

±800 kV 云广特高压直流线路合成电场仿真 计算与测试分析

邓 军^{1,2}, 肖 遥², 楚金伟², 郝艳捧¹, 李立涅¹, 赵宇明³, 张建功⁴

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663;

3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080; 4. 国网电力科学研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为研究实际运行特高压直流输电线路复杂环境的合成电场特性及环境影响, 开展±800 kV 云广直流线路合成电场测量与分析。建立了特高压直流输电线路合成电场计算模型及算法流程, 阐述了特高压直流输电线路合成电场的测量仪器、环境、位置、数据记录和处理方法。不同运行方式下的测试结果表明: 正极半压和负极全压下测量值与理论值的误差小于负极全压运行下的误差, 但大于双极全压运行下测量值与理论值的误差; 因测试点的海拔高度、导线对地高度、温/湿度、风速、风向等因素影响, 负极半压、正极半压和负极全压、负极全压运行的合成电场值上下浮动于不同月份的双极全压测量值; 不同测试点的合成电场的80%值和95%值对应的测量位置基本相同, 同时所有测量结果满足合成电场环境限值且有足够的裕度。云广直流工程的电磁环境设计合理性得到了验证。

关键词: 特高压输电; 直流输电; 输电线路; 电场; 合成电场; 电磁环境; 高海拔地区; 电晕效应; 实测
中图分类号: TM 721.1; TM 723 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.023

0 引言

为提高长距离大容量输电的经济性, 我国采用特高压直流技术。随着特高压工程的建设和民众电磁环境意识的增强, 电磁环境成为影响输电线路结构和建设费用的重要因素。合成电场是特高压输电工程的电磁环境效应之一, 是输电工程设计、建设和环评中必须考虑的重大技术问题。因此国内外学者作了大量研究工作, 提出了应用于直流线路电场效应的计算方法。国外基于 Deutsch 或 Kaptzov 假设计算双极直流线路合成电场分布^[1-2]。国内利用有限元法、有限体积法等进行了高压直流输电线路合成电场分布计算^[3-7]; 同时开展了高压直流输电线路下存在建筑物时合成电场计算方法的研究和实例分析, 为线路房屋拆迁范围的确定提供了有效的理论支持^[8-9]; 并针对交流线路与直流线路同走廊、同塔双回高压直流线路及同走廊双回直流线路的不同极导线排列方式的电场开展初步研究^[10-17]。但上述理论分析结果缺乏与线路投运后的合成电场测量值进行比较验证。

为此, 基于南网昆明和国网昌平分别建立的特高压直流基地开展了实验线段的直流合成电场特性和实际工程的导线选型研究。然而实验线段长度有限且合成电场测量易受多种因素影响, 同时实际输

电线路所处复杂变化的环境且国外所用导线类型和研究手段与目前已投入工程存在明显差异而无法直接经验借鉴^[18-19]。因此开展投运工程的合成电场测试分析, 对验证已投入直流工程设计的合理性、后续直流工程设计的经济性及电磁环境评估有着重要的意义。

本文以我国已建成的云广特高压直流输电线路为测试对象, 研究合成电场的测量方法, 并分别进行了云广工程系统调试期间的负极半压、正极半压和负极全压、负极全压和双极全压运行的合成电场的现场测量与分析, 获得了不同运行方式和海拔高度下特高压直流线路合成电场的特性。

1 特高压直流输电线路合成电场仿真计算方法

特高压直流线路的合成电场计算是直流线路静电场与离子运动共同作用的电场问题。以正极性导线为例, Sarma、Janishewskyj、Deutsch 等提出了模型简化的假设, 结合泊松方程、离子迁移方程与电流连续性方程, 特高压直流输电线路合成电场计算模型满足式(1)所示的方程。

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{E}_s = -\rho^+ / \varepsilon_0 \\ \mathbf{J}^+ = K \rho^+ \mathbf{E}_s \\ \nabla \cdot \mathbf{J}^+ = 0 \\ \mathbf{E}_s = A \mathbf{E} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{E}_s$ 为合成电场; ρ^+ 为空间电荷密度; $\mathbf{J}^+$ 为离子电流密度; $\mathbf{E}$ 为无空间电荷的标称电场; A 为标量函

收稿日期: 2014-02-10; 修回日期: 2014-11-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012-AA050209)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA050209)

