

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.03.019

温度对 GIS 内部固体绝缘缺陷间歇性放电特性影响研究

张国治^{1,2,3}, 田晗绿¹, 杨帅⁴, 鲁昌悦¹, 张晓星^{1,5}

(1. 湖北工业大学新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430068;
2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 3. 武汉大学
动力与机械学院, 湖北 武汉 430072; 4. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司,
新疆 昌吉 831100; 5. 襄阳湖北工业大学产业研究院, 湖北 襄阳 441100)

摘要:针对现场气体绝缘组合电器(gas insulated substation, GIS)局部放电绝缘缺陷漏报、误报情况频发的问题,文中根据 GIS 实际运行温度范围对 GIS 内部常见固体绝缘缺陷开展不同温度下间歇性放电特性试验研究,搭建 GIS 电-热耦合间歇性放电模拟试验平台,采用脉冲电流法、特高频(ultra high frequency, UHF)法、超声波法和气体特征组分检测法获取不同温度下固体绝缘缺陷间歇性放电特征数据并进行分析。研究发现:UHF 法和脉冲电流法在不同温度下均能有效检测到试验缺陷间歇性放电 UHF 信号,超声波法和气体特征组分检测法无法有效采集到有效放电数据;固体绝缘表面金属污秽缺陷和内部气隙缺陷间歇性放电电压与温度呈负相关,污秽缺陷间歇性放电电压呈较为明显的线性下降趋势,气隙缺陷间歇性放电电压呈先大幅下降后较平缓线性下降趋势;污秽缺陷间歇性放电的平均放电量和 UHF 信号幅值与温度的升高呈正相关;污秽缺陷放电间歇性在不同温度下随放电时间的增加会增强,而气隙缺陷放电时间间隔在 26 °C、40 °C、50 °C 下能由秒级发展为毫秒级,存在演变成击穿放电的风险。文中研究成果进一步丰富了 GIS 间歇性放电理论体系,有助于提升现场 GIS 间歇性放电的有效诊断率。

关键词:温度;气体绝缘组合电器(GIS);固体绝缘;间歇性放电;多源特征;有效诊断

中图分类号:TM85

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)03-0183-09

0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated substation, GIS)具有占地面积少、安装灵活方便、绝缘性能好等优点,在电力系统中获得了广泛的应用^[1-4]。国际大电网会议(CIGRE)工作组的统计结果表明,在 GIS 故障中,绝缘故障占比超过 50%,由绝缘表面缺陷和内部缺陷造成的局部放电(partial discharge, PD)严重威胁到了 GIS 的安全运行,影响电力系统的安全稳定运行^[5-8]。尽管国内外科研工作者针对 PD 绝缘缺陷检测技术进行了大量的理论和试验研究^[9-10],并且国内新投运的 220 kV 及以上 GIS 均安装有检测系统或者留有检测接口,但是运行效果不佳,GIS 的 PD 在线监测系统出现了较多的误报和漏报情况^[11]。针对该问题,国网公司组织相关技术专家对 GIS 设备进行解体与故障分析,认为间歇性放电是导致误报和漏报的原因,间歇性放电每次放电的时间间隔远远大于稳定放电时间间隔,导致现有的 PD 检测系统往往将间歇性放电脉冲信号误判为干扰信号而忽略^[12]。

目前,国内外对 GIS 间歇性放电的研究还比较少,对间歇性放电的理解还不够透彻,对间歇性放

电并没有明确的定义,其放电时间间隔也没有统一的标准。文献[13]设计 GIS 固体绝缘金属污秽放电缺陷模型,通过施加稍低于缺陷起始放电的试验电压,研究长间歇性放电情况下放电特高频(ultra high frequency, UHF)信号图谱特性和放电时间间隔的变化规律,试验发现绝缘子表面放电通道出现明显的增长,放电的间歇性进一步增强。文献[14]研究固体绝缘金属污秽放电缺陷 UHF 放电特性的稀疏特征,发现放电区间分散度很大、间隔跨度自数秒至数小时不等。文献[15]研究 GIS 绝缘子内部气隙缺陷的放电发展过程,在平稳劣化阶段气隙缺陷放电重复率下降,放电变得稀疏。

而在实际运行过程中,GIS 的高压载流导杆会流过较大的负载电流并受到外界环境温度的影响,导致中心导杆温度升高^[16-17],GIS 绝缘子不仅承受强电场的作用,还承受温度场的作用。已有文献表明,温度会对 GIS 放电特性造成一定的影响,随着温度升高,绝缘子表面金属异物缺陷的局部放电起始电压降低,放电量和放电频次增加^[18]。文献[19]针对 2 种典型固体绝缘放电(沿面和气隙放电)在不同温度下的放电 UHF 特征进行分析,发现随着温度的升高,试验所选绝缘缺陷放电起始电压降低、放电频度增大、放电幅值均值降低、放电间隔减小。因此有必要开展不同温度下 GIS 内部固体绝缘缺陷

收稿日期:2023-11-19;修回日期:2024-01-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107144)

间歇性放电特性试验研究。

基于此,文中根据 GIS 实际运行温度范围,搭建 220 kV GIS 电-热耦合间歇性放电模拟试验平台,采用脉冲电流法、UHF 法、超声波法和气体特征组分检测法获取固体绝缘表面金属污秽缺陷和固体绝缘内部气隙缺陷(下文统称固体绝缘缺陷)间歇性放电特征数据,并调整试验温度探究 GIS 间歇性放电多源特征信号变化规律和温度之间的关系。

1 GIS 电-热耦合间歇性放电模拟试验平台

1.1 不同温度下 GIS 间歇性放电模拟系统

为实现不同温度下 GIS 间歇性放电的有效模拟及其放电多源特征信号变化规律的有效获取,文中搭建 220 kV GIS 电-热耦合间歇性放电模拟试验平台,如图 1 所示。其中可动态调温加热带缠绕于 GIS 腔体外表面,通过无线测温的方式在线测量 GIS 腔体内部温度,通过调整加热带加热功率来保证试验过程中 GIS 内部温度的稳定性,GIS 试验腔体采用有机玻璃密封。

