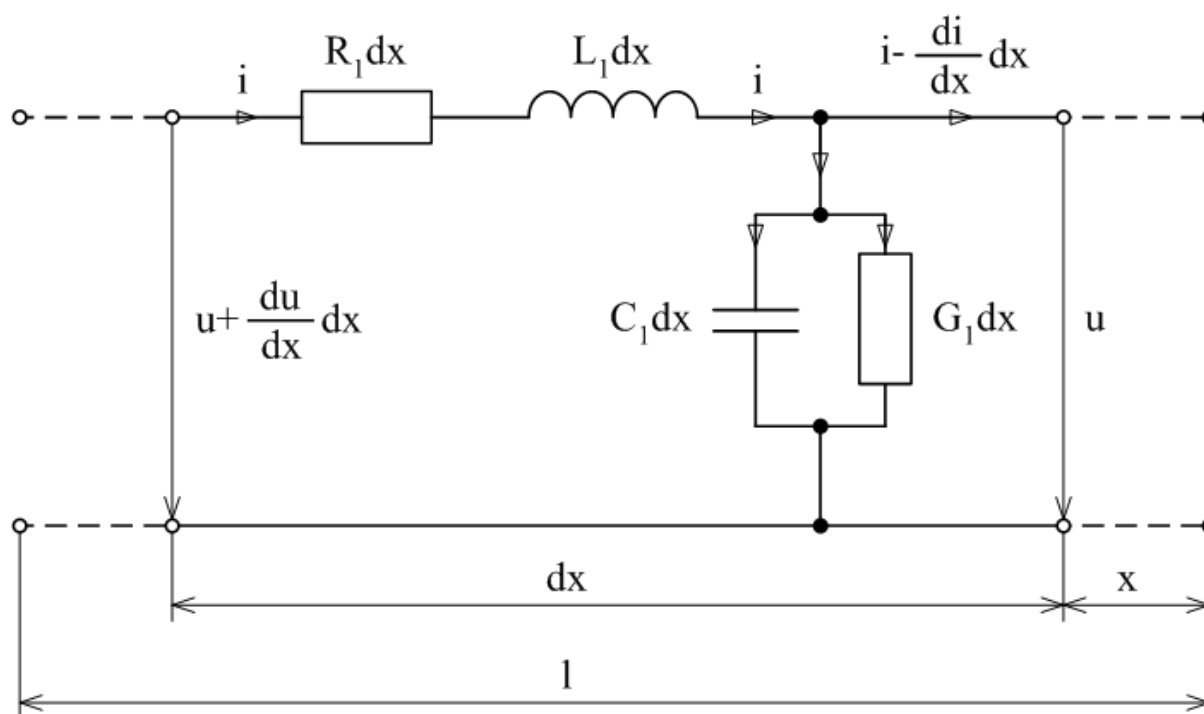


Prvky přenosových a distribučních soustav

Vedení s rovnoměrně rozloženými parametry

Homogenní vedení – parametry R_1 , L_1 , G_1 , C_1 jsou rovnoměrné po celé jeho délce.



4 základní (primární) el. parametry (pro 1 fázi)

- 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)

Sekundární parametry

- indukční reaktance
$$X_1 = \omega L_1 = 2\pi f L_1 \quad (\Omega / \text{km})$$
- kapacitní vodivost (susceptance)
$$B_1 = \omega C_1 = 2\pi f C_1 \quad (\text{S} / \text{km})$$
- podélná impedance
$$\hat{Z}_{11} = R_1 + jX_1 \quad (\Omega / \text{km})$$
- příčná admitance
$$\hat{Y}_{q1} = G_1 + jB_1 \quad (\text{S} / \text{km})$$

- vlnová impedance

$$\hat{Z}_v = \sqrt{\frac{\hat{Z}_{11}}{\hat{Y}_{q1}}} \quad (\Omega)$$

- konstanta přenosu

$$\hat{\gamma} = \sqrt{\hat{Z}_{11} \hat{Y}_{q1}} = \alpha + j\beta \quad (\text{km}^{-1})$$

α – měrný útlum

β – měrný posuv

pozn.

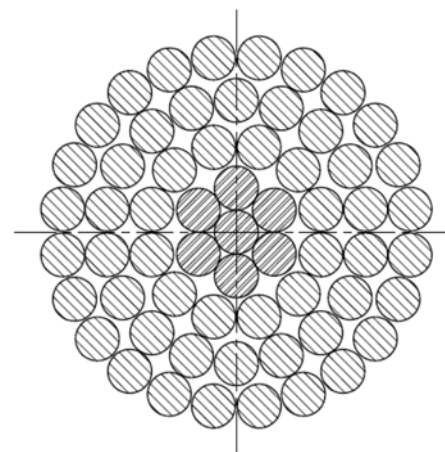
- uvažujeme souměrné napájení a zatížení
- sítě nn – převažuje R
 - vn – R, L (při poruchách C)
 - vvnn – R, L, G, C (rozprostřené par.)

Vodiče venkovních vedení

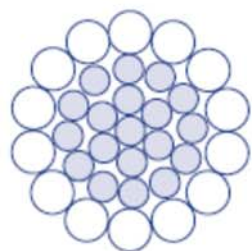
- plný průřez nebo lana (1 nebo více materiálů)
- lana Cu, Al, slitiny, kompozity, optická vlákna, vysokoteplotní materiály
- AlFe (Fe – nosná duše, Al – vodivý plášť) = ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)

$$S \in (20 ; 800) \text{ mm}^2$$

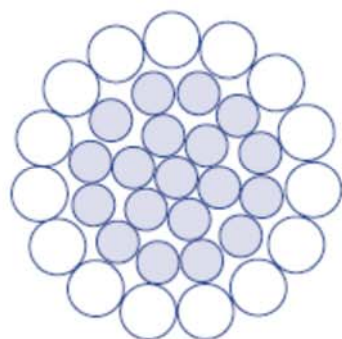
- př. označení
 - 382-AL1/49-ST1A
 - 350AlFe4
 - AlFe450/52



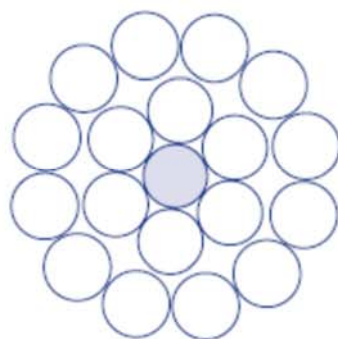
Lano	Konstrukce	Fe				Al			Lano		
		poč.dr.	Prům.dr	Prům.duše	Průřez	poč.dr.	Prům.dr	Průřez	Půměr	Průřez	R _{DC+20}
		ks	mm	mm	mm ²	ks	mm	mm ²	mm	mm ²	Ω·km ⁻¹
350 AlFe 4	1+6+12/12+18	19	2,36	11,80	83,11	30	3,75	331,34	26,80	414,45	0,087
450 AlFe 8	3+9/18+14+20	12	2,36	9,90	52,49	18+34	1,90+3,75	426,55	28,70	479,05	0,0674
AlFe 450/52	3+9/12+18+24	12	2,36	9,81	52,49	54	3,25	447,97	29,31	500,46	0,0646
382-AL1/49-ST1A	1+6/12+18+24	7	3,00	3,00	49,48	54	3,00	381,70	27,00	431,18	0,0758
476-AL1/62-ST1A	1+6/12+18+24	7	3,35	10,05	61,70	54	3,35	475,96	30,15	537,66	0,0608



