

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.12.016

地形对1 000 kV交流输电线路地面工频电场的影响分析

杨 滔, 邹岸新

(国网重庆市电力公司, 重庆 400014)

摘要:工频电场是1 000 kV交流输电线路电磁环境影响的重要因素之一,容易受多种因素的影响。为准确掌握地形对其影响规律,基于镜像法并结合优化模拟电荷法,提出了可用于起伏地形下工频电场计算的方法,其有效性得到了实测数据的验证。利用该计算方法对1 000 kV交流输电线路在不同地形及起伏角度情况下的工频电场分布进行仿真分析,结果表明:起伏角度越大,工频电场的分布畸变越强;凹形地形靠近地面的两个拐角和凸形地形顶部的两个拐角会增大工频电场,而对应的另外两个拐角对工频电场有一定的抑制作用。该方法及相应的仿真分析结果可为1 000 kV交流输电线路经过起伏地形时线路规划设计从电磁环境角度提供技术参考。

关键词:1 000 kV交流输电线路;工频电场;起伏地形;影响

Analysis on Effect of Topography on Ground Power Frequency Electric Field of 1 000 kV AC Transmission Line

YANG Tao, ZOU Anxin

(State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China)

Abstract: Power frequency electric field is one of important electromagnetic environment influence factors of 1 000 kV AC transmission line, which is easy impacted by many factors. In order to accurately grasp the effect of topography on it. Based on the image method and combined with the optimized charge simulation method, put forward the improved calculation method of the power frequency electric field when exist the rugged topography, the effectiveness of the proposed method has been measured data validation. Use the proposed method to analyze the influence rule of power frequency electric field distribution in the of different angles and landform. The results show that the greater rolling angle, the stronger power frequency electric field distortion; Concave terrain two inflection points close to the ground and convex terrain at the top of the two turning points will increase the power frequency electric field distribution. The other two corresponding corner has a certain inhibitory effect. The method and simulation analysis results can offer technical reference for the planning and design of the 1 000 kV AC transmission lines through slope topography in the view of electromagnetic environment.

Key words: 1 000 kV AC transmission lines; power frequency electric field; rugged topography; influence

0 引言

随着中国经济持续发展,人民生活水平不断提高,电力需求快速增长,已有的电网难以满足日益增长的电力需求,迫切需要发展特高压输电技术^[1-2]。

特高压交流输电线路在运行过程中会产生电磁环境影响问题,针对该问题,国内外学者从特高压交流输电线路电磁环境的测试、影响因素及其计算等方面进行了大量研究,研究表明:工频电场是表征电磁环境的重要参数之一^[3-12]。

然而,目前国内外有关工频电场的计算一般是针对地面是理想的平地而进行的,忽略了地形对工频电场的影响。在特高压输电线路实际架设过程中,会跨越不同的起伏地貌,尤其是特高压大跨越线路,为准确评价这种情况下的电磁环境状况,需要能够准确考虑地形的影响。针对该情况,只有少许文献考虑了地形的影响。文[13]基于模拟电荷法,在线下地面设置模拟电荷和匹配点对复杂地形下的工频电场进行了计算。但是文[13]的计算方法需要在地面设置大量的模拟电荷,计算工作量大,计算精度有待提高,存在一定的不足。因此,文中基于镜像法并结合优化模拟电荷法,提出了起伏地形下改进的工频电场计算方法,利用该方法对起伏地形情况下特高压交流输电线路地面工频电场分布进行了仿真计算,分析了其影响规律,可以为输电线路的规划设计等提供参考。

1 计算方法

1.1 计算模型简化

为方便计算与分析,同时不对计算结果产生较大的影响,可以对特高压输电线路模型作以下简化处理^[14-17]:①输电线路工频电场为准静态场;②大地电位为零;③忽略特高压输电线路的端部效应和弧垂,将输电线路视为无限长直平行导线,取输电线路弧垂的最低点为导线的对地高度,其产生的电场为平行平面场。输电线路计算模型见图1。

