

基于修正时频聚类分界的 GIS 设备特高频 偶发局放识别算法

董冰冰¹, 高常胜¹, 许 渊², 崔其会³, 胡 洁⁴, 周迎超⁵

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;
3. 国网山东省电力公司, 济南 250001; 4. 积成电子股份有限公司, 济南 250100; 5. 国网内蒙古东部电力
有限公司, 呼和浩特 010000)

摘 要: 特高压气体绝缘金属封闭开关(gas insulated switchgear, GIS)特高频局放信号呈现小脉冲、少脉冲偶发特征, 常被干扰信号淹没。常规单通道局放识别方法难以有效提取特高压 GIS 特高频偶发局放信号, 为此迫切需要研究基于多通道的特高频偶发局放信号识别算法。首先现场实测了 1000 kV GIS 多通道特高频局放信号, 基于其频谱特性, 提出了采用双指数脉冲信号注入和真实干扰源的特高压 GIS 特高频偶发局放信号模拟实验方法, 通过改变注入信号幅值模拟不同信噪比的特高频局放信号脉冲, 获得了 9000 组多通道特高频局放信号和干扰信号数据样本; 其次研究了多通道特高频信号时频特征聚类方法, 在常规 K-Means 方法的基础上, 提出了一种基于修正时频聚类分界的特高压 GIS 特高频偶发局放识别方法, 提出了修正系数 L 的最优取值; 最后将该方法应用于某 1000 kV GIS 特高频局放现场带电检测, 验证了该方法的有效性。

关键词: 特高压; GIS; 带电检测; 偶发局放信号; 局放识别; K-Means; 聚类分界

Identification Algorithm of UHF Occasional Partial Discharge of GIS Equipment Based on Modified Time-frequency Clustering Boundary

DONG Bingbing¹, GAO Changsheng¹, XU Yuan², CUI Qihui³, HU Jie⁴, ZHOU Yingchao⁵

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China; 4. Integrated Electronic Systems Lab Co., Ltd., Jinan 250100, China; 5. State Grid East Inner Mongolia Electricity Power Company Limited, Hohhot 010000, China)

Abstract: Ultra-high frequency (UHF) partial discharge (PD) signals of UHV gas insulated switchgear(GIS) are characterized by small pulses and few pulses, which are often submerged by interference signals. Conventional single-channel PD identification method is difficult to effectively extract UHF GIS occasional PD signal, thus it is urgent to study the multi-channel UHF occasional PD signal recognition algorithm. First, the 1000 kV GIS multi-channel UHF PD signal is measured in the field. Based on its spectrum characteristics, a simulation experiment method of UHV GIS UHF accidental PD signal is proposed by using double-exponential pulse signal injection and real interference source. By changing the amplitude of the injected signal to simulate the UHF PD signal pulse with different signal noise ratio(SNR), 9000 sets of multi-channel UHF PD signal and interference signal data samples are obtained. Secondly, the time-frequency feature clustering method of multi-channel UHF signals is studied. Based on the conventional K-Means method, an identification method of UHV GIS UHF PD based on modified time-frequency clustering boundary is proposed, and the optimal value of the correction coefficient L is proposed. Finally, this method is applied to live detection of a 1000 kV GIS UHF PD site, and the effectiveness of this method is verified.

Key words: UHV; GIS; live detection; occasional partial discharge signal; partial discharge identification; K-Means; clustering boundary

0 引言

气体绝缘金属封闭开关(gas insulated switchgear, GIS)是电力系统的关键核心设备, 截止 2021 年底, 我国 72.5~1100 kV GIS 在运量超过 6 万间隔, 特高压输变电工程已全部使用 GIS 设备^[1]。为保障 GIS 运行可靠性, 普遍采用特高频(ultra high frequency, UHF)带电检测诊断 GIS 内部是否存在局部放电缺陷^[2-3], 避免设备故障。

与常规电压等级不同, 特高压 GIS 绝缘裕度较低, 故障前特高频局放信号呈现小脉冲、少脉冲偶发特征, 且常被淹没在 GIS 外部干扰信号中, 难以识别^[4-7]。为检测特高压 GIS 内部是否存在局部放电, 确认局放类型和数量, 定位局放位置, 必须首先从干扰信号中提取出 GIS 内部局放特高频偶发信号^[8-10]。为检测识别出特高压 GIS 内部特高频偶发局放信号, 实际应用中, 通常采用内置特高频传感器和外置空间特高频传感器进行多通道检测, 对每个信号脉冲进行人工分析, 通过对比内置特高频传感器和外置空间特高频传感器信号的幅值大小、时差先后识别特高压 GIS 内部局部放电信号, 当干扰信号较多时, 识别工作量十分巨大, 无法满足现场快速诊断的需求, 故现场迫切需要一种特高压 GIS 特高频偶发局放脉冲多通道识别算法。

在特高频局放信号识别方面, 国内外学者通常采用信号频率分量^[11-13]、频率组成特性^[14]、聚类特征^[15-17]等信号特征的分析方法, 并取得了一定效果。但以上方法主要用于放电频次高、幅值大的单通道局放信号识别, 对特高压 GIS 频率特征不明显、信号幅值较小、放电频次较低、干扰信号较多的特高频偶发局放信号识别效果并不理想^[1,8], 也无法用于多通道信号分析, 难以满足特高压 GIS 现场带电检测需求。

为此, 本文提出了一种适用于特高压 GIS 带电检测特高频偶发局放脉冲信号识别的智能算法。首先现场实测了 1000 kV GIS 典型局部放电信号和干扰信号, 根据其频谱特性, 建立了基于双指数脉冲信号注入和真实干扰源的实验平台, 通过改变注入信号幅值模拟不同信噪比的特高压 GIS 特高频局放信号脉冲, 采集了 9000 组多通道 UHF 局放信号和干扰信号数据; 其次基于大量数据, 研究了多通道特高频信号时频域特征的聚类方法, 针对特高压 GIS 特高频局放偶发特性, 提取时频域特征, 在常

规 K-Means 方法的基础上, 采用误差平方和(sum of the squared errors, SSE)优化聚类中心, 建立了一种基于修正时频聚类分界的特高压 GIS 特高频偶发局放识别方法, 获得了关键参数修正系数 L 的最优取值; 将该方法应用于某特高压变电站 1000 kV GIS 局放带电检测, 取得了较好的应用效果, 证明了该方法的有效性。

