

大地分层结构条件下架空线路系统导线— 地回路阻抗的计算分析

朱 军, 吴广宁, 龚宏奎, 吴静文, 张龙伟, 曹晓斌

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 架空线路系统导线—地回路阻抗是输电线路过电压防护和电磁兼容研究的重要参数。笔者将大地视为水平分层结构,运用复数镜像法,给出了大地水平分层时架空线路系统导线—地回路阻抗的计算方法,验证了该计算方法的正确性;结合中国特高压输电线路实例,计算分析了大地分层结构条件下架空线路系统导线—地回路阻抗的变化规律。结果表明:文中方法克服了 Carson 公式计算结果频率性能较差的缺点,具有更高的计算准确度;架空线路导线—地回路阻抗随频率和第1层土壤厚度的增加而增大且有饱和趋势,第1层土壤的电阻率对导线—地回路阻抗有明显影响。

关键词: 大地分层结构; 复数镜像法; 导线—地回路; 阻抗; 频率; 土壤电阻率; 土层厚度

中图分类号: TM726.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)02-0029-06

Calculation and Study of Impedance of Conductor-earth Circuits for Overhead Line Systems with Layered Soil Structure

ZHU Jun, WU Guangning, GONG Hongkui, WU Jingwen, ZHANG Longwei, CAO Xiaobin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The impedance of overhead line systems is of particular importance for the study on overvoltage protection and electromagnetic compatibility for transmission lines. In this paper, considering the earth as horizontal layered model, based on the complex image method, the calculation method of impedance of conductor-earth circuits with layered soil structure is given. The correctness of this proposed method is verified. Finally, taking UHV transmission lines as an example, the regularities of impedance of conductor-earth circuits for overhead line systems with layered soil structure are analyzed by calculation results. The results demonstrate that this proposed method overcomes the disadvantage of Carson's formula which has poor frequency characteristics and its calculation result has a higher accuracy. The impedance of conductor-earth circuits becomes larger with the increase of frequency and thickness of the first-layer soil, but has a tendency to saturation. Meanwhile, the resistivity of the first-layer soil has obvious influence on the impedance of conductor-earth circuits.

Key words: layered soil structure; complex image method; conductor-earth circuit; impedance; frequency; soil resistivity; soil thickness

0 引言

随着中国经济的持续增长, 社会对电力的需求

急剧增加, 以超/特高压为主的“长距离、大容量”输电线路得到了快速发展。由于输电线路走廊资源的日益紧缺, 多条输电线路共用走廊建设已不可避免, 且实际工程现已采用^[1-3], 如以能源输出为主的西南

收稿日期: 2013-08-22; 修回日期: 2013-09-26

基金项目: 国家电网公司科技项目(2011-WG-4); 铁道部科技研究开发计划重点项目(2011Z01-D)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC (2011-WG-4), Technological Research and Development Programs of the Ministry of Railways(2011Z01-D).

地区和经济发达的华东地区。相比单独架设的输电线路,共用走廊内输电线路电磁环境更为复杂,走廊内线路间的过电压防护和电磁兼容问题日益突出。在过电压和电磁干扰分析中,普遍将输电线路视为传输线结构,用多导体传输线理论建模计算。输电线路单位长串联阻抗是传输线模型的重要参量之一,包括导线纵向阻抗(导线和大地均为理想媒质)、导线内阻抗、导线—地回路阻抗(大地为有损媒质)3个部分。研究表明,导线纵向阻抗和导线内阻抗均有解析计算公式可供使用^[4-5]。相关研究表明^[5-7],导线—地回路阻抗对多导体系统单位长串联阻抗有重要影响。因此,笔者主要针对架空线路系统导线—地回路阻抗进行论述分析。

有关架空线路系统导线—地回路阻抗的计算,现有研究大多将大地视为理想无损情况或具有一定电阻率的均匀结构。文[8]中给出了均匀土壤结构条件下导线—地回路阻抗的计算公式,该公式影响最广,但计算较为繁琐;文[9]给出了均匀土壤结构条件下导线—地回路阻抗最普遍、较准确的近似计算公式;文[10]提出了低频下导线—地回路阻抗的时域近似计算公式,但适用范围有限;文[11]结合拉普拉斯反变换将导线—地回路阻抗变换为时域形式,但仅适用于均匀结构土壤。事实上,大地为不均匀结构,每层应用土壤电阻率、介电常数和磁导率等电气参数来表征^[12-14]。在过电压和电磁干扰计算中,不考虑大地不均匀结构对架空线路参数的影响会带来系统误差。

