

特高压 GIS 现场试验中低频次局放测量与定位技术研究

刘瑜琛^{1,2}, 李红兵³, 徐璋鑫³, 吴传奇^{1,2}, 夏 天^{1,2}, 许 渊⁴, 丁登伟⁵, 文雅钦^{1,2}

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 武汉 430070; 2. 国家电网有限公司高压电气设备现场试验与评估技术实验室, 武汉 430070; 3. 国网湖北省电力有限公司, 武汉 430048; 4. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 5. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610213)

摘要: 现场绝缘试验是 GIS 投运前检验设备可靠性最经济有效的环节, 然而, 目前以特高频和超声波带电检测为代表的现场绝缘试验局放监测技术在监测有效时长、局放灵敏度、现场应用判据等方面均存在不足。为此, 文中提出了一种适用于特高压 GIS 现场绝缘试验全过程的局部放电高灵敏检测方法, 能够实现试验过程中所有局部放电信号原始脉冲的测量与分析, 并通过“试验电压特征采集—局放采集单元外部触发”的方式, 实现了现场试验工况中非工频电压下的局放图谱准确测量; 研究了基于相干平均的特高频局部放电信号去噪算法, 在现场实测中可将背景高频噪声从 20 mV 左右降至 1 mV 以下; 在某特高压站 1 100 kV GIS 现场试验中进行了现场应用, 成功发现了某台断路器中金属异物引发的局放异常现象, 开盖检查发现了异物烧蚀痕迹并进行了消除处理, 验证了文中局放检测方法、信号处理方法的有效性。

关键词: 特高压 GIS; 绝缘试验; 特高频; 局部放电; 金属颗粒; 缺陷定位

Research on Measurement and Localization Techniques for Low-occurrence Partial Discharge During UHV GIS Field Insulation Tests

LIU Yuchen^{1, 2}, LI Hongbing³, XU Zhangxin³, WU Chuanqi^{1, 2}, XIA Tian^{1, 2}, XU Yuan⁴, DING Dengwei⁵, WEN Yaqin^{1, 2}

(1. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430070, China; 2. SGCC Laboratory of High-Voltage Electrical Equipment Field Testing and Evaluation Technology, Wuhan 430070, China; 3. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430048, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 5. Sichuan Energy Internet Research Institute of Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

Abstract: Field insulation testing is the most cost-effective and efficient means of verifying equipment reliability before GIS commissioning. However, current partial discharge (PD) monitoring technologies used in field insulation tests, typically represented by UHF and ultrasonic live detection, have shortcomings in terms of effective monitoring duration, PD sensitivity, and field application criteria. To address these issues, this paper proposes a highly sensitive PD detection method suitable for the entire process of field insulation testing of UHV GIS. The method enables the measurement and analysis of all raw PD signal pulses during the test, and by adopting an approach of “test voltage characteristic acquisition – external triggering of the PD acquisition unit”, it achieves accurate PD pattern measurement under non-power-frequency voltage conditions encountered in field testing. A UHF PD signal denoising algorithm based on coherent averaging is investigated, which can reduce the background high-frequency noise from around 20 mV to below 1 mV in field measurements. The proposed method was applied during the field testing of a 1 100 kV GIS at a UHV substation, where it successfully detected an abnormal PD phenomenon caused by metallic foreign objects inside a circuit breaker. Subsequent internal inspection after opening the cover revealed ablation traces from the foreign object, and the defect was eliminated. These results validate the effectiveness of the proposed PD detection method and signal processing approach.

Key words: UHV GIS; insulation test; UHF; partial discharge; metal particles; defect location

0 引言

电力需求的不断增长和电力设备电压等级的不断提高, 对电力系统中广泛使用的气体绝缘金属封闭开关(GIS)设备可靠性提出了更高的要求。近年

来, 国网设备部启动 GIS 可靠性提升专项行动, 陆续组织开展了隐患排查治理、GIS 技术符合性评估、设备状态监测能力提升、选型采购策略差异化、设备质保期延长等多项重点工作。但 500 kV 及以上

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5500-202422154A-1-1-ZN)。
Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5500-202422154A-1-1-ZN).

GIS 仍出现故障多发态势,严重影响重点工程投产送电和大电网的安全稳定运行。

在 GIS 制造、安装、调试过程中,不可避免会出现导体表面尖刺、绝缘件内部、自由导电微粒等局部电场集中造成的绝缘缺陷。该类绝缘缺陷在 GIS 设备运行及遭受过电压情况下可能导致异常放电,影响系统安全稳定运行。因此,现场绝缘试验作为 GIS 设备投运前的最后一道关口,是保障 GIS 设备可靠运行的必要手段。

根据相关标准要求以及行业惯例, GIS 现场绝缘试验过程中一般使用特高频法或者超声波法进行局部放电检测^[1-2]。通常由试验人员使用手持式局放检测仪器,在 1 min 的耐压结束、试验电压降至 1.2 倍运行电压后进行。超声波局放检测需要沿着 GIS 设备罐体按一定间距逐点进行,特高频局放检测则需要 在盆式绝缘子浇注口处或设备上预留的内置式特高频传感器进行。

然而从实际效果来看,上述方法可靠性、有效性较低,难以检测到 GIS 内部缺陷^[3-4]。特高压 GIS 电压等级高、绝缘裕度小,其内部潜伏性的微小缺陷也可能导致严重故障,这类缺陷产生的局部放电信号往往有着间歇性、偶发性的特点,常规的带电检测方法中每个检测点位覆盖的范围小、检测时间短(1 min 以内)^[1],检出间歇性、偶发性的局放信号概率极低。同时手持式局放检测仪器采样频率低,仅仅能够采集到检波信号,无法更进一步提取局放脉冲的时域、频域特征,从而进行分类、定位等更进一步的分析,近年来,有学者相继提出了基于特高频和超声波联合的局放定位方法^[5-8],能对 GIS 设备进行局放定位,但基本都是针对运行工况的设备,而现场绝缘试验工况与运行工况在电压幅值、频率等方面有显著区别,现有方法难以应用于现场试验过程中。

