

Elektroenergetika 2 (A1B15EN2)

LS 2016/2017

A1B15EN2 - Elektroenergetika 2 (2+2s) - sudý a lichý týden podle Časového plánu															
hodina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
čas	7:30 - 9:00		9:15 - 10:45		11:00 - 12:30		12:45 - 14:15		14:30 - 16:00		16:15 - 17:45		18:00 - 19:30		20:30
Pondělí															
Úterý									T2:C3-135 - Pře J. Švec, J. Tlustý 1(88 stud.)						
Středa															
Čtvrtek	T2:F1-114 - Cvi 107(0 stud.)	T2:F1-114 - Cvi J. Švec, M. Čerňan 105(18 stud.)	T2:F1-114 - Cvi L. Straka 101(18 stud.)	T2:F1-114 - Cvi L. Straka 102(18 stud.)	T2:F1-114 - Cvi J. Švec, M. Čerňan 103(18 stud.)	T2:F1-114 - Cvi M. Čerňan 104(16 stud.)	T2:F1-114 - Cvi 106(0 stud.)								
Pátek															
Přednášky			Cvičení				Laboratoře				Ostatní				

Témata

- Elektrické parametry vedení a prvků ES
- Stejnoseměrná a střídavá vedení nn, vn
- Vedení vvn, náhradní články
- Uzlové sítě
- Vlny na vedení
- Zkratky
- Zemní spojení
- Stabilita přenosu
- Elektrické ochrany
- Elektrické stanice
- Uzemňování
- Dimenzování

Literatura

- [1] Fejt, Z., Čermák, J.: Elektroenergetika. Skripta ČVUT, 1985
- [2] Němeček, F.: Přenos a rozvod elektrické energie. Skripta ČVUT, 1983
- [3] Trojánek, Z., Hájek, J., Kvasnica, P.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, 1987
- [4] Fencel, F.: Elektrický rozvod a rozvodná zařízení. Skripta ČVUT, 2009
- [5] Fejt, Z., Němeček, F.: Elektroenergetika I: Příklady. Skripta ČVUT, 1984
- [6] www.powerwiki.cz
- [7] H. Saadat: Power system analysis. USA, McGraw-Hill, 1999

- [8] Blume, Steven Warren. Electric power system basics: for the nonelectrical professional [online]. Hoboken: Wiley, 2007 [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: <<http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9780470185810>>. ISBN 978-0-470-18581-0.
chap. 3, 4, spíše USA
- [9] El-Hawary, M. E. Introduction to electrical power systems [online]. New York: Wiley, 2008. IEEE Press series on power engineering [cit. 2013-02-08]. Dostupné z:

<<http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9780470411377>>. ISBN 978-0-470-41137-7.

chap. 3, 4, 5, 7, 8

[10] Hase, Yoshihide. Handbook of power system engineering. Chichester: Wiley, ©2007. xxvi, 548 s. ISBN 9780470033678.

chap. 1, 2, 3, 5, 8, 12, 14, 18

[11] Kasicki, Ismail. Analysis and design of low-voltage power systems: an engineer's field guide. Weinheim: Wiley, ©2002. xxii, 387 s. ISBN 9783527602339.

chap. 8, 10, 12, 13, 15

[12] Kasikci, Ismail. Short circuits in power systems: a practical guide to IEC 60909. Weinheim: Wiley, ©2002. xvi, 262 s. ISBN 9783527600465.

chap. 1, 6, 7, 8, 10, 11, 13

[13] Horowitz, Stanley H. a Arun G. Phadke. Power system relaying. 3rd ed. Chichester: Wiley, ©2008. xvi, 331 s. ISBN 9780470758786.

- zápočet – semestrální práce
- zkouška – 3 příklady + 2 teoretické otázky

Elektrické parametry venkovních vedení

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
 $X_1 = \omega L_1 = 2\pi f L_1$ (Ω / km)
- kapacitní vodivost (susceptance)
 $B_1 = \omega C_1 = 2\pi f C_1$ (S / km)
- podélná impedance
 $\hat{Z}_{11} = R_1 + jX_1$ (Ω / km)

- příčná admittance

$$\hat{Y}_{q1} = G_1 + jB_1 \quad (\text{S/km})$$

- 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.

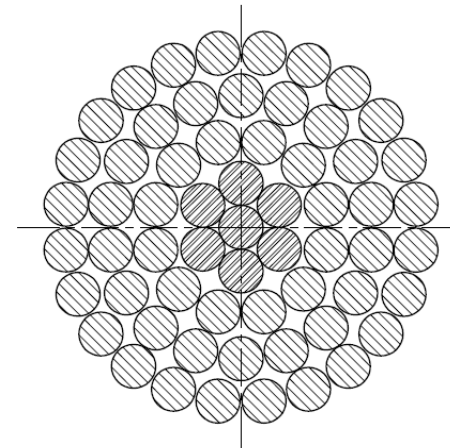
- uvažujeme souměrné napájení a zatížení
- síť nn – převažuje R
 - vn – R, L (při poruchách C)
 - vvn – R, L, G, C (rozprostřené par.)

Vodiče venkovních vedení

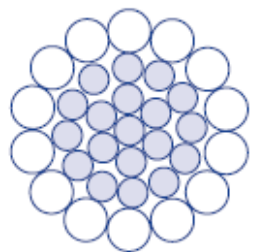
- plný průřez nebo lana (1 nebo více materiálů)
- lana Cu, Al, slitiny, kompozity, optická vlákna, vysokoteplotní materiály
- AlFe (Fe – nosná duše, Al – vodivý plášť) = ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)

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

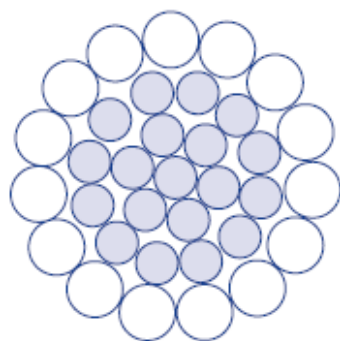
- př. označení
 - 382-AL1/49-ST1A
 - 350AlFe4
 - AlFe450/52



