

POVRCHOVÉ JAVY NA TROJFÁZOVÝCH VEDENIACH NÍZKOOHMOVÝCH PECÍ SURFACE EFFECT ON THREE PHASE LINES OF LOW-OHMIC FURNACES

Pavel Novák

Katedra elektroenergetiky, FEI TU Košice, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice

Abstrakt V článku je prezentovaná ďalšia možnosť použitia numerickej metódy elementárnych vodičov pri analýze povrchových javov na trojfázových prívodoch energie do nízkoohmových pecí. V nadväznosti na autorom publikovaný článok v tomto časopise (Roč. 2/2003, č. 2, str. 42) je analyzovaná impedančná asymetria trojfázových prívodov o rôznom tvare vodičov a rôznej priestorovej konfigurácie. Sú naznačené možnosti znižovania nepriaznivého javu tzv. živej a mŕtvej fázy a ich využitie pri projektovaní a konštrukcii predmetných vedení.

Summary The article another option of using numerical method of elementary conductors in surface effect three-phase supply lines for low-ohmic furnaces. Impedance asymmetry of three-phase supply lines of different conductor profiles and various space configurations is analysed following to the author's article published in this journal (Vol. 2/2003, No. 2, pg. 42). Options of reducing unfavourable effect of so called live and dead phase and their utilization in design and construction of mentioned lines are outlined.

1. ÚVOD

Princíp a využitie numerickej metódy elementárnych vodičov sme už publikovali v článku [1], podrobnejšie je popísaná napr. v odkazoch [2, 3]. K uplatneniu metódy treba zdôrazniť požiadavku dostatočne hustého delenia vyšetrovaného vodiča na elementárne, ktorá vychádza z dodržania konštantnej prúdovej hustoty na ich jednotlivých prierezoch. Inými slovami, charakteristický rozmer každého elementárneho vodiča musí byť menší ako zodpovedajúca hĺbka vniku elektromagnetickej vlny do deleného vodiča. Vplyv hĺbky vniku na delenie vodiča, resp. na počet elementárnych vodičov vidieť z nasledujúceho príkladu.

Predpokladajme plný Cu-vodič valcového tvaru ($\mu_r = 1$; $\gamma = 5,5 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$) napr. o polomere $r_v = 10 \text{ mm}$, ktorý je pretekaný striedavým prúdom s frekvenciou $f = 50 \text{ Hz}$. Zodpovedajúca hĺbka vniku vlnenia do vodiča je

$$a_{50} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \gamma \cdot \omega}} = 9,602 \text{ mm}$$

Ak by rovnaký vodič bol pretekaný prúdom s frekvenciou $f = 500 \text{ Hz}$, potom hĺbka vniku bude

$$a_{500} = 3,036 \text{ mm}$$

Predmetným hĺbkam vniku zodpovedajú nasledujúce počty elementárnych vodičov [2, 3]:

- pre a_{50} v smere osi r :

$$(n_r)_{50} \geq 2 \cdot \frac{r_v}{a} = 2,08; \text{ zaokrúhlene } (n_r)_{50} = 4$$

čo je nutný minimálny počet vodičov.

- pre a_{50} v smere osi φ :

$$(n_\varphi)_{50} \geq 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_v}{a} = 13,08; \text{ zaokrúhlene } (n_\varphi)_{50} = 14$$

Vodič bude rozdelený na $4 \times 14 = 56$ elementárnych.

- pre a_{500} v smere osi r :

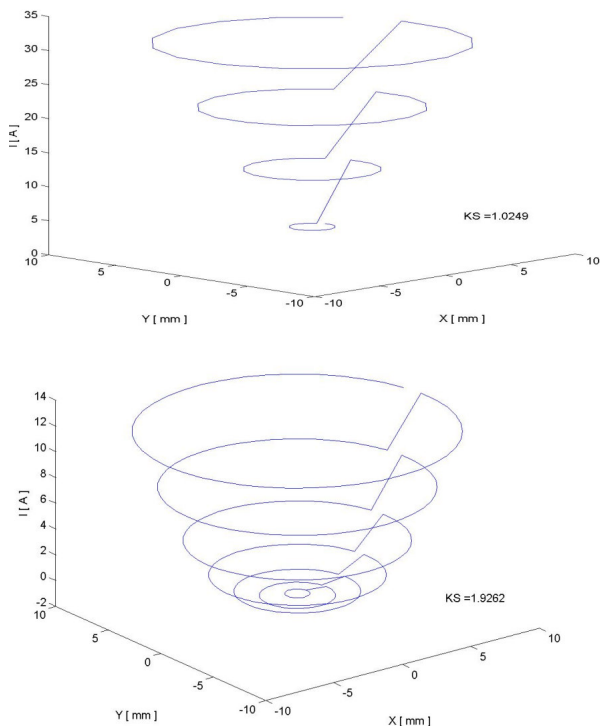
$$(n_r)_{500} \geq 2 \cdot \frac{r_v}{a} = 6,58; \text{ zaokrúhlene } (n_r)_{500} = 7$$

