

Anastázia Margitová, Michal Kolcun, Martin Kanálik, Michal Kosterec

Porovnanie metód na výpočet pozdĺžnej impedancie vedení

Elektrické vedenia tvoria spojovací článok medzi výrobou a spotrebou elektrickej energie. Tento článok sa zaoberá výpočtom elektrických parametrov vonkajších vedení, ktorý je nevyhnutný pri riešení stacionárnych a nestacionárnych javov vyskytujúcich sa v elektrických sieťach. V prípade vedení rôznych napätových hladín je možné uvažovať s pozdĺžnou impedanciou (rezistancia a indukčnosť) a priečnou admitanciou (zvod a kapacita). Článok rieši výpočet pozdĺžnej impedancie vonkajších vedení tromi rôznymi metódami (Rüdenbergova koncepcia, Carsonova metóda a teória komplexnej hĺbky), porovnanie daných metód a ich aplikáciu na model reálneho vedenia.

Kľúčové slová: vonkajšie silové vedenia; elektrické parametre vedení; rezistancia; indukčnosť; teória komplexnej hĺbky

Power lines are connections between the electric power generation and its consumption. This paper deals with the calculation of electrical parameters of overhead power lines which is necessary for the solution of stationary and non-stationary phenomena occurring in electrical networks. In the case of different voltage lines, it is possible to consider the series impedance (resistance and inductance) and the shunt admittance (conductance and capacity). The paper is focused on the calculation of the series impedance of overhead power lines by three different methods (Rüdenberg's conception, Carson's method and the theory of complex penetration depth), the comparison of these methods and their applying to a real power line model. **(Comparison of methods for the calculating of the series impedance of power lines)**

Keywords: overhead power lines; electrical parameters of power lines; resistance; inductance; complex penetration depth

I. ÚVOD

Štandardné výpočty elektrických parametrov silových vedení uvažujú s určitými zjednodušeniami, napr. prúdy tečúce fázovými vodičmi sú symetrické, pre dvojsystémové vedenie sú prúdy tečúce vo vodičoch prvého systému totožné s prúdmi druhého systému, uvažuje sa so strednými vzdialenosťami medzi vodičmi, neuvažuje sa s vplyvom zeme na pozdĺžnu impedanciu vedení atď. Úlohou takýchto metód je dopracovať sa k jednému konečnému prevádzkovému parametru (stredná indukčnosť), ktorý nahrádza magnetické pôsobenie všetkých vodičov sústavy na uvažovaný vodič [1].

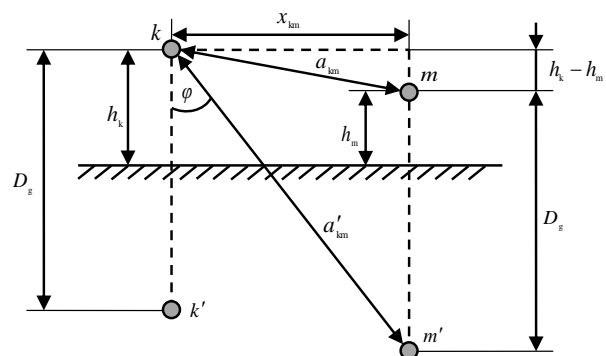
V praxi sú však vzdialenosti medzi vodičmi rôzne, teda aj elektrické parametre vedenia majú odlišné hodnoty z pohľadu jednotlivých vodičov. Metódy výpočtu uvedené v tomto článku sú zamerané na vyjadrenie vzťahov medzi vodičmi jedného systému, ale aj medzi viacerými systémami navzájom. Výsledkom výpočtu jednotlivých parametrov nie je jedno číslo, ale matica prvkov. Rozmery matice, riadky aj stĺpce, sú zhodné s počtom vodičov danej sústavy, pričom na diagonále sú umiestnené vlastné parametre daného vodiča (vlastná rezistancia a vlastná indukčnosť), mimo diagonály sú vyjadrené vzťahy medzi jednotlivými vodičmi (vzájomné parametre - vzájomná rezistancia a vzájomná indukčnosť) [1].

