

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.12.016

基于矩量法的同走廊并行交流输电线路工频电场求解

唐 波, 江浩田, 孙 睿, 刘 任, 吴 卓

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 同走廊并行交流输电线路工程的电磁环境较单回线路复杂, 传统的模拟电荷法及有限元法无法适用于大空间尺度下的同走廊并行线路工频电场计算。为此, 文中提出了一种基于矩量法的同走廊并行交流输电线路工频电场的求解算法。该算法考虑了单相导线的弧垂, 依据其空间悬链线形状方程, 推导出与弧垂相关的单相导线电场积分方程, 从而采用矢量叠加原理获得同走廊并行交流线路在空间任意场点处的电场积分方程。采用脉冲函数和狄克拉函数, 通过矩量法对该电场积分方程进行离散, 最终得到输电线路的工频电场值。以三峡大学220 kV跨沁园并行输电线路为例, 根据仿真计算与实验验证结果, 认为相比于模拟电荷法, 文中算法的计算结果与实情更为符合, 适用于同走廊并行交流输电线路的电场研究。

关键词: 同走廊并行交流输电线路; 工频电场; 模拟电荷法; 矩量法; 电场测量

Calculation of Power Frequency Electric Field for AC Parallel Transmission Lines in the Same Corridor Based on MOM

TANG Bo, JIANG Haotian, SUN Rui, LIU Ren, WU Zhuo

(College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: The electromagnetic environment under AC parallel transmission lines in the same corridor is more complex than the single circuit line. Traditional charge simulation method (CSM) and finite element method could not be applied in the calculation of power frequency electric field for parallel transmission lines in the same corridor at large spatial scales. Therefore, an algorithm is proposed of calculating power frequency electric field for AC parallel transmission lines in the same corridor based on the methods of moments (MOM). This algorithm considers the single-phase conductor arc sag, according to the equation of catenary, and the electric field integral equation of single-phase conductor is derived related to arc sag. Thus, the electric field integral equation at any point of the space of AC parallel transmission lines in the same corridor is obtained by the vector superposition principle. Using the function of pulse and DC, the electric field integral equation is discrete by MOM. Finally, the value of power frequency electric field under transmission lines is obtained. Taking the China Three Gorges University 220 kV transmission line over Qinyuan as an example, according to the results of simulation and experimental, this algorithm is more coincidence with the truth than that compared to the CSM. And it is also applied to the study of electric field for AC parallel transmission lines in the same corridor

Key words: parallel transmission lines in the same corridor; power frequency electric field; CSM; MOM; electric field measurement

0 引言

随着全国用电量的增加和走廊用地的紧张, 同

走廊并行交流输电线路作为解决土地资源稀缺的方法越来越受到青睐^[1-3]。然而, 同走廊并行输电线路的大量输电导线在局域范围内集中的特点, 造成

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307098)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51307098).

电磁环境较常规线路更为复杂^[4-5]。当前,国际大电网会议^[6]推荐了单回输电线路的电场算法以及国家标准对限值^[7]进行了规定,但缺乏多条输电线路并行时的相关规定。

目前,国内外对同走廊并行交流输电线路电场的求解问题研究较少,且没有形成固定的标准和规定^[8-10]。现有输电线路工频电场的算法均以单回输电线路为基础^[11-14],且大都按照国际大电网会议推荐的模拟电荷法,将导线等效为无限长直导线进行计算。这种方法虽然便捷,但和实情有一定区别,特别当线路电压等级较高、线路邻近区域电场环境复杂或者导线数量较多时,计算误差较大。为此,文[15-16]采用有限元法计算线路的电场强度。但该方法对于所占空间区域达数百米的并行或交叉线路来说,计算量极大,在工程应用中局限性明显;文[17]采用简单的空间点电荷求解模型,以各根导线的空间电场矢量叠加实现并行输电线路的工频电场;该方法虽然算法简单,却未考虑各相导线之间的电场耦合,其计算结果也不甚理想。

针对该问题,文中基于国际大电网会议的推荐算法模拟电荷法,考虑导线空间悬链线形状,建立了同走廊并行交流输电线路空间电场的积分方程;并提出采用矩量法对该方程进行离散求解,从而实现了同走廊并行输电线路电场的准确快速求解。

