

交流 500 kV/1000 kV 同塔四回输电线路空间电场分析

谢天喜, 马勇, 徐阳, 周志成, 陶风波, 陈娜, 何泽家

(国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

摘要:交流超/特高压同塔四回并架输电线路在国内外尚无先例,其运行方式和相序布置多样,线路导线及空间中电位、电场分布复杂。为研究该线路对周围电磁环境的影响,针对我国设计的交流 500 kV/1000 kV 同塔四回输电线路,计算了 8 种典型相序布置下,一个工频周期内导、地线表面场强及线路下方空间中的电场分布,分析了现有的布置形式与配置参数下导、地线表面及空间电场分布是否满足工程要求,并对地线进行了优化。结果表明,8 种典型相序布置下导、地线表面最大场强分别在 2500 kV/m 和 3100 kV/m 左右,将地线直径优化至 25 mm 后,导、地线表面最大场强相当,该导、地线配置可应用于海拔 1.2 km 以下线路,线路下方对地 1.5 m 处空间中的最大场强为 3.2 kV/m,满足标准要求。

关键词:1000 kV;同塔四回;电晕;电场;结构优化;有限元;电磁环境

中图分类号:TM151

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2016)06-0013-05

发展和建设特高压工程已纳入我国“十二五”规划纲要,是我国家战略的重要内容。目前,进入我国苏浙沪地区的在建和规划的超、特高压交直流输电项目较多,由于华东沿海地区工业发展和城市化进程速度很快,导致输变电工程在路径选择和通道清理上遇到较大的困难。因此如何节约输电线路走廊用地,降低建设投资,减少输电线路对环境的影响是当下迫切需要研究和解决的课题^[1-3]。

采用同塔双回或多回输电线路,是当前提高线路走廊输电效率的主要措施^[4,5]。我国规划建设交流超高压 500 kV 与特高压 1000 kV 同塔双回并架输电线路,并进行了杆塔设计、试验、动力响应等方面的研究^[6-8]。然而,由于线路和人口密集,超、特高压输电线路已不可避免地靠近或进入了居民区,而人们对自身所处环境的质量以及环境对人体的影响关注度不断升温,导致高压输电线路引起的电磁环境投诉与纠纷越来越多^[9,10]。其中导线由于表面粗糙,场强集中,较容易出现电晕,其产生的噪声将使线路附近的居民或工作人员感觉到烦躁不安,严重时可以使人们难以忍受,引发的无线电干扰也会影响附近电子设备的正常工作^[11]。同时,输电线路附近地面上方的空间电场是电磁环境测评的重要参数,相关环保标准中均进行了详尽严格的规定^[12,13]。

因此计算分析高压输电线路下方的电场分布,研究改善措施对高压输电线路的顺利建设和投运具有重要的意义。尤其对于不同电压等级多回同塔并架线路,由于相序布置多样、塔形和导线布置复杂、两种电压等级间电场相互影响,导致导、地线表面电场和空间电场分布情况更为复杂多变,因而有必要进行深入研究分析。

1 计算方法及模型

目前,计算工频电场的数值方法主要包括有限元法、有限差分法、模拟电荷法、边界元法等。其中有限元法是微分方程的一种数值解法,适用于解决含有复杂媒质和几何边界的静电场、静磁场及电流场等问题。其原理是将连续物理结构划分为不同大小、不同类型的区域,称为单元,以后的数值计算分析就在这些离散单元上进行。根据不同学科,对每个单元选取适当的插值函数,使得该函数在子域内部、子域分界面上(内部界面)以及子域和外界分界面(外部边界)上都满足一定的条件,推导出每个单元的作用方程,然后把所有单元的方程组合起来,组集成整个结构的系统方程。求解该系统方程,就可以得到结构的近似解^[14,15]。

电磁场问题的求解都可视为从麦克斯韦方程出发,用偏微分方程和定解条件描述的边值问题求解。由于本文研究的问题在工频电压下,可作为准静电场处理,因此满足如下边值条件^[16,17]:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = -\rho/\varepsilon, \varphi|_{r_1} = f_0(p) \\ \partial\varphi/\partial n|_{r_2} = f_1(p), [\partial\varphi/\partial n + f_1(p)\varphi]|_{r_3} = f_2(p) \end{cases} \quad (1)$$

