

DOI: 10.7667/PSPC161880

高海拔地区 220 kV 输电线路带电作业安全距离技术研究

王炳强¹, 岳嵩¹, 吴元香¹, 丁玉剑², 张志鹏¹, 侯田钰¹, 韩建良¹

(1. 国网西藏电力有限公司电力科学研究院, 西藏 拉萨 850000; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为了给高海拔地区 220 kV 线路的带电检修和维护工作提供技术依据, 保证线路带电作业的安全开展, 针对高海拔地区 220 kV 输电线路带电作业安全距离, 分别在西藏羊八井(海拔 4300 m)、青海乌兰(海拔 3000 m)、青海硝湾(海拔 2200 m)的试验场地进行了 220 kV 输电线路实际尺寸杆塔不同作业位置的操作冲击放电特性试验, 得到了不同工况下的操作冲击放电特性曲线。根据以上试验结果和低海拔地区 220 kV 输电线路带电作业已有的研究成果, 结合常用海拔校正方法, 通过危险率的计算, 推荐了海拔 3000~5500 m 范围内 220 kV 输电线路带电作业所需的最小安全距离及最小组间间隙距离。研究结果可为 220 kV 输电线路的工程设计和带电作业提供技术依据。

关键词: 高海拔; 220 kV; 带电作业; 最小安全距离; 组间间隙

Research on security distance of live working on 220 kV transmission line at high altitudes

WANG Bingqiang¹, YUE Song¹, WU Yuanxiang¹, DING Yujian², ZHANG Zhipeng¹, HOU Tianyu¹, HAN Jianliang¹

(1. State Grid Tibet Electric Power Research Institute, Lhasa 850000, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Experimental study on safety distance of live working is carried out in high-altitude areas for 220 kV transmission line in order to supply technical base for live overhaul and maintenance of 220 kV line and guarantee safe operation of live working. Switching impulse discharge characteristics tests of live working in different working positions of trim-size tower for 220 kV transmission line are performed in Yangbajing, Tibet (4300 m), Wulan, Qinghai (3000 m), Xiaowan, Qinghai (2200 m) respectively. The discharge characteristic curves under different work conditions are given. According to the above test results and the existing research on low altitude areas for 220 kV transmission line live working, the required live working minimum safety distance and complex gap within the range of altitude 3000 ~ 5500 m for 220 kV transmission line are calculated and analyzed by combining with the common altitude correction methods and the calculation of hazard scale. The results of this experimental investigation provide technical reference for engineering design and live working of 220 kV transmission line.

Key words: high altitudes; 220 kV; live working; minimum safe distance; complex gap

0 引言

带电作业技术是保障电网安全运行的重要手段, 除了供电安全配电网的故障诊断外, 带电作业安全作业距离的研究也尤为重要。在低海拔地区已经成功应用于各个电压等级的输变电工程中, 有效地提高了电网的安全运行程度。但在高海拔地区, 尤其海拔 3000 m 以上的地区, 还未进行高海拔地

区的带电作业技术研究。随着海拔高度的增加, 空气间隙放电电压将降低, 从而直接影响输电线路带电作业安全距离的确定, 也将会影响最小组间间隙距离的确定。根据我国西部大开发的战略决策, 高海拔地区 220 kV 输电线路已经投入运行, 带电作业是保证线路安全、可靠运行的重要技术手段, 我国已较为深入地研究了低海拔地区输电线路的带电作业。为了给高海拔地区 220 kV 输电线路带电作业和检修维护提供技术依据, 本文进行了相关试验研究, 尤其是 220 kV 输电线路带电作业安全距离的研究。结合高海拔地区 220 kV 输电线路塔型结构特点, 进

基金项目: 国家电网科技项目“高海拔地区输电线路带电作业试验研究与应用”

行有针对性的试验和计算,从而确定 220 kV 输电线路带电作业安全距离。

1 试验布置及典型工况

1.1 试验布置

高海拔 220 kV 输电线路直线塔带电作业 4300 m 试验在位于西藏当雄县羊八井镇的国网公司西藏高海拔试验基地户外试验场进行。国家电网公司西藏高海拔试验基地海拔高度为 4300 m, 户外场尺寸为长 120 m、宽 100 m, 主要试验设备与装置包括: 4200 kV/200 kJ 冲击电压发生器及测控系统、净空尺寸 50 m×50 m 的门型塔。试验区布置见图 1。

