

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.022

±800 kV 直流输电线路地面合成电场的影响因素分析研究

李振华¹, 魏寅孔¹, 黄悦华¹, 姚为方², 徐鹏², 谢辉春³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601;
3. 中国电力科学研究院有限公司武汉分院, 武汉 430074)

摘要: 高压直流线路下方地面合成电场易受到线路本身结构和环境风速的影响,且下方房屋对地面合成电场有畸变作用。基于上述问题,提出一种合成电场数值仿真模型,以探究上述变量对地面合成电场的影响规律,采用 Comsol 仿真分析了线路结构和风速对地面合成电场的影响规律以及线路下方房屋结构对电场的畸变作用。分析表明:在线路结构中,导线对地高度对地面合成场强影响最大,其他线路结构对地面合成场强的影响不大;当风速小于 3 m/s 时,顺风侧的地面场强增大,但风速大于 3 m/s 之后地面场强会减小;对于线路下方房屋参数中,房屋高度对地面电场的畸变作用最大,房屋净高相同时,平面屋顶内部利用空间大,屋顶对电场的畸变最小。

关键词: 合成电场; 线路结构; 风速; 房屋结构; Comsol

Analysis and Research on the Influencing Factors of Ground Induced Synthetic Electric Field of ±800 kV DC Transmission Line

LI Zhenhua¹, WEI Yinkong¹, HUANG Yuehua¹, YAO Weifang², XU Peng², XIE Huichun³

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China;
2. State Grid Anhui Electric Power Corporation Research Institute, Hefei 230601, China;
3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd. Wuhan Branch, Wuhan 430074, China)

Abstract: The ground-induced synthetic electric field beneath the high voltage DC line is susceptible to the influence of the structure of the line itself and the ambient wind speed, and the house beneath the line has a distortion effect on the ground-induced synthetic electric field. Based on the above problems, a synthetic electric field numerical simulation model is proposed to explore the influence of above variables on the ground-induced synthetic electric field. The Comsol simulation is used to simulate and analyze the influence of line structure and wind speed on the ground-induced synthetic electric field and the distortion effect of the house structure beneath the line on the electric field. The analysis shows that in the line structure, the influence of the height from the conductor to the ground on the ground-induced synthetic field strength is maximum, and the influence of other line structures on the ground synthetic field strength is insignificant. In case of the wind speed less than 3 m/s, the ground field strength of the upwind side increases, however the ground field strength will decrease after the wind speed is greater than 3 m/s. Regarding the parameters of the houses beneath the line, the distortion effect of the height of the houses on the ground electric field distortion effect is maximum. In case identical net height of houses, the internal utilization space of the flat roof is large and the distortion of the top roof on the electric field is minimum.

Key words: synthetic electric field; line structure; wind speed; house structure; Comsol

收稿日期:2025-07-02; 修回日期:2025-10-21

基金项目:国家电网公司总部科技项目(8100-202055158A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(8100-202055158A-0-0-00).

0 引言

特高压直流输电因其可以提高线路输送能力, 大大减少线路损耗, 在中国电网线路中架设比例越来越高, 但因其线路建设的跨度大, 直流线路架设距离长, 加之工程沿线的地形复杂, 导线所处环境多变, 线路下方存在各类建筑物, 致输电线路下的电磁环境变得复杂^[1-5]。

考虑线路整体经济性, 线路运行时, 允许发生一定程度的电晕, 直流线路极性不变使产生的空间离子在电场力的作用下, 向线路下方空间移动, 致线路下方区域内充满带电离子, 形成稳定的离子流, 离子流与线路电荷一起作用产生的电场称为合成电场^[6-9]。线路下合成场强是静电场强的 3~3.5 倍, 是影响线路电磁环境重要因素。

离子流场的研究在国内外已相当全面。Sarma 根据 Deutsch 假设将二维离子流场计算转换为一维^[10-11], 但忽略了空间电荷畸变而引入误差。在此基础上, Janischewskj 采用 Kaptzov 假设用有限元计算也得到不错的效果^[12-13]。