1 GIS 特高频局放模拟实验平台及方法

1.1 实验平台

为研究特高压 GIS 内置特高频传感器、外置空间特高频传感器的多通道特高频局放信号和干扰信号特征, 本文综合考虑实验成本及等效性, 搭建了含 252 kV 真型 GIS、特高频局放信号和干扰信号模拟系统以及特高频局放测量系统在内的实验平台, 主要包括以下部分:

1) 252 kV 真型 GIS

如图 1(a)所示, 单相 252 kV 真型 GIS 主要包括长母线实验段 A(长 10 m)、断路器实验段 B(长 6 m)、短母线实验段 C(长 6 m), GIS 两端安装出线套管以模拟现场真实特高频信号传输环境。实验主要在短母线实验段 C 上开展, 如图 1(b)所示, 主要包括 3 个气室和 3 个盆式绝缘子①、②、③。为模拟现场实际测试条件, 在两端气室设置 1 号、3 号内置特高频传感器, 间距 3.82 m, 用于检测 GIS 局部放电信号; 在盆式绝缘子③设置 2 号外置特高频传感器, 用于注入局部放电模拟信号, 距离 1 号内置特高频传感器 2.52 m; 在 3 号内置特高频传感器附近, 设置 4 号外置空间特高频传感器, 用于测量空间干扰信号。

2) 特高频偶发局放信号和干扰信号模拟系统

如图 1(b)所示, 包括可产生双指数脉冲信号的 Tektronix AWG7082C 高性能任意波形发生器(采样率 8 GHz), 通过向 2 号外置特高频传感器注入不同幅值的双指数脉冲信号模拟 GIS 内部特高频偶发局放信号。为避免信号泄漏导致识别错误, 采用屏蔽布包裹盆式绝缘子③和 2 号外置特高频传感器进行屏蔽。同时在真型 GIS 附近布置 110 kV 升压变, 并在升压变高压屏蔽罩外表面设置尖端和悬浮缺陷, 模拟变电站内空间特高频电晕和悬浮干扰信号。

3) 特高频局放测量系统

如图 1(b)所示, 采用频带 250~1000 MHz、增益 50 dB 的特高频信号放大器和采样率 5 GHz 的

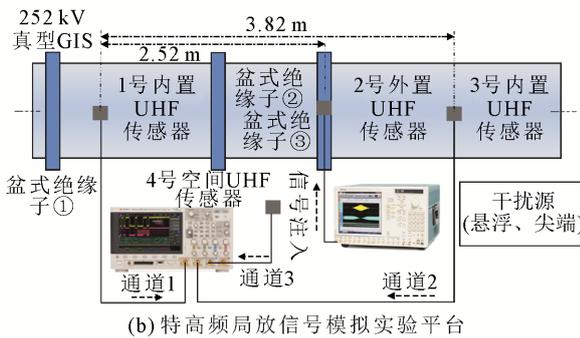
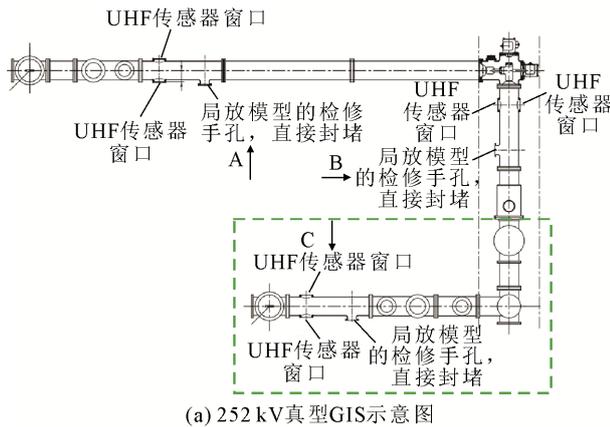


图1 252 kV 真型 GIS 特高频局放信号模拟平台

Fig.1 252 kV real GIS UHF PD signal simulation platform

Keysight DSOX3014T 高速示波器在 1 号、3 号内置特高频传感器测量局放信号，在 4 号外置空间特高频传感器测量空间干扰信号，测量方法、接线布置与特高压 GIS 现场带电检测一致。

1.2 实验方法

为研究特高压 GIS 内部特高频局放脉冲智能识别算法，首要解决的问题是在多通道测量条件下，实验获得大量不同信噪比的偶发局放和干扰信号样本。图 2 为典型频发局放与偶发局放特高频信号频域时域与频谱图，根据图 2 可知，频发局放与偶发局放信号频谱特性一致，但局放发生频次不同，当偶发时，在干扰影响下，局放信号常淹没在干扰信号中难以识别^[3]。为模拟偶发局放信号，根据文献^[6-7]，本文采用双指数脉冲注入法模拟偶发局放信号，每个工频周期注入 2 个脉冲，采用实际空间尖端、悬浮放电模拟干扰信号，建立数据样本集，其中注入双指数脉冲信号半峰值时间为 20 ns，波前时间 T_f 为 0.5 ns，注入双指数脉冲信号波形见图 3。

为验证模拟特高频局放信号与现场实际特高压 GIS 特高频局放信号的等效性，计算对比了模拟局放信号和 3 个特高压站 1000 kV GIS 现场实测局放信号的功率谱密度^[18]，如图 4 所示，模拟特高频