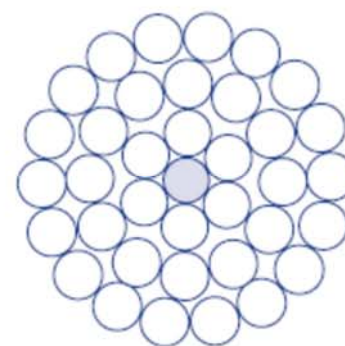
14Al/19Fe



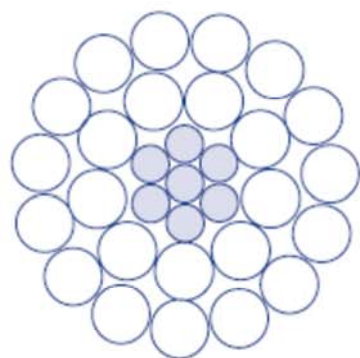
15Al/19Fe



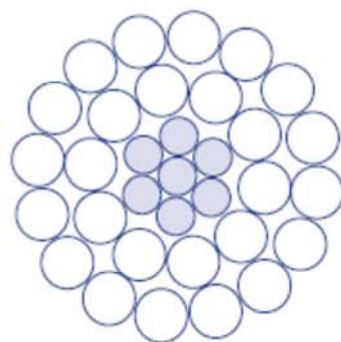
18Al/1Fe



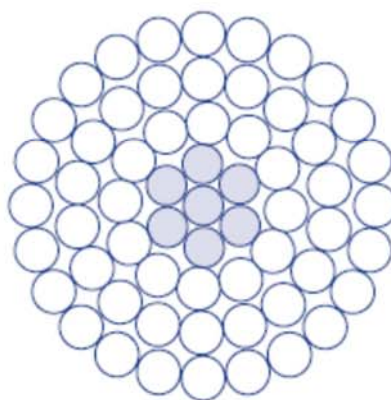
36Al/1Fe



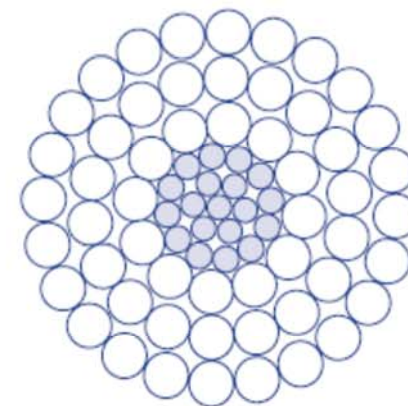
24Al/7Fe



26Al/7Fe

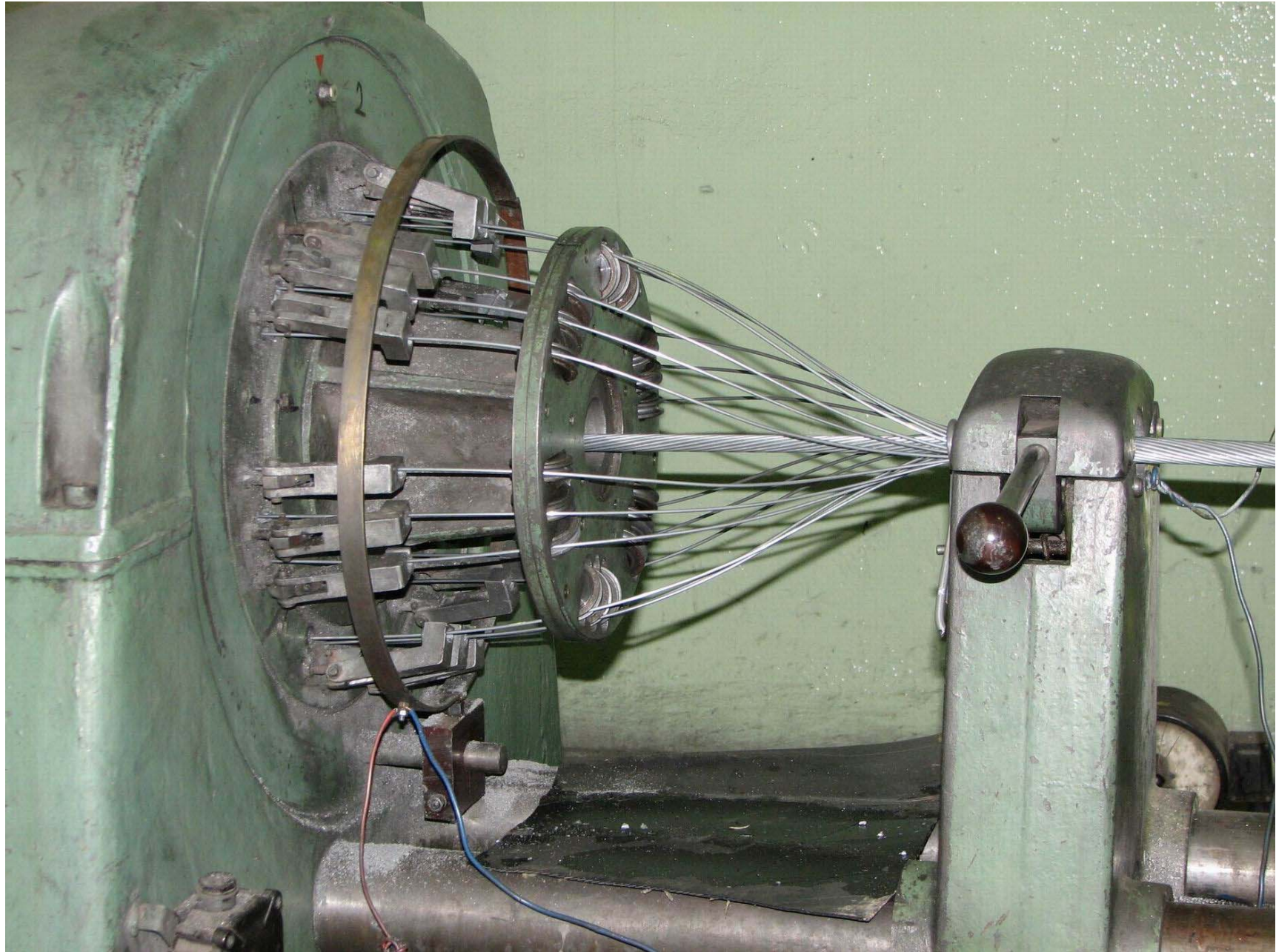


54Al/7Fe



54Al/19Fe





Rezistance (činný odpor)

Velikost ovlivňují:

materiál vodiče, teplota, skinefekt, prodloužení délky kroucením dílčích vodičů, rozložení proudové hustoty po vrstvách, průhyb, nerovnoměrnost průřezu, spojky

Při průchodu ss proudem (při 20°C)

$$R_{1dc0} = \frac{\rho_0}{S} \quad (\Omega / \text{km})$$

Vliv teploty

$$k_T = 1 + \alpha(T_1 - T_0) + \beta(T_1 - T_0)^2 \quad (-)$$

V katalogu obvykle R_{1dc0}

$$\Rightarrow R_1 = R_{1dc0} \cdot k_T \cdot k_{ac} \quad (\Omega / \text{km})$$

$$\text{cca } R_{1dc0} \in (0,05 ; 2) \Omega / \text{km}$$

AlFe42 $R_{1dc0} \sim 0,7 \text{ } \Omega/\text{km}$

AlFe70 $R_{1dc0} \sim 0,4 \text{ } \Omega/\text{km}$

AlFe95 $R_{1dc0} \sim 0,3 \text{ } \Omega/\text{km}$

AlFe120 $R_{1dc0} \sim 0,2 \text{ } \Omega/\text{km}$

AlFe210 $R_{1dc0} \sim 0,14 \text{ } \Omega/\text{km}$

AlFe350 $R_{1dc0} \sim 0,09 \text{ } \Omega/\text{km}$

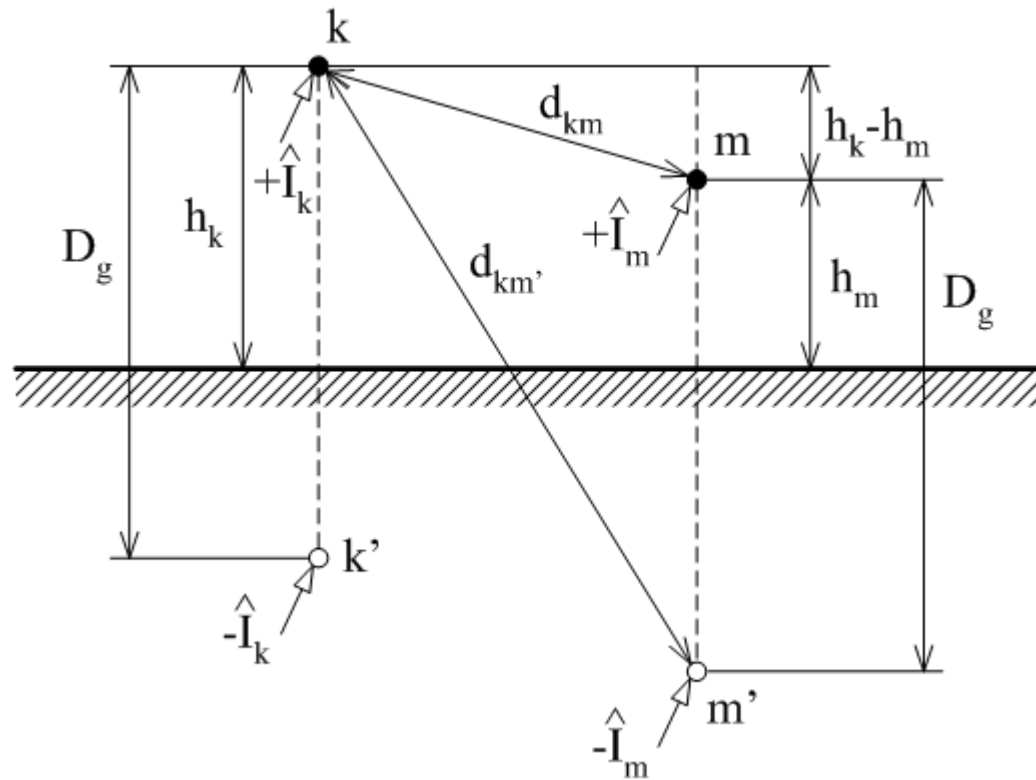
AlFe450 $R_{1dc0} \sim 0,07 \text{ } \Omega/\text{km}$

AlFe680 $R_{1dc0} \sim 0,04 \text{ } \Omega/\text{km}$

Indukčnost a podélná impedance

Soustava n vodičů

Uspořádání smyček n skutečných vodičů a země se nahradí n skutečnými a n fiktivními vodiči ve vzájemné vzdálenosti D_g .



Vlastní indukčnost (smyčka k-k')

$$M_{kk} = 0,46 \log \frac{D_g}{\xi r_k} \quad (\text{mH} / \text{km}; \text{m}, \text{m})$$

r_k ...poloměr k-tého vodiče

ξ ...činitel nerovnoměrnosti rozložení proudové hustoty po průřezu a permeability vodiče

$\xi \in (0,809 ; 0,826)$ pro obvyklá AlFe lana

D_g ... hloubka fiktivního vodiče v zemi, $D_g \sim 100x \text{ m}$, tj. $h \ll D_g$

Vzájemná indukčnost (smyčky k-k', m-m')

$$M_{km} = 0,46 \log \frac{D_g}{d_{km}} = M_{mk} \quad (\text{mH} / \text{km}; \text{m}, \text{m})$$

Obecně

$$M_{aa} = M_{bb} = M_{cc}$$

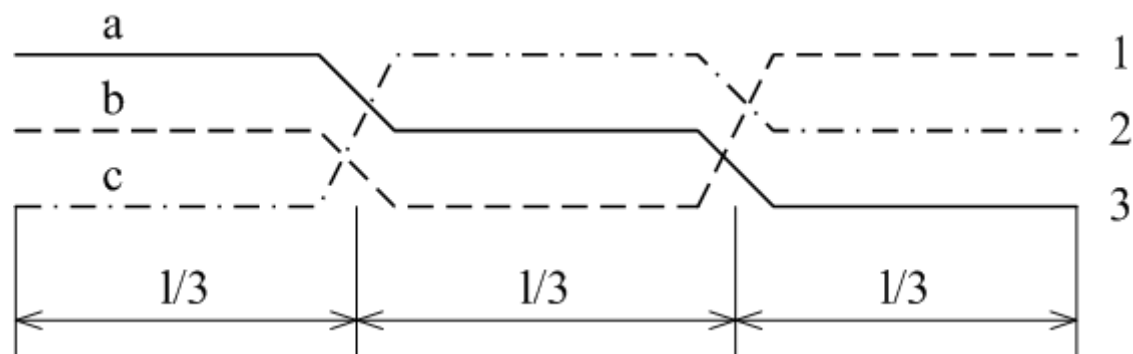
$$M_{ab} \neq M_{bc} \neq M_{ac}$$

$$\hat{L}_a \neq \hat{L}_b \neq \hat{L}_c$$

→ nestejné úbytky napětí (velikost i fáze) → napěťová nesymetrie,
předávání činného výkonu mezi fázemi elmag. vazbou bez dalšího
zatěžování zdrojů → transpozice

