

±800 kV 滇西北至广东特高压工程极导线与接地极线共塔电磁环境研究

李倩¹, 廖民传², 王学军¹, 潘春平¹, 汪晶毅¹, 陈云云¹, 刘俊翔³

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510080; 3. 广州供电局有限公司电力试验研究院, 广州 510000)

摘要: 直流输电线路经过高度城市化的地区时, 将直流线路和接地极线路共塔架设是解决输电线路走廊紧缺问题的最佳选择, 但目前国内外对于这种塔型的电磁环境鲜有研究。本文对传统电磁环境计算方法进行了拓展, 以便能够考虑接地极线对极导线电磁环境的屏蔽作用。以±800 kV 滇西北至广东特高压工程为例, 分析了水平排列和垂直排列两种共塔架设方式下线路可听噪声、无线电干扰、地面电场和地面离子流密度等的分布特点。结果表明, 共塔架设线路的地面电场优于独立架设直流线路, 采用极导线垂直排列(上层负极导线)的布置型式可将输电线路走廊压缩约 44%。

关键词: 特高压直流; 电磁环境; 可听噪声; 无线电干扰; 电场强度;

Research on the Electromagnetic Environment of Polar Wires and Ground Electrode Wires on the Same Tower of ±800 kV Dianxibei to Guangdong UHVDC Project

LI Qian¹, LIAO Minchuan², WANG Xuejun¹, PAN Chunping¹, WANG Jingyi¹, CHEN Yunyun¹, LIU Junxiang³
(1. Guangdong Electric Power Design Institute, CEEC, Guangzhou 510663, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. Electric Power Testing and Research Institute, Guangzhou Power Supply Bureau Co. Ltd., Guangzhou 51000, China)

Abstract: In highly urbanized areas, erecting ± 800 kV polar wires and ground electrode wires on the same tower is the best choice to solve the shortage of transmission line corridors and scarcity of land resources. However, there are few researches on the electromagnetic environment of this type of tower at home and abroad. In this paper, the conventional calculation method is expanded to consider the shielding effect of ground electrode wires to the electromagnetic environment of polar wires. Taking the ±800 kV Dianxibei to Guangdong UHVDC Project as an example, the audible noise, radio interference, total field strength above ground and ion current density under horizontally and vertically arranged modes of same tower hybrid transmission lines are discussed. The results show that the total electric field strength above ground of same tower hybrid transmissin lines is less than the DC line, and the transmission line corridors can be compressed about 44% by using the vertical arrangement of same tower hybrid transmissin lines.

Key words: HVDC; electromagnetic environment; audible noise; radio interference; electric field strength

0 引言

随着国民经济的迅速增长和电网建设的不断发展, 输电线路走廊紧张的形势日益严峻。特别是在珠江三角洲等地区, 线路常常需要在工业区、居民

密集区或夹在两条已建线路中间走线。直流线路除了包含双极直流线路之外, 还包含接地极线路, 在高度城市化的地区, 将两者共塔架设是解决输电线路走廊需求与土地资源供给之间矛盾的最佳选择。

±800 kV 极导线与接地极线共塔架设作为一种

新型塔型^[1]，其排列方式主要有水平排列和垂直排列两种。其中采用水平排列的塔型仅在极个别已建成线路中局部使用过；而采用垂直排列的塔型目前尚无运行经验，国内外对这种塔型电磁环境的研究几乎为空白。目前，国内外学者已经对特高压 1 000 kV 交流输电线路或 ± 800 kV 直流输电线路的电磁环境开展了大量的研究，并取得了显著得成果^[2-8]。

基于上述背景，本文对常规独立架设直流线路的可听噪声、无线电干扰、地面电场和地面离子流密度的计算方法^[2-8]进行拓展，使之适用于 ± 800 kV 极导线和接地极线共塔架设这种新型方式。随后以 ± 800 kV 滇西北至广东特高压直流工程为例，讨论了采用水平排列和垂直排列两种共塔架设方式下线路的电磁环境分布，并与常规独立架设的 ± 800 kV 直流输电线路进行比较，总结这种新型共塔架设方式下的电磁环境分布特点，为优化线路结构设计提供帮助，以确保设计的参数满足生态环境安全，并为确定输电线路最小对地距离和拆迁范围提供依据。