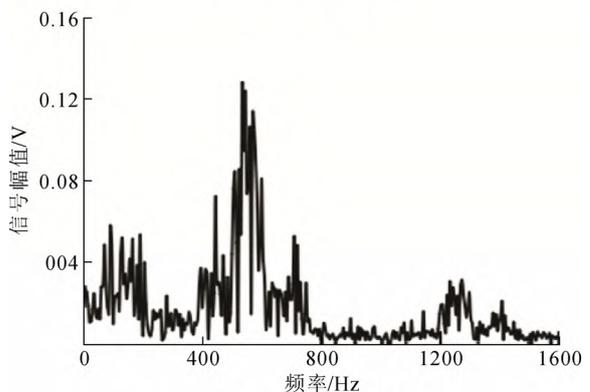
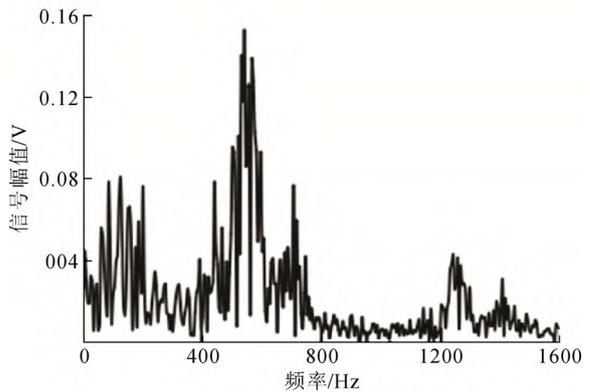
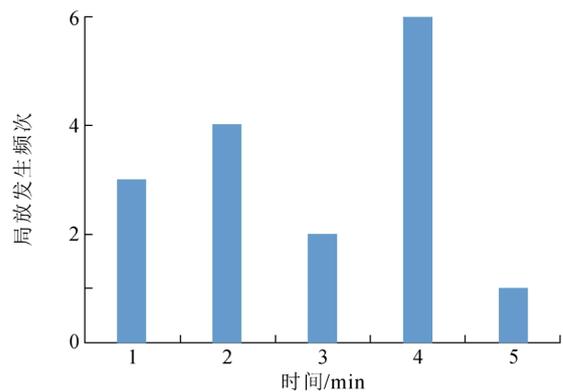
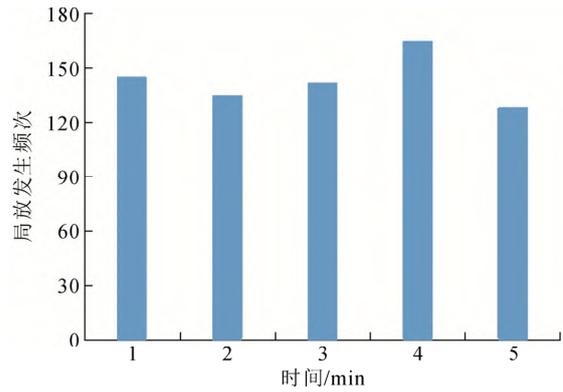


图2 频发局放与偶发局放特高频信号频域时域与频谱图
Fig.2 Time domain and frequency spectrum of UHF signal frequency of frequent partial discharge and occasional partial discharge

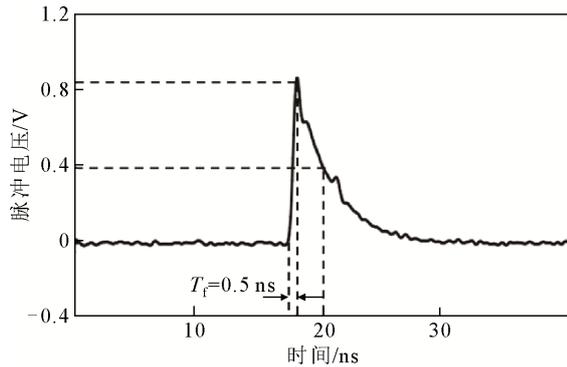


图3 注入双指数脉冲信号

Fig.3 Injection of double exponential pulse signal

局放信号与3个特高压站实测特高频局放信号功率谱密度分布范围一致,证明了采用252 kV真型试验平台进行模拟实验的可行性与等效性。

相同测试条件下,现场实测的GIS特高频信号幅值主要与局放实际产生的特高频信号大小、局放源位置、信号在不同结构的传播衰减特性有关^[19-20]。为模拟现场测量不同幅值的特高频局放信号,本文通过改变注入双指数脉冲信号幅值模拟现场具有不同信噪比的局放信号。如表1所示,注入陡脉冲信号电压峰峰值范围为0.4~2.0 V,共设置9个测点,每个测点测量1000组特高频信号脉冲。

实验时,向2号传感器注入双指数脉冲模拟GIS内部特高频局放信号;采用110 kV升压变升压,通过尖端和悬浮缺陷模拟变电站干扰信号;通过1号、3号特高频传感器测量特高频局放信号,通过4号特高频传感器测量特高频空间干扰信号;改变双指数脉冲注入幅值,在多通道测量条件下,获得9000组具有不同信噪比的局放和干扰信号样本。

2 多通道 UHF 信号特征选取

常规K-Means聚类算法作为局放信号处理的常用方法,属于非监督学习,训练模型不需输入样本标签,只需输入特征参量即可进行聚类,具有对大样本聚类速度快等优点^[16]。提取时频域特征是常规K-Means聚类算法特高频信号处理的关键步骤,故本文首先对特高频信号时域特征进行分析。

2.1 时域特征选取

为分析GIS特高频偶发局放信号和干扰信号特征,本文首先对采集的多通道UHF信号进行时域特征分析。多通道特高频原始信号可分为两类:GIS内部特高频局部放电信号和干扰信号如图5、6所

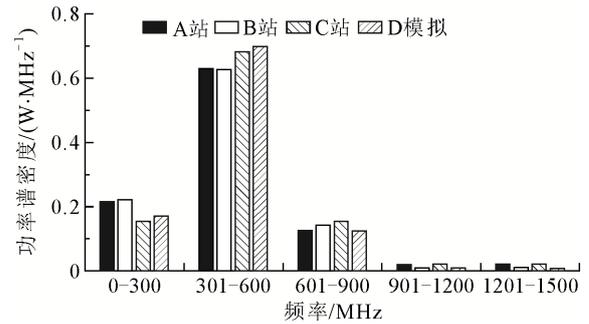


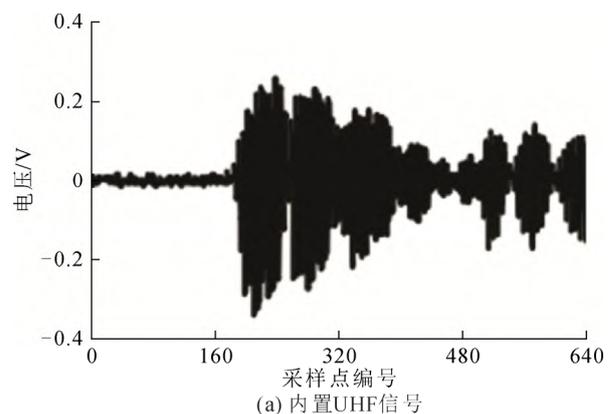
图4 特高压GIS及模拟局放特高频信号频谱分布

Fig.4 Spectrum distribution of ultra-high frequency signal of UHV station GIS and simulated partial discharge