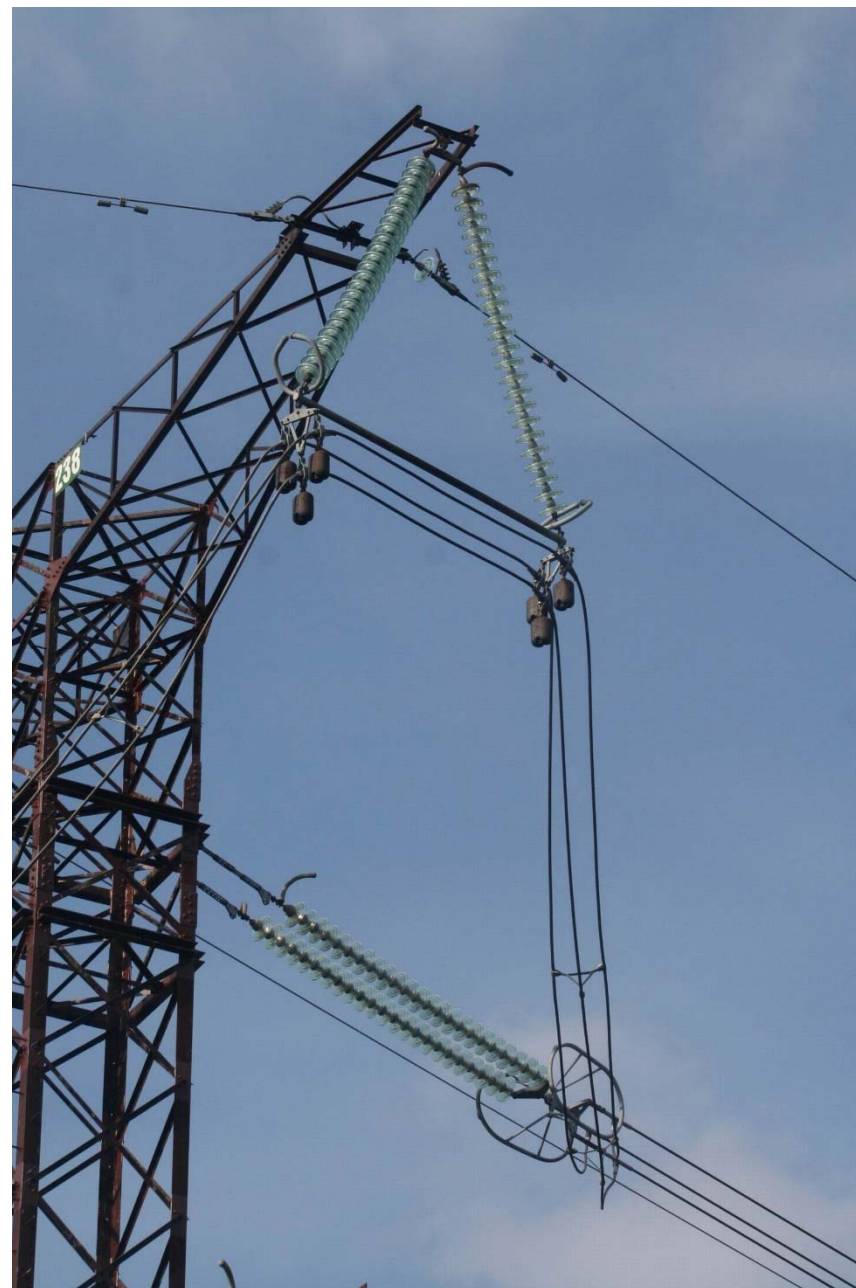
Transpozice 3f vedení

= výměna poloh vodičů tak, že výsledně je každý v určité poloze v $1/3$
délky



Výsledně

$$L_1 = L_a = L_b = L_c = 0,46 \log \frac{d}{\xi_r} \quad (\text{mH / km})$$



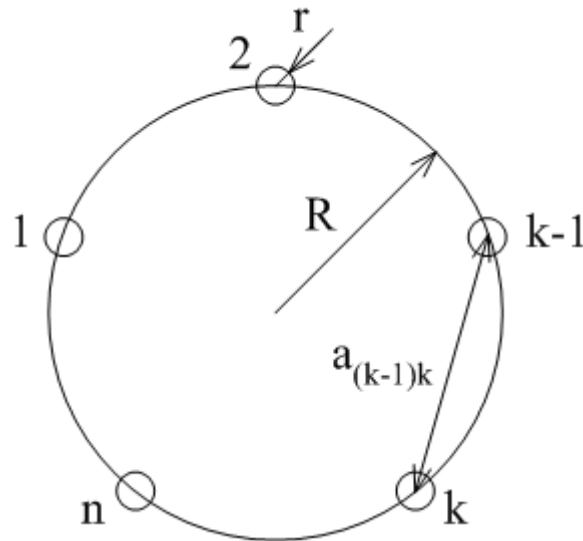
Vedení se svazkovými vodiči

Svazkový vodič

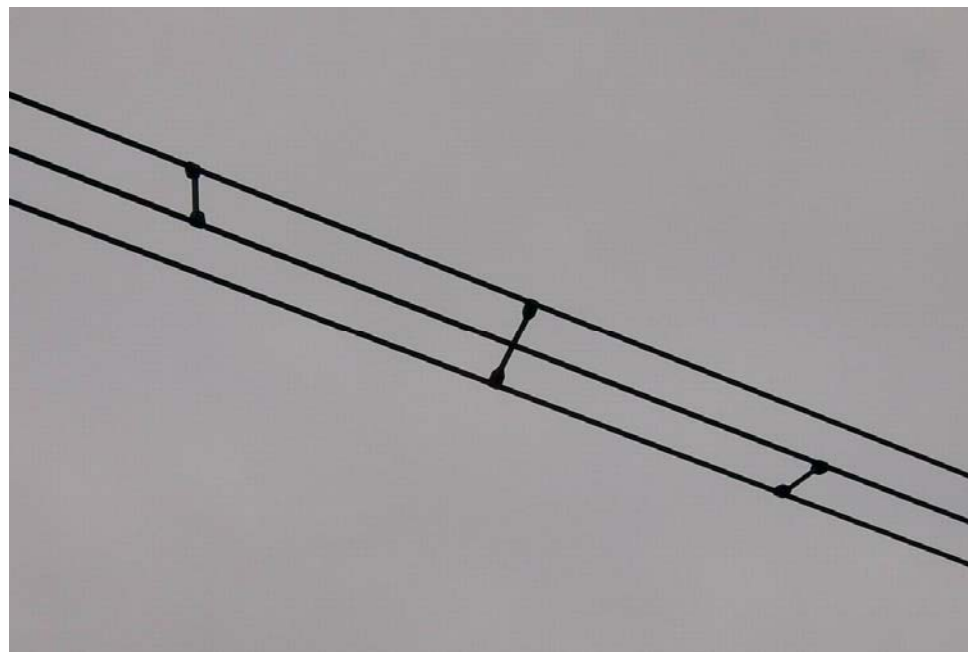
- jednu fázi tvoří n dílčích vodičů spojených paralelně
- uspořádání v pravidelném n -úhelníku
- zvyšuje počáteční napětí koróny
- od napětí 400 kV výše

U (kV)	400	750	1150	1800
n	3	4	8	16

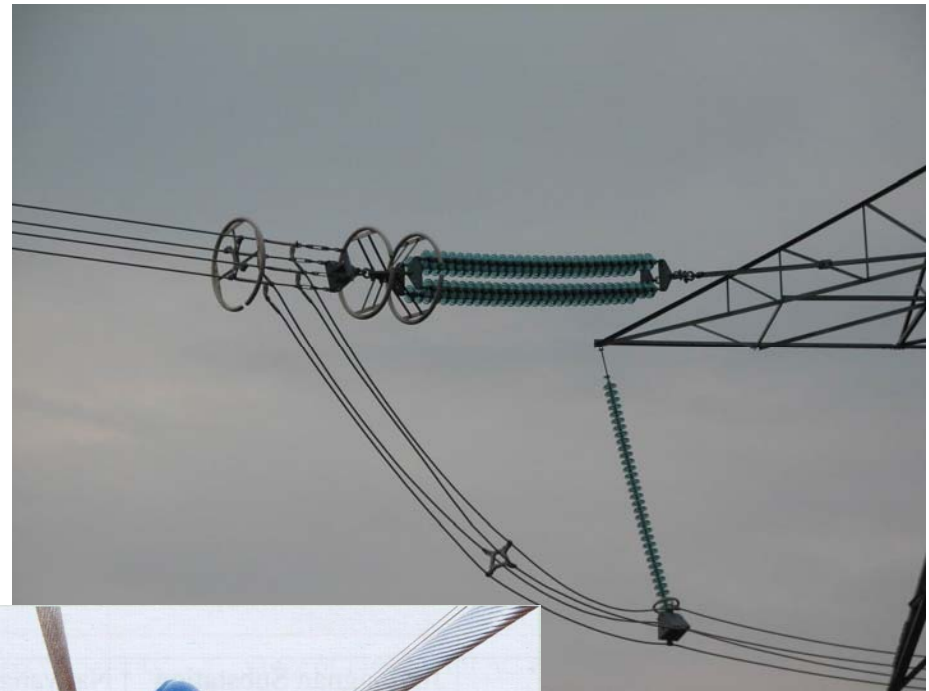
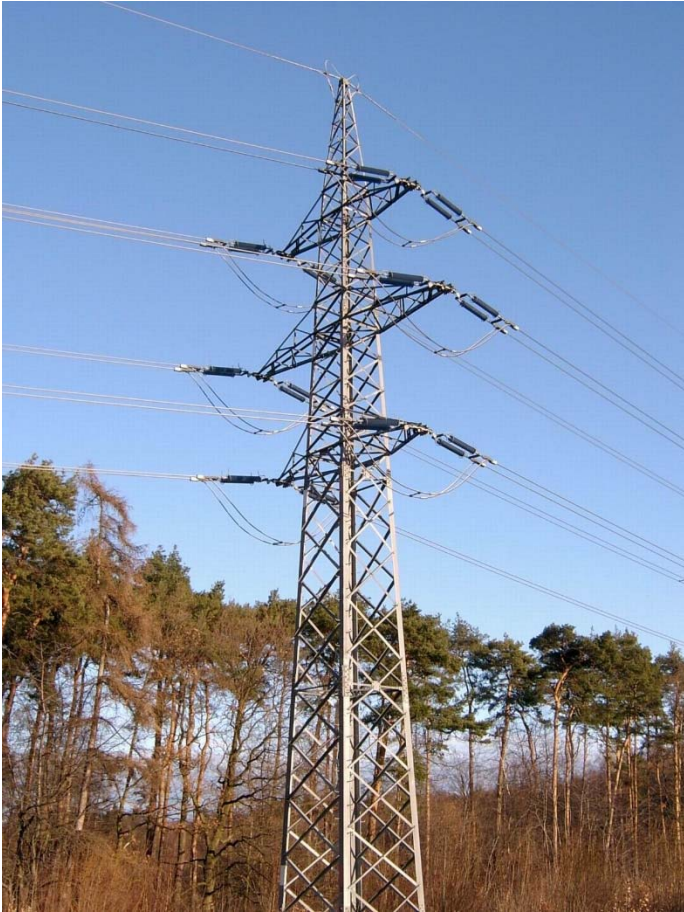
- $a_{400kV} = 40$ cm



ČR: 400 kV – trojsvazek



Kladno 110 kV (2), Kanada 750 kV (4), Čína 1000 kV (8)



UHV conductor

Provozní indukčnost

$$L_1 = 0,46 \log \frac{d}{\xi_e r_e} \quad (\text{mH} / \text{km})$$

ekvivalentní poloměr svazku

$$r_e = R \sqrt[n]{r \frac{n}{R}}$$

ekvivalentní činitel

$$\xi_e = \sqrt[n]{\xi}$$

→ svazkový vodič snižuje L, snižuje R (vodiče paralelně) a zvyšuje C

22 kV $X \sim 0,35 \, \Omega/\text{km}$

110 kV $X \sim 0,35 \div 0,4 \, \Omega/\text{km}$

220 kV $X \sim 0,4 \, \Omega/\text{km}$

400 kV $X \sim 0,3 \, \Omega/\text{km}$

750 kV $X \sim 0,25 \, \Omega/\text{km}$

Svod

Způsobuje činné ztráty svodem k zemi (přes izolátory, korónou – dominantní u venkovního vedení). Závislé na napětí, povětrnostních podmínkách (p, T, vlhkost), vodičích. Málo závislé na zatížení.

