

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.09.013

基于超高频特高频法的 GIS 局部放电特征图谱提取与研究

张广东¹, 秦睿¹, 张忠元², 孙亚明¹, 王峰², 杨萍¹

(1. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730500; 2. 国网甘肃省电力公司, 兰州 730050)

摘要: 局部放电检测对发现 GIS 设备内部潜在的缺陷发挥着重要作用,不同类型的放电对 GIS 的危害程度存在明显差别,正确识别 GIS 的放电类型对于保证设备安全运行、评估绝缘状况和制定检修策略具有十分重要的意义。文中研究了三相共筒式 GIS 在运行中常见的故障类型,根据具体的试验条件,设计了 4 种典型的绝缘缺陷模拟常见的 GIS 故障类型,并通过采用超高频特高频(UHF)法对存在故障的 GIS 进行了局部放电检测,分析了 4 种绝缘缺陷放电的典型图谱,为 GIS 的稳定运行和故障的及时检修提供了依据。

关键词: GIS; 绝缘缺陷; 局部放电; 超高频特高频法; 特征图谱

Extraction and Analysis of Characteristic Spectrum of Partial Discharge in GIS Based on UHF Method

ZHANG Guangdong¹, QIN Rui¹, ZHANG Zhongyuan²,
SUN Yaming¹, WANG Feng², YANG Ping¹

(1. Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730500, China;
2. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Detection of partial discharge(PD) is very important role for diagnosing and assessing insulation state of GIS. Different types of PD harm GIS to different degrees, so identification of PD type is vital to safe and reliable operation, insulation condition evaluation, and rational maintenance strategy of GIS. This paper studies the familiar fault types in the operation of three-phase-common GIS, designs four typical insulation defects according to the test conditions, and conducts PD detection for faulty GIS with the UHF method. Typical PD spectrums of four insulation defects are analyzed. This study may provide a basis for stable operation and timely maintenance of GIS.

Key words: GIS; insulation defect; partial discharge(PD); UHF method; characteristic spectrum

0 引言

GIS 设备以其结构紧凑、占地面积小、元件全部密封不受外部环境干扰、运行可靠性高、检修周期长、维护工作量小、运行费用低等优点,在电力系统中得到了广泛的应用,基本覆盖了中国现有的全部电压等级。由于 GIS 是大型的全封闭组合机构系统,一旦发生故障,停电检修时除需要投入大量的人力、物力外,还需要较长的检修工期,这势必给社会、企业造成重大的损失^[1-2]。

研究表明,引起 GIS 发生故障的原因主要是其内

部存在各种各样的缺陷,这些缺陷的存在畸变了 GIS 内部的电场,使得某些部位的电场过于集中而发生局部放电。虽然局部放电一般不会引起绝缘的穿透性击穿,但可以导致绝缘介质的局部损坏,长期的局部放电在一定条件下会导致绝缘恶化甚至击穿^[2-3]。因此对 GIS 设备进行局部放电带电检测和在线监测,不但能够发现许多有关制造与安装方面的问题,还能了解设备的绝缘状况,确定绝缘故障的原因及严重程度,对电网的安全运行具有非常重要的意义^[1-4]。

1 GIS 局部放电检测方法

GIS 发生局部放电过程中都会产生电脉冲、超

收稿日期:2016-03-07; 修回日期:2016-05-19

声波、电磁辐射、光、局部发热、化学反应等现象,相对于这些现象,可以利用脉冲电流法、超声波法、特高频法、光测法、热检测法和化学检测法等手段对局部放电信号进行检测^[5-14]。

1.1 脉冲电流法

脉冲电流法是通过测量阻抗在耦合电容侧或通过 Rogowski 线圈从 GIS 设备的接地点测得局部放电时产生的脉冲电流。该方法的优点是灵敏度高、可定量分析,但由于现场存在严重的电磁干扰,对检测结果的精度和准确性影响较大,不利于对局部放电信号的甄别和故障诊断,制约了其在 GIS 局部放电带电检测中的应用^[15-16]。