目前,关于不均匀结构条件下传输线阻抗研究,大多集中于埋地导体系统、架空与埋地导体间导线—地回路阻抗的计算。文[15-16]中给出了两层、多层结构条件下埋地导体的导线—地回路(自)阻抗、架空与埋地导体间导线—地回路(互)阻抗计算公式。

笔者将大地视为水平分层结构,运用复数镜像法,给出了大地分层结构条件下架空线路系统导线—地回路阻抗计算方法。通过与现有文献对比分析,验证文中计算方法的正确性、有效性。最后,计算分析了大地分层结构条件下架空线路系统导线—地回路阻抗的变化规律,同时也阐释了在过电压和电磁干扰分析中考虑土壤损耗及大地分层结构的必要性。

1 基于复数镜像法的导线—地回路阻抗计算方法

对于大地分层结构条件下导线—地回路阻抗的计算问题,国内外众多学者在文[8]中所提出的均匀结构条件下导线—地回路阻抗计算公式的基础上陆

续做了大量研究,如考虑不同导电及导磁特性媒质,采用具有不同电气参数的大地分层结构,以及采用等效复透射深度的镜像法等^[12-17]。其中,文[17]中采用复数镜像法讨论了均匀土壤结构条件下架空线路系统导线—地阻抗的计算问题。目前,已证实该计算方法可推广到大地分层结构,效果较好^[18-20]。

图 1 为水平分层结构条件下的架空线路系统。在图 1 中,导线 i 高度为 h_i ,导线 j 高度为 h_j ,导线 i 和导线 j 水平间距为 d_{ij} 。在大地为理想无损情况下,通常采用镜像法求解架空线路导线—地回路阻抗,此时导线 i 镜像位于 $-h_i$,导线 j 镜像位于 $-h_j$,导线 i 与导线 j 镜像间的几何距离为 $\sqrt{(h_i+h_j)^2+d_{ij}^2}$ 。在大地为有损媒质情况下,分层介质的不良导电性会造成电磁波的多次折反射并产生集肤效应。因此,架空线路系统各导线的镜像位置不易确定。当大地为具有一定电阻率的均匀结构和水平分层的不均匀结构时,复数镜像法可较方便地求解架空线路的导线—地回路阻抗。图 2 为采用复数镜像法的架空线路系统等效示意图。如图 2 所示,采用复数镜像法,可将具有水平分层结构的有损土壤等效为位于真实地面之下深度 p 位置处的镜像平面。在图 2 中,导线 i 距等效地面 h_i+p ,导线 j 距等效地面 h_j+p ,采用复数镜像法对水平分层结构大地等效之后,导线 i 与导线 j 镜像间的几何距离为 $\sqrt{(h_i+h_j+2p)^2+d_{ij}^2}$ 。在水平分层结构大地条件下,架空线路系统导线—地回路阻抗为:

自阻抗

$$Z_{ii}(\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_i+p)}{r}; \quad (1)$$

互阻抗

$$Z_{ji}(\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_i+h_j+2p)^2+d_{ij}^2}}{\sqrt{(h_i-h_j)^2+d_{ij}^2}}. \quad (2)$$

式(1)、(2)中, p 为电磁波在 n 层水平分层大地中的等效复透射深度。

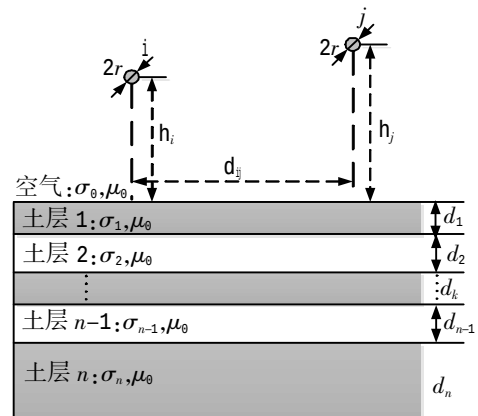


图 1 水平分层结构条件下的架空线路系统

Fig. 1 Overhead line systems with layered soil structure

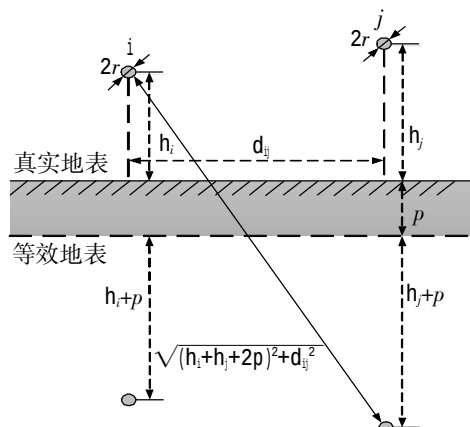


图2 采用复数镜像法的架空线路系统等效示意图
Fig. 2 Schematic diagram of overhead line systems using the complex image method