现场试验工况下,局放信号中的噪声种类更多、特征也更复杂,因此需要使用去噪算法减小噪声对局放测量的影响。目前,相关研究人员已经提出了基于小波方法、奇异值分解、分型算法、滤波算法等的局放信号降噪算法^[9-13],但这些方法往往依赖于参数选择,而参数的选择需要大量实际数据作为支撑。然而,现场绝缘试验中的实际噪声情况复杂多变,每一个工程建设现场的噪声来源、特征等都不尽相同,要针对每一个新建工程进行参数选择非常困难。同时,现场绝缘试验中的大噪声可能导致局放信号被淹没在噪声信号中,导致上述降噪算法有效性偏低,因此,需要针对性地开发适用于现场试验工况的局放信号降噪算法。

基于上述问题,文对特高压 GIS 现场绝缘试验中的局部放电测量、信号处理与缺陷定位方法进行了研究,并在某特高压新建工程 1 100 kV GIS 现场试验中进行了应用,验证了局放信号测量、去噪算法、定位方法的有效性,实现了缺陷的精确定位,为特高压 GIS 现场绝缘试验过程中的局放检测提供了全新思路。

1 特高压 GIS 现场绝缘试验中的局部放电测量与信号处理方法

1.1 特高压 GIS 现场绝缘试验中的局部放电测量方法

特高压 GIS 现场绝缘试验加压采用变频串联谐振方法进行,采用固定的高压电抗器与试验回路电容串联,以调整施加到该回路电压频率的方式实现谐振,从而实现在试品上产生高压的目的。试验电压从 GIS 出线套管处施加。试验接线如图 1 右下部红色虚线框内所示。

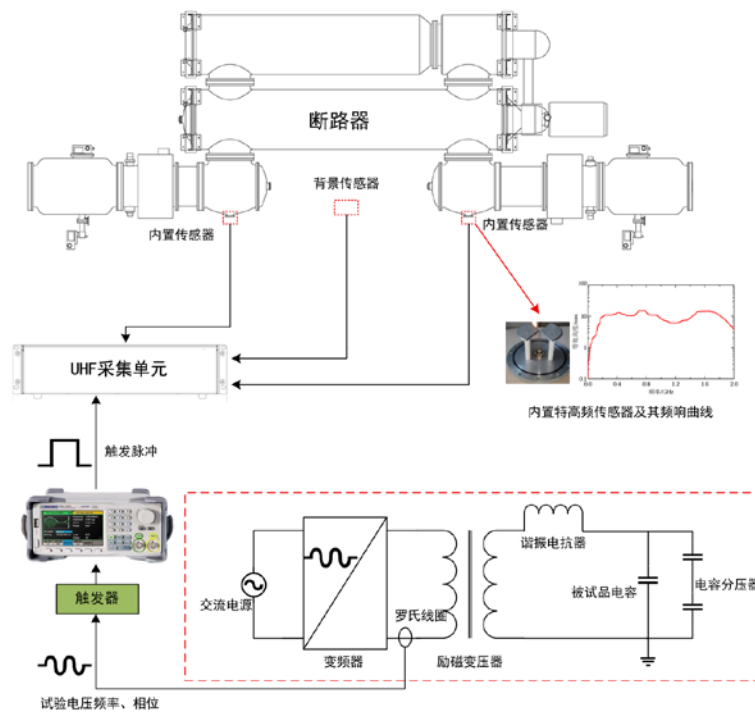


图 1 1100 kV GIS 绝缘试验及局放测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the 1100 kV GIS insulation test and partial discharge measurement system

试验加压流程为：0→200 kV 持续 20 min→300 kV 持续 20 min→577 kV 测量 PT 空载电流→635 kV 持续 10 min→762 kV 持续 20 min→1 100 kV 持续 1 min→762 kV 持续 30 min 同时进行局放测量→577 kV 测量电压互感器空载电流→降压至零，见图 2。

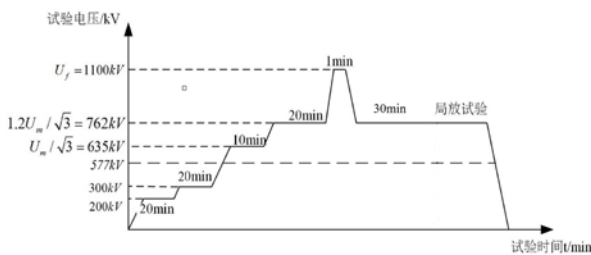


图 2 1100 kV GIS 绝缘试验加压流程

Fig. 2 Voltage application procedure for 1100 kV GIS insulation test

传统的试验方法中，通常在 1 min 耐压之后进行局部放电测量，由试验人员使用手持式仪器逐点测量，单点检测时间有限(通常小于 1 min)、仪器采样率低(仅能采集包含幅值和相位信息的检波信号)、易受现场复杂环境干扰，导致局放检测有效性

低，难以发现设备内部间歇性、偶发性的局部放电缺陷。

图 1 中红框之外的部分为文中所采用的局部放电测量系统接线示意图，利用 GIS 设备内置的特高频传感器采集局部放电信号，传感器在 300~1 500 MHz 频率范围内的平均有效高度 ≥ 11 mm，其输出信号经前置放大器后接入特高频信号采集单元，前置放大器在 300~1 500 MHz 增益为 50 dB，采集单元最大采样率为 2 GSa/s，带宽 1 GHz，分辨率为 12 位，外置的背景传感器用来排除空间电磁干扰的影响。通过该局放测量系统，可以在图 2 所示的整个试验过程中对 GIS 设备内部的局部放电信号进行测量，并能捕捉到每一次局部放电的原始脉冲波形。

