

OPTIMÁLNÍ TRANSPOZICE VODIČŮ U DVOJITÝCH VENKOVNÍCH VEDENÍ

Petr Kropík, Lenka Šroubová

Katedra teoretické elektrotechniky, Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 26, Plzeň.

Abstrakt: V příspěvku je posuzován vliv vhodné transpozice vodičů u dvojitých venkovních vedení na rozložení elektrického a magnetického pole v blízkosti povrchu země. Konfigurace fází má vliv také na indukční a kapacitní vazby mezi vodiči. V práci je odvozen algoritmus pro posouzení variant uspořádání fází na vodiče dvou paralelních trojfázových vedení s ohledem na velikost indukčních úbytků napětí a je zavedena komplexní matice indukčností respektující nejen geometrickou nesymetrii vedení ale i rozložení fází na jednotlivé vodiče. Dále je uveden algoritmus pro určení nábojů vodičů a kapacitních vazeb v soustavách se zemnicími lany opět s ohledem na geometrickou nesymetrii vedení. Na základě provedených výpočtů lze učinit doporučení pro optimální návrh transpozice vodičů u dvojitých vedeních. Výpočty byly provedeny pomocí systému MATLAB.

ÚVOD

Vedení vvn a vn se pro přenos velkých výkonů často provozují jako dvojitá vedení, v důsledku geometrické blízkosti obou paralelních tras se mohou výrazně uplatňovat vzájemné kapacitní a indukční vazby jak mezi vodiči jednoho vedení, tak mezi vodiči obou vedení. K omezení vlivu kapacitních a indukčních vazeb a jejich závislosti na geometrické nesymetrii se tato vedení zpravidla projektují jako transponovaná. S ohledem na danou prostorovou konfiguraci však nemusí být toto opatření vždy stejně účinné. Vhodnou volbou uspořádání fází na vodiče při transpozici lze dosáhnout redukce elektrického a magnetického pole v okolí vedení, omezení indukčních a kapacitních vazeb a snížení negativních vlivů vedení na okolní prostředí.

ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO A MAGNETICKÉHO POLE V OKOLÍ VEDENÍ

Při výpočtu rozložení elektrického a magnetického pole v okolí dvou paralelních vedení (viz obr. 1) předpokládáme časově harmonicky proměnné veličiny a proudově i napěťově souměrnou soustavu. Uvažujeme rovnoběžné vodiče ve výšce h_i nad povrchem země, výpočet provedeme pro dvě varianty – pro výšku vodičů danou rozměry stožáru a výšku vodičů odpovídající minimální vzdálenosti vodičů od země (nejnižší bod řetězovky).

Kombinací všech možných uspořádání fází na fázové vodiče pro dvě paralelní vedení existuje celkem 36, z nichž šest je základních a ostatní vedou na stejné výsledky. Šest základních kombinací lze vyjádřit pomocí sloupců p_i matice P

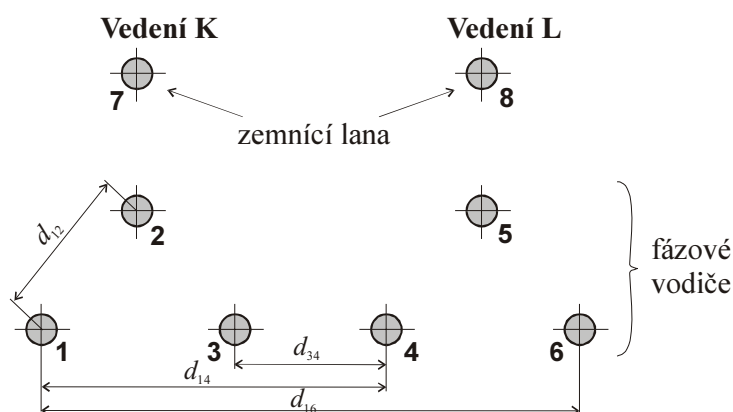
$$(1) P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & a & a^2 & a^2 & a \\ a^2 & a & 1 & 1 & a & a^2 \\ a & a^2 & a^2 & a & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

kde a je operátor natočení. Superpozicí jednotlivých složek fázoru intenzity elektrického pole od i -tého vodiče dostaneme (známe-li geometrickou konfiguraci vedení a velikost nábojů na jednotlivých vodičích, viz [2]) velikost intenzity elektrického pole v bodě M (obr. 2).

