

500 kV/±800 kV 交直流同走廊运行时的 电磁环境分析

杨子科¹, 徐玮江¹, 肖宏峰²

(1. 国网湖南常德德山区供电公司, 湖南 常德 415001; 2. 沙理工大学 电气与信息工程学院, 长沙 410004)

摘要:为研究超、特高压交直流线路同走廊架设时所产生的电磁环境影响,建立 500 kV/±800 kV 交直流线路同走廊混合运行的仿真模型,利用 CDEGS 中的架空交流和直流传输线路设计模块计算不同天气、极导线高度和导线间距下的无线电干扰和可听噪声。计算结果表明:交流与直流线路单独运行时,其电场分布呈中心对称分布,而交直流混合电场分布无明显规律,适当地增大极导线高度可有效降低混合电场强度;混行线路产生的可听噪声值已超过规定的限值标准,而改变极导线间距,对混合线路产生的可听噪声和无线电干扰影响较小。所得结论可为交直流线路同走廊架设提供参考。

关键词:交直流混行;混合电场;无线电干扰;可听噪声;CDEGS

中图分类号:TM721.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2021)08-0244-06

随着中国经济的迅猛发展,社会对电能的需求日益增大。由于中国资源分布与经济发展的不平衡,需要建设大量高压架空输电线路,将西部的电能输送到经济较为发达的东部^[1-2],不可避免地会造成交直流输电线路同走廊架设的情况,而高压输电线路会对环境造成一定的影响^[3-5],可能会影响到线路周边居民的正常生活。

文献[6]利用线性叠加原理得出了交直流混行架空线路所产生的混合电场计算方式,结合不同天气下线路电晕放电强度的改变,提出了交直流线路同走廊架设计无线电干扰和可听噪声的计算方法。文献[7]针对高海拔地区±500 kV 直流输电线路电磁环境进行了计算与分析,并对不同型号的导线进行了无线电干扰和可听噪声等电磁环境参数的计算,选出了更适合于高海拔地区的超高压直流导线型号。文献[8]总结了多种电场的标准,提出了交直流混合电场的合成方法,计算了±800 kV 直流输电线路与 220 kV 交流输电线路的平行距离,给出了各相导线的最小对地高度。近些年来,大多数学者仅研究了交流线路与直流线路单独运行时的电磁环境影响^[9-11],而对交直流线路同塔混行时的电磁环境鲜有研究。

笔者通过上海一向家坝±800 kV 特高压直流

线路参数与 500 kV 超高压交流输电线路并行,利用 CDEGS 仿真软件建立超、特高压交直流混行的仿真模型,计算不同条件下的混合场强并分析了天气因素、极导线高度以及交直流导线间距对线路所产生的无线电干扰和可听噪声的影响。

1 电磁环境影响原理

交直流线路同塔混行架设时,会对线路周围的环境造成影响,如图 1 所示。在线路周边的空间中产生一个混合电场,混合电场和电晕效应的计算一般考虑各导线束表面最大或平均最大电场。每个交流导体表面的电场将具有由直流导体产生的直流偏压,每个直流导体表面的电场将具有由交流导体产生的交流纹波分量。对于每根交直流导线束,当其表面的交流电场分量和直流电场分量之和的平均最大值大于其起晕电场时,就会发生电晕。通过上述分析可以得出:交直流输电线路平行相邻架设将影响每根交直流导线束的电晕起始电压。

施加在交流导线束上的电压变化将改变同一走廊线路附近的无电荷电场,会影响直流电晕产生的空间电荷分布。直流电晕产生的大量空间电荷将被交流输电线路阻止到达位于交流输电线路下方的地面^[12-13]。