Úlohou prezentovaných metód na výpočet pozdĺžnej impedancie vedení je vytvoriť jednoduchý spôsob, ako určiť vlastné aj vzájomné parametre jednotlivých vodičov s požadovanou presnosťou, pre široký rozsah geometrického usporiadania, prostredia, materiálov a pod. Existujú tri základné koncepcie (Carsonova, Rüdenbergova a Deriho) na výpočet pozdĺžnej impedancie vedení s uvažovaním vplyvu zeme, ktoré sa od seba odlišujú usporiadaním vodičov, ich obrazov a vlastnosťami prisudzovanými zemi. Dané teórie prichádzajú k záveru, že striedavý prúd v zemi sleduje presne trasu vodičov nad

zemou, pričom jeho najväčšia hustota je priamo pod vedením a rýchlo klesá ako do strán, tak aj do hĺbky. Všetky tri teórie považujú zem za vodič ustáleného prúdu, ktorá má svoje parametre, teda neuvažujú s ideálnou zemou (impedancia zeme nie je rovná nule) [1], [2].

II. RÜDENBERGOVA KONCEPCIA

Rüdenbergova koncepcia na výpočet vlastnej a vzájomnej pozdĺžnej impedancie vodičov je považovaná za matematicky najjednoduchšiu, vychádza z niekoľkých predpokladov uvedených v [1] a nahrádza účinok zeme na rezistanciu a indukčnosť vodičov fiktívnymi vodičmi podľa Obr. 1. Usporiadanie n skutočných vodičov a jednej zeme sa nahrádza n skutočnými vodičmi a n fiktívnymi vodičmi. Teória uvažuje, že fiktívnymi vodičmi tečú prúdy opačnej polarítity ako skutočnými vodičmi. Vzdialenosť medzi vodičom a jeho odpovedajúcim obrazom je D_g .



Obr. 1. Model dvoch vodičov a ich obrazov vo vzdialenosti D_g .

Veľkosť D_g nie je závislá na výške vodiča h nad zemou, zvyčajne platí, že $h \ll D_g$. Hodnota D_g je daná vzťahom [3]:

$$D_g = \frac{0,178\sqrt{10^7 \cdot \rho}}{\sqrt{f}} \quad (\text{m}), \quad (1)$$

kde

ρ je rezistivita zeme (Ωm),

f je frekvencia (Hz).

Podľa Rűdenbergovej teórie pre vlastnú pozdĺžnu impedanciu \bar{Z}_{kk} vodiča k platí [3]:

$$\bar{Z}_{kk} = R_{kk} + j\omega L_{kk} = R_k + R_g + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_g}{\zeta_k r_k} \quad (\Omega\text{m}^{-1}), \quad (2)$$

kde

R_{kk} je vlastná rezistancia vodiča k (Ωm^{-1}),

R_k je striedavá rezistancia vodiča k bez uvažovania vplyvu zeme podľa [2] (môže zahŕňať vplyv teploty, skinefektu, krútenia lán a priehybu) (Ωm^{-1}),

R_g je rezistancia zeme na jednotku dĺžky (Ωm^{-1}), špecifikovaná v [2],

L_{kk} je vlastná indukčnosť vodiča k (Hm^{-1}),

ζ_k je činiteľ rešpektujúci skinefekt a magnetické vlastnosti materiálu vodiča k (-),

r_k je polomer vodiča k (m),

ω je uhlová frekvencia (s^{-1}),

μ_0 je permeabilita vákuua (Hm^{-1}), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$.

Príspevok k pozdĺžnej impedancii vodiča k od skutočného vodiča m a jeho odpovedajúceho fiktívneho vodiča m' (vzájomná pozdĺžna impedancia \bar{Z}_{km} medzi vodičmi k a m) vyjadruje vzťah [3]:

$$\bar{Z}_{km} = R_{km} + j\omega L_{km} = R_g + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{a'_{km}}{a_{km}} \quad (\Omega\text{m}^{-1}), \quad (3)$$

$$a'_{km} = \sqrt{[D_g + (h_k - h_m)]^2 + x_{km}^2} \quad (\text{m}), \quad (4)$$

$$R_{km} = R_{mk}, \quad L_{km} = L_{mk}, \quad \bar{Z}_{km} = \bar{Z}_{mk},$$

kde

R_{km} je vzájomná rezistancia medzi vodičmi k a m (Ωm^{-1}),

L_{km} je vzájomná indukčnosť medzi vodičmi k a m , príspevok k indukčnosti vodiča k od skutočného vodiča m a jeho odpovedajúceho fiktívneho vodiča m' (Hm^{-1}),

