

GIS/GIL 设备局部放电高电位脉冲电流测量方法

李 星¹, 丁登伟¹, 张 榆², 许 渊³, 袁明虎¹, 刘卫东¹

(1. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610213; 2. 国网四川省电力有限公司电力科学研究院, 成都 610041;
3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘 要: 局部放电(partial discharge, PD)脉冲电流法是定量表征气体绝缘开关设备(gas-insulated switchgear, GIS)和气体绝缘输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)放电强度最基础和有效的方法。然而, 脉冲电流法检测频率低, 抗干扰能力差, 现场应用灵敏度低。为此, 该文提出了局部放电高电位脉冲电流测量方法, 将局部放电脉冲电流测量单元串联入高压导体, 抑制地电位耦合的干扰, 同时增强局放信号耦合, 以提高局放测量的抗干扰能力和灵敏度。进一步, 通过搭建 500 kV 真型 GIS 试验平台, 验证了所提方法的灵敏度和抗干扰能力, 并开展了不同类型缺陷局部放电试验。结果表明, 复杂干扰试验环境下, 传统脉冲电流法灵敏度仅为 20 pC, 高电位脉冲电流法最小可测局放量则可低至 0.5 pC。高电位脉冲电流法抗干扰能力更强, 其噪声抑制比为传统脉冲电流法的近 10 倍。局放测量结果显示, 针对不同类型缺陷, 高电位测量法均可实现有效测量, 检测有效性优于传统脉冲电流法和特高频法。该文研究内容为现场复杂干扰下 GIS/GIL 局部放电定量检测的应用奠定了基础。

关键词: 气体绝缘开关设备; 气体绝缘输电线路; 局部放电; 脉冲电流; 高电位; 抗干扰

High Potential Partial Discharge Pulse Current Detection Method for GIS/GIL Equipment

LI Xing¹, DING Dengwei¹, ZHANG Yu², XU Yuan³, YUAN Minghu¹, LIU Weidong¹

(1. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Partial discharge (PD) pulse current detection is the most basic and effective method for quantitatively characterizing discharge intensity of gas-insulated switchgear method (GIS) and gas-insulated transmission line (GIL). However, the pulse current method has a low detection frequency and poor anti-interference ability, resulting in a low sensitivity during on-site application. Therefore, in this paper, a PD detection method based on high-potential pulse current is proposed. The PD measurement unit is connected in series with the high-voltage conductor to suppress the interference coupling from ground wire and to enhance the PD signal coupling, so that the anti-interference ability and sensitivity of PD measurement can be improved. Furthermore, a 500 kV actual GIS test platform is built to verify the sensitivity and anti-interference ability of the proposed method, and PD tests for different types of defects are conducted. The result shows that, under complex interference test environment, the sensitivity of the traditional method is only about 20 pC, while the minimum measurable apparent charge of the proposed method can be as low as 0.5 pC. The high-potential measurement method has higher anti-interference ability, and its noise suppression ratio is about 10 times that of traditional method. PD measurement results show that the high-potential measurement method can achieve effective detection for different types of defects, and the detection effectiveness is better than traditional pulse current method and UHF method. This study provides a foundation for the application of PD quantitative detection in GIS/GIL under complex field interference.

Key words: gas insulated switchgear (GIS); gas insulated transmission line (GIL); partial discharge (PD); pulse current; high potential; anti-interference

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)和气体绝缘输电线路(gas insulated transmission

lines, GIL)以其结构紧凑、占地面积小、环境适应能力强等优点, 在大型水电站、超/特高压变电站以及特高压直流换流站等电能生产与传输环节应用广泛^[1-2]。GIS/GIL 作为电力系统的关键核心设备, 其运行可靠性直接关系整个电网能源输送通道的安全稳定。

基金资助项目: 国家电网有限公司科技项目(SGSCDK00SDJS2200251)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (SGSCDK00SDJS2200251).

GIL/GIS 在制造、装配、运输及现场安装过程中可能引起绝缘缺陷, 从而在运行过程中引发绝缘失效^[3]。局部放电检测是进行设备绝缘状态诊断和评估的重要手段, 可以提前发现设备内部缺陷^[4-6]。GIL/GIS 产生局部放电时, 通常伴随声、光、电、气体分解等物理和化学现象。基于上述物理化学现象, 可以使用脉冲电流法、特高频法、超声波法、光检测法和气体分解物检测法等对 GIL/GIS 中的局部放电进行检测^[7-10]。

目前, 现场局部放电检测多采用特高频法、超声波法和气体分解物检测法。特高频法和超声波法对绝缘表面微缺陷少脉冲、小脉冲局放的检测灵敏度存在不足, 质效难以满足现场检测需求^[11-13]。另一方面, 特高频信号和超声波信号幅值与局部放电量大小没有直接对应关系, 无法有效衡量 GIL/GIS 绝缘缺陷大小^[14-15]。而局部放电产生的气体分解物含量较小, 稳定性较差, 通常需要累积到一定程度才能被检测到, 故而时效性较差^[16-17]; 且分解物检测只能定性判断局部放电产生与否, 分解物与放电量之间的关联性尚无法准确判断。

脉冲电流法可以定量测量局部放电的放电量, 是局部放电测量最基本和有效的方法^[18-19]。局部放电过程必然伴随电荷的变化, 故只要测量环境良好且测量系统灵敏度足够, 使用脉冲电流法能够检测到很微小的局部放电信号。因此, 理论上脉冲电流法具有较高的检测灵敏度。