收稿日期:2021-04-01

作者简介:杨子科(1978—),男,湖南常德人,国网湖南常德德山区供电公司,德力分公司副经理,研究方向为电力配网建设工程。

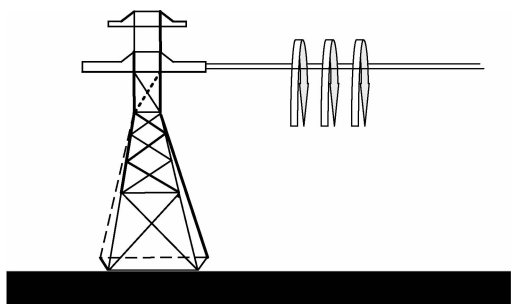


图1 架空线路的电磁环境影响

由于无线电干扰的频带宽度较大,通常在工程应用中仅计算其 0.5 MHz 时的分量^[14-15]。高压交流线路与直流线路运行时都会产生可听噪声,对环境造成一定的影响^[16-18]。对于交直流混行线路所产生的可听噪声,可通过对交直流线路单独运行时所产生的可听噪声值进行算术相加来计算^[19-20]。

2 计算模型及参数设置

模型是基于向家坝—上海±800 kV 特高压架空输电线路与 500 kV 交流架空输电线路同塔并行完成搭建。大多数学者在进行交直流输电线路同走廊运行时的电磁环境研究时,仅采用有限元分析法建模进行分析,但该计算方法存在一定的局限性,电流连续性方程的求解无法全面反映交流电压的变化对空间电荷密度的影响,甚至有少部分学者仅简单地将交流电场与直流电场叠加进行分析,其计算结果存在较大误差。而在本文模型中,将地面视为面积无穷大的导体平面,大地表面电位值设置为 0,并将输电线路看作等位面,其电压值恒定不变,结合上流有限元法与向后欧拉法,可较为全面地考虑不同等级电压对离子流密度和地面电场的影响,并且考虑了同塔交直流线路空间电荷的运动,可准确分析交流电场对直流离子流场的作用机制。采用 CDEGS 中的架空交流和直流架空线路设计模块 (SESEnviroPlus) 计算了超、特高交直流并行时,架空线路对周边所造成的电磁环境影响,模型中线路具体布局如图 2 所示。其中±800 kV 直流架空线路所采用的钢芯铝绞线型号为 6×LGJ-720/50,其分裂间距取 0.45 m,两根地线均采用型号为 JLBIA-150 的铝包钢绞线,直流线路中心坐标为 20 m;500 kV 交流线路采用的钢芯铝绞线型号为 4×LGJ-400/35,其分裂间距为 0.45 m,两根地线均采用型号为 JLB-150 的铝包钢绞线,交流线路中心坐标为 -30 m。交流导线对地最低高度为 11 m,直流导线对地高度为 18 m,土壤电阻率取

100 Ω·m;海拔高度为 0,大气压强设置为 750 mm 汞柱,温度取 25 ℃,观测面取地面。

在电磁环境参数模块中,所需要的导线起始电晕场强可由式(1)所示的 Peek 公式进行计算,即

$$E_{on} = 29.8m\delta \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r}}\right)$$
 (1)

式中: m 表示导线表面粗糙系数,对于理想的光滑导线 $m \approx 1$,通常情况下晴天取 0.47,雨天时取 0.38; r 为导线半径; δ 为空气相对密度。

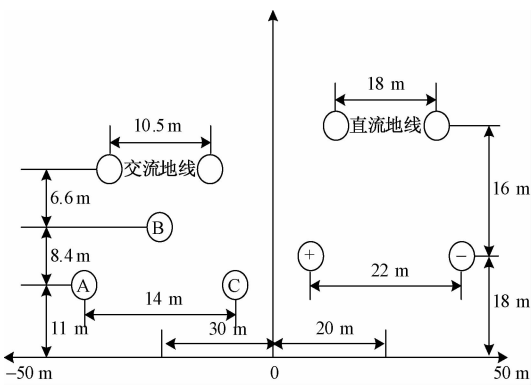


图2 ±800 kV/500 kV 交直流混行仿真模型

3 电场强度计算

3.1 交、直流电场及混合电场计算

通过上述模型仿真计算了晴天状态下,交、直流输电线路单独运行时所产生的场强及交直流线路共同作用下的混合电场强度,晴天时 m 取 0.47,由于海拔高度设置为 0, δ 取 1,通过计算得到所需的起始电晕电位梯度值为 17.61 kV/cm,场强计算结果如图 3 所示。