1 现有工频电场的计算方法及其应用局限

1.1 工频电场的常用算法

输电线路的工频电场可以视为准静电场,静电场的数学模型可以归结为以电位函数为待求量的泊松方程或拉普拉斯方程的定解问题^[18-19]。在二维场中,可以采用的模拟电荷为无限长直线电荷。电位系数矩阵由镜像原理求得,地面为电位等于零的平面,地面的感应电荷可由对应地面导线的镜像电荷代替,由此得到相应的电位系数矩阵;同时由输电线路的电压等级可以得到电压矩阵。多导线线路中单位导线上的等效电荷主要可由电压矩阵和麦克斯韦电位矩阵进行求解,最终根据求得的电荷计算得到空间中任一点电场强度的水平及垂直分量。

计算输电线路电场时,文[6]的推荐计算方法要求采用简化手段,忽略线路弧垂、档距等因素,假设输电导线无限长且平行于地面,并取导线对地平均高度为计算高度,从而求解模型。然而,随着电压等级升高引起的导线分裂以及同走廊并行输电线路在局域空间内出现成倍数的导线,则采用固定高

度的无限长直导线模型进行计算得到的电场显然较实际误差增大。因此,需提出一种更为准确的同走廊并行交流输电线路工频电场的计算方法。

1.2 同走廊并行交流输电线路的工频电场求解分析

同走廊并行交流输电线路见图1。相比于单回输电线路,同走廊并行线路由于并行同走廊紧密架设,在局域空间中出现大量电压等级、相序排列、空间布置方式及其他参数不尽相同的导线,从而导致同走廊区域内的电场环境十分复杂,相互邻近的高压交流线路间的相互干扰水平更高,耦合关系更复杂。若采用传统工频电场求解算法,仍采用确定性电位矩阵进行求解,实际上忽视了同走廊并行各条导线之间不同电场分量的矢量叠加影响,以及导线空间拓扑对电位系数及电荷的影响,从而造成同走廊并行架设线路工频电场的难以准确求解及分析。

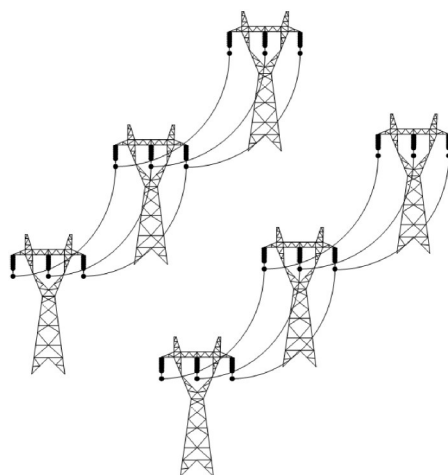


图1 同走廊并行交流输电线路图

Fig. 1 Alternating current parallel transmission lines in the same corridor

为此,可考虑根据同走廊并行架设线路各导线的实际空间拓扑,建立准确的电场求解积分方程,并采用合适的算法对方程进行求解,从而准确获取工频电场及其衰减特性。

2 基于矩量法的工频电场求解算法

2.1 同走廊并行交流输电线路电位求解的积分方程

根据电力行业推荐标准^[19],对输电线路工程电场的测试一般在档距中央断面,因此计算时可只考虑一个档距进行计算。考虑导线空间形状,选取某相建立模型,见图2。在一个档距内,将该相导线沿 x 轴等间距分割成 N 段,每段导线线电荷密度为 $\tau_i (i=1, 2, \dots, N)$;同样,镜像导线等间距地剖分为 N 段,每段导线线电荷密度为 $\tau'_i (i=1, 2, \dots, N)$,有对应关系 $\tau_i = -\tau'_i$ 。

$$\varphi(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^{6n} \tau_i \Delta l_i \left\{ \frac{1}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z+z_i)^2}} \right\} \quad (13)$$

进而可得到任意点处的场强为:

$$E_x(x, y, z) = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0 N} \sum_{i=1}^{6n} \frac{\tau_i(x-x_i)}{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 \right]^{3/2}} - \frac{L}{4\pi\epsilon_0 N} \sum_{i=1}^{6n} \frac{\tau_i(x-x_i)}{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z+z_i)^2 \right]^{3/2}} \quad (14)$$

$$E_y(x, y, z) = -\frac{\partial\varphi}{\partial y} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0 N} \sum_{i=1}^{6n} \frac{\tau_i(y-y_i)}{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 \right]^{3/2}} - \frac{L}{4\pi\epsilon_0 N} \sum_{i=1}^{6n} \frac{\tau_i(y-y_i)}{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z+z_i)^2 \right]^{3/2}} \quad (15)$$

$$E_z(x, y, z) = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0 N} \sum_{i=1}^{6n} \frac{\tau_i(z-z_i)}{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 \right]^{3/2}} - \frac{L}{4\pi\epsilon_0 N} \sum_{i=1}^{6n} \frac{\tau_i(z-z_i)}{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z+z_i)^2 \right]^{3/2}} \quad (16)$$