现场绝缘试验采用的是串联谐振方法，其频率会随着设备结构、接线方式等变化，根据标准规定通常在 50~300 Hz 范围内，因此，试验过程中设备内局部放电信号也会依据该频率变化。然而，局放采集单元使用的是 50 Hz 工频交流电源，若不采取

措施, 则无法得到有效的 PRPD 累积图谱。在图 1 所示的测量系统中, 通过在变频器输出端接入一个罗氏线圈来采集试验电压的频率和相位信息, 再经由触发器控制信号发生器输出一组与试验电压具有相同频率的触发脉冲, 从而实现采集单元测量周期与 GIS 所加试验电压的频率、相位同步, 见图 3。

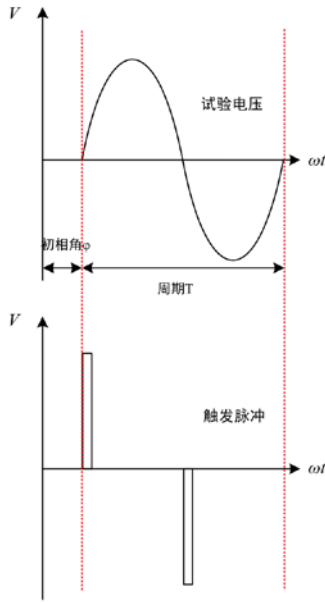


图 3 试验电压与触发脉冲示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test voltage and trigger pulse

1.2 局放信号处理方法

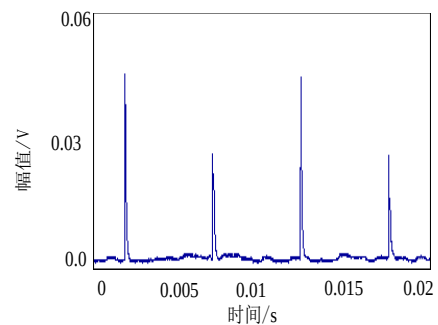
文中所采用的局放采集单元最大采样率为 2 GSa/s, 带宽 1 GHz, 相比于只能采集检波信号的传统局放检测方法, 文中方法可以实现局部放电原始脉冲波形的采集, 脉冲上升沿 ≤ 1 ns。

在现场检测中, 总是存在一些幅值较大的脉冲干扰信号, 文中的局放检测方法采用了一种基于波形幅比和时延特征聚类分析的局部放电 UHF 综合抗干扰技术, 可有效排除窄带通讯干扰、设备外部脉冲型干扰, 其基本原理为:

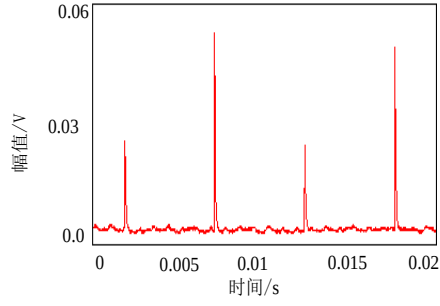
局部放电信号传感器接收的检测信号与背景噪声传感器接收的噪声信号进行时域同步, 由于信号传感器放置于设备内部或设备的盆式绝缘子处(对于 GIS 设备), 而背景噪声传感器放置于距离设备较远位置, 其有效接收方面朝向外空间, 因此对于外

部干扰信号而言, 信号传感器耦合到的信号(简称内部信号)将会小于背景噪声传感器(简称为外部信号); 反之如为设备内部放电信号则噪声传感器不能有效接收, 据此可以通过内、外部同步信号幅度对比进而进行时域开窗方法有效去除。首先将模拟信号源放置于所要检测的位置, 将噪声传感器与信号传感器置于指定的位置; 模拟信号源发射脉冲信号, 记信号传感器接收到的信号的平均幅度为 V_s , 噪声传感器接收到的同步信号的平均幅度为 V_n , 令 $K_0 = V_s/V_n$, 确定两个传感器接收检测位置辐射出的信号的幅值之比。当放电源不是处于信号的位置时, 那么 K_0 值便会发生改变。现场检测时, 如果只有信号传感器有脉冲信号, 则判定为设备内部放电; 如果只有噪声传感器有信号, 则判定为外界干扰; 如果出现同步信号, 则根据 V_s/V_n 的比值进行判断, 如果 $V_s/V_n \geq K_0$, 则判定信号来自检测部位, 否则判定信号来自其他位置, 这样可以避免出现多放电源辐射出的信号出现叠加的状况, 也可排除来自空间的干扰信号。

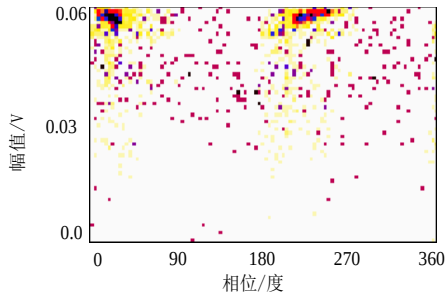
在实验室中通过向测试系统人为叠加外部打火干扰信号来验证, 见图 4, 图 4(a)为内部信号, 图 4(b)为外部噪声信号, 内部信号中同步脉冲的幅值大于外部噪声信号中同步脉冲的幅值, 经过干扰抑制后保留了内部信号, 内部信号中同步脉冲的幅值小于外部信号, 降噪后内部信号置零。图 4(c)和(d)同样分别为降噪前的放电模式谱图和降噪后的放电模式谱图, 可以看到对于人为叠加的无规律的干扰信号的抑制效果比较明显。