线路所处气象环境变化对高压直流线路下方合成场强产生影响。乔骥通过对区域分解法边界条件和计算流程的改进, 得到直流线路下方合成场强分布会受到风速的影响^[14]。徐吉来提出一种新的寻找电荷密度初值的数值计算方法, 可以有效提高计算精度, 最大相对误差为 8.3%^[15]。蓝天等人通过建立三维有限元计算模型分析高压交直流交叉跨越时的线路下方的离子流场^[16]以及谢莉等人改变交叉跨越的交直流线路中直流电压大小总结地面合成电场的变化^[17]。赵永生等对线路所处不同雾区时离子流场的变化情况进行了分析, 结果表明地面合成电场在雾浓度较高时增加, 离子流密度几乎不变^[18]。以上方法对在不同湿度及复杂空间结构下的合成电场有较为准确的计算, 但线路结构、风速对电场的影响以及线路下方存在建筑物时对地面电场的畸变作用却鲜有研究。为此文中建立了合成电场仿真模型, 采用 Comsol 有限元仿真方法研究了线路结构、风速和对地面合成电场的影响及线下建筑物对地面电场的畸变作用。

1 理论分析

1.1 离子流场控制方程

线路下方离子流场中任意位置处电位 j 与该位置处离子流密度 r 是相耦合的关系。因此, 无法直

接求解空间中任意位置处的离子流场。在此事实基础上, 需建立有限元迭代数学计算模型进行求解。

离子流场由泊松方程和电荷守恒方程组成, 泊松方程为

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho^+ - \rho^-}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

电荷守恒方程为:

$$\nabla \cdot J^+ = -R \frac{\rho^+ \rho^-}{e} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot J^- = R \frac{\rho^+ \rho^-}{e} \quad (3)$$

电荷守恒方程中:

$$J^+ = K_+ \rho_c^+ E_s - D_+ \nabla \rho^+ + v \quad (4)$$

$$J^- = K_- \rho_c^- E_s + D_- \nabla \rho^- + v \quad (5)$$

式(1)-(5)中: φ 为线路与地面所包含空间中任意位置电势值, V; ρ^+ 及 ρ^- 分别为线路下方整体空间中的正负电荷总密度, C/m³; ε_0 为线路所处空气的介电常数, F/m; J^+ 和 J^- 分别为线路与地面之间的正负离子流密度, A/m²; R 为空间离子复合系数, m³/s; e 为单位电子电量, 1.602×10⁻¹⁹ C; K_+ 和 K_- 分别为空间中正负离子迁移率, m²/Vs; ρ_c^+ 和 ρ_c^- 分别为当导线发生电晕时所产生的离子空间电荷密度, C/m³; E_s 为线路下方空间中合成电场强度, V/m; D_+ 和 D_- 分别为线路下方空间中正负离子的扩散系数, m²/s; v 为线路所处环境的风速值, m/s。

在此计算过程中所涉及泊松方程边界条件有:

1) 导体中的电压为线路实际运行电压, 为 $\varphi = \pm U$ 。

2) 在静电模块中设置地面电压为 0, $\varphi = 0$ 。

3) 通过文[19]所述, 人工边界设置为导体对地高度的 3~5 倍, 文中取 5 倍。域边界处电荷密度为 0, 边界处电压为标称电压。

4) Kaptzov 假设

$$\partial \varphi / \partial n = E_{\pm} \quad (6)$$

式(6)中, E_{\pm} 分别为正负导线的起晕场强。

5) 人工边界及地面流入的电荷为 0。

1.2 导线表面电晕起始场强

当导体周围的电场强度接近或者超过导体周围气体的临界起晕电场强度时, 导体周围的气体就会被电离。由此导体表面的起晕场强是影响下路下方合成电场的关键因素^[20]。国外学者通过大量现场测试的实测数据总结出了正负极导体表面起晕场强经验公式为

$$E = E_0 m \delta \cdot \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r_0}} \right) \quad (7)$$

式(7)中: E_0 通常取 32.35 kV/cm; m 为导体表面

粗糙系数,文中取0.47; δ 为导体所处环境空气相对密度; r_0 为子导体半径。

1.3 线路参数

线路的具体参数见表1。

表1 线路结构参数

Table 1 Line structure parameters

导线参数	数值	导线参数	数值
电压等级 U/kV	± 800	分裂间距 d/m	0.5
对地高度 H/m	30	正离子迁移率 $K_+/[\text{m}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s}^{-1})]$	1.5×10^{-4}
极间距 D/m	21	负离子迁移率 $K_-/[\text{m}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s}^{-1})]$	1.7×10^{-4}
子导线半径 r_0/m	0.023 675	正负离子复合系数 $R/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2.0×10^{-12}
分裂数 n	6		