1 ± 800 kV 直流线路与接地极线路共塔方式

± 800 kV 直流线路和接地极线共塔架设时，根据以往设计和运行经验，考虑接地极线绝缘配合、安全系数取值、带电作业等问题，通常接将接地极线布置于极导线下方，极导线上方布置两根地线。根据极导线布置方式的不同又分为水平排列和垂直排列两种，如图 1 所示。

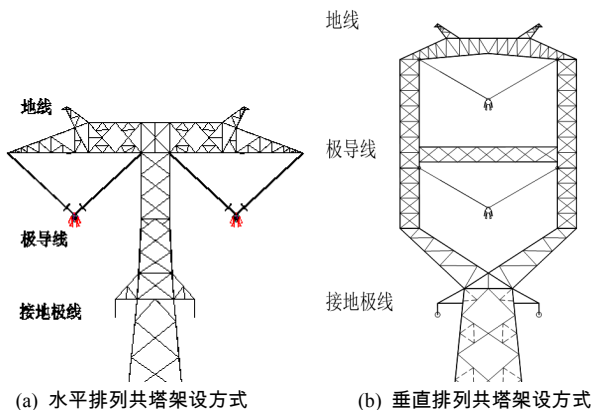


图 1 ± 800 kV 直流线路和接地极线共塔架设方式

Fig. 1 ± 800 kV HVDC polar wires and ground electrode wires on the same tower

2 电磁环境计算方法概述

正常情况下，极导线双极运行时流过接地极线的电流是不平衡电流，约占双极流过电流的 1%，接地极线的电压极低，可以近似忽略不计。对于 ± 800 kV 直流线路和接地极线共塔架设这种新型导线地线布置方式，接地极线类似于屏蔽线，将改善线路的电磁环境分布。本文对常规独立架设直流线路的电磁环境计算方法进行拓展^[1]，主要有以下两方面。

2.1 拓展导线表面电荷计算方法

导线表面电场是可听噪声和无线电干扰计算的基础参数。而对于导线表面电场，导线表面电荷又是其基础参数。本文利用麦克斯韦电位系数法^[8-10]计算表面电荷时，对传统的电位系数矩阵进行扩充，将接地极线和极导线、以及接地极线和地线之间的相对关系作为子矩阵纳入总的电位系数矩阵。由此得到的极导线表面电荷除了考虑地线的屏蔽作用，还考虑了接地极线的影响。在此基础上，对于表面电场采用逐步镜像法计算^[8-10]，对于可听噪声采用 BPA 公式计算^[8-9,11]，对于无线电干扰采用 CISPR 公式计算^[8-9,12]。

2.2 拓展地面电场计算方法

对于未起晕的直流线路，采用等效电荷法^[13-14]计算地面电场。计算等效电荷时可采用上文所述拓展方法及接地极线的影响。

若直流线路起晕，直流线路地面电场应采用计及空间电荷影响的数值解析法计算^[8-9,13-14]。数值解析法的核心是模拟导线周围电力线的分布。接地极线的存在改变了极导线周围电力线原有的分布状态。本文算法除了模拟极导线和地面之间的电力线分布，还模拟了极导线和接地极线之间的电力线分布。

3 电磁环境限值要求

直流输电线路的电磁环境主要涉及可听噪声、无线电干扰、地面合成电场和离子流密度等。在线路设计和建设中, 必须使这些电磁环境因子满足环保要求。

3.1 可听噪声

在海拔 1 000 m 及以下地区, 距±800 kV 直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20m 处, 由电晕产生的可听噪声(L_{50})不应超过 45 dB (A)^[9]。

3.2 无线电干扰

在海拔 1000m 及以下地区, 距±800 kV 直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20m 处, 80%时间, 80%置信度, 0.5MHz 频率的无线电干扰不应超过 58 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$)^[9]。