1.2 特高频法

GIS 内部的电场强度为几十甚至几百 kV/cm,在局部放电发生瞬间的 du/dt 很大。GIS 局部放电的一个显著特点是电流脉冲上升时间及持续时间仅为纳秒级,等值频率在特高频(UHF)范围,300 MHz~3 GHz,而且会激发出电磁波。UHF 法通过检测 GIS 局部放电产生的特高频电磁波对局部放电进行评估^[7-8]。该方法最主要的优点是抗干扰能力强,灵敏度高,通过对接收到的电磁波进行分析,可实现对局部放电源的定位和设备的故障诊断。

1.3 超声波法

GIS 设备内部产生局部放电信号时,会产生冲击的振动及声音。超声波法(AE,又称声发射法)通过在设备腔体外壁上安装超声波传感器来测量局部放电信号^[9]。该方法的特点是传感器与电力设备的电气回路无任何联系,不受电磁干扰,但在现场使用时易受周围环境噪声或设备机械振动的影响。另外,由于超声信号在电力设备常用绝缘材料中的衰减较大,检测精度下降,且无法对放电量的大小定量分析,致使超声波的检测范围有限,但其具有定位准确度高的优点。

1.4 化学法

GIS 发生局部放电时会导致 SF_6 气体发生分解并和 GIS 中的微量水分、氧气发生化学反应,生成不同的分解产物,化学检测法就是通过检测气体生成物的各组分含量来确定局部放电的严重程度^[10-11]。但 GIS 中的吸附剂和干燥剂可能会影响该方法的测量。另外,断路器正常开断时的电弧、局放的严重程度等因素对判断的准确性影响较大,因此通常作为分析 GIS 的绝缘故障的辅助方法。

1.5 光学法

GIS 内部出现绝缘故障时,会发生电晕、闪络或电弧不同形式的放电,在放电过程中,电子不断释放

能量,向外辐射声、硝酸和臭氧等。光学检测法通过采用光学传感器来接收局部放电产生的光信号用以判断内部是否发生局部放电^[12]。由于光信号易被 SF_6 气体和玻璃强烈吸收、光子容易发生反射、接收效果受外部自然环境影响较大等因素,使检测灵敏度降低,应用范围受限。

近年来,国内外在 GIS 局部放电的检测和故障诊断方面也开展了大量的研究工作,取得多项显著成果^[13-18],推动了对现场带电检测和在线监测技术的发展和运用。通过实验室模拟检测和现场时间,对各种 GIS 局部放电检测方法的特点和适用场合进行了深入的分析。普遍认为,在 GIS 局部放电的在线监测和带电检测中,UHF 和超声波法较为适用。但在工厂试验中,由于脉冲电流法能够对局部放电量进行定量的分析,并且是 IEC 60270 和 GB/T 7354—2003 标准规定试验方法,因此较为常用^[18-21]。

文中建立了一种 110 kV 三相共筒式 GIS 局放故障模拟检测系统,在真实的 GIS 中分别模拟了高压导体上金属尖端、自由金属颗粒、绝缘子表面金属异物、绝缘子内部气泡 4 种典型绝缘缺陷。通过采用 UHF 法对 4 种缺陷产生的局部放电信号进行了检测,并对试验结果进行了深入的分析,得到了 4 种典型绝缘缺陷的放电图谱。

2 GIS 局放故障模拟检测系统

2.1 试验设备

试验设备由无局放试验电源、调压器、升压变压器、耦合电容器组成,电源容量 50 kVA,试验变压器输出电压 0~350 kV 可调,并配备有 SF_6 气体充装、回收装置,试验设备在额定电压下无局放。检测地点是某 GIS 试验大厅,试品采用 110 kV 三相共筒式 GIS,典型绝缘缺陷模拟检测系统见图 1。



图 1 GIS 模拟试验装置

Fig. 1 GIS experimental setup

2.2 检测仪器

UHF 局部放电检测仪器采用 ICMsystem8 系列特高频局放测试系统,见图 2,该设备特高频传感器

检测信号带宽 300 MHz~2.5 GHz。检测系统由绑带式 UHF 传感器、UHF 信号放大器、高速数据采集系统及局放信号检测分析系统组成,见图 3。



图 2 8 通道局放数据采集系统

Fig. 2 Data acquisition system for PD



图 3 局放数据检测分析系统

Fig. 3 Detection and analysis system for PD

2.3 检测方法

试验时,预先打开 GIS 盆式绝缘子浇注口金属屏蔽,将绑带式 UHF 传感器贴于浇注口,连接 UHF 放大器与信号电缆至八通道数据采集系统,数据采集系统与计算机通过 RS232 接口连接即可实现局放数据采集与分析处理,测试同步信号取自加压设备分压器低压臂,见图 4。