1.4 计算步骤

步骤1),边界设置完毕后,对平面有限区域网格剖分。

步骤2),对区域进行2.1节中的边界设定,其中导体表面初始电荷密度由等式(8)给出。

步骤3),据步骤2中的电荷初始密度值,经过Comsol计算得到域中所有位置处的电势和合成电场强度值。

步骤4),据步骤3中的电势和场强,解电荷守恒方程得到域中对应位置处的电荷密度。

步骤5),依据式(9)、(10)检查解的收敛程度,判断是否满足Kaptzov假设。

步骤6),若解不满足等式要求的收敛程度,则通过等式(11)对其表面电荷密度进行修正,再重复步骤3)-6),直到达到步骤5)中的收敛精度要求。

上述导体表面电荷密度公式^[21]为

$$\begin{cases} \rho_0 = \frac{4\epsilon_0 U_0 E_g (U - U_0)}{r_0 H E U \left(5 - \frac{4U_0}{U}\right)} \\ U_0 = E r_0 \ln(H/r_0) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: ρ_0 为导体表面电荷密度的初始值, C/m^2 ; U_0 为正负导体起晕电压, kV ; E_g 为导体在静电状态时地面位置处的最大标称电场, kV/cm ; U 为导体表面工作电压, kV ; r_0 为子导线半径, m ; H 为正负导体离地高度, m ; E 为正负导线的达到起晕时的电场强度, kV/m 。

Kaptzov假设检验公式^[21]:

$$\left| \frac{\rho_s(n) - \rho_s(n-1)}{\rho_s(n-1)} \right| < \delta_1 \quad (9)$$

$$\left| \frac{E_{\max} - E}{E} \right| < \delta_2 \quad (10)$$

式(9)、(10)中: $\rho_s(n)$ 、 $\rho_s(n-1)$ 分别为 n 次及 $n-1$ 次更新的正、负导线表面某处的电荷密度值, C/m^2 ; δ_1 和 δ_2 为设定误差值,取0.5%; E_{\max} 为极导体表面最大

电场强度, kV/m 。

两极导体电荷密度更新公式^[22-23]

$$\rho_s(n) = \rho_s(n-1) \left(1 + \mu \frac{E_{\max} - E}{E_{\max} + E} \right) \quad (11)$$

式(11)中, μ 为大于0的修正系数,在此模型中取5。

1.5 实测验证

以河南息县 $\pm 800 \text{ kV}$ 灵绍直流极II线路1 951、1 952号杆塔之间建立电场环境观测平台,测量到地面不同位置的实际合成电场值,现场地面合成电场值采用旋转式直流电场仪(场磨)进行测量,该场磨测量值与计算值误差在2%^[24]左右。具体布置现场见图1。

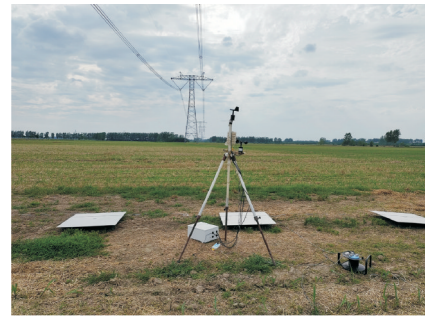


图1 现场实测图

Fig. 1 Field measured drawing

将表1参数导入模型所得到的建模值与实测地面合成电场值比较(现场温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为50%),结果见图2。

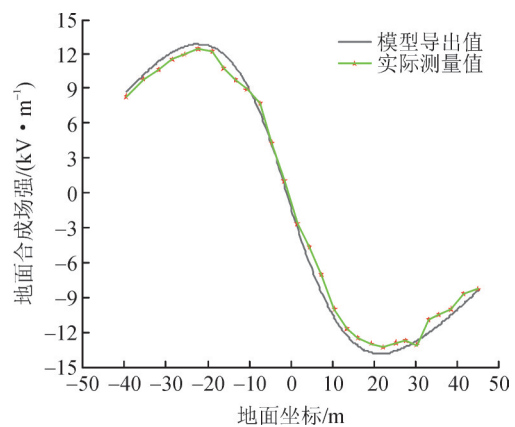


图2 地面不同位置合成电场

Fig. 2 Synthetic field strength at different locations on the ground

根据图2,实际值与建模值误差较小,表明以Comsol为基础的离子流场仿真模型在计算地面合成电场是可靠的,为后续问题的计算分析提供基础。

2 线路结构的影响

2.1 对地高度的影响

研究线路结构对地面合成电场的影响时,将仿真中横风风速设置为 0 m/s。在后面极间距、子导线分裂间距以及子导线表面粗糙系数中同样采用此设置,后续不做赘述。地面合成电场见图3。

