

文章编号: 1001-1609(2006)06-0407-03

特高压直流线路的场分布影响因素分析

黎小林¹, 张波², 王琦¹, 何金良²

(1. 南方电网技术研究中心, 广东 广州 510623; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

Influence Factor Analysis of the Field Distribution around the Ultra-HVDC Line

LI Xiao-lin¹, ZHANG Bo², WANG Qi¹, HE Jin-liang²

(1. Technology Research Center, China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 线路附近地面的场分布是输电线路电磁环境中的一个重要指标。首先验证了半经验公式法的有效性。然后使用该方法分析了极导线水平排列的±800 kV 直流线路合成场强、标称场强和离子流密度的影响因素和变化规律。研究表明地面, 标称电场强度受线路对地高度的影响很大, 而合成电场强度和离子流密度除受导线对地高度的影响较大外, 受导线直径和分裂数的影响也很大。

关键词: 直流线路; 极导线; 合成场强; 标称场强

中图分类号: TM721.1

文献标识码: A

Abstract: The field distribution on the ground near the transmission line is an important index to evaluate the electromagnetic environment. In this paper, the validity of the semi-experiential formulas to calculate the total electric field and the ion current density is testified. The influencing factors of the field distribution under the ultra-HVDC line are analyzed. It can be seen that the variation rules of the total electric field and the ion current density are quite different from that of the nominal electric field. The nominal electric field is greatly influenced by the height of conductors. However, the total electric field and the ion current density only greatly are not influenced by the height of conductors, but influenced by the diameter and the number of the sub-conductors.

Key words: DC line; polar conductor; total electric field; nominal electric field

0 引言

输电线路电磁环境是线路设计中必须要考虑的问题, 在特高压直流输电线路中, 这一问题变得更加严重。线路附近地面的场分布是输电线路电磁环境中的一个重要指标^[1-3]。当直流输电线路导线表面电

场强度大于起始电晕电场强度时, 靠近导线表面的空气发生电离, 产生空间电荷。这些空间电荷将造成直流输电线路所特有的一些效应。直流输电线路下的空间电场由两部分合成: 一部分是由导线所带电荷产生的静电场, 又称为标称电场; 另一部分是空间电荷产生的电场。这两部分电场的向量迭加, 称为合成电场。合成场强的大小主要取决于导线电晕放电的严重程度, 最大合成电场有可能比标称电场大很多, 可达它的3~3.5倍。同时, 空间电荷在电场作用下的运动, 形成离子电流。虽然直流场强对生态的长期影响尚未得出结论, 但人在高直流场强下活动, 可能产生不舒服的感受。目前, 我国直流线路无电晕时的最大电场强度(标称场强)限值暂取为15 kV/m, 地面最大合成场强限值暂取为30 kV/m, 邻近民房的地面标称场强限值暂取为25 kV/m, 离子电流密度限值暂取为100 nA/m²^[3]。因此, 在设计直流输电线路时, 必须考虑直流场效应。分析了极导线水平排列的±800 kV 直流线路合成场强、标称场强和离子流密度的分布及影响因素, 研究结果可供工程设计参考。

1 计算方法

1.1 标称电场的计算方法

标称电场为不考虑空间电荷时的电场, 因此计算方法比较成熟, 主要有模拟电荷法、矩量法、逐步镜像法等等。考虑到地面离导线较远, 使用下面的计算公式^[4]:

$$E = \frac{2Uh}{\ln\left(\frac{2h}{R_{eq}}\right) - \frac{1}{2}\ln\left(\frac{4h^2+S^2}{S^2}\right)} \cdot \left[\frac{1}{h^2+(x-S/2)^2} - \frac{1}{h^2+(x+S/2)^2} \right], \text{ kV/m} \quad (1)$$

式中: U 为每极对地电压, kV; h 为导线平均高度,

收稿日期: 2006-06-27

作者简介: 黎小林(1963-), 男, 高级工程师, 硕士, 从事直流输电技术研究及管理工作。

m ; S 为极间距离, m ; R_{eq} 为分裂导线的等效半径 ($R_{eq}=R\sqrt{N}/R$), m ; N 为分裂导线的根数; R 为子导线所在圆的半径, m ; r 为子导线半径, m .

1.2 合成电场和离子电流的计算方法

由于线下整个空间存在因电晕产生的大量空间电荷, 实际电场为包括由空间电荷产生电场的合成电场。同时, 空间电荷在电场作用下的运动, 形成离子电流。合成电场和离子电流的计算相当复杂, 目前大致有 3 种计算方法: 解析法、半经验公式法和有限元法^[5-7]。其中, 解析方法假设较多, 对初值的选取要求较高; 有限元方法需大量的前后处理工作, 比较难以掌握; 半经验公式法是美国 EPRI 在直流输电线路模型上进行了大量模拟试验的基础上, 找出了地面合成电场和离子电流密度与线路基本参数间的关系而提出的, 计算较为简便。

