

±800 kV特高压直流输电线路的电磁环境研究

王小凤, 周 浩

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

Electromagnetic Environmental Effect of ±800 kV UHVDC Transmission Lines

WANG Xiao-feng, ZHOU Hao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

摘要: 采用CDEGS软件包对±800 kV特高压直流输电线路的电磁环境进行了仿真研究。分析了极导线水平排列的±800 kV特高压直流输电线路的标称电场、合成电场、无线电干扰(RI)和可听噪声(AN)的总体水平。讨论了线路参数,包括极导线对地高度、极间距、子导线截面积等对特高压直流输电线路的电磁环境参数的影响。对海拔高度变化和单极运行方式等的影响也进行了分析。

关键词: 特高压直流; 电磁环境; 合成电场; 无线电干扰; 可听噪声

中图分类号: TM151; TM726.1 文献标识码: A

Abstract: The electromagnetic environmental effect of ±800 kV UHVDC transmission lines is numerically investigated in this paper. The CDEGS software package is employed for the numerical simulation. Pole conductor horizontal arranged ±800 kV UHVDC transmission lines models are studied. The distributions of nominal electric field, total electric field, radio interference and audible noise are calculated. The influence of the height of phase conductors, wire spacing, the sectional area of the subconductors on the above parameters are analyzed. The effect of height above sea level and single pole operation mode are also investigated.

Key words: UHVDC; electromagnetic environment; total electric field; radio interference(RI); audible noise(AN)

0 引言

环境影响问题是特高压输电工程设计、建设和运行中必须考虑的重大技术问题。特高压直流输电工程的环境影响主要包括电场效应、无线电干扰和可听噪声等^[1-4]几个方面。我国将要建设的向家坝-上海、溪洛渡左-湖南、溪洛渡右-浙江±800 kV特高压直流输电工程,其输电电压和单回输电容量均将创世界之最。特高压直流线路本身的技术特性决定

了其电晕效应、电磁环境影响与超高压直流线路有较大的差异。研究这些技术特性,对于合理确定线路的设计参数、保证线路安全可靠运行和降低特高压工程建设运行成本、满足环境保护要求等均具有十分重要的现实意义。

采用CDEGS软件包中的SES-enviro模块对±800 kV直流输电线路的环境影响进行了仿真研究,并分析比较了导线对地高度、极间距、子导线截面积等对合成场强、无线电干扰和可听噪声的影响。对海拔高度和双极直流输电线路单极运行等情况也进行了讨论。

1 双极直流输电线路的仿真模型及结果

考虑极导线水平布置的双极±800 kV直流输电线路模型,参见图1,导线对地高度为18 m;极间距为19 m;导线型号为6×LGJ-720/50;避雷线型号为JLB1A-80;避雷线距极导线水平距离2 m;垂直距离为15 m;分裂间距为0.45 m。假定土壤电阻率为100 Ω·m;地面海拔高度为0 m;大气压为760 mm汞柱;气温为20℃。图中正负号为极导线的极性。

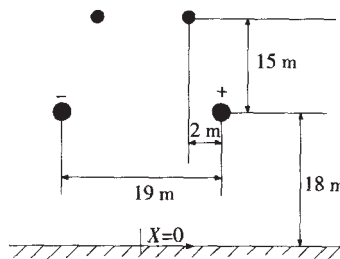


图1 双极直流输电线路的导线布置模型

由公式(1)即Peek公式,得到线路的起晕场强为17.61 kV·cm⁻¹。

$$E_c = 30m(1 + 0.3/\sqrt{r}) \quad (1)$$

式中:m为导线表面粗糙系数,光滑导线m=1,在此

收稿日期: 2006-09-25

作者简介: 王小凤(1982-),女,硕士研究生,主要从事高电压技术方面的研究。

取 0.48; 为空气相对密度:

$$= \frac{\rho}{T} \frac{T_s}{P_s}$$

式中: $P_s=101.3$ kPa; $T_s=293$ K; r 为子导线半径, cm。

在额定电压下, 计算了地面及距离地面 1.5 m 高度处各电磁环境指标参数的横向分布, 其中无线电干扰和可听噪声均采用软件中集成的 IREQ (魁北克水电研究院) 经验方法计算, 无线电干扰的参考