3.3 导线地面场强

根据国内外直流超高压、特高压输电线路下电场限值的研究成果, ±800 kV 直流特高压架空输电线路下对于居民区合成场强限定在雨天 30 kV/m、晴天 25 kV/m, 离子流密度限定在雨天 100 nA/m²、晴天 80 nA/m²^[9]。

4 工程案例电磁环境计算结果

本文以珠三角地区在建的±800 kV 滇西北至广东特高压直流工程为例, 研究其极导线与接地极线共塔时水平排列和垂直排列的电磁环境特点, 并与±800 kV 独立架设的直流线路进行比较。本工程±800 kV 直流线路每极导线采用 6×JL/G2A-720/50 钢芯铝绞线, 极导线分裂间距推荐采用 450 mm; 接地极线路导线采用两组 JNRLH60/G3A-300/40 钢芯耐热铝绞线, 垂直分裂间距为 500 mm。地线采用 JLB20A-180 型铝包钢绞线。在居民区, 极导线水平排列、垂直排列方案 1 (上层正极导线) 和垂直排列方案 2 (上层负极导线) 的线路空间几何尺寸分别如图 2 所示。

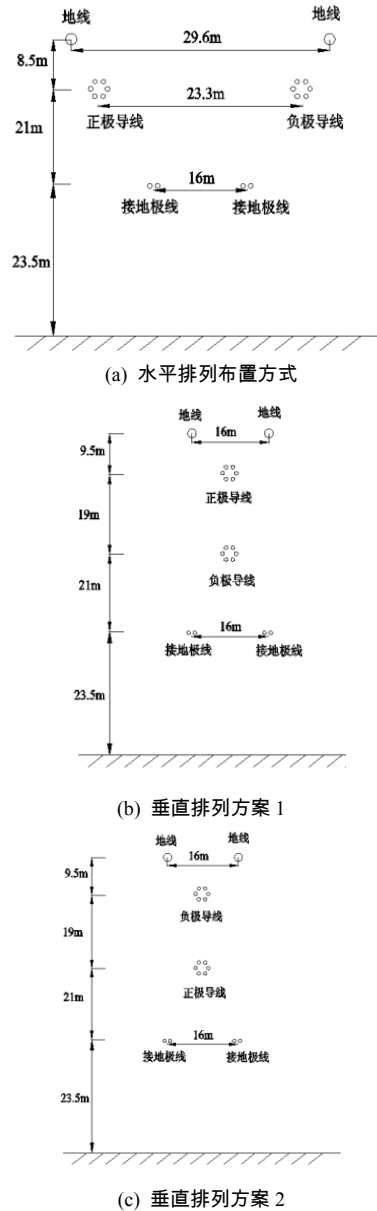


图 2 各种塔型布置方案线路几何尺寸

Fig. 2 Line geometry dimension of various tower layout programs

4.1 可听噪声和无线电干扰

通过计算, 图 3—4 给出了海拔 1 000 m 时独立架设直流线路、极导线水平排列、垂直排列方案 1 和垂直排列方案 2 四种型式下居民区的可听噪声和无线电干扰分布(可听噪声为晴天的值, 无线电干扰为 80%时间, 80%置信度, 0.5MHz 频率的值)。

由图 3—4 可见, 各种极导线布置方案的可听噪声均小于±800 kV 直流设计规范限制标准 45 dB(A) 的限值要求, 无线电干扰均小于±800 kV 直流设计

规范限制标准 58 dB(A)的限值要求。进一步分析表明,由于受正极导线和负极导线产生的脉冲电流分布特点不同,可听噪声和无线电干扰主要由正极导线产生。因此从数值上来看,垂直排列方案 1<水平排列方案<独立架设方案<垂直排列方案 2。可听噪声的最大值和最小值差约 4~5 dB;无线电干扰的最大值和最小值差约 9~10 dB。

