

电容式复合绝缘母线特性及绝缘试验研究

贾涛¹, 刘宸¹, 李博¹, 李强¹, 周小乐², 夏立迎²

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 天津沃尔法电力设备有限公司, 天津 301721)

摘要: 文中介绍了一种新型电容式复合绝缘母线,重点对其结构以及绝缘试验方法进行了分析。其中在雷电冲击试验中应用一种滤波电路,通过仿真计算分析其参数对试验波形的影响,并在实际试验中验证了回路的效果,能够解决此类试品的波形调节问题;根据局部放电测量结果,分析了可能影响母线局部放电量的因素。最后对此类母线的绝缘试验方法提出几点建议,为此类母线产品的试验与运行提供了参考。

关键词: 电容式复合绝缘; 母线; 雷电冲击; 局部放电

Analysis on the Characteristics and Dielectric Test of Capacitive Composite Insulation Bus Bar

JIA Tao¹, LIU Chen¹, LI Bo¹, LI Qiang¹, ZHOU Xiaole², XIA Liying²

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;
2. Tianjin Woerfar Electric Equipment Co., Ltd., Tianjin 301721, China)

Abstract: A new type of capacitive composite insulation bus bar is introduced in this paper. The structure and the dielectric test method are analyzed. A kind of filter circuit is used in lightning impulse voltage test; the influence of its parameters on test waveform is analyzed by simulation, and the feasibility of this method is verified during tests, using this method helps to solve the problem of adjusting lightning impulse waveform. According to the results of partial discharge measurement, the factors that may affect the partial discharge of bus bar are analyzed. Finally, some suggestions are put forward for the insulation test method of such bus bar, which provides reference for the test and operation of such bus products.

Key words: capacitive composite insulation; bus bar; lightning impulse; partial discharge

0 引言

近十几年来,以有机绝缘材料为主绝缘的管型母线产品在中低压配电系统中的应用日益广泛,其中的绝缘材料包括聚酯薄膜、聚四氟乙烯带、硅橡胶、环氧树脂等。此类型母线的优点在于结构紧凑、节省空间、安装与维护比较方便。若要将此类母线应用在高压输配电领域,需要解决均匀电场以及控制局部放电量的问题^[1-5]。

目前针对高压母线类产品的国家标准只有 GB/T 22383—2008《额定电压 72.5 kV 及以上刚性气体绝缘输电线路》^[6],但是此类固体绝缘母线产品与气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)的特性不完全相同。固体绝缘介质在击穿后不可恢复,而气体绝缘介质是一种自恢复绝缘;在工频电压下固体绝缘介质中

存在着电导损耗与极化损耗;由于制造工艺可能造成不同材料连接处或者绝缘介质内部存在气隙、夹杂等缺陷。因此局部放电量和介质损耗因数是这类母线绝缘性能的重要指标。

在绝缘测试过程中应充分考虑被试品电容量较大的特点,在雷电冲击试验中为了使波前时间与过冲同时满足标准 GB/T 16927.1—2011 的要求,需要对常规试验回路进行调整。在考核其绝缘介质有无损伤时,还应当在绝缘试验前后对其进行电容量与介质损耗因数以及局部放电的测量。

1 电容式复合绝缘母线

近期在高压母线产品领域,出现一种新型电容式复合绝缘母线产品。其基本横截面结构见图 1。最内层为导流的铜管或铝管,最外层为起防护作用的热缩护套,中间部分为多层串联电容屏,电容屏的