其所对应的等价变分问题为:

$$\begin{cases} F(\varphi) = \frac{1}{2} \int_V \int_V \varepsilon |\nabla\varphi|^2 dV - \int_V \int_V \rho\varphi dV - \\ \int_{\Gamma} \varepsilon (f_2\varphi - \frac{1}{2}f_1\varphi^2) ds \\ \varphi|_{r_1} = f_0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: V 为求解域; Γ 为求解域边界。剖分整个求解域 V 成 n_e 个单元,则总体泛函式为:

$$F(\varphi) = \sum_{e=1}^{n_e} F^e(\varphi) \quad (3)$$

泛函 F 达到极值时可得单元矩阵方程为:

$$[K_\varphi]^e [\varphi_K^e] = [F]^e \quad (4)$$

式(4)中:上标“e”的矩阵为单元“e”的贡献。

合成为总体系数矩阵 $[K]$ 和总体右端列向量 $[F]$ 。总体合成为:

$$[K][\varphi] = [F] \quad (5)$$

式(5)中: $[\varphi]$ 为求解域内全部节点电位所形成的电位列阵,由此即可得到各节点的电位值。

本文运用三维有限元仿真软件 ANSYS,参照我国交流 500 kV/1000 kV 同塔四回并架输电线路的设计方案,SSZT2 试验塔呼高为 39 m,总高为 124.1 m,根开 23.4 m。双回 1000 kV 导线垂直排列,导线型号为 8xLGJ-630/45,分裂间距 400 mm,复合绝缘子串长 9.75 m;双回 500 kV 导线三角排列,导线型号为 6xLGJ-240/30,分裂间距 400 mm,复合绝缘子串长 4.45 m,地线型号为 JLB20A-240。塔形尺寸及相序编号如图 1 所示。

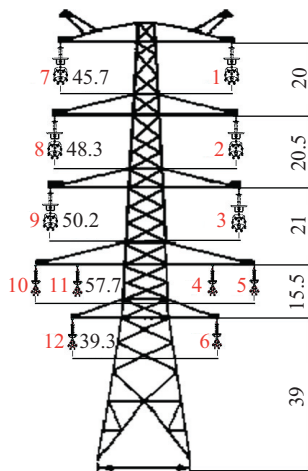


图 1 塔形尺寸及相序编号

由于计算场域较大,而导线尺寸相对较小,因而采用三维模型计算难度较高,本文采用二维无限长直导线模型进行适当简化计算。

2 计算结果及分析

混压同塔四回线路可能的运行方式很多,包括单回、双回、三回和四回,由于回与回、相与相之间的影响,不同运行方式下导、地线表面场强和空间中电场分布差异较大。选取如表 1 所示 8 种特殊的运行方式,对其导、地线表面场强和空间中场强进行了计算分析。

表 1 8 种特殊运行方式

编号	1	2	3	4
运行方式	500 单	1000 单	500 双	1000 双
编号	5	6	7	8
运行方式	500 单 1000 单 同边	500 单 1000 单 异边	500 双 1000 单	500 单 1000 双

8 种运行方式下导、地线表面最大场强在一个工频周期内变化曲线如图 2 所示。当只有单回 500 kV 或 1000 kV 线路运行时,导、地线表面最大场强相对较低,最高不超过 2200 kV/m,随着运行回数的增加,导、地线表面最大场强也随之升高,尤其是当 500 kV 和 1000 kV 同边运行时,导、地线表面最大场强较高,达到 2500 kV/m 左右,如运行方式 5,7,8。由此可见,相与相、回与回之间的相互影响较为明显,运行的回数增加会导致电场分布更为复杂,导、地线表面场强更高。