- pre a_{500} v smere osi φ :

$$(n_\varphi)_{500} \geq 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_v}{a} = 41,3; \text{ zaokrúhlene } (n_\varphi)_{500} = 42$$

Vodič bude rozdelený na $7 \times 42 = 294$ elementárnych.

Stanovený počet elementárnych vodičov zabezpečuje dostatočnú presnosť výpočtu (hustejším delením vodiča sa zmenšujú charakteristické rozmery elementárnych). Okrem požadovanej presnosti výpočtu metóda elementárnych vodičov (v programovacom prostredí MATLAB) poskytuje fyzikálne názornú predstavu o rozložení prúdu vo vodiči vplyvom povrchových javov. Na obr. 1 sú znázornené elementárne prúdy v sieti elementárnych vodičov s počtom 56, resp. 294 vodičov, t.j. pre $f = 50 \text{ Hz}$, resp. 500 Hz a plný Cu-vodič $r_v = 10 \text{ mm}$. Rozloženie prúdov zodpovedá vplyvu skinefektu.



Obr. 1 Elementárne prúdy siete elementárnych vodičov pre Cu-vodič $r_v = 10$ mm pri frekvencii 50 Hz a 500 Hz

Fig. 1 Elementary currents of elementary conductors network for copper conductor $r_v = 10$ mm at frequency of 50 Hz and 500 Hz

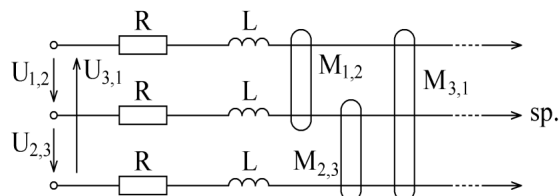
V článku [1] sme zdôraznili pôvod povrchových javov na osamotenom vodiči (skinefekt) a zväzku vodičov (proximity efekt), ako dôsledok pôsobenia vlastného elektromagnetického poľa alebo cudzích polí od susedných vodičov. Pretože polia sú generované pretekajúcimi prúdmi vo vodičoch, s ich intenzitou silnejú a vplyv povrchových javov na ich impedanciu sa stáva výraznejší. Preto problematika povrchových javov na prívodoch k elektrickým peciam pracujúcich v tzv. nízkoohmovom režime je stále aktuálna. Obsah článku [1] bol venovaný vyšetreniu proximity efektu predmetnou metódou elementárnych vodičov v jednofázových sústavách.

Prirodzene analogický vplyv silných elektromagnetických polí na impedanciu jednotlivých vodičov zaznamenávame aj na trojfázových vedeniach k nízkoohmovým peciam (oblúkové oceliarske pece, sklárske taviace pece a iné). Odpor jednotlivého vodiča nie je ovplyvňovaný len skinefektom a proximity efektom od uvedených vodičov tej istej fázy, ale k jeho zmene prispievajú aj susedné fázy. Zdrojom tejto zmeny je tzv. komplexná reaktancia vedenia, ktorej pôvod je v pôsobení všeobecne rôznych vzájomných indukčností medzi fázami. Dôsledkom ich priestorovej asymetrie teda je impedančná asymetria trojfázového vedenia, spôsobujúca nerovnomerný prenos výkonu jednotlivými fázami. Tento nepriaznivý jav stručne popíšeme

v nasledujúcich častiach a naznačíme možnosti jeho potlačania.

2. IMPEDANCIE VODIČOV V TROJFÁZOVEJ SÚSTAVE

Pre vyšetrenie impedančných pomerov uvažujeme trojfázový, trojvodičový systém prívodov v zapojení do hviezdy (obr. 2). Fázové odpory a vlastné indukčnosti jednotlivých fáz sú rovnaké. Systém je pripojený na symetrický zdroj napätí.