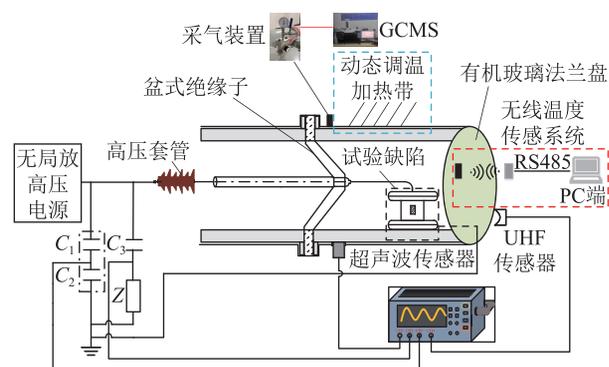


图 1 不同温度 GIS 间歇性放电多源检测试验平台

Fig.1 GIS intermittent discharge multi-source detection test platform at different temperatures

试验平台根据 IEC 60270 和 GB/T 7354 建立耦合电容 C_3 和检测阻抗 Z 串联的 PD 检测回路, C_1 和 C_2 为分压电容,工频周期信号由 C_2 通过同轴电缆线传输至泰克高性能数字示波器 (Tektronix * MS044, 四通道,带宽 1.5 GHz,采样频率 6.25 GS/s),并利用标准脉冲发生器对检测回路进行脉冲放电量的标定试验。将 UHF 传感器置于有机玻璃法兰盘外表面,超声波传感器经耦合剂紧贴于 GIS 试验腔体金属外表面,试验缺陷地电极用金属铜线通过有机玻璃法兰盘连接到地线。试验腔体中充入 0.5 MPa 纯净的 SF_6 气体,并利用 GCMS-QP2020 NX 气相色谱质谱联用仪 (gas chromatography-mass spectrometry, GCMS) 对试验后的 SF_6 气体分解组分进行定性和定量分析。

试验用传感器性能参数如表 1 所示。其中, UHF 传感器为超宽带椭圆单极子天线^[20],超声波传感器型号为 PX PXR15,超声波传感器采用 40 dB 前置放大器来提高信号的检测能力。

表 1 试验用传感器性能参数

Table 1 Performance parameters of sensors for testing

试验用传感器	检测频带范围	驻波比	谐振频率	灵敏度
UHF 传感器	0.3~3 GHz	<5		<1 dBm
超声传感器 (接 40 dB 放大器)	25~530 kHz		140±20% kHz	67 dB

1.2 不同温度下 GIS 间歇性放电模拟试验方法

GIS 内部的高压导体因电流而产生的温升范围为 40~70 °C^[17,21-22],故文中选取 26 °C (室温)、40 °C、50 °C、60 °C 和 70 °C 共 5 个不同温度进行试验,研究不同温度下 GIS 间歇性放电特性。加热带设定不同加热温度后 GIS 内部 SF_6 气体的温度测量结果如表 2 所示,可以看出,受热量扩散的影响,GIS 内温度和加热带设定温度之间存在微弱差别。

表 2 试验测温结果

Table 2 Test temperature measurement results

加热带设定温度/°C	GIS 内测量温度/°C
42.5	40.3
52.8	50.5
63.6	60.2
74.2	70.5

不同温度下 GIS 间歇性放电模拟试验方法如图 2 所示。首先利用加热带调节 GIS 试验腔体内部温度,待试验腔体内部温度稳定后,采用阶梯升压法,缓慢升压至试品产生稳定 PD,记该电压为 U_{PDIV} ,随后缓慢降低试验电压至放电完全消失,记该电压为 U_{PDDV} ,选择试验电压 U_i ($U_{PDDV} < U_i < U_{PDIV}$);保持试验电压恒定不变,进行间歇性放电 UHF、超声和脉冲电流信号的监测和分析,并在试验结束后利用 GCMS 对 SF_6 气体分解组分进行分析;调节试验温度,获取不同温度下 GIS 间歇性放电多源特征信号的变化特性。

1.3 固体绝缘缺陷模型

现场超特高压 GIS 出现了多起固体绝缘突发性击穿或闪络的故障,此类缺陷未能被已经安装的 PD 在线监测系统提前发现并预警,对设备造成了严重的损害。参照国网公司企标 Q/GDW 11304.8—2015《电力设备带电检测仪器技术规范》第 8 部分标准,文中所研制的固体绝缘表面金属污秽缺陷和内部气隙缺陷如图 3 所示。其中金属污秽缺陷是利用环氧树脂胶将多个尺寸约为 1 mm×1 mm×0.5 mm

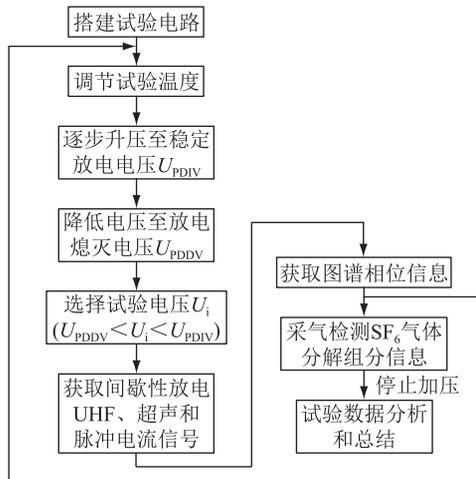


图2 不同温度下 GIS 间歇性放电特性试验方法

Fig.2 Test method for intermittent discharge characteristics of GIS at different temperatures

的金属碎屑附着在环氧树脂圆柱体表面;内部气隙缺陷是利用环氧树脂胶将3层高1 mm、直径90 mm的环氧树脂板粘在一起,在中间一层环氧树脂板的中心开一个直径为3 mm的圆形通孔。

