

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.05.012

一起GIS固体绝缘件局部放电缺陷的定位与分析

宋东波¹, 黄洁², 朱太云¹, 杨为¹, 杨海涛¹, 赵常威¹,
秦金飞¹, 金甲杰³, 舒日高³

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230022; 2. 国网安徽省电力有限公司培训中心, 合肥 230022;
3. 国网安徽省电力有限公司芜湖供电公司, 安徽 芜湖 241027)

摘要: 随着电气设备状态检修工作的开展,带电检测技术在输变电设备状态检测中发挥了越来越重要的作用。文中介绍了利用带电检测技术发现的一起GIS柱式绝缘子内部气隙放电缺陷的定位与分析过程,首先利用特高频法局部放电检测技术,结合谱图特征对放电类型进行了确认;随后利用高速示波器各通道信号到达的时延同时结合设备内部结构,对缺陷位置进行了精确定位;最后对异常位置绝缘件进行X射线数字成像检测及局部放电测量,发现其内部存在气隙缺陷,放电量严重超标,证明了定位分析的正确性,并对局部放电特征随施加电压的变化情况进行了分析。总结分析了各局部放电检测技术的优缺点,为GIS绝缘缺陷的诊断分析提供参考。

关键词: GIS; 局部放电; 特高频; 定位; X射线

Localization and Analysis of a Partial Discharge Defects in GIS Solid Insulation

SONG Dongbo¹, HUANG Jie², ZHU Taiyun¹, YANG Wei¹, YANG Haitao¹,
ZHAO Changwei¹, QIN Jinfei¹, JIN Jiajie³, SHU Rigao³

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China; 2. State Grid Anhui Training Center, Hefei 230022, China; 3. State Grid Wuhu Electric Power Supply Company, Anhui Wuhu 241027, China)

Abstract: With the advancement of condition-based maintenance of electrical equipment, the live detection technology plays an increasingly important role in the state inspection of transmission and transformation equipment. Localization and analysis of a partial discharge (PD) defects in void of GIS solid insulation are introduced. First, the type of discharge is confirmed by UHF (ultra high frequency) PD detection method combined with the characteristics of PD spectrum. Then, the position of the defects is accurately located through channel signal reach time delay of the high-speed oscilloscope with consideration of the equipment structure. Finally, X-ray digital imaging detection and PD measurement are performed and find that there is a void inside the post insulator, and the PD is seriously exceeded, which proves the correctness of the location analysis. The characteristics of partial discharge with the change of voltage are analyzed. In addition, the advantages and disadvantages of commonly used PD detection techniques are summarized and analyzed to provide reference for diagnosis and analysis of GIS insulation defects.

Key words: GIS; partial discharge; ultra high frequency; localization; X-ray

0 引言

近年来,气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)以其占地面积小、运行稳定、维护量少等优点,在电力系统中得到了广泛的应用^[1-2]。但随着GIS用量的增加,因部件生产加工

工艺不良、现场安装调试不当、运行中部件松动等原因导致的GIS故障时有发生^[3-5],加之其故障抢修周期长、经济损失大,对电网的安全稳定运行造成了较大威胁^[6-8],因此必须采取有效的技术手段对GIS的绝缘状态进行检测评估。

局部放电作为设备故障击穿的前兆,是衡量

GIS绝缘状态的重要指标。当GIS内部发生局部放电时将产生声、光、热等物理、化学变化,基于对上述现象的检测,形成了特高频法、超声波法、 SF_6 气体分解产物分析法等带电检测技术手段^[9-14],可从不同侧面对GIS绝缘状态进行评估,提前发现设备内部潜在隐患,以及及时采取有效措施,避免事故发生。另外,X射线数字成像检测技术,以其能够实现GIS内部“可视化”的技术特点,可为缺陷的诊断分析提供有力佐证^[15-18]。