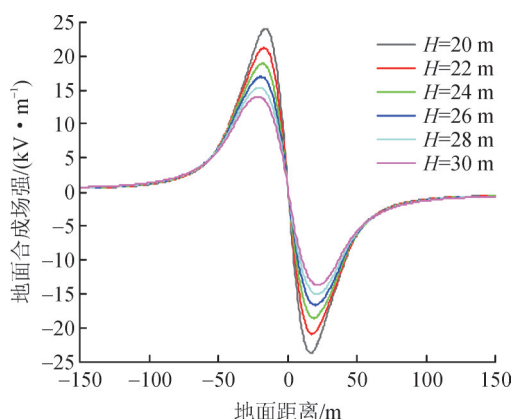


图3 地面合成电场(不同高度)

Fig. 3 Synthetic electric field on the ground (different heights)

图3中分别计算了 H 为20~30 m时的地面合成电场值。从图3中可知正极导体下方地面合成电场峰值从20 m时的23.98 kV/m到30 m时的14.01 kV/m,同理,负极下方的电场峰值从20 m时的-23.59 kV/m到30 m时的-13.64 kV/m。整体上,正极下方场强峰值略高于负极下方,但下方合成场强都是随线路对地高度的增加而逐步减小。

根据分析得,架设高度增加会使得线路下方空间各位置处的标称场强减小;在更大的空间中电离产生的离子扩散范围更广;从而导致地面合成场强减小。

2.2 两极间距的影响

D 为20~25 m时的地面合成电场值,见图4。从图4中可知正极导体下方地面合成电场峰值从20 m时的13.71 kV/m到25 m时的15.25 kV/m,同理,负极下方的电场峰值从20 m时的-13.35 kV/m到25 m时的-14.93 kV/m。增大线路两极间距会增大下路下方场强峰值,但增大幅度很小。极间距的变化主要影响线路之间的电场,对线路下方场强影响不大。

2.3 子导线分裂间距的影响

d 为0.35~0.55 m时,地面合成电场值见图5。从图5中可知正极导体下方地面合成电场峰值从0.35 m时的13.42 kV/m到0.55 m时的14.21 kV/m,同理,负极下方的电场峰值从0.35 m时的-13.03 kV/m到

0.55 m时的-13.86 kV/m。整体上,场强峰值都随子导线分裂间距的增大而增大,但幅度很小。

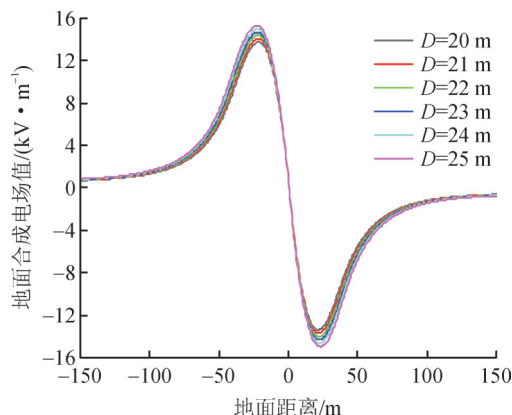


图4 地面合成电场(不同极间距)

Fig. 4 Synthetic electric field on the ground (different pole spacing)

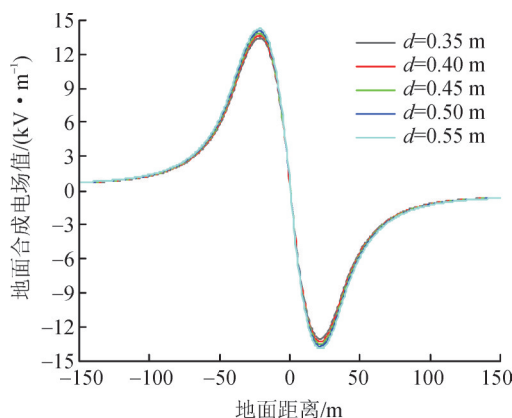


图5 地面合成电场(不同分裂间距)

