

±800 kV直流输电线临近复杂地形时可听噪声分布特性仿真分析

杨滔¹, 邹岸新², 陈建明³, 徐禄文², 籍勇亮², 龙英凯²

(1. 国网重庆市电力公司, 重庆 400014; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;
3. 国网重庆市电力公司信息通信分公司, 重庆 401128)

摘要: 为分析特高压直流输电线路临近复杂地形时的可听噪声状况, 基于镜像法并结合优化模拟电荷法, 提出了可用于计算复杂地形情况下特高压直流输电线路可听噪声的方法。该方法的有效性通过实测数据获得了验证。利用该方法仿真分析了不同斜坡角度、斜坡起点离导线距离以及凸凹地形对特高压直流输电线路可听噪声的影响规律, 结果表明: 地形对直流线路可听噪声的分布特性影响较为明显, 在进行直流输电线路可听噪声评估时应适当考虑地形的影响。该计算方法及相应的仿真分析结果可为特高压直流输电线路经过复杂地形时的规划设计作技术参考。

关键词: 直流输电线路; 复杂地形; 可听噪声; 仿真

Simulation Analysis for Audible Noise Characteristics of ±800 kV Transmission Lines Near the Complex Terrain

YANG Tao¹, ZOU Anxin², CHEN Jianming³, XU Luwen², JI Yongliang², LONG Yingkai²

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Co., Chongqing 401123, China;
3. Information and Communications Branch, State Grid Chongqing Electric Power Co., Chongqing 401128, China)

Abstract: In this paper, a way is proposed to analyze and to calculate the audible noise situation of ultra high voltage direct current (UHVDC) transmission lines near the complex terrain, which is based on the image method and combined with optimized charge simulation method. The measured data are given to verify the effectiveness of the proposed method. The method is used to simulate and analyze the different slope angle, the slope distance from slope's starting point to the transmission lines, and the effect of convex-concave terrain on audible noise of UHVDC transmission lines. The result shows that the terrain has obvious influence on the audible noise, therefore, appropriate consideration should be given to the evaluation of audible noise of UHVDC transmission lines. The calculated method and its relevant simulation analysis results can offer technical reference for the planning and design of the UHVDC transmission lines.

Key words: DC transmission line; complex terrain; audible noise; simulation

0 引言

近年来,在“一特四大”能源发展战略的指引下,中国特高压输电工程研究及建设不断向前发展。2014年上半年,为研究部署进一步加强雾霾等大气污染治理,相关部门提出的首要措施就是实施

跨区送电项目,这标志着特高压输电工程进入了快速发展阶段。特高压直流输电线路拥有可用于远距离、大容量输电和电力系统联网等优点,对于实现全国范围内的资源优化配置可以发挥重要作用^[1]。然而,高压直流输电线路所产生的电磁环境问题受到人们广泛关注,尤其是易被感知的可听噪声问题。因此,开展相关问题的研究具有极其重要的现

实意义。目前国内有关高压直流输电线路可听噪声的分析主要侧重于线路噪声的测试与分析^[2-9],可听噪声计算^[10-12],噪声控制限值这几个方面^[13-16]。而且这些计算与分析主要是将实际线路简化成地面是理想的平地而进行的,忽略了地形对可听噪声计算结果的影响。在实际的高压直流输电线路工程中会经常跨越不同的地形地貌,为准确实现高压直流输电线路可听噪声的评估,需要研究地形对直流输电线路可听噪声分布的影响。然而,目前该方面的研究还未见报道。

鉴于此,文中基于镜像法并结合优化模拟电荷法,提出了针对复杂地形的特高压直流输电线路可听噪声分析方法,并通过实例分析了不同地形对线路可听噪声分布的影响,可为特高压直流输电线路工程设计和电磁环境分析提供更为准确的技术参考。

1 理论方法

1.1 可听噪声计算

直流输电线路电晕产生的可听噪声可以利用经验公式进行计算。这些公式一般根据电晕笼和试验线段试验得出的数据,通过归纳分析得出。其中以美国 EPRI 和美国邦纳维尔电力局(BPA)总结的公式较有代表性。文中需计算的特高压直流线路分裂导线根数为 6,因此采用 BPA 推荐公式进行输电线路噪声计算^[17]。其计算方法如下。

$$\begin{cases} N_A = -133.4 + 86 \lg g_{\max} + 40 \lg d_{\text{eq}} - 11.41 gR \\ d_{\text{eq}} = 0.66 k^{0.64} d \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $g_{\max}$ 为导线表面的最大电场强度,kV/cm; d 为子导线的直径,mm; k 为导线分裂数; R 为计算点至正极导线的空间距离,m。