图 4 特高频传感器原理图

Fig. 4 Principle diagram of UHF sensor

该 GIS 典型故障模拟检测的目的是得到一套基于 PDSG 局放检测仪器的 GIS 设备典型故障下的局放特征图谱,进而建立 GIS 设备不同缺陷类型的局部放电指纹库,指导现场利用该仪器进行 GIS 局部放电的带电检测和缺陷识别。通过比较检测仪器提供的各种图谱,最终选择以振幅相位发生率图(PRPD)和三维图谱建立局放特征指纹库,这两种图谱都可以较好地表征出各类型局部放电故障的特征。

2.4 数据分析及分类

试验过程中检测到的局部放电数据由软件直接

转换成可视化的图形:PRPD 图形提供了局放信号的幅值,放电发生率及其的相位分布,三维图谱提供了局放信号的幅值,放电次数及其相位的分布。

3 GIS 典型缺陷局部放电试验

3.1 高压导体上金属尖端

GIS 内导体机械加工时留下的尖端或毛刺,是设备内部高压尖端故障的主要类型。这种缺陷往往导致尖端附近的局部场强过高,引发典型的尖板电极流注电晕放电^[14]。该故障在工作电压下通常表现出较为稳定的局部放电,但在雷电过电压以及 VFTO 作用下,可能引发击穿性故障。

该试验使用直径 2 mm,长度为 9.7 mm 的铜丝制作成高压导体上的金属尖端缺陷。将铜丝的一端用锡箔纸包裹以使其紧贴在导体外表面,铜丝另一端磨成针尖状,针尖曲率半径约 0.15 mm,最后用干燥的 3M 绝缘胶带将其固定在导体表面,模拟的缺陷见图 5。

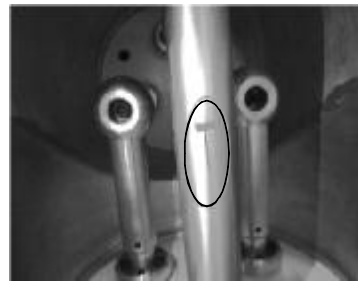


图 5 金属尖端缺陷照片

Fig. 5 Photo of metal point in GIS

3.2 自由金属颗粒

自由金属颗粒是 GIS 中的常见缺陷,也是导致 GIS 故障的最主要原因^[17-18]。当 GIS 腔体中存在自由金属颗粒时,它们在外电场的作用下感应电荷以获得足够的电场能量,并在电场力的作用下跳动、位移。如果获得的能量足够大,微粒可能越过外壳和高压导体的间隙移动到有损绝缘的地方,引起局部放电甚至击穿。

试验中制作的自由金属颗粒模型长度为 1 mm,直径为 0.4 mm 的小铜粒 8 颗,长度为 2 mm;直径 0.4 mm 的小铜粒 4 颗,随机均匀地放置于导体下方的 GIS 外壳内表面,并标注其位置。制作的金属颗粒及其在 GIS 中的位置见图 6。

3.3 绝缘子表面金属异物

该类缺陷通常来自于施工工艺控制不良,施工环境条件差等,从而使绝缘子表面有少许铁屑、灰尘覆盖^[2]。在工作电压下,可能引发较强的电磁辐射和超声波,使 SF₆ 气体分解,形成腐蚀性分解物和微



图6 自由金属颗粒缺陷照片

Fig. 6 Photo of free metal particle in GIS

粒,从而加速GIS内部绝缘劣化,污染绝缘子表面直至造成绝缘故障。

该试验制作了绝缘子表面金属异物缺陷模型。试品绝缘子采用真空浇铸的环氧盆式绝缘子,用3M绝缘胶带将长14.6 mm,宽2.2 mm的铜片固定在绝缘子的表面,环氧绝缘子安装在GIS底端,制成并安装后的缺陷见图7。