Fig. 5 Synthetic electric field on the ground (different splitting spacing)

根据分析得,当子导线分裂间距增大时,其等效半径就会增大,根据式(8)、(9)得,起晕场强减小,导线易起晕。

2.4 子导线表面粗糙系数的影响

g 为0.3~0.6时,地面合成电场值见图6。从图6中可知,正极导体下方地面合成电场峰值从0.3时的14.18 kV/m到0.6时的13.87 kV/m,同理,负极下方的电场峰值从0.3时的-13.8 kV/m到0.6时的-13.5 kV/m。整体上,场强峰值都随导线粗糙系数的增大而减小,但幅度很小。

根据分析得,导体表面粗糙系数与导体的起晕场强呈正比,当粗糙系数越大时,正负极导体的起晕场强也就越大,越不易起晕,致地面场强峰值会随粗糙系数的增大而略微减小。

3 线路所处环境风速的影响

横风风速(风速方向为原点向 x 轴正方向) v 为

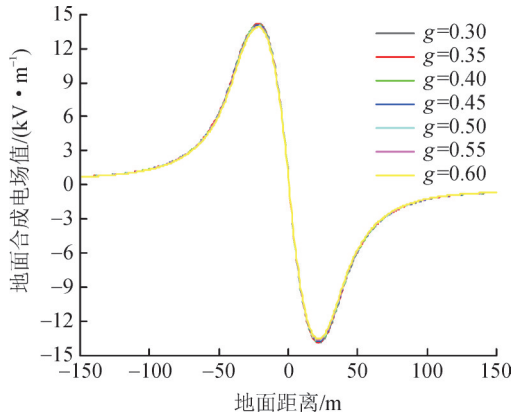


图6 地面合成电场(不同粗糙系数)

Fig. 6 Synthetic electric field on the ground(different roughness factor)

1~7 m/s,地面合成电场值见图7。顺风侧,风速从1 m/s增大到3 m/s时,负极下方场强峰值增大,从3 m/s到7 m/s场强峰值减小,且场强峰值沿着横风风速方向偏移,空间场强所覆盖的范围更广。逆风侧,正极下方场强峰值随着风速的增大而逐渐变小。

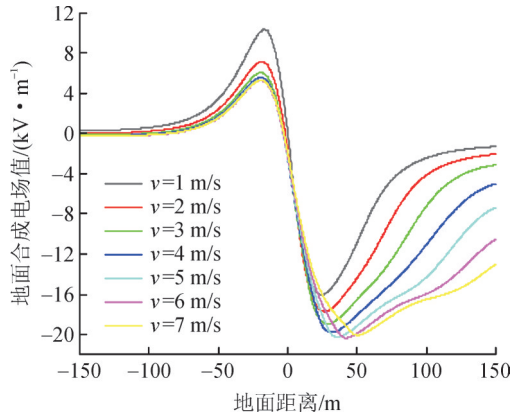


图7 地面合成电场(不同风速)

Fig. 7 Synthetic electric field on the ground (different wind speed)

根据分析得,横风致空间电荷向风速的方向转移,在风速较小时,在顺风侧的地面场强峰值由于空间电荷的增多变得更大。当风速大于3 m/s时,负极下方空间电荷会随着风向转移到更远的区域,空间电荷所涉及的范围会更广,但同时导体和相同地面位置处的电荷就会减少,地面场强峰值降低。

4 线路下方房屋的影响

线路下方存在建筑物时,建筑物及建筑物不同结构参数对电场有畸变作用。建筑物视作钢筋混凝土结构,模型参数为:与负极水平距离为10 m,房屋高度为4 m,房屋长度为10 m。

4.1 房屋高度的影响

高度 h 从4~10 m时,地面合成电场值见图8。从

图8中可知正极导体下方地面合成电场峰值没有明显变化,负极下方房屋两侧顶部的场强峰值都随房屋高度的增加而畸变更大,且在靠近线路附近一侧的畸变幅度更为明显。同时,建筑物对两侧场强的屏蔽效果由于高度的增加而增强,两侧场强随高度的增加而减小。