等效复透射深度 p 是大地分层结构条件下导线—地回路阻抗的一个重要参量。以往, 通常用 Carson 公式误差函数来表征大地分层结构及土壤不良导电性对导线—地回路阻抗的影响。文[14]用复数镜像法替代 Carson 公式, 推导了大地水平分层时电磁波在土壤中等效复透射深度的计算公式。经验证, 该算法可避免对 Carson 公式误差函数的计算, 提高计算速度且具有较高精度。

结合文[14]中等效复镜像深度的计算公式, 对式(1)、(2)求解, 便可得到大地分层结构条件下架空线路的导线—地回路阻抗, 进而可较准确评估架空线路系统的过电压水平和电磁干扰。

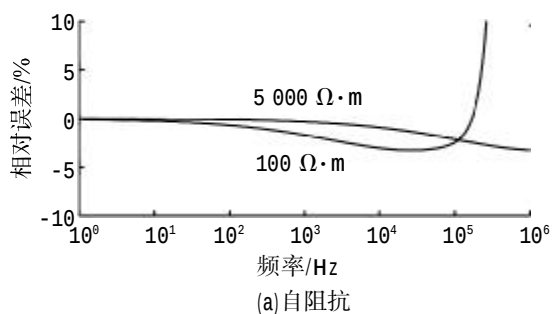
2 方法验证

在电力系统中, 对于架空线路系统导线—地回路阻抗的计算问题, 影响最广且被广泛应用的是 Carson 公式。在 Carson 公式中, 由于被积函数分子上存在负指数因子会导致积分不易计算, 因此常采用其级数解。但其推导过程中的一些假设使得计算结果频率性能较差。

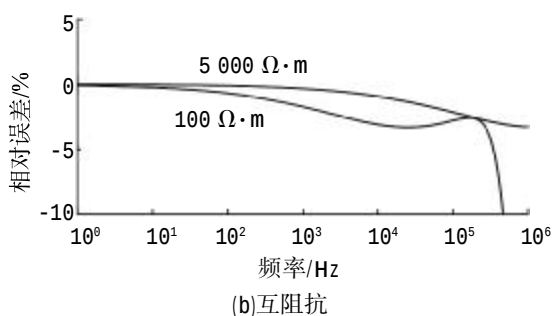
为了证明文中提出的大地分层结构条件下架空线路系统导线—地回路阻抗计算方法的正确性、有效性, 现做如下计算: 假设大地为均匀媒质的半无限大平面, 相对磁导率为 1; 用 2 根导线模拟架空线路系统, 导线半径 25.5 mm, 导线高度 10 m, 导线间距 5 m; 取土壤电阻率分别为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $5000 \Omega \cdot \text{m}$ 。

图 3、4 给出了 Carson 公式对文中提出的计算公式的相对误差。对于电阻部分, 较广频率范围内 ($1 \times 10^5 \text{ Hz}$ 以下) 相对误差在 5% 以下, 见图 3; 对于电抗部分, 相对误差变化范围较大且在低频下仍有较大误差, 见图 4。