文中介绍了一起126 kV GIS柱式绝缘子内部气隙放电的定位与分析过程,所介绍的定位方法省去了传统时差定位法传感器距离测量、信号时差读取及定位计算过程,排除了距离测量误差及信号首波头读取误差对定位结果的影响,精简了定位过程、提高了定位准确性;X射线数字成像检测及局部放电电量测量证明了定位方法的有效性;最后对试验中气隙在不同电压下所表现出的放电特征进行了分析。

1 局部放电检测与定位

1.1 特高频法局部放电检测

2016年11月,采用特高频法对某220 kV变电站内126 kV GIS开展局部放电检测时,发现58A间隔所在区域的多个传感器所测信号异常,设备现场情况见图1。

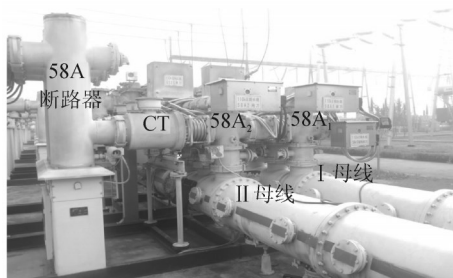


图1 126 kV GIS现场实物图

Fig. 1 Physical map of 126 kV GIS

随后采用多通道局放检测仪,在58A间隔布置5个传感器同时开展局部放电检测,各传感器布置情况见图2。

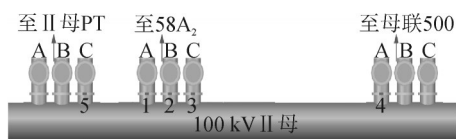


图2 传感器布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sensors

图2中1至5为传感器编号,在58A间隔附近的外部空间布置传感器6(背景传感器),分别接到仪器

的1至6通道。传感器6所测背景信号幅值较低,在一个周期内脉冲分布均匀,无脉冲集中现象,说明空间背景信号无异常;传感器1至5同时检测到异常信号,谱图特征一致,其中传感器1所测异常信号幅值最大,其PRPS及PRPD谱图见图3。

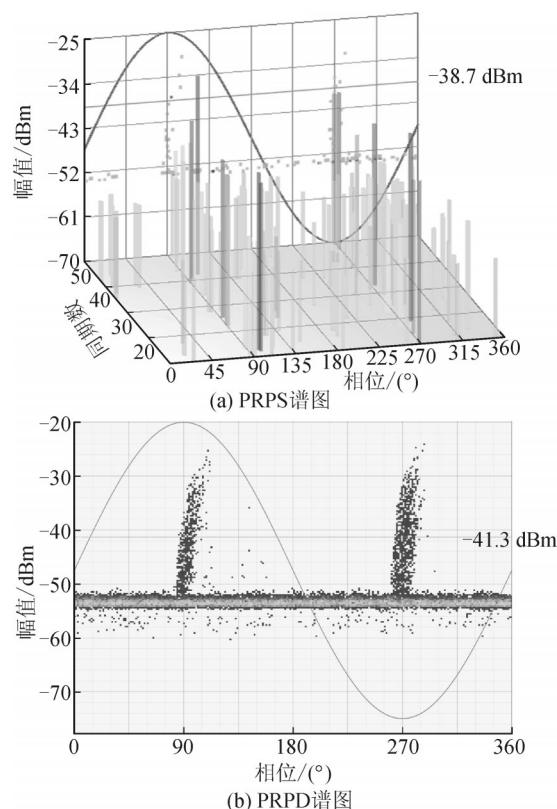


图3 传感器1所测信号谱图

Fig. 3 Detection spectrum of sensor 1

由异常信号谱图特征可知,一个周期内放电次数较少,信号幅值较为分散,有两簇明显的脉冲集中现象,谱图特征呈“兔耳状”,与典型的绝缘件内部气隙放电特征相似。初步判断58A间隔所在位置区域的某绝缘件内部存在气隙或裂纹产生局部放电。

1.2 超声波法及 SF_6 气体分解产物检测

对58A及其相邻间隔开展超声波法局部放电检测,未见异常。分析认为气隙放电本身的放电能量相对偏低,产生的超声波信号强度不大,且信号在固体绝缘材料内部的衰减较为明显,致使超声波法对内部气隙产生的局部放电信号不敏感,因此现场未测到异常信号。