Obr. 2 Jednoduchý trojfázový systém vodičov
Fig. 2 Simple three phase conductors system

Pri všeobecne rôznych vzdialenostiach fáz sú vzájomné indukčnosti $M_{i,k}$ rôzne, rôzne budú aj fázové úbytky napätia, ktoré pri harmonických prúdoch \mathbf{I}_{Li} vyjadruje stĺpcová matica fázorov:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{L1,j} \\ \Delta U_{L2,j} \\ \Delta U_{L3,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R + j\omega L); j\omega M_{12}; j\omega M_{13} \\ j\omega M_{21}; (R + j\omega L); j\omega M_{23} \\ j\omega M_{31}; j\omega M_{32}; (R + j\omega L) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{L1} \\ \mathbf{I}_{L2} \\ \mathbf{I}_{L3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

pričom $M_{12} = M_{21}$; $M_{13} = M_{31}$; $M_{23} = M_{32}$. Ak idealizovane budeme predpokladať symetrické fázové prúdy, potom s využitím operátorov natočenia medzi ich fázormi platí

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{L2} &= \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{L1} = \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \mathbf{I}_{L1} \\ \mathbf{I}_{L3} &= \mathbf{a} \mathbf{I}_{L1} = \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \mathbf{I}_{L1} \end{aligned} \quad (2)$$

a matica (1) sa transformuje na tvar

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{L1,j} \\ \Delta U_{L2,j} \\ \Delta U_{L3,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + j\omega L + j\omega(\mathbf{a}^2 M_{12} + \mathbf{a} M_{13}); 0; 0 \\ 0; R + j\omega L + j\omega(\mathbf{a}^2 M_{23} + \mathbf{a} M_{21}); 0 \\ 0; 0; R + j\omega L + j\omega(\mathbf{a}^2 M_{31} + \mathbf{a} M_{32}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{L1} \\ \mathbf{I}_{L2} \\ \mathbf{I}_{L3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Z matice (3) je zaujímavá zložka úbytkov napätí od vzájomných indukčností, t.j.

$$(\Delta U_{Li})_M = j\omega(\mathbf{a}^2 M_{i,i+1} + \mathbf{a} M_{i,i+2}) \mathbf{I}_{Li} \quad (4)$$

resp. s využitím (2) zodpovedajúca reaktancia

$$X_{pi} = -\frac{1}{2} \omega (M_{i,i+1} + M_{i,i+2}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \omega (M_{i,i+1} - M_{i,i+2}) \quad (5)$$

ktorá je komplexným číslom. Má fyzikálny význam „prídavnej“ reaktancie v jednotlivých fázach, takže celkové impedancie fáz sú:

$$\mathbf{Z}_i = R_i + j.X_i = R + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \omega \cdot (M_{i,i+1} - M_{i,i+2}) + j \cdot \omega \cdot \left[L - \frac{1}{2} \cdot (M_{i,i+1} + M_{i,i+2}) \right] \quad (6)$$

Reálna časť týchto impedancií pozostáva okrem konštantného odporu R tiež zo zložiek

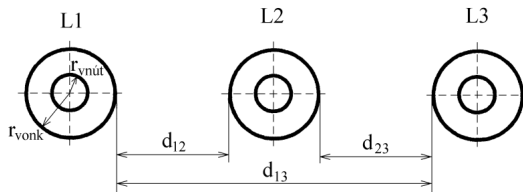
$$R_{pi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \omega \cdot (M_{i,i+1} - M_{i,i+2}) \quad (7)$$

ktoré sú všeobecne rozdielne a závislé od priestorovej konfigurácie fáz. Sú to prídavné odpory fáz, pre ktoré prirodzene platí, že

$$\sum_{i=1}^3 R_{pi} = 0 \quad (8)$$

z čoho vyplýva, že ich prítomnosť nespôsobuje zvýšenie celkových činných strát trojfázového systému, len ich prerozdelenie medzi fázami. Táto skutočnosť sa zvykne označovať ako jav medzifázového prenosu výkonu.