在大地为均匀媒质的半无限大平面条件下, 架



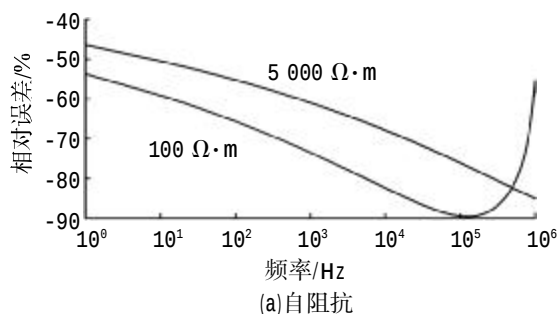
(a) 自阻抗



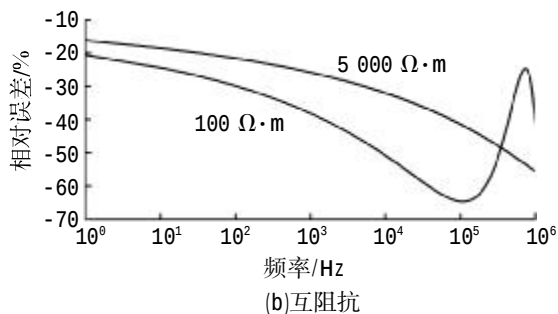
(b) 互阻抗

图3 电阻部分的相对误差

Fig. 3 Relative errors of resistance



(a) 自阻抗



(b) 互阻抗

图4 电抗部分的相对误差

Fig. 4 Relative errors of reactance

空线路导线—地回路阻抗能用渗透深度的概念进行解释。电流频率越高、电阻率越小, 电磁波的透射深度越小^[14-17], 因此电流会更多集中在有损大地表层而减小向土壤内部的传播, 导线—地回路阻抗主要由距导线较近的表层土壤决定。相关研究指出, 土壤是一种典型的多孔介质, 矿物质、腐殖质及微生物等共同构成了土壤基本骨架, 固体颗粒间存在着填充着水、空气的大小不一的空隙, 其导电性能受其结构影响。在土壤结构恒定不变的条件下, 频率的改变不会引起导线—地回路阻抗的较大波动。在图 3、4 中, 在较高频段, 曲线均有较大波动, 尤其是当土壤电阻

率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 时,架空线路系统导线—地回路阻抗的相对误差较大。此计算结果一方面说明文中方法克服了 Carson 公式计算结果频率性能较差的缺点,可得到更高的计算准确度;另一方面也说明文中方法的运算结果符合物理规律,效果较好。

3 方法应用

3.1 架空线路系统

以中国 $1\,000 \text{ kV}$ 特高压输电线路为例,计算分析大地分层结构条件下架空线路系统导线—地回路阻抗的变化规律。特高压输电线路示意图见图 5。在图 5 中,输电线路杆塔采用酒杯塔,呈水平排列;地面最大工频电场限值取为 12 kV/m ,所以杆塔处输电线路的导线悬挂点高度为 34.16 m ,且在两端等高悬挂的档距内导线最低点对地高度为 19.30 m ,导线最大弧垂为 14.86 m ^[21-22]。在工程中,常用输电线路平均对地高度计算其单位长串联阻抗。输电线路平均对地高度 h 为

$$h = H - \frac{2}{3}f. \quad (3)$$

式(3)中: h 为导线平均对地高度; H 为杆塔处导线悬挂点高度; f 为档距内导线最大弧垂。经计算,图 5 中水平排列的特高压输电线路导线平均对地高度为 24.25 m 。

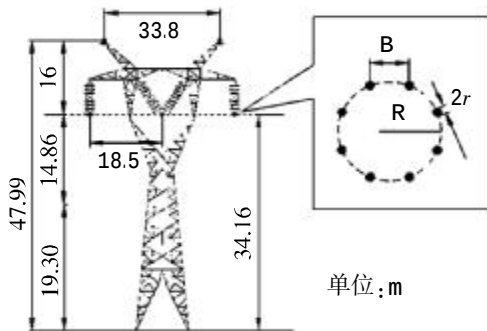


图 5 特高压输电线路结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of UHV transmission lines

如图 5 所示,输电线路三相导线均采用 $8 \times \text{LGJ-630/45}$,子导线直径为 34.32 mm ,分裂间距为 400 mm ^[21]。分裂导线等效半径 R_{eq} 为

$$R_{\text{eq}} = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}. \quad (4)$$

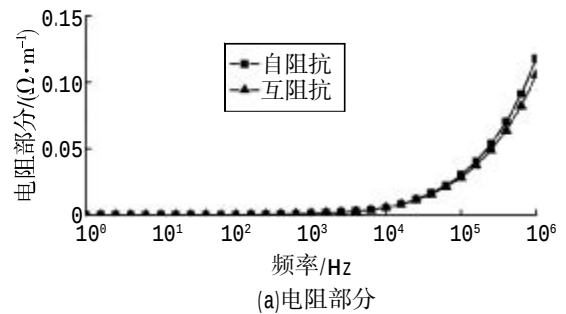
式(4)中: n 为分裂导线根数; R 为分裂导线圆半径; r 为子导线半径; B 为分裂间距。经计算,图 5 中水平排列的特高压输电线路每相导线等效半径为 0.41 m 。

