

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.01.033

110 kV 盆式绝缘子法兰金属缺陷局部放电研究

高锵源¹, 张建宏², 郑雪钦¹, 石文广¹

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024; 2. 麦克奥迪(厦门)电气股份有限公司, 福建 厦门 361101)

摘要: 针对现有运行的带金属法兰和未采用全屏蔽内环的盆式绝缘子中,会出现局部放电时而不时的发生现象,采用有限元仿真和试验验证,确认了这种现象发生的原因是由于盆式绝缘子浇注体与金属法兰之间的缝隙气隙分布不均匀造成的。为了解决存在的问题,提出通过调节螺栓来调节缝隙气隙的均匀度、采用全屏蔽内环设计的解决方案。实践证明,2种解决方案都是有效的、可行的。

关键词: 盆式绝缘子; 法兰; 缝隙气隙; 局部放电

Study on Partial Discharge of Metal Defects in 110 kV Basin-type Insulator Flange

GAO Qiangyuan¹, ZHANG Jianhong², ZHENG Xueqin¹, SHI Wenguang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Fujian Xiamen 361024, China;

2. Motic (Xiamen) Electric Group Co., Ltd., Fujian Xiamen 361101, China)

Abstract: The paper aims at the non-stable partial discharge of the existing metal flange and the basin-type insulator without using full shielding inner rings. The paper confirms the cause of this phenomenon is the gap between basin-type insulator and the metal flange distributes unevenly. In order to solve the finding problems, the paper adjusts the uniformities of the air gap and uses full-shielding inner rings. The tests proved that these two solutions are effective and feasible.

Key words: basin-type insulator; flange; gap; partial discharge

0 引言

盆式绝缘子是GIS设备中最为重要的绝缘部件之一,起到对GIS外壳与中心导体进行隔离、隔离三相高压母线、衔接高压母线、利用中心导体固定高压母线等作用。盆式绝缘子发生故障率最高,达到36.3%。因此,盆式绝缘子的绝缘性能好坏,直接影响到GIS设备运行的可靠性^[1-9]。根据事故统计分析表明,在绝缘老化的过程中大部分伴随着局部放电的发生。局部放电是检测产品是否合格的重要指标,局部放电虽然很小,但是在长期运行的过程中,局部放电对绝缘的破坏性会逐渐扩大,日积月累,最终导致绝缘子绝缘性能彻底损坏^[10-19]。

有些带金属法兰和未带全屏蔽内环的盆式绝缘子产品在出厂测试中局部放电显示合格,但是在经过运输安装后会出现局部放电测试不合格的现

象;对同一只盆式绝缘子多次测试过程中会出现局部放电时而不时的发生现象称为“局放不稳定现象”。虽然可以将这种放电归于不确定因素,但是无法解决实际问题,对生产和使用者造成很大的困扰。所以对这种特殊局部放电现象的探讨将具有深远现实意义,文中将深入分析“局放不稳定现象”的发现过程、查找原因、解决问题,以对类似绝缘结构的设计提供借鉴。

1 局放不稳定现象的原因查找

对大量带有金属外圈(法兰)、未采用全屏蔽内环的盆式绝缘子,进行工频耐压局部放电的测试过程中发现,有些产品在出厂检测中显示合格,但是在经过运输、安装后,再进行测试发现不合格。对于不合格产品,回厂后未经处理,直接进行局放测试,有些不合格产品会出现测试合格的现象。而对不合格产品进行缺陷排查(X光透视等),均无发现气泡、杂质等缺陷。在通过对盆式绝缘子同类产品的

研究中发现,这种现象对没有带金属外圈(法兰)的产品或者具有全屏蔽内环的产品中几乎没有出现过。通过现场的多次的试验前的安装和试验过程的跟踪发现,盆式绝缘子由于浇注材料的收缩,在法兰与浇注体间会出现一段缝隙。这段缝隙在实际的运行过程中是空气。而若在试验过程中,将六氟化硫气体引入到这段缝隙中,局放测试都为合格。