图7 绝缘子上金属异物

Fig. 7 Photo of metal foreign body on insulator

3.4 绝缘子内部气泡

GIS设备绝缘子采用真空浇注的方式进行制作,在浇注过程中如果真空度不够或者进入了微量气体,会在浇注成型的绝缘子内部产生微量气泡。气泡一旦形成,由于环氧的介电常数大于空气的介电常数,所以气泡会承受很高的场强,导致气泡发生放电,引起绝缘子产生局部放电^[2]。局部放电一旦形成,就会对绝缘产生长期的电气和物理破坏,最终导致绝缘丧失,致使GIS发生事故。

试验中所用的绝缘子采用真空浇注、经验证无任何绝缘缺陷的完好盘式绝缘子。为模拟该类型缺陷,对环氧绝缘子开一深度为15.7 mm直径为1.3 mm的气隙孔,然后再用相同材料的环氧树脂将小孔密封、凝固,制成并安装后的缺陷见图8。为保证气孔在试验过程中不会由于气压差而破裂,试验后检查气孔完好无损。

4 GIS典型缺陷局部放电谱图

在上述设计的4种典型绝缘缺陷局部放电试验中,加压策略如下:当试验电压升高至一定数值时,GIS内部畸变电场增大,发生局部放电,UHF检测仪上的放电脉冲信号就会越来越明显,单位时间内在



图8 绝缘子内部气泡

Fig. 8 Photo of inner bubble in insulator

谱图上出现表征放电发生率的圆点会越来越密;继续升高电压,当放电密度点的形成趋于稳定时,表明此时的局部放电处于稳定状态,局部放电量也达到最大值,此时停止升压;待放电点能够形成较为清晰稳定的图像时,记录该试验放电起始电压、最大电压等相关参数,并将放电谱图和数据导入数据库,以便对局部放电信号进行分析和特征提取。

通过试验表明,每类典型的模拟缺陷类型均具有不同的放电特性,在放电谱图上表现为起始放电相位、幅值、放电发生率等的不同。因此,通过在模拟试验中更改设计缺陷的尺寸、位置,改变GIS气室压力和最高试验电压等参数,可获取同类型缺陷的大量实测样本数据,再结合现场实测的反复验证和修正,即可建立GIS内部不同故障类型放电缺陷的指纹库。下面为该模拟试验获取的4种典型绝缘缺陷的局部放电谱图,分为PRPD图谱和三维检测图谱。

4.1 高压导体上金属尖端

高电压下金属尖端电场属于不均匀场,因此,当施加试验电压时,高压导体上的金属尖端很容易引起局部放电。高压导体金属尖端放电图谱见图9。从图9(a)上看,金属尖端放电信号幅值较小,最大放电幅值均在电压峰值处出现,局放信号点数负半周明显多于正半周,即负半周的放电密度较正半周大,放电主要分布在负半波峰值附近。正负半周初始放电相位基本相同,局放的PRPD图谱相似度较低,负半周放电图谱向相位增大方向倾斜。

4.2 自由金属颗粒缺陷

在GIS腔体底部放置自由金属颗粒,当电压持续升高时,金属颗粒附近的电场发生畸变,导致局部放电的发生,并可能引起金属颗粒的跳动。由于该试验采用铜颗粒,且升压过程仅维持至产生持续的局放信号,受颗粒材质影响,试验后检查其位置并未发生变化。

在该前提条件下,得到UHF检测图谱,见图10。从图10(a)上看,初始放电点较电压峰值提前出现,且局放信号分布较为紧凑,局放脉冲幅值和密度在正负半轴基本相同,且主要分布在电压曲线的第1、