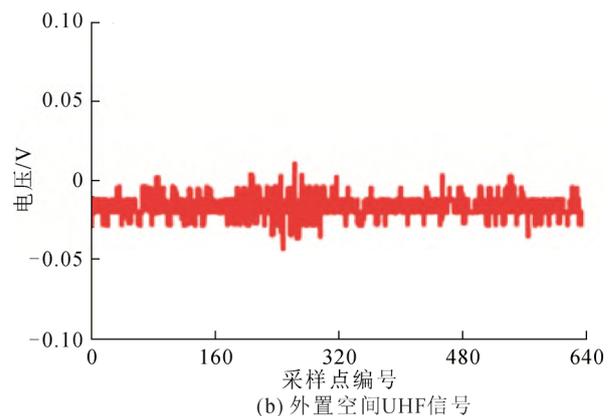
表1 脉冲信号注入组合

Table 1 Pulse signal injection combination

干扰源	注入陡脉冲信号电压峰峰值/V								
尖端/悬浮	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4



(a) 内置UHF信号



(b) 外置空间UHF信号

图5 GIS典型内部特高频局部放电信号

Fig.5 Typical UHF partial discharge signal in GIS

示,其中为保证时差定位准确性,并获得特高频信号的头波的频率特性,同时减少计算量,故特高频单脉冲信号采集时间为200 ns,640个采样点。

由图5可知,内置UHF信号峰峰值约为0.45 V(远大于空间UHF信号峰峰值0.06 V),此时外界

干扰信号很小, 特高频内置传感器所测信号为 GIS 内部信号。图 6 中内置 UHF 信号峰峰值约为 0.9 V, 空间特高频信号峰峰值也约为 0.9 V, 根据特高频局放幅值定位法, 此时内置特高频传感器受到外界严重干扰, 所测信号为干扰信号。

基于以上分析可知, 当现场存在干扰信号, 各特高频信号峰峰值存在明显差异。故对多通道特高频信号峰峰值分布情况进一步分析, 其结果如图 7 所示, 分析图 7(a)和 7(b)可以得到:

1) 图 7(a)为内置特高频传感器信号峰峰值 U_{pp} 分布, 由图中可以看出所测信号主要集中在 0~0.6 V 之间, 其占总数据 95.7%, 小部分峰峰值集中在 0.8~1.0 V 之间, 只占总样本 4.1%。

2) 图 7(b)为 4 号外置空间特高频传感器信号峰峰值分布, 图中可以看出空间传感器所测外界信号主要集中在 0~0.2 V, 其占总数据 95.6%, 小部分峰峰值集中在 0.8 V~1.2 V 之间, 只占总样本 4.2%。

根据以上分析可知, 多通道特高频信号峰峰值可作为干扰信号识别特征参数。由于峰峰值无法识别与局放信号峰峰值相似的干扰信号, 故采用累积能量法表征信号全长度特征。累积能量计算式为:

$$Z(x) = \int_{x'=x_i}^x \frac{u^2(x')}{R} dx' \quad (1)$$

式中: x_i 为信号采集起始时刻; $u(x')$ 为时刻 x' 的 UHF 信号电压值; R 为采集系统的输入阻抗。

综上所述, 本文选取表征时域特征的多通道特高频信号累积能量特征参数, 以累积能量曲线最大值为时域特征参量, 避免了以往研究提取多时域统计特征参数计算量大和处理速度慢的问题。设特高频时间序列信号 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 通道个数为 p , 则构建多通道时域特征序列 $W = \{\max(Z_{p1}), \max(Z_{p2}), \dots, \max(Z_{pn})\}$, Z_{pn} 为第 n 个时域特征。

2.2 频域特征选取

为选取有效表征特高频局放信号的频域特征参数, 对各通道 UHF 信号频域特征进行分析。由于空间 UHF 传感器最易受外部干扰信号影响, 故分析其频谱分布特性, 空间 UHF 信号频谱分布如图 8 所示。分析图 8 可知: 图 8(a)为空间 UHF 信号干扰频谱分布, 外部尖端和悬浮缺陷的干扰信号频谱分布主要集中在 200~600 MHz; 图 8(b)为无干扰空间 UHF 信号频谱分布, 与图 8(a)相比, 由于外部干扰信号微弱, 故空间特高频信号的频谱分量在高频段很小, 其中直流分量为示波器检测基噪峰值。