传统局部放电脉冲电流测量方法通常在耦合电容接地线上串入测量阻抗, 通过阻抗测量局部放电产生的脉冲电流信号。通常, 耦合电容需为试品电容的 10 倍以上才能获得较好的局放测量灵敏度。然而, 对整段 GIL 或整间隔 GIS 而言, 其设备等效电容较大, 在现场试验中耦合电容往往难以满足要求, 导致测量灵敏度降低。为此, 徐洋、许渊等人提出了脉冲电流互参考测量方法^[20-21], 在试品接地线上串入测量阻抗, 获得了较高的局放测量灵敏度, 且该方法的测量灵敏度不依赖于耦合电容的选择。然而, 将整段 GIL 或整间隔 GIS 对地绝缘难度较大。此外, 由于脉冲电流法的检测频率较低, 通常在兆赫兹以下, 容易受到现场复杂干扰的影响^[22], 因此对测量环境要求较高, 一般只用于实验室测量和 GIS/GIL 设备出厂试验。现阶段, 脉冲电流法还难以在现场应用。因此, 迫切需要提高局部放电脉冲电流测量的抗干扰性, 实现复杂干扰环境中局部放

电的定量测量。

本文提出局部放电高电位脉冲电流测量方法, 将局部放电脉冲电流测量阻抗串联接入高压导体中, 以有效抑制接地线上耦合干扰的影响, 降低局放测量背景噪声, 提高局部放电测量的灵敏度。同时, 该方法降低了对耦合电容的依赖, 可实现整段 GIL 或整间隔 GIS 的高灵敏局部放电测量。500 kV 真型 GIS 试验平台上的局放试验结果表明, 相比传统脉冲电流法, 高电位测量法具有更高的抗干扰能力和测量灵敏度, 最小可测局放量低于 0.5 pC。

1 局部放电高电位脉冲电流测量方法

首先介绍局部放电高电位脉冲电流测量系统原理, 然后分析其抗干扰能力和测量灵敏度。

1.1 高电位脉冲电流测量原理

图 1 为高电位局部放电脉冲电流测量系统示意图。与传统脉冲电流法和互参考测量方法在接地线上接入测量阻抗不同, 高电位局放测量方法将测量阻抗 Z_0 串联进试验回路高压导体中, 测量阻抗两端分别连接电源侧和试品侧高压导体, 用以测量试品局部放电产生的脉冲电流信号。

图 2 为局部放电高电位脉冲电流测量方法等效电路。图中, U 为工频试验电源, Z_s 为保护阻抗, C_k 为耦合电容, Z_k 为测量阻抗, C_p 为试验工装杂散电容(被试品与试验电源之间连接工装等效电容), Z_0 为高电位测量用阻抗, C_x 为被试品等效电容。

当试品 C_x 发生局部放电时, 放电产生的脉冲电流以试品电容、耦合电容以及高压导体构成的回路流通, 在耦合电容接地线以及高压导体上串入阻抗均能测量到放电产生的脉冲电流信号。因此, 通过高电位测量阻抗 Z_0 可以实现试品局部放电测量。

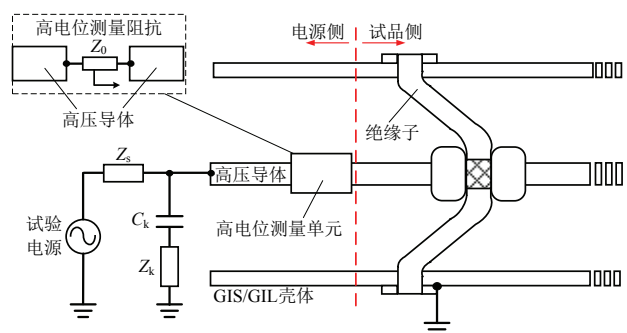


图 1 高电位脉冲电流测量系统示意图

Fig.1 Diagram of high potential PD pulse current detection system

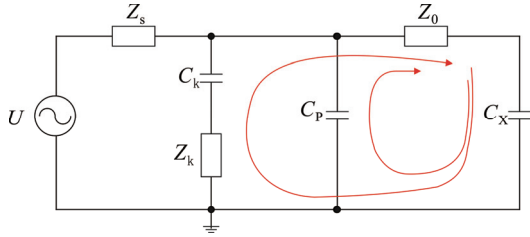


图2 高电位脉冲电流测量等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit for high potential pulse current detection system

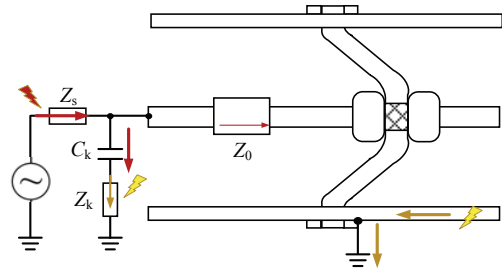


图3 外部干扰电流通路

Fig.3 Flow path for external interference current

1.2 高电位脉冲电流测量的抗干扰能力

局部放电脉冲电流测量的干扰主要来自两方面：一是从试验电源干扰或外部干扰耦合至试验电源侵入试验回路；二是干扰直接耦合到接地线上流经测量阻抗。高电位测量阻抗位于高压导体上，GIS/GIL 壳体可起到屏蔽作用，外部干扰无法耦合至测量阻抗。因此，采用高电位脉冲电流法可有效降低外部环境干扰对局部放电测量的影响，提高测量的抗干扰能力。