1.2 导线表面最大电场计算

由 1.1 节的式(1)可知,BPA 推荐公式中除了需要知道线路相关计算参数外,最重要的需要知道导线表面的最大电场。然而,传统的 BPA 推荐公式,无法考虑地形对表面电场的影响,进而无法考虑地形对噪声的影响。因此,文中基于镜像法并结合优化模拟电荷法来计算导线表面的最大电场,从而反映出地形对噪声的影响。

导线表面的最大电场采用如下方法进行计算: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间隔较密,远处均匀设置,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^[8],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。该方法模拟电荷设置方法见图1。

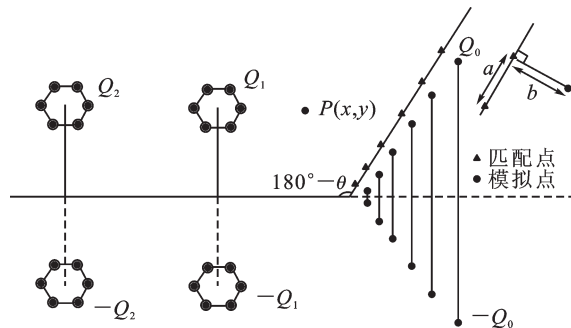


图 1 模拟电荷设置示意图

Fig. 1 Sketch map of set charge simulation

输电线路视为无限长且平行于地面,认为地面电位是0。由电磁场理论,根据镜像法可得到如下方程^[15]:

$$u = \sum_{j=1}^N p_j q_j; \quad (2)$$

$$p_{\ddot{y}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{\ddot{y}}}{d'_{\ddot{y}}} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: p_{ij} 是麦克斯韦电位系数,表示第 j 个电荷对第 i 个匹配点的作用; q_j 表示第 j 个模拟电荷; d_{ij} 是第 j 个模拟电荷到场点 i 的距离, d'_{ij} 是相应的镜像电荷到场点 i 的距离。考虑所有的模拟电荷可以得到一个矩阵方程

$$[P][Q]=[U]_{\circ} \quad (4)$$

由式(4)可以求得模拟电荷的值。而已知模拟电荷及其镜像电荷就能求得空间任意点的标称电位和电场。对空间一点 (x, y) 有

$$\begin{cases} E_x = \sum \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0} \frac{x-x_j}{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \\ E_y = \sum \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0} \frac{y-y_j}{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \circ \\ E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中的 q 包括镜像电荷。

获得精确的模拟电荷量,是准确计算标称电场分布的前提。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^[19]

$$f = \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \varphi_{0i})^2 \quad (6)$$

采用优化算法求解式(6)的极小值问题,进而求

得各优化的模拟电荷。最后利用得到的优化模拟电荷计算导线表面的最大电场。

2 计算方法验证

为验证文中计算方法的有效性,选择途经重庆境内的 ± 800 kV 复奉特高压直流输电工程一段靠近斜坡的线路进行可听噪声的现场实测与仿真计算。该直流输电工程线路极间距 22 m, 6 分裂子导线, 分裂半径 0.45 m, 子导线半径 0.017 8 m。现场测得导线最低点对地高度为 17.5 m, 线路正极导线中心垂直于地面的点离斜坡起点距离 13.8 m。测试过程中利用 DJ6 型光学经纬仪测得该斜坡的角度为 22.460° 。

采用文中方法在导线和斜坡表面附近设置模拟电荷, 针对该工程进行建模计算。见图 2。噪声测点布置方式按照从双极导线的中心至斜坡上方每隔 5 m 进行噪声测试, 从左至右共计 10 个测点, 见图 3^[20]。噪声测试采用 QUEST SoundPro SE/DL 型声级计, 该测试设备可以精确到 0.1 dB(A), 并能根据需要进行实时噪声测试。噪声在测试过程中的背景噪声主要有虫鸣声、交通噪声及人为噪声等。由于测试结果特别容易受到背景噪声的影响, 因此为减少背景噪声的影响, 特在晚上 10 点后进行测试, 同时每个测点噪声测试过程中利用该仪器选择无背景噪声的时刻进行及时测试, 尽可能不受背景噪声的影响^[21]。测试值与计算值对比情况见表 1。