Pre jednoduchú ukážku vplyvu odporov R_{pi} na celkové fázové odpory uvažujme trojfázový jednoduchý systém s koplánárnym uložením fáz, symetrický vzhľadom k osi strednej fázy, napr. podľa obr. 3



Obr. 3 Koplánárny trojfázový systém vodičov
Fig. 3 Coplanar three-phase conductors system

S ohľadom na fázové vzdialenosti $d_{13} > d_{12} = d_{23}$ prirodzene platí, že $M_{12} = M_{23} > M_{13}$, teda podľa zápisu (7) bude

$$R_{p1} = -R_{p3}; \quad R_{p2} = 0 \quad (9)$$

a teda pre celkové fázové odpory platí nerovnosť

$$R_{L1} > R_{L2} > R_{L3} \quad (10)$$

Záver je jednoznačný, systém je odporovo značne asymetrický. Fáza L1 vykazuje najväčší odpor, prenáša najmenší výkon, fáza L3 sa správa opačne. Tento povrchový jav je známy pod názvom jav živej a mŕtvej fázy (živá fáza je tá, ktorá prenáša najväčší výkon a naopak). Uplatňuje sa na ľubovoľnom priestorovom systéme vodičov, pri ktorom je $d_{12} \neq d_{23} \neq d_{31}$, pričom sa vždy zachováva podmienka (8), pri možných zmenách (9) a (10).

Inak sa prejavuje imaginárna zložka reaktancie v impedancii (6). Príspevok od vzájomných indukčností má zápornú hodnotu, teda znižuje celkovú fázovú reaktanciu. To prirodzene znižuje jalové straty pri prenose energie, pretože celkový súčet vyplývajúci zo (6) je vždy kladný

$$M_{12} + M_{23} + M_{31} > 0 \quad (11)$$

Pre prípad podľa obr. 3, t.j. znovu $M_{12} = M_{23} > M_{31}$ pre jednotlivé fázy platí

$$\left[\frac{1}{2} \cdot (M_{12} + M_{13}) \right]_{L1} = \left[\frac{1}{2} \cdot (M_{31} + M_{32}) \right]_{L3} < [M_{23}]_{L2} \quad (12)$$

t.j. celkové fázové reaktancie sú

$$X_{L1} = X_{L3} > X_{L2} \quad (13)$$

Podľa (13) systém je reaktančne symetrický vzhľadom k strednej fáze.

Spôsob naznačenej analýzy prirodzene nie je dokonalý, nakoľko vychádza z predpokladu symetrických fázových prúdov. Je však akceptovateľný, pretože jednoznačne poukazuje na príčinu impedančnej asymetrie, ktorá je v priestorovej asymetrii vodičov. Zároveň je východiskom pre potlačenie tejto príčiny.

3. POTLÁČANIE IMPEDANČNEJ ASYMETRIE VODIČOV ZMENOU ICH TVARU A PRIESTOROVEJ KONFIGURÁCIE

Všeobecným výrazom pre výpočet indukčnosti prúdového vlákna so zanedbateľným prierezom je Neumannov dvojité integrál [4]. Tento sa dá použiť pri určitých zjednodušujúcich predpokladoch aj na vodiče reálnych prierezov. Ak medzi dvoma nemagnetickými rovnobežnými vodičmi i a k rovnakej dĺžky l je tzv. stredná geometrická vzdialenosť $x_{i,k}$, pričom $l \gg x_{i,k}$, potom vzájomnú indukčnosť medzi nimi vyjadruje vzťah [5]

$$M_{i,k} = 2 \cdot l \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{x_{i,k}} - 1 \right) \cdot 10^{-7} \quad [\text{H}; \text{m}] \quad (14)$$

Vzťah (14) sa dá aplikovať aj na výpočet vlastnej indukčnosti vodiča, ak $x_{i,k}$ nahradíme strednou geometrickou vzdialenosťou vodiča samého od seba x_0 (závislou od tvaru prierezu vodiča). Predmetný vzťah využijeme pri výpočte impedancií (6) a jej zložiek.

Napr. dosadením (14) do (7) dostaneme prídavné odpory priestorovo asymetrického trojfázového systému vodičov ($x_{12} \neq x_{23} \neq x_{31}$):

$$R_{p1} = k_1 \cdot \ln \frac{x_{13}}{x_{12}}; \quad R_{p2} = k_1 \cdot \ln \frac{x_{21}}{x_{23}}; \quad R_{p3} = k_1 \cdot \ln \frac{x_{32}}{x_{31}} \quad (15)$$

pričom $x_{12} = x_{21}$; $x_{23} = x_{32}$; $x_{31} = x_{13}$ a konštanta $k_1 = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot l \cdot 10^{-7}$ [Ω ; m]. Súčet rovníc (15) potvrdzuje platnosť (8).

