

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.01.004

1 000 kV特高压变电站带电作业试验研究

肖 宾¹, 刘 凯¹, 陈 磊², 吴 田¹, 刘 庭¹

(1. 中国电力科学研究院, 武汉 430074; 2. 国网陕西省电力公司, 西安 710054)

摘要: 为了确保特高压变电站作业人员和设备的安全,开展了特高压变电站带电作业的最小安全距离和组合间隙的试验研究。通过分析1 000 kV特高压变电站带电检修典型作业工况,针对作业人员与周围带电体、接地体之间构成的空气间隙进行操作冲击试验,获得典型带电作业间隙的放电特性曲线。结合典型作业工况下间隙的放电特性,根据变电站通用设计方案的操作过电压水平,计算得到带电作业最小电气安全距离(分裂软母线相地6.8 m、相间9.1 m,硬管母线相地6.2 m、相间9.0 m),以及构架侧方进出分裂母线的最小组合间隙6.2 m、绝缘升降平台地面进出硬管母线的最小组合间隙6.3 m;最后校核了通用设计方案中相地和相间距离带电作业危险率。研究表明特高压变电站带电作业满足安全性的要求,为特高压变电站带电作业的安全开展提供了技术支撑。

关键词: 1 000 kV; 变电站; 带电作业; 安全距离; 组合间隙

Test Research of Live Working in 1 000 kV UHV Substation

XIAO Bin¹, LIU Kai¹, CHEN Lei², WU Tian¹, LIU Ting¹

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710054, China)

Abstract: The minimum approach distances and complex gaps test are completed to insure the safety of workers and apparatus during live working in UHV substation. Typical working condition of live maintenance in 1 000 kV UHV substation were analyzed. Then switching impulse discharging test on air gaps that around the workers, ground structures and the charged conductors were conducted and the discharging characteristic curve of typical live working gaps were acquired under typical operation working. According to the switching overvoltage level of the general designation in substation, the minimum electrical safety distance of live working are calculated quad bundle bus phase-to-earth 6.8 m, phase-to-phase 9.1 m, hard tube bus phase-to-earth 6.2 m, phase-to-phase 9.0 m), the minimum complex gap of entering and leaving the quad bundle bus 6.2 m and the minimum complex gap of entering and leaving hard tube bus by insulation lifting platform 6.3 m. Finally, the risk rate of live working is checked in this article, which provides technical support for the safety of live working in UHV substation.

Key words: 1 000 kV; substation; live working; minimum approach distance; complex gap

0 引言

2008年,中国第1条1 000 kV特高压交流示范工程“晋东南—南阳—荆门”全面建成,随后“淮南—上海”、“浙北—福州”等工程也相继投运,特高

压电网逐渐成为电网的骨干网架^[1]。特高压电网具有输送容量大、传输距离远等优点,但若发生故障将会极大冲击整个电网的运行稳定,因此其安全可靠运行显得尤为重要。

变电站设备在恶劣的环境、强电场和大电流的长期作用下不可避免地会出现一些缺陷^[2-6],如接头发热、设备缺陷、绝缘子劣化等,对这些缺陷要及时

收稿日期:2015-07-11; 修回日期:2015-08-13

基金项目:国家电网公司2013年科技项目(GY71-13-048)。

Project Supported by China State Grid Corporation in 2013(GY71-13-048).