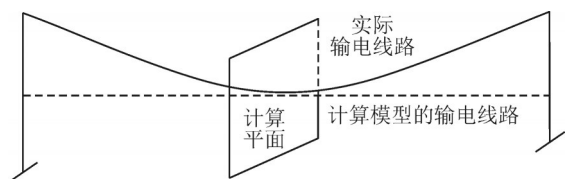


图1 输电线路计算模型

Fig. 1 A model of the transmission lines for calculating

1.2 工频电场计算方法

起伏地形下工频电场常规计算方法中,需要在输电导线下方的地面均设置匹配点和模拟电荷^[13]。文中工频电场计算采用改进的模拟电荷法,该方法原理基于镜像法,见图2。首先选择镜像地面,假设镜像地面延伸至斜坡内,此时若在斜坡内设置模拟电荷及其镜像电荷,使起伏地表的电位维持为零,则场域内所有边界条件都满足。在模拟电荷设置过程中,在斜坡起点或者地形拐角附近处设置较密,远离处均匀设置,模拟电荷在斜坡上与匹配点垂直设置。该计算方法相比常规的计算方法,只在斜面上设置匹配点和模拟电荷,而在水平地面上没

有设置模拟电荷和匹配点。因此,设置的数量大为减少,可以提高计算效率。

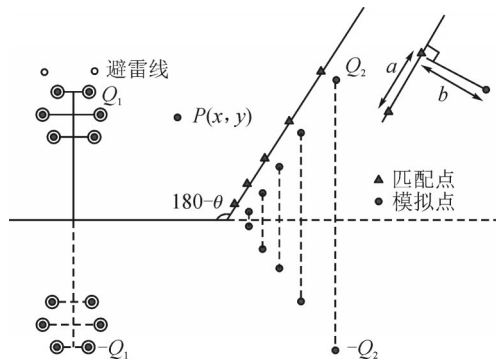


图2 模拟电荷设置示意图

Fig. 2 Sketch map of set charge simulation

如图2所示,空间任意一点 $P(x, y)$ 的电位表达式为

$$\varphi(x, y) = P_1 Q_1 + P_2 Q_2 \quad (1)$$

式(1)中: P_1 、 P_2 分别为输电线路和起伏地表上的模拟电荷产生的电位系数; Q_1 、 Q_2 为分别输电线路和起伏地形内部的模拟电荷。

获得精确的模拟电荷量,是准确计算工频电场分布的前提。文中采用优化模拟电荷法^[18-19]来计算工频电场分布。根据场域空间的边界形状,在导线和大地表面设置合适的模拟电荷和匹配点,取场域边界上所有匹配点的已知电位和计算电位的差值之和作为目标函数

$$\omega = \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \varphi_{0i})^2 \quad (2)$$

式(2)中: $\varphi_i = \sum_{j=1}^m P_{ji} Q_j$ ($i=1, 2, \dots, n$) 为利用模拟

电荷计算出在第 i 个匹配点处的电位; P_{ji} 为电位系数; φ_{0i} 为第 i 个匹配点的已知电位,输电线路表面 $\varphi=U$,地表上 $\varphi=0$ 。

约束条件为①模拟电荷的电量为自由变量;②模拟电荷的位置必须在无效计算场域内,图2的计算模型中无效场域为输电线内部(不包括边界)、起伏地表内部(不包括地表):

$$\sqrt{(x_{Qd} - x_0)^2 + (y_{Qd} - y_0)^2} < r \quad (3)$$

$$y_Q - f(x_Q) < 0 \quad i = m+1 \cdots n \quad (4)$$

式(3)、(4)中: x_{Qd} 、 y_{Qd} 为导线上模拟电荷坐标; x_0 、 y_0 为子导线中心坐标; r 为子导线半径; y_Q 为地下模拟电荷纵坐标; x_Q 为地下模拟电荷横坐标; $f(x_Q)$ 为地下模拟电荷横坐标在斜坡上对应的纵坐标; m 为子导线数。

采用优化算法求解式(2)的极小值问题,进而求得各优化的模拟电荷。利用求解约束非线性优化问题的函数来求解模型的最优解。最后利用得到

3 起伏地形情况下工频电场影响因素分析

为分析实际工程中,同塔双回特高压交流输电线路经过起伏地形时地面工频电场的分布情况。选择中国拟建的华东交流1 000 kV特高压输电示范工程进行分析。该线路由淮南至池州、池州至杭北、杭北至上海三段组成,其中池州至杭北线路为同塔双回,线路长度为164 km。导线为8×LGJ800/55,呈方形八角布置,地线采用LGJ-185/30,采用逆相序,分裂间距400 mm,子分裂导线直径0.033 6 m^[20],线路具体参数见图7。计算过程中计算电压取导线运行电压的1.05倍;导线离地25 m。