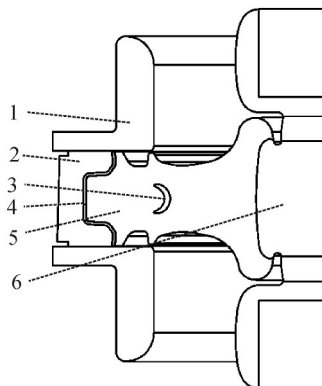
通过对以上的分析进行总结,可以确定这种“局放不稳定现象”的问题点在于未采用全屏内环的盆式绝缘子的法兰与浇注体间的缝隙气隙问题上,特别是屏蔽内环没有屏蔽到的缝隙气隙。理由如下:①在与同类绝缘子对比发现,采用部分屏蔽内环的盆式绝缘子比采用全屏蔽内环的盆式绝缘子出现这种现象的几率高;②由于金属法兰的存在,盆式绝缘子在浇注材料冷却收缩后,在绝缘子与法兰间会出现缝隙,而在实际的运行过程中这段缝隙是空气。对于空气而言,在工频电压下的局部放电临界击穿场强值为 3 kV/mm ,小于六氟化硫的 18.5 kV/mm (0.42 MPa)^[20-21]。若在局部放电测试中,将缝隙间的空气用六氟化硫替代,测试全部合格;③在安装和运输过程中,出厂合格的绝缘子产品处于密封状态,且安装过程中对绝缘子的清洁度要求很高,很少出现污秽等影响,但是依然会出现出厂合格的产品在使用过程中测试不合格。由于法兰在运输过程中晃动或者安装不规范,会出现法兰与绝缘浇注体的缝隙气隙分布不均匀。通过观察统计发现,合格产品的缝隙气隙分布均匀或者较为均匀,而95%的不合格产品的缝隙气隙均有不均匀现象。因此,未采用全屏蔽内环的盆式绝缘子出现的局放不稳定现象的根本原因就是由于金属法兰在安装不规范或者运输晃动,导致缝隙气隙不均匀的法兰金属缺陷引起的。

2 电场仿真计算

产品结构图见图1。针对局部放电不稳定现象可能出现的位置和引起的原因进行有限元电场仿真,通过3种方案的电场仿真,在理论上进行验证。

方案Ⅰ:在完全模拟实际生产图纸建模,对正确安装金属法兰的模型进行电场仿真计算。方案Ⅱ:通过人为的建立法兰不规范安装而引起缝隙气隙不均匀的法兰金属缺陷模型进行仿真。方案Ⅲ:采用盆式绝缘子全屏蔽内环的盆式绝缘子进行仿真计算。方案Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的加载电压方式相同,在一相导体上加载电压 425 kV (有效值为 300 kV 的峰值);

屏蔽内环、另外两相导体、测试工装和金属法兰加载电压 0 V ,法兰正确安装时的气隙宽度约为 1.5 mm 。方案Ⅰ和方案Ⅱ采用部分屏蔽内环(3个屏蔽内环的弧角为 80°);方案Ⅲ采用全屏蔽内环。3种方案的介电常数设置:盆式绝缘子介电常数为 5.5 、测试工装使用的绝缘密封圈介电常数为 4 、空气介电常数为 1 、六氟化硫介电常数为 1.002 。



1—接地壳体; 2—金属法兰; 3—屏蔽内环;
4—缝隙气隙; 5—环氧树脂浇注材料; 6—中心导体。

图1 产品示意图

Fig. 1 Product schematic

方案Ⅰ:仿真结果见图2-4。其中疑似问题部位(缝隙气隙部位)最大场强值为 2.52 kV/mm ,如图4所示,出现在没有屏蔽的范围内。该值小于空气设计的基准值 3 kV/mm ,符合设计要求。