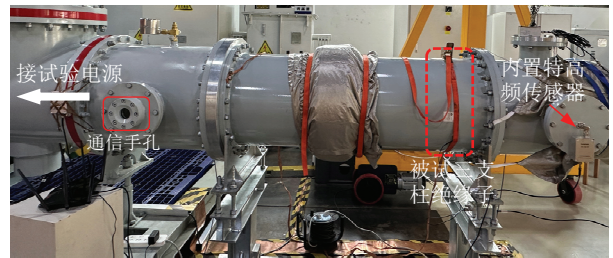
具体地，如图3所示，外部干扰通过电源侧耦合进试验回路时，部分干扰将被保护阻抗 Z_s 抑制，剩余干扰脉冲电流大部分被耦合电容支路旁路，测量阻抗 Z_k (即传统测量方法)受干扰影响较大，而仅有少部分干扰能流经高电位测量阻抗 Z_0 。此外，若外部干扰直接耦合到接地线或 GIS/GIL 壳体上，将通过接地线入地，干扰脉冲电流将流经测量阻抗 Z_k 而高电位测量阻抗 Z_0 不受该干扰影响。

综上所述，现场外部环境干扰严重，传统测量方法容易受干扰影响，从而影响局放测量灵敏度，限制其现场应用。采用高电位测量方法则可以极大地提高测量的抗干扰能力，使其具有复杂外部干扰场景下的应用前景。

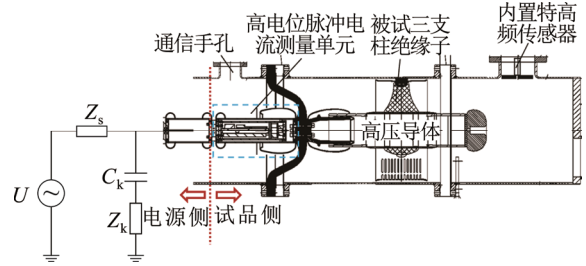
因此，局部放电高电位测量方法一方面可以有效地降低现场环境干扰对局部放电测量的影响，提高系统抗干扰能力；另一方面，可以更好地耦合试品局部放电产生脉冲电流信号，获得更大的局放信号幅值。通过降低噪声干扰，增强耦合到的局放信号幅值，有效提高了局放测量灵敏度。

2 局部放电测量系统

建立图4所示500 kV真型GIS试验平台，对局部放电高电位脉冲电流测量方法的有效性和灵敏度进行验证。该试验平台周围放置多台运行中的变



(a) 实物图



(b) 结构示意图

图4 试验平台

Fig.4 Schematic diagram of the experimental platform

频设备，试验电源无特殊滤波处理，周围无屏蔽、电磁环境复杂，可用于验证复杂干扰下高电位测量有效性。试验平台包括长度约3 m的500 kV GIS母线构成的试验单元，一个被试三支柱绝缘子(设置于试验单元内)，以及交流电源系统(包括交流电源和保护阻抗)。局部放电测量系统具体包括特高频法、传统脉冲电流法和高电位脉冲电流法。

如图4所示，在试验工装手孔内安装偶极子天线作为内置特高频传感器，其频响特性曲线如图5所示，在300~1500 MHz范围内平均等效高度大于11 mm。配备特高频放大器带宽250~800 MHz，增益50 dB。

传统脉冲电流检测法由检测阻抗 Z_k 和耦合电容 C_k 实现，通过 Z_k 进行局部放电检测。

局放高电位脉冲电流法由串接在高压导体中的检测阻抗及相应信号处理、采集、传输单元等实

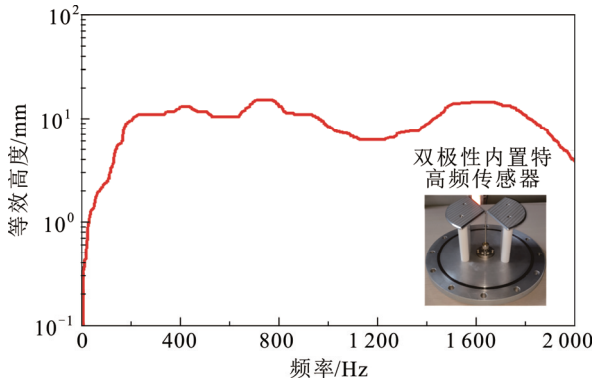


图 5 内置特高频传感器频响曲线

Fig.5 Frequency response characteristic of UHF sensor

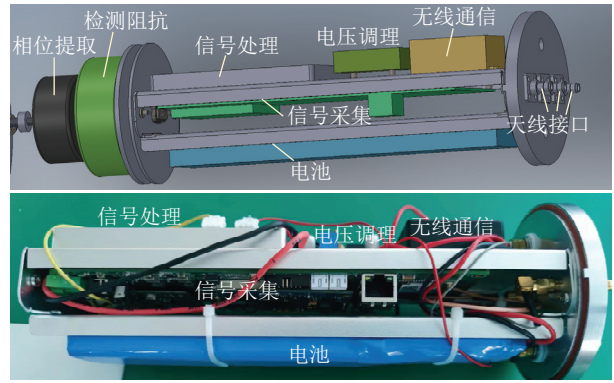
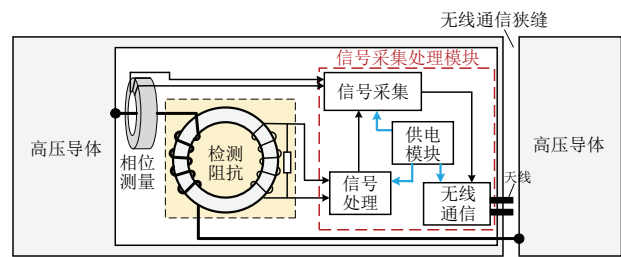