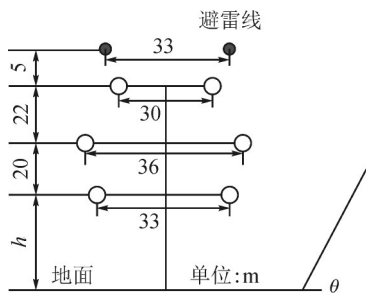


图7 实际线路参数

Fig. 7 Parameters of the actual line

3.1 斜坡角度对工频电场的影响分析

同塔双回特高压交流输电线路临近斜坡地形时,斜坡角度的大小会对工频电场的分布产生影响。当斜坡起点离导线中心距离为38 m时,不同斜坡角度对斜坡上工频电场的影响见图8。图8中,当斜坡角度为30°、45°、60°时,在斜坡起点的工频电场分别为2.56、2.09、1.81 kV/m,因此斜坡起点处,对工频电场的分布具有抑制作用,且角度越大,抑制作用越明显;在斜坡上时工频电场最大值分别为2.80、3.01、3.66 kV/m,因此在斜坡上,斜坡对工频电场的分布具有增强的作用,且角度越大,增强作用越明显。从图8中还可以发现,在距离导线中心约40 m的地方,存在角度时的工频电场和不同斜坡角度时的工频电场相等;随着斜坡长度增加,斜坡的工频电场的影响慢慢减小。

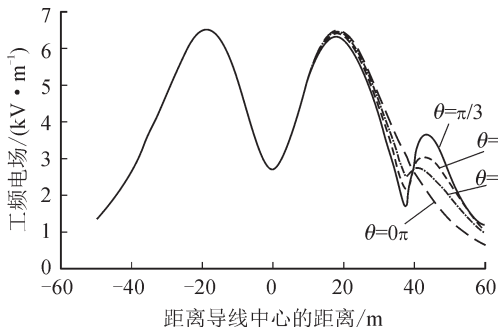


图8 不同斜坡角度对工频电场的影响

Fig. 8 The influence of different slope angle for power frequency electric field

3.2 不同地形对工频电场的影响分析

实际同塔双回特高压交流输电线路在架设过程中,会遇到各种地形,最典型的的就是凹形和凸形地形。实际的复杂地形都可以简化成凹形和凸形地形的组合,因此,文中就这两种不同的地形对工频电场的分布影响展开分析,计算示意图见图9。

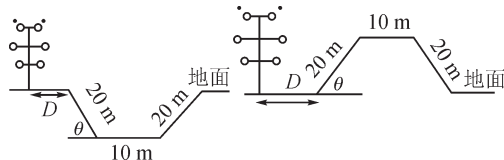


图9 计算地形示意图

Fig. 9 Sketch map of calculated terrain

3.2.1 凹形地形对工频电场的影响

首先分析凹形地形起点离导线距离对工频电场分布的影响。固定凹形地形斜坡角度为60°,当凹形地形起点离导线距离为10、20、30 m时,其工频电场的分布见图10。从图10中可以看出:在凹形地形靠近地面的两个拐角处,明显增大了工频电场的分布,远离导线的拐角随着导线距离越近对工频电场的增强作用越明显;在凹形地形底部的两个拐角对工频电场的分布具有一定的抑制作用,但不明显;另外,还可以看出,在凹形地形底部上,工频电场分布呈现中间大两边小的趋势。

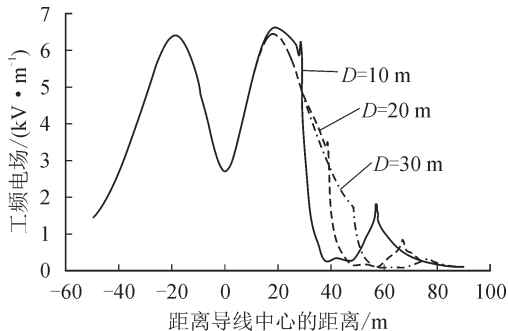


图10 凹形地形离导线距离对工频电场影响

Fig. 10 The influence of distance from concave terrain to transmission lines for power frequency electric field

当凹形地形起点离导线中心距离为48 m,凹形地形斜坡角度为30°、45°、60°时对工频电场分布的影响见图11。从图11中可以看出:在凹形地形第一段斜坡地形上,角度越大工频电场分布越小;在凹形地形第二段斜坡地形上,工频电场的分布规律刚好相反。