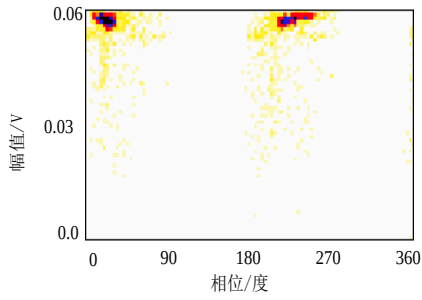
(a) 内部信号



(b) 外部噪声信号



(c) 降噪前的放电模式谱图



(d) 降噪后的放电模式谱图

图4 噪声传感器干扰抑制效果

Fig. 4 Interference suppression effect of the noise sensor

除上述脉冲型干扰信号外,现场测试中还会存在幅值较低的高频白噪声,两个相邻传感器采集到的同一源头特高频局放信号的典型原始脉冲波形见图5,要对该局放缺陷进行精确的定位,则需要准确找到两个通道采集到脉冲信号的起始位置,通过两个脉冲的时间差来计算局放信号源与两传感器之间的相对距离。然而,图5中的原始波形中含有相当比例的高频背景噪声(如图中虚线框所示),使得脉冲起始位置被淹没在高频噪声中而无法有效找到。为了排除高频背景噪声的影响,文中采用基于相干平均的降噪算法,对测量获得的局部放电特高频

频信号进行处理。

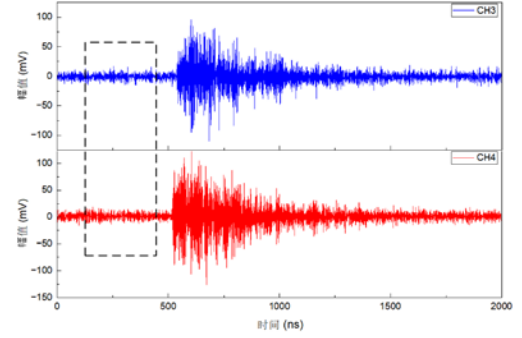


图5 典型异常局放信号波形

Fig. 5 Typical abnormal partial discharge signal waveform

在一定的时间内,同一局放源产生的有效特高频信号 s_i 通常具有很好的一致性,而伴随的高频背景噪声 δ_i 则具有很强的随机性,局放传感器实际测量到的实测信号 x_i 为两者的叠加

$$x_i(n) = s_i(n) + \delta_i(n) \quad (1)$$

式(1)中: $n=1, 2, 3, \dots, N$ 表示序列数; $x(n)$ 、 $s(n)$ 、 $\delta(n)$ 为实测信号 $x(t)$ 、 $s(t)$ 、 $\delta(t)$ 的离散形式; N 为采集长度(信号采样总点数)。

高频背景噪声通常可视为平稳的随机信号,其数学期望近似为0,方差通常是一个固定的常数 σ^2 ,当采集长度 N 足够大时,每一次传感器检测到信号中背景噪声的期望和方差可视为定值,因此,背景噪声信号的总能量 E 可以用式(2)来表示

$$E \approx N\sigma^2 \quad (2)$$

假设有效信号 s_i 的总能量为 e_i ,则实测信号的信噪比 S_i 为

$$S_i = \frac{e_i}{N\sigma^2} \quad (3)$$

将 M 组实测信号相加取平均值后,由于高频背景噪声的强随机性,其信号平均总能量 $\bar{E}$ 可表示为

$$\bar{E} = \frac{1}{M} N\sigma^2 \quad (4)$$

比较式(2)、(4)可知,将实测信号进行平均降噪

处理后，其包含的噪声分量的总能量变为了处理前的 $1/M$ ，相对应地，其信噪比相比处理前增大了 M 倍。因此，进行处理的信号组数越多，则降噪效果越好。然而，使用此种降噪方法需要使每组实测信号是相关的，也就是需要对齐每组特高频信号的起始点，因此，需要对测量得到的特高频信号在时域进行对齐处理，其方法如下

采集到 M 组信号 $X_j(i)(j=1, 2, \dots, M)$ 后，在其中选择一组信噪比较高的作为参考信号 $X_R(i)$ ，将待处理信号与参考信号进行比较计算，得到相关序列 $R_j(k+N-1)$ 及其最大值对应的时刻 d_j 并构成数据集 $R(d_j)$ ，并得到待处理信号与参考信号间时差 ΔN 的集合。

$$R_j(k+N-1) = \sum_{i=1}^N X_R(i) X_j(i+k), 1-N \leq k \leq N-1 \quad (5)$$

$$R(d_j) = \max [R_j(k+N-1)] \quad (6)$$

$$\Delta N = \{ \Delta N_j | \Delta N_j = d_j - N + 1 \} \quad (7)$$

式(5)-(7)中： $R_j(k+N-1)$ 为相关序列； d_j 为相关序列取最大值对应的时刻； $R(d_j)$ 为相关序列 $R_j(k+N-1)$ 的最大值。

得到 M 组信号各自与参考信号的时差 ΔN 后，就可以对每组信号在时域进行平移，并根据前述方法对其进行平均降噪处理，得到降噪后的信号 $X_p(i)$

$$X_p(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M X_j(i + \Delta N_j) \quad (8)$$

使用仿真方法，将上述相干平均方法与奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)和小波方法的降噪效果进行比较，使用双指数震荡函数模拟有效局放信号，见式(9)，并在其中加入随机噪声信号。使用相干平均方法、SVD 法和小波方法对该信号进行处理，处理结果见图 6。