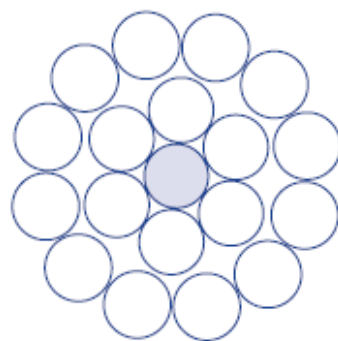
Lano	Konstrukce	Fe				Al			Lano		
		poč.dr.	Prům.dr	Prům.duše	Průřez	poč.dr.	Prům.dr	Průřez	Půměr	Průřez	R _{DC+20}
		ks	mm	mm	mm ²	ks	mm	mm ²	mm	mm ²	Ω·km ⁻¹
350 AlFe 4	1+6+12/12+18	19	2,36	11,80	83,11	30	3,75	331,34	26,80	414,45	0,087
450 AlFe 8	3+9/18+14+20	12	2,36	9,90	52,49	18+34	1,90+3,75	426,55	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



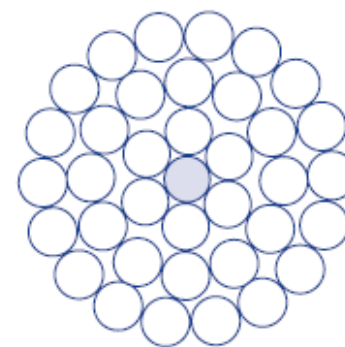
14Al/19Fe



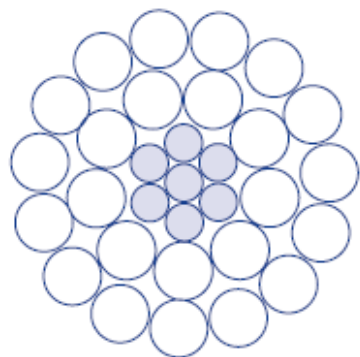
15Al/19Fe



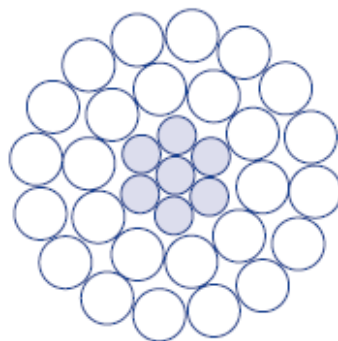
18Al/1Fe



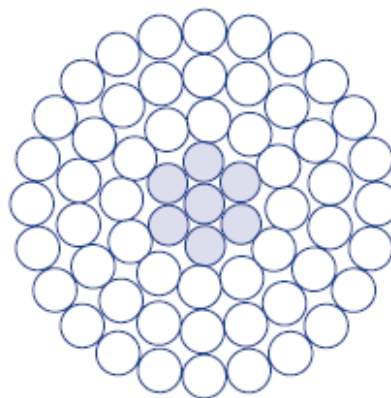
36Al/1Fe



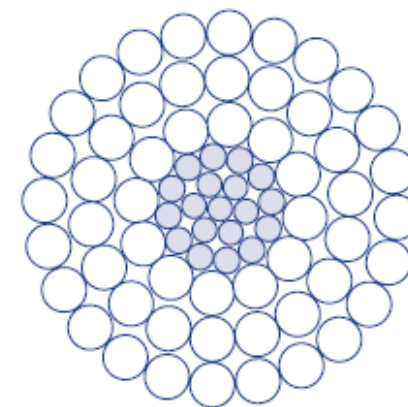
24Al/7Fe



26Al/7Fe

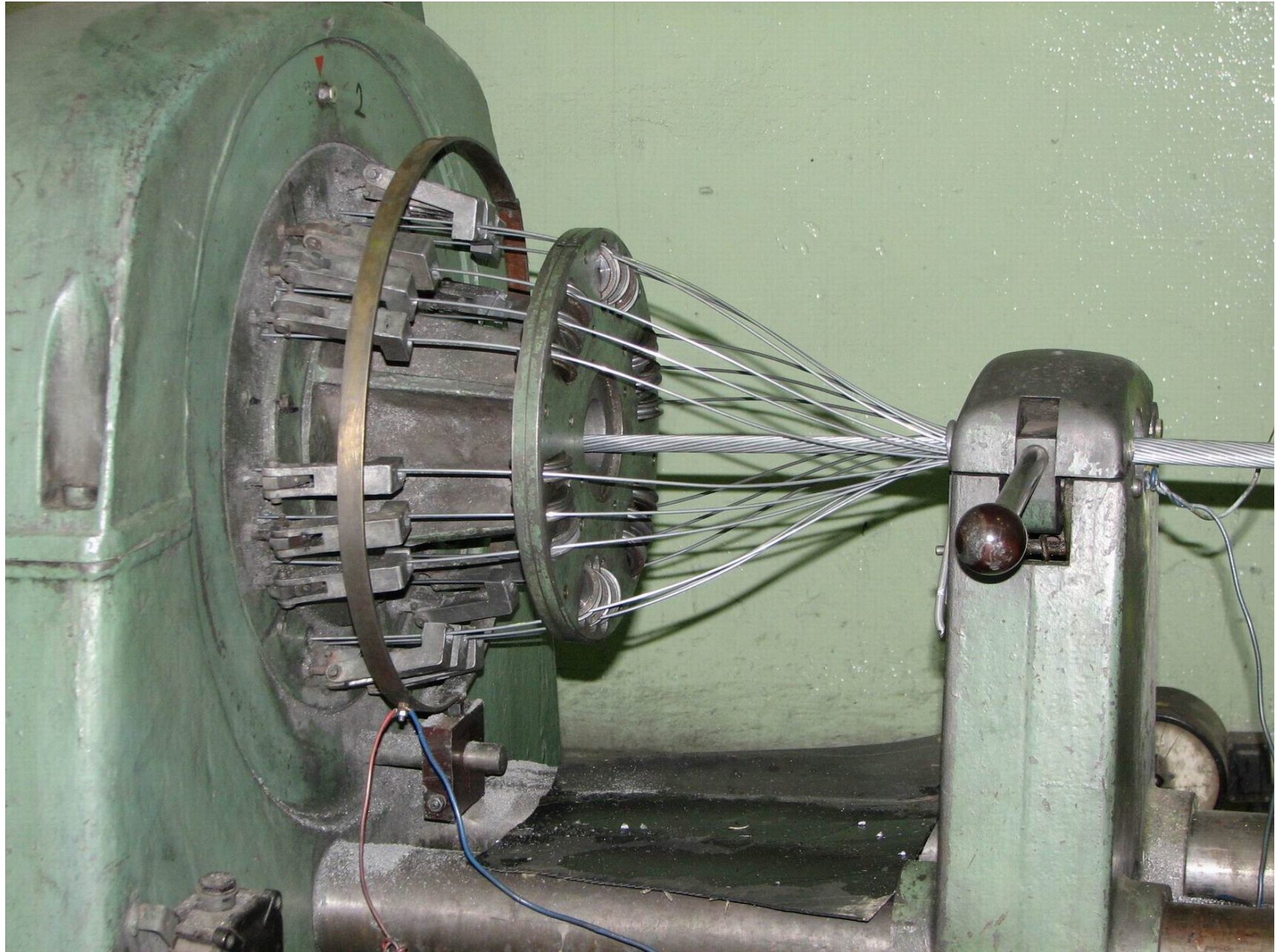


54Al/7Fe



54Al/19Fe





Rezistance (činný odpor)