消缺,而带电作业是电网检修的重要技术手段,相较停电检修具有明显优势^[7-18],一方面带电作业可根据缺陷的危急程度及检修人员的工作时间灵活安排,保证检修工作的安全有序开展;另一方面开展带电作业可减少变电站的倒闸操作次数,提高设备的利用率及使用寿命。一直以来,中国都十分重视带电作业技术的研究,在超特高压输电线路带电作业领域取得了丰硕成果,文[8-11]中进行了1 000 kV输电线路带电作业安全距离及安全防护措施研究,阐述了特高压交流输电线路运行维护及带电作业方法。国网湖北、河南等检修公司已多次开展特高压线路等电位更换间隔棒及消缺工作。然而,特高压变电站设备结构较之输电线路设备更为复杂,作业人员在检修过程中与周围带电设备所构成的间隙结构也与线路不同,不能简单照搬输电线路带电作业的技术参数。

美国、法国等发达国家在500 kV以下电压等级变电站带电作业方面开展大量的试验工作,形成了较为完善的作业方法^[7,15]。中国目前开展的变电站带电作业项目主要是带电作业间隙放电特性^[7,12]、110 kV和220 kV隔离开关设备线夹发热处理^[13-15]、带电断接母线引线,带电作业机器人^[16]及500 kV以下电压等级支柱类绝缘子的带电清扫和带电水冲洗^[17-18]。对于1 000 kV特高压变电站安全开展带电作业的关键技术参数,国内外尚未见相关研究成果的报道。

1 典型作业工况

特高压变电站带电检修主要针对母线的不同结构型式采用不同的作业方法,一般来说,站内母线分为四分裂软母线和单根硬管母两种型式,软母线采用构架悬垂绝缘子悬挂方式,硬管母采用支柱绝缘子支撑方式。对于输变电带电作业,按照作业人员所处的电位不同分为地电位作业、中间电位作业、等电位作业3种方式。由于1 000 kV电压等级高、相地间隙大,通常采用等电位的作业方式进行检修,其典型作业工况见图1、2。

图1中,分裂软母线典型工况下所构成的作业间隙主要有4种:作业人员等电位站立于分裂母线上时,作业人员头部与上方构架之间的间隙 d_1 ;作业人员处于母线等电位时,人体与邻相母线之间的间隙 d_2 ;作业人员处于边相等电位时,作业人员与侧方构架之间的间隙 d_3 ;作业人员由侧方构架进出母线等电位过程中,带电母线与人体及侧方构架之间的组合间隙 $d_{41}+d_{42}$ 。

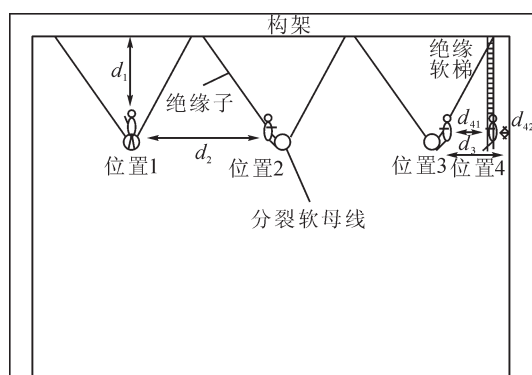


图1 分裂软母线典型工况示意图

Fig. 1 Typical working conditions diagram of quad bundle

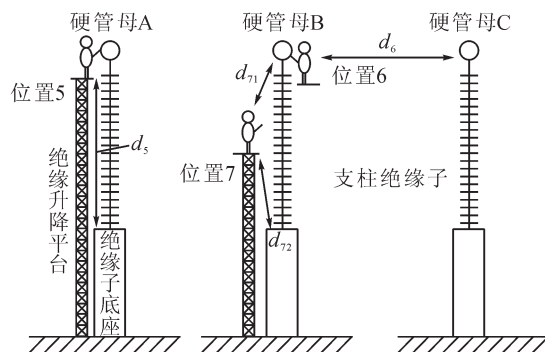


图2 硬管母线典型工况示意图

Fig. 2 Typical working condition schematic diagram of hard tube bus

图2中,硬管母线典型工况下所构成的作业间隙主要有3种:作业人员处于管母等电位时,人体与支柱绝缘子底座之间的间隙 d_5 ;等电位作业人员与邻相管母之间的间隙 d_6 ;作业人员采用绝缘升降平台从地面进出管母等电位过程中,带电管母与人体及绝缘子底座之间的组合间隙 $d_{71}+d_{72}$ 。