a'_{km} je vzdialenosť medzi vodičom k a obrazom vodiča m (m) podľa Obr. 1,

a_{km} je vzdialenosť medzi vodičom k a vodičom m (m) podľa Obr. 1,

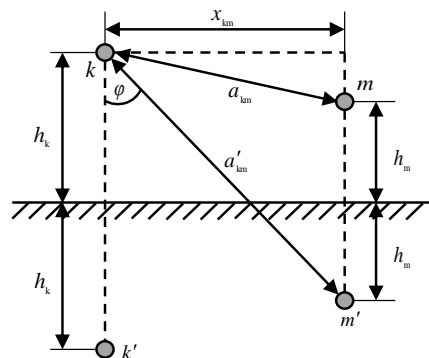
h_k je výška vodiča k nad zemou (m),

h_m je výška vodiča m nad zemou (m),

x_{km} je horizontálna vzdialenosť medzi vodičmi k a m (m).

III. ÚPLNÁ A ZJEDNODUŠENÁ CARSONOVA METÓDA

Teória bola uverejnená v roku 1926 a stále predstavuje štandard pre výpočet pozdĺžnej impedancie vedení. Carson predpokladá, že zem je jednotný, rovný, pevný a nekonečný povrch s konštantnou rezistivitou [4]. Metóda vyjadruje pozdĺžnu impedanciu vedenia ako nevlastný integrál, ktorý je možné rozvinúť do nekonečného radu [5]-[8]. Pre praktické účely je postačujúce uvažovať konečný počet prvkov v rade. Carsonova teória zahŕňa vplyv zeme do výpočtu pozdĺžnej impedancie vo forme korekčných faktorov a jej odvodenie vychádza z Obr. 2.



Obr. 2. Model dvoch vodičov a ich zrkadlových obrazov vzhľadom na rovinu zeme.

Vlastnú rezistanciu R_{kk} a vlastnú indukčnosť L_{kk} vodiča k (podľa Obr. 2) je možné určiť ako [9]:

$$R_{kk} = R_k + \Delta R_{kk} = R_k + 4 \cdot 10^{-7} \omega P \quad (\Omega\text{m}^{-1}), \quad (5)$$

$$L_{kk} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2h_k}{\zeta_k r_k} \right) + \Delta L_{kk} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2h_k}{\zeta_k r_k} \right) + 4 \cdot 10^{-7} Q \quad (\text{Hm}^{-1}), \quad (6)$$

kde

ΔR_{kk} je Carsonov korekčný činiteľ pre vlastnú rezistanciu vodiča k vzhľadom na zem (Ωm^{-1}),

ΔL_{kk} je Carsonov korekčný činiteľ pre vlastnú indukčnosť vodiča k vzhľadom na zem (Hm^{-1}),

P je činiteľ na určenie korekčného faktora pre rezistanciu (Ωm^{-1}),

Q je činiteľ na určenie korekčného faktora pre indukčnosť (Hm^{-1}).

Pre vzájomnú rezistanciu R_{km} a indukčnosť L_{km} medzi vodičmi k a m platí:

$$R_{km} = \Delta R_{km} = 4 \cdot 10^{-7} \omega P \quad (\Omega\text{m}^{-1}), \quad (7)$$

$$L_{km} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{a'_{km}}{a_{km}} \right) + \Delta L_{km} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{a'_{km}}{a_{km}} \right) + 4 \cdot 10^{-7} Q \quad (\text{Hm}^{-1}), \quad (8)$$

kde

ΔR_{km} je Carsonov korekčný činiteľ pre vzájomnú rezistanciu medzi vodičmi k a m vzhľadom na zem (Ωm^{-1}),

ΔL_{km} je Carsonov korekčný činiteľ pre vzájomnú indukčnosť medzi vodičmi k a m vzhľadom na zem (Hm^{-1}),

a'_{km} je vzdialenosť medzi vodičom k a obrazom vodiča m (m) podľa Obr. 2,

a_{km} je vzdialenosť medzi vodičom k a vodičom m (m) podľa Obr. 2.

Činitele P a Q slúžiace na určenie korekčných faktorov pre rezistanciu a indukčnosť závisia od frekvencie, rezistivity zeme a usporiadania vodičov. Vzťahy na ich výpočet sú uvedené v [2].