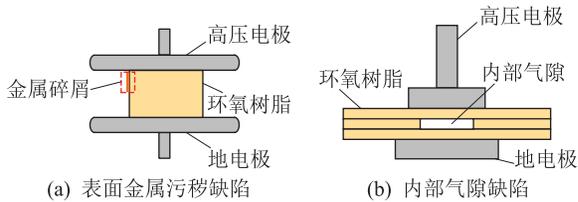


图3 固体绝缘缺陷模型

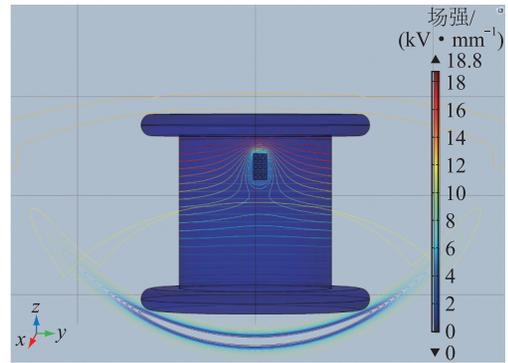
Fig.3 Solid insulation defect models

为探究试验缺陷间歇性放电过程中场强畸变区域以及场强畸变程度,通过 COMSOL 对缺陷模型进行电场仿真,其中固体绝缘表面金属污秽缺陷施加交流 22 kV 间歇性放电试验电压,气隙缺陷模型施加交流 5.2 kV 间歇性放电试验电压(试验电压等级的确定见下文),仿真结果如图 4 所示。

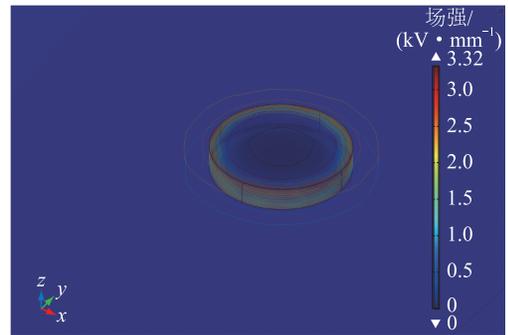
从图 4(a)可以看出,金属污秽缺陷最大畸变场强为 18.8 kV/mm,平均场强为 1.1 kV/mm,远低于高压导体与金属污秽之间间隙的击穿场强。从图 4(b)中可以看出,气隙缺陷最大畸变场强为 3.32 kV/mm,平均场强为 0.436 kV/mm,同样远低于高压导体与环氧树脂气隙之间的击穿场强。2 种缺陷在外施电压较低的情况下缺陷部位的场强畸变不足,均难以引发连续的强烈放电。

2 固体绝缘缺陷间歇性放电状态分析

为保证试验结果的可靠性,在室温无缺陷条件下对 GIS 间歇性放电多源检测试验平台进行无 PD 测试,加压至 60 kV 并保持恒压,维持加压时间为



(a) 固体绝缘表面金属污秽缺陷电场畸变情况



(b) 固体绝缘内部气隙缺陷电场畸变情况

图4 电场仿真结果

Fig.4 Simulation results of electric field

30 min,期间未检测到 PD 信号,说明试验平台在 60 kV 及以下试验电压等级下不存在 PD 干扰信号。

2.1 固体绝缘缺陷间歇性放电模拟

在室温条件下进行污秽缺陷间歇性放电试验,试验电压为 23 kV 时,采集该电压等级下 50 个工频周期脉冲电流信号进行放电图谱分析,分析结果如图 5(a) 所示,污秽缺陷达到稳定放电状态,平均放电量为 24.3 pC。进一步保持试验环境不变,降低试验电压至 22 kV,采集该状态间歇性放电情况下 50 个工频周期的放电脉冲电流信号并进行图谱分析,如图 5(b) 所示,对应平均放电量为 15.2 pC,该状态下放电脉冲个数较少,放电较为稀疏,能有效模拟间歇性放电状态。

在室温条件下进行气隙缺陷间歇性放电试验,试验电压升至 5.5 kV 时,采集该电压等级下 50 个工频周期脉冲电流信号进行放电图谱分析,分析结果如图 6(a) 所示,内部气隙缺陷处于稳定放电状态,平均放电量为 54.8 pC。降低试验电压至 5.2 kV,此时对应放电脉冲图谱如图 6(b) 所示,放电时间间隔远大于稳定放电脉冲时间间隔,平均放电量为 43.5 pC,相较于固体绝缘内部气隙缺陷连续放电状态,其间歇性放电相位分布较为分散,放电较为稀疏,放电脉冲幅值波动较大,能有效模拟间歇性放电状态。