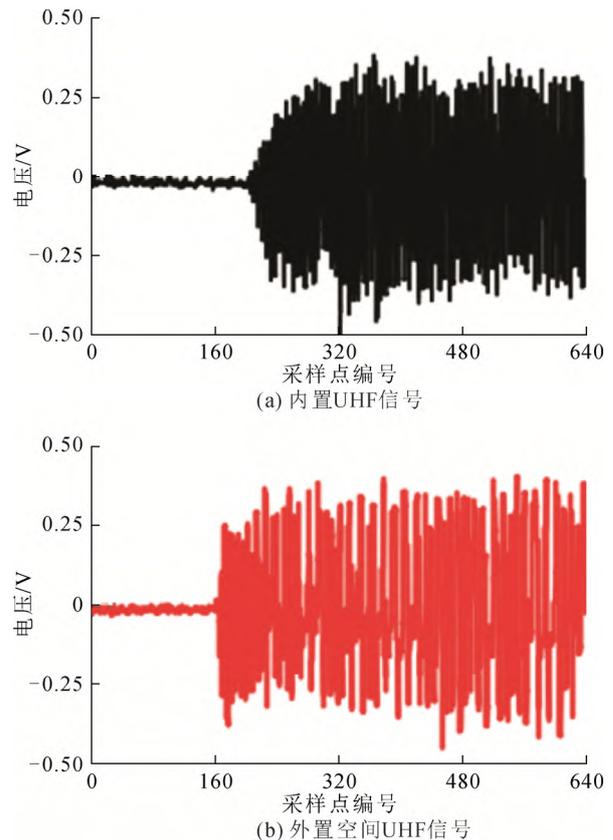


图 6 GIS 典型特高频干扰信号

Fig.6 GIS typical UHF interference signal

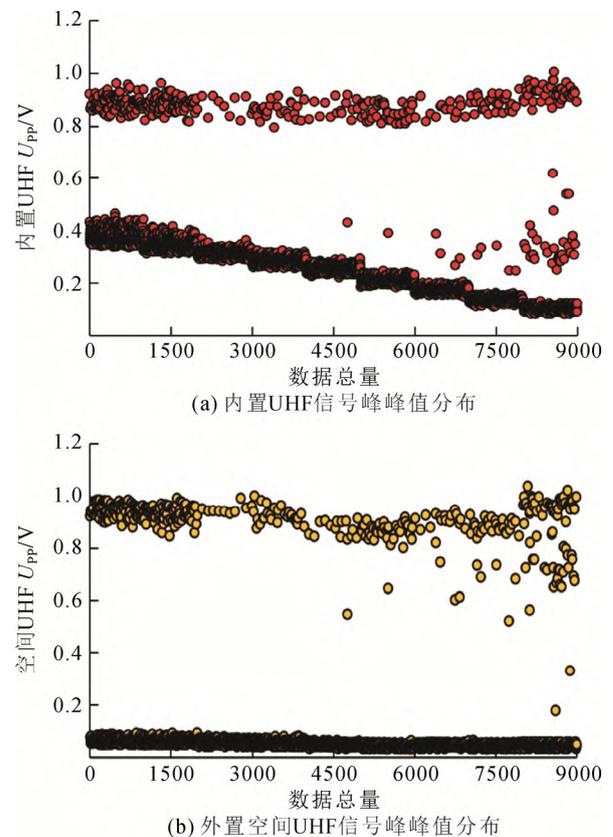


图 7 多通道 UHF 信号电压峰峰值 U_{pp} 分布

Fig.7 Peak voltage distribution of multichannel UHF signal

进一步分析 UHF 信号频域特征, 本文统计了 9000 组空间 UHF 信号频谱分量最大值对应的频率分布如图 9 所示, 其中空间 UHF 信号中高频分量集中范围为 375~400 MHz, 占数据总量约为 4%。频率分量最大值对应的频率为低频样本数占比最大, 其占数据总量约为 95.7%。

综上所述, 频域特征可选取特高频信号频谱分量最大值对应的频率。由于特高频信号为非周期离散信号, 其频域转换式如(2)所示。对空间 UHF 信号进行频域转换, 构建频域特征序列 $X_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, N 为信号长度, n 为信号标签, k 为采样点编号。

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left(\cos 2\pi k \frac{n}{N} - j \sin 2\pi k \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, N-1)$$

3 修正时频聚类分界的局放识别方法

3.1 K-Means 聚类算法局放识别

常规 K-Means 法虽然可随机选取初始聚类中心, 但无法保证聚类效果。为了提高特高频局放信号识别效果, 故对关键参数聚类中心选取进行优化。为了选取最佳中心 K 值, 本文采用肘点法进行最优 K 值的选取。误差平方和(sum of squared error, SSE, 用符号 D_{SSE} 表示)可以评估聚类效果, D_{SSE} 越小则聚类效果越好。 D_{SSE} 计算式为:

$$D_{SSE} = \sum_{i=1}^m \sum_{g \in C_i} |g - m_i|^2 \quad (3)$$

式中: C_i 为第 i 个簇; m_i 为第 i 个聚类中心; g 为属于 C_i 的数据点。聚类中心 K 选取 1 到 10, 分别求取 D_{SSE} 值, 不同聚类中心的 D_{SSE} 值如图 10 所示。

根据肘点法原理: 当聚类个数未达到最优个数 K 时, 随着聚类个数的增加, D_{SSE} 下降较快。当达到最优个数以后, D_{SSE} 下降缓慢, 斜率最大处即为最优 K 值。由图 8 可知, 在聚类中心为 3 时, 斜率最大, 即 D_{SSE} 下降最快, 且聚类中心大于 3 后, D_{SSE} 下降缓慢, 故最优 K 值为 3。

基于时频域特征的 SSE 优化 K-Means 算法流程如图 11 所示。

基于多通道时频域特征的 SSE 优化 K-Means 算法对样本进行分析, 聚类中心设置为 3。内置和空间 UHF 信号特征可视化聚类结果如图 12 所示, 其中样本点分为 3 个簇团, 聚类 1 簇团有 512 个样本点, 聚类 2 簇团有 3252 个样本点, 聚类 3 簇团有

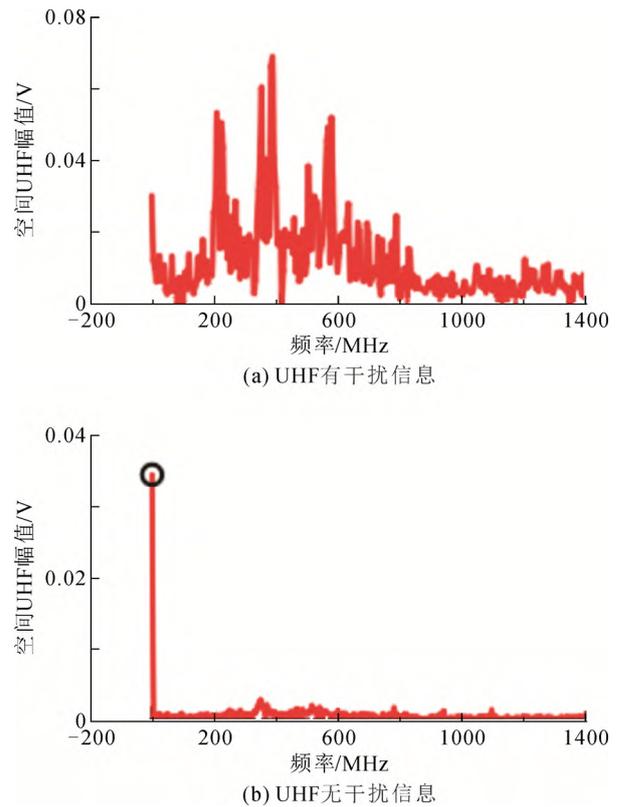


图 8 空间 UHF 信号频谱分布

Fig.8 Spatial UHF signal spectrum distribution

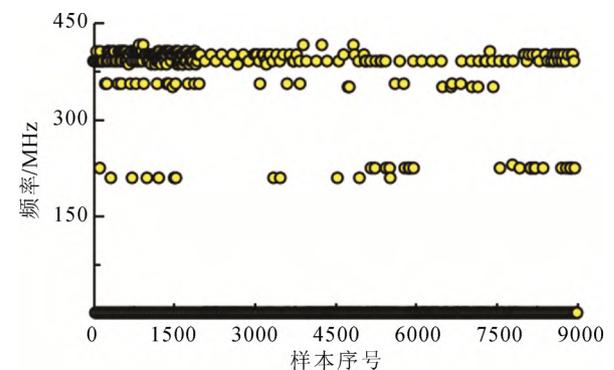


图 9 空间 UHF 信号频谱分量最大值的频率分布

Fig.9 Frequency distribution of maximum spectral component of space UHF signal

3236 个样本点。

为减小局放识别误差, 本文提出聚类分界阈值 α 代替人工经验判据, 该参数由选取的时频域特征决定。若信号总数为 H , 聚类 1 为 $X_1(f)$, 聚类 2 为 $Y_1(d)$, 聚类分界阈值 α 推导式为:

$$\alpha = \frac{\min(Y_1(d)) + \max(X_1(f))}{2}, f = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