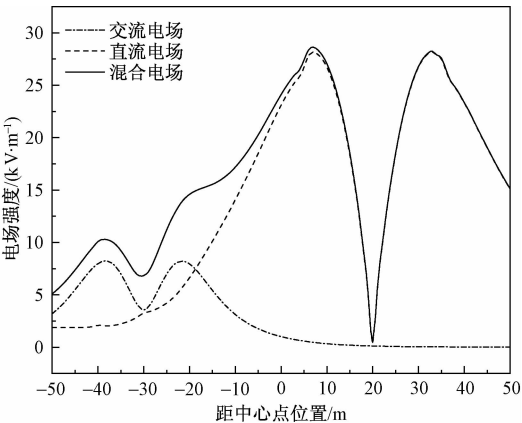


图3 电场强度计算

由图 3 可知,500 kV 交流场强峰值为 8.23 kV/m,±800 kV 直流场强峰值为 28.16 kV/m,混合电场所引起的场强峰值为 28.64 kV/m,其数值仅比直

流线路单独运行时高 1.7%。靠近交流线路处,混合电场的空间分布与交流电场分布趋势相似,而在靠近直流线路端,混合电场分布与直流电场分布趋势一致。交直流线路单独运行时,所产生的电场分布基本在其线路中心左右呈“V”形对称分布,而混合电场的分布无明显的规律。交流线路所产生的交流场强在其线路中心位置-30 m 时数值最低,为 3.57 kV/m,直流线路所引起的直流场强分量在其线路中心位置 20 m 处数值最低,为 0.33 kV/m,交直流混合电场强度最小位置也在 20 m 处,其数值为 0.45 kV/m。

3.2 不同极导线高度

通过改变模型极导线的对地高度进行仿真计算,得出电场分布与极导线高度间的关系。计算结果如图 4 所示。

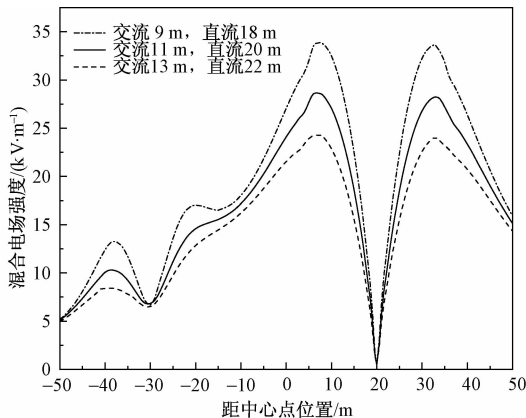


图 4 不同极导线高度下的混合场电场分布

由图 4 可知,随着极导线的升高,地面的混合场强数值也有所下降,当交流导线最低相为 9 m,直流为 18 m 时,混合场强峰值为 33.91 kV/m,将交直流极导线相应升高 2、4 m 时,混合场强峰值分别 28.64、24.30 kV/m,分别降低了 5.27、4.34 kV/m。不同极导线高度下,两端导线正下方的混合场强具体数值见表 1。

表 1 极导线高度对地面混合电场的影响

距线路中心 位置/m		-40	-20	10	30
混合电场强度/ (kV·m ⁻¹)	交流 9 m 直流 18 m	12.41	17.03	32.47	32.25
	交流 11 m 直流 20 m	10.08	14.59	27.06	26.80
	交流 13 m 直流 22 m	8.40	12.85	22.88	22.60

3.3 不同极导线间距

交流与直流线路位置关系的改变会使线路下方的混合电场分布发生改变,研究混合电场分布与交直流线路中心间距的关系,仅改变交流线路的架设位置即可。笔者分别计算了交直流中心间距 40、50、60m 时的混合电场分布,其结果如图 5 所示。