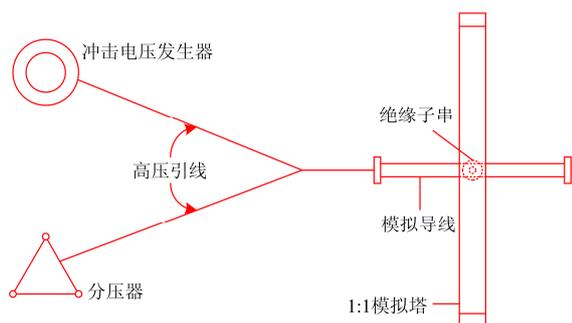


图 1 试验区布置图

Fig. 1 Arrangement of test area

在进行冲击试验^[1]的同时,记录试验时的气象条件,包括气压、干温和相对湿度。气压的测量使用 DYM3-1 型空盒气压表,测量准确度不低于±3.3 hpa。干温和相对湿度的测量使用德国产 testo 608-H2 型湿度计,干温测量误差不大于±0.5 °C,相对湿度测量准确度不低于±2% RH。为了保证测量的气象参数的稳定性,测量仪表都放在气象站专用的百叶箱内,且百叶箱离地高 1.5 m,符合相关标准要求。

1.2 典型工作位置

大量试验研究表明:人在导线(等电位)时对杆塔构架的操作冲击 50%放电电压要比人在杆塔构架

(地电位)时对导线的低。因此,在分析过程中,可以只对作业人员位于导线(等电位)时对杆塔构架的安全距离进行分析。

另外,为便于作业人员进行 220 kV 输电线路带电作业时的操作,考虑作业的安全性,取位置 2、3、5 三个典型位置进行分析,如图 2 所示。

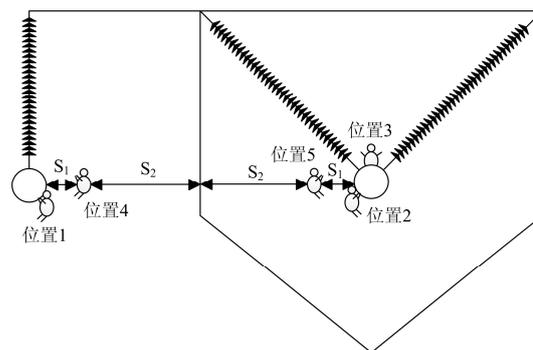


图 2 220 kV 输电线路带电作业不同作业位置示意图

Fig. 2 Arrangement of live test of 220 kV transmission line at different working positions

1.3 带电作业危险率计算

在带电作业中,通常将绝缘损坏的危险率简称为危险率。则危险率公式为

$$R_0 = \int_{U_{ph.m}}^{\infty} p_0(U) p_d(U) dU$$

式中: $p_0(U)$ 为操作过电压幅值的概率密度分布函数,可由单相接地三相分闸过电压分布得到; $p_d(U)$ 为绝缘在冲击下放电的累计概率分布函数,可根据试验结果得到^[2-6]; $U_{ph.m}$ 为最大相电压。通过间隙放电特性研究^[7]: 在相同的过电压下,当间隙长度增加时绝缘放电概率降低,危险率减小。在不同电压等级、不同线路、不同塔型上,用不同的作业方式进行带电作业,其安全程度是不一样的,因此必须逐一经过检验。国内通行的检验方法是:首先进行真型塔试验,然后根据试验结果计算出危险率。目前公认可以接受的危险率水平为小于 10^{-5} ,即每出现一次最大过电压,带电作业间隙的放电概率低于十万分之一。

2 带电作业安全距离研究

在进行安全距离试验时,考虑到作业人员会处于不同的位置,由此可能导致放电路径不同。如当作业人员位于等电位时,放电路径可能是对塔身、上横担或下方构架放电路径;当作业人员位于不同的塔身地电位(下方构架地电位,塔身地电位)时,也可能对带电导线形成放电路径。因此,为了保证作业的安全性,需要对作业人员位于不同位置时进

行冲击放电试验(图 3 为现场试验照片), 以此来确定作业人员在不同位置进行作业时所需要的最小安全距离。选取海拔 0 m 地区、3000 m 地区与海拔 4300 m 地区的 220 kV 输电线路带电作业的试验数据, 根据外绝缘放电电压与气压存在幂指数函数的相对气压修正的方法插值, 得到海拔 2000~5500 m 地区的海拔校正系数, 结合海拔 0 m 地区的试验数据, 得到了海拔 2000~5500 m 地区典型带电作业位置的放电特性曲线, 并与海拔 2200 m、3000 m 地区的典型带电作业位置的试验数据进行对比, 计算校正系数与试验值之间的误差, 分析产生误差的原因, 并在此基础上, 推荐海拔 2000~5500 m 地区 220 kV 输电线路典型带电作业位置所需的安全距离。