Velikost ovlivňují:

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

Při průchodu ss proudem (při 20°C)

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

$$\text{Cu: } \rho_0 = 1,78 \cdot 10^{-8} \quad (\Omega\text{m})$$

$$\text{Al: } \rho_0 = 2,81 \cdot 10^{-8} \quad (\Omega\text{m})$$

$$\text{Fe: } \rho_0 = 12,8 \cdot 10^{-8} \quad (\Omega\text{m})$$

$$\rho_{\text{AlFeDC}} = \frac{\rho_{\text{Al}} \cdot S_{\text{Al}} + \rho_{\text{Fe}} \cdot S_{\text{Fe}}}{S_{\text{Al}} + S_{\text{Fe}}}$$

Vliv teploty

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

$$\text{Cu: } \alpha = 3,93 \cdot 10^{-3} \quad (\text{K}^{-1})$$

$$\text{Al: } \alpha = 4,03 \cdot 10^{-3} \quad (\text{K}^{-1})$$

$$\text{Fe: } \alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \quad (\text{K}^{-1})$$

$$\beta \approx 10^{-6} \text{ K}^{-2} \rightarrow \text{při běžném } \Delta T \text{ zanedbáno}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{Al}} \cdot \alpha_{\text{Fe}} \left(\frac{\rho_{\text{Al}}}{S_{\text{Al}}} + \frac{\rho_{\text{Fe}}}{S_{\text{Fe}}} \right) + \alpha_{\text{Al}} \cdot \frac{\rho_{\text{Fe}}}{S_{\text{Fe}}} + \alpha_{\text{Fe}} \cdot \frac{\rho_{\text{Al}}}{S_{\text{Al}}}}{\frac{\rho_{\text{Al}}}{S_{\text{Al}}} + \frac{\rho_{\text{Fe}}}{S_{\text{Fe}}} + \alpha_{\text{Al}} \cdot \frac{\rho_{\text{Al}}}{S_{\text{Al}}} + \alpha_{\text{Fe}} \cdot \frac{\rho_{\text{Fe}}}{S_{\text{Fe}}}}$$

Vliv AC proudu např.

$$k_{\text{ac}} = 1 + 0,0375 \cdot 10^{-12} \cdot \left[\frac{(r_2 - r_1) \cdot f}{r_2 \cdot R_{\text{1dc0}}} \right]^2 \quad (-; \text{m, m, Hz, m, } \Omega \cdot \text{m}^{-1})$$

$$k_{ac} = 1,004 \div 1,3 \quad (-)$$

empiricky podle počtu vrstev Al (Fe jádrem 2÷3% proudu)

dvouvrstvá $k_{ac} = 1,04$

třívrstvá $k_{ac} = 1,06$

čtyřvrstvá $k_{ac} = 1,05$

V katalogu obvykle R_{1dc0}

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

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

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

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

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

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

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

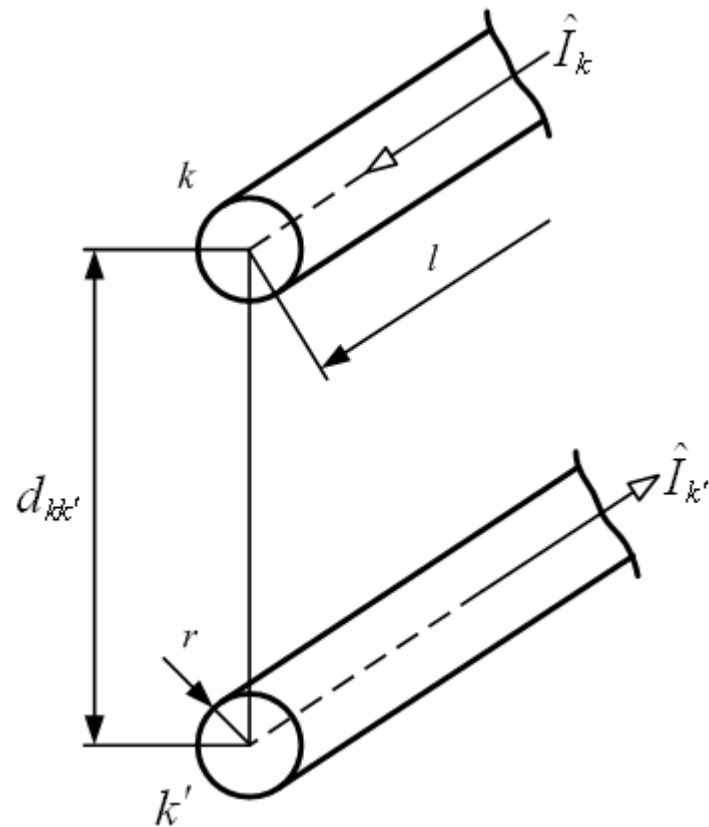
AlFe350 $R_{1dc0} \sim 0,09 \Omega / \text{km}$

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

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

Indukčnost a podélná impedance

Indukčnost a impedance ve smyčce



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

Vnitřní indukčnost vodiče (mag. tok uvnitř vodiče)

$$L_{ik} = \frac{\mu_0 \mu_{rv}}{8\pi} \alpha \quad (\text{H/m; H/m, -, -})$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

μ_{rv}relativní permeabilita vodiče

α nerovnoměrnost rozdělení proudu po průřezu

Vnější indukčnost vodiče ve smyčce (mag. tok vně vodiče)

$$L_{ek} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r} \quad (\text{H/m; H/m, m, m})$$