数; K 为离子迁移率; ϵ_0 为真空介电常数。

通过计算线路标称电场、电力线、极导线表面电荷、任意点电荷密度及标量函数,获得特高压直流输电线路合成电场分布,采用通量线法的求解流程参见文献[20]。

2 特高压直流输电线路合成电场测量方法

为保证高精度测量特高压直流输电线路合成电场,需对测量仪器、测量环境、测量位置、数据记录和数据处理按照标准进行规定^[21]。

合成电场测量仪器通常采用能够测量直流合成场强的大小和极性的旋转电场仪。该仪器选用 1 m×1 m 的金属板作为接地参考平面,并将其可靠接地。同时旋转电场仪应直接放置在地面上,保持探头与地面间的距离小于 200 mm。

合成电场测量环境要求测试风速低于 2 m/s,同时 在无雨、无雾、无雪的好天气下进行测量的时间段大于 30 min。为避免测量人员在旋转电场仪处产生电场畸变而影响测量结果,要求测量人员与旋转电场仪的距离大于 2.5 m,同时为减小固定物体对测量值的影响,规定旋转电场仪与固定物体的距离必须大于 1 m。

合成电场测量地点应选在地势平坦,远离树木杂草,没有其他电力线路、通信线路及广播线路的空地。同时测量点分布在导线档距中央弧垂最低位置的横截面方向上。测量时两相邻测量点间的距离可以任意选定,但在测量最大值时,两相邻测量点间的距离应小于 5 m。输电线路下合成电场一般测至距离双极导线对地投影外 50 m 处。

合成电场的 数据记录要求同一断面的测试结果同时记录,并记录测量路径相关的极导线线路参数,如导线高度、极间距离等。合成电场与测试环境的关系密切,因此测量时应记录测试时间内的风速、风向、温度、相对湿度、大气压等气象条件及测量开始时间与结束时间。

因合成电场的测量数据分散性大,采用累计概率的方法进行数据处理。输电线路地面合成场强测量数据按测点分别统计分析,每个测点数据按数值大小的顺序排列,给出测量值在 95%、80%、50% 测量时间大于等于地面合成场强的绝对值,分别对应最大值、80% 值和平均值,并将合成电场 80% 测量值小于 15 kV/m 作为输电线路环境评价的限值。

3 特高压直流输电线路合成电场测量值特性分析

特高压直流线路合成电场测量受线路运行方式、气候条件、导线参数和海拔高度等因素影响,因

此结合云广工程系统调试对不同运行方式下的合成电场进行了测量。

由于云广特高压直流线路全长 1 373 km,沿线的气候条件和导线参数等测量环境有着明显的差异性,因此选择了 6 个代表性强和测试环境好的测量点(见表 1)。所有测量点的坐标系均是以正极对地投影点为坐标原点,正极指向负极规定为正方向。同时现场数据的测量都在好天气(温度 18~38℃,湿度 20%~75%)环境下开展。本文开展了负极半压、正极半压和负极全压、负极全压和不同月份的双极全压运行的合成电场测量,并进行了不同运行方式下的合成电场比较分析。

表 1 不同海拔高度下不同测量点的概况
Table 1 Overview of test points at different altitudes

测点	运行杆号	地点	海拔高度/m	导线高度/m
1	2 112~2 113	广东省肇庆市封开县良心寨	75	26.5
2	1 644~1 645	广西省来宾市武宣县大禄村	64	33
3	1 496~1 497	广西省来宾市兴宾区陆平村	91	26.5
4	1 042~1 043	广西省百色市右江区四加村	700	49
5	0 534~0 535	云南省曲靖市罗平县法金甸村	1 464	32
6	0 382~0 383	云南省曲靖市越州镇杨旗田村	1 900	36.5

3.1 负极全压运行下合成电场理论值与测量值的比较分析

负极全压运行下合成电场理论值与测量值的比较分析如图 1 所示。图中, X 表示测量点位置,后同。负极全压运行期间,合成电场最大值位于负极导线地面投影附近,并向两边呈衰减趋势。因负极导线首次全压 -800 kV 运行而导线电晕较强烈,测点 1、5 的理论计算值较测量值误差较大。测点 5 因临近 500 kV 交流输电线路,其测量值与理论计算值的误差大于测点 1 的误差值。然而各点合成电场最大值满足电磁环境标准限值^[22]。

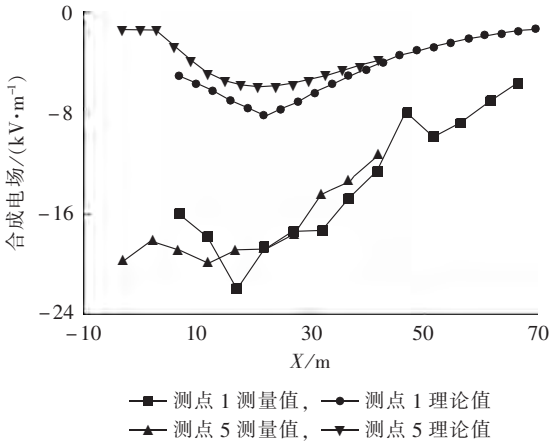


图 1 负极全压运行下测点 1 和 5 合成电场理论值与测量值的比较分析

Fig.1 Comparison between theoretical and measured total field values in full negative pole voltage mode for point 1 and 5

