

应用理化分析和机械性能分析方法探索HGIS故障原因

晏年平¹, 于钦学², 任文娥², 钟力生²

(1. 江西省电力科学研究院, 南昌 330096; 2. 西安交通大学电气绝缘研究中心, 西安 710049)

摘要: 笔者针对一起500 kV HGIS故障,通过能谱、热重等检测手段,分析了故障气室相关盆式绝缘子的物理化学特性;通过水压强度试验,检测了故障气室相关盆式绝缘子的机械强度变化情况,从而查明HGIS设备故障的根本原因主要来自两个方面:①盆式绝缘子制造过程中,制造厂没有严格执行绝缘件材料(环氧树脂、固化剂、三氧化二铝)的理论配方,或绝缘件材料中存在微量杂质,影响了盆式绝缘子的整体质量;②盆式绝缘子抗机械老化能力不足,在持续机械应力作用下,产生细微裂纹等缺陷,在高强电场的进一步作用下,不断劣化最终形成故障。最后,笔者对新出厂HGIS设备提出了质量管控措施,对在运同厂家、同批次HGIS设备提出了故障预防措施。

关键词: HGIS; 盆式绝缘子; 能谱; 热重; 理化性能; 机械强度

中图分类号: TM216; TM63

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)07-0111-06

Exploring Fault of HGIS with Physical-chemical Analysis and Mechanical Performance Analysis

YAN Nianping¹, YU Qinxue², REN Wen'e², ZHONG Lisheng²

(1. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

2. Electric Insulation Research Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For exploring the cause of a fault in 500 kV HGIS, the energy dispersive X-ray detector(EDX) and TGA were used to analyze the physical and chemical properties of the basin-type insulator in faulty gas chamber, and a water pressure strength test was conducted to test the change of mechanical strength of the basin-type insulator. Thus the causes of the HGIS equipment fault are found to include two aspects: 1) In the manufacturing process of the basin-type insulator, the theoretical formulation of the insulating materials (epoxy resin, curing agent, alumina) is not strictly followed, or tiny impurities exist in insulating materials, which affects the overall quality of the basin-type insulators; 2) the mechanical aging resistance of the basin-type insulator is insufficient, which leads to micro-cracks or other defects under continuous mechanical stress and finally causes the fault of the basin-type insulator under further effect of high strength electric field. Moreover, some quality control measures are offered for newly made HGIS equipment, and some fault prevention approaches are proposed for the running HGIS equipment from same manufacturer and same batch.

Key words: HGIS; basin-type insulators; EDX; TGA; physical and chemical properties; mechanical strength

0 引言

SF₆ 气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)具有占地面小、维护工作量小、检

修周期长等特点,被广泛用于电力系统。但现有 GIS 设备运行经验表明,运行电压等级越高,GIS 设备内部故障概率越大^[1]。而且由于 GIS 设备结构复杂且内部充满 SF₆ 气体,给故障后设备解体检修造成巨大不便,造成检修耗时长、停电损失大的局

收稿日期:2013-11-27; 修回日期:2013-12-26

基金项目:国家电网公司科技项目。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC.

面^[2],因此研究有效的 GIS 设备质量管控方法以及运行状态检测手段,提出可靠的故障预防措施具有重要意义。

目前,国内外对于 GIS 设备故障预防措施的研究,主要集中于 GIS 设备运行过程中,通过检测 GIS 设备内部局部放电信号或 SF_6 气体放电分解产物,以判断 GIS 设备健康状况,由此衍生的检测方法大致有 5 类:脉冲电流法^[3-4]、超高频法^[5-12]、超声波法^[13-15]、 SF_6 气体分解物检测法^[16-21]、X 射线成像法^[22-24]。而对于如何运用材料理化性能分析、绝缘件机械性能分析等技术手段,从而从源头上控制好 GIS 设备质量的研究,目前相对较少。

笔者针对一起 500 kV HGIS 故障,通过能谱、热重等检测手段,分析了故障气室相关盆式绝缘子的物理化学特性;通过水压强度试验,检测了故障气室相关盆式绝缘子的机械强度变化情况,从而查明了造成 HGIS 设备故障的根本原因,对新出厂 HGIS 设备提出了质量管控措施,以及对在运同厂家、同批次 HGIS 设备提出了故障预防措施。