图 2 现场测试图

Fig. 2 Sketch map of locale test

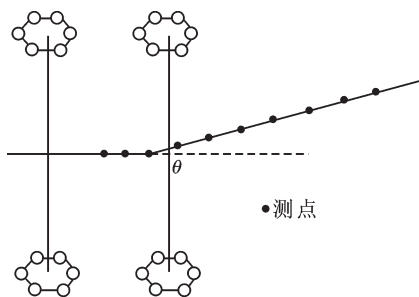


图 3 测点布置示意图

Fig. 3 Measuring point layout diagram

从表 1 中可以发现, 利用文中计算结果和测试结果的最大误差为 4.1%, 而传统的 BPA 经验公式计算方法和测试结果的最大误差为 5.6%, 考虑到测

表 1 测试值与计算值对比

Table 1 Test values compared with calculated values

	calculated values				dB(A)
测点	1	2	3	4	5
测试值	48.6	48.2	47.8	47.0	48.5
文中计算值	46.8	46.2	46.1	45.9	47.4
BPA 计算值	46.2	45.5	45.3	45.1	46.0
测点	6	7	8	9	10
测试值	47.3	46.0	45.1	44.0	43.1
文中计算值	46.8	45.6	44.2	43.8	42.5
BPA 计算值	45.1	44.3	44.1	43.2	42.8

试过程中受环境、设备及电压波动的影响, 可以认为文中计算方法是有效的, 具有更高的准确性。

3 复杂地形算例分析

现以糯扎渡 ± 800 kV 直流输电工程为例进行计算分析。线路参数选取如下: 导线为 6 分裂, 子导线半径 $r=16.8$ mm, 导线极间距 $D=22$ m, 导线平均对地高度 $H=21$ m, 导线分裂半径 $R_0=0.5$ m。根据 DL/T 436—2005 《高压直流架空送电线路技术导则》, 导线表面的粗糙系数 m 取 0.47。相关研究表明, 双极特高压直流输电线路正负极导线的起晕状况差别很小, 在进行电磁环境分析时可以忽略不计^[22]。因此文中计算时, 以 X, Y 正半轴为边界, 只考虑第一象限。同时, 也为了便于分析讨论, 当改变一个参数时, 其他参数保持不变。实际线路计算示意图见图 4。

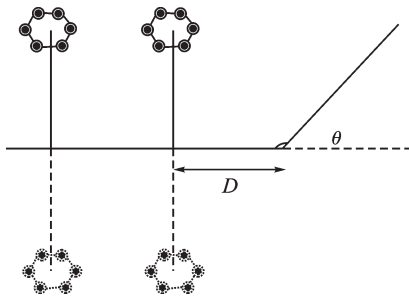


图 4 实际线路计算示意图

Fig. 4 The actual circuit schematic diagram

3.1 斜坡角度影响分析

不同斜坡角度对可听噪声的影响可能会不同, 首先仿真分析斜坡角度对其分布的影响。斜坡起点离导线中心距离 30 m 时不同斜坡角度变化时的可听噪声分布曲线见图 5。从图 5 中可以发现, 正极导线下方可听噪声的最大值随着斜坡角度的增大而增大, 但是变化很小。根据计算可知斜坡为 0° 时 (导线下方地面水平), 最大可听噪声为 45.8 dB(A), 而在斜坡为 60° 时, 最大可听噪声为

46.2 dB(A)。对比斜坡角度 60° 和 0° 可以发现: 在同样距离导线中心约 35 m 处, 在斜坡角度 60° 时的可听噪声值为 45.0 dB(A), 而在斜坡角度 0° (平地) 的可听噪声值为 43.2 dB(A), 二者相差 1.8 dB(A)。因此, 当该线路导线进过一类声环境区域(夜间标准限值 45.0 dB(A))^[23] 时, 则斜坡地形情况下, 导线的走廊宽度应该大于 35 m, 而在平面地形时其走廊宽度可以控制在 35 m。

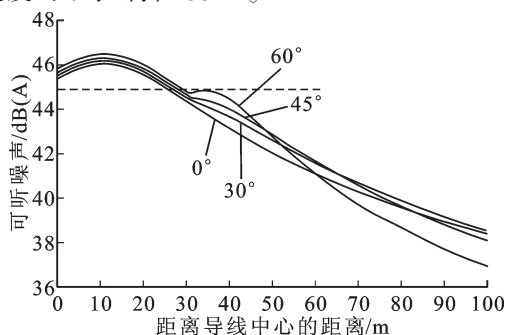


图 5 不同斜坡角度时可听噪声分布

Fig. 5 Audible noise distribution in different slope angle

从图 5 中还可以发现在斜坡上, 随着斜坡角度的增大, 斜坡起点附近的可听噪声变化越明显; 远离斜坡后, 角度越大, 噪声分布曲线与平面地形(0°)噪声分布曲线的交点越靠前(即: 在 X 方向上可听噪声超过平面地形时的范围随斜坡角度的增大而减小)。