频率为 0.5 MHz。

图 2(a), (b), (c), (d) 分别给出了双极运行方式下地面及距地面 1.5 m 高度处的标称电场及合成电场、磁场、晴天和雨天时无线电干扰和可听噪声的横向分布。表 1 为 ± 800 kV 的直流输电线路下电磁环境指标参数的最大值。

从图 2(a) 和表 1 可见, 地面的合成电场强度最大值比地面以上 1.5 m 高处高出 $1.45 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。而标

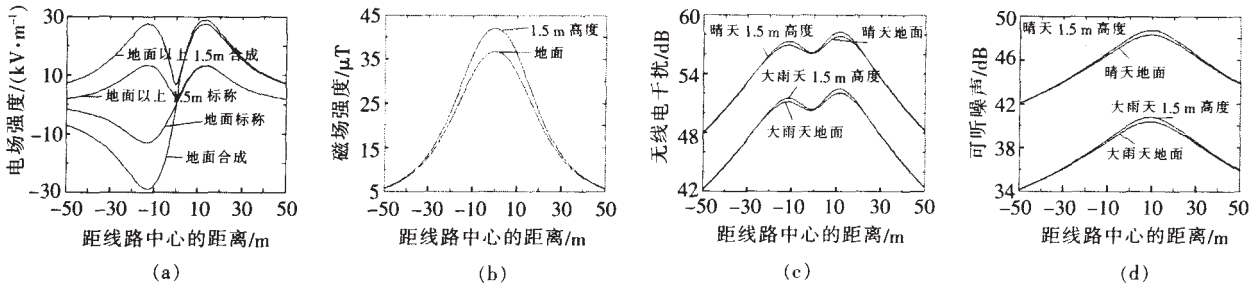


图 2 ± 800 kV 直流输电线路下电磁环境指标参数分布

表 1 ± 800 kV 直流输电线路下电磁环境指标参数的最大值

电磁环境		指标参数最大值	
电场强度最大值/($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)	标称电场	地面	13.13
		地面以上 1.5 m	13.29
	合成电场	地面	28.85
		地面以上 1.5 m	27.40
磁感应强度最大值/ μT	地面	36.69	
	地面以上 1.5 m	41.93	
RI 最大值/dB	晴天	地面	57.80
		地面以上 1.5 m	58.25
	大雨天	地面	52.01
		地面以上 1.5 m	52.45
AN 最大值/dB	晴天	地面	48.32
		地面以上 1.5 m	48.73
	大雨天	地面	40.39
		地面以上 1.5 m	40.79

称场强在地面和地面以上 1.5 m 高处相差不多。因此对于直流线路的电场效应, 宜考虑地面的合成场强。直流线路由于离子流的存在, 使得同一条线路下方的合成电场强度随着距地面高度的增加而减小, 在地面的合成场强高于地面以上的合成场强。

对于磁场强度, 目前没有国家专门制定标准对直流线路磁场予以限制。国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP) 建议 1 Hz 以下磁场的公众暴露限值取 $40 \text{ mT}^{[5]}$ 。 ± 800 kV 特高压直流输电线路下方距地面 1.5 m 高处的磁感应强度的最大值为 $41.93 \mu\text{T}$, 远远小于 ICNIRP 建议的公众暴露限值。

对于直流输电线路的无线电干扰和可听噪声, 距地面 1.5 m 高处比地面略大, 但相差不多, 只有约 0.4 dB。无线电干扰和可听噪声在大雨天时比晴天时低。雨天时导线的起晕场强比晴天时低, 导线周围的离子比晴天时的多; 下雨初期, 导线表面离子浓度不大时, 电晕放电比晴天时的稍强, 下雨延续一段时间之后, 导线起晕场强进一步降低, 导线表面离子增