对58A间隔及附近的母线等多个气室开展 SF_6 分解产物测量,未见异常。分析认为由于放电发生在气隙内部,且放电能量较小,因此不会导致 SF_6 气体分解,另外基于 SO_2 与 H_2S 的分解产物检测方法受气体扩散、吸附剂吸附作用等影响,只有分解产物浓度累积到一定程度后才能被检测到。

1.3 局部放电源定位

采用高速示波器(带宽2 GHz,采样频率20 GS/s)利用各通道信号到达的时延,对局放源进行定位。首先将图2中的传感器1、3接入示波器通道1、2,波形见图4。

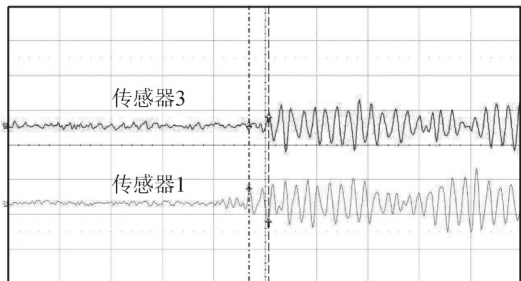


图4 传感器1、3所测信号波形

Fig. 4 Signal waveform of sensor 1 and 3

由图4可知,信号先到达传感器1,后到达传感器3,因此信号源应在传感器1、3之间靠近1的位置或在传感器1的左侧或上方。随后将传感器1、5接入示波器通道1、2,波形见图5。

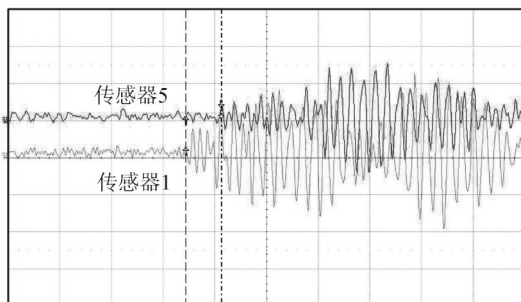


图5 传感器1、5所测信号波形

Fig. 5 Signal waveform of sensor 1 and 5

由图5可知,信号先到达传感器1,后到达传感器5,因此信号源应在传感器1、5之间靠近1的位置或在传感器1的右侧或上方。

综合图4、5可知,信号源在传感器1所在位置附近,也可能处在传感器1所在绝缘盆子上或其上方某区域,为对信号源进一步定位,将传感器1、2接入示波器通道1、2,波形见图6。

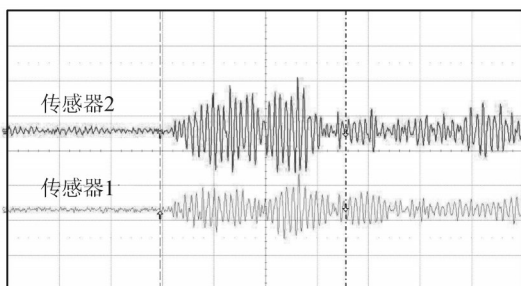


图6 传感器1、2所测信号波形

Fig. 6 Signal waveform of sensor 1 and 2

由图6可知,信号到达传感器1、2的时间基本

一致,因此信号源应处在传感器1、2之间的某个位置,而不可能来自传感器1所在绝缘盆子或其上方。

综合各传感器定位结果,判断局放源应处在110 kV II母线上传感器1、2之间的某部位,为进一步查找局放源,查阅了设备内部结构,见图7。

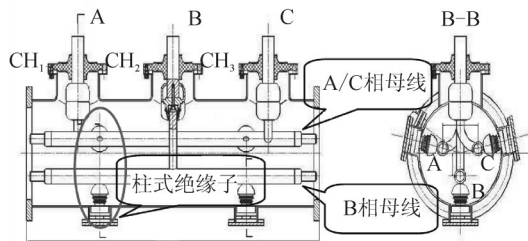
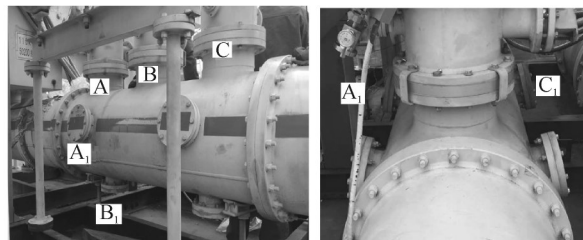