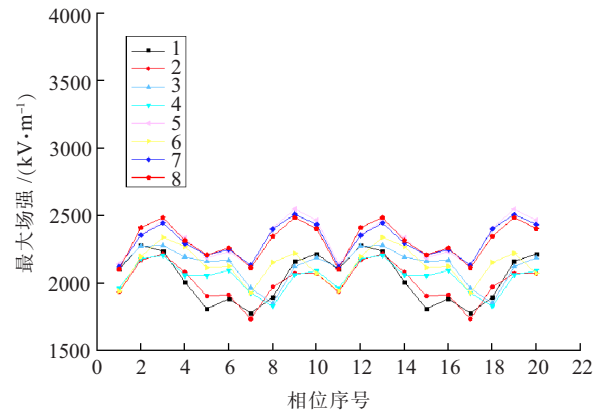


图 2 导线和地线表面场强最高值在一个工频周期内变化曲线

8 种运行方式下对地 1.5 m 处空间中场强最大值在一个工频周期内变化曲线如图 3 所示。与导、地线表面场强规律有所不同,地面附近空间中的电场强度除受到运行回数的影响外,更受到运行导线离地面的高度的影响,1000 kV 单回线路运行时明显低于 500 kV 线路运行时的场强。

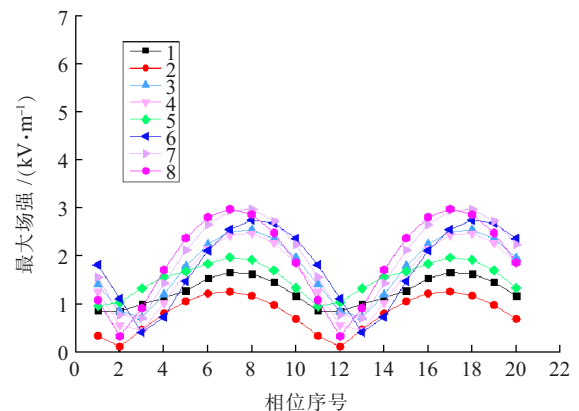


图 3 一个工频周期中线路下方对地 1.5 m 处空间中场强最大值变化曲线

此外,混压同塔四回线路相序布置形式也很多,包括正相序、逆相序、异相序等,8 种典型的相序布置如表 2 所示。

表 2 中列出了 8 种典型的相序布置。计算中分别取 500 kV 和 1000 kV 输电线路最高运行相电压 317 kV 和 635 kV,根据表 2 中的典型相序布置分别进行三相加载,计算一个工频周期内的 20 个相位的电位、

表 2 8 种典型的相序布置

电压等级 /kV	相序布置							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1000	A	A	A	C	A	C	A	A
	B	B	B	B	B	B	B	B
	C	C	C	A	C	A	C	C
500	A	A	A	C	A	A	A	C
	B	B	B	B	B	B	B	B
	C	C	C	A	C	C	C	A

电压等级 /kV	相序布置							
	5	6	7	8	5	6	7	8
1000	A	A	C	C	C	C	C	C
	B	B	B	B	B	B	B	B
	C	C	A	A	A	A	A	A
500	C	C	C	C	C	A	A	A
	B	B	B	B	B	B	B	B
	A	A	A	A	A	C	C	C

电场分布结果,导线为理想光滑表面。

线路空间中某一时刻典型电位和电场分布如图 4 所示,其中红色为高电位(电场)、深蓝色为低电位(电场),其他颜色为中间过渡电位(电场),颜色相近的区域则电位(电场)值也相近,不同颜色对应的电位(电场)值范围可由图右侧的标度查出。