Výpočtem ze ztrát korónou

$$P_s = 3U_f I_s = 3G_1 U_f^2 = G_1 U^2 \quad (\text{W} \cdot \text{km}^{-1})$$

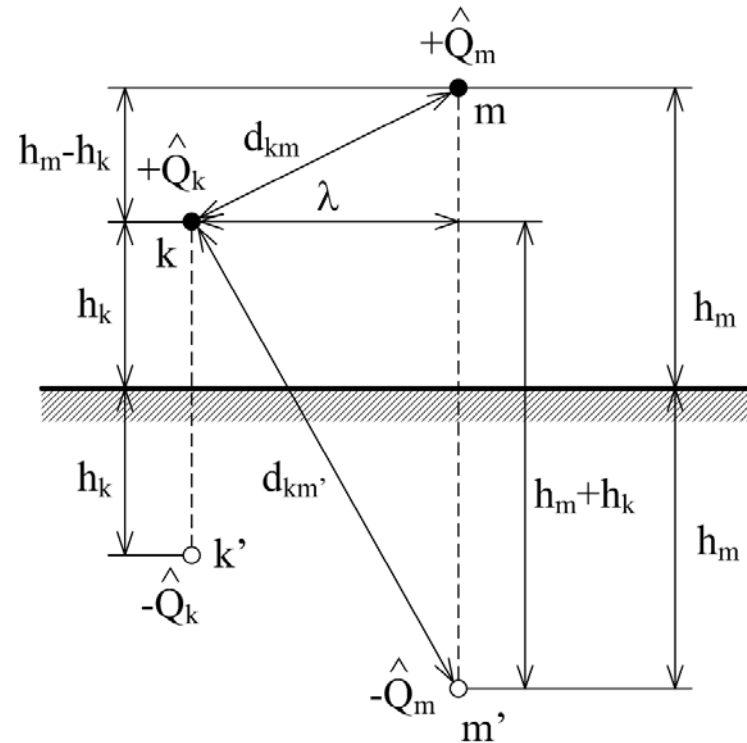
$$G_1 = \frac{P_s}{U^2} \quad (\text{S} / \text{km}; \text{ W} / \text{km}, \text{ V})$$

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

U (kV)	G ₁ (S/km)
110	(3,6 ÷ 5) · 10 ⁻⁸
220	(2,5 ÷ 3,6) · 10 ⁻⁸
400	(1,4 ÷ 2) · 10 ⁻⁸
750	(1,3 ÷ 2,5) · 10 ⁻⁸
1150	(1,0 ÷ 2) · 10 ⁻⁸

Kapacity venkovních vedení

El. potenciál v bodě P v soustavě n rovnoběžných vodičů ($d_{kk'} \ll l$) a země s nulovým potenciálem $\rightarrow$ metoda zrcadlení



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

Transponované vedení

$$\delta = \frac{1}{0,0242} \log \frac{2h}{r} \quad (\text{km} / \mu\text{F})$$

$$\delta' = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d} \quad (\text{km} / \mu\text{F})$$

Kapacita k zemi

$$k_0 = \frac{1}{\delta + 2\delta'}$$

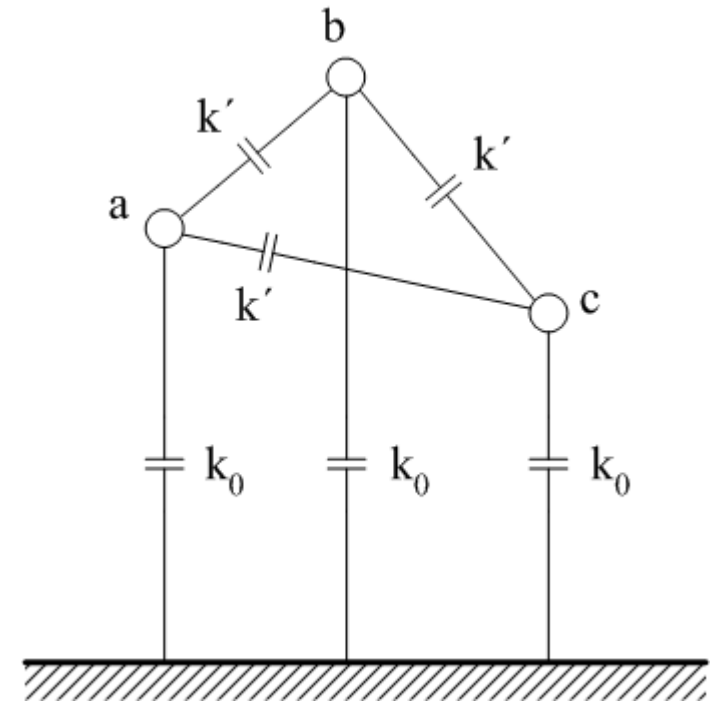
Kapacita mezi vodiči

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

Provozní kapacita (reálné číslo)

$$C = C_a = C_b = C_c = k_0 + 3k'$$

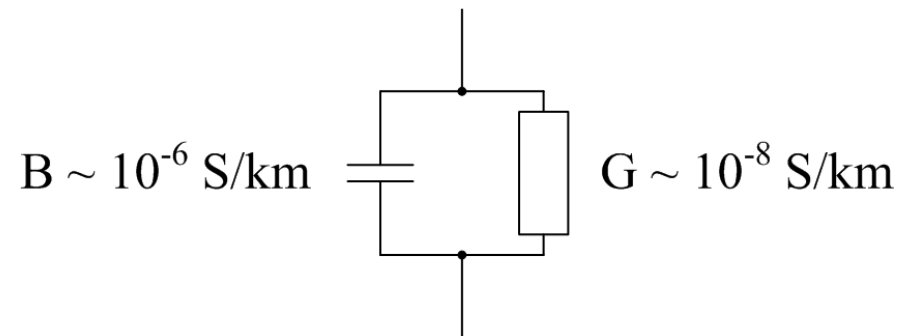
$$C = \frac{1}{\delta - \delta'}$$



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 - $B_1 \approx 1,4 \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$

Svod vůči kapacitám zanedbatelný.



Elektrické parametry kabelů

Rezistance

Stejné jako u venkovních vedení.

Indukčnost

U trojžilových stejná jako u transponovaných vedení.

$$L_1 = 0,46 \log \frac{d}{\xi_r} \quad (\text{mH} / \text{km})$$

6 kV $X \sim 0,06 \, \Omega/\text{km}$

22 kV $X \sim 0,1 \, \Omega/\text{km}$

Svod

Dán dielektrickými ztrátami.

Trojfázově

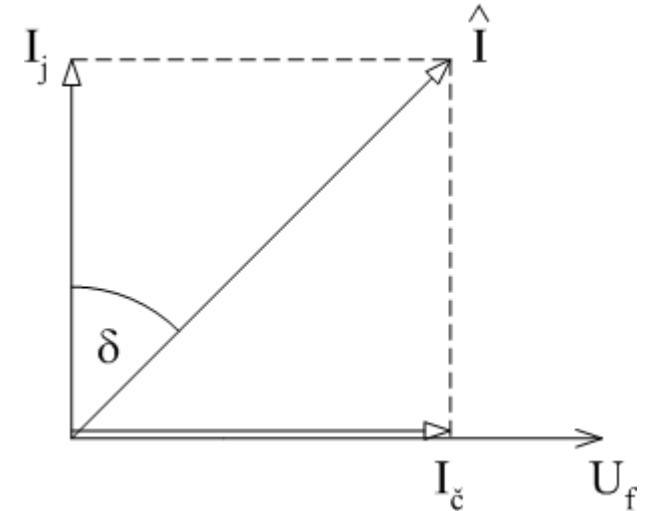
$$P_d = 3U_f I_{\check{c}} = 3U_f I_j \operatorname{tg} \delta \quad (\text{W})$$

$$P_d = 3U_f \omega C U_f \operatorname{tg} \delta = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta = Q_c \operatorname{tg} \delta$$

Q_c ...nabíjecí výkon

Svod na jednotku délky

$$G_1 = \frac{P_{d1}}{U^2} \quad (\text{S / km; W / km, V})$$



Kapacity

Kapacity kabelů výrazně větší než u venkovních vedení (cca 30 ÷ 50krát)

→ omezené délky kabelových sítí kvůli nabíjecím proudům (10x km).