Mnoho komerčných softvérových programov určených na výpočet elektrických parametrov vedení využíva zjednodušenú Carsonovu metódu. Zjednodušená verzia Carsonových rovníc uvažuje len niekoľko výrazov v rovniciach pre výpočet činiteľov P a Q . Po úprave sa získa [2], [9]:

$$R_k = R_k + 9,8796 \cdot 10^{-7} f \quad (\Omega m^{-1}; \Omega m^{-1}, \text{Hz}), \quad (9)$$

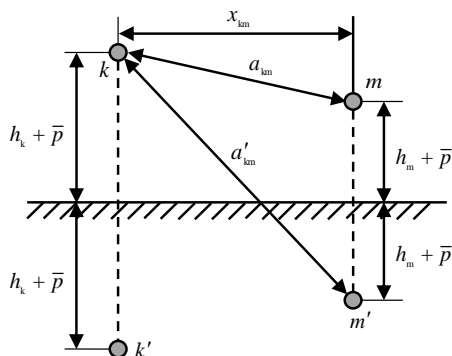
$$L_k = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{658,37 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{\zeta_k r_k} \right) \quad (\text{Hm}^{-1}; \text{Hm}^{-1}, \Omega m, \text{Hz}, -, m), \quad (10)$$

$$R_{km} = 9,8796 \cdot 10^{-7} f \quad (\Omega m^{-1}; \text{Hz}), \quad (11)$$

$$L_{km} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{658,37 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{a_{km}} \right) \quad (\text{Hm}^{-1}; \text{Hm}^{-1}, \Omega m, \text{Hz}, m). \quad (12)$$

IV. TEÓRIA KOMPLEXNEJ HLĚBKY

Koncepciu komplexnej hĺbky spracoval Dubanton už v roku 1969 [10], Gary v roku 1976 [11] a Deri [7] v roku 1981. Na reprezentáciu prúdu tečúceho zemou je zem nahradená množinou vodičov umiestnených presne pod skutočnými vodičmi vedenia v komplexnej hĺbke \bar{p} (Obr. 3) [12]. To znamená, že vzdialenosti medzi vodičmi a ich obrazmi sú komplexné čísla.



Obr. 3. Model dvoch vodičov a ich obrazov zahŕňajúcich komplexnú hĺbku \bar{p} .

Komplexnú hĺbku je možné definovať ako [12]:

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu_0}} \quad (\text{m}), \quad (13)$$

kde j je imaginárna jednotka.

Vlastnú pozdĺžnu impedanciu \bar{Z}_k vodiča k je možné určiť zo vzťahu [12]:

$$\bar{Z}_k = R_k + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_k + \bar{p})}{\zeta_k r_k} \quad (\Omega m^{-1}). \quad (14)$$

Výraz $j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_k + \bar{p})}{\zeta_k r_k}$ má reálnu aj imaginárnu časť. Reálna časť výrazu predstavuje činné straty spôsobené nenulovou impedanciou zeme. Výsledkom je, že pre vlastnú rezistanciu R_k a indukčnosť L_k vodiča k platí [12]:

$$R_k = R_k + \text{Re} \left\{ j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_k + \bar{p})}{\zeta_k r_k} \right\} \quad (\Omega m^{-1}), \quad (15)$$

$$L_k = \frac{\text{Im} \left\{ j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_k + \bar{p})}{\zeta_k r_k} \right\}}{\omega} \quad (\text{Hm}^{-1}). \quad (16)$$

Vzájomná pozdĺžna impedancia \bar{Z}_{km} medzi vodičmi k a m je určená vzťahom [12]:

$$\bar{Z}_{km} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{a'_{km}}{a_{km}} \quad (\Omega m^{-1}), \quad (17)$$

kde veličina a_{km} predstavuje vzdialenosť medzi vodičom k a vodičom m podľa Obr. 3. Premenná a'_{km} vyjadruje vzdialenosť medzi vodičom k a obrazom vodiča m podľa Obr. 3:

$$a'_{km} = \sqrt{(h_k + h_m + 2\bar{p})^2 + x_{km}^2} \quad (\text{m}). \quad (18)$$

Impedancia \bar{Z}_{km} má takisto reálnu zložku R_{km} a imaginárnu zložku ωL_{km} . Reálna časť R_{km} vyjadruje fázový posun, ktorý je zahrnutý v indukovanom napätí v dôsledku existujúcej pozdĺžnej impedancie zeme (zem je nedokonalá vodivá cesta pre prechod prúdu) [2].