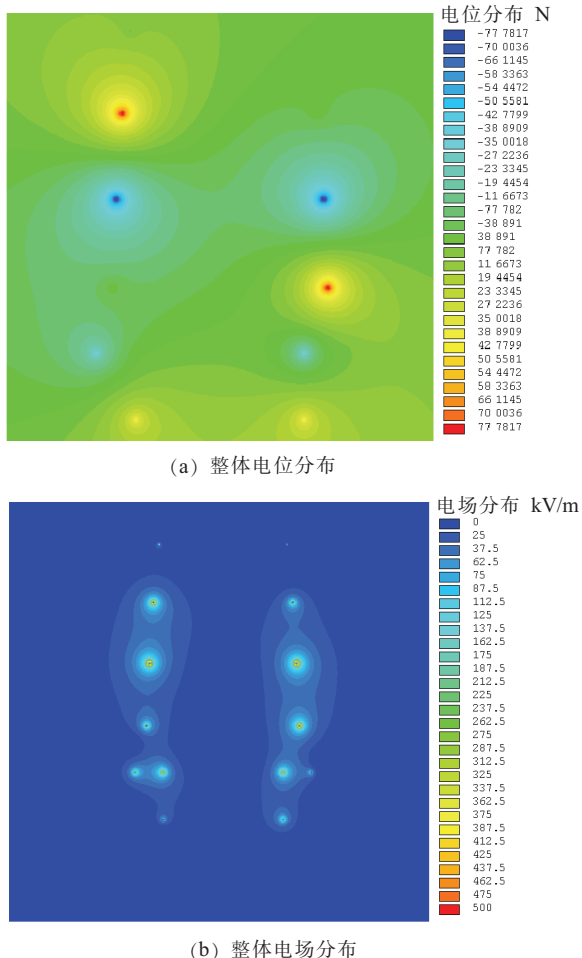


图 4 线路空间中某时刻电位和电场分布

由图 4 可见,同塔四回线路空间中电位分布复杂,回与回、相与相之间的相互影响显著,导致导线与地线及其附近空间中的电场分布畸变严重,场强较高。

当线路处于不同的相序布置下时,四回导线上的电压也不同,从而导致导、地线表面场强及空间中的电场分布各异。图 5 为 8 种相序布置下,一个工频周期内 20 个时刻所有导、地线表面场强最高值的变化曲线。

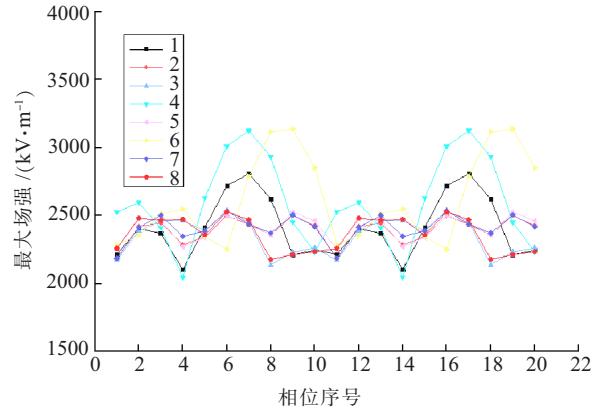


图 5 8 种相序布置下导线和地线表面场强最高值在一个工频周期内变化曲线

由图 5 中可知,导、地线表面场强最高值变化也呈周期性,频率为工频的一半。8 种相序布置下,导、地线表面最大场强在 2000~3200 kV/m,不同的相序布置下幅值和变化趋势差异较大。其中相序布置 4 和 6 下导、地线表面最大场强幅值最高,均超过了 3000 kV/m,其他 14 种相序布置下导、地线表面最大场强低于 3000 kV/m。

同时,相位变化时各相导线上的电位和相互间的影响也会随之变化,导致导、地线表面最大场强的最高值所在点也随之变动。如图 6 所示,相序布置 6 下大部分时间最高场强出现在地线上,其次在 500 kV 导线上,1000 kV 导线上出现最高场强的时间最短且幅值最低。最高场强出现在导线上时,均位于 500 kV/1000 kV 相邻的相导线上。