图 3 组合间隙最低放电位置试验照片

Fig. 3 Lowest discharge position test photo of combination gap

2.1 等电位模拟人对上部横担

以海拔 0 m 和海拔 4300 m 地区的 220 kV 输电线路带电作业等电位对上横担的试验数据为基础, 按照幂指数函数插值的方法进行海拔校正^[8], 分别得到了海拔 2000~5500 m 地区 220 kV 输电线路带电作业等电位对上横担的放电特性曲线, 如图 4 所示, 同时图中也给出了海拔 3000 m 地区的试验值, 用以对比分析。

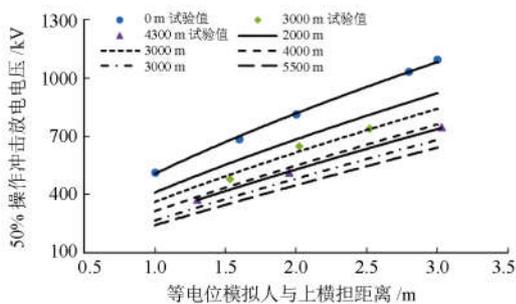


图 4 不同海拔地区220 kV输电线路带电作业等电位模拟人-上横担放电电压曲线

Fig. 4 Discharge voltage curve of 220 kV transmission line live working at different altitudes between equal-level simulated person and upper cross arm

如图4所示, 海拔3000 m的试验值与其对应的校正系数基本一致, 误差不超过5%, 因此, 在对最小

安全距离进行推荐时, 按照由线性插值法得到的放电电压值进行计算推荐。根据DL/T 876《带电作业绝缘配合导则》中的规定, 按照3.0 p.u.的过电压水平, 并结合危险率的计算, 得到了不同海拔地区 220 kV输电线路带电作业中相等电位模拟人对上横担的最小安全距离如表1所示(本文所有表中数值不包括人体活动范围, 作业中需考虑人体活动范围不超过0.5 m)。

表 1 不同海拔地区 220 kV 输电线路带电作业中相等电位模拟人-上横担最小安全距离

Table 1 Minimum safety distance of 220 kV transmission line live working at different altitudes between equal-level simulated person and upper cross arm

海拔/m	2000	3000	4000	5000	5500
最高统计过电压/kV	617				
线路统计过电压均值/kV	495				
间隙 50%放电电压/kV	806	798	802	796	791
间隙距离/m	2.5	2.8	3.2	3.6	3.8
危险率/ $\times 10^{-6}$	3.80	5.90	4.74	6.59	8.64

2.2 等电位模拟人对侧面塔身

以海拔 0 m 地区和海拔 4300 m 的 220 kV 输电线路带电作业等电位对侧面塔身的试验数据为基础, 按照幂指数函数插值的方法进行海拔校正, 分别得到了海拔 2000~5500 m 地区 220 kV 输电线路带电作业等电位对侧面塔身的放电特性曲线, 如图 5 所示, 同时图中也给出了海拔 3000 m 地区的试验值。

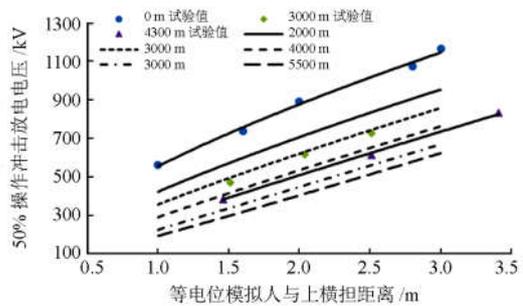


图 5 不同海拔地区220 kV输电线路带电作业等电位模拟人-侧面塔身放电电压曲线

Fig. 5 Discharge voltage curve of 220 kV transmission line live working at different altitudes between equal-level simulated person and side of tower

由图 5 可以看出, 海拔 3000 m 的试验值与其对应的校正系数基本一致, 误差约 5%左右, 因此, 在对最小安全距离进行推荐时, 按照由线性插值法得到的放电电压值进行计算推荐。根据 DL/T 876《带电作业绝缘配合导则》中的规定, 按照 3.0 p.u.的过电压水平, 并结合危险率的计算, 得到了不同

海拔地区 220 kV 输电线路带电作业等电位模拟人对侧面塔身的最小安全距离如表 2 所示。

《电力安全工作规程》(以下简称“安规”)以及送电线路带电作业技术导则 DL/T966-2005 (以下简称“导则”)中给出了海拔 1000 m 及以下地区 220 kV 输电线路带电作业的最小安全距离及组合间隙距离, 如表 3 所示。