电介质主要为聚酯薄膜,电容极板为双面真空镀铝聚酯薄膜。

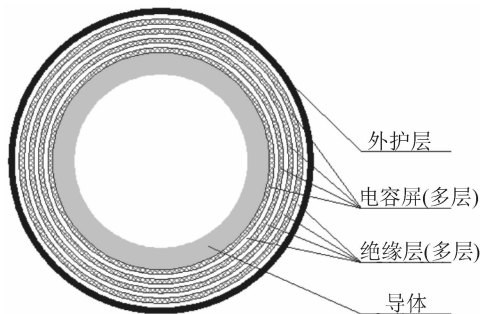


图1 电容式复合绝缘母线横截面示意图

Fig. 1 Cross section diagram of capacitive compositely insulation bus bar

电容式复合绝缘母线相比于其他类型的全绝缘管型母线的优势在于:①其绝缘结构采用多层电容屏串联,母线端部的轴向及径向电场分布比较均匀;②在母线端部及母线与其他电器连接处因多层电容屏串联改善电场分布、充足的电容屏尾椎长度设计,使接口处具有可靠的相间绝缘和相对地绝缘以及稳定可靠的局放特性;③聚酯薄膜材料具有优良的电气及机械性能,有助于提高产品的使用寿命^[7-9]。

文中对 72.5~252 kV 电压等级的电容式复合绝缘母线在绝缘试验中产生的问题进行了分析,对今后此类产品的设计与运行提供了参考。

2 电容式复合绝缘母线绝缘试验

2.1 试验布置与连接方式

针对目前尚无此类绝缘母线产品的国家标准,现参考 GIL 标准 GB/T 22383—2008 进行绝缘试验,对于 72.5~252 kV 电压等级的产品需进行的试验项目以及参数列于表 1,试验时电容式复合绝缘母线、电容式复合绝缘母线接头、电容式复合绝缘套管与 GIS 接头的连接方式见图 2,接口处经环氧树脂盆式绝缘子与 GIS 接头相连。为了确定绝缘介质在工频耐受电压试验和雷电冲击耐受电压试验后有无损伤,在这两项试验前后均应进行电容量及介质损耗因数测量与局部放电测量。

2.2 电容量及介质损耗因数测量

对于 GIL 产品,GB/T 22383—2008 中并未规定进行此项试验。但对于多层电容屏绝缘结构的母线,有必要进行此项试验。首先此类母线的电容量相比 GIL 大很多,母线电容量随着长度增加而增加,测量电容量及介质损耗因数有助于判断绝缘试验前后固体绝缘介质的性能;其次,由

表 1 绝缘试验项目及参数

Table 1 Insulation test items and parameters

试验项目	电压/kV		
	72.5	126.0	252.0
介质损耗因数测量/%	$\tan\delta \leq 0.5$		
局部放电测量($1.2 \times U_m$)/pC	≤ 5		
工频耐受电压试验/kV	160	230	460
雷电冲击耐受电压试验/kV	350	550	1 050

注: U_m 是最高运行电压。

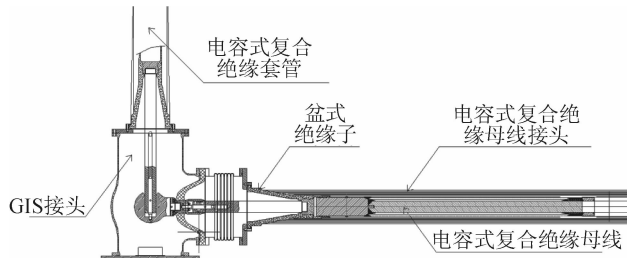
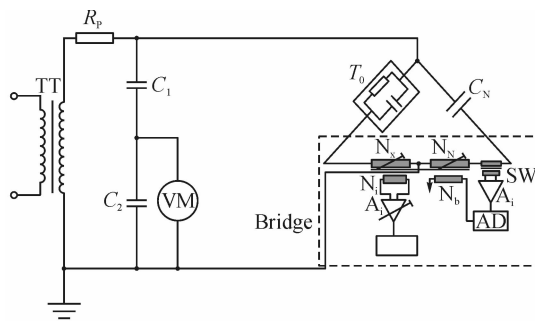