Vlastní indukčnost

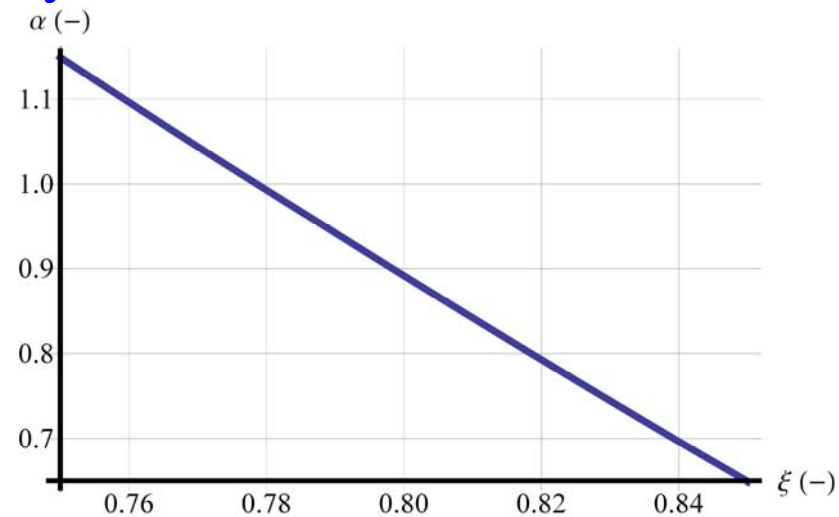
$$L_v = L_{ik} + L_{ek} = \frac{\mu_0 \mu_{rv}}{8\pi} \alpha + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r}$$

$$L_v = 0,05 \mu_{rv} \alpha + 0,46 \log \frac{d}{r} = 0,46 \log \frac{d}{\xi r} \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}; \text{m, m})$$

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

$$\xi = 10^{\frac{0,05\mu_{rv}\alpha}{0,46}}$$

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

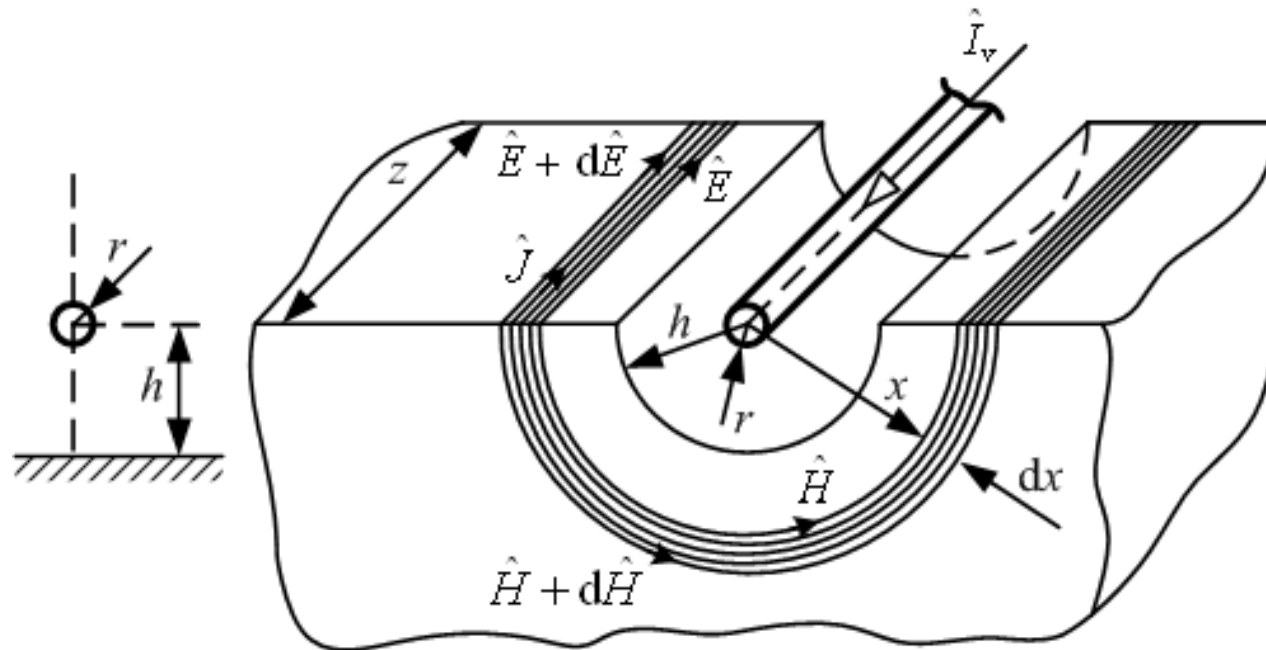


Impedance jednoho vodiče ve smyčce 2 vodičů

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

Vlastní impedance smyčky vodič-zem

- země jako vodič stacionárního střídavého proudu
- Rűdenbergova koncepce
- hustota střídavého proudu v zemi je nerovnoměrná, největší přímo pod vedením



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

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

$$R_{1g} = \pi^2 f \cdot 10^{-7} \quad (\Omega \cdot \text{m}^{-1}; \text{Hz})$$

$$\text{pro } f = 50 \text{ Hz je } R_{1g} = 0,0495 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

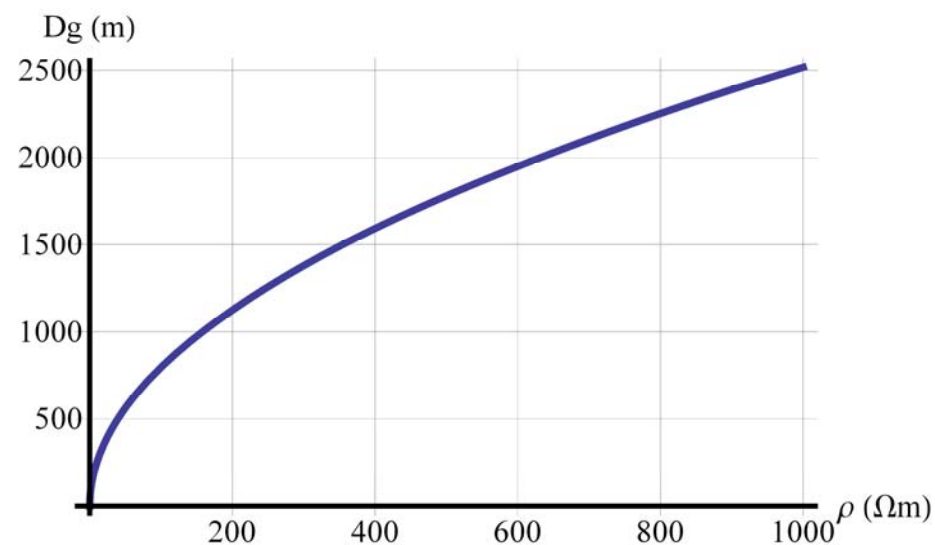
$$\hat{Z}_{kk} = R_{1k} + \pi^2 f \cdot 10^{-4} + j\omega \cdot 10^{-3} \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{\xi \cdot r} \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$$