EPRI 认为直流输电线路下的电场有两种极限情况。一种是没有电晕时, 仅由导线上电荷决定的静电场或称标称电场。一种是饱和电晕时仅由空间电荷决定的电场。计算实际线路下的空间电场和离子流密度分布时, 首先计算出上述两种极限情况的电场分布和离子电流密度分布, 在此基础上再依照实验得到的曲线插值计算出未饱和电晕放电时的合成电场和离子电流密度的分布^[6]。使用该方法通过分析葛上 ±500 kV 直流试验线路的地面合成场强和离子流密度并与中国电力科学研究院测量结果比较^[8], 见图 1。可以看到, 该方法计算直流线路地面合成场强和离子流密度是比较有效的。在下面的分析中选择该方法计算。

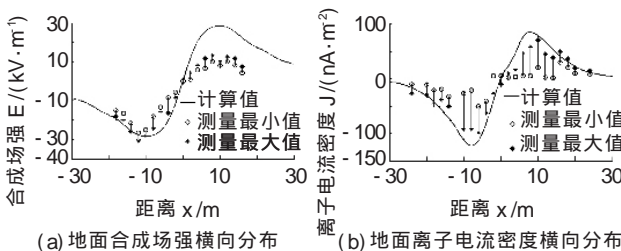


图 1 葛上 ±500 kV 直流试验线路的场分布

2 影响场效应的因素分析

下面分析地表最大标称电场强度、最大合成电场强度、最大离子流密度随各种参数的变化规律, 如表 1~表 5 所示, 以便为设计最佳的 ±800 kV 直流线路方案提供参考。计算中极间距离均为 22 m, 导线平均高度均为 22 m。

由表 1 和表 2 可以看到, 分裂导线直径越大, 分裂数越多, 地面标称电场强度越大, 而合成电场强度和离子流密度越小。这是因为在目前的分裂间距下, 子导线直径越大, 分裂导线越多, 每极的等效半径越大, 导线等效对地距离越小, 因此在电压相同的情况

表 1 地面电场效应随分裂导线直径的变化

类型	分裂间距/cm	最大标称电场强度/(kV·cm ⁻¹)	最大合成电场强度/(kV·cm ⁻¹)	最大离子流密度/(nA·m ⁻²)
A	50	9.09	25.4	-57.8
B	50	9.12	24.5	-54.1
C	50	9.15	23.6	-50.2
D	50	9.20	22.0	-43.3
E	50	9.21	21.5	-41.6

注: A—4 ㄨGJ-720/50 B—4 ㄨGJ-800/55 C—4 ㄨGJ-900/70 D—4 ㄨGJ-1092/89 E—4 ㄨGJ-1171/64

表 2 地面电场效应随分裂导线数的变化

类型	分裂间距/cm	最大标称电场强度/(kV·cm ⁻¹)	最大合成电场强度/(kV·cm ⁻¹)	最大离子流密度/(nA·m ⁻²)
A	50	9.09	25.4	-57.8
B	50	9.68	22.4	-44.3
C	50	10.2	18.9	-31.8
D	50	10.7	14.9	-21.4

注: A—4 ㄨGJ-720/50 B—5 ㄨGJ-720/50 C—6 ㄨGJ-720/50 D—7 ㄨGJ-720/50

表 3 地面电场效应随分裂导线间距的变化

类型	分裂间距/cm	最大标称电场强度/(kV·cm ⁻¹)	最大合成电场强度/(kV·cm ⁻¹)	最大离子流密度/(nA·m ⁻²)
A	50	9.68	22.4	-44.3
A	45	9.49	22.2	-43.7
A	40	9.29	22.0	-43.2
A	35	9.06	21.8	-42.9
A	30	8.82	21.9	-43.0

注: A—5 ㄨGJ-720/50

表 4 地面电场效应随极间距的变化

类型	分裂间距/cm	最大标称电场强度/(kV·cm ⁻¹)	最大合成电场强度/(kV·cm ⁻¹)	最大离子流密度/(nA·m ⁻²)
A	24	9.93	22.5	-44.0
A	22	9.49	22.2	-43.7
A	20	9.02	21.8	-42.9
A	18	8.49	21.4	-41.7

注: A—5 ㄨGJ-720/50, 分裂间距 45 cm, 对地高度 22 m

表 5 地面电场效应随导线平均对地高度的变化

类型	分裂间距/cm	最大标称电场强度/(kV·cm ⁻¹)	最大合成电场强度/(kV·cm ⁻¹)	最大离子流密度/(nA·m ⁻²)
A	24	8.13	19.4	-31.3
A	22	9.49	22.2	-43.7
A	20	11.2	25.6	-62.4
A	18	13.4	30.0	-91.8

注: A—5 ㄨGJ-720/50, 分裂间距 45 cm, 极间距 22 m

下, 地表的标称电场随每极等效半径的增大而增大; 而在电压相同的情况下, 导线表面的电位梯度随每极等效半径的增大而减小, 导线表面电晕越不明显, 产生的离子流也相应减少, 同时这些离子产生的场强也减小, 从而造成子导线直径越大、分裂导线越多, 地面的合成电场越小。

