

±800 kV 直流接地极线路带电作业方式

崔建业¹, 赵乐冰², 陈智伟³, 程磊³, 潜力群¹

(1. 国家电网金华供电公司, 浙江 金华 321000; 2. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 中国电力科学研究院有限公司武汉分院电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:直流接地极线路是直流输电系统的重要组成部分,对其开展带电作业对于保障直流输电系统的可靠运行具有重要意义。该文通过计算得到接地极线路的最大接地故障过电压为 288 kV。针对接地极线路的带电作业间隙进行了操作冲击放电试验,采用惯用法计算得到了带电作业最小安全距离为 0.65 m。在安全防护方面:由于带电作业时的人体体表场强低于 240 kV/m 的限制,作业人员无需进行电场防护;但作业人员和绝缘工具需考虑单极大地运行时高温导线的影响,应采取隔热措施。为了保证安全,建议采用绝缘杆作业法。若需采用直接作业法,则应采取必要的安全距离控制措施。

关键词:±800 kV 直流; 接地极线路; 带电作业; 安全距离; 安全防护

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.024 中图分类号:TM84 文章编号:1673-9140(2020)01-0176-05

Study on live working of ± 800 kV DC electrode line

CUI Jianye¹, ZHAO Lebing², CHEN Zhiwei³, CHENG Lei³, QIAN Liqun¹

(1. State Grid Jinhua power supply company, Jinhua 321000; 2. School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan Branch of China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074)

Abstract: The DC grounding system is one of important parts in DC transmission system. In order to ensure the reliable operation of DC transmission systems, it is necessary to develop live working tools for UHV grounding systems. In this paper, the overvoltage of grounding faults on BP and GR modes is calculated firstly and the maximum amplitude is 288 kV. Then, the switching impulse flashover tests are carried out in live working air gaps of a simulation tower. The routine method is employed and the live working safety distance is calculated as 0.65m. In addition, for the electric field strength at the surface of live working workers is generally less than 240 kV/m, the additional protection is not required for such electric field. Nevertheless, thermal insulation measures should be adopted due to the influence of high-temperature wire on the operating personnel and insulation tools. It is recommended to use the insulated rod operation method. Otherwise, necessary measures should be taken to ensure the safety distance when the direct work method is selected.

Key words: ±800 kV DC; electrode line; live working; safety distance; safety protection

±800 kV 特高压直流线路是中国长距离解决高电压、大容量、远距离送电和电网互联的一个重要手段。其中直流接地极线路是连接直流换流站中性点出线至接地极址之间的重要线路,其核心功能是承担单极大地方式下的额定电流和双极运行方式下的不平衡电流。接地极线路的可靠运行是直流输电系统正常运行的前提条件,因此采用带电作业方式对其进行运维,可有效提高直流输电工程的可靠性。

近年来,国内学者和工程技术人员在直流架空线路带电作业技术方向已进行了研究与应用。文献[1]采用有限元法建立 2 种作业人员进入等电位方式的仿真模型,分析塔型、人体姿势和进入等电位方式对人员体表场强分布的影响;文献[2]在有限元分析软件 ANSYS 中建立仿真模型,计算分析作业人员沿所有可能路径进入等电位过程中,处于多个不同位置点时人体表面电场强度的动态分布;文献[3]采用模糊层次分析法,建立以带电作业环境、作业人员素质、技术设备条件及安全管理等因素为主体的递阶层次安全综合评价指标体系。但是涉及±800 kV 直流接地极线路带电作业方式的相关文献资料较少。该文依据模拟间隙试验、电场仿真计算以及工器具的高温老化试验,提出±800 kV 直流接地极线路带电作业的最小安全间隙、人员防护措施以及带电作业方式,为±800 kV 直流接地极线路带电检修的安全开展提供科学指导。

1 安全距离

1.1 过电压水平

因安规条例规定雷电天气下不得进行带电作业,则对于接地极线路带电作业,只需考虑操作过电压的影响,即针对±800 kV 直流系统在双极运行(BP)、单极大地运行(GR)时接地极线路的操作过电压进行计算^[4]。

仿真计算时,±800 kV 直流系统在双极运行时的额定电压为 800 kV,额定电流为 5 kA。各典型接地故障条件下的接地极线路上过电压水平见表 1。

1.2 间隙试验

±800 kV 直流接地极架空线路的直线杆塔采用 160 kN 直流盘型瓷绝缘子单、双联悬垂串,每联 5 片。为了确保试验结果的有效性和适用性,采用等电位作业时人员背部对塔身、手指对侧面塔身及