1 故障经过

2012 年 12 月 21 日 19 点 46 分, SZS 500 kV 变电站 YS I 线双套线路保护动作, 5022、5023 断路器 B 相单相跳闸, 单相重合不成功, 跳三相。对侧 YX 500 kV 变电站 5032、5033 断路器 B 相单相跳闸, 单相重合不成功, 跳三相。YS I 线接线示意图见图 1。

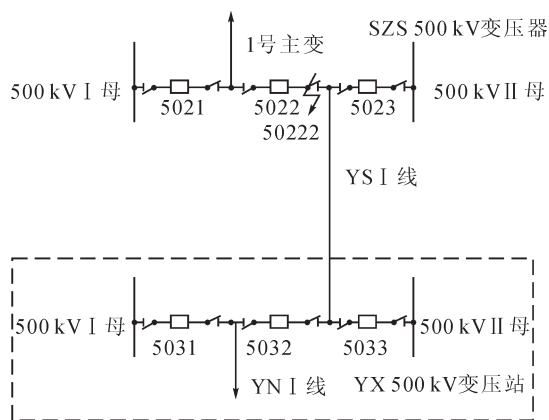


图 1 500 kV YS I 接线示意图

Fig. 1 500 kV YS I wiring schematic diagram

故障现场检查发现 YS I 线 50222 B 相隔离开关罐与电流互感器罐之间盆式绝缘子部位,有大量黑色胶状物溢出,并滴落在电流互感器罐体外部,见图 2。初步认定,50222 B 相隔离开关部位气室内发生放电故障,立即进行隔离。



图 2 故障气室现场检查情况

Fig. 2 Fault gas chamber of on-site inspection situation

2 故障设备基本情况及现场调查分析

2.1 故障设备基本情况

SZS 变电站 500 kV 一次设备采用复合式组合电器 (HGIS), 型号为 ZHW-550, 500 kV YS I 线于 2010 年 4 月 15 日投入运行。

2.2 故障现场调查分析

故障时, SZS 500 kV 变电站无检修作业, 故障线路无操作, 查阅雷电定位系统及避雷器动作记录, 故障前后半小时内变电站及 YS I 线范围均无落雷, 由此可以排除由于操作过电压及雷电过电压引起的设备故障。

查阅变电站巡视记录, 故障前 5022 断路器 B 相各气室压力正常。故障初始 19 时 46 分 50222 B 相隔离开关气室未出现 SF_6 压力低告警, 而至 20 时 30 分监控后台报“5022 断路器 B 相 2 号气室 SF_6 气体压力降低报警”, 气压降至告警值, 故障气室部位有刺鼻气味。由此表明, 故障气室气压监测系统工作正常, 且故障前各气室 SF_6 气体压力正常。

3 YS I 线跳闸原因初步分析

为查明 YS I 线跳闸原因, 解开 50222 B 相隔离开关传动机构与 VT 罐的连接螺栓, 发现 50222 B 相隔离开关 VT 罐盆式绝缘子沿面有贯穿性烧蚀凹槽, 面积大小约 20 cm×25 cm 绝缘子整块破裂脱落; 烧蚀凹槽凸面较宽, 平均宽度约为 4 cm, 其中靠 CT 筒壁一侧最宽, 约 6 cm; 烧蚀凹槽靠 CT 筒壁一侧较深, 其中与底部屏蔽罩烧穿对应部位彻底烧穿, 见图 3, 气室内壁附着大量黑色粉状放电分解物, 烧蚀的盆式绝缘子安装部位示意图见图 4。

综合现场检查情况, 分析 YS I 线故障跳闸原因是: 50222 B 相隔离开关气室 VT 罐盆式绝缘子贯穿性击穿炸裂, 致使 YS I 线接地短路。黑色胶状物为 HGIS 罐体盆式绝缘子处密封圈经电弧灼伤高温溶化形成, 并从罐体内泄漏出来。放电通道为盆式绝缘子嵌件沿盆式绝缘子上表面至 CT 罐基座法兰, 见图 4。