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

Tlumivky a kondenzátory v ES

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 (malá L)



b) Tlumivky příčné (paralelní)

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

$$X_{tl} = \frac{U_{tl n}}{\sqrt{3} \cdot I_{tl n}} = \frac{U_{tl n}^2}{Q_{tl n}}$$

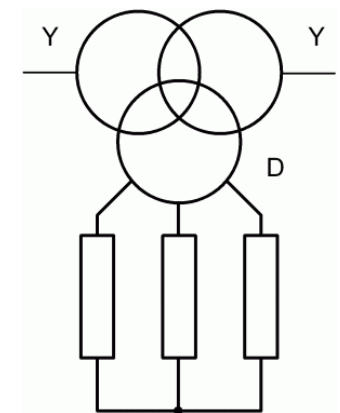
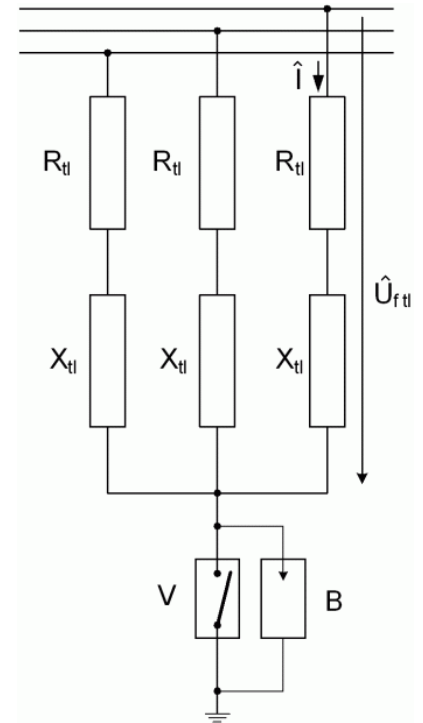
Zapojení do soustavy:

a) galvanické spojení s vedením

- vinutí do Y

b) zapojení tlumivky do terciáru transformátoru

- nižší $U_n \approx 10 \div 35$ kV

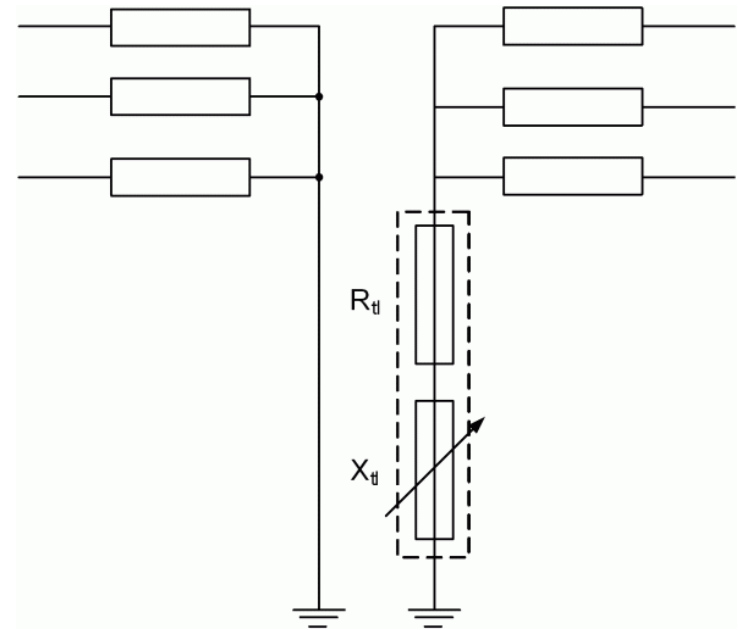


Kočín 400 kV



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 induktivního proudu byla co do velikosti stejná jako kapacitní proud $\rightarrow$ zhasnutí oblouku
 - od 6 do 35 kV (dimenzována na U_{fn}), jednofázová!, olejové chlazení
 - změna velikosti kapacitního proudu (rozsah sítě) $\rightarrow$ změna indukčnosti (změna velikosti vzduchové mezery v mag. obvodu)
- = kompenzační (zhášecí) tlumivka

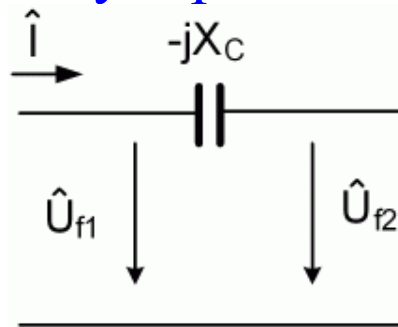


6 MVar, 13 kV, Sokolnice

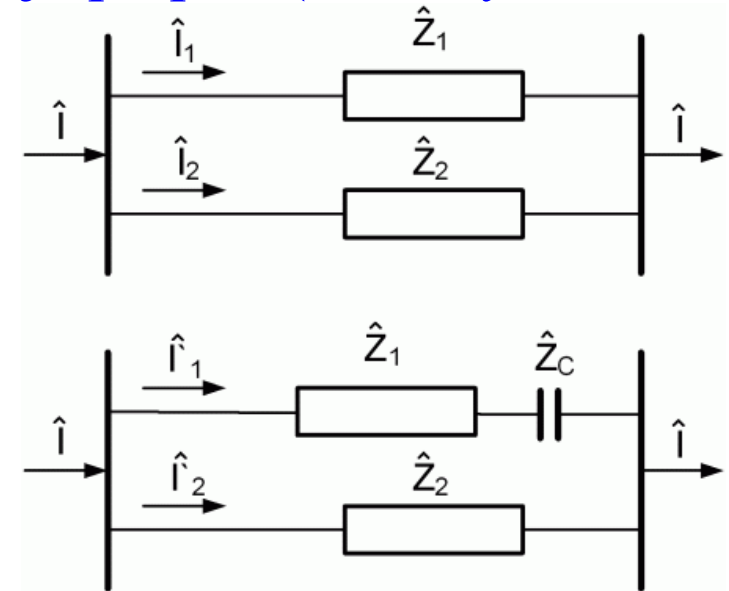


d) Kondenzátory sériové

- kondenzátory v ES = kond. baterie = sériové a paralelní řazení
- pro zlepšení napěťových 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)



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



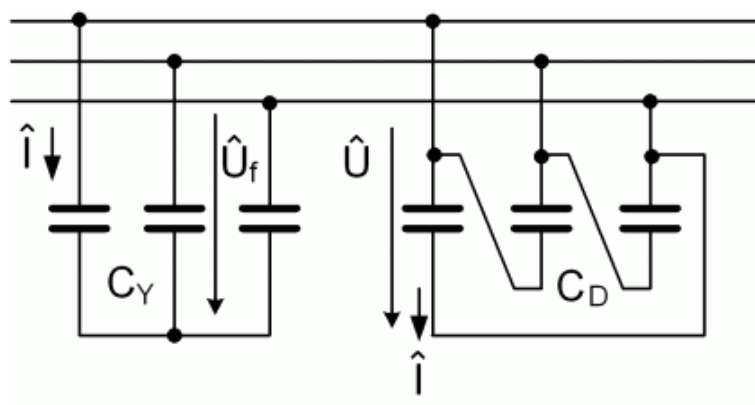
- kond. se musí izolovat proti zemi (izolační podpěry, plošiny) – na něm napětí
- lze s nimi dosáhnout rozdělení proudů na paralelní přenosové cesty

Kanada 750 kV



e) Kondenzátory paralelní

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



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

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

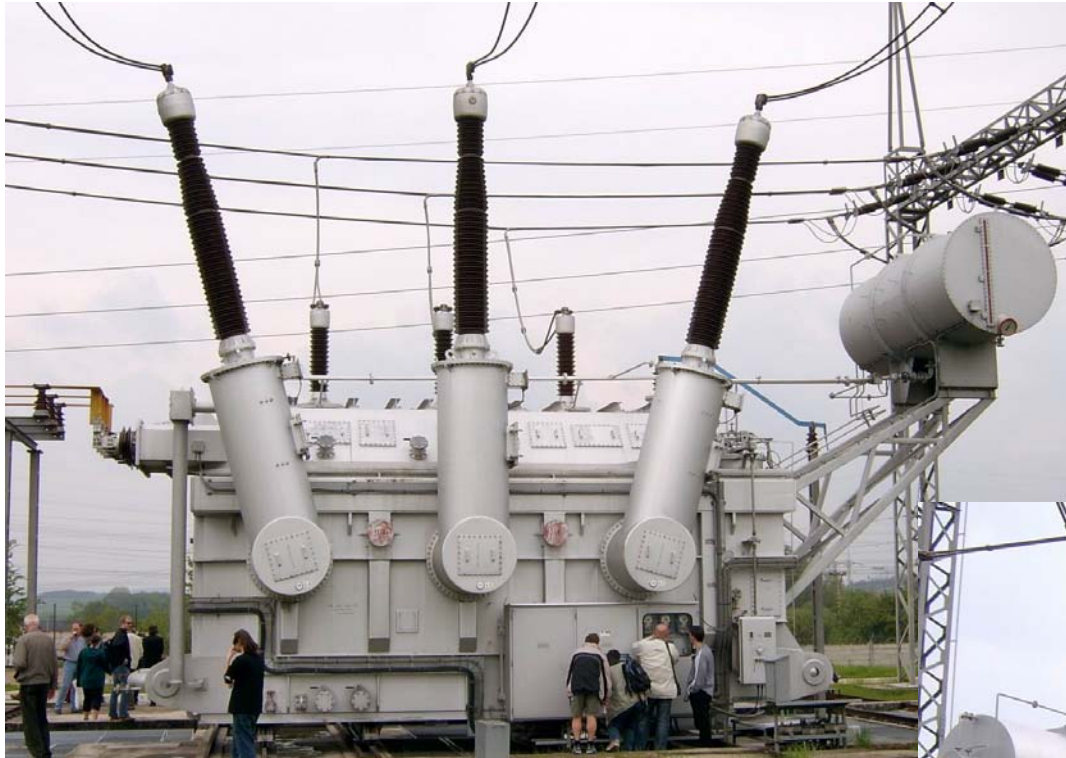
- při stejném $Q \rightarrow C_Y = 3C_\Delta \rightarrow$ spíše D

→ zlepšení účinníku, menší ΔP , úbytky napětí



Parametry transformátorů





350 MVA, 400/110 kV
YNauto - d1, Sokolnice



a) Dvojvinut'ové TRF

- zapojení vinutí Y, Yn, D, Z, Zn, V

Yzn – distribuční TRF vn/nn do 160 kVA, pro nesouměrné zatížení

Dyn – distribuční TRF vn/nn od 400 kVA

Yd – blokové TRF v elektrárnách, nepřenáší 3. harmonickou

Yna-d, YNynd, YNynd – síťové transformátory

- lze uvažovat každou fázi zvlášť (zanedbána nesymetrie)
- náhradní schéma: T – článek