V. VÝPOČET POZDĹŽNEJ IMPEDANCIE DVOJSYSTÉMOVÉHO VEDENIA BEZ UZEMŇOVACIEHO LANÁ

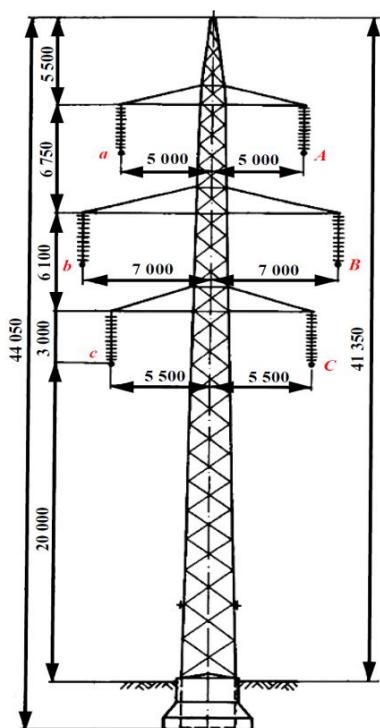
Táto kapitola obsahuje porovnanie jednotlivých metód na výpočet pozdĺžnej impedancie aplikovaných na vedenie podľa Obr. 4, ktorého parametre sú uvedené v Tabuľke I. Vplyv uzemňovacieho lana sa neuvažuje.

TABUĽKA I

Parametre vodičov dvojsystémového vedenia a zeme podľa Obr. 4

| Frekvencia | 50 Hz |
|---|--------------------------|
| Polomer vodiča | $13,195 \cdot 10^{-3}$ m |
| Rezistivita zeme | 150 Ω m |
| Striedavá rezistancia vodiča (bez uvažovania vplyvu zeme) | 0,06196 Ω /km |

Výpočty parametrov sú vzťahnuté na jednotku dĺžky jeden kilometer. Rozmery stožiara, vzdialenosti vodičov od zeme a medzi vodičmi na Obr. 4 sú uvedené v milimetroch. V prípade rezistencie vodiča sa neuvažuje s vplyvom skinefektu, teploty, krútenia lán ani priehybu.



Obr. 4. Model dvojitého trojfázového vedenia s jedným uzemňovacím lanom.

Aplikovaním Carsonovej metódy na model vedenia podľa Obr. 4 pre vlastnú a vzájomnú pozdĺžnu impedanciu v maticovom tvare platí (hodnoty sú uvedené v mH/km a Ω/km):

$$L_{CARSON} = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c & A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ A \\ B \\ C \end{matrix} & \begin{pmatrix} 2,3334 & 1,0265 & 0,9051 & 0,9573 & 0,8923 & 0,8541 \\ 1,0265 & 2,3314 & 1,0474 & 0,8923 & 0,8880 & 0,8884 \\ 0,9051 & 1,0474 & 2,3296 & 0,8541 & 0,8884 & 0,9344 \\ 0,9573 & 0,8923 & 0,8541 & 2,3334 & 1,0265 & 0,9051 \\ 0,8923 & 0,8880 & 0,8884 & 1,0265 & 2,3314 & 1,0474 \\ 0,8541 & 0,8884 & 0,9344 & 0,9051 & 1,0474 & 2,3296 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$R_{CARSON} = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c & A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ A \\ B \\ C \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0,1085 & 0,0468 & 0,0470 & 0,0465 & 0,0468 & 0,0470 \\ 0,0468 & 0,1090 & 0,0473 & 0,0468 & 0,0470 & 0,0473 \\ 0,0470 & 0,0473 & 0,1095 & 0,0470 & 0,0473 & 0,0476 \\ 0,0465 & 0,0468 & 0,0470 & 0,1085 & 0,0468 & 0,0470 \\ 0,0468 & 0,0470 & 0,0473 & 0,0468 & 0,1090 & 0,0473 \\ 0,0470 & 0,0473 & 0,0476 & 0,0470 & 0,0473 & 0,1095 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