Celkové fázové reaktancie, t.j. imaginárnu zložku v rovnici (6) vypočítame rovnako dosadením (14) pre tú istú podmienku $x_{12} \neq x_{23} \neq x_{31}$ a $x_{11} = x_{22} = x_{33} = x_0$ (vodiče rovnakých prierezov). Potom je

$$\begin{aligned}
 X_{C1} &= k_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{x_{12} \cdot x_{13}}}{x_0}; \\
 X_{C2} &= k_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{x_{23} \cdot x_{21}}}{x_0}; \\
 X_{C3} &= k_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{x_{31} \cdot x_{32}}}{x_0}
 \end{aligned} \quad (16)$$

kde $k_2 = \omega \cdot 2 \cdot l \cdot 10^{-7}$ [Ω ; m].

Aplikujeme výsledky (15) a (16) na konkrétne priestorové konfigurácie trojfázových systémov.

1. Koplanárny systém vodičov, symetrický vzhľadom k strednej fáze, t.j. $x_{12} = x_{23} = \frac{x_{13}}{2} = x$. Pre prídavné odpory jednoducho zistíme, že

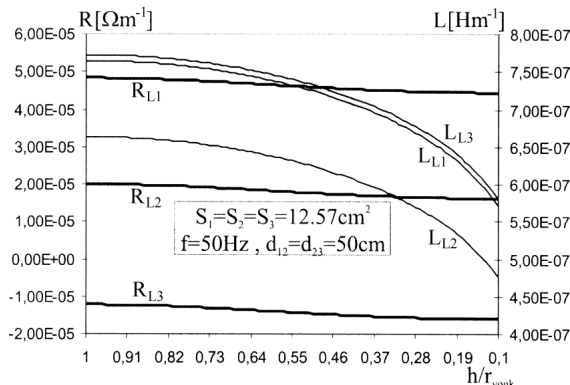
$$R_{p1} = -R_{p3} = k_1 \cdot \ln(2); \quad R_{p2} = 0 \quad (17)$$

Čo potvrdzuje nerovnosť (10).

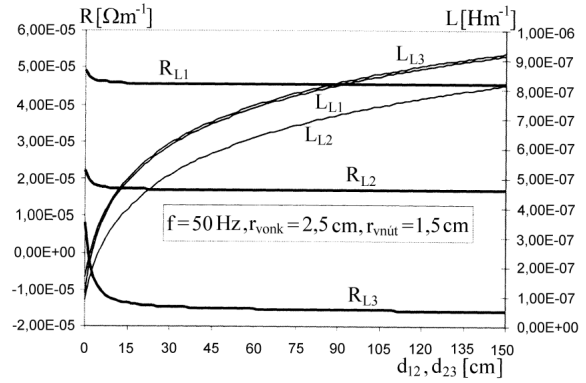
Pre celkové fázové reaktancie dostaneme

$$\begin{aligned}
 X_{C1} = X_{C3} &= k_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{2} \cdot x}{x_0}; \\
 X_{C2} &= k_2 \cdot \ln \frac{x}{x_0}
 \end{aligned} \quad (18)$$

Ak na výpočet zložiek impedancií systému (obr. 3) aplikujeme metódu elementárnych vodičov, získame pohľad na ich závislosť od geometrických parametrov. Na obr. 4 je znázornená závislosť celkových fázových odporov a indukčností od pomernej hrúbky vodičov z Cu-rúr konštantného prierezu. Na obr. 5 je závislosť rovnakých zložiek od medzifázových vzdialeností. Priebehy potvrdzujú značnú asymetriu odporov koplanárneho systému, teda nerovnosť (10) a zároveň skutočnosť, že zmenou predmetných nezávisle premenných sa asymetria nedá potlačiť. Potvrdzujú tiež zápis (13), t.j. reaktančnú symetriu vodičov systému vzhľadom k strednej fáze.



Obr. 4 Závislosti $R_{Li} = f(h/r_v)$ and $L_{Li} = f(h/r_v)$ koplanárneho systému
 Fig. 4 Dependencies $R_{Li} = f(h/r_v)$ and $L_{Li} = f(h/r_v)$ of coplanar system



Obr. 5 Závislosti $R_{Li} = f(d_{12} = d_{23})$ and $L_{Li} = f(d_{12} = d_{23})$ koplanárneho systému
 Fig. 5 Dependencies $R_{Li} = f(d_{12} = d_{23})$ and $L_{Li} = f(d_{12} = d_{23})$ of coplanar system