Hloubka fiktivního vodiče v zemi, který svými účinky nahrazuje proud v zemi

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

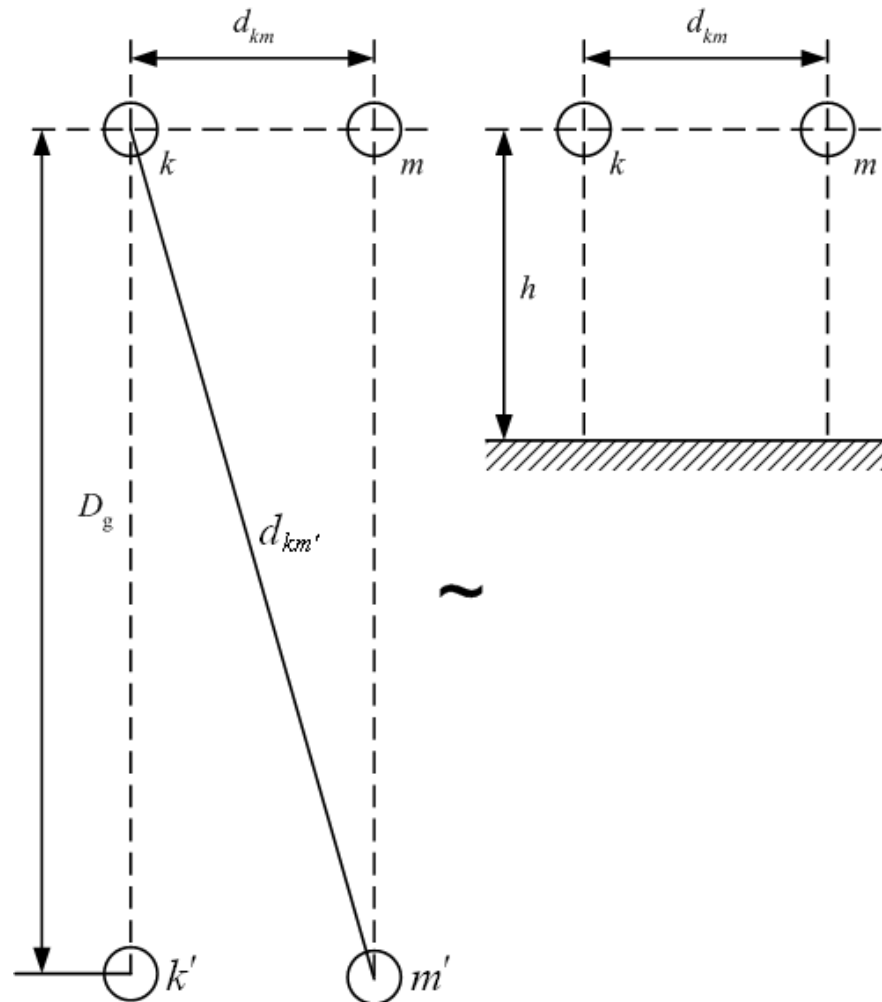
$D_g \sim 100x \text{ m}$, tj. $h \ll D_g$
 ρ ...rezistivita země

Typ zeminy	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)
rašelina	30
ornice a jíl	100
vlhký písek	200 - 300
suchý štěrk a písek	1000 - 3000
kamenitá půda	3000 - 10000



Vzájemná impedance 2 smyček vodič-zem

- dvouvodičové jednofázové vedení $d_{km} \leq h$
- 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

Impedance jednoho vodiče ve smyčce

$$\Delta \hat{U}_{kv} = \hat{Z}_{kv} \cdot \hat{I}_k = \hat{Z}_{kk} \cdot \hat{I}_k + \hat{Z}_{km} \cdot \hat{I}_m$$

$$\hat{I}_k = -\hat{I}_m \Rightarrow \hat{Z}_{kv} = \hat{Z}_{kk} - \hat{Z}_{km}$$

Odtud po dosazení

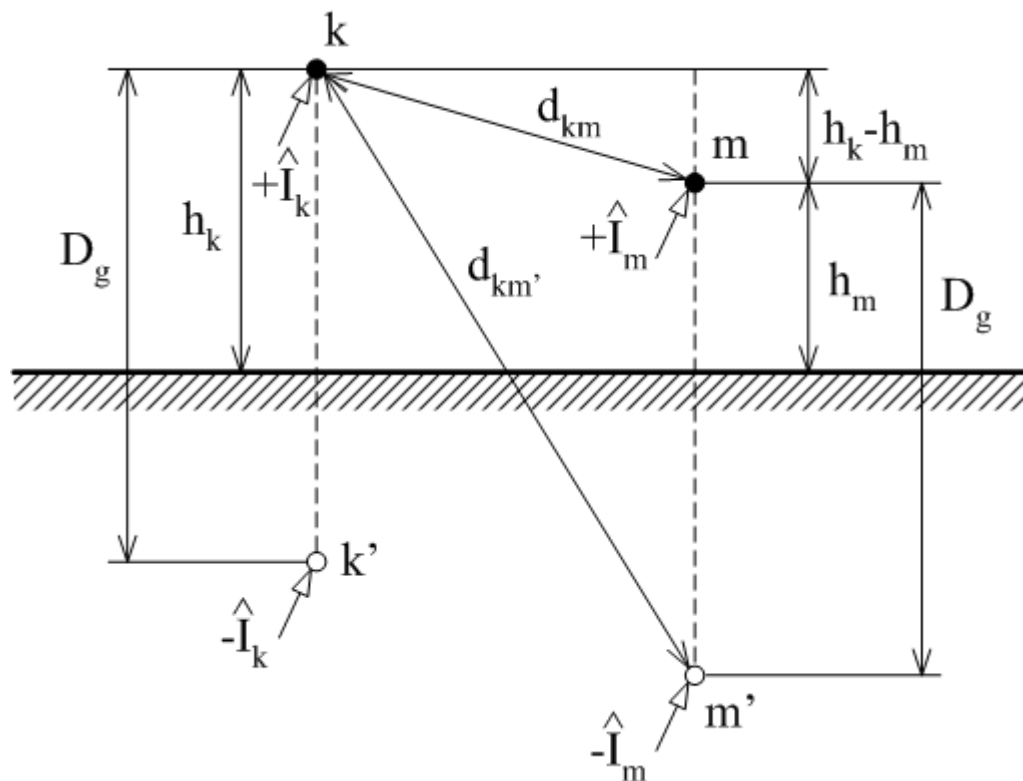
$$\hat{Z}_{kk} = R_{1k} + R_{1g} + j\omega \cdot 10^{-3} \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{\xi r} \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$$