3.2.2 凸形地形对工频电场的影响

同样,首先分析凸形地形起点离导线距离对工频电场分布的影响。固定凸形地形斜坡角度为60°,当凸形地形起点离导线距离变化时,工频电场的分布见图12。其从图12中可以看出:当凸形地形起点离导线距离为10、20、30 m时,凸形地形顶部靠

3 起伏地形情况下工频电场影响因素分析

为分析实际工程中,同塔双回特高压交流输电线路经过起伏地形时地面工频电场的分布情况。选择中国拟建的华东交流1 000 kV特高压输电示范工程进行分析。该线路由淮南至池州、池州至杭北、杭北至上海三段组成,其中池州至杭北线路为同塔双回,线路长度为164 km。导线为8×LGJ800/55,呈方形八角布置,地线采用LGJ-185/30,采用逆相序,分裂间距400 mm,子分裂导线直径0.033 6 m^[20],线路具体参数见图7。计算过程中计算电压取导线运行电压的1.05倍;导线离地25 m。

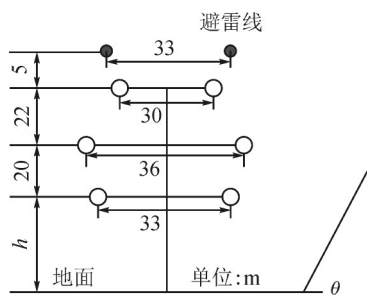


图7 实际线路参数

Fig. 7 Parameters of the actual line

3.1 斜坡角度对工频电场的影响分析

同塔双回特高压交流输电线路临近斜坡地形时,斜坡角度的大小会对工频电场的分布产生影响。当斜坡起点离导线中心距离为38 m时,不同斜坡角度对斜坡上工频电场的影响见图8。图8中,当斜坡角度为30°、45°、60°时,在斜坡起点的工频电场分别为2.56、2.09、1.81 kV/m,因此斜坡起点处,对工频电场的分布具有抑制作用,且角度越大,抑制作用越明显;在斜坡上时工频电场最大值分别为2.80、3.01、3.66 kV/m,因此在斜坡上,斜坡对工频电场的分布具有增强的作用,且角度越大,增强作用越明显。从图8中还可以发现,在距离导线中心约40 m的地方,存在角度时的工频电场和不同斜坡角度时的工频电场相等;随着斜坡长度增加,斜坡的工频电场的影响慢慢减小。

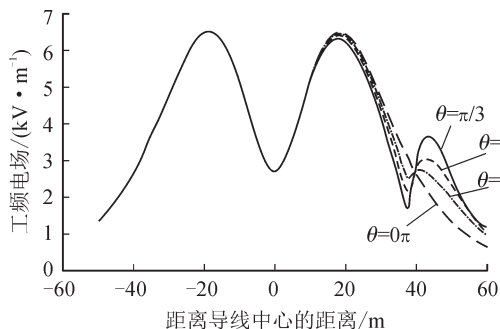


图8 不同斜坡角度对工频电场的影响

Fig. 8 The influence of different slope angle for power frequency electric field

3.2 不同地形对工频电场的影响分析

实际同塔双回特高压交流输电线路在架设过程中,会遇到各种地形,最典型的的就是凹形和凸形地形。实际的复杂地形都可以简化成凹形和凸形地形的组合,因此,文中就这两种不同的地形对工频电场的分布影响展开分析,计算示意图见图9。

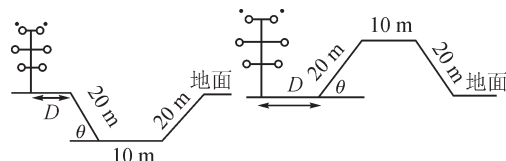


图9 计算地形示意图

Fig. 9 Sketch map of calculated terrain

3.2.1 凹形地形对工频电场的影响

首先分析凹形地形起点离导线距离对工频电场分布的影响。固定凹形地形斜坡角度为60°,当凹形地形起点离导线距离为10、20、30 m时,其工频电场的分布见图10。从图10中可以看出:在凹形地形靠近地面的两个拐角处,明显增大了工频电场的分布,远离导线的拐角随着导线距离越近对工频电场的增强作用越明显;在凹形地形底部的两个拐角对工频电场的分布具有一定的抑制作用,但不明显;另外,还可以看出,在凹形地形底部上,工频电场分布呈现中间大两边小的趋势。