$$f_d(t) = A(e^{-t/\tau} - e^{-2t/\tau}) \sin(2\pi ft) \quad (9)$$

式(9)中： $f_d(t)$ 为不含噪声的模拟局放信号，mV；

A 为幅值； τ 为时间常数； f 为信号震荡频率。

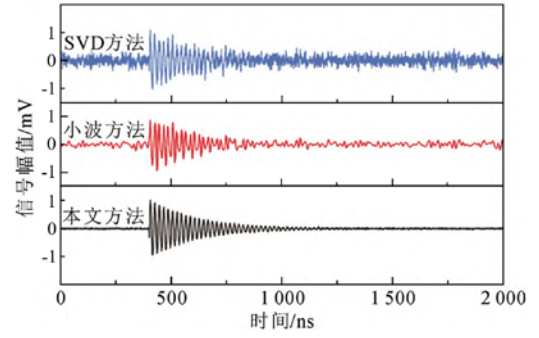


图 6 不同降噪算法信号处理结果

Fig. 6 Signal processing results for different denoising algorithms

从图中结果可以看出，文中所采用的相干平均算法与奇异值分解法、小波方法相比，对信号中含有的随机噪声信号的滤除效果最好，所得的信号最接近于不含噪声的原始信号。

2 结果及分析

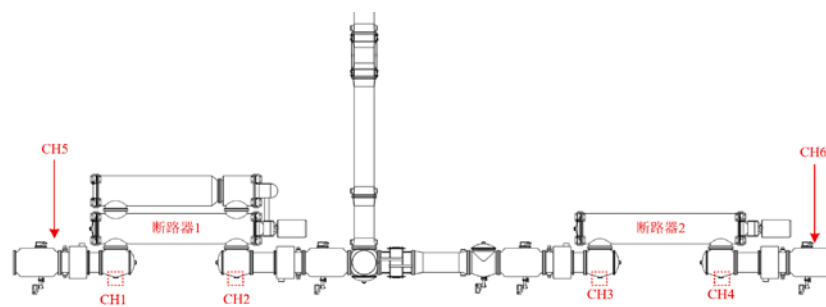
2.1 试验结果

本次试验过程中使用高灵敏特高频监测装置采集现场试验过程中的特高频局放信号，单通道采样率为 2 GSa/s，能够准确采集每一次局部放电的脉冲波形。在某新建特高压站交接试验过程中，在其中两台断路器上布置 6 个测点，包括断路器两侧内置特高频传感器 4 个，背景信号传感器 2 个，见表 1 和图 7。

表 1 特高频传感器布置方式

Table 1 UHF sensor arrangement

传感器通道	传感器位置
CH1	断路器 1 非机构侧内置传感器
CH2	断路器 1 机构侧内置传感器
CH3	断路器 2 非机构侧内置传感器
CH4	断路器 2 机构侧内置传感器
CH5	断路器 1 侧背景信号传感器
CH6	断路器 2 侧背景信号传感器



(a)传感器布置示意图



(b)现场布置示意图

图 7 现场实测中特高频传感器布置方式与实际现场布置图

Fig. 7 UHF sensor arrangement in field measurements and actual on-site layout diagram

采集到的特高频局放信号的原始脉冲波形见图 8，在加压过程中，升压到 300 kV 时 CH3 和 CH4 通道(断路器 2 两侧内置传感器)出现一组持续存在的局放信号，其它通道则只存在较低幅值的背景噪声，如图 7 中红色和蓝色曲线所示，且 CH3 和 CH4 通道的局放信号幅值和频次随着试验电压的升高而增大。根据设备结构、特高频信号传播路径和时差定位，判断该信号靠近 CH4 传感器，即断路器 2 内部操作机构一侧。

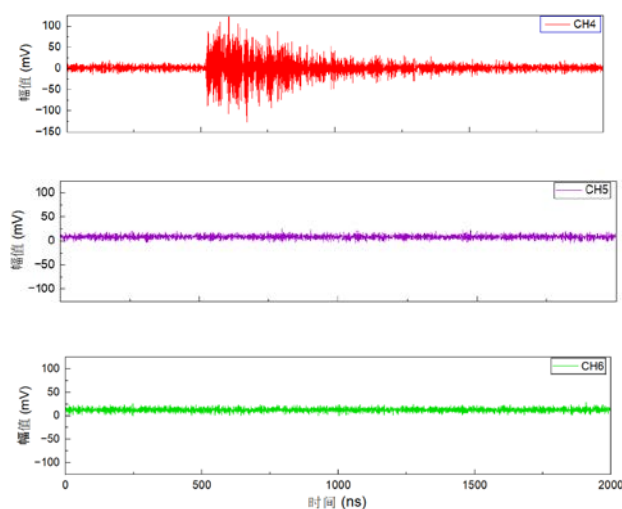
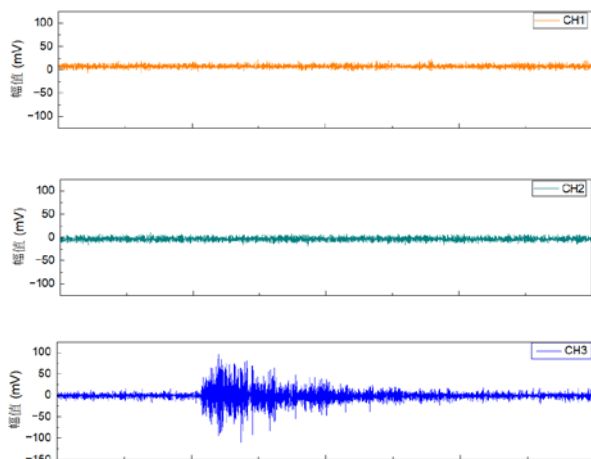


图 8 异常特高频信号原始波形

Fig. 8 Original waveform of abnormal UHF signal

对图 8 中 CH3 和 CH4 所测信号使用 2.2 节所述相干平均降噪方法后得到的结果见图 9，此时，脉冲波形前端的高频噪声已几乎被消除，从而可以清晰辨别出脉冲的起始时刻。从图中可以看出，CH4 的信号相比 CH3 超前的时间差为 17 ns。