$$\hat{Z}_{kv} = R_{1k} + j\omega \cdot 0,46 \cdot 10^{-3} \cdot \log \frac{d_{km}}{\xi r} \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$$

$$\hat{Z}_{km} = \hat{Z}_{kk} - \hat{Z}_{kv} = R_{1g} + j\omega \cdot 10^{-3} \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{d_{km}} \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$$

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 a impedance (smyčka k-k')

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

r_k ...poloměr k-tého vodiče

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

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

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

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

Úbytek napětí v k-tém vodiči

$$\Delta \hat{U}_k = \sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m \quad (\text{V / km})$$

(pro $m = k$ je $d_{kk} = \xi r_k$)

Provozní impedance (indukčnost) – 1 osamocenému vodiči vyvolá stejný úbytek napětí jako v soustavě n vodičů (může být komplexní, dána provozním stavem)

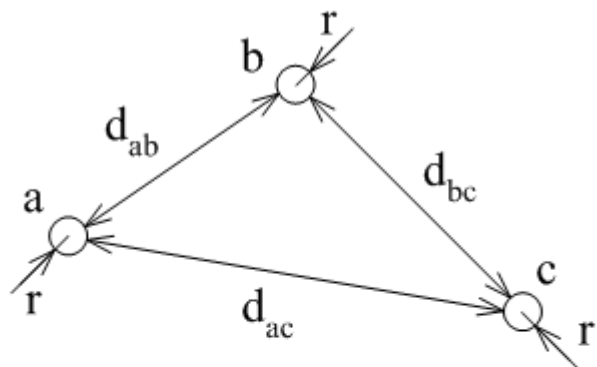
$$\Delta \hat{U}_k = \sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m = \hat{Z}_k \hat{I}_k \Rightarrow \hat{Z}_k = \frac{\sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m}{\hat{I}_k} \quad \hat{L}_k = \frac{\sum_{m=1}^n M_{km} \hat{I}_m}{\hat{I}_k}$$

n -vodičový systém

$$[\Delta \hat{U}] = j\omega [M_{km}] [\hat{I}]$$

Jednoduché (nesymetrické) trojfázové vedení

Symetrické zatížení



$$\hat{I}_a = \hat{I}_a$$

$$\hat{I}_b = \hat{a}^2 \hat{I}_a$$

$$\hat{I}_c = \hat{a} \hat{I}_a$$

$$\hat{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{+j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\hat{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

$$1 + \hat{a}^2 + \hat{a} = 0$$



Provozní indukčnosti

$$\hat{L}_a = \frac{M_{aa}\hat{I}_a + M_{ab}\hat{I}_b + M_{ac}\hat{I}_c}{\hat{I}_a} = M_{aa} + \hat{a}^2 M_{ab} + \hat{a} M_{ac}$$

$$\hat{L}_b = \frac{M_{ab}\hat{I}_a + M_{bb}\hat{I}_b + M_{bc}\hat{I}_c}{\hat{I}_b} = \hat{a} M_{ab} + M_{bb} + \hat{a}^2 M_{bc}$$

$$\hat{L}_c = \frac{M_{ac}\hat{I}_a + M_{bc}\hat{I}_b + M_{cc}\hat{I}_c}{\hat{I}_c} = \hat{a}^2 M_{ac} + \hat{a} M_{bc} + M_{cc}$$

Obecně

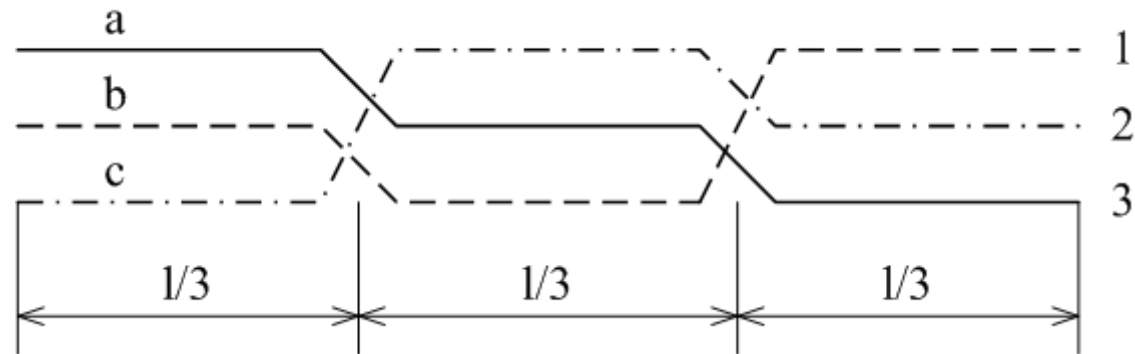
$$M_{aa} = M_{bb} = M_{cc} \quad M_{ab} \neq M_{bc} \neq M_{ac}$$

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

→ nestejně úbytky napětí (velikost i fáze) → napět'ová nesymetrie,
předávání činného výkonu mezi fázemi elmag. vazbou bez dalšího
zatěžování zdrojů → transpozice