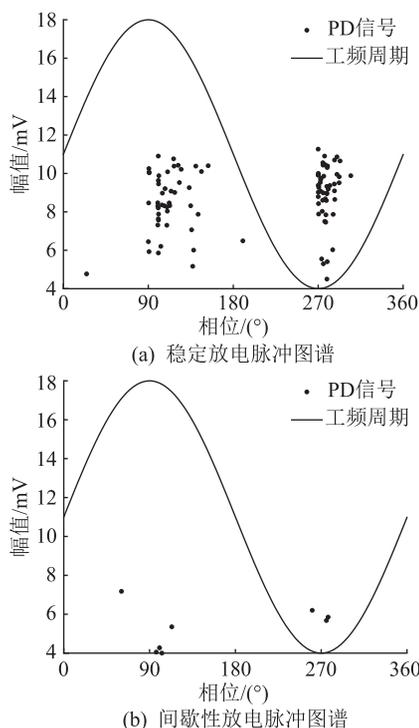


图5 金属污秽缺陷 50 工频周期脉冲图谱

Fig.5 Pulse graph of metal contamination defect in 50 power frequency cycle

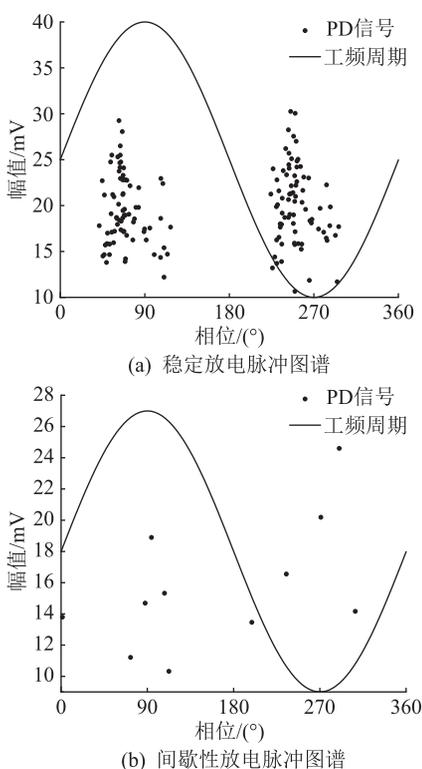


图6 气隙缺陷 50 工频周期脉冲图谱

Fig.6 Pulse graph of air gap defect in 50 power frequency cycle

2.2 固体绝缘缺陷间歇性放电 UHF、超声信号分析

在 2.1 节中确定的间歇性放电试验条件下开展固体绝缘表面金属污秽缺陷和固体绝缘内部气隙

缺陷间歇性放电试验。试验中获取的间歇性放电 UHF 信号和超声波信号分别如图 7、图 8 所示,试验缺陷在不同温度下均能有效检测到间歇性放电 UHF 信号。

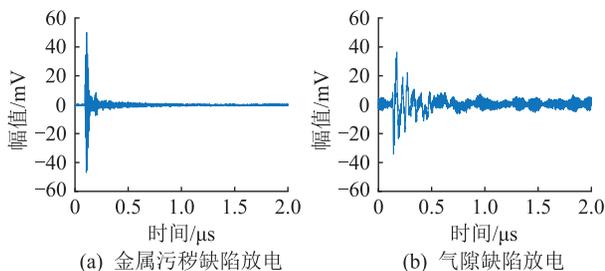


图7 固体绝缘缺陷间歇性放电 UHF 时域图

Fig.7 UHF time-domain diagram of intermittent discharge of solid insulation defects

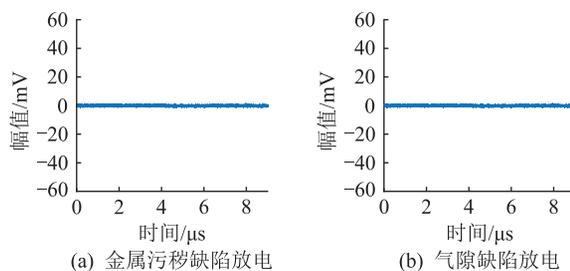


图8 固体绝缘缺陷间歇性放电超声波时域图

Fig.8 Ultrasonic time-domain diagram of intermittent discharge of solid insulation defects

由图 8 可以看出,超声波法无法有效检测缺陷间歇性放电所产生的超声波信号。这是因为超声波信号在 SF₆ 中衰减大,衰减系数为 26 dB/m,是空气或油中衰减系数的近 20 倍,间歇性 PD 产生的超声波信号先通过 SF₆ 气体再通过金属外壳传达到超声波传感器^[23]。试验中,超声波探头贴于试验腔体外壁,与声源距离约 200 mm,而间歇性放电能量小,辐射的超声波信号较弱,导致外置超声波法很难检测固体绝缘缺陷间歇性放电所产生的超声信号。

进一步对试验缺陷间歇性放电 UHF 信号进行频谱分析,结果见图 9。从图 9(a)可知,背景噪声信号主要频点在 0.9 GHz 和 1.8 GHz,这 2 个频率对应信号为通信干扰信号^[24]。由图 9(b)和(c)可知,表面金属污秽缺陷间歇性放电 UHF 信号主要频带集中在 0.9 GHz 以上,内部气隙缺陷间歇性放电 UHF 信号主要频带集中在 0.3~0.9 GHz,符合 PD UHF 信号 0.3~3 GHz 的频率范围。

3 不同温度下固体绝缘缺陷间歇性放电特性

3.1 温度对固体绝缘缺陷间歇性放电电压影响

试验前利用加热带对腔体外部进行预加热,待

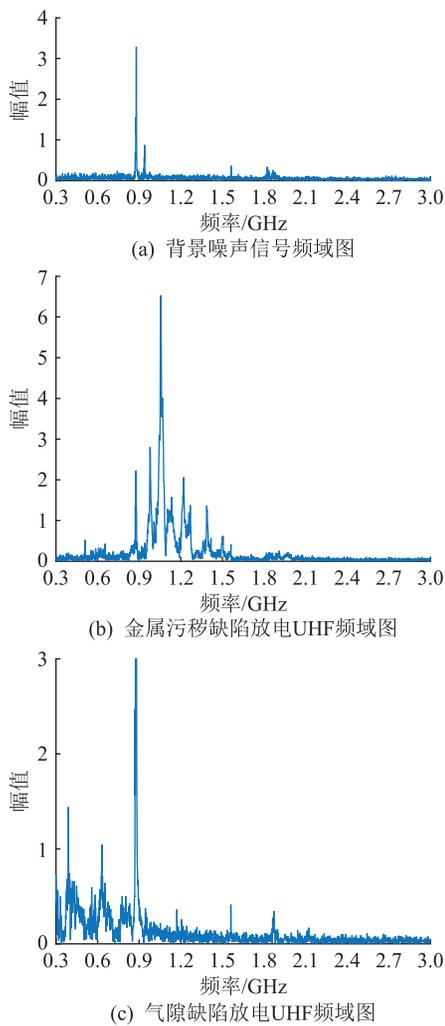


图9 背景噪声信号和固体绝缘缺陷放电 UHF 信号频域图
Fig.9 Frequency domain diagram of background noise signal and solid insulation defect discharge UHF signal

温度分布稳定后开始试验,通过 GIS 间歇性放电模拟方法获取不同温度下间歇性放电试验电压,每次试验重复测量 5 次间歇性放电试验电压并取平均值,试验结果如图 10 所示。