式中: $X_1(f)$ 为内置 UHF 信号时频域特征序列; $Y_1(d)$ 为空间 UHF 信号时频域特征序列。

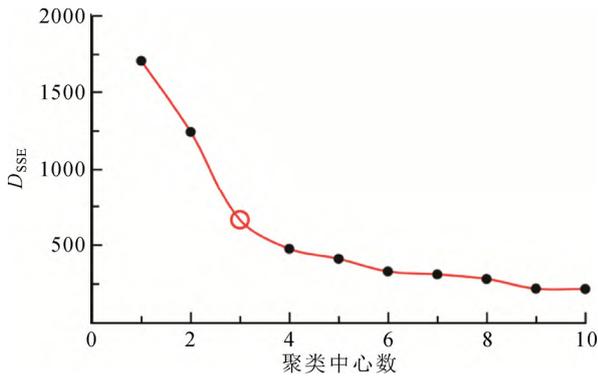


图 10 不同聚类中心的 SSE 值

Fig.10 SSE values of different clustering centers

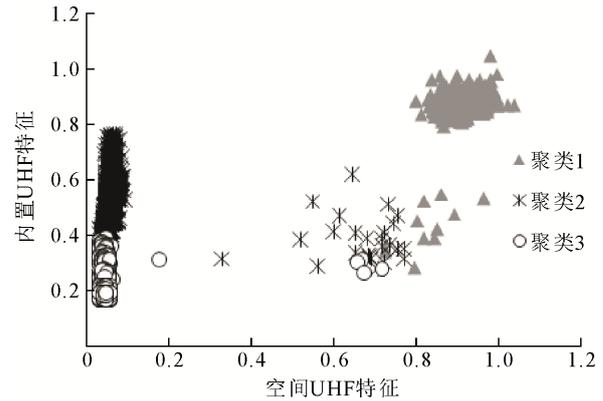


图 12 内置和空间 UHF 信号特征可视化聚类结果

Fig.12 Visualization results of built-in and spatial UHF signal characteristics

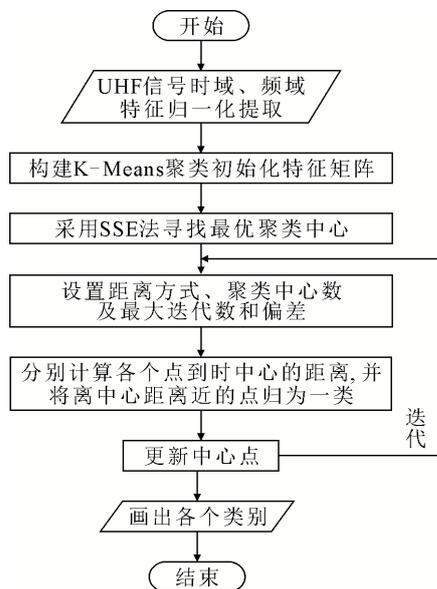


图 11 基于时频域特征的 SSE 优化 K-Means 算法流程

Fig.11 Process of SSE optimized K-Means algorithm based on time-frequency features

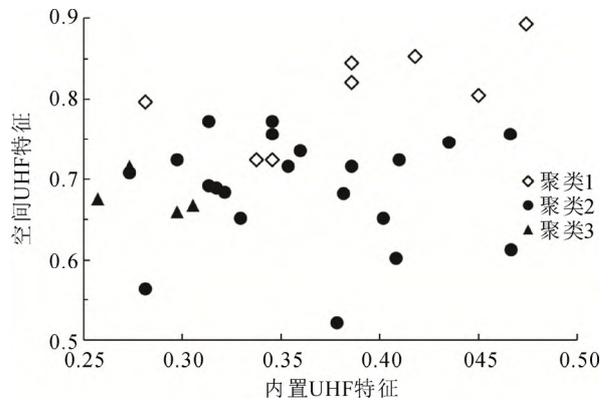


图 13 聚类分界样本混叠现象

Fig.13 Clustering boundary sample aliasing phenomenon

表 2 干扰信号识别结果

Table 2 Interference signal recognition results					
修正系数 L	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
局放信号个数	8024	8347	8490	8374	8331
干扰信号个数	976	653	510	626	669

3.2 聚类分界判据优化

图 12 中聚类 1、2、3 簇团存在聚类分界样本混叠现象, 聚类分界样本混叠局部放大见图 13。

由于聚类中心局部存在混叠现象, 混叠样本会影响聚类分界阈值 α 的选取, 从而影响局部放电识别准确性, 因此需要解决聚类样本的混叠问题, 为此, 本文引入修正系数 L , 通过修正聚类分界阈值 α , 处理局放样本的混叠问题, 如式(5)所示。

$$\bar{\alpha} = L\alpha, k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

式中: $\bar{\alpha}$ 为修正聚类分界阈值, 修正系数的取值由样本特征决定, 当修正系数为 1 时, $\bar{\alpha} = \alpha$ 。研究修正系数 L 分别取 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 时局放识别结果, 如表 2 所示。

对表 2 进行分析可知, 聚类分界阈值参数的选取决定剔除干扰信号个数, 当 $L > 1$ 时, 局放信号个数迅速减小, 其识别的局放信号虽然含干扰信号很少, 但也有大量 UHF 局放信号被剔除; 当 $L = 1.2$ 时局放信号只有 8331 个, UHF 局放信号丢失严重, 基于该局放信号进行 GIS 设备局部放电定位无法保证其定位有效性; 当 $L < 1$ 时, 识别的局放信号会包含一定的干扰信号, L 越小, 包含的干扰信号越多, 难以满足局放识别的要求。因此, 为取得较好的识别效果, 需要确定修正系数 L 的最优取值。