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

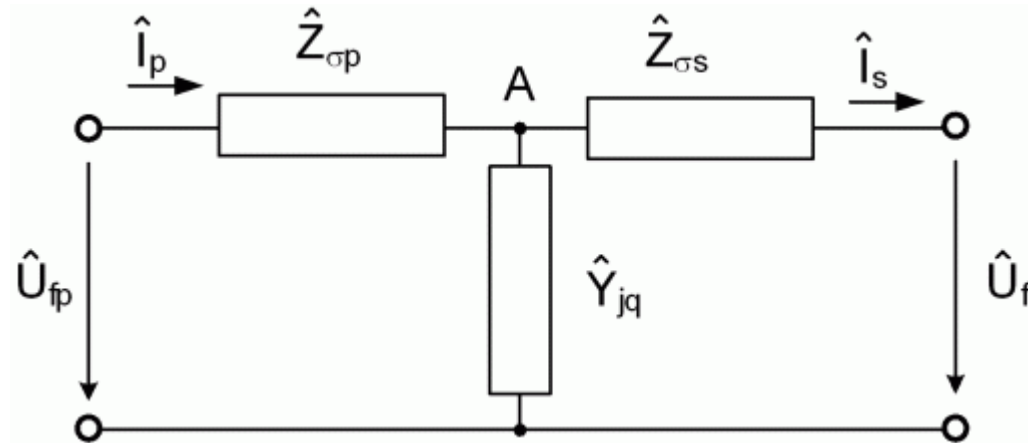
- hodnoty jednotlivých veličin výpočtem, ověření zkouškou naprázdno a nakrátko:

ΔP_0 (W), i_0 (%), ΔP_k (W), $z_k = u_k$ (%), S_n (VA), U_n (V)

$u_k \approx 4 \div 14\%$ (roste s výkonem TRF)

$p_k \approx 0,1 \div 1\%$ (klesá s výkonem TRF)

$p_0 \approx 0,01 \div 0,1\%$ (klesá s výkonem TRF)



- příčná větev – zkouška naprázdno:

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

- podélná větev – zkouška nakrátko:

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

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

Komplexní výkon ve střídavých sítích

$$\begin{aligned} 3f \quad P &= 3U_f I \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad (\text{W}) \\ Q &= 3U_f I \sin \varphi = \sqrt{3}UI \sin \varphi \quad (\text{VAr}) \\ S &= 3U_f I = \sqrt{3}UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{VA}) \end{aligned}$$

Komplexně (1f)

$$\hat{S}_f = P_f \pm jQ_f = U_f I (\cos \varphi \pm j \sin \varphi) = S_f e^{\pm j\varphi}$$

Znaménko dle konvence.

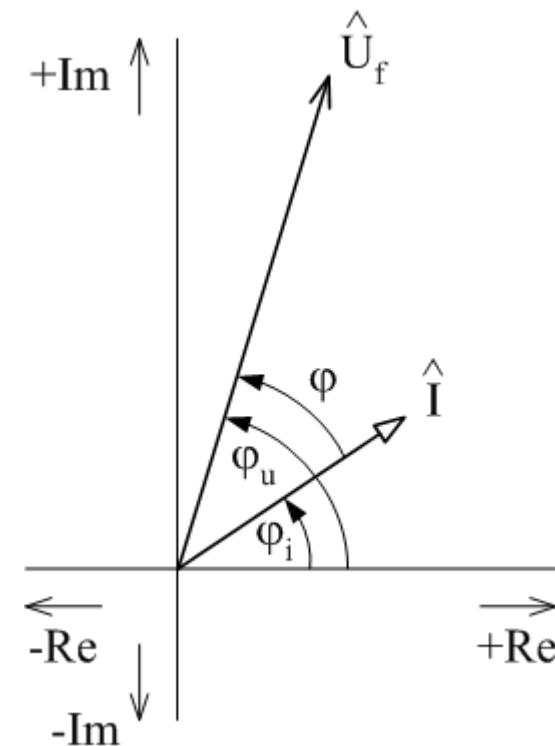
Induktivní zatížení

$$\hat{U}_f = U_f e^{j\varphi_u}, \quad \hat{I}_f = I e^{j\varphi_i}$$

Komplexní sdružení proudu

$$\hat{S}_f = \hat{U}_f \hat{I}^* = U_f I e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = U_f I e^{j\varphi}$$

$$\hat{S}_f = \hat{U}_f \hat{I}^* = P_f \pm jQ_f \begin{array}{l} \text{IND} \\ \text{KAP} \end{array}$$

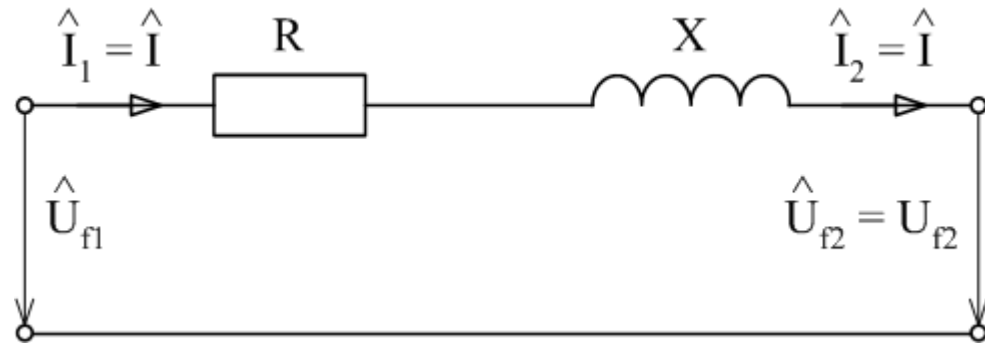


Trojfázová vedení nn, vn

Uplatní se podélné parametry, pro nn $X \rightarrow 0$.

3f vedení vn, 1 zátěž na konci

Symetrické zatížení $\rightarrow$ jednofázové schéma, provozní parametry.



Komplexní úbytek napětí

$$\Delta \hat{U}_f = \hat{Z}_l \hat{I} = (R + jX) (\hat{I}_c \mp j \hat{I}_j) \begin{matrix} \text{IND} \\ \text{KAP} \end{matrix}$$

$$\Delta \hat{U}_f = R \hat{I}_c \pm X \hat{I}_j + j(X \hat{I}_c \mp R \hat{I}_j) \begin{matrix} \text{IND} \\ \text{KAP} \end{matrix}$$

velikost

fáze

Fázorový diagram (zadáno U_{f2} , I , φ_2)
(úhel ν obvykle malý, do 3°)

Po zanedbání imaginární části a úpravách

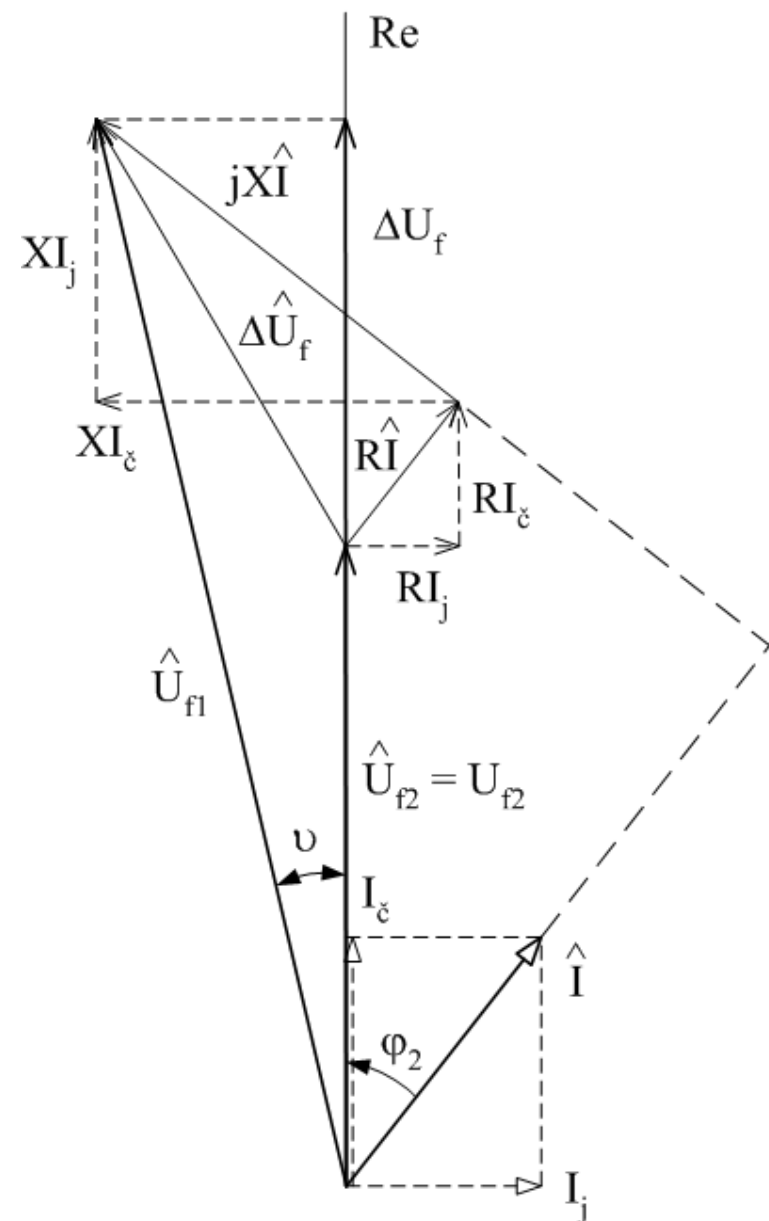
$$\Delta U_f = \frac{R3U_f I_{\check{c}} \pm X3U_f I_j}{3U_f} = \frac{RP \pm XQ}{3U_f}$$

3f ztráty činného výkonu

$$\begin{aligned} \Delta \hat{S} &= 3\Delta \hat{U}_f \hat{I}^* = 3\hat{Z}_1 \hat{I} \cdot \hat{I}^* = 3\hat{Z}_1 I^2 = \\ &= 3(R + jX)I^2 = 3RI^2 + j3XI^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P = 3RI^2 = 3R(I_{\check{c}}^2 + I_j^2) \quad (W; \Omega, A)$$