可以看出,金属污秽缺陷和气隙缺陷间歇性放电试验电压均与温度的升高呈明显负相关。随着温度的上升,金属污秽缺陷间歇性放电试验电压呈线性下降趋势,温度从 26 °C 升至 70 °C,试验电压从 22 kV 下降至 18.8 kV,下降了约 14.5%。气隙缺陷在温度降低的起始阶段,间歇性放电电压出现大幅降低,温度从 26 °C 升至 70 °C,试验电压从 5.2 kV 下降至 2.6 kV,下降了约 50%。

温度升高, SF₆ 气体和固体绝缘内部气隙中粒子的能量增加,更容易发生碰撞电离,产生 PD。此外,绝缘子周围温度较高区域内的气体密度降低,电气绝缘强度下降,更容易引发 PD。因此,随着温度升高,试验缺陷的 PD 起始电压降低。

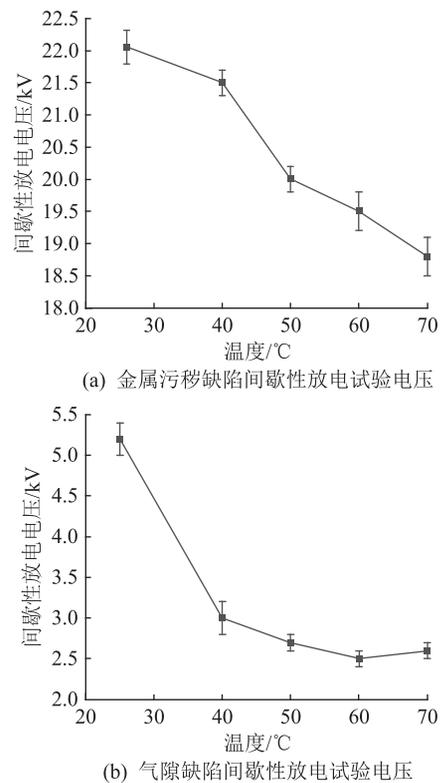


图 10 间歇性放电试验电压随温度变化规律
Fig.10 Intermittent discharge test voltage variation with temperature

3.2 不同温度下固体绝缘缺陷放电信号幅值变化分析

由于超声波法无法检测到固体绝缘间歇性放电辐射超声波信号,试验过程中每隔 8 h 同步采集放电量信息和 UHF 信号幅值信息,共采集 48 h 放电量信息,对每次采集的放电量信息和 UHF 信号随机取 10 组放电信号进行放电量 and UHF 幅值均值计算,统计结果如图 11 和图 12 所示。

由图 11(a)可知,固体绝缘表面金属污秽缺陷间歇性放电状态下平均放电量与温度的升高呈正相关。随着温度的升高,在间歇性放电初始时刻,平均放电量由最低 29 pC 最高增加到 49.1 pC,70 °C 下平均放电量最高达到 65.2 pC。由图 11(b)可知,固体绝缘内部气隙缺陷在间歇性放电初始时刻的平均放电量随着温度升高而显著增加,由最低 117.3 pC 最高增加到 179 pC,60 °C 下平均放电量最高达到 205 pC,且在温度影响下,其平均放电量长时间保持在一个较高值,70 °C 下平均放电量在 32 h、40 h 明显低于 50 °C、60 °C 下的平均放电量。

图 12 中,在整个试验阶段,气隙缺陷 UHF 信号幅值与温度的升高呈正相关,随着放电时间的增加,气隙缺陷平均放电量先升后降。在放电 24 h 内,气隙缺陷 UHF 信号幅值与温度的升高呈正相

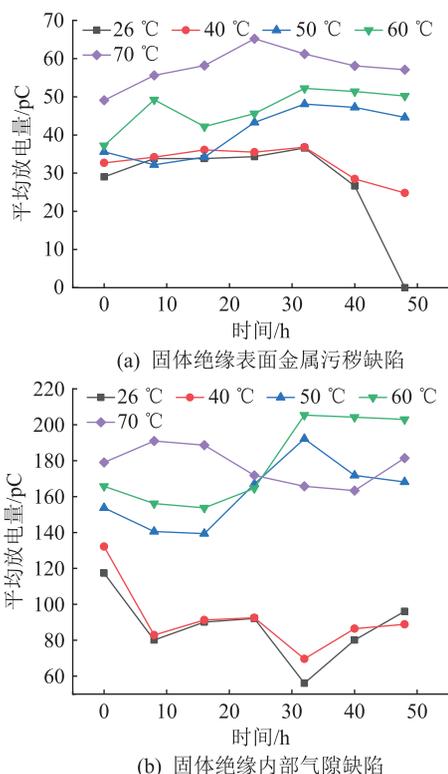


图 11 不同温度下平均放电量随时间变化规律
Fig.11 The variation of average discharge value with time at different temperatures

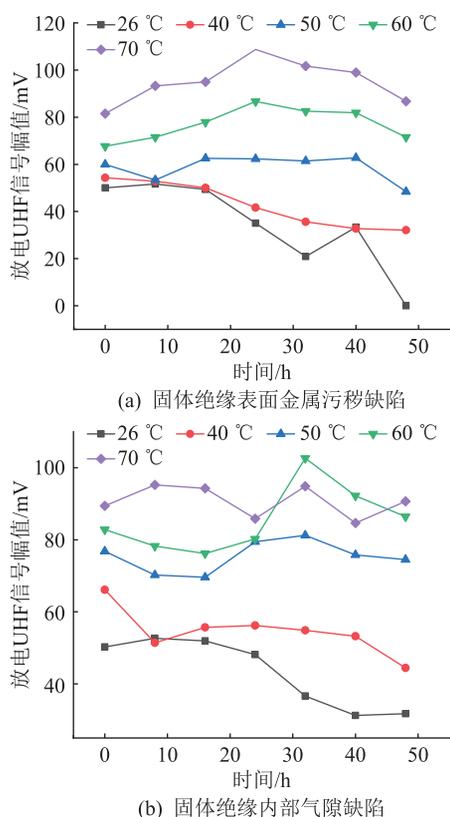


图 12 不同温度下平均 UHF 信号幅值随时间变化规律
Fig.12 The variation of average UHF signal amplitude with time at different temperatures