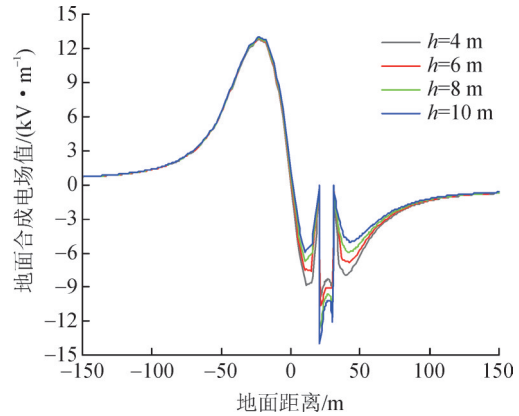


图8 地面合成电场(不同房屋高度)

Fig. 8 Synthetic electric field on the ground(different house height)

4.2 房屋宽度的影响

宽度 a 从4~16 m时,地面合成电场值见图9。从图9中可知正极导体下方地面合成电场峰值没有明显变化,负极下方靠近导线的房屋侧无明显变化,而房屋另一侧随宽度的增加其边缘场强减小。另外宽度增大时,房屋涉及的畸变区域不断变大。

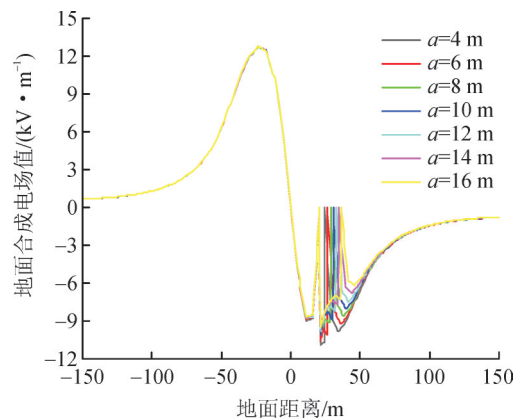


图9 地面合成电场(不同房屋宽度)

Fig. 9 Synthetic electric field on the ground (different house width)

4.3 房屋与线路间距的影响

房屋距负极距离 c 从10~20 m时,地面合成电场值见图10。从图10中可知正极导体下方地面合成电场峰值没有明显变化,负极下方当房屋与线路距离增大时,房屋顶部的场强在减小。

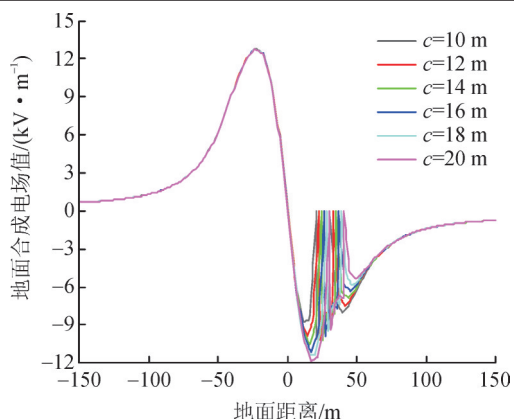


图 10 地面合成电场(不同间距)

Fig. 10 Synthetic electric field on the ground (different spacing)

4.4 房屋顶部不同形状的影响

房屋顶部不同结构见图 11。

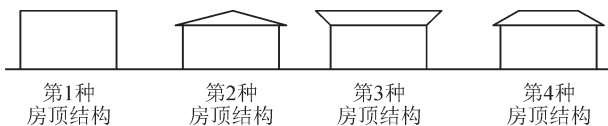


图 11 房屋顶部不同结构

Fig. 11 Different structures on top of the house

对 4 种房屋屋顶结构的地面合成电场分别进行了计算, 见图 12。由图 12 可知, 平面屋顶场强峰值位于房屋靠导线侧边缘, 三角屋顶的场强峰值在屋顶最高处, 倒梯形屋顶场强峰值在屋顶的两个尖角处, 且靠近负极一侧的场强高于另一侧, 梯形屋顶的场强峰值也在屋顶的两个尖角处, 且整体大小小于倒梯形屋顶的场强。

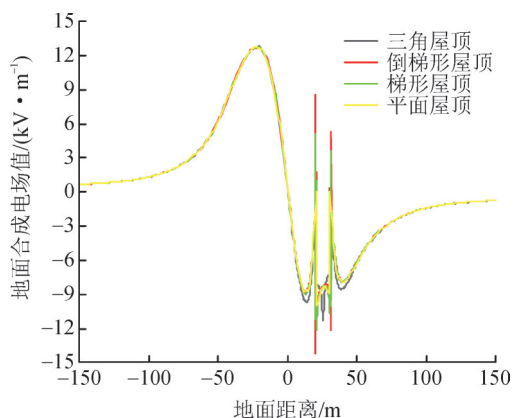


图 12 地面合成电场(不同屋顶结构)