图 6 局放高电位测量模块

Fig.6 PD high potential measurement unit

现。高电位脉冲电流测量模块结构如图 6 所示, 主要包含相位测量、检测阻抗、信号处理、信号采集、电源模块(电池+电压调理)以及无线通信等模块。

如图 7 所示, 高电位检测阻抗串联入高压导体, 输入侧两端分别连接两侧高压导体, 输出端连接至信号处理单元, 用于测量局部放电产生的脉冲电流信号。相位测量则基于电流互感器原理, 通过测量流过高压导体的试验电流来获得试验电压相位信息, 作为局放信号图谱的参考相位。局放信号和相位信号均经过信号采集处理模块后通过无线方式发送至位于 GIS/GIL 壳体外的后端存储显示终端。无线通信模块还可接收来自后台的控制指令, 以控制采集系统启停并配置信号采集参数。供电模块主要由大容量锂电池和电压调理电路组成, 用于给信号处理、信号采集以及无线通信模块供电。



(a) 结构示意图



(b) 实物图

图 7 局部放电高电位测量单元结构

Fig.7 Structure of PD high potential measurement unit

高压导体为金属材质, 局部放电高电位检测模块所有单元封闭在高压导体内。因此, 为实现导体内无线信号向外传输, 在高压导体上开设有宽度 10 mm 的通信狭缝。狭缝内布置有 5G/2.4G 天线, 可通过狭缝向外发射无线信号并接收外部信号。与此对应, 在 GIS/GIL 壳体上开设有通信手孔(见图 4(a), 手孔盖板上开设玻璃观察窗), 通过布置在壳体外的无线路由器接收 GIS/GIL 内无线信号。

3 局放高电位脉冲电流测量灵敏度验证

参照 IEC 60270 规定方法, 通过注入标准脉冲对高电位局部放电测量系统灵敏度进行校验^[18-19], 具体步骤如下所述。

1) 如图 8(a)所示, 将标准脉冲源(C_q 为脉冲源输出电容)与试品并联连接, 注入放电量为 5 pC 的校准脉冲。此时, 局放高电位测量系统测得的信

号幅值 U_0 约为 335 mV。测量阻抗 Z_k (传统脉冲电流法)则需要注入放电量为 50 pC 时, 才能检测到明显信号, 幅值 U_{k0} 约为 870 mV。

2) 如图 8(b)所示, 将标准脉冲源并联高压与地之间, 注入放电量为 50 pC 的校准脉冲, 测量阻抗 Z_0 获得信号幅值 U_1 约为 415 mV, 测量阻抗 Z_k 检测到信号幅值 U_{k1} 约为 920 mV。

3) 撤去标准脉冲源, 测量此时测量系统的背景噪声。测量阻抗 Z_0 背景噪声幅值 U_x 约为 25 mV, 测量阻抗 Z_k 背景噪声幅值 U_{kx} 约为 420 mV。

由此可计算获得高电位脉冲电流测量系统的最小可测放电量为:

$$Q_{\min} = \frac{U_x}{U_0} \cdot Q_0 = 0.37 \text{ pC} \quad (1)$$

传统脉冲电流最小可测放电量为:

$$Q_{kmin} = \frac{U_{kx}}{U_{k0}} \cdot Q_0 = 24.1 \text{ pC} \quad (2)$$

根据上述标定结果, 本文提出的局放高电位脉冲电流测量方法的最小可测局放量小于 0.5 pC, 测量灵敏度优于传统脉冲电流法。

此外, 定义系统的噪声抑制比 K 为相同大小的放电脉冲和外界干扰脉冲在测量阻抗上产生的信号的幅值之比, 则使用 Z_k 检测局部放电时系统的噪声抑制比为:

$$K_k = \frac{U_{k0}/50}{U_{k1}/50} = 0.95 \quad (3)$$

使用 Z_0 检测局部放电时系统的噪声抑制比为:

$$K_0 = \frac{U_0/5}{U_1/50} = 8.1 \quad (4)$$

显然 $K_0 \gg K_k$, 即相对于传统脉冲电流法而言, 采用高电位测量可有效抑制噪声的幅值, 提升测量结果的信噪比。

综上所述, 高电位测量系统可以在很大程度上提升局部放电的测量灵敏度和干扰抑制能力。

4 基于高电位脉冲电流法的缺陷局放测量

为进一步验证高电位脉冲电流法的有效性, 开展了不同缺陷局部放电测量。如图 9 所示, 分别模拟沿面金属微粒、绝缘内部气泡、金属尖端和悬浮放电缺陷。其中, 沿面金属微粒为三支柱绝缘子支腿表面长度 8 mm 的金属丝, 距离微粒捕捉器 4 cm(图 9(a)); 绝缘内部气泡缺陷为绝缘块内部直径约 2 mm 气泡(图 9(b)); 金属尖端缺陷为高压导体上长度为 7 cm 的金属针(图 9(c)); 悬浮放电缺陷由间距为 0.5 mm、长度分别为 8 mm 和 15 mm 的两根金属丝组成(图 9(d))。基于图 4 实验平台, 开展不同类型缺陷的局部放电测量, 比较高电位脉冲电流法和传统脉冲电流法的灵敏度和抗干扰性能, 对比分析高电位脉冲电流法和特高频法检测有效性。

4.1 绝缘子表面金属微粒缺陷局部放电

电压升高至约 150 kV 时, 高电位脉冲电流法测量到稳定局放信号, 特高频法仅检测到偶发局放脉冲。电压升高到 200 kV 后, 高电位脉冲电流和特高频法均能检测到明显局放信号, 图 10 所示为两种方法获得的相位分辨的局部放电图谱(phase resolved partial discharge, PRPD)。由图 10 可见, 脉冲电流信号图谱形态呈“兔形”, 放电图谱由相位分布宽幅值低和相位分布窄幅值高的两部分组成。放电集中在