加, 使得导线不规则的面都被较浓的电荷包围, 减小了电晕放电强度, 使无线电干扰和可听噪声较晴天反而有所减小。 ± 800 kV 的直流输电线路, 在距离线路中心 50 m 远的地方无线电干扰衰减了约 10 dB, 可听噪声衰减了约 6 dB。可听噪声以正极导线为中心横向对称分布。在评价无线电干扰和可听噪声时, 只需计算晴天时地面上的值就可以了。

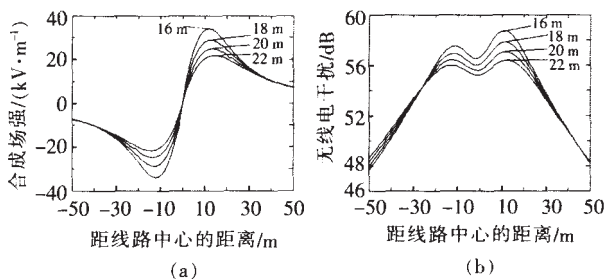
从以上分析可知, ± 800 kV 特高压直流输电线路的电磁环境影响的主要指标参数是地面合成电场、晴天时的无线电干扰和可听噪声。因此在分析线路参数的影响时, 主要考虑了线路参数变化对上述指标参数的影响。

2 线路参数不同时仿真结果的比较

2.1 极导线对地高度对电磁环境的影响

图 3(a), (b), (c) 分别给出了双极运行方式下极导线高度分别为 16, 18, 20, 22 m 时的地面合成电场、晴天时无线电干扰和可听噪声的横向分布。表 2 给出了不同导线对地高度对应的地面上的合成电场、无线电干扰和可听噪声的最大值。

由图 3(a) 可见, 在距线路中心 30 m 以内地面合成电场随极导线对地高度的增加而减小, 到 30 m 以外几乎就没有影响了。导线从 16~22 m 每增加 2 m,



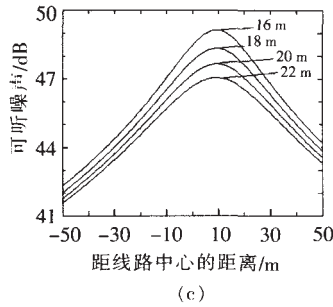


图 3 极导线对地高度对电磁环境参数分布的影响

表 2 极导线对地高度对电磁环境参数最大值的影响

极导线对地高度/m	合成电场最大值/(kV·m ⁻¹)	RI 最大值/dB	AN 最大值/dB
16	33.97	57.52	49.13
18	28.85	56.91	48.32
20	24.89	56.41	47.63
22	21.76	55.99	47.04

对应的合成电场最大值分别减小了 5.12 (15.07%), 3.96(13.73%) 和 3.13 kV·m⁻¹ (12.58%)。

由图 3 (b) 可见, 提高导线对地高度在距线路中心约 25 m 的范围内无线电干扰值有所减小, 在 25 m 之外反而增加, 但是影响并不大。无线电干扰在距线路中心 50 m 时衰减到了约 48 dB。从 16~22 m, 极导线抬高 2 m, 无线电干扰的最大值减小只有 0.61(1.06%), 0.50(0.88%) 和 0.42 dB(0.74%)。

由图 3 (c) 可见, 抬高极导线可以减小线路下方的整个区域内的可听噪声。从 16~22 m, 导线每抬高 2 m, 可听噪声的最大值分别减小 0.81(1.65%), 0.69(1.43%), 0.59 dB(1.24%)。

2.2 极间距变化对电磁环境的影响

图 4 (a), (b), (c) 分别给出了双极运行方式下极间距分别为 17, 18, 19, 20 m 时的地面合成电场、晴天时无线电干扰和可听噪声的横向分布。表 3 给出了对应的各环境指标参数的最大值。