头顶对上方横担等 3 个工况进行标准操作冲击放电试验,同时校核了招弧角的操作冲击放电特性,各试验的 U_{50} 见表 2。试验现场如图 1 所示。

表 1 接地极线路的过电压水平

Table 1 Overvoltage level of grounding electrode line

故障类型	kV	
	BP	GR
高端 YY 换流变阀侧接地故障	229	224
单极沿线接地故障和重启动	181	149
极顶接地故障	229	—
潮流反转时高端 YY 换流变阀侧接地故障	288	276

表 2 操作冲击试验的 U_{50}

Table 2 U_{50} of switching impulse tests

工况	不同间隙时的 U_{50}			
	0.3 m	0.4 m	0.5 m	0.6 m
背一塔身	231.6	301.2	375.7	453.6
手一塔身	210.4	270.8	330.5	415.2
头一横担	216.3	286.1	351.0	424.8
招弧角	272.3	335.5	396.6	460.6

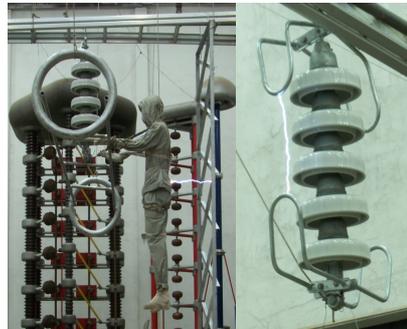


图 1 试验现场

Figure 1 Test site pictures

1.3 绝缘配合

对于 0.1~1 m 的棒—板小间隙操作冲击 50% 放电电压可以采用以下公式计算:

$$U_{50RP} = 450D + 20 \quad (1)$$

式中 U_{50RP} 为 50% 放电电压, kV; D 为间隙距离, m。其他间隙结构的 U_{50} 可由式(2)求得:

$$U_{50} = KU_{50RP} \quad (2)$$

式中 U_{50} 为操作冲击 50% 放电电压, kV; K 为间隙系数。

对于 220 kV 及以下电压等级系统的带电作业安全距离一般采用惯用法进行绝缘配合^[5-7], 即:

$$A = \frac{U_w}{U_{0 \cdot \max}} \quad (3)$$

式中 A 为安全系数; U_w 为间隙的耐受电压, 系统最大过电压。

$$U_w = (1 - 3\sigma)U_{50} \quad (4)$$

式中 σ 为 U_{50} 的标准偏差, 取 0.06; U_{50} 为间隙操作冲击 50% 放电电压, kV。

带电作业安全裕度一般取 1.2; 带电作业间隙耐受电压 U_w 按式(3)计算为 345.6 kV; 将 U_w 代入式(4), 可得 U_{50} 为 421.5 kV。结合式(1)、(2), 可计算得到 3 种典型工况条件下等电位作业人员距地电位构件的最小安全距离, 如表 3 所示。其中等电位人员手部对塔身的安全距离最大为 0.64 m, 因此, 按最大安全裕度取整, 接地极线路带电作业的最小安全距离为 0.65 m。

表 3 典型工况的最小安全距离

Table 3 Minimum safety distances for typical conditions

试验工况	间隙系数 K	安全距离/m
等电位人员后备一侧面铁塔	1.49	0.58
等电位人员手部一侧面铁塔	1.36	0.64
等电位人员头部一上方横担	1.39	0.63

招弧角的主要功能是作为遭遇外部过电压时的临时放电通道, 但 2015 年 7 月特高压宾金直流线路的招弧角就因内部过电压闪络事故, 导致直线杆绝缘子串损毁掉落。因此, 目前的 ± 800 kV 直流接地极线路的招弧角间隙均被增大至 680 mm。通过操作冲击放电试验得到其耐受电压为 373.6 kV, 大于系统最大过电压, 故在调整过后的接地极线路上, 招弧角不会再因接地故障发生放电。

2 安全防护

2.1 电场防护

± 800 kV 直流接地极线路上的运行电压可用式(5)计算, 其最大值为 5 kV, 此时为单极大地方式运行。因此作业人员防护仅考虑在单极大地方式下的防护需求。

$$U_p = I_N (R_e + R_0 L_p) \quad (5)$$

式中 U_p 为接地极线路点 p 处的电压, V; I_N 为额定电流, A; R_e 为极址接地电阻, Ω ; R_0 为每公里架空导线的电阻, Ω/km ; L_p 为 p 点距离接地极址的长度, km。