图2 电容式复合绝缘母线试验连接方式

Fig. 2 Test connection of capacitive compositely insulation bus bar

于电容式复合绝缘母线电容量较大,在进行雷电冲击试验时,必须考虑试品电容量对波形的影响,根据试品电容值可更有效地调节试验回路的参数。

试验回路图见图 3。试验时应将 GIS 接头外壳与试品各末屏引线连接,整个母线试品对地绝缘接入电桥。在最高运行电压下测量电容量与介质损耗因数。试验结果见表 2。



TT—工频试验变压器; C_1 —分压器高压臂; C_2 —分压器低压臂; R_p —保护电阻; T_0 —试品母线; C_N —标准电容器; Bridge—测量电桥。

图3 介质损耗和电容量测量回路图

Fig. 3 Measurement circuit of dielectric dissipation factor and capacitance

表 2 电容量和介质损耗因数试验数据

Table 2 Dielectric dissipation factor and capacitance

电压/kV	电容量/pF	介质损耗因数/%
72.5	3 163	0.107
126.0	4 058	0.119
252.0	4 537	0.106

2.3 雷电冲击试验

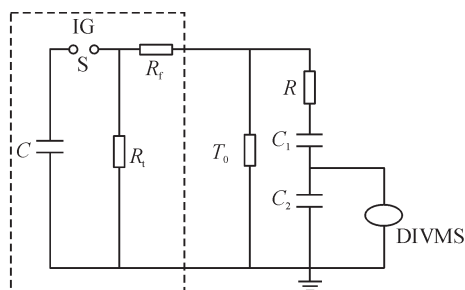
由于电容式复合绝缘母线的电容量比常规开关类、特别是 GIS 类产品大很多, 所以采用常规试验回路难以满足获得符合标准要求的雷电波前时间 t_1 。一般在不改变回路连接的情况下可以通过以下措施减小波前时间: ①减小波头电阻; ②减少发生器本体级数; ③缩短发生器本体至试品高压端的连接导线^[10]。但当波头电阻过小, 且满足关系 $R < 2\sqrt{L/C}$ 时, 回路会产生欠阻尼振荡, 导致过冲超过标准限值的 10%。此时可以通过串联 RC 滤波电路来减小振荡^[11]。

为了确定并联的电阻与电容参数, 还需要测量发生器本体电感, 根据短路振荡法, 将发生器高压端接地, 测量放电波形的振荡周期^[12], 可根据式(1)计算出发生器本体电感

$$f = 1/[2\pi\sqrt{LC/n}] \quad (1)$$

式(1)中: f 为振荡波形的频率; L 为发生器本体电感; C 为发生器每级电容量; n 为发生器使用级数。

以 252 kV 母线为例, 试验回路见图 4。冲击发生器使用 11 级, 本体电容量为 $C_1 = 1/11 \approx 0.091 \mu\text{F}$ 。根据式(1)可算得本体电感为 $L = 83 \mu\text{H}$ 。冲击发生器与试品的连接采用低电感连接线。



IG—冲击电压发生器; T_0 —试品母线; R —分压器阻尼电阻; C_1 —分压器高压臂; C_2 —分压器低压臂; DIVMS—数字测量系统。

图 4 雷电冲击试验回路

Fig. 4 Lightning impulse test circuit

首先当回路未接入 RC 滤波电路时, 波头电阻减小到约 200Ω 时, 波形开始产生振荡, 过冲与波前时间均不满足标准要求。在发生器与试品之间串联接入 RC 滤波电路, 此时回路见图 5, 其中 L_1 与 L_2 分别为发生器本体电感与外部回路电感, 当只考虑计算波前时间时, 回路可简化为图 6, 其中 $L = L_1 + L_2$, $C_0 = T_0 + C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ 。