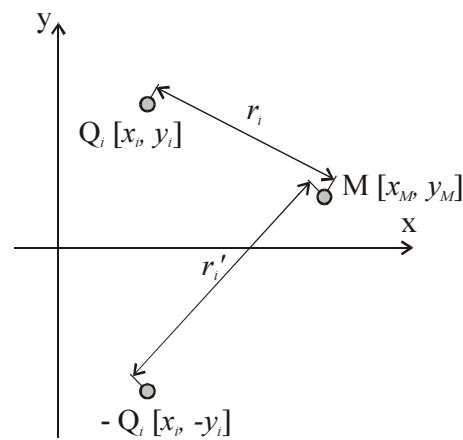
$$(2) E_{xM} = \sum_i E_{xi}(M), \quad E_{yM} = \sum_i E_{yi}(M), \quad E_M = \sqrt{|E_{xM}|^2 + |E_{yM}|^2}$$

Podobně velikost intenzity magnetického pole v bodě M je dána superpozicí složek fázoru intenzity magnetického pole v bodě M od i -tého vodiče protékajícího proudem I_i

$$(3) H_{xM} = \sum_i H_{xi}(M), \quad H_{yM} = \sum_i H_{yi}(M), \quad H_M = \sqrt{|H_{xM}|^2 + |H_{yM}|^2}$$

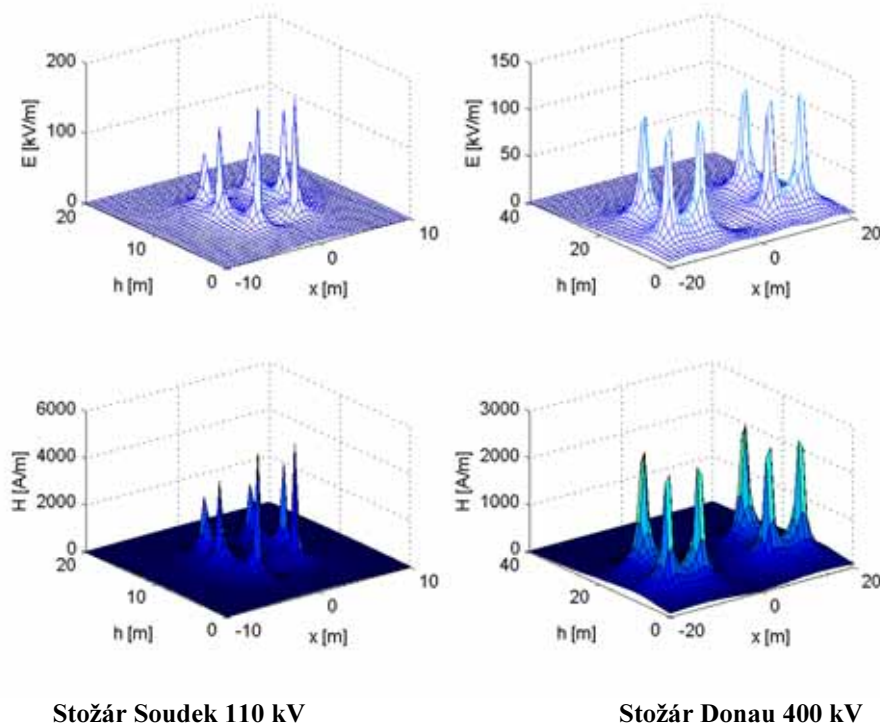


Obr. 1 Dvě paralelní vedení se dvěma zemnicími lany



Obr. 2 Výpočet intenzity el. pole v bodě M

Na obr. 3 je znázorněna závislost velikosti intenzity elektrického a magnetického pole na vzdálenosti od osy stožáru x a na výšce nad povrchem země h pro dva nejběžněji používané stožáry v ČR. Algoritmus výpočtu pro vyšetření optimální varianty uspořádání fází je podrobně uveden v [2].