关,随着放电时间的增加,60 °C 下 UHF 信号幅值有较为明显的变大趋势且高于其他温度下 UHF 信号幅值。

固体绝缘表面污秽缺陷和内部气隙缺陷在不同温度下间歇性放电信号幅值呈现上述变化的原因主要为:随着试验温度的升高,SF₆ 气体粒子的能量增加,缺陷放电电量会增大;温度升高使得间歇性放电试验电压降低,在较低的试验电压激励下放电电量会减少,温度升高对其间歇性放电的促进作用强于抑制作用,导致放电量呈现增大趋势;长时间放电会对环氧树脂材料造成绝缘劣化损伤,导致气隙缺陷间歇性放电信号幅值会在某个时刻发生较大变化。

3.3 不同温度下固体绝缘缺陷放电间歇性

采用脉冲电流法统计的试验缺陷平均放电时间间隔如图 13 所示。

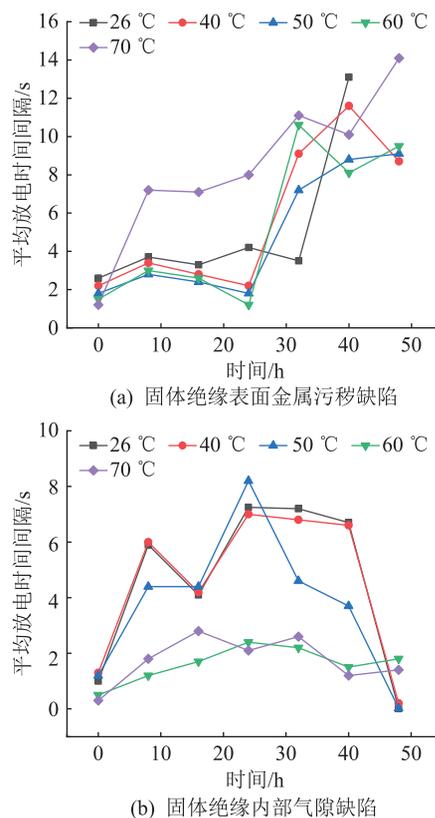


图 13 不同温度下平均放电时间间隔随时间变化规律
Fig.13 The variation of average discharge time interval with time at different temperatures

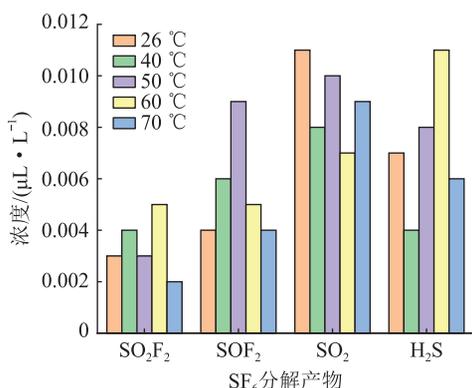
污秽缺陷平均放电时间间隔在间歇性放电初始时间段随着温度的升高而减少,在不同温度下平均放电时间间隔整体上都呈现逐渐变大的趋势且放电十分稀疏。固体绝缘内部气隙缺陷间歇性放电在 26 °C、50 °C、60 °C、70 °C 下放电时间间隔会增大然后会出现减小的趋势,在 26 °C、40 °C 和 50 °C

下,放电时间间隔分别从 6.7 s、6.6 s 和 3.7 s 变化为 23 ms、20 ms 和 10 ms,放电时间间隔由秒级转变为毫秒级,放电脉冲信号由间歇性放电演变成连续放电,而在 60 °C 和 70 °C 下,固体绝缘内部气隙缺陷并未出现连续放电的情况,在试验过程中仍保持间歇性放电状态。

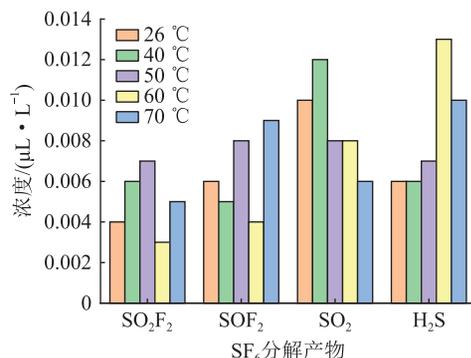
固体绝缘表面污秽缺陷和内部气隙缺陷在不同温度下间歇性放电时间间隔呈上述变化的原因主要为:在同一个工频半周期内,前次放电产生的表面电荷对后续放电起抑制作用,放电时间间隔会增大;另一方面,在工频极性反转时,绝缘子表面电荷产生的电场与外施电场叠加会增强电场,放电时间间隔会减小。综上,由于温度升高,绝缘子表面电荷消散加快,但间歇性放电时间间隔为秒级,表面电荷会对其产生抑制作用,也会产生促进作用。表面污秽缺陷平均放电时间间隔在 26 °C、40 °C、50 °C、60 °C、70 °C 下随着放电时间的延长会逐渐增大,在放电初始时刻平均放电时间间隔与温度的升高呈负相关。内部气隙缺陷放电时间间隔在 26 °C、40 °C、50 °C、60 °C、70 °C 下随着温度的增加会出现先增大减小的趋势,且在 26 °C、40 °C 和 50 °C 下,放电时间间隔由秒级转变为毫秒级。

3.4 化学检测分析

纯净 SF₆ 气体在长时间放电试验之后会分解出 SO₂F₂、SOF₂、SO₂ 和 H₂S 等主要分解产物^[25]。开展固体绝缘缺陷间歇性放电试验后,利用 GCMS 对试验后 SF₆ 气体组分进行检测,检测结果如图 14 所示。可以看出,不同温度下 48 h 固体绝缘缺陷间歇性放电后检测结果中的 SO₂F₂、SOF₂、SO₂ 和 H₂S 特征气体的浓度精度为 10⁻³ μL/L 级别,实验室 GCMS 对 SF₆ 分解产物的有效测量精度为 1 μL/L,这说明试验缺陷间歇性放电没有导致 SF₆ 气体有效分解,同时也说明试验缺陷在间歇性试验中放电并不剧烈。