通过有限元仿真计算, 典型工况条件下等电位人员在接地极线路首端、中部、末端开展作业时的不同身体部位的电场强度如表 4 所示。

表 4 等电位人员不同身体部位的电场强度

Table 4 Electric fields at equipotential body surface

身体部位	kV/m		
	换流站出口	线路中部	极址附近
头部	41.6	23.3	5.3
身体	23.5	11.6	2.7
手部	60.1	33.0	7.1
脚部	59.8	32.1	8.8

GB/T 6568 规定, 带电检修人员未穿戴防护服时不应暴露在大于 240 kV/m 的电场环境中。根据仿真计算结果表明, 作业人员可能接触的最大电场出现在接地极线路首端进行等电位作业时的人体手指处, 但仍远小于 240 kV/m 的限值。因此带电检修作业人员无需针对 ± 800 kV 直流接地极线路的电场进行安全防护。

2.2 高温导线的影响

± 800 kV 直流接地极线路可能最大承受电流为系统额定电流, 此时系统运行方式为单极大地。接地极线路采用 $2 \times \text{JNRLH60/G1A}-500/45$ 耐热导线, 其主要性能如表 5 所示, 相较于普通钢芯铝绞线, 这种耐热导线可以在流过大电流引起发热的条件下照常工作。

表 5 耐热导线主要性能

Table 5 Performance of heat-resistant wires

型号	标称截面 (mm^2)	20 °C 直流电 阻/ Ω	参考载流量(40 °C)/A		
			90 °C	120 °C	150 °C
JNRLH60/ G1A-500/45	500/45	0.060 1	996	1 323	1 576

假设 ± 800 kV 直流线路额定电流为 5 000 A, 单根子导线承载的最大电流为额定值的 1/4, 根据耐热导线的运行参数, 其表面的最大温度应低于 120 °C。同时考虑正常人体接触 70 °C 高温的物体超过 1 min, 表皮就可能发生烫伤。因此在直流系统单极大地运行时, 接地极线路等电位作业人员须尽可能避开高温导线, 并采用合适的隔热防护措施。

带电作业常用的绝缘工具多为环氧玻璃钢制成的硬质工具或高分子聚合物制成的绳索。这些材料在高温条件下已发生分子链断裂,导致整体性能急剧下降,最终影响作业的安全性。因此,对常规绝缘杆和绝缘绳索进行 30 分钟高温老化,然后开展机械性能测试。试验使用 $\Phi 30$ mm 的绝缘杆, $\Phi 16$ mm 的常规绝缘绳作为样品。

根据表 6 的试验数据,绝缘杆的机械强度在 120 °C 和 160 °C 老化后,相较于常温时的性能分别下降了 60% 和 95%,绝缘绳索的机械强度在 120 °C 和 160 °C 老化后,相较于常温时的性能分别下降了 37% 和 50%。如图 2 所示,在 160 °C 老化处理后,绝缘杆和绝缘绳的颜色和形态与老化前基本一致,但其断裂强度大幅下降,已经无法正常使用。因此,在高温的接地极线路上开展带电作业时,常规绝缘工具不能与接地极线路发生零距离接触。

表 6 高温老化后的断裂强度

Table 6 Fracture strength after high-temperature aging

试品	温度/°C	轴向破坏负荷/kN	断裂强度/kN
绝缘杆	25	32.5	—
	120	11.3	—
	160	2.2	—
常规绝缘绳	25	—	19.5
	120	—	12.3
	160	—	9.9