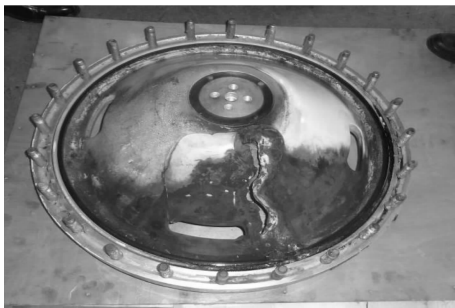


图3 2XA090708-142 盆式绝缘子

Fig. 3 2XA090708-142 basin-type insulator

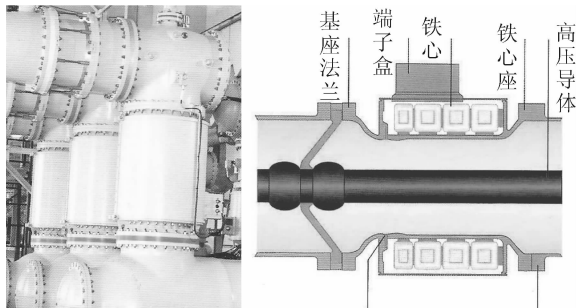


图4 放电部位示意图

Fig. 4 Schematic diagram of PD position

4 故障气室相关盆式绝缘子理化及机械性能分析

为查找 50222 B 相隔离开关气室 VT 罐盆式绝缘子贯穿性击穿炸裂的原因,文中选取故障气室相关盆式绝缘子进行了理化分析和机械性能测试。

4.1 故障气室相关盆式绝缘子安装位置和编号

用作测试的盆式绝缘子共 3 个, 安装位置见图 5, 编号如下:

- 1) 盆式绝缘子 5KBj.780.089.G3 (支撑), 编号: 1XA090714-96;
- 2) 盆式绝缘子 5KBj.780.089.G3 (支撑), 编号: 2XA090708-142(故障盆);
- 3) 盆式绝缘子 5KBj.780.089.G1 (隔板), 编号: 3XA090507-138。

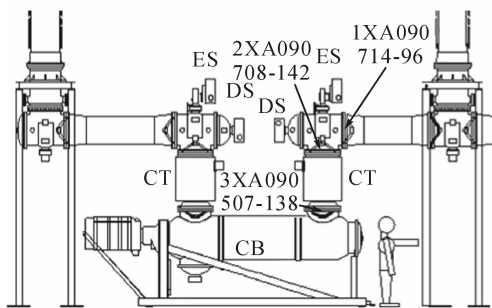


图5 盆式绝缘子安装位置

Fig. 5 Installation position of basin-type insulator

4.2 相关盆式绝缘子理化分析和机械性能测试方案

笔者针对故障气室相关盆式绝缘子制定如下

试验方案:①采用水压强度试验,检测盆式绝缘子整体机械性能变化情况;②采用理化分析方法,包括热重和能谱试验,考核盆式绝缘子的制造工艺及绝缘件制造材料的质量。

1)2XA090708-142 盆式绝缘子为故障盆式绝缘子,由于该盆式绝缘子已破损,仅能取样进行热重、能谱试验。

2)1XA090714-96 盆式绝缘子为支撑盆式绝缘子,由于该盆式绝缘子为通盆,故不能进行水压强度试验,只能取样进行热重、能谱试验。

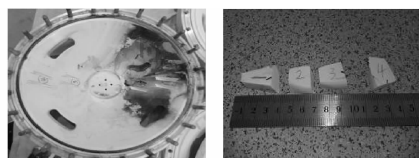
3)3XA090507-138 盆式绝缘子为隔板盆式绝缘子,安装于 2XA090708-142 故障盆式绝缘子的正下方,考虑到故障时跌落的碎屑及放电分解物势必影响其能谱测试结果的准确性,故对该盆式绝缘子先进行水压强度试验,后取样进行热重试验,不做能谱试验。

试验前,查阅了盆式绝缘子制造材料的配方,各部位盆式绝缘子配方相同,且均为环氧树脂、三氧化二铝和固化剂,按质量比 100:300:40 制作。此外,还查阅了 3XA090507-138 盆式绝缘子 2009 年出厂时的水压强度试验报告,报告显示该盆式绝缘子出厂时通过了 1.21 MPa/1 min 水压强度试验。