Obr. 3. Závislost velikostí intenzity elektrického a magnetického pole na vzdálenosti od osy stožáru x a na výšce nad povrchem země h

INDUKTIVNÍ ÚBYTKY NAPĚTÍ NA VODIČÍCH DVOU PARALELNÍCH VEDENÍ

Napětí na indukčnostech všech vodičů vedení K (viz obr.1) můžeme zapsat podle [3] v maticovém tvaru

$$(4) \quad \begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{b1} \\ u_{c1} \\ u_{o1} \end{bmatrix} = \mathbf{L}_n^{(11)} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{o1} \end{bmatrix} + \mathbf{L}_n^{(12)} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \\ i_{o2} \end{bmatrix}$$

kde matice $\mathbf{L}_n^{(11)}$ představuje indukivní vazby ve vedení K, matice $\mathbf{L}_n^{(12)}$ vyjadřuje vzájemné indukivní vazby mezi vedením K a L. Analogicky bychom sestavili matici napětí na indukčnostech vodičů ve vedení L. Předpokládáme-li proudově souměrnou soustavu, jsou proudy v zemních lankách nulové. V důsledku geometrické nesymetrie indukivních vazeb však napětí zemních lan proti zemi není obecně nulové, viz [3]. Omezíme-li se na harmonický ustálený stav, lze použít komplexní vyjádření časově proměnných veličin.

Uspořádáme-li fázory napětí všech vodičů ve vedení K a L do matic $\mathbf{U}^{(K)} = [U_1, U_2, U_3, U_7]^T$, resp. $\mathbf{U}^{(L)} = [U_4, U_5, U_6, U_8]^T$, rovnici (4) pak můžeme zapsat pro libovolnou kombinaci fází v maticovém tvaru

$$(5) \quad \mathbf{U}_{ij}^{(K)} = j\omega [I_1 \mathbf{L}_{11} \mathbf{p}_i + I_2 \mathbf{L}_{12} \mathbf{p}_j], \quad \mathbf{U}_{ij}^{(L)} = j\omega [I_1 \mathbf{L}_{21} \mathbf{p}_i + I_2 \mathbf{L}_{22} \mathbf{p}_j], \quad i = 1, 2, \dots, 6, j = 1, 2, \dots, 6$$

kde indexy i, j značí čísla sloupců matice \mathbf{P} z rovnice (1), uspořádání fází ve vedení K respektujeme sloupcem \mathbf{p}_i a ve vedení L sloupcem \mathbf{p}_j . Matice \mathbf{L}_{11} a \mathbf{L}_{22} vyjadřují indukivní vazby ve vedení K a L, matice \mathbf{L}_{12} resp. \mathbf{L}_{21} vzájemné indukivní vazby mezi vedením K a L resp. L a K. Prvky těchto matic jsou odvozeny v práci [3]. Prochází-li oběma vodiči stejný proud ($I_1 = I_2 = I$), pak lze rovnici (5) upravit do jednoduššího tvaru

$$(6) \quad \mathbf{U}_{ij}^{(K)} = j\omega I [\mathbf{L}_{11} \mathbf{p}_i + \mathbf{L}_{12} \mathbf{p}_j] = j\omega I \mathbf{M}_{ij}^{(K)}, \quad \mathbf{U}_{ij}^{(L)} = j\omega I [\mathbf{L}_{21} \mathbf{p}_i + \mathbf{L}_{22} \mathbf{p}_j] = j\omega I \mathbf{M}_{ij}^{(L)}$$

kde \mathbf{M}_{ij} (4, 1) je *komplexní matice indukčností* pro vedení K, resp. L a zahrnuje všechny indukivní vazby celé soustavy s přihlédnutím ke konkrétnímu rozložení fází. Porovnáním prvků matice \mathbf{M}_{ij} lze posoudit vhodnost dané kombinace. Podobné závěry lze učinit z hodnot napětí vypočtených podle rovnice (5), případně (6). Pro posouzení nesymetrie indukivních úbytků napětí lze provést rozklad fázových napětí pomocí metody souměrných složek.