2 作业间隙试验

输变电工程通用设计中管母对地净空距离17.5 m,四分裂架空母线19.5 m,构架母线挂点相地距离11.3 m,相间距离14.2 m^[9]。模拟试验按照典型工况1:1布置试品,试验用管母直径0.25 m,长15 m,绝缘底座高10 m,四分裂模拟导线分裂半径0.5 m,长18 m,端部均压环直径35 m。试验用模拟人高1.8 m,身宽0.5 m。试验设备包括5 400、3 000 kV冲击发生器及其测量设备,经国家高电压计量站校验,整套测量系统不确定度小于3%。

间隙试验采用升降法,对被试间隙进行多次操作冲击放电,计算放电间隙的 U_{50} (50%放电电压),然后调整被试间隙的长度,从而得到被试间隙的放电特性。由于同一间隙上施加正极性操作波的放电电压要低于负极性操作波,该次试验中,相地间隙上

相施加正极性标准操作波(250/2 500 μ s),相间试验的作业相施加正极性标准操作波,相邻相施加负极性标准操作波,其电气接线图分别见图 3、4。

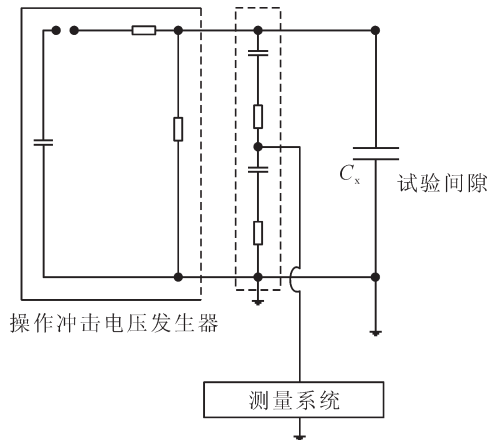
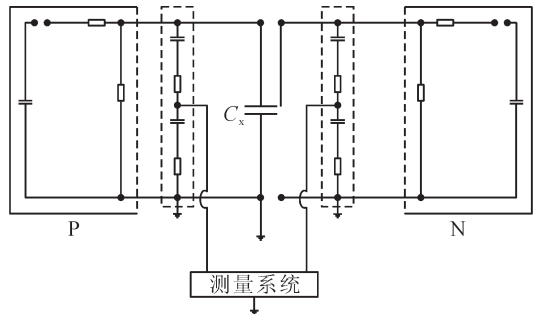


图 3 相地试验电气接线图

Fig. 3 Electric wiring diagram of phase to ground test



P—正极性操作冲击发生器; N—极性操作冲击发生器;
 C_x —试验间隙。

图 4 相间试验电气接线图

Fig. 4 Electric wiring diagram of phase to phase test

作业位置 1,试验模拟人采用站姿,与四分分裂模拟导线处于同一电位,上方模拟构架接地,调节模拟人与模拟构架下平面的距离,测量其放电电压,结果见表 1。

表 1 位置 1 试验结果

Table 1 Test results in position 1

d_1/m	U_{50}/kV	标准偏差 δ
6.5	1 654	4.7
7.5	1 867	3.5
8.5	1 975	4.1
9.5	2 103	5.3

作业位置 2,试验模拟人采用抱姿,由四分分裂模拟导线侧方与之连接处于同一电位,邻相分裂母线在模拟人后侧,调节模拟人与邻相母线的距离,测量其放电电压,结果见表 2。