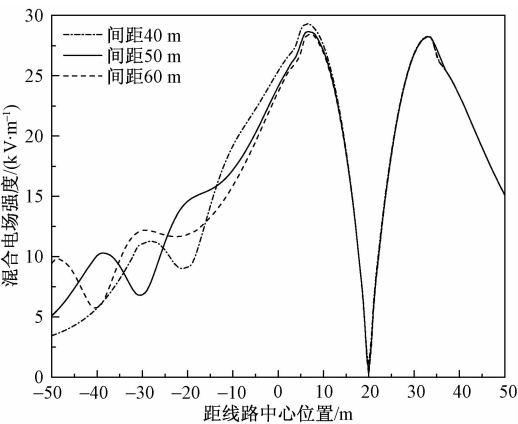


图 5 不同极导线间距时的混合电场分布

由图 5 可知,不同极导线间距对混合电场的空间位置的分布会产生改变,但对于混合场强的峰值影响很小。当改变交流线路中心的架设位置时,仅对交流线路周边的混合电场影响较大,而对直流线路端的混合电场影响几乎可以忽略不计。交直流线路中心间距 40 m 时,混合场强的峰值为 29.27 kV/m,间距 60 m 时,峰值为 28.40 kV/m,其导线间距增大 20 m,混合场强峰值仅降低 2.9%。

4 无线电干扰及可听噪声计算

4.1 天气因素

不同的天气环境会对线路产生无线电干扰和可听噪声造成一定影响。在雨天时,长时间的雨水会使得输电导线的起始电晕场强有较大幅度的降低,造成线路表面存在大量的离子,不规则导线表面周围聚集大量电荷,从而使得电晕放强度有所下降。通过 CDEGS 仿真软件计算了雨天与晴天时混合线路产生的无线电干扰和可听噪声,表 2、表 3 分别列出了交流线路中心和直流线路中心无线电干扰、可听噪声的计算结果以及不同天气下的影响峰值。

表 2 不同天气下线路产生的无线电干扰

距线路中心位 置及峰值/m	晴天			雨天		
	-30	20	峰值	-30	20	峰值
无线电干扰/dB	45.27	51.27	55.45	42.57	50.74	51.95

表 3 不同天气下线路产生的噪声影响

距线路中心位 置及峰值/m	晴天			雨天		
	-30	20	峰值	-30	20	峰值
噪声影响/dB	47.72	43.55	47.73	44.32	41.20	44.38

由表 2 可知,不论是晴天还是雨天环境下,直流线路中心处的无线电干扰值都略大于交流线路中心。晴天时,交流线路中心与直流线路中心处所产生的混合无线电干扰值分别为 45.27、42.57 dB,雨天环境下的干扰值分别为 51.27、50.74 dB。晴天与雨天环境下的干扰峰值分别为 55.45、51.95 dB,较雨天而言,晴天环境下的无线电干扰值更大,高出 8.7%。参照中国对于±800 kV 直流输电线路的无限电干扰标准的规定,未超过 58 dB 的限值,符合相关限值要求。故在后续计算中,仅对晴天环境下无线电干扰进行计算分析。

由表 3 可知,晴天环境下,交直流混合线路产生的可听噪声峰值为 47.73 dB 与交流线路中心正下面产生的噪声值 47.72 dB 大小基本相同,对于雨天状况下的可听噪声规律也基本一致,由此可判断交流线路所产生的可听噪声较直流线路而言幅值更大,计算得到晴天、雨天时直流线路中心的可听噪声值分别为 43.55、41.20 dB,通过对比直流线路中心正下方的可听噪声值也可证明该结论。由于晴天时线路产生的可听噪声峰值较直流线路高 7.5%,故后续分析中也仅对晴天环境下的噪声值进行计算。按照交直流线路可听噪声的限值标准,在档距中央导线两端 20 m 处,晴天不超过 45 dB 的标准,交直流混合架空线路产生的可听噪声干扰略大于限值要求,故在实际工程应用中可采用架设屏蔽线和屏蔽网等措施来减小噪声影响。