KAPACITNÍ VAZBY VE DVOJITÝCH VEDENÍ

Za předpokladu harmonického ustáleného stavu můžeme pro časově proměnné veličiny opět použít zobrazení do komplexní roviny, fázory napětí fázových vodičů pro různé varianty rozložení fází vyjádříme pomocí sloupců matice \mathbf{P} (viz rovnice (1)). Náboje na fázových vodičích vedení K a L jsou

$$(7) \quad \begin{bmatrix} \mathbf{q}_K \\ \mathbf{q}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{KK} & \mathbf{B}_{KL} \\ \mathbf{B}_{LK} & \mathbf{B}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_K \\ \mathbf{U}_L \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{KK} & \mathbf{B}_{KL} \\ \mathbf{B}_{LK} & \mathbf{B}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_K \\ \mathbf{p}_L \end{bmatrix}$$

kde submatice \mathbf{B}_{KK} a \mathbf{B}_{LL} vyjadřují vztahy mezi nábojem a napětím ve vedení K, resp. L, submatice \mathbf{B}_{KL} a \mathbf{B}_{LK} respektují kapacitní vazby mezi vedením K a L. Algoritmus pro určení matice \mathbf{B} a jejích submatic je uveden ve [4]. Nabíjecí proud ve vodičích obou vedení pak stanovíme podle vztahu

$$(8) \quad \begin{bmatrix} \mathbf{I}_K \\ \mathbf{I}_L \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{q}_K \\ \mathbf{q}_L \end{bmatrix}$$

V důsledku geometrické nesymetrie se projeví nesymetrie kapacitních vazeb a pro vyváženou napěťovou soustavu není soustava proudů a nábojů vyvážená, tj. platí

$$(9) \quad \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3 \neq 0; \mathbf{q}_4 + \mathbf{q}_5 + \mathbf{q}_6 \neq 0. \quad \text{Označíme-li } \mathbf{q}_{C1} = \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3; \mathbf{q}_{C2} = \mathbf{q}_4 + \mathbf{q}_5 + \mathbf{q}_6$$

bude náboj indukovaný na zemnicích lanech a na povrchu země $\mathbf{q}_i = \mathbf{q}_{C1} + \mathbf{q}_{C2}$. Určení nábojů indukovaných na zemnicích lanech je popsáno ve [4], jejich velikost je mírou nesymetrie kapacitních vazeb a lze podle nich určit optimální transpozici vodičů. Jalový výkon odebíraný vedením K je

$$(10) \quad Q_K = \text{Im}\{\mathbf{U}_K^+ \mathbf{I}_K\} = \omega U^2 \text{Im}\{\mathbf{p}_K^+ (\mathbf{B}_{KK} \mathbf{p}_K + \mathbf{B}_{KL} \mathbf{p}_L)\}$$

kde symbolem \mathbf{U}^+ je označena asociovaná matice k matici \mathbf{U} , tj. transponovaná matice s komplexně sdruženými prvky. Vektory \mathbf{p}_K^+ , resp. \mathbf{p}_L^+ jsou dány k -tým, resp. l -tým řádkem matice \mathbf{P}^+ , tj. asociované matice k matici \mathbf{P} z rovnice (1). Jalový výkon ve vedení L se určí analogicky. Ve [4] je uveden příklad změny (zvýšení nebo snížení) odebíraného jalového výkonu v důsledku kapacitních vazeb mezi vedením K a L a rovněž změny nabíjecího proudu vlivem kapacitní vazby mezi vedením K a L.

ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLADY

Výpočty je možno provádět pro různé typy stožárů, pro nestejné hodnoty napětí a proudů, pro jakékoli průhyby vodičů. U výpočtu elektrického a magnetického pole lze zvolit libovolnou výšku nad zemí.