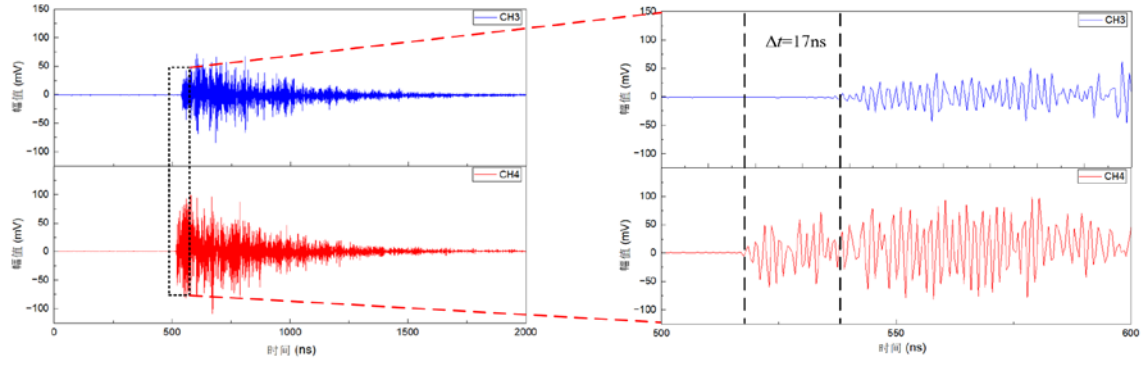


图 9 降噪处理后异常局放信号时差

Fig. 9 Time difference of abnormal PD signals after denoising

GIS 内部发生局部放电时，会从局放源处向各个方向辐射电磁波，由于 GIS 设备金属外壳的屏蔽作用，内置特高频传感器只能接收到沿着 GIS 内部传递过来的信号，本研究中假设传感器接收到的信号都是沿着罐体轴线传播的。电磁波传播速度取 $c=0.3 \text{ m/ns}$ ，CH3 和 CH4 两传感器之间沿着 GIS 罐体的距离为 $L=L_1+L_2$ ，则局放缺陷距离 CH4 传感器的距离 L_1 可以表示为：

$$L_1 = \frac{L - c\Delta t}{2} \quad (10)$$

代入测量结果可算得局放缺陷距离 CH4 传感器的距离约为 2.5 m，其位置见图 10。在 1 100 kV 1 min 耐压后，将电压降至 762 kV，30 min 后开展超声波局放检测，在断路器 2 气室靠近操动机构侧发现异常信号，位置与特高频信号定位位置吻合。围绕罐体一周进行检测，发现罐体正下方底部异常信号幅值最大。

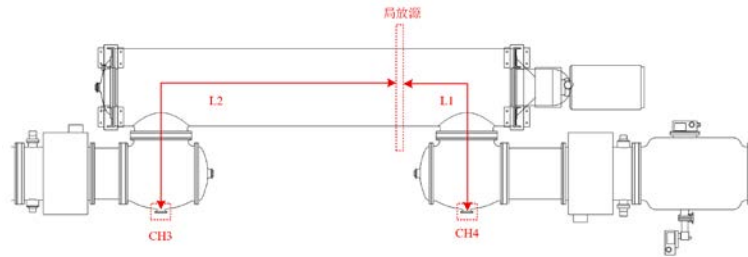


图 10 局放信号时差定位结果

Fig. 10 Time-difference localization results of partial discharge signals

2.2 局部放电信号特征分析

该局部放电信号在试验过程中一段时间内的 PRPD 图谱见图 11，其横轴坐标为相位角(单位°)，整个横轴表示试验电压的一个周期，纵坐标为局放信号幅值(单位 mV)。观察该局部放电图谱及 3.1 中图 8 所示原始脉冲波形，可发现其存在如下特征：

1)试验电压频率为 56.8 Hz，图谱累积时间约为 13 s，计算可知每个周期内局放脉冲数量较少，约 1~2 次，脉冲信号幅值主要分布在 75~150 mV 之间，且在正弦波的正负半周期内均出现，相位则主

要分布在 45~135°、225~315°两个区间内。

2)局放信号最大幅值都接近出现在 90°和 270°，即正负半周峰值处，且主要分布在在 45~135°、225~315°两个区间内，相位越接近 90°和 270°，局放信号幅值越大，说明该局放信号与试验电压值存在正相关关系；

3)图 8 中原始脉冲的波头较陡，说明该信号在传播过程中受到衰减较少，为绝缘件内部缺陷可能性不大，同时根据 3.1 中的定位结果，该位置处无绝缘件，且罐体底部存在超声波信号，推测该局放

信号为自由金属颗粒掉落在壳体底部所引发。

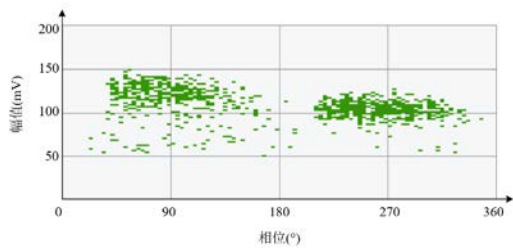
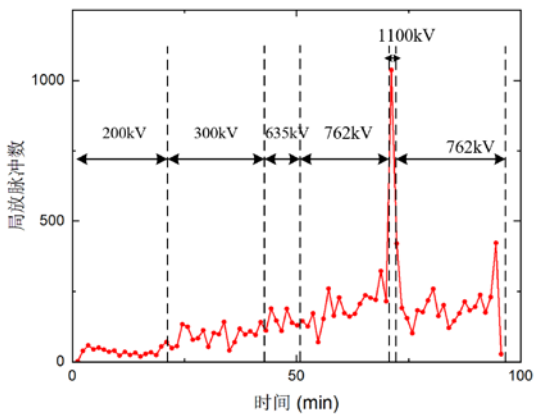