4.2 不同极导线高度

在不改变其他参数的条件下,通过搭建仿真模型计算了晴天环境下极导线设高度对交直流混行线路产生的无线电干扰和可听噪声数值的影响,其结果分别如图 6、图 7 所示。

由图 6 可知,随着极导线高度的升高,交直流混行线路下方区域的无线电干扰值有所下降,但是整体的区域分布规律几乎未发生改变,不论是极导线高度上升还是下降,从计算结果中都可以看出,在交流线路中心与直流线路中心处的无线电干扰值都在其两端呈“V”形对称分布。当交流线路最低相架设高度为 13 m,直流线路架设高度为 20 m 时,无线电干扰在距线路中心 34 m 处取的最大值为 54.55 dB,将所有的导线架设高度以依次降低 2、

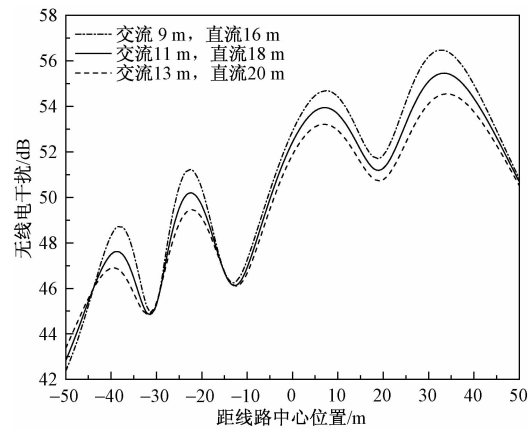


图 6 不同极导线高度下的无线电干扰

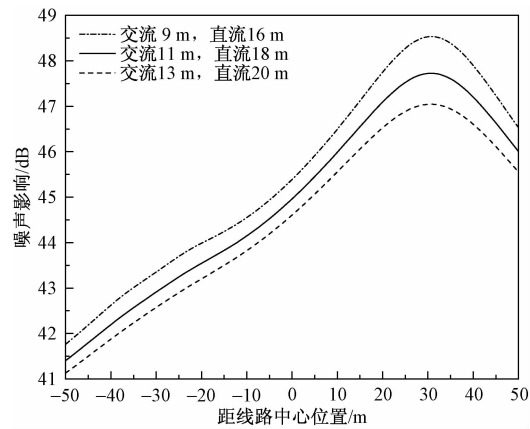


图 7 不同极导线高度下的可听噪声影响

4 m,计算得到无线电干扰的最大值分别为 55.46、56.48 dB,且其峰值所在位置也基本不变。当极导线高度升高 2 m 时,无线电干扰峰值会降低 1.6%;升高 4 m 时,其峰值会降低 3.4%。无线电干扰值随极导线高度的变化较小,所以在降低无线电干扰的防护措施中,考虑到工程建设的经济性,不建议采用升高杆塔高度的方式来提高极导线架设高度。

由图 7 可知,交直流混行线路下方的混合区域可听噪声值随着极导线高度的升高而下降。3 种不同极导线高度下,都呈现从左至右逐渐上升的趋势直至在距线路中心 31 m 位置取得噪声影响的峰值,按照极导线架设高度由低到高分别为 48.54、47.73、47.05 dB,当线路架设高度交流 9 m、直流 16 m 时,线路产生的可听噪声数值最大,极导线升高 2 m 时,其数值下降 0.82 dB;升高 4 m 时,下降 1.49 dB。