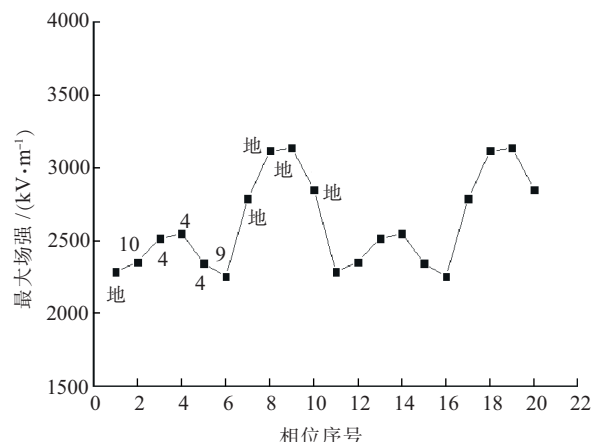


图 6 相序布置 6 下导线和地线表面场强最高值在一个工频周期内变化曲线

此外 8 种相序布置下导、地线表面场强最高值所在点也各不相同,如图 7 所示。相序布置 1,4,6 均是地线表面场强高于导线表面场强,达到 3000 kV/m 左右,而其它 5 种相序布置下则相反,为 2500 kV/m 左右。

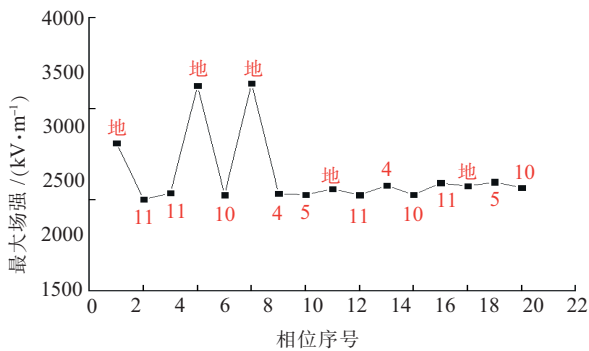


图 7 8 种相序布置下导线和地线表面场强最高值

PEEK 公式和研究经验表明,不考虑海拔、气象等因素影响,极不均匀电场下空气的局部放电临界场强峰值下在 3000 kV/m 左右,而对于导、地线等绞线金具,还需要考虑其表面粗糙度,通常用乘以 0.8~0.9 的表面粗糙系数的方法折算处理,即相当于降低至 2400~2700 kV/m^[18-20]。在相序布置 6 下对地线直径进行优化,结果如表 3 所示。

表 3 相序布置 6 下地线不同直径时表面最大场强

直径/mm	场强/(kV·m ⁻¹)
20	3139
23	2687
25	2500
30	2119

当地线直径增大至 25 mm 时与导线表面最大场强相当,在 2500 kV/m 左右。随着海拔升高,气压逐渐降低,相同电极布置形式下,其起晕电压会随之降低,同时起晕场强也会降低。根据金具电晕试验国家标准,当试验金具用于海拔高于 1 km 但不高于 4 km 的地区,而试验在零海拔地区进行时,试验电压 U_H 应比额定运行电压 U_0 有所提高,按式(3)进行海拔修正^[21,22]:

$$U_H = k_H \times U_0 \quad (6)$$

$$k_H = \frac{1}{1.1 - 0.1H} \quad (7)$$

式(7)中: H 为海拔高度,km。与之相对应,高海拔下金具的起晕场强 E_H 会比零海拔时 E_0 有所降低,因而需要进行相应的修正,同时考虑导线表面粗糙系数 k_r 。

$$E_H = E_0 \times k_r / k_H \quad (8)$$

如将理想光滑表面状态下的导、地线表面场强均控制在 2500 kV/m 以下,取表面粗糙系数为 0.85,则该导、地线配置可应用于海拔 1.2 km 海拔以下地区。