当回路接入滤波电路之后, 可先使其短接, 继续减小 R_f 至波前时间满足要求。之后可调整滤波电

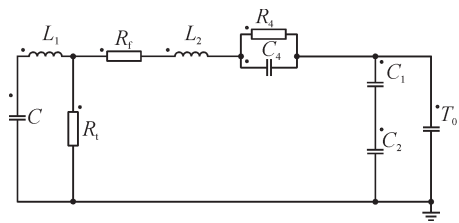


图 5 回路中接入 RC 滤波电路

Fig. 5 Circuit with RC filter

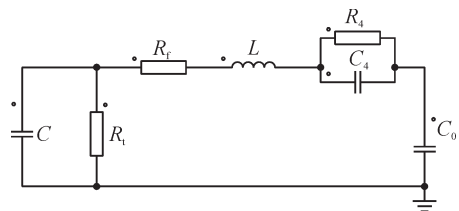


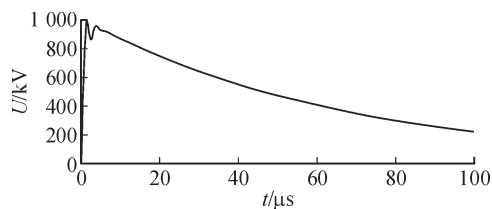
图 6 简化计算回路

Fig. 6 Simplified calculation circuit

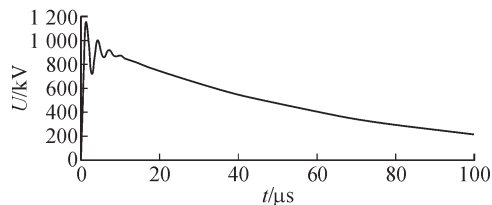
路的 R 值与 C 值。

当 C 值不变时, 增加 R 值, 会使波形出现第 2 个峰值, 持续增大 R , 第 2 个峰值会逐渐增大, 成为波形的最大值, 此时波前时间也会过大, 这种情况相当于增大了波头电阻。所以 R 值不能过大, 调整时应以波前时间为参考。

当 R 值不变时, 增大 C , 会使波形开始产生振荡, 在峰值处产生一个大的跌落, 此时过冲会不满足 $\leq 10\%$ 的要求, 但波前时间会继续减小, 这种情况相当于减小了负载电容量。两种情况的波形对比见图 7。



(a) R 值过大时的波形



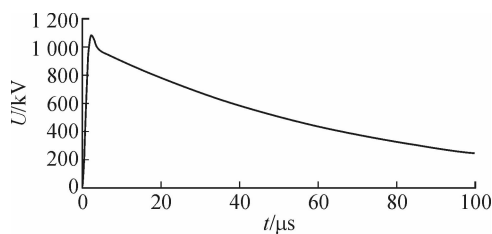
(b) C 值过大时的波形

图 7 不同 R 值与 C 值时的波形

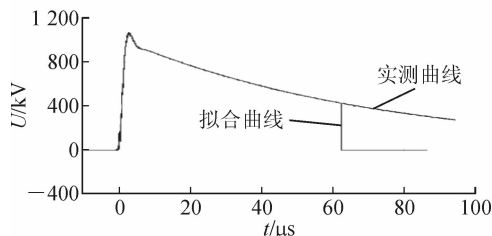
Fig. 7 Waveform of different R and C value

由于在回路中接 RC 滤波电路会使回路搭建比较繁琐, 并且一般高压实验室的可选电容值有限, 故在试验中可先固定 C 值, 逐渐调整 R 值, 在该回路条件下, 最终参数选定 $C = 2000 \text{ pF}$, $R = 120 \Omega$ 。最终仿真计算波形与试验波形见图 8, 实际获得的波