通过计算可以得出,提升极导线的架设高度可以适当降低交直流混合线路造成的无线电干扰和可听噪声影响。

4.3 不同极导线间距

不同间距下交直流混合输电线路所产生的无线电干扰和可听噪声计算结果如图8、图9所示。

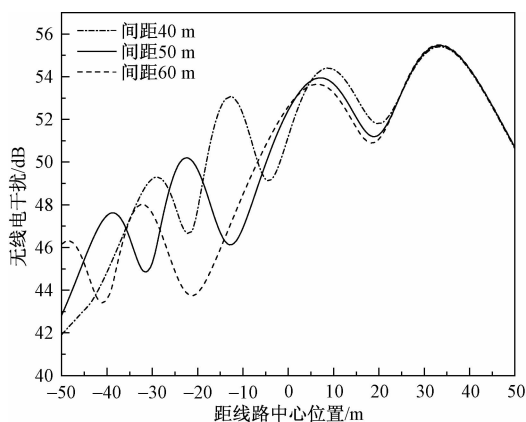


图8 不同极导线间距下的无线电干扰

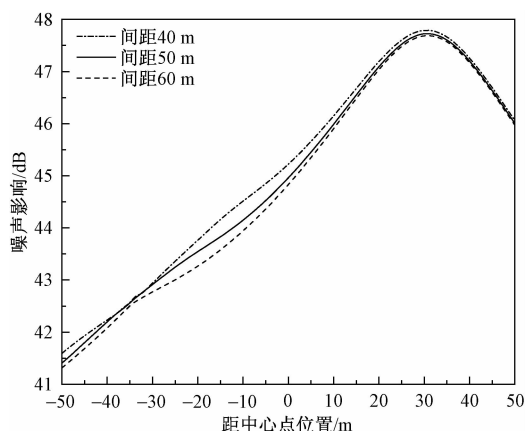


图9 不同极导线间距下的可听噪声影响

由图8可知,随着极导线间距的改变,交直流混行线路所产生的无线电干扰的峰值大小几乎相等,极导线间距40、50、60 m时的无线电干扰峰值分别为55.40、55.46、55.50 dB。在计算模型中是通过改变交流线路位置来改变交流与直流导线间距的,从计算结果中可以发现在交流线路中心-20、-30、-40 m处的无线电干扰值都是其所在单位区间内的最低值,而在边相导线正下方取得最大值。通过分析,可以得出对于交直流混行线路,改变极导线间距并不会对无线电干扰的数值产生较大的影响,仅会使其空间分布发生相应的移动。

图9给出了不同极导线间距下,交直流混行线路所产生的可听噪声影响,从计算结果中可以发现,随着导线间距的增大,可听噪声的数值并未发生较大的变化,其峰值都在47.70 dB左右。

结果显示,极导线间距对交直流混行输电线路

产生的无线电干扰和可听噪声影响较小,通过改变极导线间距来降低混合线路产生的干扰效果不佳。

5 结论

通过CDEGS软件对500 kV/±800 kV交直流混行线路进行仿真模型的搭建,并对不同天气因素、极导线架设高度、极导线间距下的电磁环境进行了仿真计算,得出以下结论:

1)交直流混行线路所产生的混合电场,可不计交流与直流线路间的相互影响,等效于单独计算交流电场与直流电场后的叠加。

2)交直流输电线路产生的混合场强随着极导线高度的升高而降低,随着导线间距的增大而减小。极导线升高4 m混合场强峰值下降9.61 kV/m,导线间距增大20 m,场强峰值降低0.87 kV/m。

3)晴天时的无线电干扰、可听噪声值分别比雨天高8.7%、7.5%。晴天时,极导线升高4 m,无线电干扰值下降1.93 dB,可听噪声下降1.49 dB;极导线间距的改变对无线电干扰和可听噪声数值的影响几乎可忽略不计。