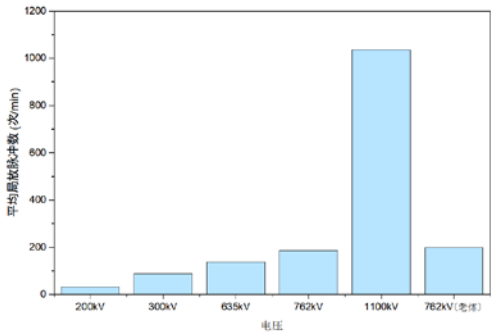
图 11 局放信号 PRPD 图谱

Fig. 11 PRPD pattern of partial discharge signal

在试验过程中局放脉冲数随时间变化的趋势见图 12，从图 12 中曲线和柱状图可以看出：随着试验电压的升高，局放出现的次数逐渐升高，在每一段电压保持稳定的区间内，局放脉冲数会在一定范围内波动，随着电压的升高，波动的幅度也会变大。在 70 min 左右，试验电压升至最高点 1 100 kV 时，曲线上有一个很大的尖峰，这是由于在 1 100 kV 时，GIS 出线套管均压环处会产生强烈的电晕放电，对测量结果产生了影响。而在试验结束时刻 100 min 左右，曲线又出现了一个较小的尖峰，这可能是由于试验电压从 762 kV 快速降为 0 的这一过程导致了金属颗粒运动状态的变化，产生了数量更多的局部放电脉冲信号。总体上，该局放脉冲数随时间变化的趋势符合金属颗粒产生局放的规律。



(a)局放脉冲总数变化曲线

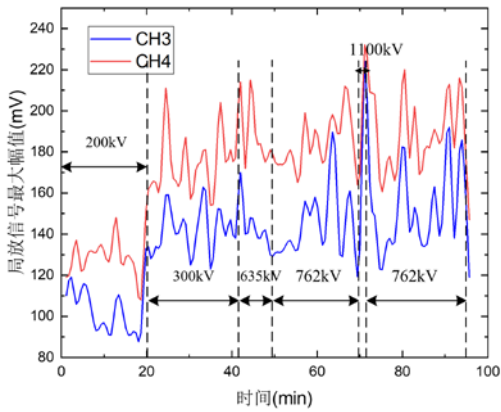


(b)每个试验阶段平均局放脉冲数

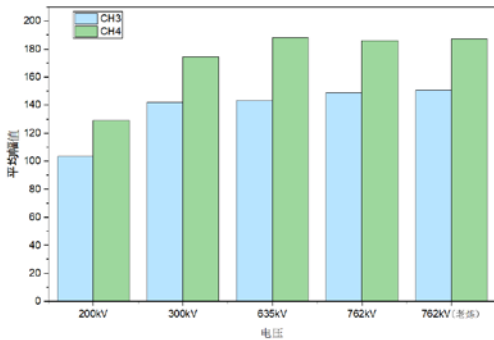
图 12 局放脉冲数量随时间变化情况

Fig. 12 Variation of partial discharge pulse count over time

在试验过程中局放信号最大幅值数随时间变化的趋势见图 13，从图 13 中曲线可以看出：由于 CH4 传感器距离局放源更近，因此局放信号传播到 CH4 传感器处衰减更小，其测量到的信号幅值始终大于 CH3 传感器。当试验电压从 200 kV 升至 300 kV 时，局放信号最大幅值增长幅度较大，在后续升压过程中，局放信号最大幅值虽略有增长，但增长幅度较小。



(a) 局放最大幅值变化曲线



(b) 每个试验阶段平均局放幅值

图 13 局放脉冲最大幅值随时间变化情况

Fig. 13 Variation of maximum partial discharge pulse amplitude over time

根据上述局放信号特征分析，判断该处局放信号为金属颗粒掉落至金属壳体底部引发，开盖检查发现，断路器气室内屏蔽罩内部结构、机构侧绝缘筒及端部法兰、与过渡气室相连处盆式绝缘子等部位均无异常，未发现放电烧蚀痕迹及异物残留，在气室壳体底部发现有烧蚀痕迹(见图 14)，其位置与局放定位位置相吻合，推测是金属颗粒在此处被烧蚀留下的痕迹。根据测量，此烧蚀痕迹距离 CH4 局放传感器距离为 2.37 m，相比 3.1 节图 10 中 L_1 的时差定位计算结果 2.5 m，偏差仅 13 cm，在现场试验中属于可以接受的误差范围。



图 14 断路器气室壳体底部黑色痕迹

Fig. 14 Black marks at the bottom of the circuit breaker gas compartment enclosure

开盖检查完成后该气室进行了清理，在完成抽真空、充气及静置后，对该断路器气室重新进行了交流耐压试验，整个试验过程中未再出现异常局放信号。

2.3 现场应用判据

项目组根据在黄石、川渝特高压工程中的应用案例，总结出了一套基于缺陷类型和劣化趋势的特高频局放诊断判据，用以指导现场试验过程中的局放检测与缺陷处置。

在现场绝缘试验过程中开展 GIS 特高频全脉冲局部放电检测试验时，当检测到异常局放信号后，

根据采集记录到的特高频信号脉冲总数、局放时间占比、最大幅值等特征参量，综合分析局放异常信号类别，并判断是否满足局放异常判据，局放异常分析流程图见图 15，可按以下步骤：

- 1)持续观察检测结果，判断是否存在局放脉冲信号；
- 2)排除干扰脉冲信号；
- 3)根据 PRPD 和 PRPS 图谱识别局部放电类型(绝缘、尖端电晕、自由颗粒、悬浮电位 4 种类型)；
- 4)持续记录脉冲特征和数量，在此过程中进行局放定位，并结合超声波局放全脉冲检测进行精确定位；
- 5)判断局放信号的起始电压，如果起始电压大于运行电压，应在局放试验后的降压过程中，在运行电压时停留，判断局放信号是否熄灭；
- 6)如局放信号均满足异常信号判据(绝缘、尖端电晕、自由颗粒类局放信号异常判据为：半小时内局放脉冲总数 ≥ 500 个；悬浮电位类局放信号异常判据为：半小时内，局放脉冲总数 ≥ 500 个或局放时间占比 $\geq 25\%$)，应结合局放定位点进行现场开盖处置；
- 7)如局放脉冲确有存在但未达到局放异常判据，应与相关单位协商处置。