Fig. 12 Synthetic electric field on the ground (different roof structure)

屋顶结构的合理设计在一定程度上可以改善屋顶的电场分布。平面屋顶的内部可利用空间最大, 当房屋净高相同时, 其屋顶对电场的畸变也最小, 因此可选择平面式屋顶结构, 以供建造时使用。

5 结论

1) 线路对地高度、极间距、子导线分裂间距及表面粗糙系数等线路参数中, 对地高度对地面合成场强的影响最大, 地面场强随线路高度的上升而明显降低。其余的参数影响可忽略, 只要达到线路架设基本条件即可。

2) 风速小于 3 m/s, 顺风侧的空间电荷由于风的影响变得更多导致地面场强峰值增大, 但风速大于 3 m/s 后空间电荷扩散到更广的区域, 地面场强会减小。

3) 线路下方房屋参数中, 房屋高度对地面电场的畸变最大。平面屋顶在房屋净高一致的情况下, 内部有较大的利用空间, 屋顶的电场畸变最小。

参考文献:

- 刘振亚. 特高压直流输电工程电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 9-13.
LIU Zhenya. Electromagnetic environment of UHV DC transmission project[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 9-13.
- 邹军, 程启问, 乔骥, 等. 高压直流输电线路离子流场计算研究综述[J]. 南方电网技术, 2020, 14(6): 1-10.
ZOU Jun, CHENG Qiwen, QIAO Ji, et al. Review on ion current field calculation in HVDC power transmission line[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(6): 1-10.
- 赵妍, 黄艳祖, 栾奕. 基于混合 ResNet-BiGRU 的高压直流输电线路故障测距[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(12): 45-55.
ZHAO Yan, HUANG Yanzu, LUAN Yi. Fault location for high-voltage DC transmission lines based on hybrid ResNet-BiGRU[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(12): 45-55.
- 徐政. 直流输电的基本特性及其应用模式概述[J]. 电力建设, 2025, 46(10): 34-43.
XU Zheng. Overview of basic characteristics and application modes of DC power transmission[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10): 34-43.
- 马彦琴, 杨刚, 李湛宇, 等. 计及系统状态的多端柔性直流输电系统可靠性评估及灵敏度分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(6): 98-107.
MA Yanqin, YANG Gang, LI Zhanyu, et al. Reliability Assessment And Sensitivity Analysis Of Multi-Terminal VSC-HVDC System Considering System Status[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(6): 98-107.
- 谢辉春, 倪园, 张建功, 等. 基于 ARIMA 和指数平滑法的直流输电线路地面合成电场实测离群值的判别[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 2161-2170.
XIE Huichun, NI Yuan, ZHANG Jianguo, et al. Discrimination of measured outliers of ground total electric field of DC transmission line based on ARIMA and exponential smoothing method[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2161-2170.
- 杨晓峰, 赵永涛, 张书浩, 等. ± 800 kV 昆柳龙直线路感应电特性的仿真研究[J]. 高压电器, 2021, 57(9): 66-71.