计算结果可为实际工程中的超、特高压交直流线路同走廊架设提供一定的参考。

参考文献

- [1] 王沛. 高压交流输电线路对穿越下方油气管道的电磁影响及防护措施研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
- [2] 吴桂芳. 我国±500 kV直流输电工程的电磁环境问题[J]. 电网技术,2005(11):5-8.
- [3] 陈博,王世峻,费斐. 超高压输电线路附近民用建筑物区域电场数值模拟[J]. 科学技术与工程,2018,18(33):160-165.
- [4] 卢莹,赵志斌,倪筹帷,等. 不同电压等级下架空导线对雷达的无源干扰[J]. 科学技术与工程,2019,19(14):187-192.
- [5] 马晓倩,何堃,谢莉,等. ±500 kV同塔三回柔性直流输电线路的电磁环境[J]. 电网技术,2020,44(5):1978-1984.
- [6] 邹军,王思颖,李本良. 高压交直流同塔输电线路无线电干扰与可听噪声的计算[J]. 重庆大学学报,2016,39(6):1-10.
- [7] 赵录兴,小布穷,王炳强,等. 高海拔地区±500 kV直流线路电磁环境试验研究及导线选型[J]. 电网技术,2021,45(2):794-801.
- [8] 吴桂芳,袁春峰,陆家榆,等. 特高压直流线路与交流线路同走廊时混合电磁环境的计算[J]. 电网技术,2010,34(2):14-19.
- [9] 李凌燕,杜志叶,阮江军,等. ±800 kV/±500 kV混压双回直流线路的电磁环境分析及改善研究[J]. 高压电器,2016,52(9):26-33.
- [10] 吴高波,李健,陈媛,等. ±800 kV与±500 kV同塔双回直流输电线路电磁环境研究[J]. 电网技术,2015,39(9):

2532—2538.

[11] 谢庆,任洁,李至峪,等. 重冰区同塔双回交流输电线路电磁环境仿真研究[J]. 高压电器,2017,53(8):9—16.

[12] 吴桂芳,袁春峰,陆家榆,等. 特高压直流线路与交流线路同走廊时混合电磁环境的计算[J]. 电网技术,2010,34(2):14—19.

[13] 郭海林,王志宁,刘宵,等. 高压交流输电线路工频电场强度理论计算公式改进研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(30):156—159.

[14] 赵永生,张文亮. 同塔交直流输电线路混合电场研究[J]. 电网技术,2014,38(1):120—125.

[15] 邹军,王思颖,李本良. 高压交直流同塔输电线路无线电干扰与可听噪声的计算[J]. 重庆大学学报,2016,39(6):1—10.

[16] 咎瀚洋. ±800 kV 特高压直流输电线路电磁环境计算方法的研究[D]. 郑州:河南工业大学,2015.

[17] ADEL Z, DEIN E. Calculation of the electric field a-round the tower of the overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(2):899—907.

[18] 孟晓波,惠建峰,卞星明,等. 交流电晕脉冲特性随气压湿度变化的规律[J]. 中国电机工程学报,2011,31(28):128—135.

[19] 王晖. 型线表面电场的理论计算及电磁环境分析[D]. 北京:华北电力大学(北京),2019.

[20] 付万璋,何旺龄,谢龚浩,等. 交流输电线路可听噪声计算分析(Ⅱ)—交叉跨越架设[J]. 高电压技术,2019,45(12):4070—4078.

Electromagnetic Environment Analysis of 500 kV/±800 kV AC/DC Power System
Operating in the Same Corridor

YANG Zi-ke¹, XU Wei-jiang¹, XIAO Hong-feng²

(1. State Grid Hunan Changde Mountain Power Supply Company, Changde Hunan 415001, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to study the electromagnetic environment impact of UHV and UHV AC/DC transmission lines in the same corridor, a simulation model of mixed operation of 500 kV/±800 kV AC/DC transmission lines in the corridor is established. The radio interference and audible noise under different weather, pole height and conductor spacing are calculated by using the overhead AC and DC transmission line design module in CDEGS. The calculation results show that: when AC and DC lines operate separately, the electric field distribution is centrosymmetric, while the distribution of AC and DC mixed electric fields has no obvious regularity. Properly increasing the height of pole wire can effectively reduce the intensity of mixed electric field, the audible noise produced by mixed line has exceeded the specified limit value standard, and the audible noise generated by changing the distance between poles and conductors will produce audible noise on hybrid lines and radio interference has little effect. The conclusion can provide reference for the erection of AC and DC lines in the same corridor.

Key words: AC/DC hybrid; mixed electric field; radio interference; audible noise; CDEGS