3.2 正极半压和负极全压运行下合成电场理论与测量值的比较分析

正极半压和负极全压运行下测点 2 和 6 的合成电场理论与测量值的比较分析如图 2 所示。相较于负极全压运行而言,正极半压和负极全压运行下合成电场测量值与理论值的误差减小,合成电场值主要取决于全压运行的负极,主要原因是正极半压未达到导线的起晕电压,合成电场主要取决于负极电晕;正极半压和负极全压运行下负极全压带电长于单独的负极全压运行,其导线表面毛刺变少,正极半压和负极全压运行下的负极电晕比刚带电不久的负极全压更稳定。测点 2 测量值与理论值的误差值小于测点 6,其主要原因是测点 6 的海拔高度 1900 m 大于测点 2 的海拔高度 64 m,随着海拔高度升高,电晕更强。

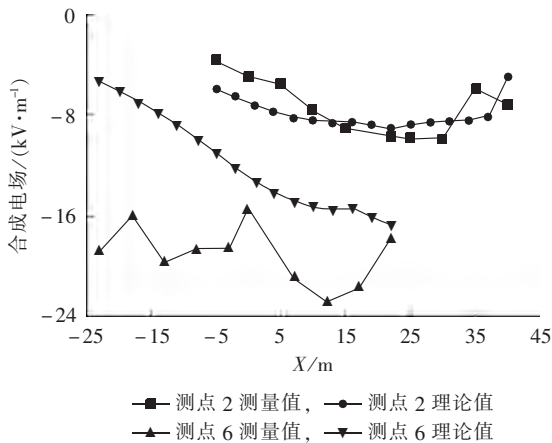


图 2 正极半压和负极全压运行下测点 2 和 6 的合成电场理论值与测量值的比较分析

Fig.2 Comparison between theoretical and measured total field values in half positive pole voltage & full negative pole voltage mode for point 2 and 6

3.3 双极全压运行下合成电场理论与测量值的比较分析

双极全压运行下测点 2、4 和 6 的合成电场理论与测量值的比较分析如图 3 所示。双极全压运行期间,所有测点在双极导线地面投影附近合成电场取最大值,双极外区域合成电场呈逐渐减小趋势,双极之间合成电场先减小后增大。基于测点 2、4 和 6 在双极全压下合成电场测量与理论计算的误差比较分析发现:双极全压下合成电场的误差明显小于负极全压、正极半压和负极全压运行,其误差减小的原因是双极全压的导线带电时间比其他运行方式长,导线表面毛刺减少而变得更光滑,从而导线电晕变弱且稳定。但双极全压下的导线和理论方法的理想导线还存在差异,实际导线所处地势、植被、气候环境等因素与理论计算方法间也存在差异性,因此,误差仍然存在。特别是测点 6 理论值与仿真值在负极

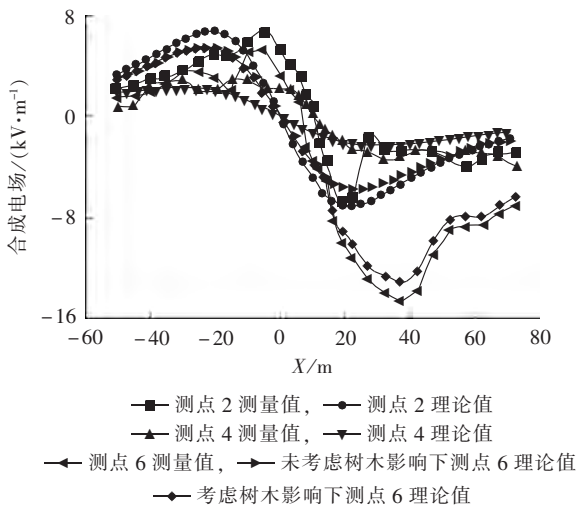


图 3 双极全压运行下测点 2、4 和 6 的合成电场理论值与测量值的比较分析

Fig.3 Comparison between theoretical and measured total field values in full positive pole voltage & full negative pole voltage mode for point 2, 4 and 6

外区域的误差明显大于其正极导线附近的误差,也大于测点 2 和 4 的误差,其主要原因是测点 6 在负极外区域时树木的影响引起误差较大,其中考虑了树木影响的合成电场仿真计算结果精度高于未考虑树木影响的分布值。因此,当因线路下方树木影响增大合成电场仿真值与测量值的误差时,建议考虑树木影响进行合成电场计算以提高计算精度。