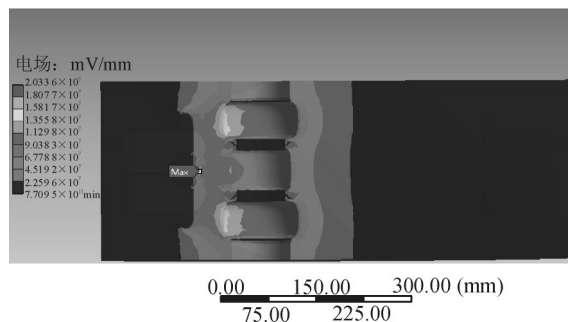


图2 产品整体电场分布图

Fig. 2 The overall electric field distribution

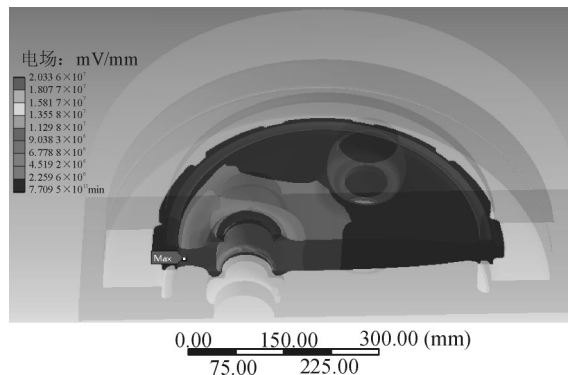


图3 盆式绝缘子电场分布图

Fig. 3 The electric field distribution of basin insulator

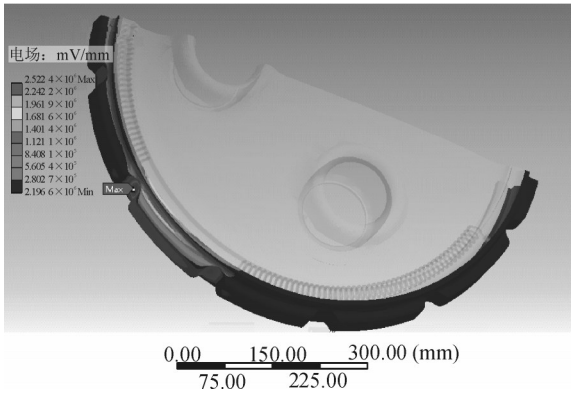
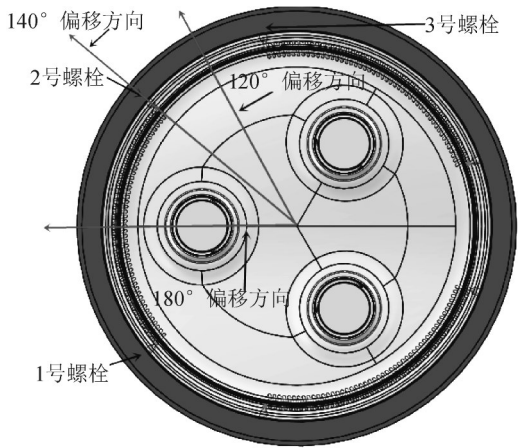


图4 气隙电场分布

Fig. 4 Air gap electric field distribution

方案Ⅱ:对3种较为普遍的法兰安装不正确的方式进行仿真计算,对3种可能出现的安装不正确方式进行说明,见图5。



注:缝隙气隙最小处宽度等于1.5 mm减去偏移量。

图5 方案Ⅱ实施说明图

Fig. 5 The illustration of scheme 2

- 1)180°偏移,指1号螺栓和2号螺栓锁紧,距离比正常锁紧距离短,造成偏移侧缝隙气隙变小。
- 2)140°偏移,指2号螺栓锁紧,螺栓锁紧距离比正常锁紧距离短,造成偏移侧缝隙气隙变小。
- 3)120°偏移,指2号螺栓和3号螺栓锁紧,距离比正常锁紧距离短,造成偏移侧缝隙气隙变小。
- 通过仿真计算得出不同偏移量下,缝隙气隙最大场强值结果见表1。

由表1得到:

- 1)在120°偏移的方案仿真结果中,当偏移量超过0.6 mm(即没有屏蔽范围内的缝隙气隙最小的宽度小于0.9 mm)时,疑似问题部位的的最大场强值超过缝隙气隙设计基准值3 kV/mm(缝隙气隙实为空气),不符合设计要求。
- 2)在140°偏移的方案仿真结果中,当偏移量超过0.4 mm(即没有屏蔽范围内的缝隙气隙最小的宽

度小于1.1 mm)时,疑似问题部位的的最大场强值超过缝隙气隙设计基准值3 kV/mm,不符合设计要求。

表1 方案Ⅱ不同偏移量下缝隙最大场强汇总

Table 1 The maximum field strength gap under different offsets of scheme 2

偏移量/ mm	120°偏移 Max / (kV·mm ⁻¹)	140°偏移 Max/ (kV·mm ⁻¹)	180°偏移 Max/ (kV·mm ⁻¹)
0.0	2.51	2.52	2.49
0.2	2.65	2.70	2.62
0.4	2.80	2.88	2.78
0.6	2.98	3.10	2.97
0.8	3.29	3.36	3.21
1.0	3.47	3.75	3.41
1.2	3.89	4.20	3.86
1.4	4.71	5.35	4.42