图7 GIS母线内部结构示意图

Fig. 7 Internal structure diagram of GIS bus

由图7可知,传感器1所在绝缘盆子右下方存在3只支撑母线用柱式绝缘子,该绝缘子采用环氧树脂浇注而成,若其制作工艺不良将可能在其内部产生气隙或裂纹,在运行中产生局部放电。因此判断局放源处在其中某一柱式绝缘子上,见图8, A₁、B₁、C₁表示A、B、C三相的柱式绝缘子。



(a) 正视图

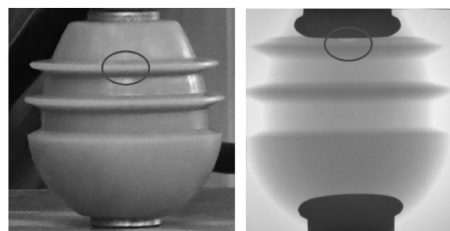
(b) 侧视图

图8 柱式绝缘子现场位置图

Fig. 8 Onsite position of post insulator

2 X射线数字成像检测及局部放电量测量

考虑到该局部放电异常信号幅值较大且持续存在,因此结合停机会对异常部位进行了开罐检查,将A₁、B₁、C₁3只柱式绝缘子进行了更换,对拆下的绝缘子进行X射线数字成像检测,发现B₁柱式绝缘子低压电极底部与绝缘材料接触面间存在气泡,其他绝缘子无异常,见图9。



(a) 可见光图谱

(b) X射线图谱

图9 B₁柱式绝缘子及其X射线图谱

Fig. 9 Physical map and X-ray of post insulator B₁

对B₁绝缘子进行245 kV/5 min交流耐压试验,耐压通过。B₁绝缘子2003年出厂,按当时厂控加压程序采用脉冲电流法对其进行局部放电量测量,见图10。

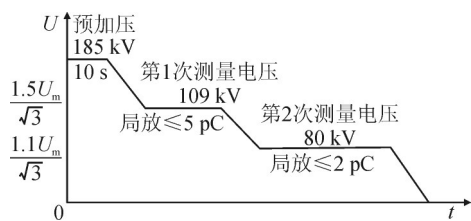


图10 局部放电量测量加压方式

Fig. 10 Applied voltage mode of PD measurement

背景局放量1.4 pC,测量发现,绝缘子在109 kV及80 kV下最大局部放电量均大于100 pC,局放严重超标,远大于厂控标准要求。在局部放电量测量的同时通过试验设备工装的盆式绝缘子浇注孔进行特高频法局部放电检测,采集到与现场谱图特征一致的异常信号,因此判断现场异常信号来自B₁柱式绝缘子,证明了现场定位分析的正确性。

3 局部放电特征随电压变化分析

对B₁绝缘子进行脉冲电流法局放检测的过程中发现随着施加电压的升高,放电起始相位不断前移,一个周期内的放电脉冲数量不断增加,且电压极性反转后的首个放电脉冲幅值明显大于后续的放电脉冲;另外,初始阶段随着施加电压的升高局部放电量逐渐增加,当电压升高到一定程度之后,局部放电量随电压的升高整体呈降低趋势。80、109、185、245 kV电压下的放电特征见图11。

固体绝缘内部气隙放电主要包含两个过程:流注在气隙内的传播过程及流注到达界面后的扩展过程^[19],对气隙放电随机特性的解释主要基于两种理论:放电时延的随机性及放电面积的随机性^[20-21]。气隙内部放电特征受很多因素影响,如气隙内部气压变化,放电后气隙表面沉积的空间电荷、介质的表面状态及放电后气体分解产物等^[22]。