Ukázka zadání pro stožár Donau:

```
typ='donau' % typ stožaru (Donau - pro dvojite vedeni se 2 zemnicimi lany, 400 kV)
f=15; % maximalni pruhby vodicu [m]
x=[-14.5,-7.5,-11,7.5,14.5,11,-6.6,6.6]; % umisteni fazovych vodicu a zemnicich lan
na stožaru [m] (x-ova souradnice)
y=[23,23,34.5,23,23,34.5,41.5,41.5]; % umisteni fazovych vodicu a zemnicich lan na
stožaru [m] (y-ova souradnice)
xM=[-40:0.5:40]; % vzdalenost od osy stožaru [m]
yM=1.2; % vyska nad zemi [m]
l=10000; % delka vedeni [m]
R=0.01; % polomer vodicu
Um=[400000;400000;400000;400000;400000;400000;0;0]; % napeti [V]
Im=[790;790;790;790;790;790;0;0]; % proud [A]
maxim(typ,x,y,xM,yM,l,R,Um,Im); % urci maximalni hodnotu intenzity el. pole [V/m] a
mag. pole [A/m] a mag.indukce [T]
ind_nap(typ,x,y,R,Im); % urci induktivni ubytky napeti (rozklad na soumerne slozky)
M(typ,x,y,l,R,Um,Im); % urci komplexni matici indukčnosti
C(typ,x,y,l,R,Um); % urci dilci kapacity, naboje fazovych vodicu a zemnicich lan,
nabijeci proud a jalovy vykon odebirany pripojenim nezatizeneho vedeni ke zdroji
napeti
```

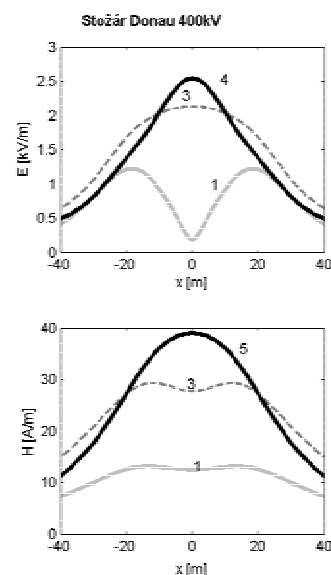
Následující výsledky jsou uvedeny pro dva u nás nejvíce užívané typy stožárů: Donau a Soudek. Výpočty byly provedeny pro následující jmenovité hodnoty napětí a hodnoty proudů při jmenovitém zatížení:

varianta 1	(stožár Donau):	$I_1 = I_2 = 790 \text{ A,}$	$U_1 = U_2 = 400 \text{ kV}$
varianta 2:	(stožár Soudek):	$I_1 = I_2 = 341,5 \text{ A,}$	$U_1 = U_2 = 110 \text{ kV}$

V tabulkách 1 a 2 jsou shrnuty výsledky pro šest základních kombinací pro tyto varianty. Uspořádání fází na vodiče je znázorněno obecnými symboly „•“, „○“ a „×“. V tabulkách jsou uvedeny hodnoty intenzity elektrického pole a magnetické indukce ve výšce 1,2 m nad zemí, hodnoty celkové indukčnosti zemnicího lana a hodnoty náboje na zemnicím lanu. Z výsledků vyplývá, že optimální transpozice vodičů u dvojitých vedení současně minimalizuje nejen velikost intenzity elektrického pole a velikost magnetické indukce, ale i nesymetrii induktivních a kapacitních vazeb. Na obr. 3 a 4 jsou znázorněny průběhy velikostí intenzity elektrického a magnetického pole ve výšce 1,2 m nad zemí (číslo křivky odpovídá označení uspořádání v tabulce).