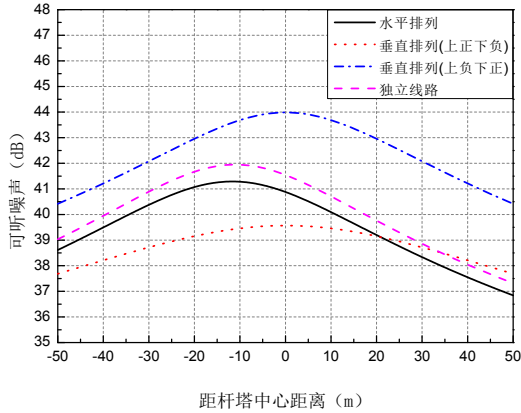


图 3 居民区可听噪声

Fig. 3 Audible noise in residential area

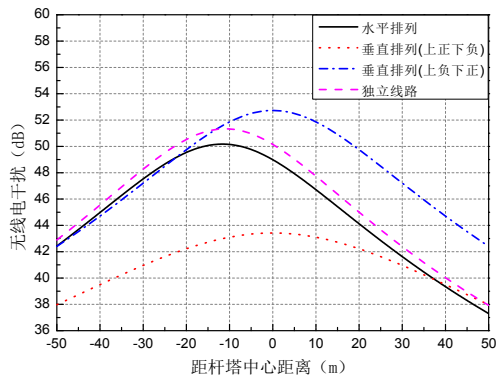


图 4 居民区无线电干扰

Fig. 4 Radio interference in residential area

4.2 导线地面电场

通过计算,图 5—6 给出了独立架设直流线路、极导线水平排列、极导线垂直排列方案 1 和垂直排列方案 2 四种型式下居民区在晴天和雨天时的地面标称电场、合成电场和离子流密度分布。居民区取最小对地距离 7.5 m。晴天时起晕电场暂按 18 kV/cm 考虑,雨天时起晕电场暂按 14 kV/cm 考虑。

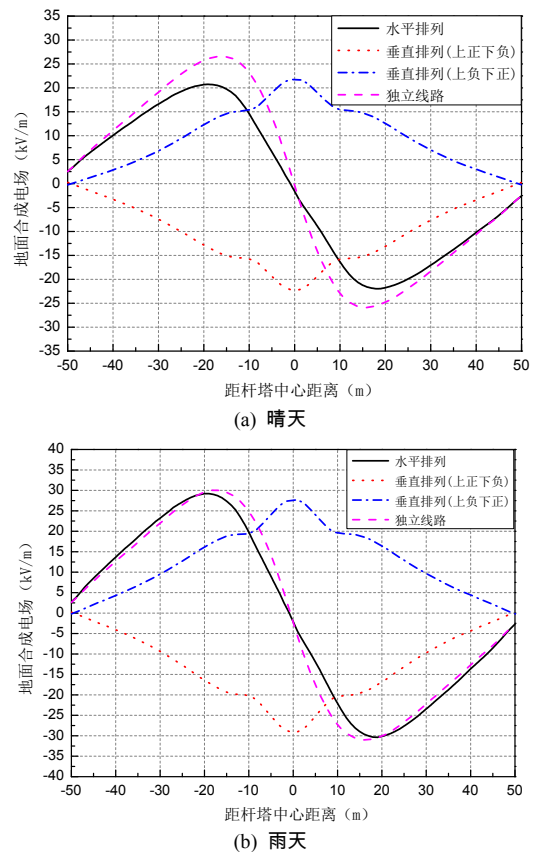


图 5 居民区地面合成电场

Fig. 5 Total electric field strength above ground in residential area

由图 5—6 可见,共塔线路的地面电场和离子流密度均满足非居民区和居民区的场强控制要求。晴天时,无论是地面合成电场还是离子流密度,垂直排列方案 2(峰值绝对值)<水平排列方案<垂直排列方案 1<独立架设方案。雨天时,对于地面合成电场,垂直排列方案 2(峰值绝对值)<垂直排列方案 1<水平排列方案<独立架设方案;对于地面离子流密度,垂直排列方案 2(峰值绝对值)<水平排列方案<垂直排列方案 1<独立架设方案。上述计算结果是基于 Deutsh 假设所获得,由于该线路尚未建成,故计算结果与实测结果并未进行对比。