3.3 最优修正系数 L 选取

在不同修正系数 L 取值条件下, 识别局放信号, 并通过 1 号、3 号内置特高频传感器时差, 计算定

位局放位置, 通过比较时差定位位置与实际缺陷位置间的距离误差, 获得修正系数 L 的最优取值。如图 14 所示, 由于特高频信号波头起始位置识别的准确性对时差定位误差影响较大, 本文时差定位时, 首先计算每一个局放信号的时差, 然后以所有局放信号的时差期望值为 1 号、3 号内置特高频传感器的时差, 计算定位局放位置, 减小波头识别对定位的影响。

根据文献[21-24]计算特高频局放信号的时差定位。由于信号能量与电压平方成正比, 可将特高频信号的电压波形转化为能量累积曲线。当局部放电信号远大于背景噪声时, 在能量累积差值曲线上会产生明显的拐点, 该拐点即可视为局部放电发生的起始时刻, 对于长度为 W 的信号, 将能量累积曲线减去每点的平均能量, 如式(6):

$$S'_v = s_v - t = \sum_{n=1}^v u_n^2 - \sum_{n=1}^W \frac{u_n^2}{W} \cdot v \quad (6)$$

式中: S'_v 为第 v 个信号的能量差值曲线; s_v 为能量曲线; t 为每一点的平均能量。针对本文特高频传感器布置方式, 时差定位式如式(7):

$$\Delta T = T_1(i) - T_3(i) \quad (7)$$

式中: ΔT 为信号时差; $T_1(i)$ 、 $T_3(i)$ 分别为 1 号 UHF 传感器和 3 号 UHF 传感器每个局放信号拐点时刻值。通过以上方法计算局放信号波头起始位置。

根据聚类分界特征得出 UHF 局放信号识别判据, 计算多通道 UHF 局放信号时差定位统计结果如表 3 所示, 其中 ΔT 为 1 号、3 号内置特高频传感器时差期望值。根据表 3 可得:

1) 当 $L > 1$ 时, L 在 1~1.1 范围内定位误差减小 18 cm, 局放识别准确度显著提高, 但 L 在 1.1~1.2 范围, 误差减小不显著, 验证了 3.2 节分析结论: L 值在该区间内, 干扰信号的剔除已经趋于饱和。

2) 当 $L < 1$ 时, 定位误差显著增大, 当 $L=0.8$ 时, 其定位误差约为 $L=1$ 的 2.25 倍。一方面, 当 $L < 1$ 时, 大量干扰信号样本点由于混叠问题被视作局放信号, 干扰信号的剔除率随着 L 减小快速降低, 另一方面论证了干扰信号的存在会严重降低定位准确性。当 $L=1.1$ 时定位误差最小, 故为保证有效剔除干扰信号, 提升局放识别效果, L 最优取值为 1.1。

4 算法应用

将修正时频聚类分界识别算法应用于某特高

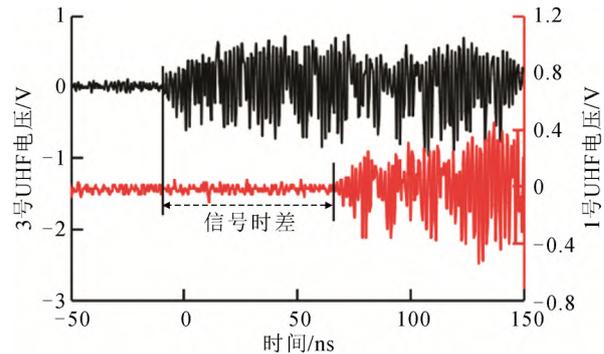


图 14 局部放电时差比较定位法

Fig.14 Comparative location method of partial discharge time difference

表 3 特高频局放定位结果

修正系数 L	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$\Delta T/\text{ns}$	7.1	6.2	5.6	5	5.1
定位误差/m	0.81	0.54	0.36	0.18	0.19

压站 1000 kV GIS 现场带电检测, 对 7000 组多通道特高频信号进行分析, 识别特高压 GIS 内部局放信号, 并将识别的局放信号用于时差定位, 统计计算获得局放位置。

该站 1000 kV GIS 局放带电检测现场传感器布置和测试接线如图 15 所示, 主要包括 2 个内置 UHF 传感器 1 号 OCU47-2 和 3 号 OCU46-2, 2 个外置 UHF 传感器, 其中 4 号外置 UHF 传感器接收空间干扰信号, 2 号外置 UHF 传感器位于 GIS 盆式绝缘子浇筑口处, 用于辅助测量, 特高频多通道测试接线和方法与图 1(b)基本相同。

根据图 11 基于时频特征的 SSE 优化 K-Means 算法流程, 首先采用时频聚类分界方法对图 15 带电检测获得的 7000 组特高频信号进行处理, 最优聚类中心为 3, 获得内置和空间 UHF 信号时频特征可视化聚类结果见图 16, 其中聚类 1 样本点有 512 个, 聚类 2 样本点有 3252 个, 聚类 3 样本点有 3236 个, 聚类 1 和聚类 2 簇团分界处存在显著的混叠现象。

然后采用修正系数 L 对聚类分界阈值进行优化, 处理聚类混叠数据, L 取值为 1.1。优化后获得的聚类识别结果如图 17 所示, 其中局放信号样本 5759 个, 干扰信号样本点 1241 个。

最后以提取的 5759 个多通道局放信号为对象, 统计 1 号 OCU47-2 和 3 号 OCU46-2 特高频局放信号时差如图 18 所示, 期望值为 -75.1 ns。由于 1 号

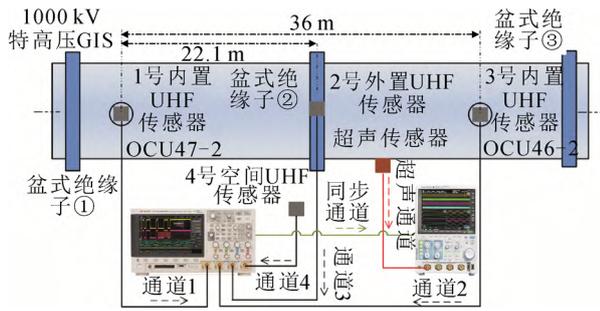


图 15 特高压 GIS 现场带电检测平台

Fig.15 On-line detection platform for UHV GIS

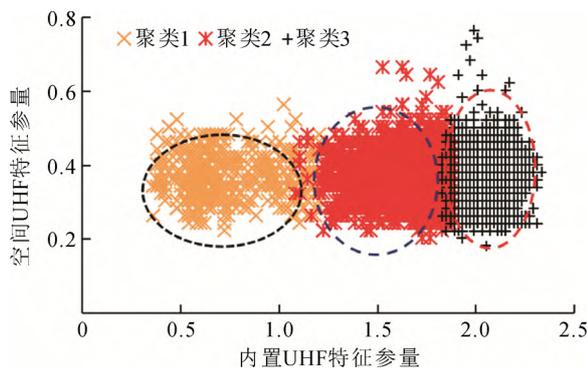


图 16 实测特高频信号聚类算法识别结果

Fig.16 Identification results of clustering algorithm for UHF signals

OCU47-2 和 3 号 OCU46-2 特高频传感器相距 36 m, 特高频信号传播速度为光速, 计算可得局放源位于 3 号 OCU46-2 特高频传感器左侧 6.735 m 处。