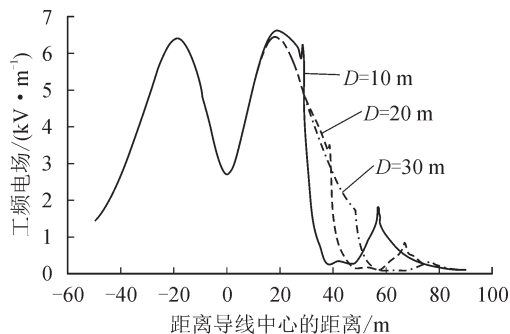


图10 凹形地形离导线距离对工频电场影响

Fig. 10 The influence of distance from concave terrain to transmission lines for power frequency electric field

当凹形地形起点离导线中心距离为48 m,凹形地形斜坡角度为30°、45°、60°时对工频电场分布的影响见图11。从图11中可以看出:在凹形地形第一段斜坡地形上,角度越大工频电场分布越小;在凹形地形第二段斜坡地形上,工频电场的分布规律刚好相反。

3.2.2 凸形地形对工频电场的影响

同样,首先分析凸形地形起点离导线距离对工频电场分布的影响。固定凸形地形斜坡角度为60°,当凸形地形起点离导线距离变化时,工频电场的分布见图12。其从图12中可以看出:当凸形地形起点离导线距离为10、20、30 m时,凸形地形顶部靠

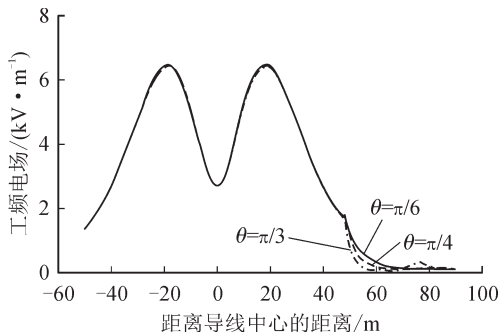


图 11 凹形地形不同角度对工频电场影响

Fig. 11 The influence of concave terrain's angle for power frequency electric field

近导线一侧的拐角附近的工频电场分别达到了 8.32、3.93、2.00 kV/m。因此,在凸形地形顶部的两个拐角处,会增大了工频电场的分布,尤其是靠近导线的拐角随着导线距离越近对工频电场的增强作用越明显;还可以看出,凸形地形会减小靠近地形的一回线路下方的工频电场分布。

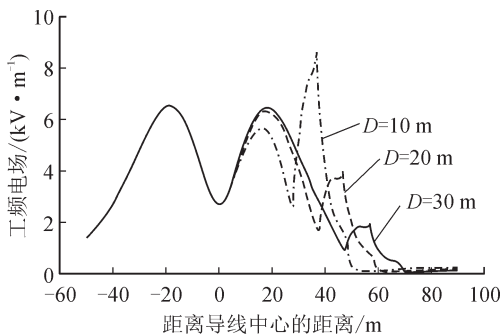


图 12 凸形地形离导线距离对工频电场影响

Fig. 12 The influence of distance from convex terrain to transmission lines for power frequency electric field

当凸形地形起点离导线中心距离为 48 m,凸形地形斜坡角度为 30°、45°、60°时对工频电场分布的影响见图 13。从图 13 中可以看出:在凸形地形第一段斜坡地形上,角度越大工频电场分布越大;在凸形地形第二段斜坡地形上,工频电场的分布规律刚好相反;还可以发现在凸形地形底部的两个拐角对工频电场的分布具有一定的抑制作用。

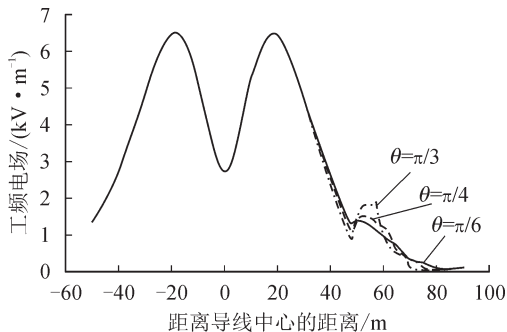


图 13 凸形地形不同角度对工频电场影响

Fig. 13 The influence of convex terrain's Angle for power frequency electric field