随着相位的变化,线路附近空间中的电场分布也在时刻变化。相序布置 1 下,一个工频周期前 10 ms 内

线路下方对地 1.5 m 处空间中垂直于线路走向上的电场分布曲线(折算至有效值,后 10 ms 与之相同)如图 8 所示。

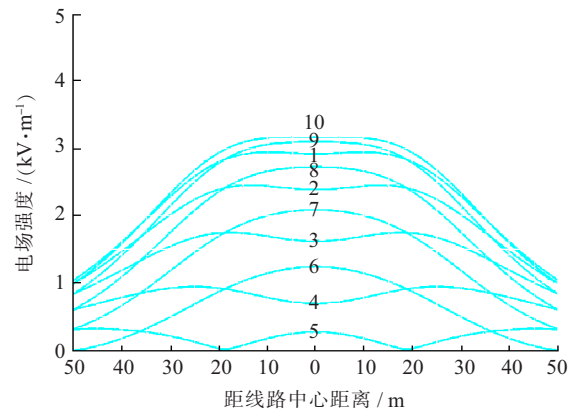


图 8 相序布置 1 下不同相位时线路下方对地 1.5 m 处空间中电场分布曲线

由图 8 可见,对地 1.5 m 处空间中的电场呈现出以线路中心为中点形如 n 或 m 形分布状态,在 10 ms 时达到最高,线路中心下方约为 3.2 kV/m。

根据 1000 kV 架空输电线路电磁环境控制值标准规定,交流 1000 kV 输电线路敏感区域下方离地 1.5 m 处电场强度值需控制在 4 kV/m 以下^[23]。8 种相序布置下,一个工频周期中线路下方对地 1.5 m 处空间中电场最大值变化曲线如图 9 所示。

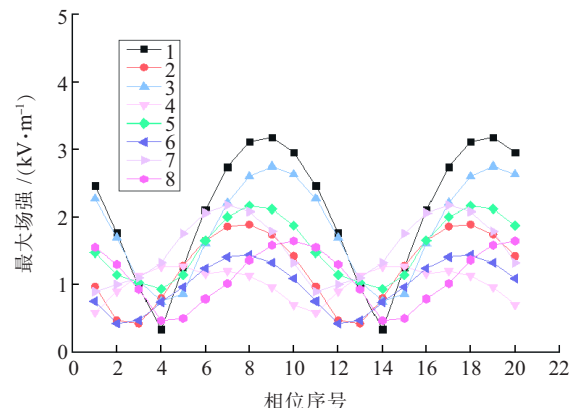


图 9 8 种相序布置下一个工频周期中线路下方对地 1.5 m 处空间中电场最大值变化曲线

由图 9 可见,8 种相序布置下,线路下方对地 1.5 m 处空间中场强均低于标准要求。

3 结束语

通过对 500 kV/1000 kV 同塔四回输电线路导线及空间电场进行计算分析,可得出以下结论:

(1) 超、特高压输电线路同塔并架时导线布置形式复杂、相序布置多样、相间电场相互影响严重。采用现有导、地线布置形式及配置参数,典型相序布置下导、地线表面最大场强在 2500 kV/m 左右,少数相序地线表面最大场强在 3100 kV/m 左右,如需在该相序布置下长期运行,可将地线直径优化至 25 mm 以上抑制

电晕。现有的导、地线配置或优化后的地线配置可应用于 1.2 km 海拔以下地区,应用于更高海拔区域时导、地线配置还需进一步优化。

(2) 现有的导线布置形式及典型相序布置下,线路下方对地 1.5 m 处空间中场强低于 4 kV/m,满足标准要求。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005:2-20.
- [2] 印永华. 特高压大电网发展规划研究[J]. 电网与清洁能源, 2009,25(10):1-3.
- [3] 窦飞,李树生. 500 kV 同塔四回架空送电线路电场分布的研究[J]. 江苏电机工程,2004,23(1):11-16.
- [4] 孙秋芹,李庆民,吕鑫昌,等. 同塔多回输电线路并联电抗器的参数优化分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):50-57.
- [5] 张佰庆,谢伟,康宇斌,等. 500kV 双回直线转角塔电场仿真分析[J]. 江苏电机工程,2015,34(4):63-66.
- [6] 王兴国,杜丁香,周泽昕. 超/特高压同塔多回线路零序电流补偿系数整定方案[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):81-85.
- [7] 李清华,杨靖波,韩军科,等. 超/特高压交流同塔四回钢管塔设计及试验[J]. 中国电力,2012,45(3):14-17.
- [8] 韩军科,杨靖波,杨风利,等. 超/特高压同塔多回输电线路脱冰跳跃动力响应分析[J]. 电网技术,2012,36(9):61-67.
- [9] 万保权,路遥,邬雄,等. 500 kV 同塔 4 回线路无线电干扰和工频电场[J]. 高电压技术,2007,33(3):113-116.
- [10] 弟泽龙,吴九汇. 高压交流输电线路电晕可听噪声机理及理论模型研究[J]. 西安交通大学学报,2012,46(8):1-6.
- [11] 谢天喜,莫娟,彭宗仁,等. 750 kV 输电线路耐张塔绕跳间隔棒结构优化[J]. 高电压技术,2011,37(7):1656-1662.
- [12] HJ/T 24—1998 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S].
- [13] DL/T 5092—1999 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S].
- [14] 倪光正. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社,2010:34-56.