表 2 不同海拔地区 220 kV 输电线路带电作业等电位模拟人-侧面塔身最小安全距离

Table 2 Minimum safety distance of 220 kV transmission line live working at different altitudes between equal-level simulated person and side of tower

海拔/m	2000	3000	4000	5000	5500
最高统计过电压/kV	617				
线路统计过电压均值/kV	495				
间隙 50%放电电压/kV	808	812	807	802	802
间隙距离/m	2.4	2.8	3.2	3.6	3.8
危险率 $\times 10^{-6}$	3.40	2.72	3.59	4.74	4.74

表 3 安规及导则中规定的不同作业位置的最小安全距离及组合间隙距离

Table 3 Minimum safety and combination gap distance at different working positions of guide lines

作业位置	间隙距离/m
等电位对接地体	1.8
组合间隙	2.1

由表 3 可以看出, 对于海拔 1000 m 及以下地区等电位对接地体的最小安全距离, 均统一为一个值, 并未区分不同的电极形状, 而对于海拔 2000~3000 m 地区, 由表 1、表 2 可以看出, 等电位对上横担及等电位对侧面塔身两个作业位置所需的最小安全距离基本一致, 相差不超过 0.1 m。为便于作业人员开展带电作业项目, 也可将等电位对上横担、等电位对侧面塔身两个作业位置所需的最小安全距离统一为同一个值; 并以此为原则对海拔 2000~5500 m 不同作业位置所需的最小安全距离进行了推荐, 如表 4 所示。

2.3 带电作业组合间隙研究

根据国内外大量的试验研究, 对于某一组合间隙, 在人体离开导线的距离占整个间隙距离的 1/4~1/3 时^[9], 以海拔 0 m 地区和海拔 4300 m 的 220 kV 输电线路带电作业组合间隙数据为基础, 按照幂指数函数插值的方法进行海拔校正, 分别得到了海拔 2000~5500 m 地区 220 kV 输电线路带电作业组合间隙的放电特性曲线, 如图 6 所示, 同时图中也给出了海拔 3000 m 地区的试验值。

表 4 不同海拔地区 220 kV 输电线路不同作业位置时的最小安全距离推荐值

Table 4 Recommendation value of minimum safety distance of different altitudes 220 kV transmission line at different working positions

作业位置	海拔/m				
	2000	3000	4000	5000	5500
地电位作业人员距带电体, 等电位作业人员距塔身, 等电位作业人员距上横担或顶部构架	2.5	2.8	3.2	3.6	3.8

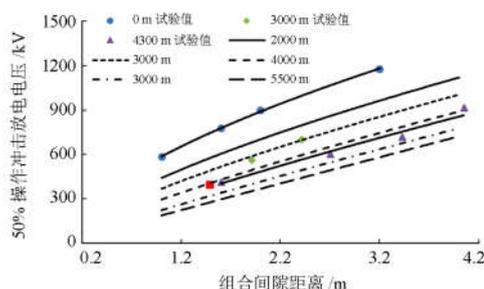


图 6 不同海拔地区 220 kV 输电线路带电作业组合间隙放电电压曲线

Fig. 6 Combination gap discharge voltage curve of 220 kV transmission line live working at different altitudes

如图 6 所示, 对于海拔 3000 m 处的试验数据, 除当组合间隙距离为 1.91 m 时, 与校正值相差较大, 另外两个点与其对应的校正值基本一致, 相差不超过 5%, 因此, 按照由幂指数函数插值法得到的放电电压进行最小组合间隙距离的推荐。根据 DL/T 876《带电作业绝缘配合导则》中的规定, 按照 3.0 p.u. 的过电压水平^[10], 并结合危险率的计算, 求出最小组合间隙值^[11-15]。得到了不同海拔地区 220 kV 输电线路带电作业中相最小组合间隙距离如表 5 所示。

表 5 不同海拔地区 220 kV 输电线路带电作业中相最小组合间隙距离

Table 5 Minimum combination gap distance of 220 kV transmission line live working at different altitudes

海拔/m	2000	3000	4000	5000	5500
最高统计过电压/kV	617				
线路统计过电压均值/kV	495				
间隙 50%放电电压/kV	794	796	801	799	801
间隙距离/m	2.4	2.9	3.5	4.1	4.4
危险率 $\times 10^{-6}$	7.35	6.59	5.01	5.59	5.01