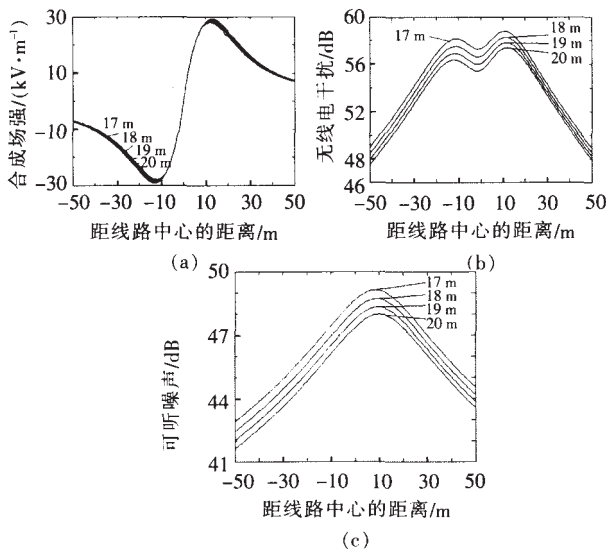


图 4 极间距对地面电磁环境参数分布的影响

表 3 极间距对地面电磁环境参数最大值的影响

极导线间距/m	合成电场最大值/(kV·m ⁻¹)	RI 最大值/dB	AN 最大值/dB
17	27.97	58.77	49.12
18	28.42	58.27	48.70
19	28.85	57.80	48.32
20	29.26	57.39	47.98

由图 4 可见, 随着极间距的增加地面合成电场稍有增加, 从 17~20 m, 极间距增加 1 m, 合成电场分别增加 0.45 (1.61%), 0.43 (1.51%), 0.41 kV·m⁻¹ (1.42%)。无线电干扰和可听噪声随极间距的增加而减小, 因为增加极间距可以减小导线的表面场强。从 17~20 m 极间距每增加 1 m, 无线电干扰值减小 0.5 (0.85%), 0.47(0.81%), 0.41 dB(0.71%), 可听噪声减小 0.42(0.86%), 0.38(0.78%), 0.34 dB(0.70%)。

因此在确定极间距时, 要考虑其对各项电磁环境指标的综合影响。

2.3 子导线截面变化对电磁环境的影响

图 5 (a), (b), (c) 分别给出了双极运行方式下子导线截面积为 630, 720, 800 mm² 时的地面合成电场、晴天时无线电干扰和可听噪声的横向分布。

由图 5 可知, 随着子导线截面增加, 地面合成电场、无线电干扰和可听噪声均减小, 原因是增加导线截面可以增大导线的起晕场强。从表 4 可以看出, 导线截面积为 630, 720, 800 mm² 时, 地面合成电场最大值分别减小 1.46(4.82%), 1.13kV·m⁻¹(3.92%),

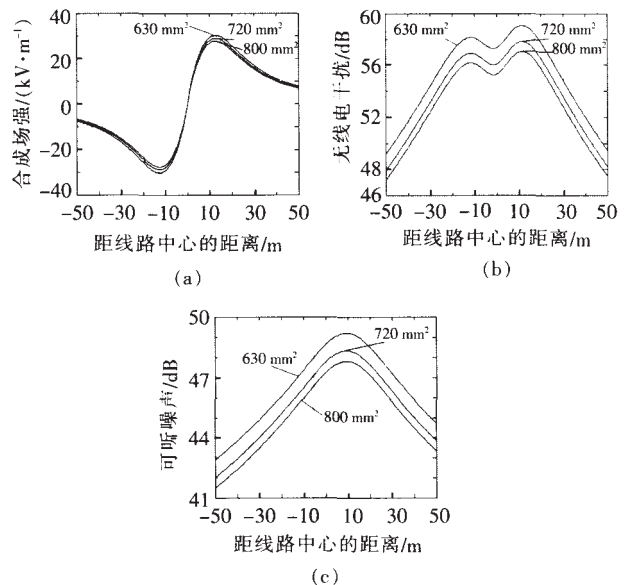


图 5 子导线截面积对地面电磁环境参数分布的影响

表 4 子导线截面积对地面电磁环境参数最大值的影响

子导线截面积/mm ²	合成电场最大值/(kV·m ⁻¹)	RI 最大值/dB	AN 最大值/dB
630	30.31	59.06	49.20
720	28.85	57.80	48.32
800	27.72	57.03	47.80