前时间与过冲均满足标准要求^[13]。



(a) 仿真波形 $t_1=1.43 \mu\text{s}$, $\beta=4.9\%$



(b) 试验波形 $t_1=1.48 \mu\text{s}$, $\beta=5.5\%$

图 8 仿真波形与试验波形对比

Fig. 8 Comparison of simulation and test waveform

通过以上分析可知, RC 滤波电路对试品电容量过大时的雷电冲击电压波形具有明显调节作用。

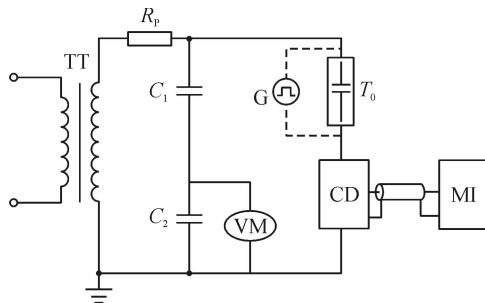
2.4 局部放电测量

局放测量方法按照标准 GB 7674—2008《额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备》^[14-15]。考虑到试品电容量较大, 故采用串联法进行试验。试验回路与实际布置见图 9, 要求母线对地绝缘。首先对回路进行校准, 将方波源加在试品两端, 测得回路背景局放为 2.2 pC。在 1.2 倍线电压下测量局放量。绝缘试验前后均进行了测量, 各电压等级试品的局放测量结果见表 3。绝缘试验前后母线的局放量基本相同, 各电压等级母线的局放值均满足标准要求的 $\leq 5 \text{ pC}$ 。

文[7]介绍分析了母线端部电场以及母线与其他电气设备的连接方式, 由试验结果可以看出, 母线采用变屏距的设计起到了一定的均匀电场的作用。但是在此类母线实际运行过程中由于绝缘结构、绝缘材料、手工绕包工艺等多方不利因素, 常导致绝缘材料发生褶皱、破损, 含气孔多而使屏内电场畸变、场强急增、局放量大, 使管母在空载带电时就发生“鼓包、冒烟、着火、烧蚀等现象”^[16-17], 因此在实际运行中应尽量避免此类情况发生。

3 结论

1) 在进行雷电冲击耐受电压试验时采用的 RC 并联滤波电路, 分析了不同电容值、电阻值对波形的影响, 解决了部分同样类型大容量负载难以调波的问题。但当试品容量过大导致波前时间已明显无法满足标准要求时, 建议标准可对此类母线产品波



G—方波校准器; CD—耦合装置; MI—局放测量仪。

(a) 局部放电测量回路图



(b) 母线局部放电测量试验布置

图 9 局部放电测量回路与试验布置

Fig. 9 Partial discharge measurement circuit and test implementation

表 3 局部放电测量结果

Table 3 Partial discharge measurement results

电压等级/kV	预加电压/kV	测量电压/kV	测量结果/pC
72.5	160	87.0	试验前 ≤ 3.3
			试验后 ≤ 3.5
126.0	230	151.2	试验前 ≤ 4.0
			试验后 ≤ 4.3
252.0	460	302.4	试验前 ≤ 3.2
			试验后 ≤ 3.7

前时间进行特殊要求。

2) 在进行电容式复合绝缘母线及其他电容量较大试品的试验时, 应在安装布置阶段考虑到试品的外壳或者支架对地绝缘问题, 否则可能导致采用并联法测量局放时, 由于耦合电容过小使耦合阻抗无法接收校准信号或测量信号的问题。

3) 根据局放测量的结果, 对影响局部放电量的因素进行了分析。有机绝缘母线在实际运行中存在内层导体温度变化对固体绝缘介质的影响、污秽环境对外层热缩套的影响以及母线制造工艺等问题^[18-20]。对于正在向高压、超高压发展的电容式复合绝缘母线还需要经过长期运行的验证, 并期待有令人满意的新成果。

参考文献:

[1] 黎 斌, 于 欣, 全志红, 等. 对中国有机绝缘管形母线

- 的回顾与展望[J]. 高压电器, 2016, 52(6):9-17.
- LI Bin, YU Xin, TONG Zhihong, et al. Review and prospect of the organic insulated bus in China[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6):9-17.
- [2] 苏永华, 杨宏峰. 环境温度对于干式电流互感器电容屏局部放电的影响[J]. 高压电器, 2013, 49(1):130-133.
- SU Yonghua, YANG Hongfeng. Ambient temperature effect on partial discharge of capacitive screen of dry-type current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1):130-133.
- [3] 王海珍, 刘朝辉, 王如璋, 等. 温度对有机复合绝缘干式高压电气设备局部放电水平影响的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(12):50-58.
- WANG Haizhen, LIU Chaohui, WANG Ruzhang, et al. Temperature effects of PD level for organic composite insulation dry-type high voltage apparatus[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12):50-58.
- [4] 田柯, 马红东. 绝缘管型母线的研究与应用[J]. 华中电力, 2013(5):16-18.
- TIAN Ke, MA Hongdong. Research and application of insulated tubular busbar[J]. Central China Power, 2013(5):16-18.
- [5] 宋邦申. 绝缘管型母线的性能优势及存在问题分析[J]. 电工电气, 2015(1):60-61.
- SONG Bangshen. Performance advantages and existing problems of insulated tubular busbar[J]. Electrotechnics Electric, 2015(1):60-61.
- [6] GB/T 22383—2008 额定电压 72.5 kV 及以上刚性气体绝缘输电线路[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- GB/T 22383—2008 Rigid, gas-insulated transmission lines for rated voltage of 72.5 kV and above[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [7] 黎斌, 王日新, 于欣, 等. 创新型电容式复合绝缘母线及套管的研究、应用和发展[J]. 高压电器, 2013, 49(6):131-138.
- LI Bin, WANG Rixin, YU Xin, et al. Research, application and development of the capacitive compositely insulative busbar and voltage bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6):131-138.
- [8] 《电气电子绝缘手术手册》编辑委员会. 电气电子绝缘技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- “Electronics Insulation Technology Handbook” Editorial Board. Electrical and electronic insulation technical manual [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007.
- [9] 古刚. 浅谈变电站设计中全绝缘屏蔽铜管母线的运用研究[J]. 电工技术, 2015(1):116.
- GU Gang. Application research of brass busbar substation design fully insulated shield[J]. Electric Engineering, 2015(1):116.
- [10] 赵有斌, 李政, 王建生, 等. 冲击电压发生器雷电波的负载特性及其波形分析和改善[J]. 高压电器, 1999, 35(1):19-23.
- ZHAO Youbin, LI Zheng, WANG Jiansheng, et al. Load characteristics and lightning impulse waveform analysis of impulse generator[J]. High Voltage Apparatus, 1999, 35(1):19-23.
- [11] 钟磊, 申萌, 李华良, 等. 限制特高压开关设备雷电冲击过冲的试验回路开发[J]. 高压电器, 2014, 50(10):20-24.
- ZHONG Lei, SHEN Meng, LI Hualiang, et al. Test circuit development for limit the lightning impulse overshoot for UHV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10):20-24.
- [12] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- ZHANG Renyu, CHEN Changyu, WANG Changchang. High-voltage testing technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [13] GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术第一部分: 一般试验要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- GB/T 16927.1—2011 High-voltage test techniques—Part 1: General definitions and test requirements[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [14] GB 7674—2008 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- GB 7674—2008 Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [15] GB/T 7354—2008 局部放电测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- GB/T 7354—2008 Partial discharge measurements[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [16] 张星海, 刘凤莲, 邓元实, 等. 35 kV 绝缘管型母线运行异常分析及结构探讨[J]. 高压电器, 2016, 52(1):190-197.
- ZHANG Xinghai, LIU Fenglian, DENG Yuanshi, et al. Analysis on abnormal operation and structure of a 35 kV insulating tubular bus bar[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1):190-197.
- [17] 曾伟忠, 钟田勇, 朱瑞超, 等. 变电站屏蔽绝缘铜管母线运行中存在的问题及解决方案[J]. 电工技术, 2015(1):64-65.
- ZENG Weizhong, ZHONG Tianyong, ZHU Ruichao, et al. Problems existed in the operation of shielded insulated copper tube busbar in substation and its solution[J]. Electric Engineering, 2015(1):64-65.
- [18] 郑云海, 吴奇宝, 何华琴, 等. 全绝缘管母线局部放电的检测与分析诊断[J]. 绝缘材料, 2010, 43(4):63-66.
- ZHENG Yunhai, WU Qibao, HE Huaqin, et al. Detecting and diagnosis of partial discharge in a fully insulated pipe type bus bar[J]. Insulating Materials, 2010, 43(4):63-66.