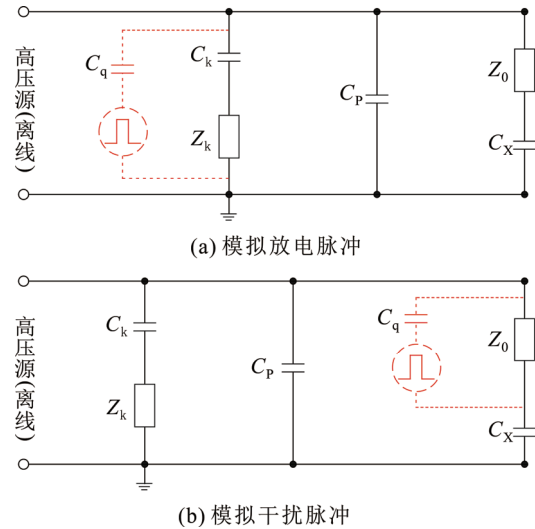


图 8 校准脉冲注入方式

Fig.8 Calibration pulse injection

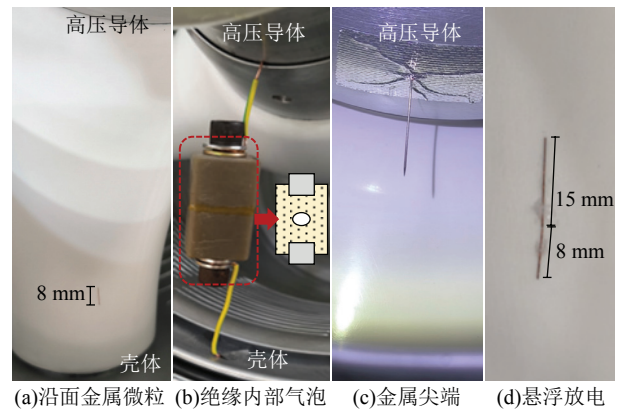


图 9 缺陷设置

Fig.9 Defect setting

工频相位 $0^\circ \sim 130^\circ$ 和 $190^\circ \sim 300^\circ$ 之间, 工频正负半周期内放电分布略不对称, 正半周期内放电更强、次数更多。局部放电量最高接近 4 pC, 最低仅 0.4 pC 左右, 且大部分放电集中在 1 pC 以下, 平均放电量约 0.6 pC。特高频信号相位分布与脉冲电流信号基本一致, 但正负半周期内放电图谱不对称性更强; 信号幅值较分散, 最大约 350 mV, 大部分集中在 200 mV 以下。脉冲电流信号频次最高为 800 次/s; 特高频信号频次波动较大, 最高为 85 次/s, 最低仅为 12 次/s。虽然特高频法能检测到该缺陷局部放电信号, 但对大部分放电量较小的信号难以有效检测, 特高频信号频次远低于脉冲电流信号频次。整个试验过程中, 传统脉冲电流法背景噪声大于 20 pC, 始终未检测到明显局放脉冲信号。

4.2 绝缘内部气泡缺陷局部放电

电压升高到 20 kV 时, 高电位脉冲电流法、传统脉冲电流法和特高频法均能检测到局部放电信号。如图 11 所示, 放电相位较稳定, 由于气泡内的电荷积聚效应, 放电主要集中在工频电压极性反转后的 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 和 $200^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 范围内; 气泡缺陷为椭圆对称结构, 因此放电无明显极性效应, 在工频正负半周期内基本对称分布, 但负半周期内放电次数略多。局部放电量分布分散, 最大超过 50 pC, 最小低至 0.5 pC, 每秒最大放电量在 5~50 pC 之间波动。高电位脉冲电流信号频次波动大, 最低仅几次/s, 最高超过 230 次/s。传统脉冲电流法由于灵敏度限制, 仅能检测到放电量超过 24 pC 的放电信号, 信号频次低, 仅 1~2 次/s。特高频信号相位分布与脉冲电流信号基本一致; 特高频幅值分散性也较大, 幅值在 90~450 mV 之间波动; 特高频信号周期重复性低, 频次最低 1 次/s, 最高 146 次/s。对绝缘内部气泡缺陷, 大部分放电的放电量较大, 特高频法均能有效检测, 因此特高频信号频次仅略低于高电位脉冲电流信号频次。

4.3 悬浮放电缺陷局部放电

电压升高到 40 kV 后, 高电位脉冲电流法、传统脉冲电流法和特高频法均检测到明显局部放电信号。如图 12 所示, 放电无极性效应, 工频正负半周期内放电对称分布; 放电相位稳定, 主要集中在工频相位 90° 和 270° 附近。放电脉冲幅值稳定, 放电量维持在 30~42 pC 之间, 平均放电量约 36 pC; 脉冲电流信号频次稳定在 100~110 次/s, 且相邻放电时间间隔基本一致, 平均每半个工频周期内 1 次放电。悬浮放电的放电量较大, 因此传统脉冲电流法也能有效检测该放电, 信号特征与高电位测量结果一致。特高频信号相位和幅值分布也均较稳定, 幅值稳定在 550~620 mV 之间, 信号频次与脉冲电流信号频次一致。对于悬浮放电, 其放电剧烈且稳定, 高电位脉冲电流法、传统脉冲电流法和特高频法均具有较好的检测有效性。

4.4 高压导体尖端缺陷局部放电

电压升高到约 35 kV 时, 高电位脉冲电流法检测到明显局部放电信号, 但放电量小于 1 pC。此时, 传统脉冲电流法和特高频法均未检测到有效局放脉冲信号。随后升高电压到 50 kV 后, 高电位测量法和特高频法均能检测到稳定局放信号, 传统脉冲电流法仍未检测到明显局放脉冲。如图 13 所示, 尖端