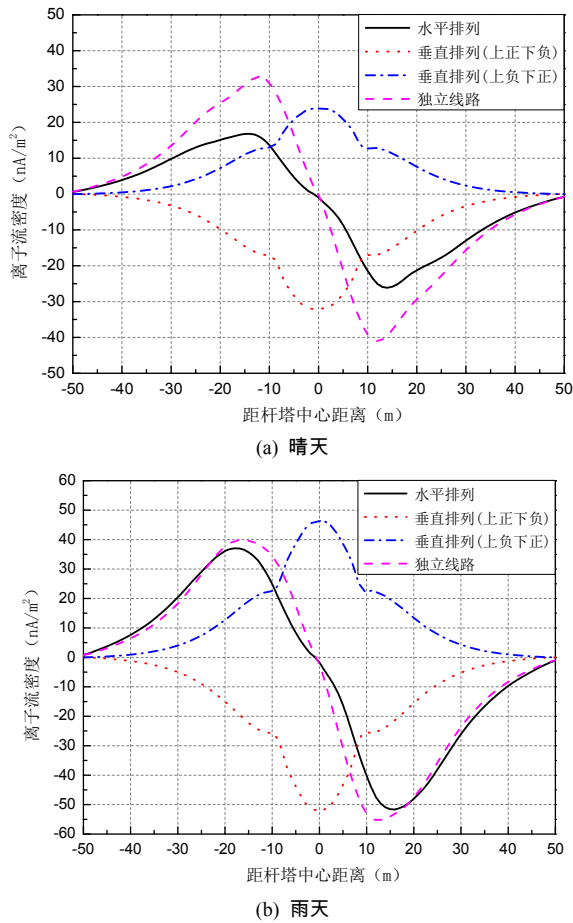


图 6 居民区地面离子流密度

Fig. 6 Ion current density in residential area

4.3 最小对地距离和拆迁范围

±800 kV 直流线路拆迁范围主要由以下两个原则确定: 1) 主要按“民房所在地面未畸变合成电场应不超过 15 kV/m”标准计算; 2) 边导线外 7 m 处以内房屋棚舍全部拆除。

由前面的计算可知, 极导线垂直排列方案 2 的地面电场(峰值绝对值)小于垂直排列方案 1。本文计算了水平排列和极导线垂直排列方案 2 两种型式下接地极线对地高度由 6.5 m 每隔 4 m 上升至 22.5 m 雨天时的地面合成电场分布, 分别如图 7 所示。

由图 7 可知, 在雨天随着接地极线对地距离升高, 拆迁范围逐渐减小。满足拆迁范围不再受“民房所在地面未畸变合成电场应不超过 15 kV/m”控制的最小对地高度为: 对于水平排列, 接地极线最小

对地高度取 22.5 m; 对于垂直排列, 接地极线最小对地高度取 21 m。海拔 1 000 m 及以下, 共塔线路采用水平排列时对应的线路走廊宽度为 77.75 m(非居民区)和 77.0 m(居民区); 共塔线路采用垂直排列时对应的线路走廊宽度为 43.50 m(非居民区)和 43.50 m(居民区)。共塔线路在采用垂直排列时, 线路走廊宽度较水平排列缩小了约 44%。可见, 极导线与接地极共塔架设在采用垂直排列方式时, 在压缩直流线路走廊方面效果极为显著。在输电线路走廊极度匮乏地区, ±800 kV 直流线路和接地极线共塔架设线路推荐采用极导线垂直排列方案 2 的布置型式。