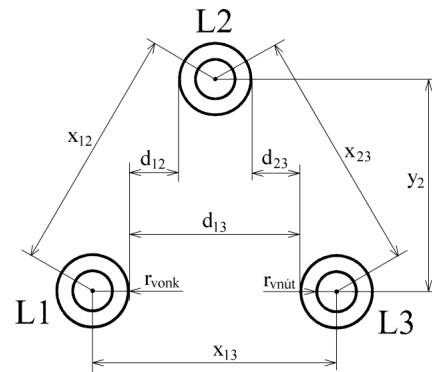
2. Triangulárny systém vodičov, t.j. $x_{12} = x_{23} = x_{31} = x$. Prídavné odpory sú nulové

$$R_{p1} = R_{p2} = R_{p3} = 0 \quad (19)$$

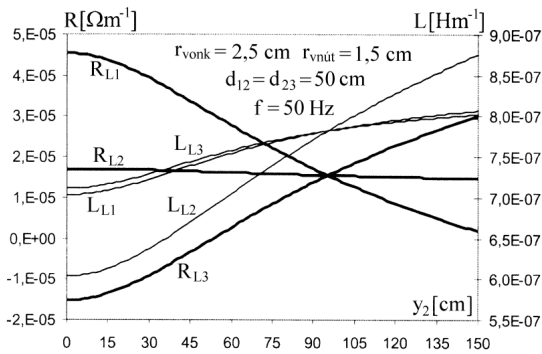
teda systém je odporovo symetrický. To isté platí aj pre reaktancie, nakoľko

$$X_{C1} = X_{C2} = X_{C3} = k_2 \cdot \ln \frac{x}{x_0} \quad (20)$$

Na obr. 6 je naznačená transformácia koplanárneho systému na triangulárny zdvihom strednej fázy, na obr. 7 výsledok tejto premeny. Pri výške y_2 zodpovedajúcej rovnostrannosti trojuholníka, sa systém stáva impedančne symetrický.



Obr. 6 Triangulárny trojfázový systém vodičov
 Fig. 6 Triangular three-phase conductors system



Obr. 7 Závislosti $R_{Li} = f(y_2)$ a $L_{Li} = f(y_2)$ trojuholňového systému

Fig. 7 Dependencies $R_{Li} = f(y_2)$ a $L_{Li} = f(y_2)$ of triangular system

Z uvedených príkladov je možné vysloviť záver:

Každý priestorovo asymetrický trojfázový systém vodičov je zároveň impedančne asymetrický. Najjednoduchším prostriedkom pre dosiahnutie úplnej impedančnej symetrie je priestorová triangulácia vodičov, spravidla vyťahnutím strednej fázy nad úroveň krajných tak, aby sa získal rovnostranný trojuholník. Praktická realizácia takej úpravy môže mať dve obmedzenia:

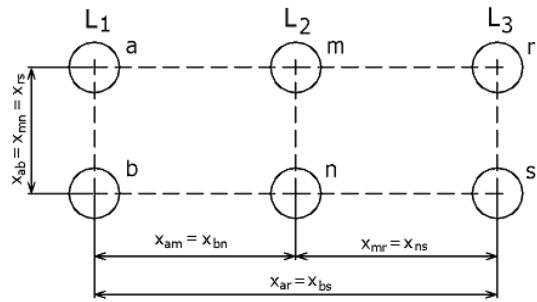
- nedostatok priestoru vo vertikálnom smere (napr. nad pevným držiakom elektród)
- pri peciach s pohyblivým príivodom narušenie triangularity v prevádzke (napr. oblúkové oceliarske pece)

Koplanárne trojfázové systémy sa bežne konštruujú symetrické vzhľadom k strednej fáze, pre ktoré platia závery (17) a (18). Podľa (17) priestorovou modifikáciou nie je možné dosiahnuť symetriu prídavných odporov, teda systém sa nedá odporovo symetrizovať. Vychádzajúc zo vzťahov (18) je však možné realizovať reaktančnú symetrizáciu a to napr. úpravou (zmenšením) prierezu vodiča strednej fázy konkrétne tak, aby platilo

$$x'_0 = \frac{x_0}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

V tomto zmysle koplanárne modifikovaný systém je reaktančne symetrický, teda impedančne čiastočne symetrický.

Predmetné úvahy a závery prirodzene platia aj pre zložitejšie trojfázové systémy zo väzkových vodičov. Z dôvodu stručnosti matematického zápisu uvažujme v každej fáze len dvojvodičový zväzok, s vodičmi rovnakého prierezu podľa obr. 8.