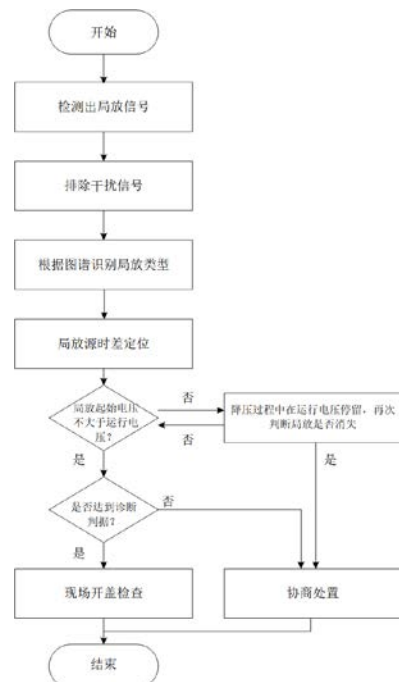


图 15 局放异常诊断分析流程图

Fig. 15 Flowchart for diagnosis and analysis of partial discharge anomalies

3 结论

1)文中提出了一种适用于特高压 GIS 现场绝缘试验全过程的局部放电高灵敏检测方法并首次应用于 1 100 kV GIS 现场试验中,通过“试验电压特征采集—局放采集单元外部触发”的方式,实现了现场试验工况中非工频电压下的局放图谱准确测量。

2)文中提出了一种基于多通道的局部放电特高频信号相干去噪算法,在某特高压站 1 100 kV GIS 现场试验中进行了现场应用,采用文中方法对局放信号进行处理后,背景高频噪声从 20 mV 左右降至 1 mV 以下,提取出的局放特高频脉冲能够实现 ns 时间精度的时差定位。

3)基于对局放信号的特征分析,成功发现了某台断路器中金属异物引发的局放异常现象,开盖检查发现了异物烧蚀痕迹并进行了消缺处理,验证了文中局放检测方法、信号处理方法的有效性。

4)根据实际工程应用经验,总结出了一套基于缺陷类型和劣化趋势的特高频局放诊断判据,能够为现场试验过程中的局放检测和缺陷处置提供明确依据。

文中的特高压 GIS 现场绝缘试验全过程的局部放电高灵敏检测方法为行业内的首次现场应用,为特高压 GIS 的现场试验中缺陷检测能力的提升提供了重要支撑。同时文中案例的相关结果也为后续进一步研究现场应用判据、制定相关标准奠定了基础。

参考文献:

- [1] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
Li Junhao, Han Xutao, Liu Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [2] 武昊,万中一,徐文聪,等. 基于特高频定向天线阵

列的变电站局部放电定位 MUSIC 算法[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3240-3249.

- Wu Hao, Wan Zhongyi, Xu Wencong, et al. MUSIC algorithm for partial discharge location in substation based on utral high fre-quency directional antenna array[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3240-3249.
- [3] 周波,胡与非,杨新春,等. 特高频及超声波法在 GIS 设备带电检测中的应用[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 54-58.
Zhou Bo, Hu Yufei, Yang Xinchun, et al. Application of ultrahigh frequency and ultrasonic method in the live detection of GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 54-58.
- [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] 牛勃,马飞越,周秀,等. 基于 PSO 的局部放电源声电联合定位的研究[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 108-115.
Niu Bo, Ma Feiyue, Zhou Xiu, et al. Acoustoelectric positioning of partial discharge source based on PSO[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 108-115.
- [6] 艾嘉伟,牛海清,陈泽铭,等. 基于神经网络的 D-S 多信息融合 GIL 局部放电联合识别方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4925-4932.
Ai Jiawei, Niu Haiqing, Chen Zeming, et al. D-S multi information fusion GIL partial discharge joint recognition method based on neural network[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4925-4932.
- [7] 刘君华,姚明,黄成军,等. 采用声电联合法的 GIS 局部放电定位试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2458-2463.
Liu Junhua, Yao Ming, Huang Chengjun, et al. Experimental research on partial discharge localization in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2458-2463.
- [8] 席英杰,张崇兴,董明,等. 基于蒙特卡洛模拟的声电联合局部放电定位阵列设计及快速定位方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 3029-3038.
Xi Yingjie, Zhang Chongxing, Dong Ming, et al.

Acoustic-electric joint sensor array design and fast partial discharge localization technology based on monte carlo simulation[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 3029-3038.

- [9]Hussein R, Shaban K B, El H A H. Energy conservation-based thresholding for effective wavelet de-noising of partial discharge signals[J]. IET Science Measurement & Technology, 2016, 10(7): 813-822.
- [10] Cheng J R, Xu Y, Ding D W, et al. A novel de-noising method based on coherence average for ultrasonic signal of partial discharge in transformer[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2021(15): 302-311.
- [11]杨志超, 范立新, 杨成顺, 等. 形态学滤波与自适应噪声抵消在 GIS 局部放电超高频信号去噪中的应用[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 41-46.
- Yang Zhichao, Fan Lixin, Yang Chengshun, et al. Noise removal of partial discharge UHF pulse in GIS with morphological filter and adaptive noise canceller[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 41-46.
- [12]Sriram S, Nitin S, Prabhu K M M, et al. Signal denoising techniques for partial discharge measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6): 1182-1191.
- [13]Hussein R, Shaban K B, El H A H. Denoising different types of acoustic partial discharge signals using power spectral subtraction[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 44-50.

刘瑜琛(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事高压开关设备现场试验、状态检测、故障诊断、局部放电监测与故障定位等方面的研究工作(E-mail: ychen_liu@foxmail.com)。