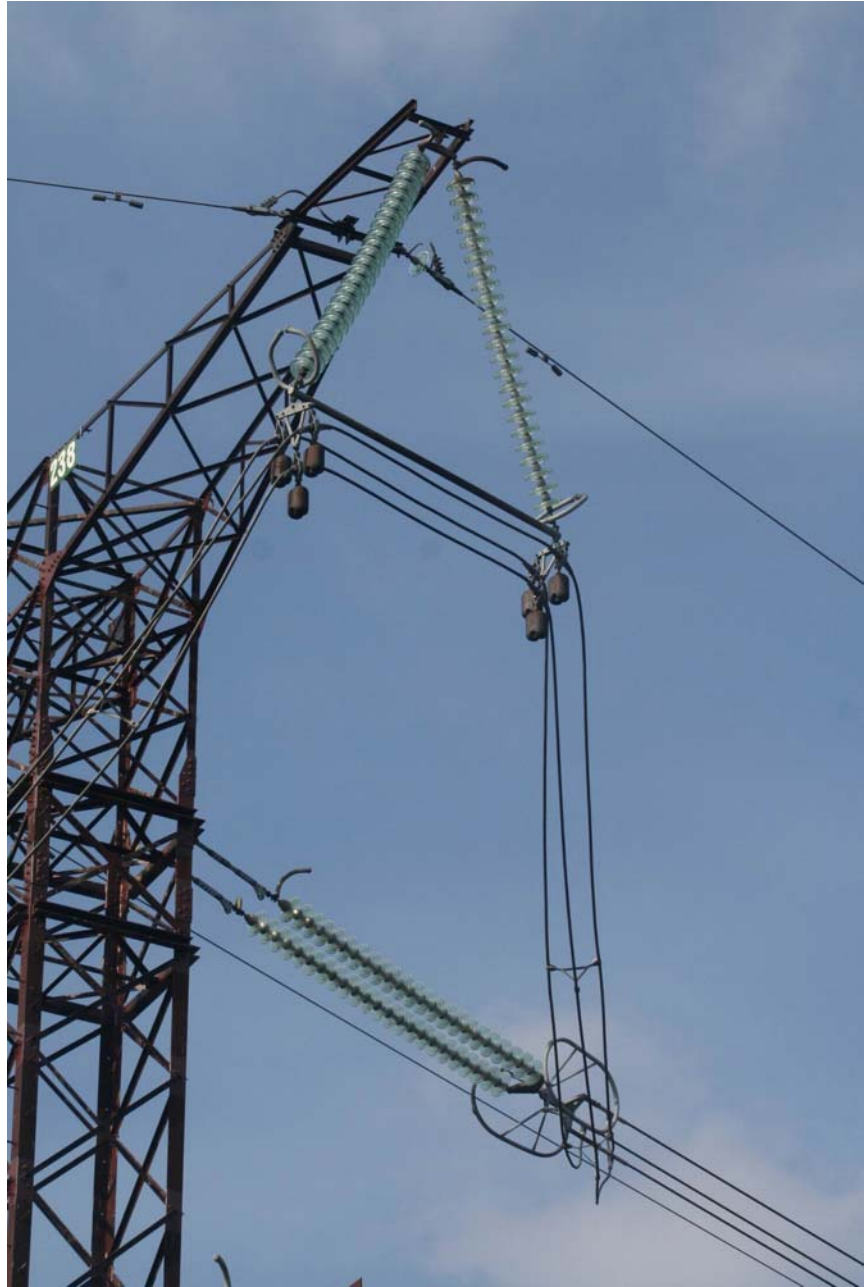
Transpozice 3f vedení

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



Úbytky napětí

$$\begin{pmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \end{pmatrix} = \frac{1}{3} j\omega \left\{ \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & M_{22} & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{33} & M_{13} & M_{23} \\ M_{13} & M_{11} & M_{12} \\ M_{23} & M_{12} & M_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{22} & M_{23} & M_{12} \\ M_{23} & M_{33} & M_{13} \\ M_{12} & M_{13} & M_{11} \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{pmatrix}$$



Označíme

$$M = \frac{1}{3}(M_{11} + M_{22} + M_{33})$$

$$M' = \frac{1}{3}(M_{12} + M_{13} + M_{23})$$

Potom

$$\begin{pmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} M & M' & M' \\ M' & M & M' \\ M' & M' & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{a}^2 \hat{I}_a \\ \hat{a} \hat{I}_a \end{pmatrix}$$

Provozní indukčnosti fází při transponovaném a symetricky zatíženém vedení jsou shodné a reálné:

$$L_a = M + \hat{a}^2 M' + \hat{a} M'$$

$$L_a = L_b = L_c = M - M'$$

Po dosazení

$$M = 0,46 \log \frac{D_g}{\xi r} \quad (\text{mH / km})$$

$$M' = 0,46 \log \frac{D_g}{d} \quad (\text{mH / km})$$

střední geometrická vzdálenost

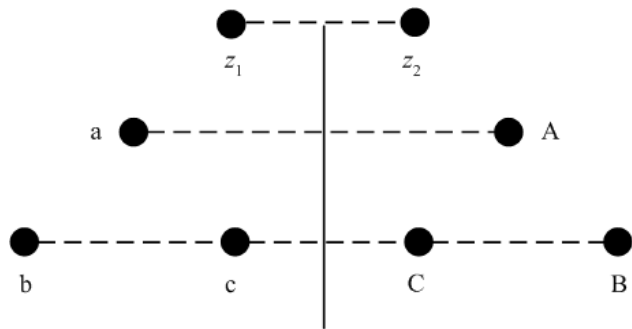
$$d = \sqrt[3]{d_{12} d_{13} d_{23}}$$

Výsledně

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

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

Dvojité vedení se dvěma zemnicími lany



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

Po úpravách lze napsat (předpoklad spojitého uzemnění zemnicích lan)

$$\begin{aligned}
 (\Delta \hat{U}_v) &= (\hat{Z}_{vv})(\hat{I}_v) + (\hat{Z}_{vV})(\hat{I}_V) + (\hat{Z}_{vz})(\hat{I}_z) \\
 (\Delta \hat{U}_V) &= (\hat{Z}_{Vv})(\hat{I}_v) + (\hat{Z}_{VV})(\hat{I}_V) + (\hat{Z}_{Vz})(\hat{I}_z) \\
 0 &= (\Delta \hat{U}_z) = (\hat{Z}_{zv})(\hat{I}_v) + (\hat{Z}_{zV})(\hat{I}_V) + (\hat{Z}_{zz})(\hat{I}_z)
 \end{aligned}$$

⇒ proudy v zemnicích lanech

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{I}}_z \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \left[\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{I}}_v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{I}}_v \end{pmatrix} \right]$$