作业位置 3,试验模拟人同样采用抱姿,由四分分裂模拟导线侧方与之连接处于同一电位,垂直模拟构架位于模拟人后方接地,调节模拟人与垂直构架

表 2 位置 2 试验结果

Table 2 Test results in position 2

d_2/m	U_{50}/kV	标准偏差 δ
7.5	2 254	5.5
8.5	2 368	4.9
9.5	2 587	3.2
10.5	2 714	4.6

的距离,测量其放电电压,结果见表 3。

表 3 位置 3 试验结果

Table 3 Test results in position 3

d_3/m	U_{50}/kV	标准偏差 δ
6.5	1 947	3.9
7.5	2 094	4.7
8.5	2 308	4.3
9.5	2 445	5.2

作业位置 4,该位置试验属组合间隙试验,用于测试作业人员由侧方构架进出母线等电位通道的安全性,根据特高压输电线路带电作业试验结果,当试验模拟人距离母线 0.5 m 时,其 U_{50} 为整个水平进出通道中最低,因此该次试验不再进行通道最低放电位置试验,仅对通道的放电特性进行测试,试验时首先采用绝缘绳索将模拟人固定于距离分裂母线 0.5 m 处,调节模拟人后侧垂直构架与模拟人之间的距离,测量其放电电压,结果见表 4。

表 4 位置 4 试验结果

Table 4 Test results in position 4

d_{41}/m	d_{42}/m	U_{50}/kV	标准偏差 δ
0.5	6.0	1 873	3.8
0.5	7.0	2 059	5.3
0.5	8.0	2 198	4.4
0.5	9.0	2 335	4.9

作业位置 5,试验模拟人采用站姿由绝缘平台支撑,手部与模拟管母处于同一电位,下方支柱绝缘子底座接地,调节模拟人脚底面与绝缘子底座的距离,测量其放电电压,结果见表 5。

表 5 位置 5 试验结果

Table 5 Test results in position 5

d_5/m	U_{50}/kV	标准偏差 δ
6.5	1 894	5.1
7.5	2 045	5.7
8.5	2 211	4.9
9.5	2 345	5.3

作业位置 6,试验模拟人姿态同位置 5,调节模拟人与邻相管母的距离,测量其放电电压,结果见表 6。

表6 位置6 试验结果

Table 6 Test results in position 6

d_0/m	U_{50}/kV	标准偏差 δ
7.5	2 278	5.0
8.5	2 411	5.4
9.5	2 651	5.3
10.5	2 803	4.2

作业位置7,该位置与位置4同属组合间隙试验,试验中模拟人站立于绝缘平台上,头部与管母保持0.5 m距离,调节模拟人脚底面与绝缘子底座的距离,测量其放电电压,结果见表7。

表7 位置7 组合间隙试验结果

Table 7 Complex gaps test results in position 7

d_1/m	d_2/m	U_{50}/kV	标准偏差 δ
0.5	6.0	1 814	4.7
0.5	7.0	1 998	4.3
0.5	8.0	2 173	5.2
0.5	9.0	2 288	5.1

根据上述典型工况不同位置的作业间隙试验结果,可获得特高压变电站带电作业安全距离和组合间隙的放电特性曲线,分别见图5、6。

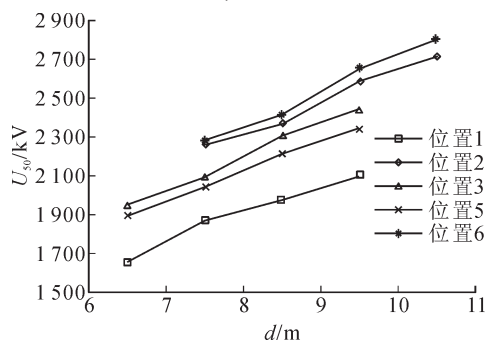


图5 安全距离放电特性曲线(位置1-6)

Fig. 5 Discharging characteristic curves of minimum approach distance(position 1-6)