3.4 不同运行方式下测点 1 合成电场分析

不同运行方式下测点 1 合成电场分布如图 4 所示。负极半压的合成电场最大值位置相对负极导线地面投影发生偏移,双极导线之间正极半压和负极全压运行下的合成电场绝对值大于 8 月份和 10 月份的双极全压测量值,但小于负极半压运行的测量值。在正极导线外的区域,8 月份双极全压测量值大于 10 月份的合成电场分布,同时对应点的合成电场波动较小。然而,在正极导线至负极导线外的区域,

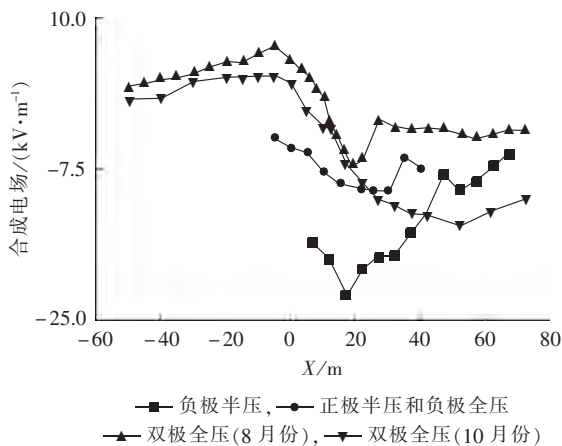


图 4 不同运行方式下测点 1 合成电场分布

Fig.4 Total electric field distribution of point 1 for different operating modes

8 月份双极全压测量值小于 10 月份的合成电场分布。同时尤其在负极导线外的区域,不同测点的合成电场差值明显大于在正极导线外至负极导线区域的差值。

3.5 不同运行方式下测点 2 合成电场分析

不同运行方式下测点 2 合成电场分布如图 5 所示。在负极导线外的区域,负极半压运行下的合成电场分布小于 8 月份和 10 月份的双极全压,而在双极之间的区域,合成电场测量值相对双极全压合成电场分布上下波动。在距离正极导线 30 m 至负极导线外的区域,10 月份全压测量值大于或等于 8 月份合成电场,而其他区域的合成电场分布获得相反的分

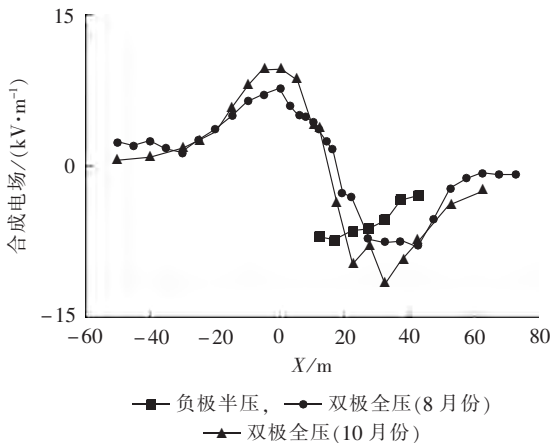


图 5 不同运行方式下测点 2 合成电场分布
Fig.5 Total electric field distribution of point 2 for different operating modes

3.6 不同运行方式下测点 3 合成电场分析

不同运行方式下测点 3 合成电场分析如图 6 所示。在正极导线外的区域,正极半压和负极全压运行的测量值相对 8 月份和 10 月份双极全压运行的合成电场分布值有上下浮动的趋势,然而在双极之间

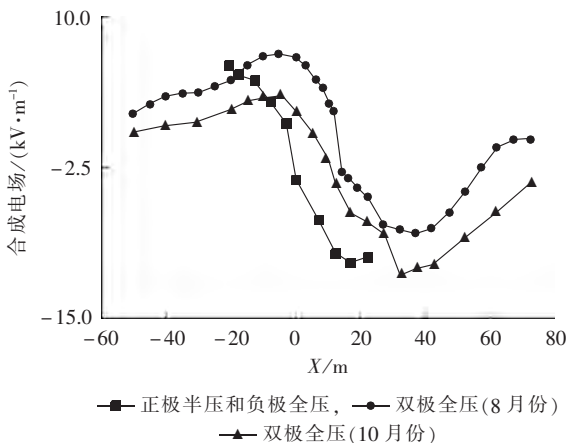


图 6 不同运行方式下测点 3 合成电场分布
Fig.6 Total electric field distribution of point 3 for different operating modes