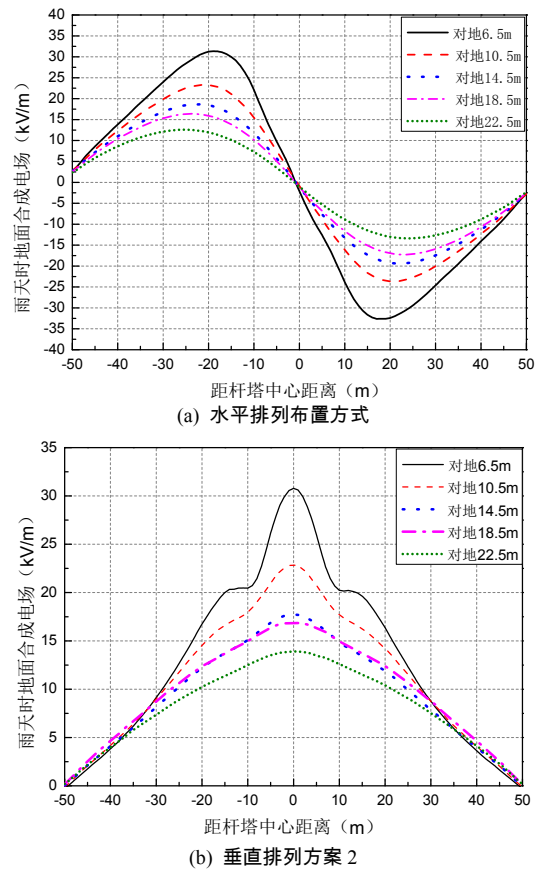


图 7 共塔线路地面合成电场随导线最小对距离的变化

Fig. 7 Relationship between Total electric field strength above ground of same tower hybrid transmission lines and minimum distance of lines

5 经济性分析

将直流线路与接地极线路共塔架设后, 不仅节

约了输电线路走廊,而且依靠接地极线的屏蔽作用,直流线路的电磁环境分布基本得到改善。但将直流线路与接地极线路共塔架设,一定程度上提高了杆塔高度,增加了工程投资。

杆塔的高度与所经过的地区类型、档距等因素有关。以居民区、400m 档距下直流线路独立架设杆塔、水平排列共塔架设杆塔和垂直排列共塔架设杆塔 3 种塔型的塔高变化为例,进行经济性比较,结果如表 1 所示。

表 1 3 种类型铁塔型经济性比较

Tab.1 Economic comparison of three tower types

比较项目	独立架设塔型	水平排列共塔塔型	垂直排列共塔塔型
塔高/m	基准	+6	+25
投资估算/万元	基准	+20	+63
走廊宽度估算/m	基准	-10	-44

注:塔高计算时,按照直流线路设计规范要求,独立架设的线路在居民区的最小对地安全距离取 21 m;共塔架设的线路取 7.5 m。

由表 1 可知,共塔架设虽然增加了工程投资,水平排列约增加 20 万元,垂直排列约增加 63 万元;但压缩输电线路走廊效果显著,水平排列减小走廊宽度约 10 m,垂直排列减小走廊宽度约 44 m。在经济高度发达、土地资源极度匮乏的珠三角地区,共塔线路以每基杆塔增加几十万元的工程投资为代价,压缩高达 44 m 的输电线路走廊宽度,其经济性较高。

6 结论

本文对常规独立架设直流线路的电磁环境计算方法进行拓展,以便能够适用于共塔线路,考虑接地极线对极导线电磁环境的屏蔽作用。以±800 kV 滇西北至广东特高压工程为例,讨论了水平排列和垂直排列两种共塔架设方式下线路可听噪声、无线电干扰、地面电场和地面离子流密度等的分布特点。居民区的电磁环境研究得到以下结论:

1) 可听噪声和无线电干扰,垂直排列方案 1 (上层正极导线) < 水平排列方案 < 独立架设方案 < 垂直排列方案 2 (上层负极导线)。

2) 对于地面合成电场和离子流密度,大多数情况下,垂直排列方案 2(峰值绝对值) < 水平排列方案 < 垂直排列方案 1 < 独立架设方案。仅在雨天时,水平排列方案的地面合成电场略大于垂直排列方案 1。推荐极导线垂直排列采用方案 2 的布置型式。