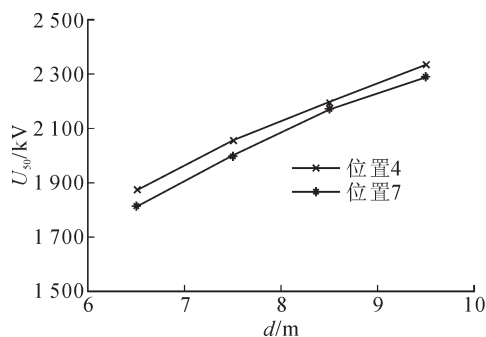


图6 组合间隙放电特性曲线(位置4和位置7)

Fig. 6 Discharging characteristics curve of complex gap (position 4 and position 7)

由图5 放电特性曲线可以看出,位置1、3、5 相

地间隙放电电压明显低于位置2 和6 相间间隙,在3 个相地间隙中位置1 放电电压最低,也就是说当作业人员站立在分裂母线上作业时,头顶与上方构架之间的空气间隙最易发生放电,此位置作业时应注意控制人体姿态及占位。

由图6 中两种不同进出等电位的组合间隙放电特性曲线可以看出,采用绝缘平台法由地面进出管母等电位过程中所构成组合间隙的放电电压低于采用绝缘软梯或吊篮法由构架侧方进出分裂母线组合间隙的放电电压,也就是说由构架侧方进出等电位更加安全,但两种方式的放电特性差异不大。

3 作业危险率及安全间隙计算

在以往带电作业研究中,衡量其作业安全性一个最为重要的指标就是危险率,带电作业危险率是指作业过程中某一绝缘破坏的概率。通常认为带电作业可接受的危险率判据为小于 10^{-5} ,即每当出现一次最大系统操作过电压,带电作业间隙的放电概率应小于十万分之一^[18]。

假定系统操作过电压的概率和空气间隙击穿的概率都服从正态分布,那么带电作业的危险率可由式(1)计算所得。

$$R_0 = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} p_0(U) P_d(U) dU. \quad (1)$$

式(1)中, $p_0(U)$ 为操作过电压幅值的概率密度分布函数,可通过式(2)来定义。

$$p_0(U) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{U - U_{av}}{\sigma_0} \right)^2}. \quad (2)$$

式(2)中: U_{av} 为操作过电压平均值; σ_0 为操作过电压的标准偏差。 $P_d(U)$ 为空气间隙在幅值为 U 的操作过电压下放电的概率分布函数。

$$P_d(U) = \int_0^U \frac{1}{\sigma_d \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{U - U_{50}}{\sigma_d} \right)^2} \cdot dU. \quad (3)$$

式(3)中: U_{50} 为空气间隙的50%放电电压; σ_d 为空气间隙放电电压的标准偏差。

《1 000 kV 变电站设计规范》中规定:特高压变电站侧操作过电压水平为相地1.6 p.u.(kV),相间2.8 p.u.^[20]。根据典型工况下各作业位置的放电特性,结合变电站操作过电压水平,计算带电作业安全距离和组合间隙,并将其修正至海拔1 000 m,结果见表8、9。

输变电工程通用设计中特高压变电站最小安全净距:四分导线相间9.2,管母相间11.3,相地均为6.8^[19]。校核设计最小安全净距条件下开展带电作业危险率见表10。

表 8 安全距离计算结果

Table 8 Calculation results of minimum approach distances

位置	安全距离/m	海拔 1 000 m 安全距离/m
1	6.4	6.8
2	8.4	9.1
3	5.6	6.0
5	5.8	6.2
6	8.3	9.0

表 9 组合间隙计算结果

Table 9 Calculation results of complex gaps

位置	组合间隙/m	海拔 1 000 m 组合间隙/m
4	5.8	6.2
7	5.9	6.3

表 10 最小设计安全净距带电作业危险率

Table 10 Risk rate of live working in minimum designed safety clearance

位置	最小安全净距/m	危险率
相地	6.8	6.34×10^{-6}
	9.2	4.61×10^{-6}
相间	11.3	1.96×10^{-8}

4 结论

1) 根据 1 000 kV 变电站带电作业典型工况作业间隙试验结果, 同样间隙长度条件下, 作业人员在分裂母线等电位作业间隙的放电电压低于在管母等电位作业约 10%, 管母带电作业安全性更高。