由表3可以看到,地面标称电场强度随分裂间距的减小而减小,而合成电场强度和离子流密度随分裂间距的减小先减小后增加,有一个最小值,但变化不大。

由表4和表5可以看到,导线对地高度越高、极间距越小,地面标称电场强度、合成电场强度和离子流密度越小。

由此可见,地面标称电场强度受线路对地高度的影响很大,而合成电场强度和离子流密度除受导线对地高度的影响较大外,受导线直径和分裂数影响也很大。由于地面标称电场强度和合成电场强度的变化规律不同,而实际场强为合成电场强度,因此,直流输电线路设计时应当以合成电场强度的限值作为电场效应的设计指标,而将标称电场的限值作为参考。从表1~表5可以看到,对于±800 kV直流线路,上述导线结构方案的地面场效应均可满足相应的限值。由于导线对地高度为18 m时,所有参数刚好满足相应的限值,因此在这种情况下,导线最小对地高度应取18 m。

3 结论

(1) 半经验公式法可以有效地分析极导线水平排列时直流线路的合成场强和离子流密度。

(2) 分裂导线直径越大、分裂数越多,地面标称电场强度越大,而合成电场强度和离子流密度越小。

(3) 地面标称电场强度随分裂间距的减小而减

小,而合成电场强度和离子流密度随分裂间距的减小先减小后增加,有一个最小值,但变化不大。

(4) 导线对地高度越高、极间距越小,地面标称电场强度、合成电场强度和离子流密度越小。

(5) 地面标称电场强度受线路对地高度的影响很大,而合成电场强度和离子流密度除受导线对地高度的影响较大外,受导线直径和分裂数影响也很大。

(6) 由于实际场强为合成电场强度,直流输电线路设计时应当以合成电场强度的限值作为电场效应的设计指标,而将标称电场的限值作为参考。

参考文献:

- [1] 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): 5-8.
- [2] 侯远航, 邬雄, 万保权, 等. ±500 kV 直流线路极导线垂直排列的合成场强[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 37-38.
- [3] DL 436-1991. 高压直流架空送电线路技术导则[S].
- [4] EPRI Report TR-102764. HVDC Transmission Line Reference Book[R]. EPRI, 1993.
- [5] Sarma P, Janischewskyj W. Analysis of Corona Losses on DC Transmission Lines, Part II-Bipolar Lines [J]. IEEE Trans. PAS, 1969, 88(10): 1476-1491.
- [6] EPRI Report EL-2257. Conductor Development [R], EPRI, 1982.
- [7] Janischewskyj W, Gela G. Finite Element Solution for Electric Fields of Coronating DC Transmission Lines[J]. IEEE Trans. PAS, 1979, 98(3): 1000-1012.
- [8] 傅宾兰. 高压直流输电线路地面合成场强和离子流密度的计算[J]. 中国电机工程学报, 1987, 29(5): 5-8.

(上接第403页)

Transient Electromagnetic Phenomena in the Secondary Circuits of Voltage and Current Transformers in GIS (Measurements and Calculations)[J]. IEEE Trans on PD., 1992, 7(1): 434-441.

- [7] Dommel H W. Simulating Traveling Waves Inside and

Outside GIS Enclosures with EMTP [R]. Canadian Electrical Association, 1994.

- [8] Povh D. Modeling and Analysis Guidelines for Very Fast Transients[J]. IEEE Trans on PD., 1996, 4(11): 2028-2035.

(上接第406页)

步断路器控制器在满足控制要求的基础上,运行稳定,调试方便;软件算法合理,精度高,运算速度快,满足断路器同步投切的实时性的要求。

参考文献:

- [1] 邹积岩, 丛吉远, 董恩源. 电子操动的概念与实践 [J]. 高压电器, 2000, 36(5): 29-31.
- [2] CIGRE Working Group Task Force. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers-guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers(Part I)[J]. Electra, 1999, 183(4): 43-57.
- [3] 段雄英, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空开关同步关合电容器组控制策略及其实现 [J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(4): 58-60.
- [4] 丁富华, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控断路器投切空载变压器的

应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 25(3): 89-93.

- [5] 钱家骥, 袁大陆, 徐国政. 对1000 kV 电网操作过电压及相位控制高压断路器的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 1-4.
- [6] 钱家骥. 相位控制高压断路器的动向[J]. 高压电器, 2001, 37(1): 38-40.
- [7] 林 莘, 徐建源, 高会军. 永磁操动机构动态特性计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 85-88.
- [8] ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, DONG En-yuan. Permanent Magnetic Actuator and Electronic Drive for Vacuum Switches [C]// Proceeding of 5th International Conference on Electrical Machines and Systems, Shenyang, 2001: 1323-1326.
- [9] 马少华, 王季梅. 72.5 kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究与设计[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
- [10] 王其平. 电器电弧理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [11] 王季梅. 真空电弧理论研究及其测试 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993.