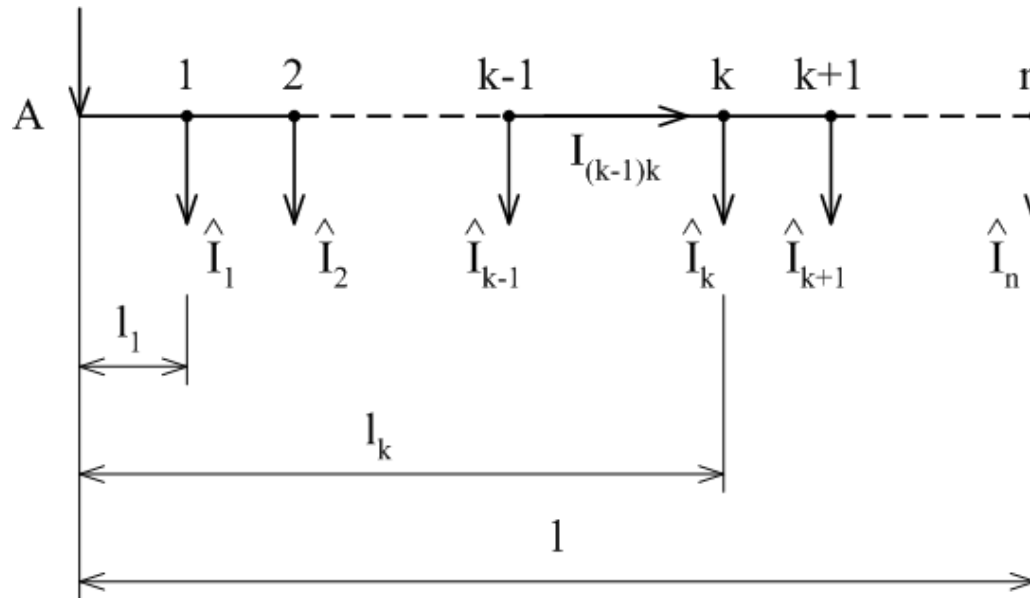
! I jalový proud způsobuje činné ztráty!
→ kompenzace jalového výkonu



3f vedení vn jednostranně napájené

Konstantní podélná impedance

$$\hat{Z}_{l_1} = R_1 + jX_1 \quad (\Omega / \text{km})$$



Úbytek napětí na konci (nemusí být největší, záleží na charakteru odběrů)

$$\Delta \hat{U}_{fAn} = \hat{Z}_{l_1} \sum_{k=1}^n l_k \hat{I}_k = \hat{Z}_{l_1} \sum_{k=1}^n (l_k - l_{(k-1)}) \cdot \sum_{y=k}^n \hat{I}_y$$

superpozičně

adičně

Po zanedbání imag. části

$$\Delta U_{fAn} \doteq R_1 \sum_{k=1}^n l_k I_{\check{k}} \pm X_1 \sum_{k=1}^n l_k I_{jk} \quad \begin{matrix} \text{IND} \\ \text{KAP} \end{matrix}$$

$$\Delta U_{fAn} \doteq \frac{R_1 \sum_{k=1}^n l_k P_k \pm X_1 \sum_{k=1}^n l_k Q_k}{3U_f} \quad \begin{matrix} \text{IND} \\ \text{KAP} \end{matrix}$$

Úbytek napětí do bodu X (superpozičně)

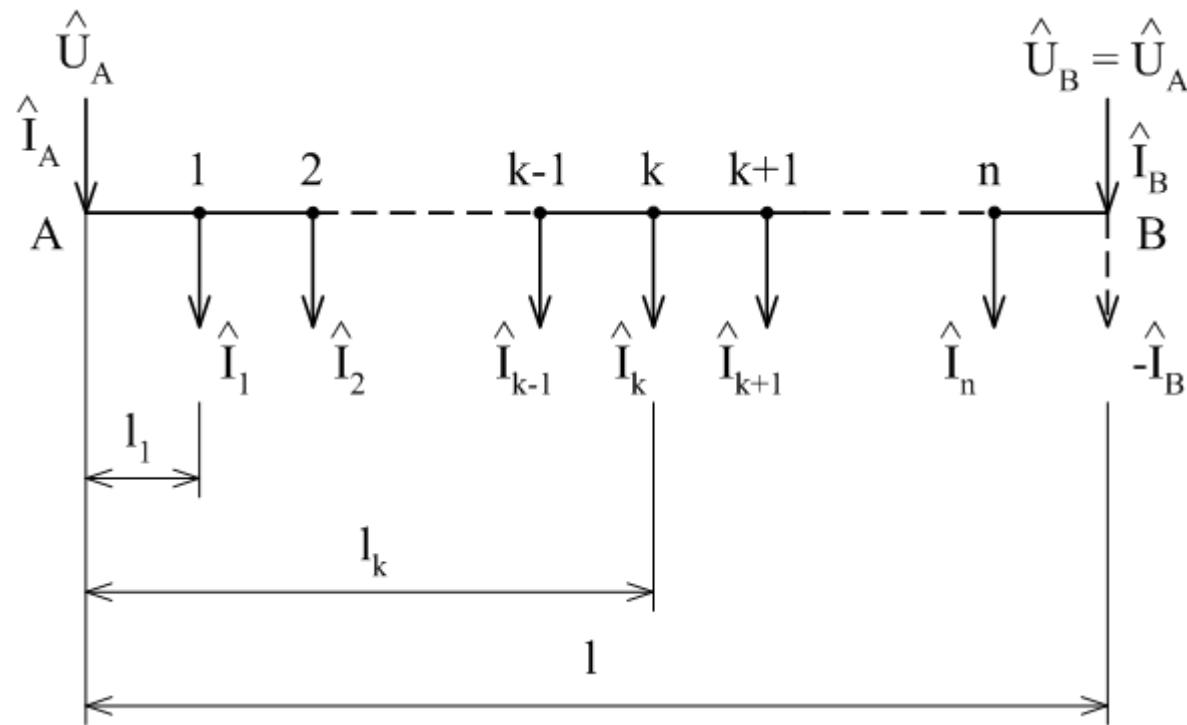
$$\Delta \hat{U}_{fAX} = \hat{Z}_{l_1} \sum_{k=1}^X l_k \hat{I}_k + \hat{Z}_{l_1} l_{AX} \sum_{k=X+1}^n \hat{I}_k$$

Pozn. Ztráty lze počítat pouze adičně!

$$\Delta P_{(k-1)k} = R_1 (l_k - l_{(k-1)}) \cdot I_{(k-1)k}^2 \quad (W; \Omega m, m^2, m, A)$$

$$\Delta P = \sum_{k=1}^n \Delta P_{(k-1)k}$$

3f vedení vn dvoustranně napájené



Okružní vedení, vyšší spolehlivost dodávky.

Okruh: napáječ jako záporný odběr, nulový úbytek napětí

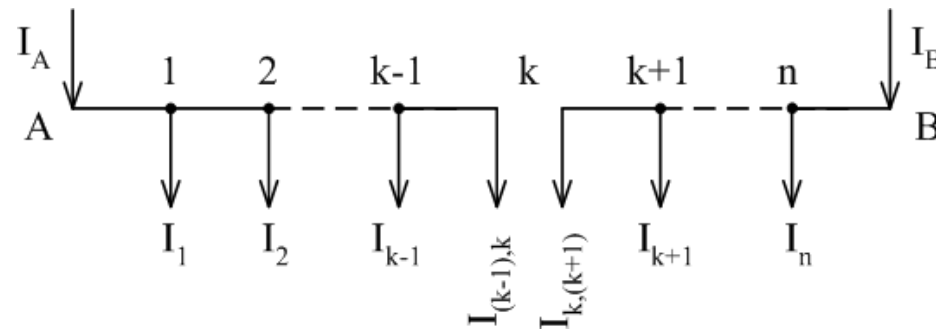
$$\Delta \hat{U}_{AB} = \hat{U}_A - \hat{U}_B = 0 = \hat{Z}_{l_1} \sum_{k=1}^n l_k \hat{I}_k - \hat{Z}_{l_1} l \cdot \hat{I}_B$$

Momentové věty

$$\hat{I}_B = \frac{\sum_{k=1}^n l_k \hat{I}_k}{1} \quad \hat{I}_A = \frac{\sum_{k=1}^n (1 - l_k) \hat{I}_k}{1} \quad \hat{I}_A + \hat{I}_B = \sum_{y=1}^n \hat{I}_y$$

(V principu jde o proudový dělič pro každý odběr.)

Změna znaménka činného a jalového proudu může být v různých bodech
→ maximální úbytek napětí kontrolovat ve všech bodech sítě.



Zkraty v ES

Zkrat:

- příčná porucha, prudká havarijní změna v ES
- nejrozšířenější porucha v ES

Vznik zkratu:

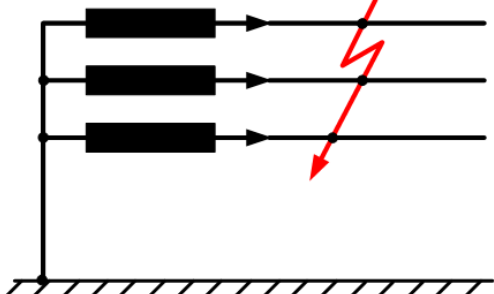
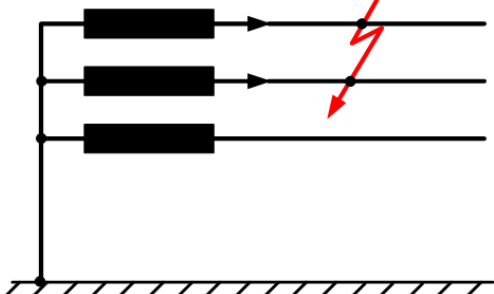
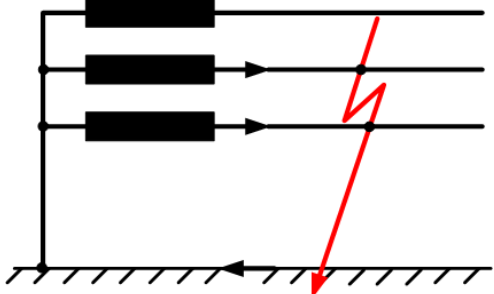
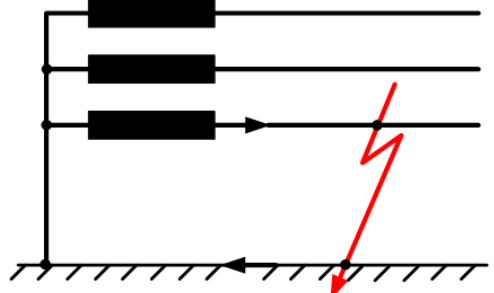
- poruchové spojení fází navzájem nebo fáze (fází) se zemí v soustavě s uzemněným uzlem

Hlavní příčiny zkratu:

- porucha izolace způsobená přepětím
- přímý úder blesku
- zestárnutí izolačních materiálů
- přímé poškození venkovních vedení a kabelů