2) 海拔 1 000 m 及以下地区 1 000 kV 变电站带电作业最小相地安全距离 6.8 m、最小相间安全距离 9.1 m; 构架侧方进出分裂母线最小组合间隙 6.2 m、绝缘升降平台法进出管母最小组合间隙 6.3 m, 符合《电力安全工作规程》的有关要求

3) 输变电工程通用设计中特高压变电站相地和相间最小安全净距带电作业危险率均小于 10^{-5} , 能够安全开展带电作业。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
LIU Zhenya. Ultra high voltage power grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [2] 胡毅, 刘凯, 彭勇, 等. 带电作业关键技术研究进展与趋势[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1921-1931.
HU Yi, LIU Kai, PENG Yong, et al. Research status and development trend of live working key technology[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1921-1931.

- [3] 刘兆林. 雷击引起的高压断路器故障分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 66-69.
LIU Zhaolin. Analysis of the lightning strike faults on the HV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 66-69.
- [4] 李 鑫, 王晓琪, 余春雨, 等. 1 000 kV 特高压交流电压互感器研制现状及性能浅析[J]. 高压电器, 2011, 47(11): 110-114.
LI Xuan, WANG Xiaoqi, YU Chunyu, et al. Development and performance analysis of 1 000 kV UHV voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 110-114.
- [5] 陈坤汉, 李顺尧. 一起 220 kV 线路避雷器泄漏电流超标的原因分析[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 111-114.
CHEN Kunhan, LI Shun Yao. Analysis of over-standard leakage current of lightning arresters on a 220 kV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 111-114.
- [6] 刘胜军, 周开峰, 徐永卫. 多重雷击引起 220 kV 断路器损坏的事故分析[J]. 中小企业管理与科技, 2012, 48(25): 115-116.
LIU Shengjun, ZHOU Kaifeng, XU Yongwei. Prevention of 220 kV circuit breaker damage due to multiple lightning strikes[J]. Management & Technology of SME, 2012, 48(25): 115-116.
- [7] 刘 强, 周 平, 朱雪松, 等. 220 kV 变电站带电作业的安全间隙试验分析[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(3): 77-82.
LIU Qiang, ZHOU Ping, ZHU Xuesong, et al. Experimental research on safety gap for live working in 220 kV substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(3): 77-82.
- [8] ASSAD L A X, BRAGA A E, MARTINS M D, et al. Mounting of by-pass disconnect switches on energized 138 kV and 230 kV substation with barehand technique[C]//Proceedings of 2000 IEEE ESMO—2000 IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live Line Maintenance. [S.l.]: IEEE, 2000: 280-286.
- [9] 王力农, 胡 毅, 邵瑰玮, 等. 1 000 kV 输电线路带电作业安全距离研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 78-82.
WANG Linong, HU Yi, SHAO Guiwei, et al. Research on minimum approach distance for live working on 1 000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 78-82.
- [10] 胡 毅, 王力农, 刘 凯, 等. 1 000 kV 交流特高压线路带电作业安全防护研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 74-77.
HU Yi, WANG Linong, LIU Kai, et al. Research of safety protection for live working on 1 000 kV ultra high voltage transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 74-77.

