kPT}	u_{kST}
měření odpovídá výkonu [VA]	S_{Sn}	S_{Tn}	S_{Tn}

zkouška nakrátko S – T:

má se zjistit $\hat{Z}_{ST} = \hat{Z}_{\sigma S} + \hat{Z}_{\sigma T}$, $\hat{Z}_{\sigma S} = R_S + j \cdot X_{\sigma S}$

ΔP_k při $I_{Tn} \rightarrow \Delta P_{kST} = 3 \cdot R_{ST}^+ \cdot I_{Tn}^2$, $I_{Tn} = \frac{S_{Tn}}{\sqrt{3} \cdot U_{Tn}}$

R_{ST}^+ rezistace sek. a terc. vinutí (vztažená na U_{Tn})

$$R_{ST}^+ = \frac{\Delta P_{kST}}{S_{Tn}^2} \cdot U_{Tn}^2$$

$$R_{ST} = R_{ST}^+ \cdot \frac{U_{Pn}^2}{U_{Tn}^2} \rightarrow R_{ST} = R_S + R_T = \frac{\Delta P_{kST}}{S_{Tn}^2} \cdot U_{Pn}^2$$

R_S (R_T).... rezistence sek. (ter.) vinutí přepočítaná na primár

- impedance: $z_{ST} = \frac{u_{kST\%}}{100} \cdot \frac{S_{Pn}}{S_{Tn}}$, $Z_{ST} = z_{ST} \cdot \frac{U_{Pn}^2}{S_{Tn}}$

$$\hat{Z}_{ST} = r_{ST} + j \cdot X_{ST}, \quad X_{ST} = \sqrt{Z_{ST}^2 - r_{ST}^2},$$

$$X_{ST} = X_{\sigma S} + X_{\sigma T}$$

- na základě odvozených vztahů můžeme psát:

P - S:

$$\hat{Z}_{PS} = r_{PS} + j \cdot X_{PS} = \frac{\Delta P_{kPS}}{S_{Sn}^2} \cdot S_{Pn} + j \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{kPS\%}}{100} \cdot \frac{S_{Pn}}{S_{Sn}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{kPS}}{S_{Sn}^2} \cdot S_{Pn}\right)^2}$$

$$\hat{Z}_{PS} = R_{PS} + j \cdot X_{PS} = \frac{\Delta P_{kPS}}{S_{Sn}^2} \cdot U_{Pn}^2 + j \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{kPS\%}}{100} \cdot \frac{U_{Pn}^2}{S_{Sn}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{kPS}}{S_{Sn}^2} \cdot U_{Pn}^2\right)^2}$$

- s obměnou i pro P – T a S – T

- rozptylové reaktance pro P,S,T:

$$\hat{Z}_{\sigma P} = R_P + j \cdot X_{\sigma P} = 0,5 \cdot (\hat{Z}_{PS} + \hat{Z}_{PT} - \hat{Z}_{ST})$$

$$\hat{Z}_{\sigma S} = R_S + j \cdot X_{\sigma S} = 0,5 \cdot (\hat{Z}_{PS} + \hat{Z}_{ST} - \hat{Z}_{PT})$$

$$\hat{Z}_{\sigma T} = R_T + j \cdot X_{\sigma T} = 0,5 \cdot (\hat{Z}_{PT} + \hat{Z}_{ST} - \hat{Z}_{PS})$$

- znalost podélných impedancí a příčných admitancí umožňuje studovat napět'ové a výkonové poměry trojvinut'ových transformátorů