3.2 规律分析

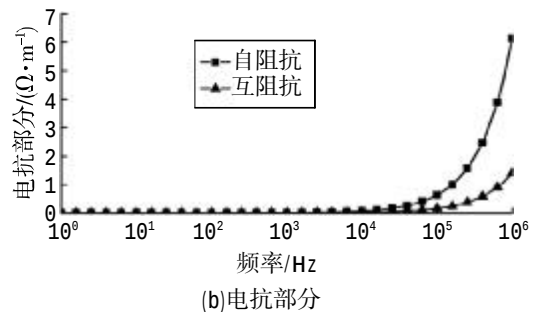
以水平双层结构大地为例,给出了架空线路系统导线—地回路阻抗随电流频率 f 、土壤电阻率 ρ 和

第 1 层土壤厚度 d 的变化情况,并进行了合理分析。

图 6 给出了大地水平双层结构条件下架空线路系统导线—地回路阻抗随频率 f 的变化曲线。在计算中,第 1 层土壤电阻率 ρ_1 为 $1\,000 \Omega \cdot \text{m}$,土壤厚度 d 为 20 m ,第 2 层土壤电阻率 ρ_2 为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。在理论上,土壤电气参数不变情况下,电磁波在土壤中的透射深度会随着频率 f 的增加而减小,且随频率 f 持续增加,透射深度的减少将趋近饱和^[15-16]。因此,当电流频率在 $0 \sim 10^6 \text{ Hz}$ 之间变化时,架空线路系统导线—地回路阻抗会随着频率的增大而增加,并且会有饱和的趋势。可以看出,由于采用对数坐标形式,导线—地回路自(互)阻抗的电阻部分和电抗部分随着频率的增加均呈现出不断增大的趋势,但是随着频率的增加,其电阻部分和电抗部分变化率有饱和的趋势。



(a) 电阻部分



(b) 电抗部分

图 6 导线—地回路阻抗随频率 f 的变化曲线

Fig. 6 Evaluation of impedance of conductor-earth circuits in function of f

图 7 给出了大地水平双层结构条件下架空线路系统导线—地回路阻抗随土壤电阻率 ρ 的变化曲线。在计算中,为了便于对导线—地回路阻抗变化规律进行分析,频率定为 10^6 Hz ;第 1 层土壤厚度为 20 m 。由前文分析可知,在较高频段,电磁波在水平双层结构大地中的透射深度主要受第 1 层土壤影响。因此,当水平双层土壤各层土壤电阻率均发生变化(变化范围 $10 \sim 5\,000 \Omega \cdot \text{m}$)时,架空线路导线—地回路阻抗主要受第 1 层土壤的影响。可以看出,当第 1 层土壤电阻率 ρ_1 不变时,自阻抗和互阻抗均随着第 2 层土壤电阻率 ρ_2 的增加而增加,但增加幅度较小,且其变化曲线基本为一水平直线;当第 2 层

土壤电阻率 ρ_2 不变时,自阻抗和互阻抗均随第1层土壤电阻率 ρ_1 的增大而迅速增大,且增大幅度较大。

图8给出了大地水平双层结构条件下架空线路导线—地回路阻抗随第1层土壤厚度 d 的变化曲线。在计算中,频率为 10^6 Hz,第1层土壤电阻率 ρ_1 为 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,第2层土壤电阻率 ρ_2 为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 。在较高频段,电磁波在水平双层结构大地中的透射深度随着第1层土壤厚度 d 的增大而迅速增大,而后又趋于饱和。因此,当第1层土壤厚度 d 在 $0.5\sim$

$100\ \text{m}$ 之间变化时,架空线路导线—地回路阻抗会呈现相同变化趋势。可以看出,在第1层土壤厚度 d 较小时,架空线路导线—地回路阻抗的电阻部分和电抗部分均迅速增大,尤其是电阻部分,从图8(a)中可以看出,当第1层土壤厚度 d 在 $0.5\sim 20\ \text{m}$ 之间变化时,电阻部分的增长率一直处于较高水平;但是随着第1层土壤厚度 d 的继续增大,架空线路导线—地回路阻抗将不再增大,一直保持一恒定数值。