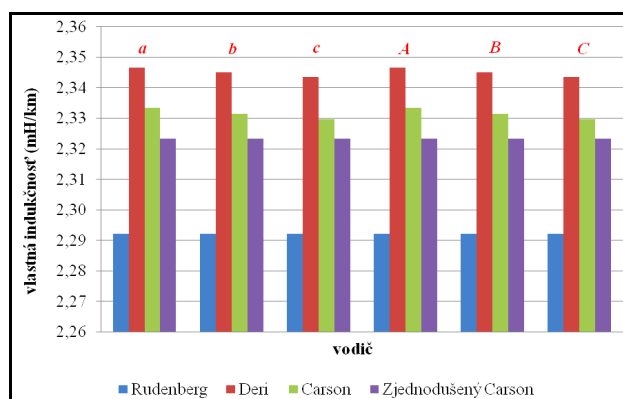
Prvky na diagonále predstavujú vlastnú indukčnosť a vlastnú rezistanciu vodičov zahŕňajúcu vplyv zeme. Vlastné parametre vodiča reprezentujú impedanciu slučky vodič - zem, teda berú do úvahy okrem parametrov vodiča aj parametre zeme. Hodnoty mimo diagonály vyjadrujú vzájomné vzťahy medzi vodičmi a medzi viacerými slučkami vodič - zem.

Na Obr. 5 až Obr. 8 je graficky znázornené porovnanie jednotlivých metód na výpočet pozdĺžnej impedancie dvojsystémového vedenia.

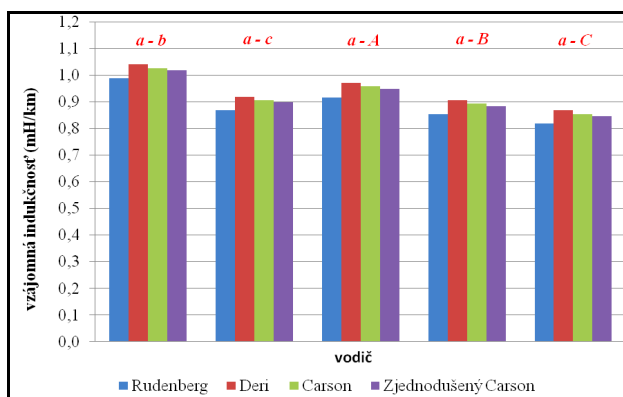
Na Obr. 5 je vidieť, že podľa metódy komplexnej hĺbky boli dosiahnuté najvyššie hodnoty vlastnej indukčnosti v rozsahu od 2,3436 mH/km do 2,3465 mH/km. Najnižšia vlastná indukčnosť bola

určená Rűdenbergovou teóriou, pričom ide o konštantnú hodnotu 2,2921 mH/km. Príčinou je vzdialenosť D_g , ktorá vstupuje do výpočtu vlastnej indukčnosti a je závislá len od frekvencie a vlastností zeme. Konštantnú hodnotu vlastnej indukčnosti priniesol aj výpočet podľa zjednodušenej Carsonovej teórie, ktorý vychádza z rovnice (10).

Čo sa týka vzájomnej indukčnosti, odchýlky medzi jednotlivými metódami sú menšie ako v prípade vlastnej indukčnosti. Obr. 6 popisuje vzájomnú indukčnosť vodičov dvojsystémového vedenia vzhľadom na vodič *a*. Najnižšie hodnoty vzájomnej indukčnosti boli dosiahnuté aplikovaním Rűdenbergovej teórie a najvyššie pomocou Deriho teórie komplexnej hĺbky. Z grafu taktiež vyplýva, že čím väčšia je vzájomná vzdialenosť medzi vodičmi, tým menšia je indukčná väzba medzi nimi.

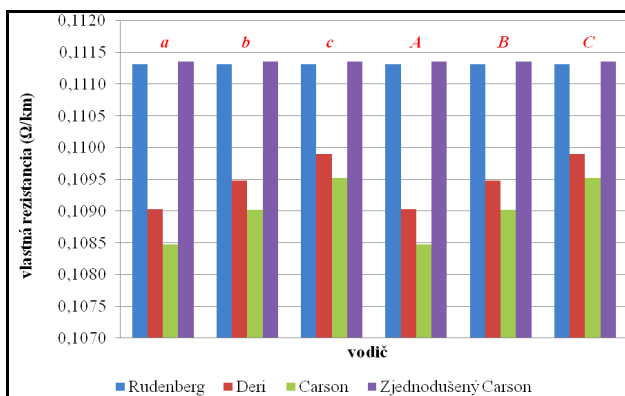


Obr. 5. Porovnanie vlastnej indukčnosti vodičov dvojitého vedenia určenej rŕznymi metódami.