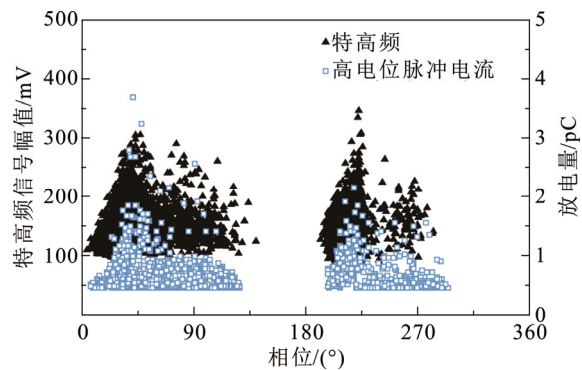


图 10 沿面金属微粒局部放电 PRPD 图谱

Fig.10 PD patterns of metal particle on insulator surface

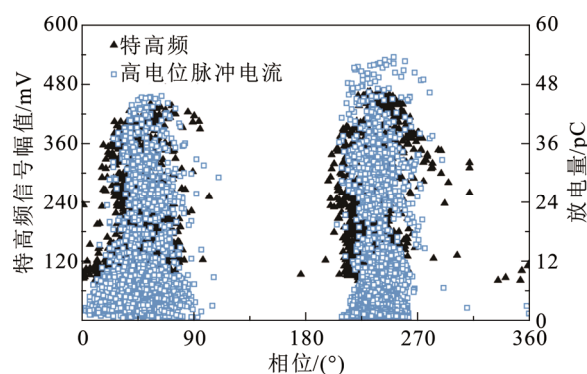


图 11 绝缘内部气泡局部放电 PRPD 图谱

Fig.11 PD patterns of gap inside insulator

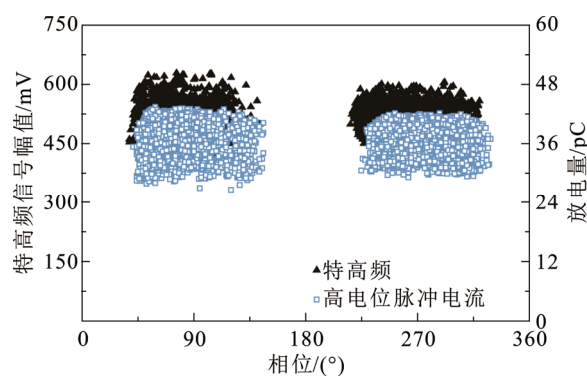


图 12 悬浮电位局部放电 PRPD 图谱

Fig.12 PD patterns of floating potential

放电极性明显, 放电主要分布在工频电压负半周期内; 相位分布较稳定, 放电集中在工频相位 270° 附近。负半周期内脉冲电流信号图谱形态呈“拱门”形, 正半周期内有少量放电量低于 1 pC 的脉冲电流信号, 但并未有对应的特高频信号被检测到。高电位方法测得的放电幅值分散, 局部放电量在 0.5~4 pC 之间波动; 信号频次维持在 1 000 次/s 以

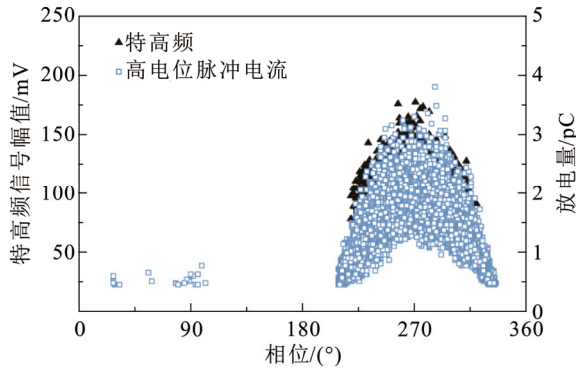


图 13 高压尖端局部放电 PRPD 图谱

Fig.13 PD patterns of protrusion on center conductor

上,最高 1 700 次/s。特高频信号相位分布范围略窄于脉冲电流信号,且仅分布在工频负半周期内;信号幅值分散,最高不足 200 mV;信号频次不稳定,最低 20 次/s,最高约 400 次/s。对于尖端缺陷,存在大量较小放电,特高频法难以有效检测,特高频信号频次显著低于高电位脉冲电流信号频次。

上述试验结果表明,外部干扰严重的情况下,传统脉冲电流法由于外部干扰影响检测灵敏度较低,仅对悬浮电位等放电量较大的缺陷能有效检测。高电位脉冲电流法最低可测局放量低于 0.5 pC,对不同类缺陷均具有较高灵敏度,在复杂干扰环境下的检测有效性优于传统脉冲电流法和特高频法。

5 现场试验测量

如图 14 所示,建立 500 kV GIS 母线段现场试验测试回路,包含 800 kV 交流铠装试验电源、耦合电容、试验 GIS 母线段等。在 GIS 母线内其中一个三支柱绝缘子支腿表面设置长度 5 mm 的金属丝,距离微粒捕捉器约 4.5 cm。基于上述高电位脉冲电流法(现场条件下最小可测局部放电量约 1 pC),开展三支柱绝缘子表面金属异物局部放电测量。