的区域,正极半压和负极全压运行的合成电场测量值大于双极全压运行的分布值。同时在正极导线外至正极导线的区域,8 月份双极全压测量值大于 10 月份的分布值,而其余区域有着相反分布趋势。

3.7 不同运行方式下测点 4 合成电场分析

不同运行方式下测点 4 合成电场分析如图 7 所示。负极全压运行下,其分布趋势满足负极地面投影点附近合成电场值最大、沿负极导线两侧逐渐衰减的分布。同时负极半压、负极全压和不同月份的双极全压合成电场测量值呈平缓的分布。在双极之间的区域 8 月份与 10 月份双极全压的合成电场测量值的差值明显大于负极导线外的差值。测点 4 处负极全压运行的合成电场值大于其他运行方式的测量值分布。

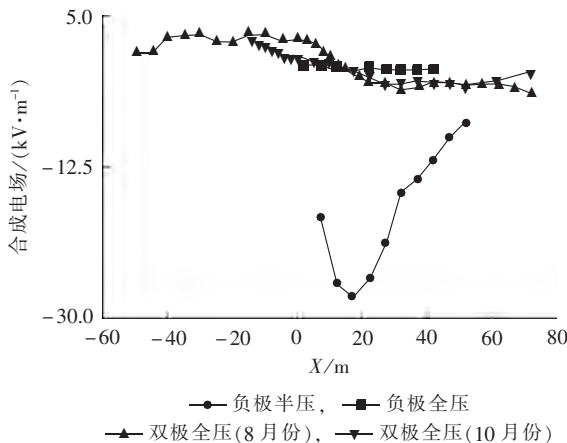


图 7 不同运行方式下测点 4 合成电场分布
Fig.7 Total electric field distribution of point 4 for different operating modes

3.8 不同运行方式下测点 5 合成电场分析

不同运行方式下测点 5 合成电场分析如图 8 所示。较其他的运行方式,在双极导线之间的区域负极全压运行的合成电场测量值最大,8 月份和 10 月份

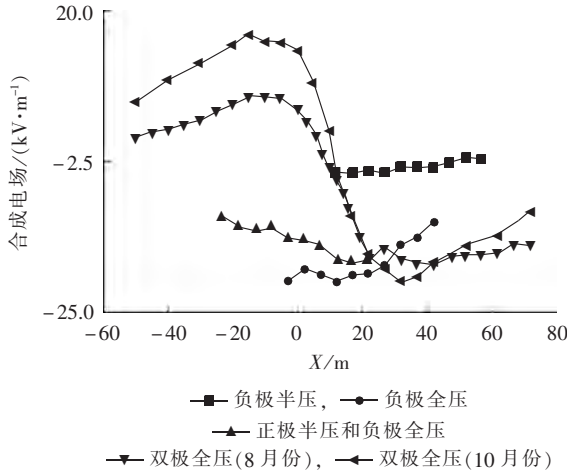


图 8 不同运行方式下测点 5 合成电场分布
Fig.8 Total electric field distribution of point 5 for different operating modes

双极全压运行测量值小于正极半压和负极全压运行的合成电场分布,但大于负极半压运行的测量值。在负极导线外的区域,负极半压的合成电场测量值分布最小。同时在正极导线外 8 月份与 10 月份的合成电场测量值的差值明显大于从正极导线至负极导线外的合成电场差值。

3.9 不同运行方式下测点 6 合成电场分析

不同运行方式下测点 6 合成电场分析如图 9 所示。从正极外 20 m 至负极导线的区域,正极半压和负极全压的合成电场值大于其他运行方式的测量值分布。负极半压运行的合成电场值小于 8 月份双极全压、负极全压运行的测量值。同时在双极之间的区域,负极全压的合成电场分布大于 8 月份双极全压的测量值,但在负极导线外有着相反的变化趋势。然而在正极导线外的区域,正极单极运行的测量值大于 8 月份双极全压的测量值。

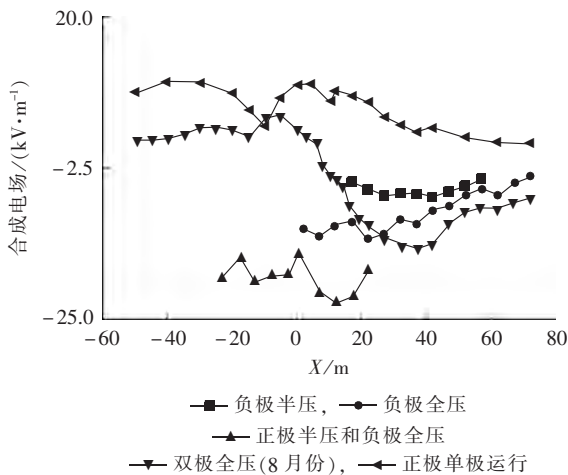


图 9 不同运行方式下测点 6 合成电场分布
Fig.9 Total electric field distribution of point 6 for different operating modes