Stožár Donau		vodiče ve výšce stožáru		při průhybu vodičů 15 m		M [$\mu\text{H}/\text{m}$]	q [$\mu\text{C}/\text{m}$]
400kV		E [kV/m]	B [μT]	E [kV/m]	B [μT]		
uspořádání fází							
	1	1,2	16,5	8,9	182,9	0,19	3,43
	2a	1,9	35,3	9,4	200,7	0,18	3,39
	2b					0,12	2,88
	3	2,1	36,8	9,1	174,0	0,23	4,49
	4	2,5	38,3	10,0	197,3	0,23	4,50
	5	2,3	48,9	10,2	220,0	0,11	2,85

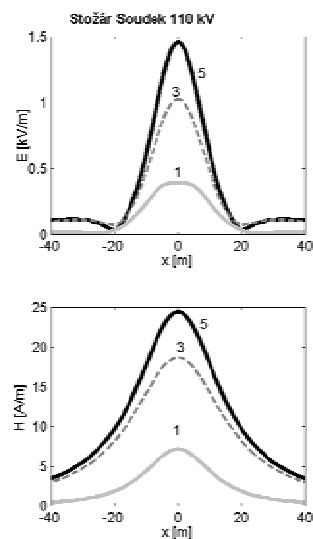
Tab. 1



Obr. 4

Stožár Soudek		vodiče ve výšce stožáru		při průhybu vodičů 8 m		M [$\mu\text{H}/\text{m}$]	q [$\mu\text{C}/\text{m}$]
110kV		E [kV/m]	B [μT]	E [kV/m]	B [μT]		
uspořádání fází							
	1	0,4	8,9	2,5	76,2	0,05	0,05
	2a	0,7	17,0	3,0	83,4	0,14	0,09
	2b						
	3	1,0	23,5	3,5	86,2	0,27	0,18
	4	1,4	29,7	5,3	114,0	0,22	0,13
	5	1,5	30,7	5,3	112,9	0,28	0,18

Tab. 2



Obr. 5

ZÁVĚR

Konfigurace fází má vliv na velikost elektrického a magnetického pole pod vn a vvn vedením, na induktivní vazby (induktivní úbytky napětí) a na kapacitní vazby (kapacitní proudy, nabíjecí proud a jalový výkon). Na základě provedených výpočtů lze učinit doporučení pro optimální návrh transpozice vodičů u dvojitého vedení. Ukazuje se, že lze nalézt takové uspořádání fází na vodiče, při kterém jsou ukazatele minimalizovány. Pro stožáry Soudek a Donau se jedná o konfiguraci, kdy blíže osy stožáru jsou fáze prostřídány, ve vodičích nejvíce vzdálených pak vodiče stejné fáze. Nepříznivé jsou konfigurace se stejnohlým nebo zrcadlovým rozmištěním fází. Výpočty byly prováděny v systému MATLAB. MATLAB jsme vybrali zejména pro jeho jednoduchost a efektivitu při práci s maticemi.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování za finanční podporu patří výzkumnému projektu FRVŠ č. MSM 232200008.

LITERATURA

- [1] Tsanakas, D., Filippopoulos, G., Voyatzakis, J.: Compact and Optimum Phase Conductor Arrangement for Reduction of Electric and Magnetic Fields of Overhead Lines, Cigré 36-103, Session 2000
- [2] Benešová, Z., Šroubová, L.: Reduction Electric and Magnetic Field of Double-Circuit Overhead Lines, Proceeding of Conference AMTEE'03, pp. A7-A12, Plzeň, ZČU, 2003
- [3] Benešová, Z., Mayer, D.: Determination of Inductance Matrix for Various HV and EHV Polyphase Overhead Lines. Acta Technica CSAV
- [4] Benešová, Z., Šroubová, L.: Kapacitní vazby v trojfázových soustavách se zemnicími lany, Advances in electrical and electronic engineering, str. 157-160, ŽU Žilina, 2004

KONTAKT NA AUTORY

Ing. Petr Kropík, FEL ZČU, KTE, Univerzitní 26, Plzeň, tel. 377 634 639, e-mail: pkropik@kte.zcu.cz

Ing. Lenka Šroubová, FEL ZČU, KTE, Univerzitní 26, Plzeň, tel. 377 634 623, e-mail: lsroubov@kte.zcu.cz