阶梯升压至 500 kV 后发生绝缘子沿面闪络,试验过程中局部放电信号如图 15 所示。由图 15 可见,闪络前局部放电表现为偶发和微小特征,放电量普遍低于 10 pC,闪络前极短时间内增加到 40~50 pC;放电重复率低于 10 次/s,仅在闪络前几秒钟内显著增加至几十次/s。放电信号在工频正负半周期内均有分布,分别集中在工频电压 90°和 270°附近,负半周期内放电次数略高于正半周期内。闪络前,特高频信号极少,频次低于高电位脉冲电流信号,总计不足 100 次;信号幅值较低,维持在 200 mV 左

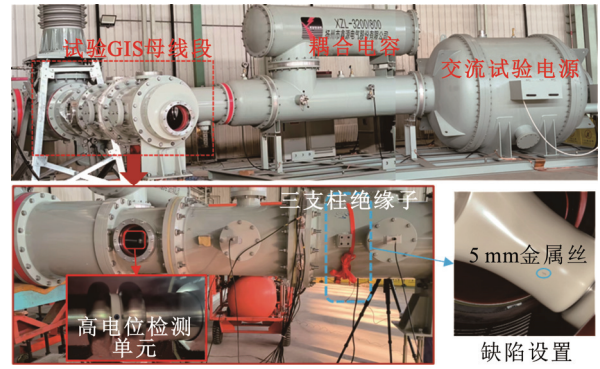
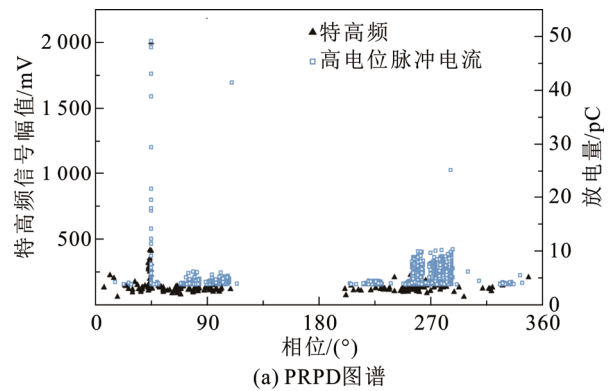
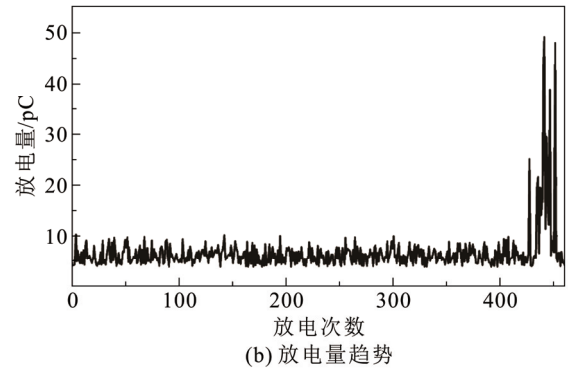


图 14 试验平台及缺陷设置

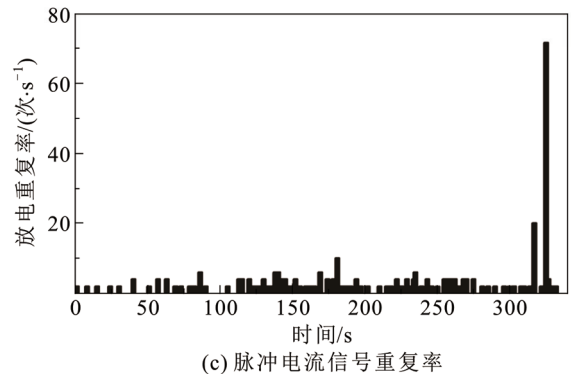
Fig.14 Test platform and defect setting



(a) PRPD图谱



(b) 放电量趋势



(c) 脉冲电流信号重复率

图 15 沿面闪络前局部放电信号特征

Fig.15 PD characteristics before flashover

右。由于外部干扰严重,传统脉冲电流法未有效获得该局部放电信号。

试验测量表明, 现场条件下, 文中所提高电位脉冲电流法依然具有较高检测灵敏度, 能有效检测绝缘表面微小金属异物局部放电, 可作为现场试验局部放电定量检测的潜在手段。

6 结论

本文提出了一种 GIS/GIL 局部放电高电位脉冲电流测量方法, 分析并验证了其抗干扰能力和测量灵敏度, 获得了基于高电位脉冲电流测量的典型缺陷局部放电特征。

1) 通过将测量阻抗串联接入高压导体, 有效抑制外部干扰对局部放电测量的影响, 提高测量的抗干扰能力, 增强对局放脉冲电流信号的耦合, 从而提高了局放测量灵敏度。

2) 复杂干扰条件下, 高电位脉冲电流法检测灵敏度和抗干扰能力显著优于传统脉冲电流法。传统脉冲电流法最小可测局放量约 20 pC, 而高电位测量法最小可测局放量则低于 0.5 pC; 高电位测量的噪声抑制比为传统脉冲电流法的近 10 倍。

3) 外部干扰严重时, 传统脉冲电流法由于灵敏度限制仅能检测到放电量较大的局放信号, 对沿面金属微粒、绝缘内部气泡和金属尖端缺陷的检测有效性低。特高频法能检测不同类型缺陷, 但对绝缘沿面缺陷和金属尖端缺陷的检测有效性低于高电位脉冲电流法。对不同类型缺陷, 高电位脉冲电流法均具有有效检测, 检测灵敏度和有效性优于传统脉冲电流法和特高频法, 可作为现场复杂干扰环境下局部放电定量测量的潜在手段。