放电起始相位主要取决于放电时延大小及放电起始场强值达到的时刻。文[19-21]研究结果表明,随着外施电压的升高,表面电子发射和电离的概率增大,即产生自由电子的概率增大,另外电压升高引发放电所需的种子电子数目减少,等待自由电子所需的时间减少,因此放电时延减小;另外随着外施电压的升高,电场强度增加,气隙内的电场强度将更早的达到起始放电场强,且前半周期产生的残余电荷在电压极性反转后亦对电场起到增强

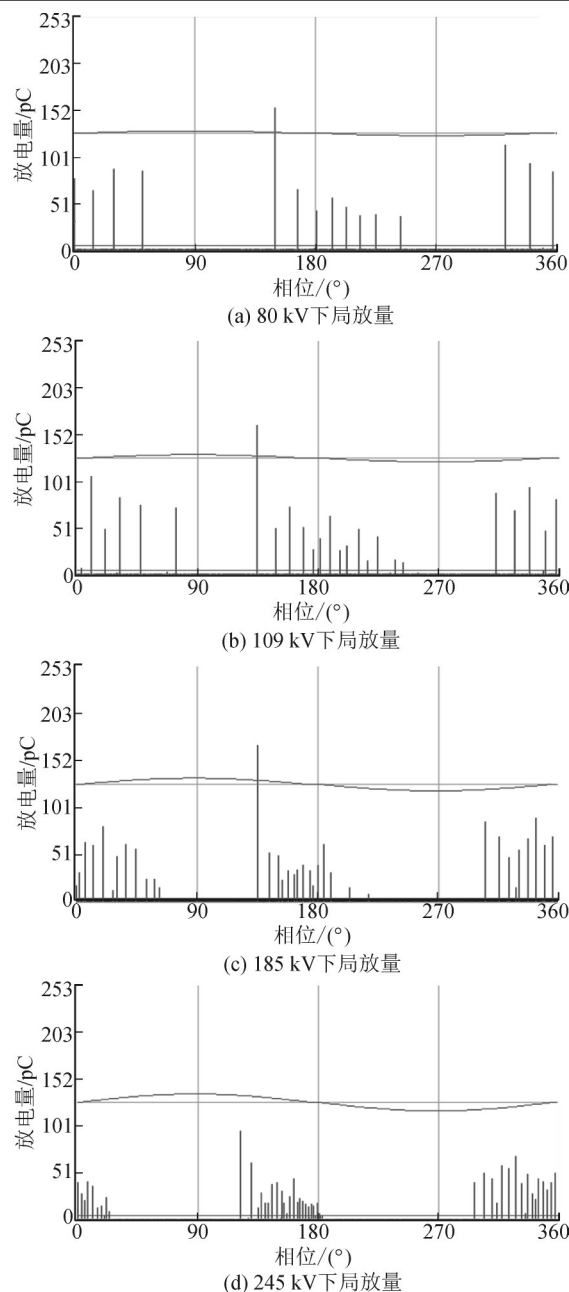


图11 B₁柱式绝缘子局放测量结果

Fig. 11 PD measurement results of post insulator B₁

作用,所以最终表现为放电起始相位前移。

局部放电导致气隙内部发生氧化反应产生电负性气体,如CO₂、H₂O等,电负性气体具有较强的捕获自由电子的能力,因此电压极性反转前最后一次放电产生的电荷将被大量消耗,致使电压极性反转后首次放电的时延增加,最终出现较大的放电幅值^[23]。

放电时气隙内部产生的电荷量可定性的表示为^[24]: $Q = \nabla U_g C_g$,其中: ∇U_g 为放电发生前后气隙两端的电压变化量; C_g 为气隙电容。放电量起始阶段随着施加电压的升高,放电时气隙上的电压降增加,另外随着电压的升高,气隙内部场强增加,离子运动活跃度增强,参加放电的气隙有效面积将增

加,即 C_g 增大,因此放电量不断增大;当电压升高到一定程度之后,随电压升高单次局放量减小的可能原因为^[25-26]:电场增加到一定程度之后,气隙内部单次放电的面积减小,出现多个独立区域的小面积的放电,即放电的等效面积减小,因此最终表现为放电脉冲数增加,放电量减小。