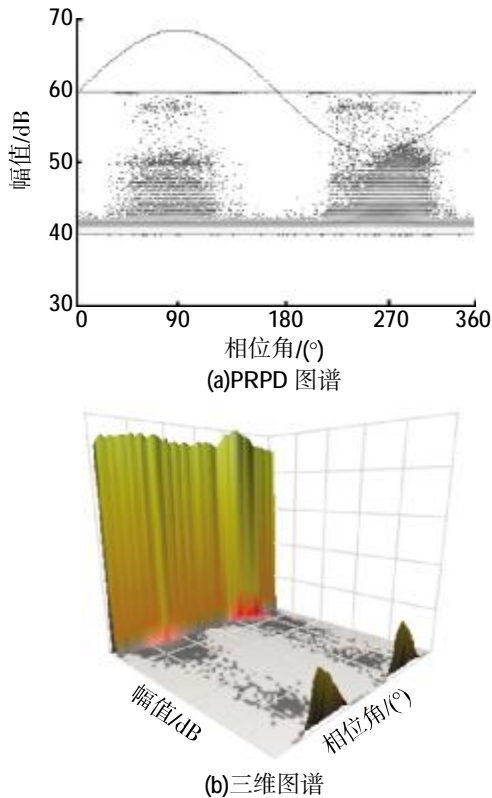


图 9 高压导体金属尖端放电图谱

Fig. 9 Characteristic spectrum of metal point

3 象限。

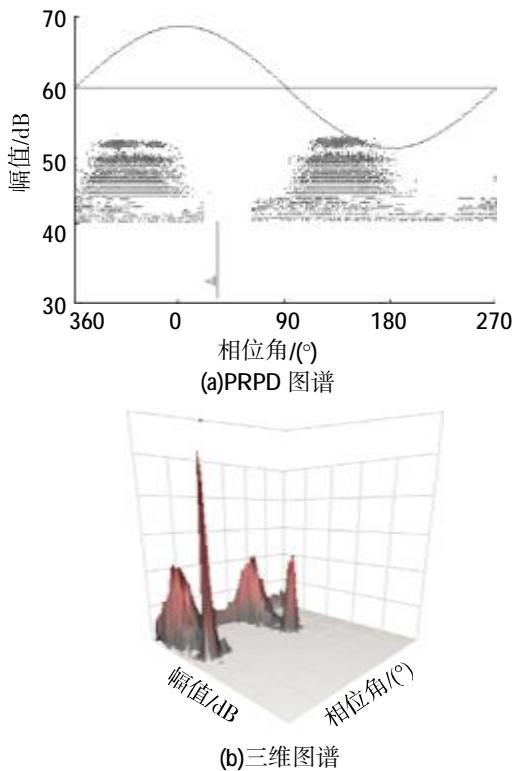


图 10 UHF 检测图谱

Fig. 10 Characteristic spectrum of free metal particle

4.3 绝缘子表面金属异物

由于绝缘子表面存在金属异物, 在较高的电压下, 绝缘子上的金属污染物附近发生电场畸变, 导致

局部放电发生。绝缘子表面金属异物缺陷的 UHF 检测图谱见图 11。由图 11(a)上可看出, 在试验电压上升阶段, 一旦对局放试验系统施加试验电压, 局部放电将随之出现达到最大幅值, 并一直维持在同一水平直至电压下降局放消失, 三维放电图谱也证实了该类型放电的特征。

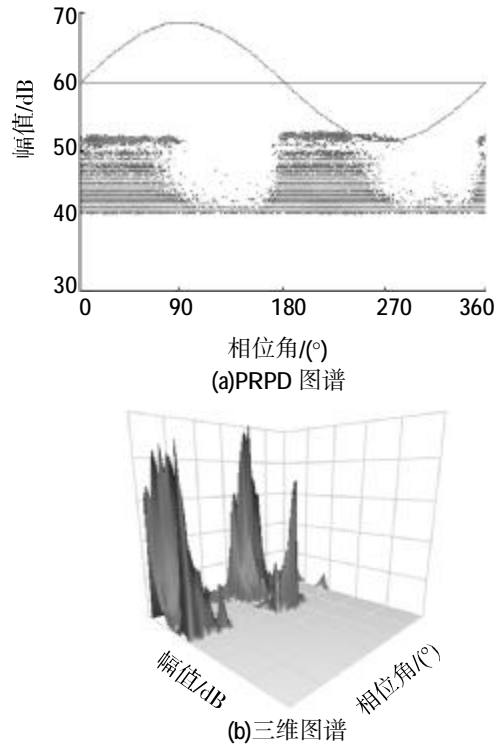


图 11 绝缘子表面金属异物缺陷的 UHF 检测图谱

Fig. 11 Characteristic spectrum of metal foreign body

4.4 绝缘子内部气泡

绝缘子内部气泡缺陷的 UHF 检测图谱见图 12。由图 12(a)上可知, 试验电压相位的正半周上的局部放电密度高于负半周, 放电脉冲幅值在正半周上较高, 局部放电次数在正半周上明显较多, 负半波图谱较正半波尖锐, 呈现“兔耳”形状。从三维放电图谱可以看出, 正半周的放电次数明显大于负半周, 放电幅值也比较集中。