参考文献 References

- [1] RIECHERT U, HOLAUS W. Ultra high-voltage gas-insulated switchgear-a technology milestone[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2011, 22(1): 60-82.
- [2] 李庆民, 薛乃凡, 王 媛, 等. 交直流输电管道绝缘运行安全关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(4): 1629-1649.
LI Qingmin, XUE Naifan, WANG Yuan, et al. Key technologies for operation safety of AC/DC gas insulated transmission lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(4): 1629-1649.
- [3] 许 渊. 运行中 GIS 绝缘子表面金属颗粒诱发放电研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
XU Yuan. Investigation on mechanism of metallic particle induced flashover of GIS insulators in operation condition[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2020.
- [4] 廖新征, 王红梅, 丁登伟, 等. 基于特高频时频分析的 GIS 盆式绝缘子缺陷分析[J]. *高压电器*, 2019, 55(1): 47-53.
LIAO Xinzheng, WANG Hongmei, DING Dengwei, et al. GIS basin insulator defect analysis based on ultra-high frequency time-frequency analysis[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(1): 47-53.
- [5] 李军浩, 韩旭涛, 王昊天, 等. 电气设备局部放电检测技术述评: 2015-2025[J]. *高压技术*, 2015, 51(7): 3132-3158.
LI Junhao, HAN Xutao, WANG Haotian, et al. Review of partial discharge detection technology in electrical equipment: 2015-2025[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 51(7): 3132-3158.
- [6] 李 星, 丁登伟, 许 渊, 等. 特高频-超声波法联合的 GIS/GIL 局部放电信号降噪与缺陷定位[J]. *高压技术*, 2025, 51(5): 2384-2393.
LI Xing, DING Dengwei, XU Yuan, et al. Signal denoising and defect localization for GIS/GIL partial discharge based on ultra-high frequency and ultrasound method united[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(5): 2384-2393.
- [7] 苏志雄, 孙 康, 丁 浩, 等. 基于脉冲电流和紫外脉冲的多源局部放电诊断方法[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(1): 101-108.
SU Zhixiong, SUN Kang, DING Hao, et al. Multi-source partial discharge detection method based on pulse current method and ultraviolet pulse method[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(1): 101-108.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 陈 跃, 任 明, 王 凯, 等. 局部放电探测光导结构参数的仿真优化[J]. *高压技术*, 2023, 49(12): 5061-5072.
CHEN Yue, REN Ming, WANG Kai, et al. Simulation and optimization on light guide structure parameters for partial discharge detection[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(12): 5061-5072.
- [11] LI X, LIU W D, XU Y, et al. Discharge characteristics and detectability of metal particles on the spacer surface in gas-insulated switchgears[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(1): 187-196.
- [12] 许 渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 基于高灵敏测量的 GIS 绝缘子表面微金属颗粒局部放电特性[J]. *高压技术*, 2019, 45(9): 2707-2714.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Partial discharge characteristics of metal particles on spacer surface in GIS based on high sensitivity measurement[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(9): 2707-2714.
- [13] QI B, LI C R, ZHEN H, et al. Surface discharge initiated by immobilized metallic particles attached to gas insulated substation insulators: process and features[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(3): 792-800.
- [14] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. GIS 中局部放电特高频信号与放电严重程度度的关联分析[J]. *高压电器*, 2014, 50(9): 6-11.
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Investigation of correlation between UHF signal and PD severity in GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(9): 6-11.
- [15] GAO W S, DING D W, LIU W D, et al. Investigation of the evaluation of the PD severity and verification of the sensitivity of partial-discharge detection using the UHF method in GIS[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(1): 38-47.
- [16] 叶凡超, 湛 鼻, 田双双, 等. $C_2F_4/N_2/CO_2/O_2$ 混合气体 PD 作用下气体和固体副产物生成特性[J]. *高压技术*, 2023, 49(11): 4507-4516.
YE Fanchao, ZHAN Ao, YUAN Shuangshuang, et al. Gas and solid

- by-product generation properties of $C_4F_7N/CO_2/O_2$ gas mixture under partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4507-4516.
- [17] 雷圣峰. 基于超高频法和 SF_6 分解产物浓度的 GIS 局部放电诊断方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
LEI Shengfeng. Research on GIS partial discharge diagnosis method based on UHF method and SF_6 decomposition product concentration[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2023.
- [18] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 高电压试验技术 局部放电测量: GB/T 7354—2018[S]. 北京: 中国标准出版社 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. High-voltage test techniques-partial discharge measurements: GB/T 7354—2018[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2018.
- [19] IEC. High-voltage test techniques-partial discharge measurements: IEC 60270: 2015[S], 2015.
- [20] 许 渊, 刘卫东, 陈维江, 等. GIS 绝缘子局部放电高灵敏测量方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1703-1712.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. High-sensitivity measurement method and application of GIS spacer partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1703-1712.
- [21] 徐 洋, 刘卫东, 许 渊, 等. GIS 绝缘件局部放电脉冲电流互参
考试验测量方法[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 87-90, 100.
XU Yang, LIU Weidong, XU Yuan, et al. PD test and measurement method of GIS insulators based on cross-reference of the pulse current[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 87-90, 100.
- [22] 倪鹤立, 傅晨钊, 胡海敏, 等. 电气设备局部放电脉冲电流法检测技术述评[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 1-14.
NI Heli, FU Chenzhao, HU Haimin, et al. Review on detection technique of pulse current method for PD measurement of electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 1-14.



LI Xing

Ph.D.

Senior engineer

Corresponding author

李 星(通信作者)

1994—, 男, 博士, 高工

主要从事电气设备状态检测与故障诊断、电气设备智能化、电气设备绝缘失效及机理方面的研究工作

E-mail: lx1230716@162.com

收稿日期 2024-08-27 修回日期 2025-06-03 编辑 卫李静