(a) 金属污秽缺陷间歇性放电气体组分检测结果



(b) 气隙缺陷间歇性放电气体组分检测结果

图 14 SF₆ 分解产物浓度

Fig.14 Concentration of SF₆ decomposition products

4 结论

(1) 文中所研制的固体绝缘表面金属污秽缺陷和内部气隙缺陷在外施电压较低的情况下缺陷部位的场强畸变不足,试验过程中均能有效模拟间歇性放电状态;

(2) UHF 法和脉冲电流法均能有效检测到固体绝缘缺陷在不同温度下的间歇性放电信号,安装在 GIS 金属外壳上的超声波传感器不能有效检测到放电信号,特征气体组分化学检测法很难对间歇性放电进行有效检测,检测的特征气体组分的浓度精度为 10⁻³ μL/L 级别;

(3) 温度对试验缺陷放电脉冲电流信号和 UHF 信号有一定的影响,间歇性放电平均放电量和 UHF 信号幅值与温度的升高呈正相关,起始放电电压与温度的升高呈负相关,金属污秽缺陷放电间歇性在不同温度下随放电时间的增加会增强,而气隙缺陷放电时间间隔则在不同温度下会出现增大然后减小的趋势,在 26 °C、40 °C 和 50 °C 下,放电时间间隔随着放电时间的增加分别从 6.7 s、6.6 s 和 3.7 s 变化为 23 ms、20 ms 和 10 ms,放电时间间隔由秒级发展为毫秒级,由间歇性放电演变成稳定放电。

参考文献:

- [1] 何金, 郝晓光, 李旭, 等. 基于多种检测手段的组合电器悬浮放电诊断及定位分析[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 25-31.
HE Jin, XI Xiaoguang, LI Xu, et al. Diagnosis and location of suspension discharge in composite apparatus based on multiple detection methods[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 25-31.
- [2] 张国治, 鲁昌悦, 周红, 等. 电力设备局部放电超声、特高频一体化传感技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 5090-5101.
ZHANG Guozhi, LU Changyue, ZHOU Hong, et al. Integrated ultrasonic and UHF sensing technology for partial discharge of power equipment [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5090-5101.

- [3] 刘航斌,林厚飞,褚静,等. 基于 CWGAN-div 和 Mi-CNN 的 GIS 局部放电图谱识别[J]. 浙江电力,2023,42(8):75-83.
LIU Hangbin, LIN Houfei, CHU Jing, et al. Recognition of partial discharge patterns of GIS based on CWGAN-div and Mi-CNN[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(8): 75-83.
- [4] 吴旭涛,赵晋飞,马云龙,等. 基于多频激励下振动响应的 GIS 机械缺陷诊断方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(4):108-115.
WU Xutao, ZHAO Jinfei, MA Yunlong, et al. Mechanical defect diagnosis technology of GIS based on vibration response under multiple frequency excitation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 108-115.
- [5] 宋辉,代杰杰,李喆,等. 运行条件下 GIS 局部放电严重程度评估方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):1231-1241.
SONG Hui, DAI Jiejie, LI Zhe, et al. An assessment method of partial discharge severity for GIS in service[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1231-1241.
- [6] 张晓星,孟凡生,任江波,等. 硼掺杂单壁碳纳米管检测 SF₆ 气体局部放电仿真[J]. 高电压技术,2011,37(7):1689-1694.
ZHANG Xiaoxing, MENG Fansheng, REN Jiangbo, et al. Simulation on the B-doped single-walled carbon nanotubes detecting the partial discharge of SF₆[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1689-1694.
- [7] LI J H, HAN X T, LIU Z H, et al. A novel GIS partial discharge detection sensor with integrated optical and UHF methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 2047-2049.
- [8] 张兴辉,常文治,杜非,等. GIS 局部放电多特征量传感研究进展[J]. 高压电器,2022,58(4):8-16.
ZHANG Xinghui, CHANG Wenzhi, DU Fei, et al. Research progress of multi-physics sensing in partial discharge of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 8-16.
- [9] 宋雨轩,陈伟根,张知先,等. 基于光纤迈克尔逊干涉仪的 GIS 内置局部放电超声传感技术[J]. 高电压技术,2022,48(8):3088-3097.
SONG Yuxuan, CHEN Weigen, ZHANG Zhixian, et al. Ultrasonic sensing technology of partial discharge built into GIS based on fiber optic Michelson interferometry[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3088-3097.
- [10] 卢启付,李端姣,唐志国,等. 局部放电特高频检测技术[M]. 北京:中国电力出版社,2017:3.
LU Qifu, LI Duanjiao, TANG Zhiguo, et al. Ultra-high frequency detection technology of partial discharge[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017: 3.
- [11] 王国利,高超,杨芸,等. GIS 绝缘缺陷局部放电检测的有效性研究[J]. 高压电器,2018,54(11):62-72.
WANG Guoli, GAO Chao, YANG Yun, et al. Partial discharge detection effectiveness of typical insulation defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 62-72.
- [12] 董建新,刘江明,酆于杰,等. GIS 绝缘子表面金属异物缺陷长间歇稀疏性局放检测研究[J]. 高压电器,2018,54(11):73-79,85.
DONG Jianxin, LIU Jiangming, LI Yujie, et al. Research on long-interval sparse partial discharge in GIS and its sudden breakdown[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 73-79, 85.
- [13] 王红梅,丁登伟,贾志杰,等. 恒压下 GIS 盆式绝缘子表面缺陷的长间歇性放电特性研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(20):6188-6194.
WANG Hongmei, DING Dengwei, JIA Zhijie, et al. Research on intermittent discharge characteristics of defects on the surface of disc-insulators of GIS under long-time constant voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6188-6194.
- [14] 张连根,路士杰,李成榕,等. 气体绝缘开关中表面金属异物长期局部放电稀疏性特征的观测[J]. 电工技术学报,2019,34(18):3928-3936.
ZHANG Liangen, LU Shijie, LI Chengrong, et al. Observation on the characteristics of long-term partial discharge sparseness of surface metal particle in gas insulated switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3928-3936.
- [15] 唐志国,李阳. 恒压下 GIS 固体绝缘界面气隙缺陷放电严重程度评估[J]. 高压电器,2024,60(2):62-68,77.
TANG Zhiguo, LI Yang. Severity assessment of air gap defect discharge at GIS solid insulation interface under constant voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 62-68, 77.
- [16] 路士杰,张连根,周宏扬,等. 温度对工频下环氧支柱沿面闪络电压的影响[J]. 高电压技术,2019,45(9):2774-2781.
LU Shijie, ZHANG Liangen, ZHOU Hongyang, et al. Effect of temperature on flashover voltage of epoxy column at power frequency[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2774-2781.
- [17] 王增彬,刘姝嫫,周宏扬,等. GIS 盆式绝缘子温度多物理场仿真方法[J]. 高电压技术,2019,45(12):3820-3826.
WANG Zengbin, LIU Shupin, ZHOU Hongyang, et al. Multi-physics simulation method for GIS epoxy spacer temperature[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3820-3826.
- [18] 李星,许渊,丁登伟,等. 温度对 GIS 绝缘子表面金属异物局部放电及闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):406-415.
LI Xing, XU Yuan, DING Dengwei, et al. Influence of temperature on partial discharge and flashover characteristics of metal particle on GIS insulator surface[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 406-415.
- [19] 陶亦然. 温度对 GIS 缺陷局部放电特高频信号特征的影响[D]. 北京:华北电力大学,2018.
TAO Yiran. Influence of temperature on partial discharge UHF characteristics of GIS defects[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [20] ZHANG H, ZHANG G, ZHANG X, et al. PD flexible built-in high-sensitivity elliptical monopole antenna sensor[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2022, 22(13): 4982.
- [21] 王珂珂,李丽,王久阳,等. 基于混合绝缘气体的三相 GIS 母线温升多物理场耦合机制研究[J]. 高压电器,2021,57