5 结语

文中利用真实的 110 kV 三相共筒式 GIS 设备和高压试验设备, 在 GIS 中设计了高压导体金属尖端、自由金属颗粒、绝缘子表面金属异物和绝缘子内部气泡 4 种典型绝缘缺陷, 借助于高性能的特高频局部放电检测仪器, 建立了 GIS 设备状态局部放电模拟检测系统, 开展了 GIS 局部放电的模拟检测。

通过模拟试验, 获取了基于 PDSG 局部放电检测仪的 4 种典型绝缘缺陷的放电图谱, 并利用 PRPD 谱图和三维检测图谱, 定性分析了 4 种典型

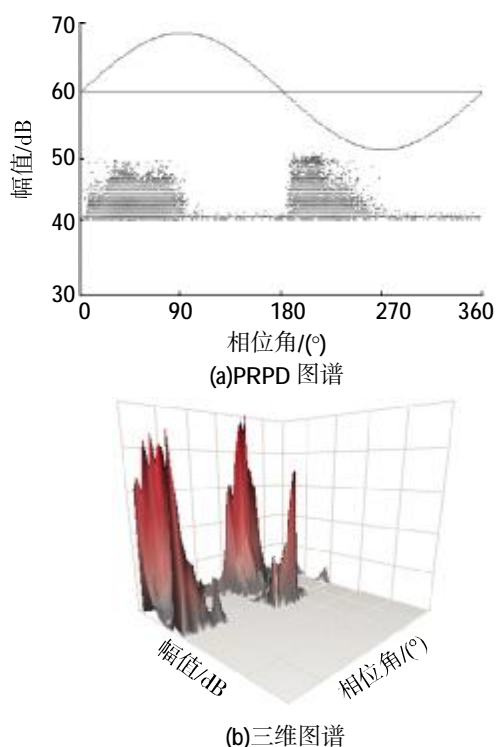


图 12 绝缘子内部气泡缺陷的 UHF 检测图谱
Fig. 12 Characteristic spectrum of inner bubble in insulator

故障下局部放电信号的初始放电相位、放电密度及脉冲幅值等关键参数和谱图特征,将有效指导现场开展 GIS 局部放电的检测工作。

参考文献:

- [1] 李娟,李明,金子惠.GIS 设备局部放电缺陷诊断分析[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 85-90.
LI Juan, LI Ming, JIN Zihui. Some methods for diagnosis of GIS partial discharge defects[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 85-90.
- [2] 李超,陶蓉.一起 126 kV GIS 设备故障后的检测实例分析[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 145-149.
LI Chao, TAO Rong. Fault detection example of 126 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 145-149.
- [3] 罗红涛,黄文武,邹洪民,等.GIS 内部潜伏性故障案例分析[J]. 中国电力, 2014, 47(7): 86-90.
LUO Hongtao, HUANG Wenwu, ZOU Hongmin, et al. Case study on GIS internal latent fault[J]. Electric Power, 2014, 47(7): 86-90.
- [4] SAKAKIBARA T, NAKAJIMA T, MARUYAMA S, et al. Development of GIS fault location system using pressure wave sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 371-377.
- [5] 段大鹏,齐伟强,刘弘景,等.GIS 状态监测实验平台建设及状态检测技术研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 100-104.
DUAN Dapeng, QI Weiqiang, LIU Hongjing, et al. Sim-