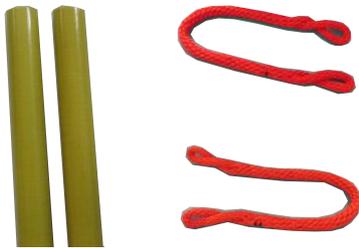


图 2 老化处理前后绝缘杆和绝缘绳

Figure 2 I Insulating rods and ropes before and after aging treatment

3 作业方法

接地极线路属于大电流、低电压的直流输电线路,其路径的选择、导地线、金具的安全系数,以及杆塔和基础设计等,应按照 DL/T 5092 中关于 220

kV 线路的设计标准执行。

在直线塔开展带电作业时的作业间隙如图 3 所示。

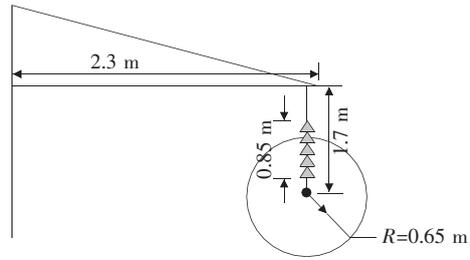


图 3 直线塔作业间隙

Figure 3 Working clearance of straight tower

直线塔塔头的外绝缘设计采用 35 kV 交流线路设计标准。接地极线路直线杆塔均采用 5 片瓷绝缘子,其结构高度为 170 mm,招弧角之间的距离为 680 mm。其中,直线塔导线距侧面塔身水平距离约 2 m,距离上方横担约 1.7 m;耐张塔导线距离横担约 2.2 m,跳线距侧面塔身约 2.5 m,距上方横担约 1.2 m。由于接地极线路的最大运行电压不超过 5 kV,而直线塔塔头空气间隙较小,安全距离控制较难,建议采用绝缘杆作业法,若须采用直接作业法,应设置好绝缘隔离或遮蔽措施,保证足够的安全距离。绝缘防护或遮蔽用具的防护等级为 10 kV^[8-9]。对于耐张塔而言,由于作业间隙较大,作业人员可在档中采用绝缘软梯进入等电位进行作业,作业时须注意等电位人员与横担的最小安全距离。

4 结语

1)接地极线路带电作业时最大过电压为 288 kV,当安全裕度为 1.2 时,最小安全距离为 0.65 m。

2)接地极线路带电作业时等电位人员体表电场最大值仍远小于 240 kV/m,无需对电场进行安全防护。

3)单极大地方式下接地极线路表面温度不高于 120 °C。作业人员和常规绝缘工具不能与接地极线路发生零距离接触,建议采用合适的隔离措施。

4)接地极线路的塔头间隙满足安全距离的要求,但为了保证安全,建议采用绝缘杆作业法。若需

采用直接作业法,则应采取必要的安全距离控制措施。

参考文献:

- [1] 吴东,潘俊文,邹明,等. ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业人体体表电场分布特性[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(2):157-164.
WU Dong, PAN Junwen, ZOU Ming, et al. Research of electric field distribution characteristics for body surface of live working on ± 800 kV[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(2):157-164.
- [2] 张亚迪,车彬,邱中华,等. 基于人员体表场强的 ± 800 kV 特高压直流线路带电作业进入等电位的路径研究[J]. 高电压技术,2019,45(4):1131-1136.
ZHANG Yadi, CHE Bing, QIU Zhonghua, et al. Research of entering path for live work on ± 800 kV UHV DC transmission lines by body surface electric field[J]. High Voltage, 2019, 45 (4): 1131-1136.
- [3] 孟遂民,徐文洋. 基于模糊层次分析法的特高压直流输电线路带电作业安全评价[J]. 高压电器,2016,52(11):42-46.
MENG Suimin, XU Wenyang. FAHP-based safety evaluation for live-line working on ultra-high voltage DC transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11):42-46.
- [4] 李世龙,滕予非,李小鹏,等. 基于注入法的改进特高压直流接地极引线保护方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(16):155-163+174.
LI Shilong, TENG Yufei, LI Xiaopeng, et al. An improved protection method of grounding electrode line for UHVDC based on injection method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(16):155-163+174.
- [5] 许箴,秦勇明. 35 kV 线路带电作业安全距离计算与放电特性分析[J]. 电力科学与技术学报,2014,29(2):71-75.
XU Zhen, QIN Yongming. Discharge characteristics analysis and minimum approach distance calculation for live working on 35 kV line[J]. Journal of electric power science and technology, 2014,29(2): 71-75.
- [6] 王炳强,岳嵩,吴元香,等. 高海拔地区 220 kV 输电线路带电作业安全距离技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(24):158-162.
WANG Bingqiang, YUE Song, WU Yuanxiang, et al. Research on security distance of live working on 220 kV transmission line at high altitudes [J]. Power System Protection and Control,2017,45(24):158-162.
- [7] DL/T 876—2004,带电作业绝缘配合导则[S].
- [8] 李如虎. 带电作业进入等电位方式点评[J]. 南方电网技术,2009,3(2):59-61.
LI Ruhu. Comments on the enter ways into equal potential in electrification operation[J]. Southern Electric Power Technology, 2009,3(2):59-61.
- [9] 徐漂,郑克全,刘兰兰,等. 配网不停电作业空调服研制[J]. 智慧电力,2017,45(9):98-103.
XU Li, ZHENG Kequan, LIU Lanlan, et al. Development of air conditioning suit for distribution network working with power uninterrupted[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 98-103.