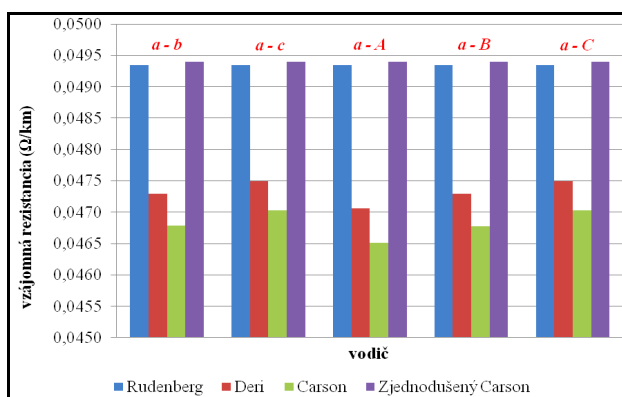


Obr. 6. Porovnanie vzájomnej indukčnosti vodičov dvojitého vedenia určenej rŕznymi metódami.

Najvyššie hodnoty vlastnej rezistancie boli vypočítané podľa Rűdenbergovej koncepcie (0,1113 Ω/km) a zjednodušenej Carsonovej teórie (0,1114 Ω/km), avšak ide o konštantné hodnoty. Do výpočtu vlastnej rezistancie vstupuje okrem rezistancie samotného vodiča len rezistancia zeme (v prípade Rűdenbergovej teórie) a frekvencia (čo sa týka zjednodušenej Carsonovej metódy). Pre úplnú Carsonovu teóriu a Deriho koncept platí, že vlastná rezistancia jednotlivých vodičov sa od seba líši kvôli závislosti na usporiadaní vodičov. Čím je väčšia výška vodiča nad zemou, tým je menšia jeho vlastná rezistancia (Obr. 7). V prípade vzájomnej rezistancie vedenia platia tie isté skutočnosti ako v prípade vlastnej rezistancie (Obr. 8).



Obr. 7. Porovnanie vlastnej rezistencie vodičov dvojitého vedenia určenej rôznymi metódami.



Obr. 8. Porovnanie vzájomnej rezistencie vodičov dvojitého vedenia určenej rôznymi metódami.

Carsonova teória je považovaná za najpresnejšiu metódu výpočtu pozdĺžnej impedancie vedení z vyššie uvedených metód. Riešenie podľa Carsona pozostáva z nevlastného integrálu, ktorý je možné rozvinúť do nekonečných radov. V Tabuľke II sú uvedené maximálne percentuálne odchýlky Rüdbergovej koncepcie, zjednodušenej Carsonovej metódy a teórie komplexnej hĺbky od danej koncepcie pre vedenie riešené v tomto článku. Porovnanie bolo realizované v maticovej podobe, pričom sa určila percentuálna odchýlka pre každý maticový prvok (pre vlastnú aj vzájomnú rezistanciu a indukčnosť jednotlivých vodičov). Následne bola zvolená maximálna odchýlka z jednotlivých odchýlok (zobrazená v Tabuľke II). Za vzájomné hodnoty boli vytýčené parametre vedenia na Obr. 4 určené Carsonovou metódou (matice pre rezistanciu a indukčnosť uvedené vyššie v tejto kapitole).

Čo sa týka indukčnosti, porovnateľné výsledky s Carsonovou teóriou priniesla práve jej zjednodušená podoba, kde maximálna percentuálna odchýlka bola $-0,2656\%$. V prípade rezistencie, najpresnejšie výsledky možno dosiahnuť aplikovaním Deriho koncepcie (najvyššia odchýlka $1,1931\%$), veľké rozdiely v porovnaní s Carsonovou metódou boli nadobudnuté výpočtom podľa teórie Rüdberga a zjednodušenej Carsonovej metódy, čo vyplýva aj z Obr. 7 a Obr. 8, kde bola dosiahnutá maximálna percentuálna odchýlka vyše 6% . Z vykonanej analýzy na dvojsystémovom vedení bez uzemňovacieho lana vyplýva, že jednotlivé metódy na výpočet pozdĺžnej impedancie vedení prinášajú porovnateľné výsledky, ktoré sa od seba odlišujú o stotiny mH/km, resp. Ω/km .