- YANG Xiaofeng, ZHAO Yongtao, ZHANG Shuhao, et al. Simulation study on inductive characteristics of ± 800 kV Kunliulong DC line[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9):66-71.
- [8] 易凡, 杜志叶, 黄从鹏, 等. 负极性球板电晕放电下绝缘表面电荷分布特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(9):197-202.
- YI Fan, DU Zhiye, HUANG Congpeng, et al. Study on charge distribution characteristics of insulation surface under negative corona in sphere-plane gaps[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9):197-202.
- [9] 邹岸新, 徐禄文, 籍勇亮, 等. 直流输电线路离子流场有限元计算研究综述[J]. 高压电器, 2017, 53(11):27-33.
- ZOU Anxin, XU Luwen, JI Yongliang, et al. Review of the researches on finite element calculation of ion flow field for DC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11):27-33.
- [10] SARMA M P, JANISCHEWSKYJ W. Corona loss characteristics of practical HVDC transmission lines part II - bipolar lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, PAS-90(3):1055-1064.
- [11] 程志远, 桑卓, 袁鑫, 等. 高压输电线路低电流CT取能技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(22):123-131.
- CHENG Zhiyuan, SANG Zhuo, YUAN Xin, et al. Research on low current CT energy harvesting technology for high voltage transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(22):123-131.
- [12] TAKUMA TA DAU, IKEDA T, KAWAMOTO T. Calculation of ion flow fields of HVDC transmission lines by the finite element method[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(12):4802-4810.
- [13] TAKUMA T, KAWAMOTO T. A very stable calculation method for ion flow field of HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(1):189-198.
- [14] 乔骥, 路遥, 刘增训, 等. 横向风对特高压交直流混合线路地面电场与离子流场分布特性的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(4):1234-1240.
- QIAO Ji, LU Yao, LIU Zengxun, et al. Influence of transverse wind on ground-level electric field and ion flow profiles of hybrid HVAC/HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2018, 42(4):1234-1240.
- [15] 徐吉来, 高克利, 万保权, 等. 以单极通量线法为初值的直流合成场数值计算及实测[J]. 高电压技术, 2021, 47(6):2091-2098.
- XU Jilai, GAO Keli, WAN Baoquan, et al. Numerical calculation and measurement of DC total field using unipolar flux line method as initial value[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6):2091-2098.
- [16] 蓝天, 刘永聪, 何旺龄, 等. 500 kV交流线路跨越 ± 800 kV直流线路三维离子流场计算[J]. 武汉大学学报, 2022, 55(2):175-182.
- LAN Tian, LIU Yongcong, HE Wangling, et al. Calculation of three dimensional ion current field of 500 kV AC line crossing ± 800 kV DC line[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(2):175-182.
- [17] 谢莉, 陆家榆, 赵录兴, 等. 电压变化对两回交叉跨越直流线路地面合成电场影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15):5381-5390.
- XIE Li, LU Jiayu, ZHAO Luxing, et al. Experimental research on ground total electric field affected by the variation of voltages of two crossing HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15):5381-5390.
- [18] 赵永生, 张文亮. 雾对高压直流输电线路离子流场的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13):194-199.
- ZHAO Yongsheng, ZHANG Wenliang. Effects of fog on ion flow field under HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13):194-199.
- [19] ZHANG Bo, HE Jinliang, JI Yiming. Dependence of the average mobility of ions in air with pressure and humidity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2):923-929.
- [20] 吴健, 杨彬, 韩文, 等. 基于有限元迭代法的高压直流输电线路离子流场仿真计算[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23):9421-9426.
- WU Jian, YANG Bin, HAN Wen, et al. Simulation of ion flow field around high voltage direct current transmission line based on finite element iteration method[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(23):9421-9426.
- [21] 谭振宇, 杨金洪, 徐明铭, 等. 雾霾对高压直流输电线路电晕离子流场的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(12):3849-3850.
- TAN Zhenyu, YANG Jinhong, XU Mingming, et al. Influence of fog haze on corona ion flow field of HVDC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12):3849-3850.
- [22] 刘鲲鹏, 陈黎明, 刘永聪, 等. 湿度风速对直流合成电场和离子流密度的影响[J]. 水电能源科学, 2019, 37(11):193-197.
- LIU Kunpeng, CHEN Liming, LIU Yongcong, et al. Effect of humidity and wind speed on DC total electric field and ion current density[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(11):193-197.
- [23] 梅飞, 张晓光, 李剑文, 等. 基于多维振动特征图谱的特高压换流阀主循环泵轻量化故障诊断模型[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16):83-96.
- MEI Fei, ZHANG Xiaoguang, LI Jianwen, et al. A lightweight fault diagnosis model for the main circulating pump of an ultra high voltage converter valve based on a multidimensional vibration feature graph[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16):83-96.
- [24] 邹志龙, 崔翔, 卢铁兵. 空间电荷对旋转式直流电场仪测量准确性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13):3443-3449.
- ZOU Zhilong, CUI Xiang, LU Tiebing. Effects of space charges on the measurement accuracy of rotating direct current electric field mill[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13):3443-3449.
- 李振华(1986—), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为数字化变电站状态监测及检修、电子式互感器及数字化电能计量装置、智能电网电气信息检测技术等(E-mail: lizhenhua1993@163.com)。
- 魏寅孔(1998—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为特高压直流输电及检修、变电站继电保护调试技术(通信作者)(E-mail: 751650358@qq.com)。