3)在180°偏移的方案仿真结果中,当偏移量超过0.6 mm(即没有屏蔽范围内的缝隙气隙最小的宽度小于0.9 mm)时,疑似部位的的最大场强值超过缝隙气隙设计基准值3 kV/mm,不符合设计要求。

所以对于产品的法兰规范安装时,为达到设计要求,在没有内环屏蔽范围内的最小缝隙气隙宽度不应小于1.1 mm。

方案Ⅲ:采用盆式绝缘子内部全屏蔽设计,在与方案2相同的计算前提下,仿真计算得出不同偏移量下,缝隙气隙最大场强值结果见表2。

表2 方案Ⅲ不同偏移量下缝隙最大场强汇总

Table 2 The maximum field strength gap under different offsets of scheme 3

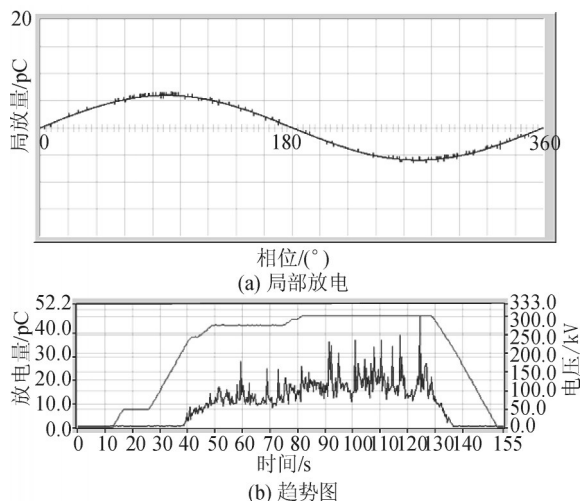
偏移 量/mm	120°偏移 Max/(kV·mm ⁻¹)	140°偏移 Max/(kV·mm ⁻¹)	180°偏移 Max/(kV·mm ⁻¹)
0.0	0.67	0.63	0.62
0.2	0.65	0.64	0.61
0.4	0.63	0.65	0.65
0.6	0.63	0.64	0.59
0.8	0.65	0.57	0.60
1.0	0.68	0.93	0.62
1.2	0.94	1.24	0.82
1.4	1.66	1.72	1.42

从表2可以得到,在采用全屏蔽内环后,可以有效优化缝隙气隙部分的电场,表2中所有的电场计算值已小于缝隙气隙的设计基准值3 kV/mm,是符合设计要求的。

3 试验验证

基于上述仿真计算结果的理论支持,取6只出现上述“局放不稳定现象”的盆子对缝隙进行调整

后,按照统一的测试方法进行测试,其测试结果都变为合格。取其中1只测试为例,该盆式绝缘子在最后一次测试为不合格时,其B相未屏蔽部分气隙最小处为0.53 mm,通过工频耐压局放测试,其局放测试图谱见图6。起始放电电压为251 kV,测试的局放量为20 pC,大于2 pC的设计要求值,试验结论为不合格。

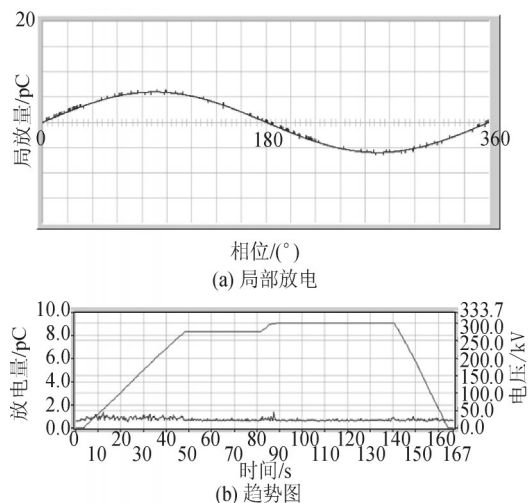


注: 局部放电为:0.76 pC, 试验电压为:300 kV, 试验结论为合格

图6 不合格局部放电测试图谱

Fig. 6 The atlas of unqualified partial discharge tests

而通过调节螺栓,使得缝隙气隙分布均匀,缝隙平均宽度为1.48 mm,通过工频耐压局放测试,其局放测试图见图7。测试的局放量为0.76 pC,小于2 pC的设计要求值,试验结论为合格。