3.10 不同海拔高度下测点合成电场分析

云广线路海拔高度是 64~1 900 m,因此选取了不同海拔高度的线路断面合成电场进行测量。然而因测量环境限制导致不同海拔高度测点的导线高度和气候条件存在差异。其测量结果如图 10 所示。正极或负极导线附近的合成电场绝对值最大,正极导线外和负极导线外的合成电场分别呈正极性和负极性。同时正极至负极导线的合成电场分布满足由逐渐减小的正极性电场值变化为绝对值逐渐增大的负极性电场。根据表 1,测点 1 和 3 的导线对地高度小于测点 5 和 6,同一海拔高度下测点 5 和 6 应获得更小的合成电场值;但测点 5 和 6 的合成电场值大于测点 1 和 3,由于测点 5 和 6 的海拔高度明显高于测点 1 和 3,海拔高度升高,导线电晕电压降低,因此合成电场随着海拔高度的升高呈增长趋势。同时云广特高压直流线路不同海拔高度下的合成电场测量值满

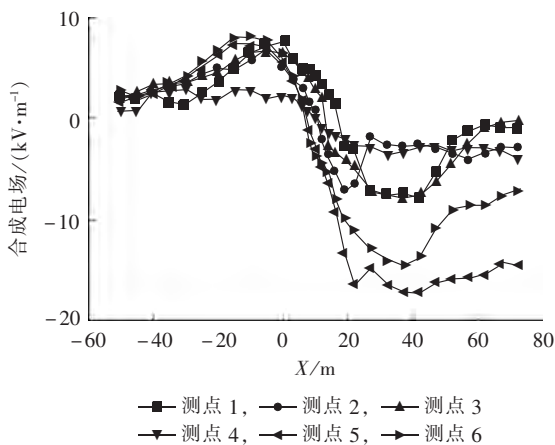


图 10 不同海拔高度下测点双极全压合成电场分布
Fig.10 Total electric field distribution of full positive pole voltage & full negative pole voltage mode for different altitudes

足电磁环境限值。

3.11 不同测点合成电场的 80% 值和 95% 值分析

不同测点合成电场的 80% 值和 95% 值分析如图 11 所示。测点 1、3 和 5 的合成电场的 80% 值和 95% 值的最大值对应的测量位置基本相同。测点 1 合成电场 80% 值和 95% 值的最大差值位于距离负极导线 5 m 且其值为 1.63 kV/m。测点 3 合成电场 80% 值和 95% 值的最大差值位于负极导线外 15 m 且其值为 0.81 kV/m。测点 5 合成电场 80% 值和 95% 值的差值范围为 0.28~1.73 kV/m。因此测点 1、3 和 5 的合成电场的 80% 值和 95% 值的差值较小且满足电磁环境限值。

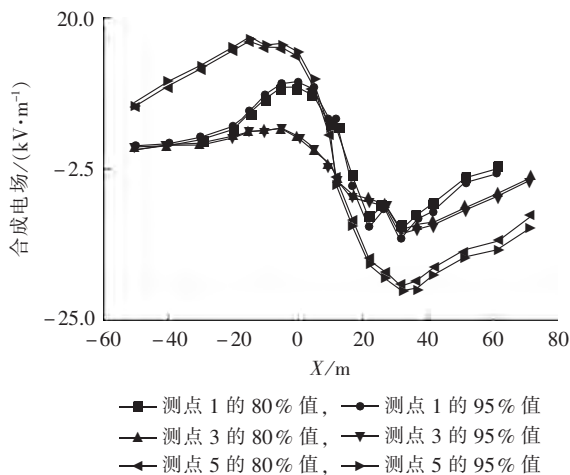


图 11 不同测点合成电场的 80% 值和 95% 值分布
Fig.11 Distribution of 80% and 95% values of total electric field for different test points