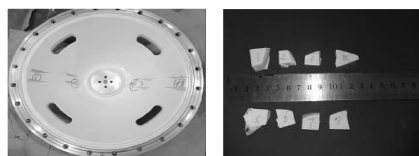
4.3 盆式绝缘子理化分析

4.3.1 取样方式

据设备制造商证实,出厂时 3 个盆式绝缘子的工艺和配方完全相同。因此,为确保该次试验数据的可靠性,理化分析取样方式也完全一致,均在一个纵向剖面均匀取样,每个盆式绝缘子取 4 个样本,见图 6。



(a) 2XA090708-142盆式绝缘子取样部位及试样尺寸



(b) 1XA090714-96盆式绝缘子取样部位及试样尺寸



(c) 3XA090507-138盆式绝缘子取样部位及试样尺寸

图6 3个盆式绝缘子取样部位及试样尺寸

Fig. 6 Sampling position and sample size of basin-type insulator

4.3.2 能谱测试结果分析

笔者采用能谱分析检测各盆式绝缘子中元素种类、各元素的重量比及原子百分比。1XA090714-96 盆式绝缘子的能谱图见图 7。

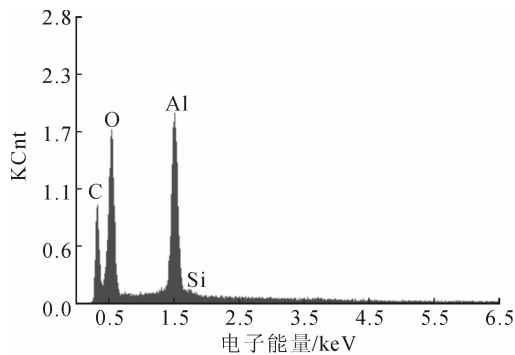


图 7 1XA090714-96 盆式绝缘子能谱图

Fig. 7 1XA090714-96 basin-type insulator EDX

1XA090714-96 盆式绝缘子的元素成分种类、重量百分比以及原子数量百分比见表 1。

表1 1XA090714-96盆子元素种类、重量和原子百分比

Tab. 1 1XA090714-96 insulator element type, weight, and atomic percentage

元素	重量/%	原子/%
C	37.61	47.38
O	45.84	43.35
Al	16.12	9.04
Si	0.43	0.23

由表 1 可知,1XA090714-96 盆式绝缘子有碳、氧、铝、硅 4 种元素,其中碳、氧两元素重量占绝对多数,其次为铝元素,只有微量硅元素。碳、氧、铝 3 种元素重量比为 2.33:2.84:1,原子个数百分比为 5.24:4.80:1。

取自 2XA090708-142 故障盆式绝缘子完好部位样本的能谱图见图 8。

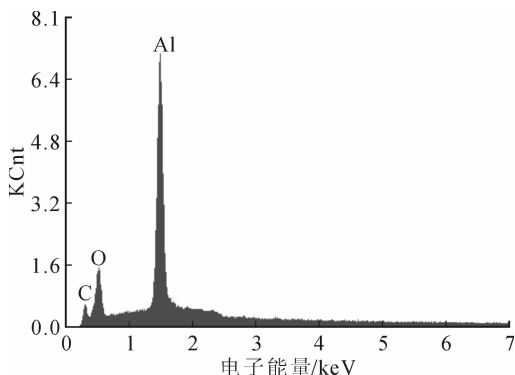


图 8 2XA090708-142 故障盆式绝缘子完好部位能谱图

Fig. 8 2XA090708-142 EDX of fault insulator in good part

2XA090708-142 故障盆式绝缘子完好部位样本元素成分种类、重量百分比以及原子数量百分比

见表 2。

表2 2XA090708-142故障盆子完好部位样本的元素种类、重量和原子百分比

Tab. 2 2XA090708-142 The element type, weight, and atomic percentage of fault insulator in good part

元素	重量/%	原子/%
C	24.57	36.40
O	30.63	34.06
Al	44.80	29.54

由表 2 可知,2XA090708-142 故障盆式绝缘子完好部位样本只有碳、氧、铝 3 种元素,重量比为 0.55:0.68:1,原子个数百分比为 1.23:1.15:1。

综合比较 1XA090714-96 盆式绝缘子和 2XA090708-142 故障盆式绝缘的能谱测试结果发现:

1)碳、氧、铝 3 种元素重量及原子个数百分比相差很大,见表 3,说明两个盆式绝缘子的配方存在差异,不符合制造商提出的各类盆式绝缘子配方一致的说法。

表 3 盆式绝缘子能谱测试结果比较

Tab. 3 Insulator EDX comparison of testing results

编号	C、O、Al 3 元素重量比	C、O、Al 3 元素原子个数比
1XA090714-96	2.33:2.84:1.00	5.24:4.80:1.00
2XA090708-142	0.55:0.68:1.00	1.23:1.15:1.00

2)1XA090714-96 盆式绝缘子检测存在微量的硅元素,而据厂家提供的配方,盆式绝缘子不应含有碳、氧、铝元素外的其他元素,说明 1XA090714-96 盆式绝缘子制造过程中混入了微量杂质。

4.3.3 热重测试结果分析

热重分析用于检测被测物质重量随温度的变化情况,用以估算制造材料的配方。3 个盆式绝缘子的热重分析结果见图 9。

对比图 9(a)、(b)和(c),3 个盆式绝缘子正常部位样本的热重测试结果基本一致。以图 9(a)为例,完好的 1XA090714-96 盆式绝缘子的热重曲线只有一个失重台阶,在 204 ℃时开始分解,至 560 ℃左右时热分解完成,此时剩余物质重量基本保持不变,而进一步加热至 1 100 ℃时,15 mg 试验样本还剩余 11.16 μg。

而根据制造厂提供的盆式绝缘子配方(环氧树脂、三氧化二铝和固化剂质量比为 100:300:40),认为样本中环氧和固化剂两种有机材料在 204 ℃时开始分解,至 560 ℃左右时剩下的均应为三氧化二铝,此时,可以推算出 15 mg 样本剩余三氧化二铝应为 10.23 mg。而实际剩余的三氧化二铝质量为 11.16 mg,较理论值多 0.93 mg。