注: 局部放电为:0.76 pC, 试验电压为:300 kV, 试验结论为合格

图7 合格局部放电测试图谱

Fig. 7 The atlas of qualified partial discharge tests

6只出现“局放不稳定现象”的盆式绝缘子,在未调整金属法兰前的缝隙宽度和300 kV时局放量测试汇总见表3。通过表3可以发现,由于在测量最小缝隙宽度和测试局放量的确定时存在一定的误

差,但总体上呈现出了“金属法兰的安装的偏移量越大,对局部放电的影响越大”的规律。而通过调节螺栓,使得缝隙气隙分布均匀后,缝隙宽度和局放量测试汇总见表4,在通过调整金属法兰后,产品的局放量测试合格。

表3 不合格产品的测试汇总

Table 3 The test summaries of the unqualified products

名称	案例1	案例2	案例3	案例4	案例5	案例6
最小缝隙宽度/mm	0.60	0.52	0.47	0.53	0.62	0.57
300 kV时局放量/pC	10	26	40	20	11	15

表4 合格产品的测试汇总

Table 4 The test summaries of the qualified products

名称	案例1	案例2	案例3	案例4	案例5	案例6
最小缝隙宽度/mm	1.46	1.47	1.49	1.48	1.45	1.51
300 kV时局放量/pC	0.77	0.76	0.8	0.76	0.78	0.75

通过改变设计结构,即采用而全屏蔽内环设计,小批量生产了12只绝缘子,未经清洗,直接进行局放测试,经过多次反复测试,局放测试全部合格。

4 结论

1)通过仿真和试验验证,确定局部放电时而不时的发生现象的原因是由于盆式绝缘子浇注体与金属法兰之间的缝隙气隙分布不均匀造成的。

2)在屏蔽内环的屏蔽盲区内,金属法兰的安装的偏移量越大,对局部放电的影响越大。

3)对于已经生产的盆式绝缘子出现上述典型问题时,优先采用调节螺栓的方法来调节缝隙气隙的均匀度来解决上述典型问题;若要根本上解决上述典型问题时,应考虑改变盆式绝缘子的设计结构,即采用全屏蔽内环的方法彻底解决上述典型问题。

参考文献:

- [1] 冯昌远. GIS的运行经验和现场试验[J]. 高压电器, 2000, 36(1):49-53.
FENG Changyuan. The GIS operational experience and field testing[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(1):49-53.
- [2] OKABE S, YUASA S, KANEKO S, et al. Simulation of prop-