- [15] 龚曙光. ANSYS 基础应用及范例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2003:101-112.
- [16] 肖冬萍. 特高压交流输电线路电磁场三维计算模型与屏蔽措施研究[D]. 重庆大学,2009.
- [17] 谢天喜,刘鹏,李靖,等. 交流 1000 kV 同塔双回输电线路复合绝缘子电场分布[J]. 高电压技术,2010,36(1):224-229.
- [18] 谢天喜,莫娟,彭宗仁,等. 500 kV 紧凑型线路悬垂复合绝缘子均压环电晕抑制分析[J]. 高电压技术,2010,36(7):1779-1784.
- [19] 王廷华,王亚伟,段基梅,等. 高压输电线路参数对计及电晕放电的电场强度的影响[J]. 高压电器,2011,47(6):77-82.
- [20] 汤振鹏,陈剑平,陈澜,等. 500 kV 顺江乙线老化线路电晕起始电压变化特性[J]. 高压电器,2013,49(1):34-39.
- [21] GB/T 2317.2—2008 电力金具试验方法第 2 部分:电晕和无线电干扰试验[S].
- [22] DL/T 1178—2012 1000 kV 交流输电线路金具电晕及无线电干扰试验方法[S].
- [23] DL/T 1187—2012 1000 kV 架空输电线路电磁环境控制值[S].

作者简介:

谢天喜(1983),男,湖北天门人,高级工程师,从事电力设备结构优化及电力系统过电压研究工作;

马勇(1986),男,湖北襄阳人,工程师,从事输变电工程启动调试、过电压检测分析等工作;

徐阳(1987),男,江苏扬州人,工程师,从事直流系统过电压及直流断路器研究工作;

周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事电力系统过电压及输电线路运行及维护等方面研究工作;

陶风波(1982),男,江苏常州人,高级工程师,从事电力系统过电压及脉冲功率研究工作;

陈娜(1985),女,安徽巢湖人,工程师,从事电力系统一次设备评价研究工作;

何泽家(1979),男,湖北红安人,高级工程师,从事电力系统人力资源管理相关工作。

Analysis of Electric Field Distributions of 500 kV/1000 kV AC Quadruple-circuit Transmission Lines on Same Tower

XIE Tianxi, MA Yong, XU Yang, ZHOU Zhicheng, TAO Fengbo, CHEN Na, HE Zejia

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In China, a 500 kV/1000 kV AC quadruple-circuit transmission line will be constructed in the near future. This kind of line has multiple operating modes and complicated arrangement forms, which results in complex electric potential and field distributions. To study the effect of transmission line on surrounding electromagnetic environment, the electric field distributions around the surfaces of conductors and earth wires and under transmission line in eighteen typical operating modes and a fundamental frequency circle are calculated, and then the conductors and earth wire configurations are optimized. The results show that the maximum electric field intensities on the surfaces of conductors are about 2500 kV/m, and on the earth wires are about 3100 kV/m; and the electric field intensities on the surfaces of conductors equals to the ones of the earth wires when the diameter of earth wire are 25 mm. The conductors and earth wires are suitable for the altitude of line located less than 1.2 km, in such a case the maximum electric field intensity in the space above the ground and below the lines is lower than 4 kV/m which is up to standard.

Key words: 1000 kV; Quadruple-circuit; Corona; Electric Field; Structure Optimization; Finite Element Method (FEM); Electromagnetic Environment