3) 海拔 1 000 m 及以下,共塔线路在采用垂直排列方案 2 时,线路走廊宽度较水平排列缩小了约 44%,

4) 在经济高度发达、土地资源极度匮乏的珠三角地区,共塔线路以每基杆塔增加几十万元的工程投资为代价,压缩高达 44 m 的输电线路走廊宽度,其经济性较高。

5) 对于±800 kV 滇西北至广东特高压直流工程,按照满足拆迁范围不再受电场强度控制的要求,水平排列共塔线路最小对地高度为 22.5 m,垂直排列共塔线路为 21 m。水平排列共塔线路的走廊宽度为 77 m,垂直排列共塔线路为 43.5 m,工程拆迁可以参考此数据。水平排列共塔线路的可听噪声为 38.4 dB,无线电干扰为 40.5 dB,雨天居民区的最大地面电场为 13.4 kV/m,最大离子流密度为 7.5 nA/m²;垂直排列共塔线路可听噪声为 41.3 dB,无线电干扰为 44 dB,雨天居民区最大地面电场为 14.9 kV/m,最大离子流密度为 8.2 nA/m²,均满足电磁环境限值要求。

参考文献

- [1] 李倩,聊民传,陈云云. ±800 kV 特高压直流线路与接地极线路共塔专题研究[R]. 广州:中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 2015.
- [2] 赵宇明,刘磊,张华赢,等. 特高压直流线路电磁环境指标计算及测量[J]. 南方电网技术, 2011, 5(3): 1-5.
ZHAO Yuming, LIU Lei, ZHANG Huaying, et al. Calculation and measurement of electromagnetic environment parameters of UHVDC transmission lines [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(3): 1-5.
- [3] 赵宇明,路遥,吕金壮,等. 溪洛渡直流工程同杆双回线路电磁环境指标研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(6): 61-64.
ZHAO Yuming, LU Yao, LÜ Jinzhuang, et al. Study on the electromagnetic environment index of double circuit transmission lines on the same tower in Xiluodu HVDC project [J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(6): 61-64.

- [4] 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.
- [5] 刘磊,李敏,李锐海,等.高海拔特高压直流试验线路电磁环境初步试验研究[J].南方电网技术,2010,4(6):49-53.
LIU Lei, LI Min, LI Ruihai, et al. Primary experiment study on the electromagnetic environment of UHVDC test line at high altitude [J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(6): 49-53.
- [6] 南方电网技术研究中心.高海拔±800 kV HVDC 电晕特性及其电磁环境影响研究[R].广州:南方电网技术研究中心,2010.
- [7] 施春华,朱普轩,蒋剑,等.±800kV 特高压直流线路采用5分裂导线的电磁环境特性分析[J].高电压技术,2011,37(3):666-671.
SHI Chunhua, ZHU Puxuan, JIANG Jian, et al. Electromagnetic environment profile of ±800 kV UHVDC transmission lines using 5 bundled conductors [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 666-671.
- [8] 赵婉君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [9] 中国电力企业联合会.±800 kV 直流架空输电线路设计规定:GB 50790—2013 [S].北京:中国计划出版社,2013.
- [10] 付启明,袁建生.绞线花纹导线表面电场强度计算与分析[J].高电压技术,2007,33(4):77-79.
FU Qiming, YUAN Jiansheng. Computation and analysis of the electric field intensity on conductor surface for the bunch wire of transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(4):77-79.
- [11] OLSEN R G. Radio noise due to corona on a multiconductor power line above a dissipative earth[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(1): 272-287 .
- [12] 中华人民共和国国家电力公司.高压架空送电线路无线电干扰计算方法:DL/T 691—1999 [S].北京:中国电力出版社,1999.
- [13] MARUVADA P S, DROGI S. Field and ion interactions of hybrid AC/DC transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1165-1172.
- [14] 傅宾兰.高压直流输电线路地面合成场强与离子流密度的计算[J].中国电机工程学报,1987,7(5):57-63.
FU Binlan. Calculation of electric field and ion current density for bipolar HVDC line [J]. Proceedings of the CSEE, 1987, 7(5): 57-63.

收稿日期:2016-05-30

作者简介:

李倩(1985),女,工程师,硕士,主要研究方向为输电线路电磁暂态仿真与分析、线路过电压与绝缘配合,liqian1209@163.com;

廖民传(1983),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为输电线路电磁暂态仿真与分析、线路过电压与绝缘配合,liaomch@163.com;

王学军(1981),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为输电线路电磁暂态仿真与分析、线路过电压与绝缘配合,wangxuejun@gedi.com.cn。