- plementation of GIS condition monitoring experiment system and study of condition monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 100-104.
- [6] 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.
- [7] 丁登伟,高文胜,刘卫东.采用特高频法的 GIS 典型缺陷特性分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 706-710.
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Analysis on the typical partial discharge using UHF detection method for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 706-710.
- [8] ZHANG Shen, ZHENG Xincui, ZHANG Jinbin, et al. Study of GIS partial discharge online monitoring using UHF method[C]/2010 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE). Wuhan, China: 2010: 4262-4265.
- [9] 李成榕,王浩,郑书生.GIS 局部放电的超声波检测频带试验研究[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1): 41-45.
LI Chengrong, WANG Hao, ZHENG Shusheng. Experiment research on ultrasonic band selection of GIS partial discharge detection[J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(1): 41-45.
- [10] 颜湘莲,王承玉,季严松,等.开关设备中 SF₆ 气体分解产物检测的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 160-165.
YAN Xianglian, WANG Chengyu, JI Yansong, et al. Application of decomposition products detection of SF₆ in switchgears[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 160-165.
- [11] 刘有为,吴立远,弓艳朋.GIS 设备气体分解物及其影响因素研究[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 58-61.
LIU Youwei, WU Liyuan, GONG Yanpeng. Investigation on SF₆ decomposition products in GIS and affecting factors [J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 58-61.
- [12] 代荡荡,王先培,胡红红,等.基于紫外光谱的 GIS 局部放电快速检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3312-3316.
DAI Dangdang, WANG Xianpei, HU Honghong, et al. An ultraviolet spectroscopy method for rapid partial discharge detection in GIS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(12): 3312-3316.
- [13] 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.

- [14] LI Xiuwei, YUN Yuxin, MU Shiyu, et al. Study of partial discharge monitoring system for GIS based on UHF method[C]//International Conference on Electrical and Control Engineering(ICECE). Yichang, China: IEEE, 2011: 3169-3172.
- [15] 李忠, 陈杰华, 胡迪军, 等. 外部传感器 GIS 局部放电超高频检测的研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 35-37. LI Zhong, CHEN Jiehua, HU Dijun, et al. Study on external sensors for UHF partial discharge detection of GIS[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6): 35-37.
- [16] 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.
- [17] 王彩雄, 唐志国, 常文治, 等. 气体绝缘组合电器尖端放电发展过程的试验研究[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 157-162. WANG Caixiong, TANG Zhiguo, CHANG Wenzhi, et al. Experimental study on development characteristics of point discharge in GIS[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 157-162.
- [18] 胡泉伟, 张亮, 吴磊, 等. GIS 中自由金属颗粒缺陷局部放电特性的研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(1): 25-30. HU Quanwei, ZHANG Liang, WU Lei, et al. Probe into the partial discharge characteristics of free metal particles in GIS[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(1): 25-30.
- [19] 金立军, 刘卫东, 黄家旗, 等. GIS 金属颗粒局部放电的试验研究[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 10-13. JIN Lijun, LIU Weidong, HUANG Jiaqi, et al. Study of GIS metal particles partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 10-13.
- [20] 胡红红, 江健武, 钟士朝, 等. 气体分解产物和局部放电测试技术在 SF₆ 电气设备状态诊断中的应用[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 121-125. HU Honghong, JIANG Jianwu, ZHONG Shichao, et al. Application cases of SF₆ decomposition products and partial discharge detection technologies in the state diagnosis of SF₆ electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 121-125.
- [21] 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. Line detection and analysis of gas cavity in insulator of gas insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 112-116.
- [22] 路俊勇, 张婷, 司刚全. GIS 悬浮电极缺陷局部放电测量与分析[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 151-156. LU Junyong, ZHANG Ting, SI Gangquan. Measurement and analysis of partial discharge on floating electrode defect in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 151-156.

张广东(1983—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电网设备状态检修工作。

《高压电器》2016 年第 9 期广告单位

彩色广告

封一: 莱茵技术(上海)有限公司

封二: 前视红外光电科技(上海)有限公司

封三: 陕西斯瑞新材料股份有限公司

封四: 常州市盈能电气有限公司

前插 1: 北京京东方真空电器有限责任公司

前插 2: 成都凯赛尔电子有限公司

前插 3: 西安华伟电力电子技术有限责任公司

前插 4: 珠海思创电气有限公司

前插 5: 陕西迪吉康电气有限责任公司

前插 6: 宁波伟隆电器成套有限公司

前插 7: 江苏常新密封材料有限公司

前插 8: 宁波天安(集团)股份有限公司

前插 9: 上海乐研电气科技有限公司

前插 10: 温岭市雅博输送设备有限公司

前插 11: 攀时(上海)高性能材料有限公司

前插 12: 北京研华兴业电子科技有限公司