3.2 斜坡起点离导线间距离的影响分析

斜坡与导线的距离不同, 也会对噪声分布产生影响。斜坡角度 60° 时斜坡起点离导线起点不同距离情况下的可听噪声分布曲线见图 6。从图 6 中可以发现, 导线下方可听噪声的最大值位于导线正下方附近, 并随着斜坡起点靠近导线而增大。但是当斜坡起点靠近导线时(该例计算中约 20 m), 导线下方可听噪声的最大值可能会位于斜坡上。

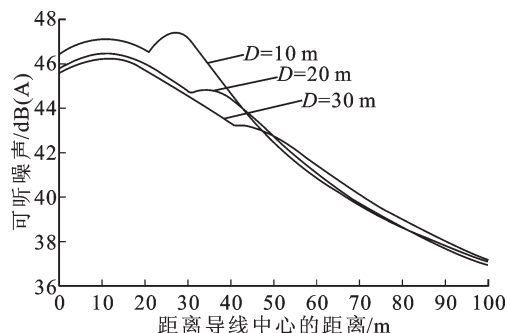


图 6 斜坡起点离导线不同距离时可听噪声分布

Fig. 6 Audible noise distribution in different distance between starting point and the conductor

3.3 地形的影响分析

实际双回特高压直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可听噪声的分布影响展开分析, 计算示意图见图 7。

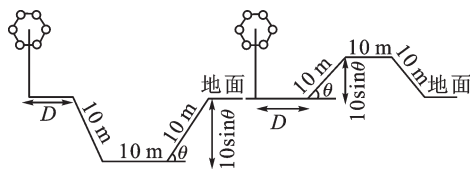


图 7 计算地形示意图

Fig. 7 Sketch map of calculated terrain

3.3.1 凹形状地形

首先分析凹形地形起点离导线距离对可听噪声分布的影响。固定凹形地形斜坡角度为 60° , 当凹形地形起点离导线中心距离为 30、40、50 m 时, 其可听噪声的分布见图 8。从图 8 中可以看出, 在凹形地形情况下, 导线下方的可听噪声最大值在对应的距离上分别为 49.3、48.2、46.0 dB(A), 其最大值随地形靠近导线而增大。从图 8 中还可以看出, 地形越靠近导线, 凹形地形上的噪声分布“塌陷”越明显。

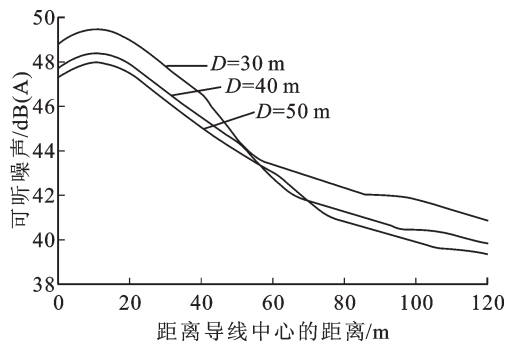


图 8 凹形地形离导线距离对可听噪声分布的影响

Fig. 8 The influence of distance from concave terrain to transmission lines for audible noise

当凹形地形起点离导线中心距离为 40 m, 凹形地形斜坡角度为 30° 、 45° 、 60° 时对可听噪声分布的影响见图 9。从图 9 中可以看出, 导线下方的可听噪声最大值随地形倾斜角度的增大而增大, 在凹形地形上噪声的“塌陷”程度则随地形倾斜角度的增大而加深, 但是总体上对地形上噪声的分布影响不大。

3.3.2 凸形地形

同样, 首先分析凸形地形起点离导线距离对可听噪声分布的影响。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, 可听噪声的分布见图 10。其从图 10 中可以看出, 当凸形地形起点离导线中心距离为 30、40、50 m 时, 导线下方的可听噪声最大值在对应的距离上分别为 47.8、46.8、46.4 dB(A), 其最大值随地形靠近导线而增大。从图 10 中还可以看出: 地形越靠近导线, 凸形地形上的噪声分布“凸起”越明显; 导线下方的噪声分布总体