无线电干扰分别减小 1.26(2.13%), 0.77 dB(1.33%), 可听噪声分别减小 0.88 (1.79%), 0.52 dB (1.08%)。因此, 增加导线的截面积可以有效地改善电磁环境, 但是建设线路时要根据经济性合理原则选择导线。

3 海拔高度对电磁环境的影响

图 6(a), (b), (c) 给出了地面海拔高度为 0 和 1000 m 时对应的地面合成电场, 无线电干扰和可听噪声横向分布。由 Peek 公式计算得, 海拔 1000 m 时起晕场强 $16.09 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。表 5 为对应的地面电磁环境参数最大值。

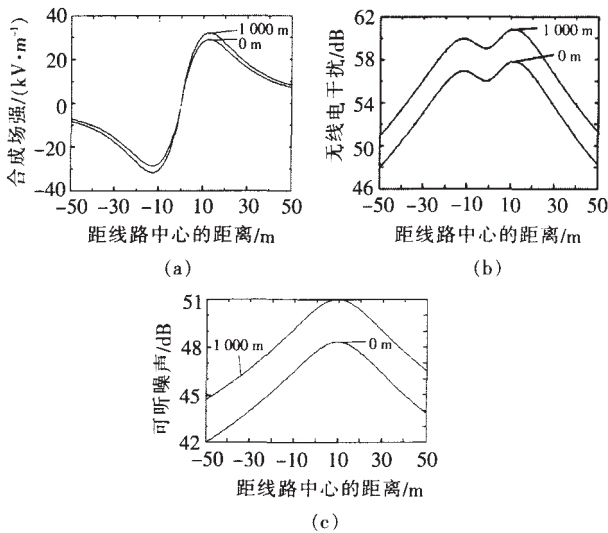


图 6 海拔高度对电磁环境参数分布的影响

表 5 双极和单极运行对应的地面电磁环境参数最大值

海拔高度/m	合成电场最大值/($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$)	RI 最大值/dB	AN 最大值/dB
0	28.85	57.80	48.32
1000	31.91	60.80	51.00

由以上图表可以看出, 由于随着海拔高度增加导线的起晕场强减小, 电磁环境也变差。海拔 1000 m 比海拔 0 m 时线路下方的地面合成电场、无线电干扰和可听噪声的最大值分别增加了 $3.06 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ (10.61%), 3 dB(5.19%) 和 2.68 dB(5.55%)。

4 单极运行方式下的电磁环境

图 7(a), (b), (c) 分别给出了单、双极运行情况下的地面合成电场、晴天时无线电干扰和可听噪声的横向分布的结果比较。表 6 为电磁环境参数最大值。

双极直流输电线路单极运行条件下, 地面合成电场是以运行的极导线对地投影为中心对称分布的, 此时双极线路中心的地面合成电场值大于双极运行时的值。

由图 7 可见, 直流线路单极运行时的地面合成电场是以运行的极导线为中心对称分布的。最大值比双极运行时小 $1.09 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ (3.78%)。单极运行时的无线电干扰和可听噪声比双极运行时小。正极运行时无线

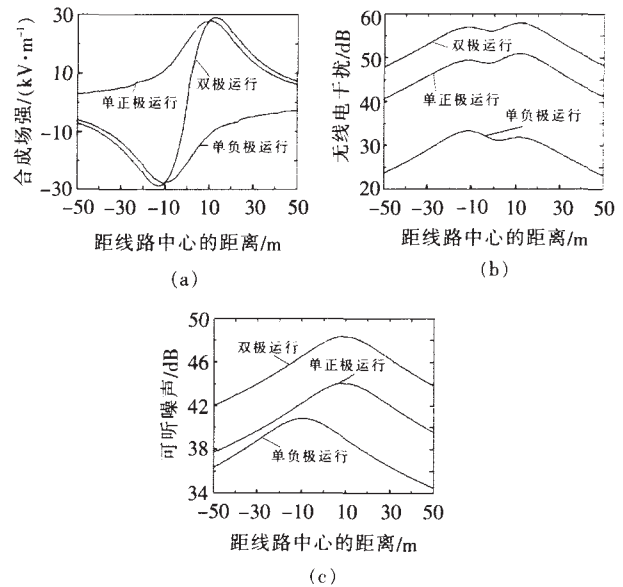


图 7 双极和单极运行时的电磁环境参数分布

表 6 双极和单极运行时的电磁环境参数最大值

运行方式	合成电场最大值/($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$)	RI 最大值/dB	AN 最大值/dB
双极	28.85	57.80	48.32
单正极	27.76	50.92	44.06
单负极	-27.76	31.83	40.80