对气隙内部放电劣化过程研究发现,其老化发展过程中,局部放电量呈现先增加后略微降低最后急剧增加直至绝缘击穿的过程^[27],整个发展过程中放电频次不断增加。因此,放电量减小但放电频次增加,对材料绝缘性能显然不利,对于绝缘件内部气隙放电,不能单纯依靠放电幅值来判断严重程度,应同时结合放电频次及放电时延进行综合分析。

4 结论

交流耐压试验通过并不能证明设备绝缘无任何缺陷,现场的局部放电带电检测手段多样,可及时发现设备内部潜在绝缘缺陷;进行GIS设备局部放电检测时,应综合采用多种检测手段,发挥各自的技术优势,提高缺陷诊断及定位的准确性,为设备的运维及检修提供有力保障。

1)特高频法局部放电检测技术,灵敏度高、有效检测范围大,对GIS内部因悬浮电位、导体或外壳毛刺、绝缘内部气隙等导致的局部放电较为敏感,是对GIS进行局部放电检测的重要技术手段,但其对GIS内部的振动信号不敏感且易受现场外部电磁波信号干扰;

2)超声波法局部放电检测技术,不受外部空间的电磁波信号干扰,且其测点选取不受设备结构限制,对GIS内部机械振动、自由颗粒缺陷及因悬浮电位、导体或外壳毛刺等导致的局部放电较为敏感,但受超声信号衰减限制,其有效检测范围较小、对气隙内部局部放电不敏感,且易受外部机械噪声影响;

3) SF_6 气体分解产物测量,受放电量大小、气体扩散、吸附剂用量等的影响,其检测灵敏度受限,但是一旦检测出 SO_2 、 H_2S 气体成分异常,就说明气室内部存在较为明显的放电类缺陷,且分解产物测量是现场运行设备故障击穿后非常有效的缺陷定位手段;

4)X射线数字成像检测技术,实现了GIS设备或其部件内部的“可视化”,可为GIS内部缺陷的定性及定位进行验证,为GIS设备检修策略的制定提供有力技术支撑,但其有效检测范围受现场设备结构限制,且X射线的辐射也给现场检测带来一定潜在风险。

参考文献:

- [1] 邱毓昌. GIS装置及其绝缘技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007.
QIU Yuchang. GIS equipment and insulation technology[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2007.
- [2] 梁方建,王 钰,王志龙,等. 六氟化硫气体在电力设备中的应用现状及问题[J]. 绝缘材料,2010,43(3):43-46.
LIANG Fangjian, WANG Yu, WANG Zhilong, et al. The application situation of SF_6 in electrical equipment and some problem[J]. Insulating Materials, 2010, 43(3): 43-46.
- [3] 李兴旺,刘 军,刘梦娜. 一起气体绝缘金属封闭开关设备悬浮放电缺陷分析[J]. 高压电器,2015,51(10):205-208.
LI Xingwang, LIU Jun, LIU Mengna. Analysis on a floating discharge defect in GIS disconnecting switch[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 205-208.
- [4] 雷汉坤,贾志杰. 检测GIS固体绝缘内部放电缺陷的特高频和X射线数字成像联合方法研究[J]. 高压电器,2018,53(1):224-229.
LEI Hankun, JIA Zhijie. Combined ultral-high frequency and X-ray digital imaging method for detecting discharge defects in GIS solid insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 53(1): 224-229.
- [5] 田 妍,张锐键,董志雯,等. GIS局部放电缺陷定位分析[J]. 高压电器,2017,53(6):182-185.
TIAN Yan, ZHANG Ruijian, DONG Zhiwen, et al. Localization of partial discharge defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 182-185.
- [6] 张 欣,李高扬,黄荣辉,等. 不同运行年限的GIS缺陷率统计分析与运维建议[J]. 高压电器,2016,52(3):184-188.
ZHANG Xin, LI Gaoyang, HUANG Ronghui, et al. Statistical analysis of defects and maintenance advice for GIS in different operating years above 110 kV[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 184-188.
- [7] 李庆民,王 健,李伯涛,等. GIS/GIL中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术,2016,42(3):849-860.
LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review of metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860.
- [8] 颜湘莲,王承玉,宋 杲,等. 气体绝缘开关设备中 SF_6 气体分解产物检测与设备故障诊断的研究进展[J]. 高压电器,2013,49(6):1-9.
YAN Xianglian, WANG Chengyu, SONG Gao, et al. Recent progress in detection of SF_6 decomposition products and fault diagnosis for insulated switchgears[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 1-9.
- [9] 芦竹茂,刘 庆,王天正,等. 多种带电检测方法在GIS局部放电诊断中的综合应用与研究[J]. 高压电器,2017,53(10):222-226.