4 结论

a. 云广特高压直流线路系统调试运行期间,正极半压和负极全压下测量值与理论值的误差小于负极全压运行下的误差。双极全压运行下测量值与理

论值的误差达到最小,因为双极全压的导线带电时间比其他运行方式长,导线表面毛刺减少,从而导线电晕变弱且稳定。

b. 云广特高压直流线路系统调试运行期间,因不同运行方式下测试点的海拔高度、导线对地高度、温/湿度、风速、风向等环境因素存在差异性,负极半压、正极半压和负极全压、负极全压运行的合成电场测量值相对不同月份的双极全压分布值有上下浮动的趋势,但满足合成电场的标准限值。

c. 不同海拔高度下测点合成电场分布满足正极或负极导线附近的合成电场绝对值最大,正极导线外和负极导线外的合成电场分别呈正极性和负极性。同时正极至负极导线的合成电场分布满足由逐渐减小的正极性电场值变化为绝对值逐渐增大的负极性电场。合成电场随着海拔高度的升高呈增长趋势。

d. 不同测点的合成电场的80%值和95%值对应的测量位置基本相同,同时合成电场80%值和95%值的最大差值能够达到 1.73 kV/m 。双极全压运行的合成电场测量值相对其环境评估的标准限值还有足够的裕度。

参考文献:

- [1] ARMA M P, JANISCHEWSKYJ W. Analysis of corona losses on DC transmission lines: II-bipolar lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(10): 1476-1490.
- [2] TAKUMA T. Calculation of ion flow fields of HVDC transmission lines by the finite element method[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(12): 4802-4811.
- [3] 甄永赞, 崔翔, 卢铁兵, 等. 高压直流输电线下合成电场的有限元快速算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 113-118.
ZHEN Yongzan, CUI Xiang, LU Tiebing, et al. FEM high-speed method for calculating total electric field below HVDC lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 113-118.
- [4] 李永明, 柴贤东, 张淮清, 等. 计算高压直流线路地面电场和电晕损耗的简单方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 6-9.
LI Yongming, CHAI Xiandong, ZHANG Huaiqing, et al. Simple algorithm for calculating ground electric field and corona loss of HVDC power line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 6-9.
- [5] 卢铁兵, 冯晗, 崔翔, 等. 基于上流有限元法对高压直流输电线路下合成电场的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 13-16.
LU Tiebing, FENG Han, CUI Xiang, et al. Research on total electric field beneath HVDC power lines based on upstream finite element method[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 13-16.
- [6] 周象贤, 卢铁兵, 崔翔, 等. 基于有限元与有限体积法的直流输电线路合成电场计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 127-133.
ZHOU Xiangxian, LU Tiebing, CUI Xiang, et al. A hybrid method for the simulation of ion flow field of HVDC transmission lines based on finite element method and finite volume method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 127-133.
- [7] 甄永赞, 崔翔, 罗兆楠, 等. 直流输电线路三维合成电场计算的有限元方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 153-160.
ZHEN Yongzan, CUI Xiang, LUO Zhaonan, et al. FEM for 3D total electric field calculation near HVDC lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 153-160.
- [8] 孙才华, 唐明贵, 韩为民, 等. 向家坝—上海、锦屏—苏南±800 kV直流线路同走廊时平行接近距离和房屋拆迁范围的确定[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 1-5.
SUN Caihua, TANG Minggui, HAN Weimin, et al. Determination of parallel adjacent distance between two ±800 kV DC transmission lines in China erected along common transmission corridor and corresponding house removal range for this project[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 1-5.
- [9] 甄永赞, 崔翔, 罗兆楠, 等. 直流输电线下存在建筑物时合成电场计算的有限元方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 120-124.
ZHEN Yongzan, CUI Xiang, LUO Zhaonan, et al. Finite element method for calculating total electric field of HVDC lines with underneath building[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 120-124.
- [10] 杨勇, 陆家榆, 鞠勇. 交流线路与±800 kV直流线路同走廊时的地面混合电场研究[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 54-58.
YANG Yong, LU Jiayu, JU Yong. Study on the hybrid electric field over the ground surface under AC lines and ±800 kV DC lines in the same corridor[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 54-58.
- [11] 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.
WU Guifang, YUAN Chunfeng, LU Jiayu, et al. Calculation on electromagnetic environment of UHVDC and EHVAC transmission lines erected in a common corridor[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 14-19.
- [12] 田冀焕, 邹军, 刘杰, 等. 高压直流双回输电线路合成电场与离子流的计算[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 61-66.
TIAN Jihuan, ZOU Jun, LIU Jie, et al. Calculation of total electric field and ionic current density of double-circuit HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 61-66.
- [13] 杨勇, 鞠勇, 陆家榆, 等. 极导线垂直和水平排列±500 kV直流输电线路的电磁环境比较分析[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 72-75.
YANG Yong, JU Yong, LU Jiayu, et al. Comparative analysis on electromagnetic environment of ±500 kV DC transmission lines with vertical and horizontal pole arrangements[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 72-75.
- [14] 杨勇, 陆家榆, 雷银照, 等. 极导线垂直排列直流线路地面合成电场的一种计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 13-18.
YANG Yong, LU Jiayu, LEI Yinzhaoh, et al. A calculation method for total electric field strength at the ground level under vertical bipolar HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 13-18.
- [15] 杨勇, 陆家榆, 雷银照. 同塔双回高压直流线路地面合成电场的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 32-36.
YANG Yong, LU Jiayu, LEI Yinzhaoh. Calculation of the total electric field at ground level for double-circuit HVDC overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 32-36.
- [16] 刘泽洪, 陆家榆, 余军, 等. 同走廊两回±800 kV直流线路地面合成电场研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 121-130.
LIU Zehong, LU Jiayu, YU Jun, et al. Study on the total electric field at the ground level under two-circuit ±800 kV DC