TABUĽKA II

Porovnanie Rüdbergovej, zjednodušenej Carsonovej a Deriho koncepcie s úplnou Carsonovou metódou v prípade parametrov vedenia podľa Obr. 4

| Metóda výpočtu | Maximálna odchýlka rezistancie (%) | Maximálna odchýlka indukčnosti (%) |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Rüdbergova koncepcia | 6,1009 | -1,6108 |
| Teória komplexnej hĺbky | 1,1931 | 1,5872 |
| Zjednodušený Carson | 6,2084 | -0,2656 |

VI. ZÁVER

Koncepcie na výpočet pozdĺžnej impedancie vonkajších vedení rozobraté v tomto článku uvažujú s vplyvom pozdĺžnej impedancie zeme ako na rezistanciu, tak aj na indukčnosť. Každá teória delí rezistanciu a indukčnosť vodiča na vlastnú a vzájomnú (vlastné parametre vodiča) a do vzťahov na ich výpočet pridáva korekcie rôzneho tvaru charakterizujúce parametre zeme.

Carsonova metóda ako jediná prináša analyticky kompletné riešenie v podobe nevlastných integrálov. Vplyv zeme na rezistanciu a indukčnosť sa vyjadruje korekčnými činiteľmi ΔR_{ik} , ΔR_m , ΔL_{ik} a ΔL_m , ktoré sú závislé od frekvencie, rezistivity zeme a geometrických rozmerov vedenia (kapitola III). Nevýhodou je, že ide o náročné a zdĺhavé výpočty.

Deriho model predstavuje aproximáciu Carsonovej teórie, je oveľa jednoduchší, dostatočne presný a porovnateľný s riešením podľa Carsona, čo vyplýva z Obr. 5 až Obr. 8 a Tabuľky II. Vzdialenosti medzi vodičmi a ich obrazmi sú reprezentované komplexnými číslami (do výpočtu vzdialeností medzi vodičmi a ich obrazmi sa zahrňa komplexná hĺbka \bar{p} , kapitola IV). Vďaka tomu môže byť pozdĺžna impedancia uvádzaná v jednoduchom algebrickom tvare a ľahšie spracovateľná počítačmi.

Rüdbergova metóda uvažuje vzdialenosť medzi vodičom a jeho obrazom D_g , ktorá je konštantná, závislá len na frekvencii a rezistivite zeme a je omnoho väčšia ako kolmá vzdialenosť vodiča od roviny zeme (kapitola II).

LITERATÚRA

- [1] L. Reiss, K. Malý, Z. Pavlíček, and F. Němeček, *Teoretická elektroenergetika I*, 2nd ed., Bratislava: Alfa, 1997.
- [2] A. Margitová, *Výpočet elektrických parametrov silových vedení*. Bakalárska práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, FEI, 2015.
- [3] M. Hodinka, Š. Fecko, and F. Němeček, *Přenos a rozvod elektrické energie*, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [4] J. R. Carson, "Wave Propagation in overhead wires with ground return," *Bell System Technical Journal*, vol. 5, pp. 539-554, 1926.
- [5] T. Theodoulidis, "On the Closed-Form Expression of Carson's Integral," *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 59, pp. 26-29, 2015.
- [6] A. Ramirez and F. Uribe, "A broad range algorithm for the evaluation of Carson's integral," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, pp. 1188-1193, 2007.
- [7] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, and A. Castanheira, "The complex ground return plane. A simplified model for homogeneous and multi-layer earth return," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PAS-100, pp. 3686-3693, 1981.
- [8] T. Noda, "A double logarithmic approximation of Carson's ground return impedance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 472-479, 2005.

- [9] R. Horton, *Effect of Line Modeling Methods on Neutral-to-Earth Voltage Analysis of Multi-Grounded Distribution Feeders*, IEEE, 2011.
- [10] C. Dubanton, "Calcul Approché des Paramètres Primaires et Secondaires d'Une Ligne de Transport, Valeurs Homopolaires," *EDF Bulletin de la Direction des Études et Recherches, Série B-Réseaux Électriques Matériels Électriques*, vol. 1, pp. 53-62, 1969.
- [11] C. Gari, "Approche complète de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexes," *EDF Bulletin de la Direction des Études et Recherches, Série B-Réseaux Électriques Matériels Électriques*, pp. 5-20, 1976.
- [12] H. Wayne Beaty, *Handbook of Electric Power Calculations*, The McGraw-Hill Companies, 2000.

ADRESY AUTOROV

Anastázia Margitová, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Anastazia.Margitova@tuke.sk

Michal Kolcun, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Michal.Kolcun@tuke.sk

Martin Kanálik, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Martin.Kanalik@tuke.sk

Michal Kosterec, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Michal.Kosterec@tuke.sk