电干扰和可听噪声比双极运行时分别小 6.88 (11.90%), 4.26 dB(8.82%), 负极运行时比双极运行时分别小 25.97(44.93%), 7.52 dB(15.56%)。因此, 单极运行时对地面的电磁环境的影响较双极运行时小。

5 结论

(1) 直流线路由于离子流现象的存在, 线路下方的合成电场强度随距地面高度的增加而减小。 $\pm 800 \text{ kV}$ 直流线路下地面合成电场强度为 $28.85 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, 接近限值。(人们感受到的是合成电场。国内外电场感受试验表明, 电场强度为 $30 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 时, 人会感到电场的存在^[6]。文[7]中规定, $\pm 500 \text{ kV}$ 直流输电线路下地面的合成场强限值取为 $30 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 。 $\pm 800 \text{ kV}$ 直流线路下地面合成电场的限值应不高于 $30 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

(2) $\pm 800 \text{ kV}$ 线路磁场强度在 $45 \mu\text{T}$ 以下, 远低于国际标准的公众暴露限值 40 mT 。

(3) 雨天时无线电干扰和可听噪声比晴天时小。 $\pm 800 \text{ kV}$ 直流线路晴天时地面无线电干扰和可听噪声最大值分别为 57.80 dB 和 48.32 dB, 雨天时比晴天时分别低约 5 dB 和 8 dB。无线电干扰和可听噪声主要来自正极导线的电晕。

(4) 抬高极导线可以有效地改善特高压直流线路下方地面合成电场、无线电干扰和可听噪声。

(5) 增大极间距会导致地面合成电场的增大, 但无线电干扰和可听噪声减小。在确定极间距时, 需综合考虑其对各电磁环境参数的影响。

(6) 增加子导线的截面积可以 (下转第 121 页)

对于 35 kV 有避雷线的输电线路, 当雷电流大于绕击临界雷电流幅值 5.5 kA 时, 不会发生绕击事故。而在小于 5.5 kA 雷电流作用下, 避雷器的放电电流和比能量不会很高。如, 当雷击 0, 1 号塔档距中央时 (在 0 号塔上装有一组避雷器), 0 号塔上 B 相避雷器的放电电流为 25.7 kA, 比能量也不过 0.029 kV/kJ, 较雷击杆塔时要小的多。因此, 绕击时避雷器能够耐受雷电作用时的放电电流和吸收的雷电放电能量^[15]。

3 结论

(1) 对于 35 kV 无避雷线输电线路: 雷击杆塔时, 金属氧化物避雷器放电电流幅值和吸收的雷电放电能量, 随雷电流的幅值增加而增大。在大雷电流下, 随着冲击接地电阻的增大, 避雷器放电电流和吸收能量均增大; 在小电流作用下, 由于避雷器动作的初始条件的变化, 随着冲击接地电阻的增大, 有先减小后增大的变化趋势。放电电流幅值最大可达 61.3 kA, 比能量最大可达 9.74 kJ/kV。

雷击线路时, 金属氧化物避雷器放电电流幅值和吸收的雷电放电能量, 随着冲击接地电阻的增大而减小, 但随着雷电流幅值的增加而增大。放电电流幅值最大可达 44 kA, 比能量最大可达 2.5 kJ/kV, 较雷击杆塔时要小。

(2) 对于 35 kV 有避雷线输电线路, 雷击杆塔时, 由于避雷线的作用, 金属氧化物避雷器放电电流幅值和比能量均随雷电流的幅值和冲击接地电阻的增加而增大。放电电流幅值最大可达 50 kA, 比能量最大可达 4.34 kJ/kV。绕击时的雷电流较小, 避雷器的放电电流和比能量不会很高。