- [11] 舒印彪,胡毅. 特高压交流输电线路的运行维护与带电作业[J]. 高电压技术,2007,33(6):1-5.
SHU Yinbiao,HU Yi. Maintenance and live working technology for ultra high voltage transmission line[J]. High Voltage Engineering,2007,33(6):1-5.
- [12] 蔡焕青,邵魂玮,文志科,等. 导电悬浮体对管母—管母相间作业间隙操作冲击放电特性的影响[J]. 高电压技术,2014,40(12):3918-3925.
CAI Huanqing,SHAO Hunwei,WEN Zhike,et al. Influence of floating conducting objects on switching impulse discharge characteristics of phase-to-phase gap between tabular buses[J]. High Voltage Engineering,2014,40(12):3918-3925.
- [13] 金阳,刘海峰,郑晓泉,等. 110 kV 变电站高压裸线扩径增强绝缘护套研究[J]. 西安交通大学学报,2014,48(12):34-40.
JIN Yang,LIU Haifeng,ZHENG Xiaoquan,et al. 110 kV high voltage substation expanding reinforced insulation sheath of bare wire[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2014,48(12):34-40.
- [14] 李飞,崔文杰,黄欣. 500 kV 变电站等电位连接铜缆方式研究[J]. 高压电器,2009,45(4):52-54.
LI Fei,CUI Wenjie,HUANG Xin. Research on equipotential bonding of copper cable in 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering,2009,45(4):52-54.
- [15] 安军,王永强. 带电处理 110 kV 隔离开关设备线夹发热问题[J]. 电网技术,2006,30(s1):228-229.
AN Jun,WANG Yongqiang. Dealing with the problem of wire clip overheating in 110 kV isolating switch with power[J]. Power System Technology,2006,30(s1):228-229.
- [16] 李健,鲁守银,王振利,等. 220 kV 变电站带电作业机器人的研制[J]. 制造业自动化,2013,35(17):76-79.
LI Jian,LU Shouyin,WANG Zhenli,et al. Development of 220 kV transformer substation hot-line work robot[J]. Manufacturing Automation,2013,35(17):76-79.
- [17] 孙阳盛,华月申. 高分子带电清洗技术在 220 kV 变电站中的应用[J]. 华东电力,2013,41(1):238-240.
SUN Yangsheng,HUA Yueshen. Application of polymer live cleaning technology in 220 kV substation[J]. East China Electric Power,2013,41(1):238-240.
- [18] 丁一正,谈克雄. 带电作业技术基础[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
DING Yizheng,TAN Kexiong. Foundmental of live working technology[M]. Beijing: China Electric Power Press,1998.
- [19] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计(1 000 kV 变电站分册)[M]. 北京:中国电力出版社,2014.
LIU Zhenya. Power transmission and transformation project general design of State grid corporation (1 000 kV substation booklet)[M]. Beijing: China power press,2014.
- [20] GB 50697—2011 1 000 kV 变电站设计规范[S]. 2011.
GB 50697—2011 Specification for design of 1 000 kV substation[S].2011.
- 肖宾(1979—),男,工学硕士,工程师,主要从事输电线路带电作业与运行维护技术研究。

(上接第 20 页)

- [21] 许勇,牛永会,郭宁明,等. 新型输电线路故障测距系统的研制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(12):119-125.
XU Yong,NIU Yonghui,GUO Ningming,et al. Development of the new fault location system based on qnet[J]. Power System Protection and Control,2014,42(12):119-125.
- [22] 周尚礼,周全,郭乾晋. 同塔双回高压直流输电线路故障行波特性的研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(23):69-75.
ZHOU Shangli,ZHOU Quan,WU Qianjin. Study on fault travelling wave characteristics in double-circuit HVDC[J]. Power System Protection and Control,2014,42(23):69-75.
- [23] 于洋,孙学锋,高鹏,等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(2):148-154.
YU Yang,SUN Xuefeng,GAO Peng,et al. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control,2015,43(2):148-154.
- [24] 马向国,顾文琪. 基于 MATLAB 语言的静电场模拟电荷法分析[J]. 电瓷避雷器,2005(3):41-46.
MA Xiangguo,GU Wenqi. Charge simulation method analysis of static field based on MATLAB language[J]. Insulators and Surge Arresters,2005(3):41-46.
- 王珍雪(1990—),女,硕士研究生,研究方向为电磁场与电磁波理论、电磁环境。