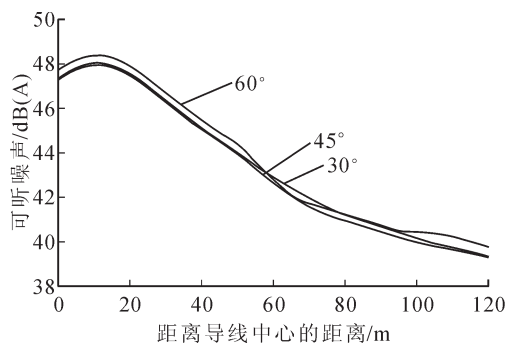


图9 凹形地形不同角度对可听噪声分布的影响

Fig. 9 The influence of concave terrain's angle for audible noise

上较平面地形稍微有所增大。

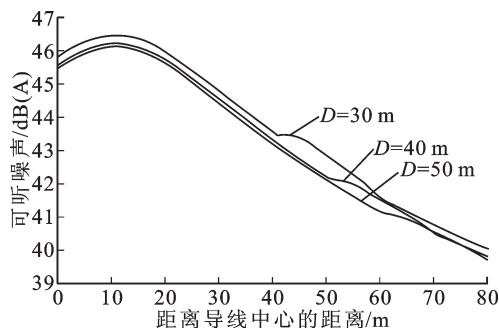


图10 凸形地形离导线距离对可听噪声分布的影响

Fig. 10 The influence of distance from convex terrain to transmission lines for audible noise

当凸形地形起点离导线中心距离为40m,凸形地形斜坡角度为30°、45°、60°时对可听噪声分布的影响见图11。从图11中可以看出,导线下方的可听噪声最大值随地形倾斜角度的增大而增大,在凸形地形上噪声的“凸起”程度则随地形倾斜角度的增大而加深,当倾斜为30°时,地形影响效果有限,但是导线下方的噪声分布总体上较平面地形稍微有所增大。

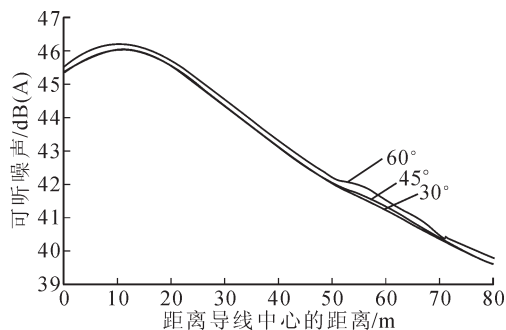


图11 凸形地形不同角度对可听噪声分布的影响

Fig. 11 The influence of convex terrain's angle for audible noise

4 结论

文中基于镜像法并结合优化模拟电荷法,仿真

计算了复杂地形情况特高压直流输电线路的可听噪声分布特性,得到如下结论:

1)特高压直流输电线路靠近斜坡地形时,斜坡上可听噪声的最大值随着斜坡角度及斜坡离导线距离的增大而增大;斜坡上可听噪声分布呈现先增大后减小的趋势。

2)特高压直流输电线路靠近凹凸地形时,虽然可听噪声在导线下方附近的最大值受地形的影响较为明显,但是相比平面地形,凹形地形和凸形地形导线下方的噪声分布总体上变化较小。

3)文中的计算方法具有通用性,对任意复杂地形的可听噪声分析,都可采用将不平坦地形等效为若干个不同角度斜坡的叠加进行建模分析。

参考文献:

- [1] 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.
LIU Zhenya. Electromagnetic environment of UHV DC transmission project[M]. Beijing:China Electric Power Press,2009.
- [2] 路遥,齐晓曼,张广洲,等. ± 500 kV 葛南线和宜华线可听噪声频谱特性及影响因素[J]. 高电压技术,2010,36(11):2754-2759.
LU Yao, QI Xiaoman, ZHANG Guangzhou, et al. Spectrum characters of the audible noise from ± 500 kV Ge-Nan and Yi-Hua transmission line and affecting factors[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2754-2759.
- [3] 李敏,余占清,曾嵘,等. 高海拔 ± 800 kV 直流输电线路电磁环境测量[J]. 南方电网技术,2011,5(1):42-45.
LI Min, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Electromagnetic environment measurement of ± 800 kV DC transmission lines at high altitude[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1): 42-45.
- [4] MARUVADA S P. Corona performance of a conductor bundle for bipolar HVDC transmission at ± 750 kV[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, PAS-96(6): 1872-1881.
- [5] NAKANO Y, FUKUSHIMA M. Statistical audible noise performance of shiobara HVDC test line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(1): 290-296.
- [6] 唐剑,何金良,刘云鹏,等. 海拔对导线交流电晕可听噪声影响的电晕笼试验结果与分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 105-111.
TANG Jian, HE Jinliang, LIU Yunpeng, et al. Test results and analysis of altitude-change effect on audible noise of AC corona occurring on conductors with corona-test cage[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 105-111.
- [7] 黄成,旷冬伟,冯春林,等. 电力电容器单元噪声测量方法的若干问题试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿,