3 算例分析

3.1 与已有文献的结果对比分析

文[13]中所计算的 500 kV 并行线路的线路布置见图 3, 两回导线均为水平排列, 导线型号为 4×LGJ-400/35, 避雷线型号为 GJ-70, 子导线按方形四角分布, 分裂间距为 0.45 m, 两回线路的最小边相接近距离为 70 m。同时测得的 I 回导线的平均间距为 12.5 m, II 回导线的平均间距为 13.0 m, I 回导线对地平均高度为 17.3 m, II 回导线对地平均高度为 17.5 m。

将文中算法与文[13]的计算结果与实验结果进行对比, 见表 1。需要指出的是, 文[13]仅给出了具体的实测数据, 而仿真数据只是曲线图, 因此表 1 中

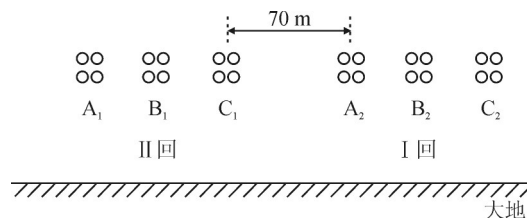


图 3 并行线路的布置形式

Fig. 3 Arrangements of two parallel lines

文[13]的仿真值是估测值。

表 1 与文[13]的结果对比

Table 1 Comparison with the results of literature [13]

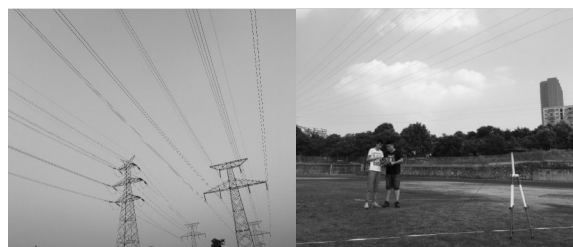
距原点/m	电场强度/ $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$		
	文[13]实验值	文[13]仿真值	文中算法仿真值
0	0.55	0.20	0.38
10	0.71	0.40	0.60
30	2.61	2.50	2.58
50	3.86	3.80	3.84
70	4.00	4.10	4.05
90	2.28	2.40	2.30

从结果的对比可以看出, 由于文中算法的计算模型考虑了线路的弧垂, 以及各导线之间的耦合关系, 仿真结果更贴近实际。

3.2 三峡大学实验测试结果分析

3.2.1 同走廊并行交流输电线路的基本参数

三峡大学沁苑足球场并行输电线路包括 2 条并行的同塔双回线路, 其中同塔双回线路的电压等级均为 220 kV, 见图 4(a)。输电线路参数的模型见图 5。



(a) 同走廊并行输电线路 (b) 现场实测图

图 4 同走廊并行输电线路及现场实测图

Fig. 4 Parallel transmission lines in the same corridor and field measurement

3.2.2 同走廊并行交流输电线路的电场实验

实验测量包括两部分: 对线路参数的测量以及对工频电场的测量。测量时间为 2016 年 5 月 20 日 14:00 点, 天气良好。测量地点为三峡大学沁苑足球场。

首先进行线路参数的测量, 用于线路参数测量的仪器是 Bushnell 2-1000 型号激光测距仪, 该仪器误差为 ± 0.01 m。测量各并行线路档距、各相导线最大弧垂及其弧垂最低点的对地距离, 以及 12 条相