Obr. 8 Dvojvodičový zväzok v trojfázovom systéme
Fig. 8 Two-conductors bundle in three-phase system

Rovnakou metodikou ako v predchádzajúcej časti dostaneme výsledky [5, 6]:

- prídavný odpor jednotlivých vodičov

$$\begin{aligned} R_{pa} &= k_1 \cdot \ln \frac{x_{ar} \cdot x_{as}}{x_{am} \cdot x_{an}}; & R_{pb} &= k_1 \cdot \ln \frac{x_{br} \cdot x_{bs}}{x_{bm} \cdot x_{bn}} \\ R_{pm} &= k_1 \cdot \ln \frac{x_{ma} \cdot x_{mb}}{x_{mr} \cdot x_{ms}}; & R_{pn} &= k_1 \cdot \ln \frac{x_{na} \cdot x_{nb}}{x_{nr} \cdot x_{ns}} \\ R_{pr} &= k_1 \cdot \ln \frac{x_{rm} \cdot x_{rn}}{x_{ra} \cdot x_{rb}}; & R_{ps} &= k_1 \cdot \ln \frac{x_{sm} \cdot x_{sn}}{x_{sa} \cdot x_{sb}} \end{aligned} \quad (22)$$

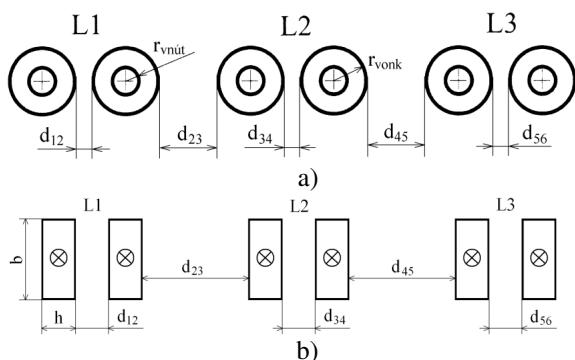
- celkovú reaktanciu jednotlivých vodičov

$$\begin{aligned} X_{ca} &= k_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{x_{am} \cdot x_{an} \cdot x_{ar} \cdot x_{as}}}{x_0 \cdot x_{ab}} \\ X_{cb} &= k_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{x_{bm} \cdot x_{bn} \cdot x_{br} \cdot x_{bs}}}{x_0 \cdot x_{ba}} \\ X_{cm} &= k_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{x_{mr} \cdot x_{ms} \cdot x_{ma} \cdot x_{mb}}}{x_0 \cdot x_{mn}} \\ X_{cn} &= k_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{x_{nr} \cdot x_{ns} \cdot x_{na} \cdot x_{nb}}}{x_0 \cdot x_{nm}} \\ X_{cr} &= k_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{x_{ra} \cdot x_{rb} \cdot x_{rm} \cdot x_{rn}}}{x_0 \cdot x_{rs}} \\ X_{cs} &= k_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{x_{sa} \cdot x_{sb} \cdot x_{sm} \cdot x_{sn}}}{x_0 \cdot x_{sr}} \end{aligned} \quad (23)$$

kde konštanty k_1 a k_2 majú rovnakú hodnotu ako v (15) a (16), a $x_0 = x_{aa} = x_{bb} = x_{nn} = x_{nn} = x_{rr} = x_{ss}$. Rovnice (22) a (23) majú analogický význam a uplatnenie ako (15) a (16).

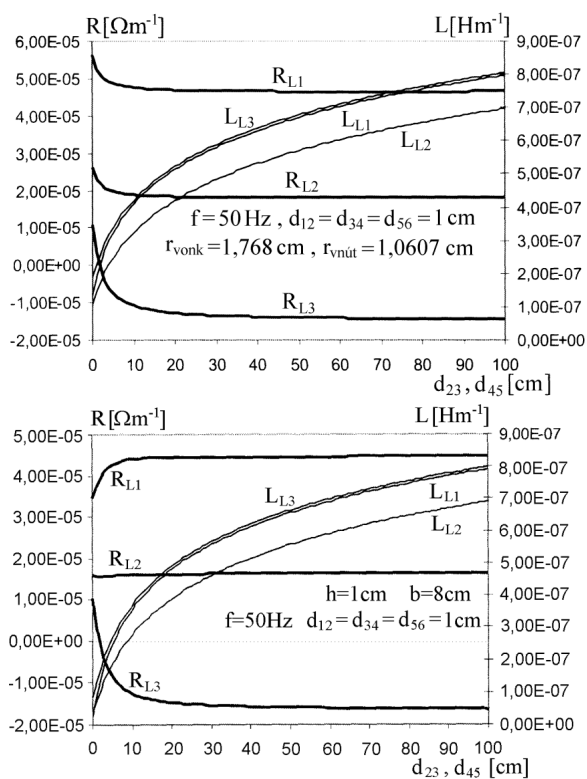
Ako ukážku aplikácie metódy elementárnych vodičov na výpočet parametrov týchto sústav uvádzame:

- sústavu dvoch Cu-rúr v každej fáze podľa obr. 9a
- sústavu dvoch Cu-pásov v každej fáze podľa obr. 9b



Obr. 9 Zväzkový koplánárny trojfázový systém
Fig. 9 Bundled coplanar three-phase system

Zodpovedajúce charakteristiky vyjadrujú zmeny celkových fázových odporov a indukčností v závislosti od medzifázových vzdialeností (obr. 10) [7]:



Obr. 10 Závislosti $R_{Li} = f(d_{23} = d_{45})$ and $L_{Li} = f(d_{23} = d_{45})$ zväzkového koplánárneho systému pre vodiče v tvare Cu-rúr a v tvare Cu-pásov
Fig. 10 Dependencies $R_{Li} = f(d_{23} = d_{45})$ and $L_{Li} = f(d_{23} = d_{45})$ of bundled coplanar system for conductors of copper pipes and onductos strips

Porovnávajúc predmetné jednoduché a zväzkové trojvodičové systémy nie je potrebné zvlášť zdôrazňovať, že vplyv elektromagnetických polí susedných fáz na aktuálnu je prirodzene analogický. Z uvedených príkladov túto podobnosť dokumentuje porovnanie obr. 5 a obr. 10. Preto aj systémy zo zväzkových vodičov sa dajú rovnako impedančne symetrizovať zmenou tvaru jednotlivých vodičov a zmenou ich priestorovej konfigurácie, buď vo zväzku alebo jednotlivých fáz.

4. ZÁVER

Cieľom autora bolo poukázať na príčiny častej impedančnej asymetrie na jednoduchých a zväzkových sústavách vodičov k trojfázovým nízkoohmovým peciam. Častej preto, že prevažná skupina týchto pecí sa prevádzkuje s prívodmi v elektrickom zapojení do hviezdy, najmä z dôvodu menej náročnej konštrukcie a menšej spotreby medeného materiálu. Z týchto aspektov sú náročnejšie zapojenia do trojuholníka, najmä ak sa má zabezpečiť účinná bifilarita vedenia.

Článok zároveň poukazuje na jednoduché možnosti zníženia, či úplného odstránenia impedančnej asymetrie predmetných napájacích sústav relatívne nenáročnými zásahmi do geometrie vodičov. V každom prípade to zlepší kvalitu prenosu výkonu do pecí s pozitívnym dosahom na technologickú a ekonomickú stránku ich prevádzky.

Prezentované výsledky, aj keď sú len prierezové, zároveň dostatočne dokumentujú použiteľnosť metódy elementárnych vodičov pre riešenie úloh tohto typu.

Obsah článku súvisí s problematikou v rámci výskumného projektu VEGA SR č. 1/10063/04 s názvom „Zvyšovanie spoľahlivosti a prenosovej schopnosti silových vedení.“

LITERATÚRA:

- [1] NOVÁK, P.: Proximity efekt na vedeniach nízkoohmových pecí. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. Vol. 2/2003, No.2. ISSN 1336-1376
- [2] BABARÍK, P., NOVÁK, P.: Numerical Determining Electrical Resistance and Reactance of Transmission Line. *EPQU – Electrical Power Quality and Utilization*. Vol. 7, No. 2/2001. ISSN 1234-6799
- [3] WINKLER, G.: *VEM – Handbuch Hochstromtechnik: Grundlagen. Dimensionierung und Ausführung von Hochstromanlagen*. Berlin, WEB Verlag Technik, 1987
- [4] KLUSS, E.: *Die Probleme des Elektrischen Lichtbogenung*. Berlin. Verlag, 1951
- [5] NOVÁK, P.: *Elektrické teplo*, skriptá. Edičné stredisko VŠT Košice, 1983
- [6] KURBIEL, A.: *Elektrotermiczne urzadzenia lukowe*. Warszawa, WNT, 1988
- [7] BABARÍK, P.: *Analýza impedančných pomerov prívodov nízkoohmových pecí*. Dizertačná práca. FEI TU Košice, 1999
- [9] DAŇKO, G.: *Optimalizácia krátkych sietí nízkoohmových pecí*. Diplomová práca. TU FEI Košice, 2004