3.3 导线在斜坡上工频电场的分析

同塔双回特高压交流输电线路实际架设过程中除了会临近起伏地形时,还会出现输电线路在斜坡上的情况。因此,选择导线中心离斜坡起点不同距离进行分析,计算示意图见图 14,计算时导线中心离斜坡起点 25 m,地形角度为 30°。

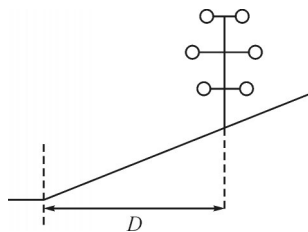


图 14 计算示意图

Fig. 14 Sketch map of calculation

当导线中心离斜坡起点分别为 20、30、40 m 时,斜坡上工频电场的分布见图 15。从图 15 中可以看出,在斜坡上,导线下方的工频电场分布与在平面上相比,发生了较大的变化。在斜坡上方侧回路导线下方最大工频电场达到了 17.35 kV/m,而在斜坡下方侧回路下方最大工频电场只有 5.76 kV/m。但是,在斜坡上方侧回路下方电场分布较大的区域较小,其衰减随远离导线的距离增加而加快。

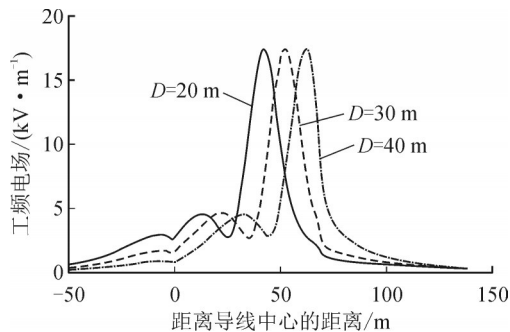


图 15 导线中心离斜坡起点不同距离时的工频电场分布

Fig. 15 The power frequency electric field distribution for different distance from transmission lines' center to starting point of slope

为进一步分析,输电线路在斜坡上时斜坡角度对工频电场分布的影响,因此,选择导线中心离斜坡起点距离为 40 m,仿真分析了斜坡角度为 30°、45°、60°时,斜坡地面附近工频电场的分布见图 16。从图 16 中可以看出,斜坡角度越大,斜坡上方侧回路导线下方的工频电场畸变越明显,如当斜坡角度为 60°时,斜坡上方侧回路导线下方的工频电场超过了 100 kV/m。

4 结论

文中基于镜像法并结合优化模拟电荷算法,计算分析了交流特高压输电线路下方起伏地形对工

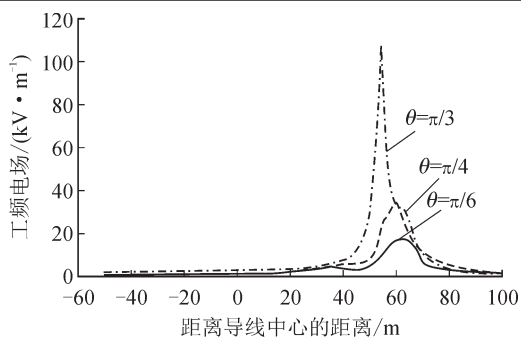


图16 不同斜坡角度时工频电场分布

Fig. 16 The power frequency electric field distribution for different slope angles

频电场分布的影响,得到如下结论:

1)通过文中算法与已有文献算法计算和实测值的对比分析,验证了该算法的正确性,可以为特高压输电线路途经起伏地形时的工程设计提供技术参考。

2)线路临近斜坡地形时,斜坡角度会对工频电场分布产生先抑制,后增强的作用;角度越大,作用越明显。

3)线路临近凹形地形时,工频电场在靠近地面的两个拐角处会有所增大,而在凹形地形的两个拐角会对工频电场产生抑制作用;线路临近凸形地形时,工频电场在顶部的两个拐角处会有所增大,而在靠近地面两个拐角也会对工频电场产生抑制作用。