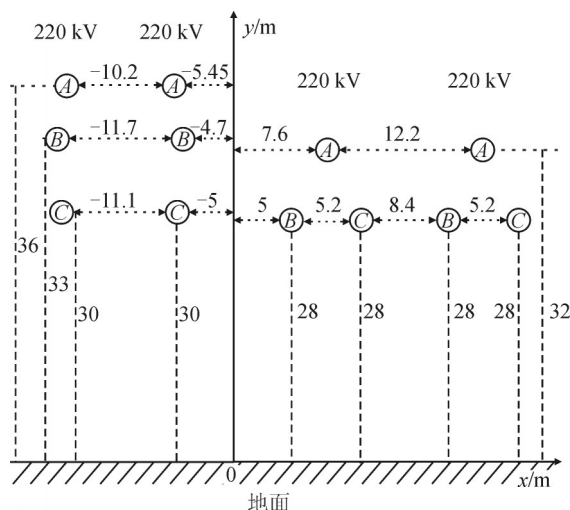


图5 并行输电线路结构简图

Fig. 5 Structure diagram of parallel transmission lines

导线之间的相对距离。然后进行工频电场的测量,用于工频电场测量的仪器是 HI-3604 电频场测量仪。见图 5,以 2 条线路中心点为基准,垂直于线路路径方向,测量工频电场的横向衰减特性。测量时,以两回线路中心(图 50 点)对地投影点为坐标原点,测点离地高度 1.5 m。测量分别沿线路横向进行,间隔 2 m 取点。每点测量时间不少于 1 min,待数据显示基本稳定后读数^[1]。现场实测图片见图 4(b)。

3.2.3 计算结果与实验值的对比分析

采用文[1]的模拟电荷法,以线路弧垂最低点对地高度为作为计算高度,将输电线设为无限长直线,计算输电线路下方距地面 1.5 m 处的电场值;采用文中提出的基于矩量法的工频电场求解算法,考虑输电线路实际的情况,计算输电线路下方距地面 1.5 m 处的电场值。将 2 种算法得到的结果与实验的测量值进行对比,见图 6。

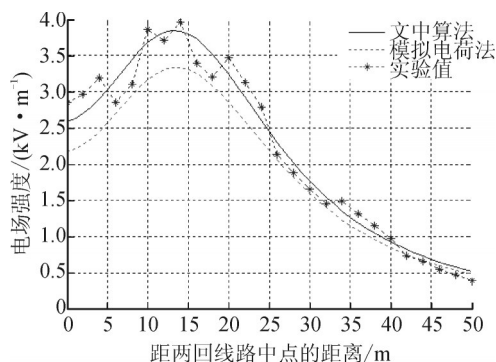


图6 两种算法的结果及实验值的对比

Fig. 6 Comparison of the results of the two algorithms with experimental values

由图 6 可以看出,两种算法下的电场强度横向分布的趋势相同,但是数据在一定范围内存在差距,文中提出的算法下的电场强度值在一定范围内

比传统算法下的电场强度值更大。这是由于传统算法下的模型为无限长直线,电场耦合关系较为简单,且在计算时以弧垂最低点的高度为线路的对地高度;而文中提出的算法下的模型为考虑弧垂的三维模型,电场耦合关系更加复杂,在计算中考虑了线路弧垂对输电线路下方电场分布的影响。显然,在计算时,文中提出的算法比传统算法更准确的反应电场的分布。

同样可知,计算结果与实验值的趋势相同,但仍存在一定的误差。其中误差最大值为 0.21 kV/m,误差最小值为 0.1 kV/m。造成误差的原因主要有:①工频电场测量仪器本身存在的精度误差;②线路参数测量时的人为操作误差;③在测量过程中,由于电荷广泛存在于空气、人体、动植物等中,从而影响测量的结果,这也是误差的主要来源。

4 结语

文中基于模拟电荷法,建立了同走廊并行交流输电线路空间电场的积分方程,采用矩量法离散该方程,从而计算得到输电线路下方的电场值。通过与实验测量值的对比,验证了该算法的准确性;同时通过传统算法与该算法的对比仿真计算,验证了该方法比传统算法更能体现反映线路下方的电场分布。文中提出的方法适用于并行交流输电线路结构类型,计算结果与实测结果相近。因此,在实际工程中,可以采用文中提出的算法进行计算。

参考文献:

- [1] 朱 军. 超/特高压交/直流输电线路共用走廊的电磁特性及其优化布局研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
ZHU Jun. Analysis on electromagnetic characteristics and optimized layout of common corridor consisting of EHV/UHV AC/DC transmission lines[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [2] ZHANG Bo, HE Jinliang, CUI Xiang, et al. Electric field calculation for HV insulators on the head of transmission tower by coupling CSM with BEM[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4):543-546.
- [3] 许 丹, 马星河, 王晨辉, 等. 500 kV 输电线路电场强度测量与计算分析[J]. 高压电器, 2013, 37(7):25-28.
XU Dan, MA Xinghe, WANG Chenhui, et al. Electric field measurement and computational analysis on 500 kV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 37(7):25-28.
- [4] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
FENG Cizhang, MA Xikui. An introduction to engineering

- electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [5] 邬雄, 万保权. 输变电工程的电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- WU Xiong, WAN Baoquan. Electromagnetic environment of power transmission project[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [6] 国际大电网会议第36.01工作组. 输电系统产生的电场和磁场[M]. 邵方殷, 译. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- CIGRE Working Group on Article 36.01. Electric and magnetic fields generated power by transmission system[M]. SHAO Fangyin, Translation. Beijing: China Water Power Press, 1984.
- [7] 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范: HJ/T 24—1998[R]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- Technical regulations on environmental impact assessment of electromagnetic radiation produced by 500 kV ultra high voltage transmission and transfer power engineering: HJ/T 24—1998[R]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [8] 甘艳, 李慧慧, 杜志叶, 等. 500 kV 并行线路工频电场测量及影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2014(9):190-194.
- GAN Yan, LI Huihui, DU Zhiye, et al. Measurements and influencing factors analysis of power frequency electric field under 500 kV parallel transmission lines[J]. Water Resources and Power, 2014(9):190-194.
- [9] SINGER H, STEINBIGLER H, WEISS P. A charge simulation method for the calculation of high voltage fields[J]. IEEE Trans. on PAS, 1974, PAS-93(5):1660-1668.
- [10] 杨文翰, 吕英华. 用模拟电荷法求解高压输电线附近电磁场[J]. 电网技术, 2008, 32(2):47-50.
- YANG Wenhan, LYU Yinghua. Application of emulation charge method in calculation of electromagnetic environment near to HV transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(2):47-50.
- [11] LEE B Y, PARK J K, MYUNG S H, et al. An effective modeling method to analyze electric field around transmission lines and substations using a generalized finite line charge[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(3):1143-1150.
- [12] 彭迎, 阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路3维工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 31(12):69-73.
- PENG Ying, RUAN Jiangjun. Calculation of three dimensional harmonic electric field around ultra high voltage overhead line based on the charge simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 31(12):69-73.
- [13] 杜志叶, 干喆渊, 阮江军, 等. 基于3D模拟电荷法的变电站工频电场计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(10):2587-2593.
- DU Zhiye, GAN Zheyuan, RUAN Jiangjun, et al. Calculation of power frequency electric field in substation using 3D charge simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10):2587-2593.
- [14] 甘艳, 阮江军, 邬雄. 有限元法分析高压架空线路附近电场分布[J]. 高电压技术, 2006, 31(8):52-55.
- GAN Yan, RUAN Jiangjun, WU Xiong. Analysis of the electric field intensity nearby high voltage transmission line by FEM[J]. High Voltage Engineering, 2006, 31(8):52-55.
- [15] 王晓燕, 赵建国, 邬雄, 等. 交流输电线路交叉跨越区域空间电场计算方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(2):411-416.
- WANG Xiaoyan, ZHAO Jianguo, WU Xiong, et al. Calculation method of electric field intensity for AC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2):411-416.
- [16] 曹红英, 张翼, 白永祥, 等. 并行输电线路工频电磁场的叠加算法研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014(4):62-66.
- CAO Hongying, ZHANG Yi, BAI Yongxiang, et al. Research of superposition algorithm of power frequency electromagnetic field of parallel transmission lines[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2014(4):62-66.
- [17] 程炜, 刘黎刚, 张艳芳, 等. 特高压输电线路工频电场的数值仿真研究[J]. 高压电器, 2012, 48(2):1-6.
- CHENG Wei, LIU Ligang, ZHANG Yanfang, et al. Numerical simulation study on power frequency electric field of UHV AC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2):1-6.
- [18] 黄道春, 阮江军, 文武, 等. 特高压交流输电线路电磁环境研究[J]. 电网技术, 2007, 31(1):6-11.
- HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WEN Wu, et al. Study on electromagnetic environment of UHV AC transmission lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(1):6-11.
- [19] Methods of measurement of power frequency electric field and magnetic field from high voltage overhead power transmission line and substation: DL/T 988—2005[S]. 2005.
- [20] 孟遂民, 孔伟. 架空输电线路设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- MENG Suiming, KONG Wei. Overhead transmission line design[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- 唐波(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事输变电系统电磁环境与超特高压输电技术研究。