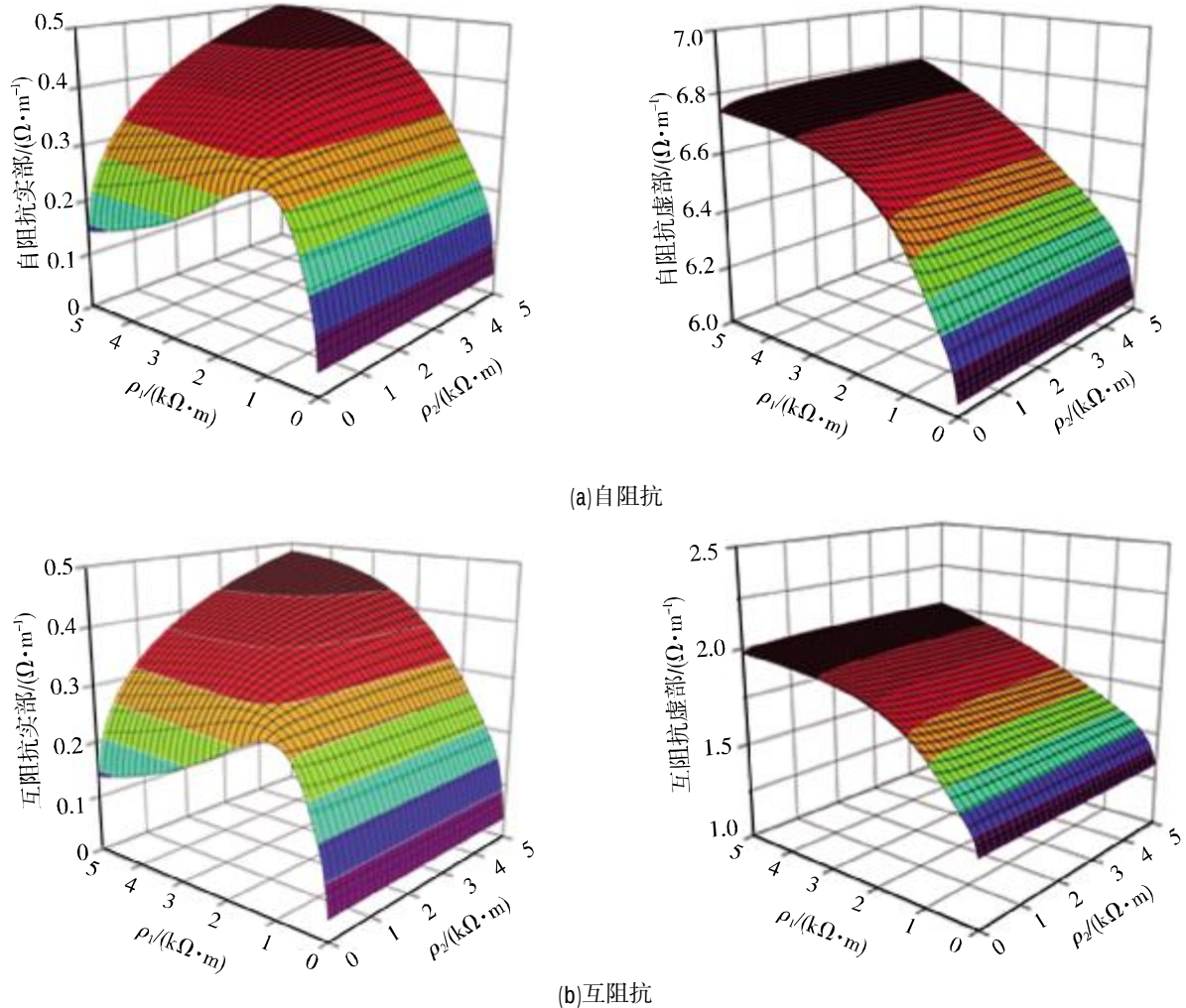


图7 导线—地回路阻抗随 ρ 的变化曲线

Fig. 7 Evaluation of impedance of conductor-earth circuits in function of ρ

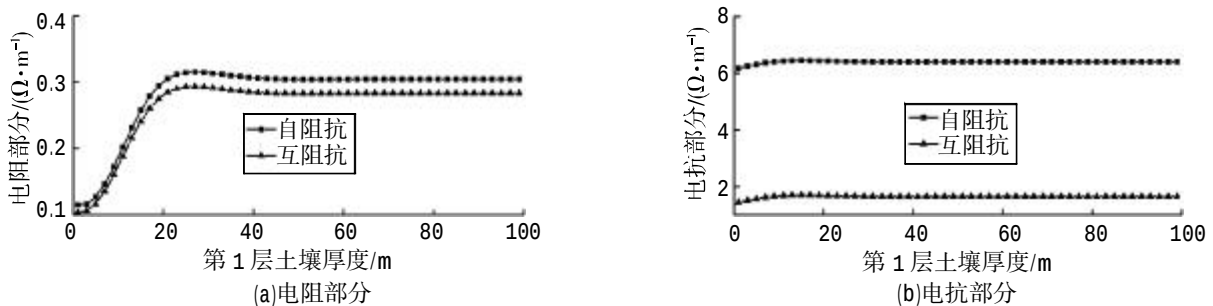


图8 导线—地回路阻抗随 d 的变化曲线

Fig. 8 Evaluation of impedance of conductor-earth circuits in function of d

4 结论

1)文中给出了基于复数镜像法的大地分层结构条件下架空线路系统导线—地回路阻抗的计算方法。通过对比分析,说明该方法运算结果符合物理规律,验证了该方法的正确性。

2)将文中方法用于大地分层结构条件下架空线路系统导线—地回路阻抗计算中,结果表明,该方法与现有常用方法的计算结果存在一定差异,文中方法克服了 Carson 公式计算结果频率性能较差的缺点,可得到更高的计算准确度。

3)以中国特高压输电线路为工程实例,计算并分析了大地水平双层结构条件下输电线路的导线—地回路阻抗的变化情况:架空线路导线—地回路阻抗随电流频率和第 1 层土壤厚度的增加而增大且均有饱和的趋势;与其他各层相比,大地分层结构条件下第 1 层土壤电阻率对架空线路导线—地回路阻抗的影响更为显著。

参考文献:

- [1] 舒印彪,刘泽洪,高理迎,等. ± 800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术,2006,30(1):1-8.
SHU Yinbiao, LIU Zehong, GAO Liying, et al. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6 400 MW [J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.
- [2] 杨勇,陆家榆,鞠勇.交流线路与 ± 800 kV 直流线路同走廊时的地面混合电场研究[J]. 电网技术,2009,33(15):54-59.
YANG Yong, LU Jiayu, JU Yong. Study on the hybrid electric field over the ground surface under AC lines and ± 800 kV DC lines in the same corridor [J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 54-59.
- [3] 吴桂芳,袁春峰,陆家榆,等.特高压直流线路与交流线路同走廊时混合电磁环境的计算[J]. 电网技术,2010,34(2):14-19.
WU Guifang, YUAN Chunfeng, LU Jiayu, et al. Calculation on electromagnetic environment of UHVDC and EHVAC transmission lines erected in a common corridor [J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 14-19.
- [4] RACHIDI F, NUCCI C A, IANZO M, et al. Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines [J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2009, 38(3): 250-264.
- [5] RACHIDI F. A Review of field-to-transmission line coupling models with special emphasis to lightning-induced voltages on overhead lines [J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2009, 54(4): 898-911.
- [6] PAPADOPOULOS T A, PAPAGIANNIS G K. Influence of earth permittivity on overhead transmission line earth-return impedances [C]//2007 IEEE Conference on Power Technology. [S.l.]: IEEE, 2007: 790-795.