- (4):69-75.
- WANG Keke, LI Li, WANG Jiuyang, et al. Study on multi-physical field coupling mechanism of three-phase GIS bus temperature rise based on mixed insulating gas[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4):69-75.
- [22] 张俊民,侯振华,张春朋,等. 27.5 kV GIS 母线室三维温度场的数值计算[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12):62-67.
- ZHANG Junmin, HOU Zhenhua, ZHANG Chunpeng, et al. Three dimensional thermal field numerical calculation of 27.5 kV gas-insulated switchgear bus bar's cabinet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12):62-67.
- [23] 黄焜志. GIS 局部放电超声信号传播特性及检测系统设计[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
- HUANG Chizhi. Research on propagation characteristics of partial discharge ultrasonic signals in GIS and design of detection system[D]. Changsha:Hunan University, 2016.
- [24] 邹阳,周求宽,刘明军,等. 局部放电特高频检测装置抗电磁干扰性能的量化评估方法研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(10):2275-2282.
- ZOU Yang, ZHOU Qiukuan, LIU Mingjun, et al. Research on quantitative evaluation on anti-electromagnetic; Interference capability of ultra high frequency partial discharge detection instrument[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(10):2275-2282.
- [25] 张晓星,姚尧,唐炬,等. SF₆ 放电分解气体组分分析的现状和发展[J]. 高电压技术, 2008, 34(4):664-669, 747.
- ZHANG Xiaoxing, YAO Yao, TANG Ju, et al. Actuality and perspective of proximate analysis of SF₆ decomposed products under partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4):664-669, 747.

作者简介:



张国治

张国治(1990),男,博士,副教授,研究方向为电气设备在线监测和状态评估等(E-mail:youzgz@163.com);

田晗绿(1999),男,硕士在读,研究方向为电气设备在线监测和状态评估等;

杨帅(1990),男,硕士,工程师,从事继电保护、基建新技术相关工作。

The impact of temperature on intermittent discharge characteristics of solid insulation defects inside GIS

ZHANG Guozhi^{1,2,3}, TIAN Hanlyu¹, YANG Shuai⁴, LU Changyue¹, ZHANG Xiaoxing^{1,5}

(1. Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Wuhan Nari Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Project Management Center of State Grid Changji Power Supply Company, Changji 831100, China; 5. Xiangyang Industrial Institute of Hubei University of Technology, Xiangyang 441100, China)

Abstract: Given the frequent missing and false alarms of partial discharge insulation defects in on-site gas insulated substation (GIS), intermittent discharge characteristics tests are conducted in this article to study the discharge characteristics of common solid insulation defects inside GIS at different temperatures in the actual operating temperature range of GIS. In this paper, the platform of GIS electric thermal coupling intermittent discharge simulation test is built with the pulse current method, ultrahigh frequency (UHF) method, ultrasonic method and gas characteristic component detection method used in combination to obtain and analyze the intermittent discharge characteristic data of solid insulation defects at different temperatures. It is found out that both UHF detection method and pulse current detection method can effectively detect the intermittent discharge UHF signals of test defects at different temperatures, while ultrasonic and gas characteristic component detection methods are not applicable to effectively collect effective discharge data. The intermittent discharge voltage of metal pollution defects on the surface of solid insulation and internal air gap defects shows a negative correlation with temperature. The intermittent discharge voltage of pollution defects shows a significant trend of linear decrease, while the intermittent discharge voltage of air gap defects shows a significant decrease first and then a trend of slow-paced linear decrease. The average discharge capacity and UHF signal amplitude of intermittent discharge of pollution defects exhibit a positive correlation with the increase of temperature. The intermittency of pollution defect discharge increases with the extension of discharge time at different temperatures, while the interval of gap defect discharge can change from second level to microsecond level at 26 °C, 40 °C and 50 °C, posing a risk of breakdown discharge. The research results obtained in this article further enrich the theoretical system of GIS intermittent discharge and improve the effective diagnosis rate of on-site GIS intermittent discharge.

Keywords: temperature; gas insulated substation (GIS); solid insulation; intermittent discharge; multi-source features; effective diagnosis

(编辑 方晶)