(3) 比较有、无避雷线线路, 由于避雷线的分流作用, 同一条件下避雷器放电电流和比能量, 前者的

(上接第 112 页)

十分有效地改善电磁环境, 但线路建设须遵循经济性合理原则。

(7) 海拔高度的增加对电磁环境有负面影响。高海拔地区宜考虑采取增加极导线对地高度或子导线截面积等措施以控制 UHVDC 线路的电磁环境影响。

(8) 直流线路单极运行时的电磁环境影响比双极运行时小, 无需特别考虑。

致谢

在写作过程中, 得到了上海交通大学傅正财教授的指导与帮助, 在此深表感谢。

参考文献:

[1] 常卫中, 李施雄. 交直流高压输电线路并行传输时的无线电

比后者的要低。

参考文献:

[1] 输电线路雷击跳闸率计算方法和 500 kV 超高压线路防雷设计中的几个问题[R]. 湖北: 武汉高压研究所, 1982.

[2] 胡大明, 弥 濮. 线路避雷器应用情况分析和新型避雷器的设想[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 59-61, 64.

[3] Furukawa S. Development and Application of Lightning Arresters for Transmission Lines [J]. IEEE Trans. on PWRD, 1989(4): 2 121-2 129.

[4] Ishida K. Development of a 500 kV Transmission Line Arrester and Its Characteristics [J]. IEEE Trans. on PWRD, 1992, 7(3): 1 265-1 274.

[5] Ohki Y, Yasufuku S. Lightning Arresters Developed for 500 kV Transmission Lines [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1994, 10(4): 61-62.

[6] HE Jin-liang, CHEN Shui-ming, ZENG Rong, et al. Development of Polymeric Surge ZnO Arresters for 500 kV Compact Transmission Line [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2006, 21(1): 113-120.

[7] 吴桂芳, 陈巧永, 蓝 磊, 等. 110 kV 线路避雷器在输电线路防雷中的应用研究[J]. 电瓷避雷器, 2002(2): 40-43.

[8] 王双文, 田建华, 荆建峰. 金属氧化物避雷器在输电线路防雷中的应用[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 36-38, 40.

[9] 何金良, 吴维韩. 氧化锌线路限压器雷电放电电流计算[J]. 高电压技术, 1993, 19(1): 18-22.

[10] 陈水明, 何金良, 吴维韩, 等. 采用氧化锌避雷器提高 220 kV 线路耐雷水平的研究[J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 77-82.

[11] 陈水明, 何金良, 吴维韩, 等. 110 kV 输电线路采用氧化锌避雷器提高耐雷水平的研究[J]. 中国电力, 1998, 31(11): 12-15.

[12] 朱维政. 110 kV 六店变电所主变遭受雷击事故的分析[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 156-157.

[13] 马晋华. 线路避雷器与绝缘子串间的绝缘配合 [J]. 电瓷避雷器, 2000(5): 33-35.

[14] L/T 620 1997. 交流电气装置过电压特性及绝缘配合[S]. 1997.

[15] 何金良, 姜 舟. 避雷器耐受输电线路雷电流绕击的能力分析[J]. 电瓷避雷器, 2001(6): 22-25.

干扰特性[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 12-15, 20.

[2] 邵方殷. 交流线路对平行接近的直流线路的工频电磁感应[J]. 电网技术, 1998, 22(12): 61-65, 70.

[3] Yuji, Yoshitaka Sunaga. Study on Reduction in Electric Field, Charged Voltage, ion Current and Ion density under HVDC Transmission Lines by Parallel Shield Wires [J]. IEEE Trans. on Power Delivery. 1989, 4(2): 1 351-1 359.

[4] 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, 29(11): 8-11.

[5] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M](2005年). 北京: 中国电力出版社, 2006.

[6] 傅宾兰. 葛-上 ±500 kV 直流输电线路的环境影响 [J]. 中国电力, 1995(1): 7-11, 45.

[7] DL 436-2005. 高压直流架空送电线路技术导则[S]. 2006.