- [8] 杨 堃, 李 炜, 宋 昊. 2013 年高压开关设备运行分析[J]. 智能电网, 2014, 2(6): 32-41.
YANG Kun, LI Wei, SONG Gao. Operation analysis of HV switchgears in 2013[J]. Smart Grid, 2014, 2(6): 32-41.
- [9] 刘兆林. 2011 年华东电网高压开关设备运行情况分析[J]. 华东电力, 2012, 40(10): 1787-1790.
LIU Zhaolin. Analysis of HV switch equipment operation in east China power grid in 2011[J]. East China Electric Power, 2012, 40(10): 1787-1790.
- [10] 李秀广, 韩四满, 万 华, 等. 宁夏电网 GIS 设备缺陷分析及预防措施[J]. 电气技术, 2015(3): 107-110.
LI Xiuguang, HAN Siman, WAN Hua, et al. Fault analysis and preventive measures of GIS Ningxia power grid[J]. Electrical Engineering, 2015(3): 107-110.
- [11] 陈保伦, 文亚宁. 断路器弹簧操动机构介绍[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 75-80.
CHEN Baolun, WEN Yaning. Introduction of spring operating mechanism for CB[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 75-80.
- [12] 刘晓春. SF₆ 高压断路器的弹簧、液压操作机构的比较应用[J]. 广西电力, 2007(6): 78-80.
LIU Xiaochun. Comparison of spring and hydraulic operating mechanism for SF₆ circuit breaker[J]. Guangxi Electric Power, 2007(6): 78-80.
- [13] 杨俊峰. 一起 GIS 断路器控制回路故障的分析与处理[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 158-160.
YANG Junfeng. Analysis and treatment of one GIS CB closing fault[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 158-160.
- [14] 樊越甫, 刘国辉, 王军峰, 等. 一例 500 kV 断路器重合闸不成功情况分析[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 106-110.
FAN Yuefu, LIU Guohui, WANG Junfeng, et al. Accident analysis for a unsuccessful 500 kV circuit breaker reclosing[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 106-110.
- [15] 阳少军, 樊灵孟, 林志波. 一次 500 kV 罐式断路器事故原因分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 126-127.
YANG Shaojun, FAN Lingmeng, LIN Zhibo. Accident analysis of 500 kV circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 126-127.
- [16] 赵 宇, 杨 军, 马小兵. 可靠性数据分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
ZHAO Yu, YANG Jun, MA Xiaobing. A course in analysis of reliability data[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2009.
- [17] 史亚斌, 殷晓刚, 武 星. 高压开关设备可靠性数据库的开发与应用[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 133-138.
SHI Yabin, YIN Xiaogang, WU Xing. Development and application of the high-voltage switchgear reliability database[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 133-138.
- [18] 刘宗兵, 熊小伏, 李 磊. 基于可靠性维修的开关设备维修决策支持平台研究[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 44-48.
LIU Zongbing, XIONG Xiaofu, LI Lei. Development of reliability centered maintenance platform for power switching equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 44-48.
- [19] 邱仕义. 电力设备可靠性维修[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
QIU Shiyi. Reliability centered maintenance of electrical equipment [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

吐松江·卡日(1984—), 男, 维吾尔族, 博士研究生, 主要研究方向为电力设备状态监测与评价。

(上接第 163 页)

- [19] 朱佩龙, 林复明, 陈晓春, 等. 一种新型插接式固体绝缘母线连接器的设计[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 115-118.
ZHU Peilong, LIN Fuming, CHEN Xiaochun, et al. Design of new type plug-in solid insulation busbar connector[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 115-118.
- [20] 张 东, 周利兵. 全绝缘母线外绝缘击穿问题分析及改造措施[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(11): 37-40.
ZHANG Dong, ZHOU Libing. Analysis and reform measures of fully insulated about busbar's external insulation

breakdown problems[J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(11): 37-40.

贾 涛(1979—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 长期从事高压电器测试工作。

刘 宸(1988—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高电压试验检测与技术研究工作。