- 2014, 35(5):75-80.
- HUANG Cheng, KUANG Dongwei, FENG Chunlin, et al. Research on several issues in noise measurement of power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(5):75-80.
- [8] 祝令瑜, 沈琪, 汲胜昌, 等. 基于振动测量的电容器装置噪声贡献分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(4):13-17.
- ZHU Lingyu, SHEN Qi, JI Shengchang, et al. Noise contribution analysis of capacitor installations based on measured vibration data[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(4):13-17.
- [9] 甘林, 刘夫云, 冯春林, 等. 电力电容器可听噪声研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(1):1-6.
- GAN Lin, LIU Fuyun, FENG Chunlin, et al. Audible noise study of power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1):1-6.
- [10] 唐剑, 杨迎建, 李永双, 等. 特高压交流输电线路电晕效应的预测方法 I: 可听噪声[J]. 高电压技术, 2010, 36(11):2679-2686.
- TANG Jian, YANG Yingjian, LI Yongshuang, et al. Prediction of corona effects generated from UHVAC transmission lines I: Audible noise[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11):2679-2686.
- [11] 路遥, 干喆渊, 陈豫朝, 等. 特高压试验线段与实际线路产生的电场和可听噪声的等效性分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(2):354-360.
- LU Yao, GAN Zheyuan, CHEN Yuchao, et al. Consistency analysis between the electric field and audible noise caused by UHV test line and UHV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2):354-360.
- [12] A task force of the corona and field effects subcommittee a comparison of methods for calculating audible noise of high voltage transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(10):4090-4099.
- [13] 张文亮, 陆家榆, 鞠勇, 等. ± 800 kV 直流输电线路的导线选型研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27):1-6.
- ZHANG Wenliang, LU Jiayu, JU Yong, et al. Design consideration of conductor bundles of ± 800 kV DC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(27):1-6.
- [14] 薛志方, 程思勇, 何民, 等. 糯扎渡—广东 ± 800 kV 直流输电线路导线选型[J]. 高电压技术, 2009, 35(10):2344-2349.
- XUE Zhifang, CHENG Siyong, HE Min, et al. Conductor schemes for ± 800 kV UHVDC transmission line of Nuozhadu-Guangdong[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10):2344-2349.
- [15] 吴桂芳, 陆家榆, 邵方殷. 特高压等级输电的电磁环境研究[J]. 中国电力, 2005, 38(6):24-27.
- WU Guifang, LU Jiayu, SHAO Fangyin. Research on electromagnetic environment of the next voltage level of transmission system in China[J]. Electric Power, 2005, 38(6):24-27.
- [16] 陆家榆, 鞠勇. ± 800 kV 直流输电线路电磁环境限值研究[J]. 中国电力, 2006, 39(10):37-42.
- LU Jiayu, JU Yong. Study on the limits of electromagnetic environment of ± 800 kV DC transmission lines[J]. Electric Power, 2006, 39(10):37-42.
- [17] 邓军, 肖遥, 楚金伟, 等. 云南—广东 ± 800 kV 特高压直流输电线路可听噪声仿真计算与测试分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(12):3268-3276.
- DENG Jun, XIAO Yao, CHU Jinwei, et al. Simulation calculation and measurement analysis of audible noise for ± 800 kV Yunnan-Guangdong UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12):3268-3276.
- [18] 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 E-HV transmission lines under condition of complex landscape[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1):18-20.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] DL/T 501—1992 架空送电线路可听噪声测量方法[S]. 北京: 中国电力出版社, 1992.
- DL/T 501—1992 Audible noise measurement method for overhead transmission line[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1992.
- [22] LU Tiebing, HAN Feng, ZHAO Zhibin, et al. Analysis of the electric field and ion current density under ultra high voltage direct current transmission lines based on finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(8):2939-2942.
- [23] GB 3096—2008 声环境质量标准[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- GB 3096—2008 Environmental quality standard for noise[S]. Beijing: China Power Press, 2008.
- 杨滔(1980—), 男, 硕士, 研究方向为电网电磁环境及噪声控制技术。