- [7] AMETANI A, YONEDA T, BABA Y, et al. An investigation of earth-return impedance between overhead and underground conductors and its approximation [J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2010, 51(3): 860-867.
- [8] CARSON J R. Wave propagation in overhead wires with ground return [J]. Bell System Technical Journal, 1926(5): 539-554.
- [9] RACHIDI F, NUCCI C A, IANZO M, et al. Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(3): 250-263.
- [10] ORZAN D. Time-domain low frequency approximation for off-diagonal terms of the ground impedance matrix [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1997, 39(1): 64.
- [11] LU Tiebing, CUI Xiang, LI Lin. Transient analysis of aerial multiconductor transmission lines with branch [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2001, 37(5): 3298-3302.
- [12] 何金良,曾嵘.电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [13] 郭剑,邹军,何金良,等.水平分层土壤中点电流源格林函数的递推算法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):101-105.
GUO Jian, ZOU Jun, HE Jinliang, et al. Recursive method to obtain analytic expressions of green's functions in multi-layer soil by computer [J]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24(7): 101-105.
- [14] 齐磊,卢铁兵,张重远,等.考虑多层土壤时架空线的瞬态分析[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):66-69.
QI Lei, LU Tiebing, ZHANG Zhongyuan, et al. Transient analysis of overhead lines with multi-layer soil [J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(5): 66-69.
- [15] TSIAMITROS D A, PAPAGIANNIS G K, LABRIDIS D P, et al. Earth return path impedances of underground cables for the two-layer earth case [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, PWRD-20(3): 2174-2181.
- [16] TSIAMITROS D A, PAPAGIANNIS G K. Earth return Impedances of conductor arrangements in multi-layer soils-Part I: Theoretical model [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2392-2400.
- [17] DERI A, TEVEN G, SYMLYEN A, et al. The complex ground return plane: A simplified model for homogeneous and multi-layer earth return [J]. IEEE Transactions on PAS, 1981, 100(8): 3686-3693.