Pro modifikované vedení

$$\begin{pmatrix} \Delta \hat{\mathbf{U}}_v \end{pmatrix} = \left[\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{vv} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{vz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zv} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{I}}_v \end{pmatrix} + \left[\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{vv} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{vz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zv} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{I}}_v \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta \hat{\mathbf{U}}_v \end{pmatrix} = \left[\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{vv} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{vz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zv} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{I}}_v \end{pmatrix} + \left[\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{vv} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{vz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{zv} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{I}}_v \end{pmatrix}$$

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

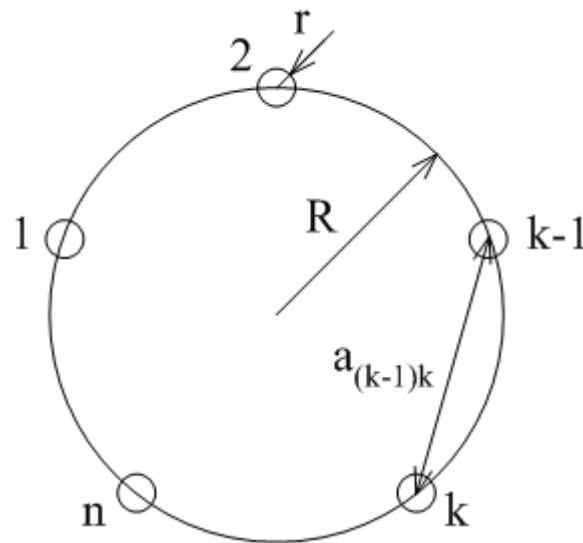
Vedení se svazkovými vodiči

Svazkový vodič

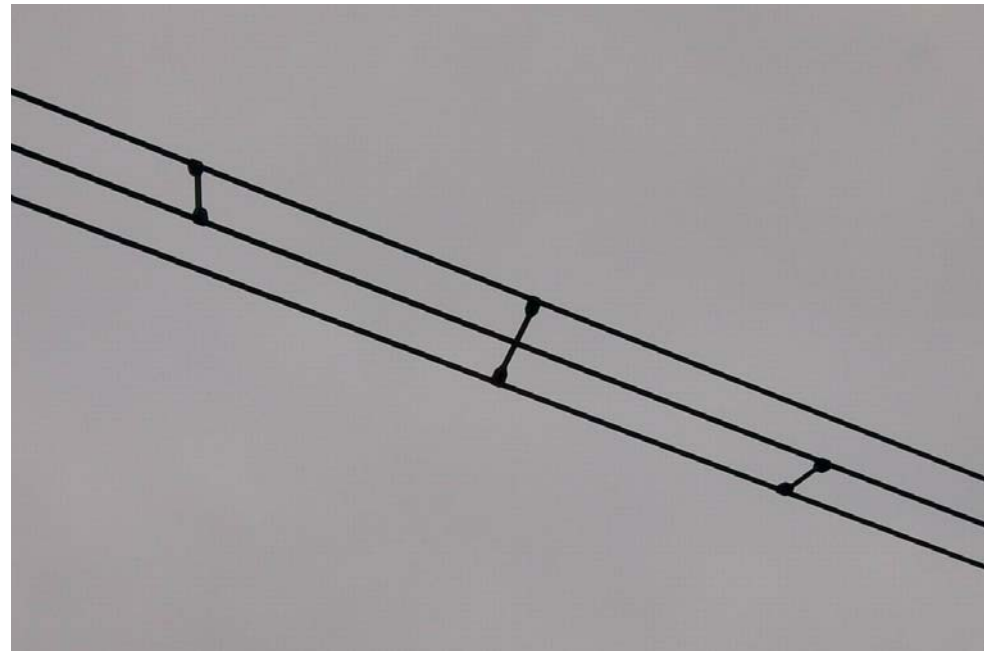
- jednu fázi tvoří n dílčích vodičů spojených paralelně
- uspořádání v pravidelném n -úhelníku
- zvyšuje počáteční napětí koróny
- od napětí 400 kV výše

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

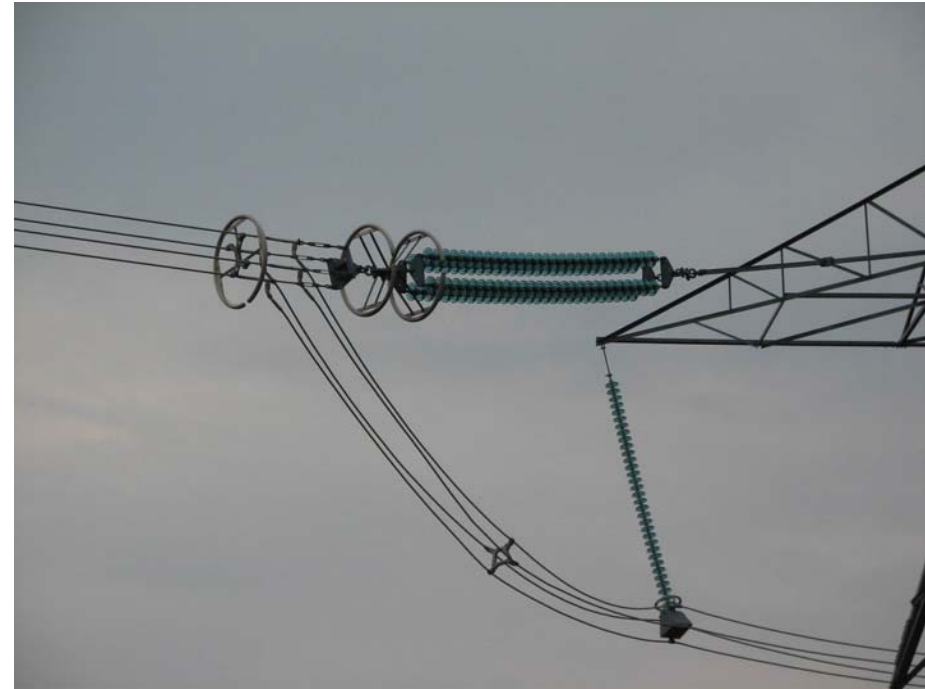
- $a_{400kV} = 40$ cm



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 ~ 0,35 Ω/km

110 kV X ~ 0,35÷0,4 Ω/km

220 kV X ~ 0,4 Ω/km

400 kV X ~ 0,3 Ω/km

750 kV X ~ 0,25 Ω/km

Netočivé reaktance

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

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.

Výpočetem 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