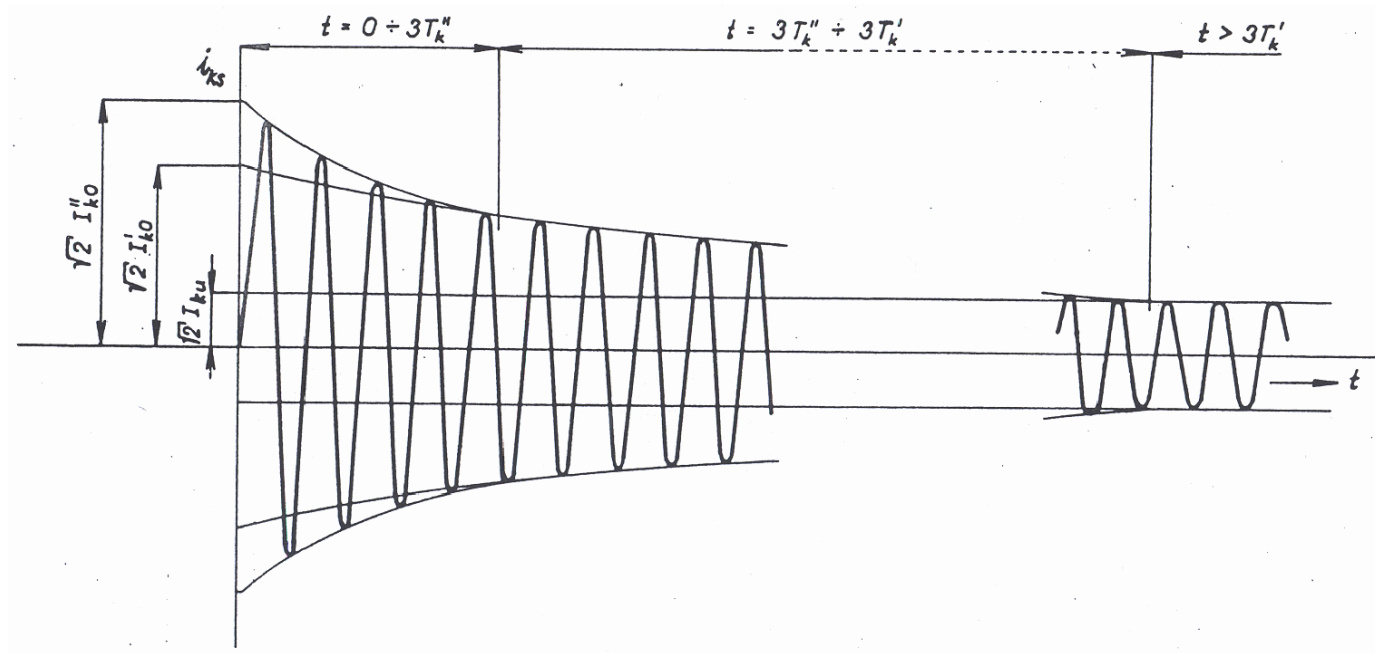
Následky zkratu:

- celková Z zkratem postižené části sítě se zmenšuje
- zvětšují se proudy $\Rightarrow$ tzv. zkratové proudy I_k
- snížení napětí v místech blízkých zkratu
- účinky I_k způsobují oteplení zařízení a silové namáhání
- problémy s vypínáním I_k , elektrický oblouk, přepětí vzniklá při zkratu
- porušení synchronismu paralelně spolupracujících ES
- rušení sdělovacích vedení $\Rightarrow$ indukovaná napětí

Druh zkratu	Schéma	Pravděpodobnost výskytu (%)		
		VN	110 kV	220 kV
3f		5	0,6	0,9
2f		10	4,8	0,6
2f zemní		20	3,8	5,4
1f		*	91	93,1

Časový průběh zkratového proudu

$U = U_{\max}$ v okamžiku zkratu $\rightarrow I_k$ začíná z nuly (min. hodnoty)

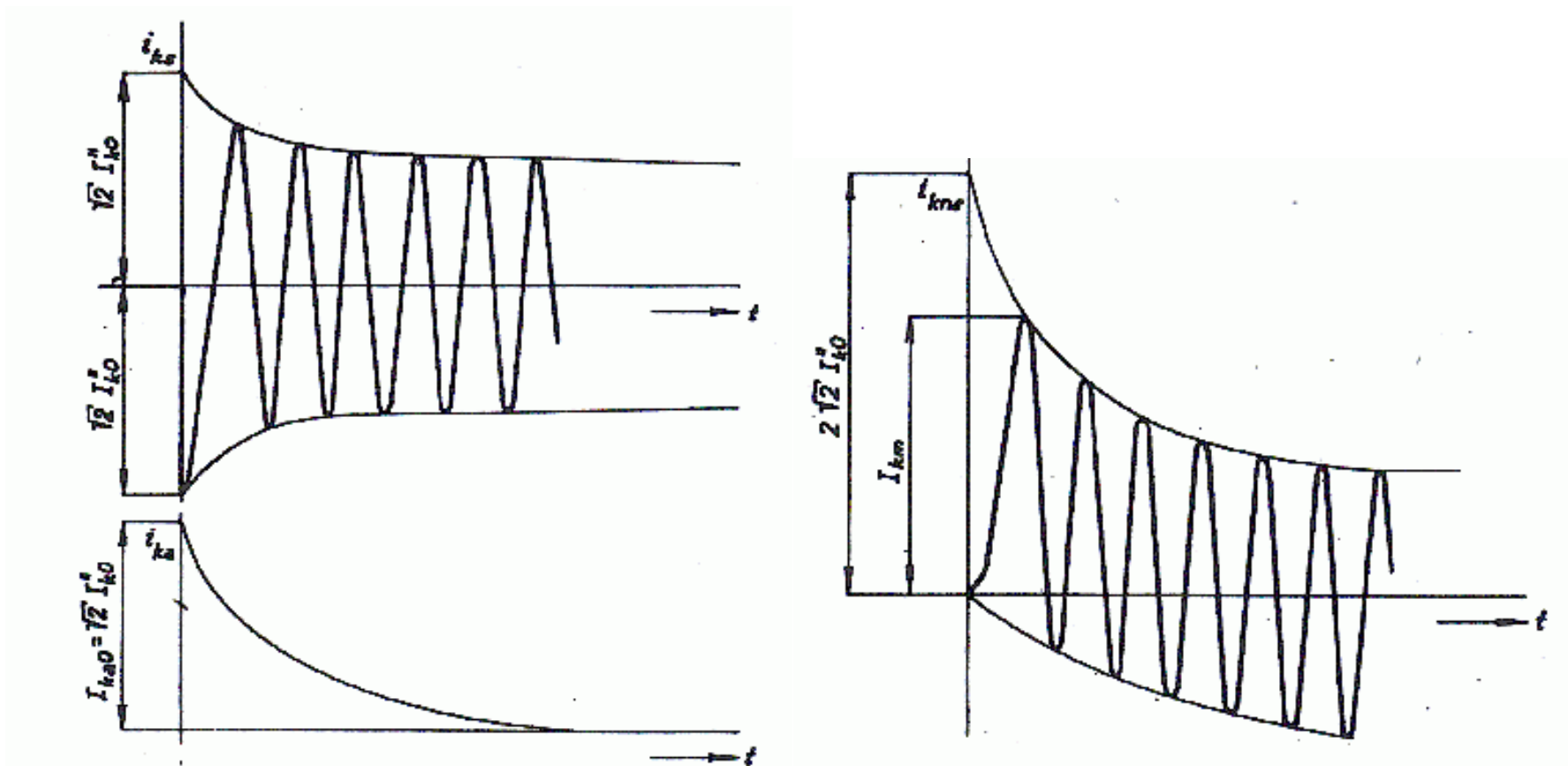


Složky zkratového proudu ($f = 50$ Hz):

- rázová - exponenciální obálka, T''_k
- přechodná - exponenciální obálka, T'_k
- ustálená - konstantní amplituda

Způsobeno proměnlivým chováním synchronního stroje při zkratu → výraznější při zkratech blízko zdrojů.

$U = 0$ v okamžiku zkratu → I_k začíná z max. hodnoty



Účinky zkratových proudů

Silové účinky

Vliv zejména u pevně uložených tuhých vodičů, podpěrných izolátorů, odpojovačů, konstrukčních prvků,...

U AC frekvence sil $2f \rightarrow$ dynamické namáhání.

Síla na vodič v mag. poli

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha = \mu \frac{I}{2\pi a} I \cdot l \cdot \sin \alpha \approx k \frac{I^2}{a} l \quad (\text{N})$$

Nejvyšší síla odpovídá nejvyšší okamžité hodnotě proudu $\rightarrow$ nárazový zkratový proud I_{km} (první amplituda po vzniku zkratu)

$$I_{\text{km}} = \kappa \sqrt{2} I''_{\text{k0}} \quad (\text{A})$$

κ – nárazový činitel podle druhu sítě ($\kappa_{\text{nn}} = 1,8$; $\kappa_{\text{vvn}} = 1,7$)
teoretický rozsah $\kappa = 1 \div 2$

Tepelné účinky

Rozhodující zejména u volně uložených vodičů.

Dány akumulací tepla působením časové proměnného proudu po dobu trvání zkratu t_k (adiabatický děj).

Teplo vyvinuté ve vodičích

$$Q = \int_0^{t_k} R(\vartheta) \cdot i_k^2(t) dt \quad (\text{J})$$

Ekvivalentní oteplovací proud – efektivní hodnota proudu, která za dobu zkratu vyvolá stejné tepelné účinky skutečný zkratový proud

$$I_{ke}^2 t_k = \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt$$

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt} = k_e I''$$

Výpočet zkratů pomocí poměrných hodnot

Poměrné hodnoty – vztažené na dohodnutý základ, eliminace různých napěťových hladin.

vztažný výkon (3f)	S_v (VA)
vztažné napětí (sdružené)	U_v (V)
vztažný proud	I_v (A)
vztažná impedance	Z_v (Ω)

$$S_v = \sqrt{3} U_v I_v$$

$$Z_v = \frac{U_{vf}}{I_v}$$

Poměrná impedance

$$z = \frac{Z}{Z_v} = \frac{Z}{\frac{U_{vf}}{I_v}} = Z \frac{I_v}{U_{vf}} \frac{3U_{vf}}{3U_{vf}} = Z \frac{S_v}{3U_{vf}^2} = Z \frac{S_v}{U_v^2}$$

Počáteční rázový zkratový proud (3f zkrat)

$$I''_{k0} = |\hat{I}_A| = \frac{|\hat{U}_f|}{|\hat{Z}_1|}$$

$$Z_1 = z_1 \frac{U_v^2}{S_v}$$

$$I''_{k0} = \frac{\frac{U_v}{\sqrt{3}}}{z_1 \frac{U_v^2}{S_v}} = \frac{1}{z_1} \frac{S_v}{\sqrt{3} U_v} = \frac{1}{z_1} I_v$$

Počáteční rázový zkratový výkon

$$S''_{k0} = \sqrt{3} U_v I''_{k0} = \sqrt{3} U_v \frac{I_v}{z_1} = \frac{1}{z_1} S_v$$