4)当输电线路走向垂直位于斜坡且位于斜坡上方时,斜坡上方地面的工频电场分布不对称性受斜坡角度的影响较大,沿斜坡方向衰减较快。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005.
LIU Zhenya. Ultra high voltage power grid[M]. Beijing:China Economic Publishing House, 2005.
- [2] 吴敬儒,徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景[J]. 电网技术,2005,29(3):1-4.
WU Jingru, XU Yongxi. Development prospect of UHV AC power transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 1-4.
- [3] 郭雄. 1 000 kV 交流输电线路电磁环境的研究[J]. 电力设备,2005,6(12):24-27.
WU Xiong. Study on electromagnetic environment for 1 000 kV AC power transmission line[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(12): 24-27.
- [4] 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.
- [5] ZHAO Luxing, LU Jiayu, WU Guifang. Measurement and Analysis on Electromagnetic Environment of 1 000 kV UHV AC Transmission line[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Asia-Pacific: [s.n.], 2012: 1023-1028.
- [6] 邵方殷. 1 000 kV 特高压输电线路的电磁环境[J]. 电网技术,2007,31(22):1-6.
SHAO Fangyin. Electromagnetic environment of 1 000 kV UHV transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 1-6.
- [7] 邵方殷. 我国特高压输电线路的相导线布置和工频电磁环境[J]. 电网技术,2005,29(8):1-7.
SHAO Fangyin. Phase conductor configuration and power frequency electromagnetic environment of UHV transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 1-7.
- [8] BELIAKOV N N, VERSHKOV V A, VISHNIAKOV G K, et al. 1 150 kV experimental installation at bely rast substation[Z]. Paris: CIGRE Report 23-03, 1976.
- [9] BOURGSDORF V V, EMELJANOV N P, LYSKOV J I, et al. Design of the EHV 1 150 kV AC transmission line[Z]. Paris: CIGRE Report 31-03, 1976.
- [10] TRINH N G P S, POIRIER B. A comparative study of corona performance of conductor bundles for 1 200 kV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, PAS-93(3): 940-949.
- [11] PERRY D E, CHARTIER V L, REINER G L. BPA 1 100 kV transmission development corona and electric field studies [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(3): 1728-1738.
- [12] CIGRE Workgroup 36-01. Electric and magnetic field from power transmission systems - results of an international survey[C]//CIGRE. [S. l.]: [s. n.], 1986: 987-990.
- [13] 俞集辉,周超. 复杂地势下超高压输电线路的工频电场[J]. 高电压技术,2006,32(1):18-20.
YU Jihui, ZHOU Chao. Power-frequency electric field of EHV transmission lines under condition of complex landscape[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 18-20.
- [14] 袁一飞,汪泉弟,杜松旺. 特高压输电线路工频电场的仿真研究[J]. 高压电器,2009,45(3):5-7.
YUAN Yifei, WANG Quandi, DU Songwang. Simulation study of the power frequency electric field of UHV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 5-7.
- [15] 李永明,何健,徐禄文,等. 超高压输电线路下工频电场抑制方法的研究[J]. 高压电器,2009,45(4):47-51.
LI Yongming, HE Jian, XU Luwen, et al. Research on suppression of power frequency electric field due to EHV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 47-51.
- [16] 谢辉春,张建功,张小武,等. 基于模拟电荷法对 500 kV

- 输电线路跨越民房时导线高度的计算[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 34-37.
- XIE Huichun, ZHANG Jiangong, ZHANG Xiaowu, et al. Charge simulation method based calculation and research on conductor heights of 500 kV transmission lines passing over residences[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 34-37.
- [17] 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.
- [18] YIALIZIS A, KUFFEL E, ALEXANDER P H. An optimized charge simulation method for the calculation of high voltage fields[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(6): 2434-2440.
- [19] 张金堂, 费增尧, 崔翔. 用优化模拟电荷法计算500 kV 变压器引线的三维电场[J]. 中国电机工程学报, 1985, 5(3): 27-35.
- ZHANG Jintang, FEI Zengyao, CUI Xiang. Computation of complex 3-dimensional electric field by advanced optimum charge simulation method[J]. Proceedings of the CSEE, 1985, 5(3): 27-35.
- [20] 孙秋芹, 王冠, 李庆民, 等. 特高压双回线路耦合效应的计算与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 737-742.
- SUN Qiuqin, WANG Guan, LI Qingmin, et al. Calculation and analysis of the coupling effects of the UHV double-circuit transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 737-742.
- 杨滔(1980—), 男, 硕士, 研究方向为电网电磁环境及噪声控制技术。
- 邹岸新(1985—), 男, 硕士, 研究方向为电网电磁环境及噪声控制技术。