根据推荐不同海拔地区 220 kV 输电线路不同作业位置时的最小安全距离的表述原则对, 海拔 2000~5500 m 不同作业位置所需的最小组合间隙进行了推荐, 如表 6 所示。

表 6 不同海拔地区 220 kV 输电线路最小组合
间隙距离推荐值

Table 6 Recommendation value of minimum combination gap
distance of 220 kV transmission line at different altitudes

作业位置	海拔/m				
	2000	3000	4000	5000	5500
导线-杆塔构架组合间隙	2.4	2.9	3.5	4.1	4.4

3 结论

开展 220 kV 输电线路带电作业的试验研究, 获得了海拔 2000~5000 m 地区 220 kV 输变电工程相关的带电作业空气间隙参数, 提供了带电作业试验数据依据, 确保了西藏等高海拔地区 220 kV 输电线路带电作业的安全性。同时, 研究的成果为我国在高海拔长空气间隙放电特性的试验研究和高海拔校正因数的研究方面提供了相应的基础数据, 并且对今后高海拔地区的输电工程的设计和建设具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 潘震东. 500 kV 同塔 4 回线路真型塔冲击电压的试验研究[J]. 华东电力, 2009, 37(2): 199-204.
PAN Zhendong. Study test for 500 kV four-circuit lines on the same tower[J]. East China Electric Power, 2009, 37(2): 199-204.
- [2] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[C] // Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0020-2
- [3] 胡毅, 王力农, 刘凯, 等. 750 kV 同塔双回输电线路带电作业技术研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 373-378.
HU Yi, WANG Linong, LIU Kai, et al. Research of live working on 750 kV double circuit AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 373-378.
- [4] 胡建勋, 刘凯, 刘庭, 等. 500 kV 高海拔紧凑型输电线路带电作业实验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(4): 35-39.
HU Jianxun, LIU Kai, LIU Ting, et al. An experimental research of living work on high altitude compact 500 kV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4): 35-39.
- [5] 高超, 邓华, 杨益, 等. 高海拔地区 500 kV 带电作业操作杆适应[J]. 云南电力技术, 2012, 6(2): 7-9.
- [6] 胡毅, 肖宾, 刘凯, 等. ± 500 kV 同塔双回直流线路带电作业试验研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 318-321.
HU Yi, XIAO Bing, LIU Kai, et al. Experimental research of live working on ± 500 kV double circuit DC transmission line on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 318-321.
- [7] 李金明, 王彦明. 电力系统高压试验的研究[J]. 科技创新导报-工业技术, 2012(16): 76-76.
- [8] 谷琛, 张文亮, 范建斌, 等. 棒-板间隙操作冲击放电电压的海拔校正[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 140-146.
GU Chen, ZHANG Wenliang, FAN Jianbin, et al. Altitude correction of switching impulse flashover voltage of

- rod-plane air gap[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 140-146.
- [9] 丁泉, 李帅. 智能变电站重采样应用研究及其线性插值法误差分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 132-136.
DING Quan, LI Shuai. Application study on resampling in smart substation with error analysis of linear interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 132-136.
- [10] 霍锋, 胡伟, 徐涛, 等. 1000 kV 交流紧凑型输电线路杆塔空气间隙放电特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1875-1881.
HUO Feng, HU Wei, XU Tao, et al. Air-gaps flashover characteristics for 1000 kV AC compact tower[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1875-1881.
- [11] 裴岳, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.
- [12] 刘洪正, 刘凯, 孟海磊, 等. ± 660 kV 直流同塔双回输电线路带电作业实验研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 2997-3005.
LIU Hongzheng, LIU Kai, MENG Hailei, et al. Experimental research of live working on ± 660 kV double circuit DC transmission line on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 2997-3005.
- [13] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡—浙江 ± 800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ± 800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- [14] 王力农, 胡毅, 刘凯, 等. 500 kV 高海拔紧凑型线路带电作业研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 12-14.
WANG Linong, HU Yi, LIU Kai, et al. Research of live working on 500 kV compact transmission lines in high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 12-14.
- [15] 陈勇, 孟刚, 谢良, 等. 750 kV 同塔双回输电线路空气间隙放电特性研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2118-2122.
CHEN Yong, MENG Gang, XIE Liang, et al. Research on air-gap discharge characteristics of 750 kV one tower double-circuit transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2118-2122.

收稿日期: 2016-11-11; 修回日期: 2017-09-18

作者简介:

王炳强(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高电压与外绝缘技术、带电作业技术研究。E-mail: 15289089259@163.com

(编辑 姜新丽)