- LU Zhumao, LIU Qing, WANG Tianzheng, et al. Comprehensive application and research of multi live detection methods in prtial discharge diagnosis for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 222-226.
- [10] 李红元, 陈 禾, 吴德贯, 等. 用超声波检测法对 GIL 设备两次局放的诊断与分析[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 68-73.
- LI Hongyuan, CHEN He, WU Deguan, et al. Diagnosis and analysis of two partial discharge in GIL equipment by ultrasonic detection method[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 68-73.
- [11] 申 强, 杨海龙, 刘 航, 等. 超声波局部放电检测技术在 500 kV GIS 盆式绝缘子上颗粒缺陷诊断中的应用[J]. 高压电器, 2017, 53(9): 228-233.
- SHEN Qiang, YANG Hailong, LIU Hang, et al. Application of ultrasonci partial discharge detection technology on the particle defect diagnosis of a 500 kV GIS basin-insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 228-233.
- [12] 李松原, 王永宁, 宋晓博, 等. 声—电—化联合检测在判别 GIS 自由金属颗粒放电缺陷上的应用[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 78-82.
- LI Songyuan, WANG Yongning, SONG Xiaobo, et al. Application of combined acoustic-electric-chemical detection to GIS partial discharge defect caused by free metal particles[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 78-82.
- [13] 王 琼, 车传强, 王慧君, 等. 悬浮缺陷模型局部放电发展过程中分解产物的特征[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 215-220.
- WANG Qiong, CHE Chuanqiang, WANG Huijun, et al. Decomposition products characteristics of suspended defect model in its partial discharge revolution[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 215-220.
- [14] 杨 波, 王慧君. GIS 盆式绝缘子表面自由金属颗粒缺陷导致局部放电的发展过程[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 73-77.
- YANG Bo, WANG Huijun. Partial discharge development of basin-type insulator of GIS triggered by free metal particles insulation defect[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 73-77.
- [15] 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): 44-47.
- YAN Bin, HE Ximei, WU Tongsheng, et al. X-ray visualization detection technology for GIS equipment[J]. Electric Power, 2010, 43(7): 44-47.
- [16] 许焕清, 马君鹏, 王成亮, 等. GIS 设备典型缺陷的 X 射线数字成像检测技术[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1697-1702.
- XU Huanqing, MA Junpeng, WANG Chengliang, et al. Study on digital X-ray imaging technology for detecting typical defects in GIS equipment[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1697-1702.
- [17] 闫文斌, 王达达, 李卫国, 等. X 射线对复合绝缘子内部缺陷的透照检测和诊断[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 58-66.
- YAN Wenbin, WANG Dada, LI Weiguo, et al. Application of X-ray technology in composite insulators defect diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 58-66.
- [18] 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.
- [19] 卓 然, 潘 成, 吴 锴, 等. 电压周期变化时表面电荷衰减对局部放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 232-239.
- ZHUO Ran, PAN Cheng, WU Kai, et al. Effect of surface charge decay on partial discharge characteristics under variable voltage cycles[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 232-239.
- [20] 柯春俊, 潘 成, 吴 锴, 等. 人工气隙面积对局部放电特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(6): 103-108.
- KE Chunjun, PAN Cheng, WU Kai, et al. Effect of artificial void area on partial discharge characters[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(6): 103-108.
- [21] 陈 曦, 潘 成, 乌 江, 等. 绝缘材料内部气隙中局部放电特性的影响因素[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 86-92.
- CHEN Xi, PAN Cheng, WU Jiang, et al. Influencing factors on characteristics of parital discharge in void of insulating materials[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 86-92.
- [22] 李军浩, 司文荣, 姚 秀, 等. 油纸绝缘内部气隙缺陷电劣化过程中局部放电的测量与模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 128-134.
- LI Junhao, SI Wenong, YAO Xiu, et al. Measurement and simulation of partial discharge in disc - void of oil - press-board insulation with electrical degradation process[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 128-134.
- [23] KIM S H, KONDO T, MIZUTANI T. Change in PD pattern with aging[J]. IEEE Transactionson Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 13-18.
- [24] 陈 曦, 陶霁韬, 潘 成, 等. 固体绝缘材料内部气隙局部放电物理模型概述[J]. 绝缘材料, 2015, 48(12): 6-11.
- CHEN Xi, TAO Xiantao, PAN Cheng, et al. Review of partial discharge model of air gap inside solid insulating material[J]. Insulating Materials, 2015, 48(12): 6-11.
- [25] 潘 浩, 殷庆铎, 高文胜. 固体绝缘中气隙尺寸对局部放电过程的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 458-461.
- PAN Hao, YIN Qingduo, GAO Wensheng. Influence of void dimensions on partial discharge in solid insulation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 458-461.
- [26] WU Kai, SUZUOKI Y, DSIAASDO L A. The contribution of discharge area variation to partial discharge patterns in disc-voids[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, (下转第 86 页)