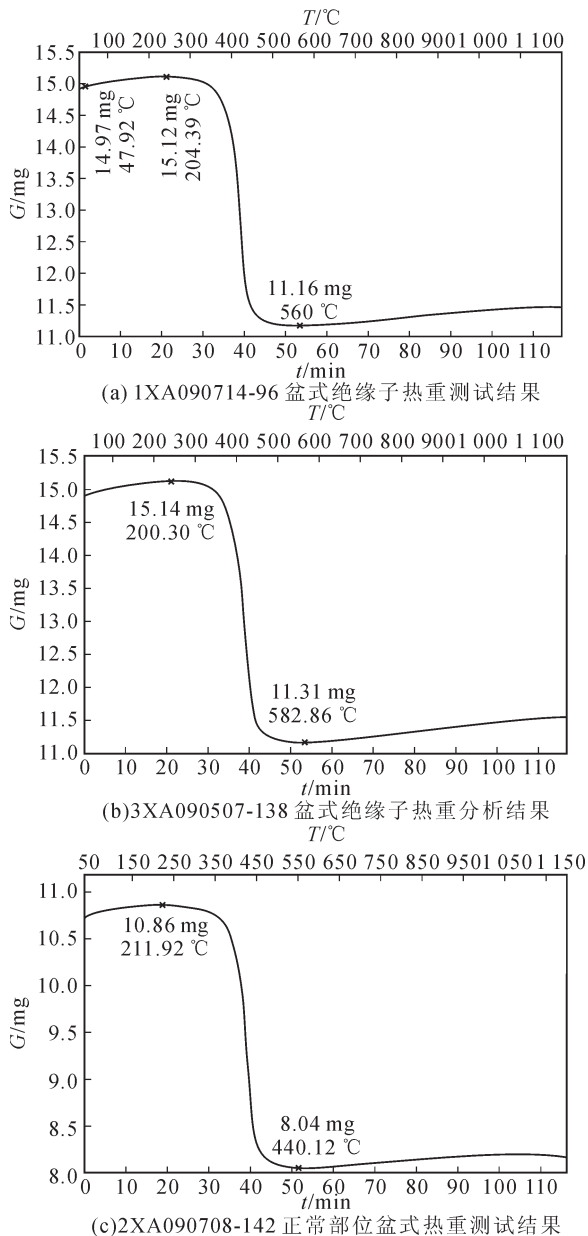


图 9 3 个盆式绝缘子的热重测试结果

Fig. 9 TG testing results of three insulators

由此进一步说明制造厂在盆式绝缘子的制造过程中没有严格按照理论配比混料或盆式绝缘子制造材料中掺杂有微量杂质(1 100 °C不能分解)。

4.4 盆式绝缘子机械性能变化情况分析

盆式绝缘子起机械支撑及电气绝缘作用,通常需要长期承受来自高压气体或导电部件重量的压力。而长期负重可能使盆式绝缘子产生机械疲劳,影响盆式绝缘子的机械强度,轻则使盆式绝缘子细微弯曲,重则使盆式绝缘子逐渐开裂。

因此,为检测盆式绝缘子在持续负重作用下机械强度变化情况,笔者选取 3XA090507-138 盆式绝缘子再次进行水压强度试验。试验结果显示该盆式绝缘子在 1.2 MPa 时即破裂,如图 6(c)。而该盆式绝

缘子出厂例行试验时经受住了 1.21 MPa 压力考核,此外,该盆式绝缘子设计破坏压力高达 1.86 MPa。由此说明该盆式绝缘子在长期负重作用下,存在一定程度的机械老化,机械强度下降明显。

5 2XA090708-142 盆式绝缘子故障原因分析

综合以上分析,认为 2XA090708-142 盆式绝缘子的故障原因主要有两个方面:

1)盆式绝缘子制造过程中,制造厂没有严格执行绝缘件材料(环氧树脂、固化剂、三氧化二铝)的理论配方,或绝缘件材料中存在微量杂质,影响了盆式绝缘子的整体质量。

2)盆式绝缘子抗机械老化能力不足,在持续机械应力作用下,产生细微裂纹等缺陷,在高压电场的进一步作用下,不断劣化最终形成故障。

而盆式绝缘子制造材料的配方对盆式绝缘子的机械强度及抗机械老化能力的影响,以及绝缘件材料质量、杂质对于盆式绝缘子整体质量的影响将是文中进一步研究的重点。

6 结论

综合以上原因分析,针对盆式绝缘子等关键绝缘件出厂质量控制,笔者建议:

- 1)严格控制环氧树脂、三氧化二铝以及固化剂等绝缘件材料的纯度,严禁混入杂质。
- 2)严格执行绝缘件材料理论配比,以确保盆式绝缘子的机械强度和绝缘强度。
- 3)严格控制绝缘件材料的混料工艺,确保绝缘件材料分布均匀,使绝缘件内部各部分冷却速率一致,杜绝气泡、裂纹等缺陷。

针对在运的同厂家 HGIS 设备,建议立即开展以下工作:

1)SF₆ 气体成分分析能较为有效地判断 HGIS 设备内部是否存在放电缺陷,应充分利用停电计划,做好 SF₆ 气体成分分析工作,有条件可以带电取气进行 SF₆ 气体成分分析。

2)缩短超高频、超声波等带电测试周期,严密监视 HGIS 各气室是否存在异常放电现象。

参考文献:

- [1] CIGRE Working Group 33/32-12. Insulation CO-ordination of GIS: return of experience, on site tests and diagnostic techniques[J]. Electra, 1998, 176(2): 67-95.
- [2] 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.
- [3] KIM J B, KIM M S, PARK K S, et al. Development of monitoring and diagnostic system for SF₆ gas insulated switchgear[C]//Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S.l.]: IEEE, 2002: 453-456.
- [4] IEC Pub.60270:1981 Partial discharge measurements[S]. 1981.
- [5] PEARSON J S, HAMPTON F B, SELLARS A G. A continuous UHF monitor for gas-insulated substations[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1991, 6(3): 469-478.
- [6] 李 信, 李成榕, 丁立健, 等. 基于超高频信号检测 GIS 局放模式识别[J]. 高电压技术, 2003, 29(11): 26-30.
LI Xin, LI Chengrong, DING Lijian, et al. Identification of PD patterns in gas insulated switchgear (GIS) based on UHF signals[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(11): 26-30.
- [7] 龙锦壮, 王克涛, 赵 鑫, 等. 一种工程实用的 GIS 定量检漏方法[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 67-70.
LONG Jinzhuang, WANG Ketao, ZHAO Xin, et al. A practical engineering method for GIS leaking quantitative detection[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 67-70.
- [8] 李兴旺, 卢启付, 李端姣, 等. GIS 局部放电特高频在线监测系统传感器配置方案研究[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 70-74.
LI Xingwang, LU Qifu, LI Duanjiao, et al. Transducers arrangement of the UHF-PD online monitoring system for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 70-74.
- [9] 印 华, 胡攀峰, 张小勇, 等. 用超高频诊断 GIS 中固定金属微粒导致的局部放电[J]. 高压电器, 2004, 40(6): 409-411.
YIN Hua, HU Panfeng, ZHANG Xiaoyong, et al. The application of UHF detection to partial discharge in GIS caused by fixed metal particle[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(6): 409-411.
- [10] 顾 乐, 陈 隽, 刘文浩, 等. GIS 局部放电圆板型内置传感器性能影响因素的研究[J]. 高压电器, 2012, 48(2): 55-59.
GU Le, CHEN Jun, LIU Wenhao, et al. Impact factors of disc sensor for partial discharge in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 55-59.
- [11] GROEGER H J, ANTHONY A, MARIE B L. Applications of ultrasonic NDE techniques for location and characterization of defects in epoxy composite GIS spacers[C]//IEEE International Symposium on Conference Record of the 1990. [S.l.]: IEEE, 1990: 443-444.
- [12] 孙曙光, 陆俭国, 俞慧忠, 等. 基于超高频法的典型 GIS 局部放电检测[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 7-12.
- SUN Shuguang, LU Jianguo, YU Huizhong, et al. Detection of typical GIS partial discharge based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 7-12.
- [13] LUNDGAARD L E. Partial discharge-XⅢ: Acoustic partial discharge detection fundamental considerations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(4): 25-31.
- [14] 李德军, 沈 威, 郭志强. GIS 局部放电常规检测和超声波检测方法的应用比较[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 99-103.
LI Dejun, SHEN Wei, GUO Zhiqiang. Application comparison between conventional and ultrasonic detection methods for GIS partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 99-103.
- [15] 张天辰, 胡 岳. 基于虚拟仪器的 GIS 局部放电声电联合检测系统[J]. 高压电器, 2011, 48(11): 43-49.
ZHANG Tianchen, HU Yue. Combined ultrasonic and electrical detection system for GIS partial discharge based on virtual instrument[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 48(11): 43-49.
- [16] KURTE R, HEISE H M. Fourier-transform infrared spectroscopy for quantification of Hydrogen fluoride in Sulfur hexafluoride decomposed by partial discharges and sparks[J]. Journal of Molecular Structure, 2003(651-653): 555-559.
- [17] KURTE R, HEISE H M, KLOCKOW D. Quantitative infrared spectroscopic analysis of SF₆ decomposition products obtained by electrical partial discharges and sparks using PLS-calibrations[J]. Journal of Molecular Structure, 2001(565-566): 505.
- [18] 骆立实, 姚文军, 王 军, 等. 用于 GIS 局部放电诊断的 SF₆ 分解气体研究[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 225-230.
LUO Lishi, YAO Wenjun, WANG Jun, et al. Research on partial discharge diagnosis of GIS by decomposed gas of SF₆[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 34(5): 225-230.
- [19] 李云阁, 尚 勇, 施 荣, 等. 750 kV GIS 中 VFTO 现场实测波形分析[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11): 25-29.
LI Yunge, SHANG Yong, SHI Rong, et al. Analysis of VFTO waveforms on-site measured on 750 kV GIS[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(11): 25-29.
- [20] 季严松, 王承玉, 杨 韧, 等. SF₆ 气体分解产物检测技术及其在 GIS 设备故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 100-103.
JI Yansong, WANG Chengyu, YANG Ren, et al. Measuring technique of SF₆ decomposition products and its application to fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 100-103.
- [21] 姚 强, 王 勇, 刘 永. SF₆ 气体中杂质含量分析在 GIS 故障分析判断中的应用[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 53-54.
YAO Qiang, WANG Yong, LIU Yong. The application of