(下转第 41 页)

- [14] 李 佳, 谭向宇, 张 斌, 等. 雷直击建筑物时内部磁场分布[J]. 电瓷避雷器, 2009, 277(1): 36-38.
LI Jia, TAN Xiangyu, ZHANG Bin, et al. Distribution of magnetic field inside the buildings directly struck by lightning [J]. Insulators and Surge Arresters, 2009, 277(1): 36-38.
- [15] BUCCELLA C, CRISTINA S, ORLANDI A. Frequency analysis of the induced effects due to the lightning stroke radiated electromagnetic field [J]. IEEE Trans. on EMC, 1992, 34(3): 338-344.
- [16] ALA G, BUCCHERI P. Transient electromagnetic hazard inside a lightning protection system [J]. High Voltage Engineering, 1999(1): 275-278.
- [17] ALA G, SILVETRE M D. A simulation model for electromagnetic transients in lightning protection system [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(4): 539-554.
- [18] ALA G, SILVETRE M D, FRANCOMANO E, et al. Wavelet-based efficient simulation of electromagnetic transients in a lightning protection system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1257-1260.
- [19] 任晓明, 傅正财, 黄晓虹. 基于 FEM 的雷击室内电磁场计算[J]. 低压电器, 2010(7): 6-9.
REN Xiaoming, FU Zhengcai, HUANG Xiaohong. Calculation of indoor electromagnetic field induced by lightning strike based on finite element method [J]. Low Voltage Apparatus, 2010(7): 6-9.
- [20] 黄晓虹, 周歧斌, 杜亚平. 分析带金属板结构的建筑物内部雷电脉冲磁场分布的等效电路法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(7): 1112-1116.
HUANG Xiaohong, ZHOU Qibin, DU Yaping. An equivalent circuit method for computing Lightning-Induced magnetic fields in structures with metallic plates [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(7): 1112-1116.
- [21] 王 庆, 傅正财, 周歧斌, 等. 雷电流波形对雷击建筑物时室内磁场分布的影响[J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 7-9.
WANG Qing, FU Zhengcai, ZHOU Qibin, et al. Influence of lightning current waveform on magnetic fields in a building struck by lightning [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(1): 7-9.

沈 寰(1989—), 男, 硕士, 主要研究方向为防雷工程技术。

(上接第 34 页)

- [18] CHOW Y L, YANK J J, SRIVASTAVA K P. Complex image of grounding electrode in layered soils [J]. Journal of Applied Physics, 1992, 15(1): 1120-1125.
- [19] 李中新, 袁建生, 张丽萍. 变电站接地网模拟计算[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 76-79.
LI Zhongxin, YUAN Jiansheng, ZHANG Liping. Numerical calculation of substation grounding systems [J]. Proceeding of the CSEE, 1999, 19(5): 76-79.
- [20] 全余生, 卢亚军, 刘 赫, 等. 考虑大地分层结构时避雷线电能损耗的计算方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 178-183.
QUAN Yusheng, LU Yajun, LIU He, et al. Power loss calculation in lightning shield line with layered soil structure [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 178-183.
- [21] 曾庆禹. 特高压输电线路地面最大工频电场强度和导线最大弧垂特性[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 1-7.
ZENG Qingyu. Study on characteristics of maximum power frequency electric field gradient on ground and maximum sag of bundle conductor for UHVAC transmission line [J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 1-7.
- [22] 曹晓斌. 大电流及复杂地质结构下接地系统散流规律及参数计算[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- 朱 军(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统过电压与电磁暂态研究。
- 吴广宁(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术方面的教学与研究工作。