- ZHANG Xiaoxing, CHEN Xiaoyu, XIAO Song, et al. Molecular dynamics simulation of thermal-mechanical properties of modified SiO₂ reinforced epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 1-10.
- [24] ZHANG Xiaoxing, WEN Hao, WU Yunjian. Computational thermomechanical properties of silica-epoxynanocomposites by molecular dynamic simulation[J]. Polymers, 2017, 58(9): 430.
- [25] 刘伟帅. 交联环氧树脂TGDDM结构与性能的分子动力学模拟[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- LIU Weishuai. Molecular dynamics simulation of structure and properties of crosslinked epoxy resin TGDDM[D]. Taiyuan: North China University, 2016.
- [26] 林生军, 黄 印, 谢东日, 等. 环氧树脂高温分子链松弛与玻璃化转变特性[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 304-310.
- LIN Shengjun, HUANG Yin, XIE Dongri, et al. High temperature molecular chain relaxation and glass transition characteristics of epoxy resin[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(7): 304-310.
- [27] 张 鑫. 胺类固化剂的种类与当量比对交联网络及对固化物和复合材料性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- ZHANG Xin. The influence of kinds and equivalent ratio of amine curing agent on crosslinking network and composite material performance[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [28] 李 浩, 张清杰, 高 亮, 等. 环氧树脂高低温弹性模量的分子模拟和实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(8): 33-37.
- LI Hao, ZHANG Qingjie, GAO Liang, et al. Molecular simulation and experimental study of high and low temperature elastic modulus of epoxy resin[J]. FRP/Composites, 2016(8): 33-37.
- 刘利珍(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。
- 谢 庆(1979—), 男, 博士(后), 教授, 主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。
- [27] 张 鑫. 胺类固化剂的种类与当量比对交联网络及对固

(上接第 79 页)

- 47(37): 1815-1823.
- [27] 陈伟根, 龙震泽, 谢 波, 等. 不同气隙尺寸的油纸绝缘气隙放电特征及发展阶段识别[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 49-58.
- CHEN Weigen, LONG Zhenze, XIE Bo, et al. Characteristics and development stage recognition of air-gap discharge within oil-paper insulation considering effect of cavity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 49-58.
- 宋东波(1987—), 男, 工程师, 主要从事超特高压设备试验及带电检测方面的研究。