- transmission lines in the same corridor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 121-130.
- [17] 杨勇, 陆家榆, 雷银照. 同走廊双回直流线路地面合成电场计算[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 181-185.
- YANG Yong, LU Jiayu, LEI Yinzha. Calculation of total electric field at ground level underneath double-circuit HVDC transmission lines in the same corridor[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 181-185.
- [18] 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.
- [19] 卢铁兵, 冯晗, 王琦, 等. 特高压直流输电线下合成电场分布的影响因素[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2066-2070.
- LU Tiebing, FENG Han, WANG Qi, et al. Analysis of influence factors of the total electric field distribution beneath UHVDC power lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2066-2070.
- [20] 罗兆楠, 崔翔, 甄永赞, 等. 直流线路邻近建筑物时合成电场的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(15): 125-131.
- LUO Zhaonan, CUI Xiang, ZHEN Yongzan, et al. Calculation method for the ionized field under HVDC transmission lines with building nearby[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(15): 125-131.
- [21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T1089—2008 直流换流站与线路合成场强、离子流密度测量方法[S]. 北京: 中

国电力出版社, 2008.

- [22] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T1088—2008 ± 800 kV 特高压直流线路电磁环境参数限值[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

作者简介:



邓 军

邓 军(1985—), 男, 重庆人, 博士, 研究方向为输变电设备过电压与绝缘配合、输变电电磁环境 (E-mail: reacherempire@163.com);

肖 遥(1960—), 男, 湖北孝感人, 教授级高级工程师, 长期从事 HVDC、电能质量、电气试验技术的研究;

楚金伟(1980—), 男, 河北衡水人, 硕士, 主要从事现场电气试验技术的研究;

郝艳捧(1974—), 女, 广东广州人, 教授, 博士, 主要从事关键电力设备绝缘状态诊断、电力系统过电压及其防护、大气压介质阻挡放电等方面的研究 (E-mail: yphao@scut.edu.cn);

李立涅(1941—), 男, 广东广州人, 中国工程院院士, 教授级高级工程师, 博士研究生导师, 从事直流输电、外绝缘等方面的研究 (E-mail: lilc@csg.cn);

赵宇明(1978—), 男, 广东深圳人, 高级工程师, 博士, 从事直流输电、电磁环境等方面的研究;

张建功(1973—), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 从事交直流电磁环境的测量与研究。

Simulative calculation and measurement analysis of total electric field for ± 800 kV Yunnan-Guangzhou UHVDC transmission lines

DENG Jun^{1,2}, XIAO Yao², CHU Jinwei², HAO Yanpeng¹, LI Licheng¹,
ZHAO Yuming³, ZHANG Jiangong⁴

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Maintenance & Test Center, EHV, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

3. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China;

4. State Grid Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: The total electric field of ± 800 kV Yunnan-Guangzhou DC lines is measured and analyzed for studying the total electric field characteristics and environmental effect of UHVDC lines. The calculation model of UHVDC total electric field and its algorithm are proposed. The measuring instruments, environment and location, as well as the data record and its processing method, are introduced. The data measured in different operating modes show that, the difference between the theoretical value and the value measured in the mode of half positive pole voltage & full negative pole voltage is less than that in the mode of full negative pole voltage but greater than that in the mode of full positive pole voltage & full negative pole; with the influences of altitude, line-ground height, temperature, humidity, wind speed, wind direction, etc., the total electric field measured in the mode of half negative pole voltage, in the mode of half positive pole voltage & full negative pole voltage or in the mode full negative pole voltage is different from the value measured in the mode of full positive pole voltage & full negative pole for different months; the measuring location of 80% value and that of 95% value are nearly same for all test points, and all the measured data meet, with sufficient margin, the environmental limits relating to the total electric field. The rationality of electromagnetic environment design for Yunnan-Guangzhou DC project is verified.

Key words: UHV power transmission; DC power transmission; transmission lines; electric fields; total electric field; electromagnetic environment; high altitude area; corona effect; measurement