- agation characteristics of higher order mode electromagnetic waves in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4):855-861.
- [3] JUDD M D, FARISH O, HAMPTON B F. The excitation of UHF signals by partial in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2):213-228.
- [4] 陈 济. 导电颗粒对绝缘子表面电场和电荷积聚影响的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2006.
- CHEN Ji. Study on the influences of conducting particles on surface electric fields and surface charge accumulation of insulator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [5] 肖 燕, 郁惟镛. GIS中局部放电在线监测研究的现状与展望[J]. 高电压技术, 2005; 31(1):47-50.
- XIAO Yan, YU Weiyong. Present status and prospect of on-line partial discharge monitoring system in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2005; 31(1):47-50.
- [6] WU K, LJICHI T, KATO T, et al. Contribution of surface conductivity to the current forms of partial discharges in voids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005; 12(6):1116-1123.
- [7] 戴罕奇. 温湿度对绝缘子污闪特性的影响[D]. 北京:清华大学, 2011.
- DAI Hanqi. Effect of temperature and humidity on flashover characteristics of polluted insulators[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [8] 周 凯. 绝缘子外绝缘状态在线监测系统的研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
- ZHOU Kai. Research on insulator outer insulation online monitoring system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [9] 汤 伟, 张建宏, 王振良, 等. 环氧树脂绝缘浇注件局部放电滞后特性的探[J]. 高压电器, 2014, 50(11):133-138.
- TANG Wei, ZHANG Jianhong, WANG Zhenliang, et al. Study on the hysteresis characteristic of partial discharge for epoxy resin insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11):133-138.
- [10] 徐 澄, 肖 荣. 大型变压器内部放电故障实例诊断与分析[J]. 高压电器, 2010, 46(11):67-69.
- XU Cheng, XIAO Rong. Diagnosis and analysis of an internal discharge fault in large transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11):67-69.
- [11] 刘云鹏, 王会斌, 王 娟, 等. 高压开关柜局部放电 UH 在线监测系统的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(1):15-17.
- LIU Yunpeng, WANG Huibin, WANG Juan, et al. Research on on-line partial discharge UHF monitoring sytem for high voltage switchboard[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1):15-17.
- [12] 谢从珍, 刘 珊, 刘 芹, 等. 交流 500 kV 复合绝缘子内部缺陷对轴电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 922-928.
- XIE Congzhen, LIU Shan, LIU Qin, et al. Internal defects influence of 500 kV AC composite insulator on the electric field distribution along the axis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4):922-928.
- [13] 汤 伟, 张建宏, 王振良, 等. 环氧树脂绝缘浇注件表面金属涂敷层末端结构设计的探讨[J]. 高压电器, 2014, 50(12):137-140.
- TANG Wei, ZHANG Jianhong, WANG Zhenliang, et al. Study on the terminal structure design of metal-coating for epoxy resin casting insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12):137-140.
- [14] 黎 斌. GIS 盆式绝缘子金属外圈及屏蔽内环设计的必要性[J]. 高压电器, 2012, 48(8):108-113.
- LI Bin. Necessity of design for the metal outer rings and shelding inner ring of GIS basin - type insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8):109-113.
- [15] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- LI Bin. Design of SF₆ high-voltage electric apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [16] 司文荣, 李军浩, 袁 鹏, 等. 气体绝缘组合电器多局部放电源的检测与识别[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 119-126.
- SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. Detection and identification techniques for multi - PD sources in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 119-126.
- [17] 狄 谦, 史艳杰, 杨凤跃. 145 kV 复合套管电场计算与分析[J]. 电气制造, 2008, 9(10):57-59.
- DI Qian, SHI Yanjie, YANG Fengyue. Calculation and analysis for the electric field of 145 kV composite bushing [J]. Electric Manufacture, 2008, 9(10):57-59.
- [18] 张福增, 宋 磊, 屠幼萍, 等. 500 kV 复合绝缘子运行特性分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2536-2541.
- ZHANG Fuzeng, SONG Lei, TU Youping, et al. Analysis of operating performance for the 500 kV composite insulator [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2536-2541.
- [19] 屠幼萍, 陈聪慧, 佟宇梁, 等. 现场运行复合绝缘子伞裙材料的老化判断方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(10):2522 -2527.
- TU Youping, CHEN Conghui, TONG Yuliang, et al. Aging characteristics of shed materials of silicone rubber composite insulators in service[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2522-2527.
- [20] 肖蔚然. 环氧树脂液氮环境中沿面闪络特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(5):40-43.
- XIAO Weiran. The surface flashover characteristics of epoxy in liquid nitrogen[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(5):40-43.
- [21] 江 汛, 王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析[J]. 高

- [17] 周云锋, 杨景刚, 张子阳. 组合电器盆式绝缘子内部气隙缺陷的带电检测与分析[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 112-116.
ZHOU Yunfeng, YANG Jinggang, ZHANG Ziyang. On-line detection and analysis of gas cavity in insulator of gas insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 112-116.
- [18] 幸琳, 姚陈果, 孙才新. GIS局部放电定位的频域时差读取方法[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 13-18.
XING Lin, YAO Chenguo, SUN Caixin. Method of time difference reading based on frequency domain for PD location in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 13-18.
- [19] 郭涛涛. 电力设备X射线检测技术及图像处理技术的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- GUO Taotao. Research on X-ray detection technology and image processing technology of electrical equipment[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [20] 闫斌, 何喜梅, 吴童生, 等. GIS设备X射线可视化检测技术[J]. 中国电力, 2010, 43(7): 45-47.
YAN Bin, HE Ximei, WU Tongsheng, et al. X-ray visualization detection technology for GIS equipment[J]. Electric Power, 2010, 43(7): 45-47.

雷汉坤(1984—), 男, 本科, 工程师, 主要从事变电检修管理工作。

(上接第 223 页)

电压技术, 2004, 30(3): 17-18.

JIANG Xun, WANG Zhongyi. Calculation and analysis for the electric field of composite high voltage bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 30(3): 17-18.

高镔源(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压绝缘技术、智能电器。

张建宏(1965—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事电工材料与绝缘技术研究。

郑雪钦(1975—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为电机控制及电力电子技术应用、新能源控制技术。

石文广(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压绝缘技术。