- 分布影响的研究[J]. 高压电器, 2006, 42(4): 262-264.
- WEI Lijing, WANG Baishi, WANG Yixin, et al. Effects of shielding rings on the electric field distributions of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(4): 262-264.
- [14] 孙恒峰, 张 扬, 孙正华, 等. 均压环的漆膜对断口均压电容器介损测量的影响[J]. 高压电器, 2010, 46(8): 70-71.
- SUN Hengfeng, ZHANG Yang, SUN Zhenghua, et al. Influence of grading ring's paint film on measurement of grading capacitor's dielectric loss[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 70-71.
- [15] 杨 杰, 吉晓波, 周国华, 等. 均压装置对复合绝缘子电气性能的影响[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 24-25.
- YANG Jie, JI Xiaobo, ZHOU Guohua, et al. The influence of voltage grading fittings on electrical performance of composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(2): 24-25.
- [16] 杨 帆, 姚德贵, 彭 卉, 等. 高压变电站工频电磁场屏蔽效能测试及分析[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 85-88.
- YANG Fan, YAO Degui, PENG Hui, et al. Measurement and analysis of shielding effectiveness for power frequency electromagnetic field in HV substation[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 85-88.
- [17] 司马文霞, 杨 庆, 孙才新, 等. 基于有限元和神经网络方法对超高缝合成绝缘子均压环结构优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 115-120.
- SIMA Wenxia, YANG Qing, SUN Caixin, et al. Optimization of corona ring design for EHV composite insulator using finite element and neural network method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 115-120.
- [18] 黄道春, 阮江军, 刘 佳, 等. 330 kV 绝缘子串电压分布和屏蔽环位置的优化[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 91-94.
- HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, LIU Jia, et al. Calculation of voltage distribution along insulator string of 330 kV transmission line and position optimization of grading ring[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 91-94.
- [19] 薄学微, 卞星明, 王黎明, 等. 750 kV 交流复合绝缘子均压环优化设计[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 5-8.
- BO Xuewei, BIAN Xingming, WANG Liming, et al. Optimal design of grading rings for 750 kV AC composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 5-8.
- [20] 周志成, 何俊佳, 陈俊武, 等. 均压环改善绝缘子串电压分布研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 45-48.
- ZHOU Zhicheng, HE Junjia, CHEN Junwu, et al. Research on improving the voltage distribution of the insulator string by voltage balance slices[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 45-48.
- [21] DL/T 760.3—2012 均压环, 屏蔽环和均压屏蔽环[S]. 2012.
- DL/T 760.3—2012 Grading ring, shielding ring, grading and shielding ring[S]. 2012.
- [22] GB/T 2317.2—2008 电力金具试验方法[S]. 2008.
- GB/T 2317.2—2008 Test method for electric power fittings [S]. 2008.
- 秦 睿(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电气设备研究。
- 高 健(1980—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电气设备金属材料分析研究。

(上接第 116 页)

- impurity analysis of SF₆ for fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 53-54.
- [22] 闫 斌, 何喜梅, 王志惠, 等. X 射线数字成像检测系统在 GIS 设备中的应用[J]. 高压电器, 2010, 46(11): 89-91.
- YAN Bin, HE Ximei, WANG Zhihui, et al. Application of X-ray digital imaging defect detection system in GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11): 89-91.
- [23] 李云阁, 侯清川, 周 斌, 等. 750 kV GIS 中 VF₅₀ 峰值[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(12): 8-11.
- LI Yunge, HOU Qingchuan, ZHOU Bin, et al. VF₅₀ magnitude values on the 750 kV GIS[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(12): 8-11.
- [24] 朱作欣, 朱全胜, 马 超, 等. 基于 MapX 的电力系统 GIS 人机交互设计[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(12): 28-33.
- ZHU Zuoxin, ZHU Quansheng, MA Chao, et al. Design of GIS human-computer interaction based on MapX for electric power system[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(12): 28-33.
- 晏年平(1985—), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为高压电器设备绝缘分析与诊断技术。
- 于钦学(1960—), 男, 博士, 主要从事电气绝缘测试技术、绝缘材料老化及寿命评估等方面的研究。
- 任文娥(1960—), 女, 高级工程师, 主要从事理化分析绝缘材料老化与寿命评估、理化和微观分析。
- 钟力生(1961—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事电介质与电气绝缘技术、聚合物光电材料及器件、生物电介质及应用等方面的研究。