通过比较特高频时差定位位置与声电联合超声定位位置, 验证定位结果准确性。图 15 中, 在时差定位位置附近, 通过声电联合检测, 确定超声局放信号幅值最大的位置。根据声电联合检测原理, 超声信号与特高频信号为同源信号, 由于 GIS 超声局放检测有效范围不超过 0.5 m, 因此可将超声局放信号幅值最大的位置近似为实际缺陷位置^[25-26]。

声电联合检测时, 由于超声局放信号的频带范围远低于 UHF 信号, 因此超声信号和 UHF 信号采用两个示波器同步采集, 并以特高频信号为触发, 同步记录超声信号, 准确检测定位出超声局放信号最大位置, 其中超声信号采用采样率 10 MHz 的 Yokogawa DLM2024 高速示波器采集^[27-28]。

经检测定位, 声电联合超声局放信号幅值最大位置位于 3 号 OCU46-2 特高频传感器左侧 6.795 m 处, 与超声定位位置相比, 特高频时差定位误差为 0.06 m, 证明了算法的有效性。

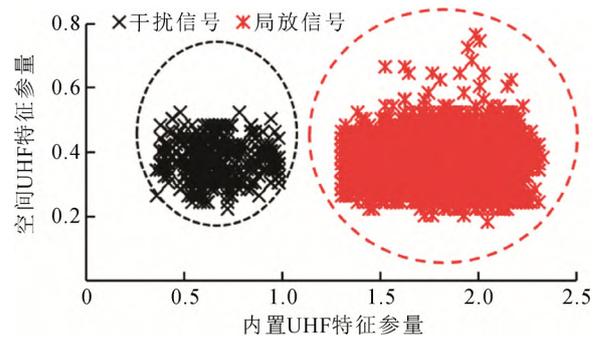


图 17 实测特高频信号修正时频聚类算法识别结果

Fig.17 Identification results of modified time-frequency clustering algorithm for real UHF signals

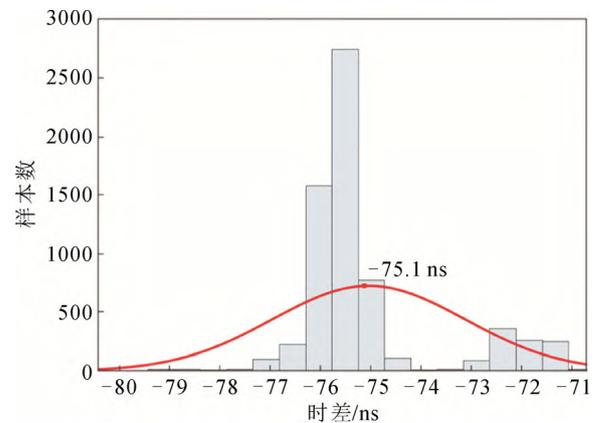


图 18 局放信号统计时差期望图

Fig.18 Statistical time difference expectation diagram of partial discharge signal

5 结论

1) 本文提出了一种模拟现场不同信噪比的 1000 kV GIS 特高频偶发局放信号和干扰信号的方法, 通过注入不同幅值的双指数脉冲模拟偶发局放信号, 通过实际空间尖端、悬浮放电模拟干扰信号, 其中注入的双指数脉冲信号半峰值时间为 20 ns, 波前时间为 0.5 ns。

2) 本文提出了一种基于修正时频聚类分界的特高压 GIS 特高频偶发局放识别算法。采用基于 SSE 优化聚类中心的 K-Means 方法, 将聚类分界阈值 α 作为局放信号识别判据, 引入修正系数 L 解决了聚类分界样本混叠问题, 并提出修正系数 L 的推荐值为 1.1。

3) 将修正时频聚类分界算法应用于某特高压站 1000 kV GIS 带电检测特高频局放信号识别, 有效识别了偶发特高频局放信号, 将识别的局放信号用于局放缺陷时差定位, 定位结果与实际缺陷位置

一致, 验证了本文偶发特高频局放识别方法的有效性。该方法除了适用于特高压 GIS, 也适用于其他电压等级 GIS 偶发局放的测量和识别。

参考文献 References

- [1] 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.
- [2] 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]. 高电压技术, 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.
- [3] 许 渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 交流 GIS 绝缘子表面亚毫米级金属颗粒的运动和局部放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4315-4324.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Motion characteristics and partial discharge characteristics of submillimeter metal particles on the surface of AC GIS spacer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4315-4324.
- [4] 许 渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 运行工况下交流 GIS 绝缘子表面微金属颗粒运动诱发沿面闪络的研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1596-1602.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Study on the development of surface flashover induced by the motion of micro-metal particle on the surface of AC GIS spacers under operation condition[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1596-1602.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] LI X, LIU W D, XU Y, et al. Surface charge accumulation and pre-flashover characteristics induced by metal particles on the insulator surfaces of 1100 kV GILs under AC voltage[J]. High Voltage, 2020, 5(2): 134-142.
- [9] 李 鹏, 毕建刚, 于 浩, 等. 变电设备智能传感与状态感知技术及应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3097-3113.
LI Peng, BI Jiangang, YU Hao, et al. Technology and application of intelligent sensing and state sensing for transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3097-3113.
- [10] GAO W S, DING D W, LIU W D. Research on the typical partial discharge using the UHF detection method for GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2621-2629.
- [11] HUSSEIN R, SHABAN K B, EL-HAG A H. Wavelet transform with histogram-based threshold estimation for online partial discharge signal denoising[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(12): 3601-3614.
- [12] KHAN S Z, ZHU D H, JIN X H, et al. A new adaptive technique for on-line partial discharge monitoring[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 700-707.
- [13] HAO L, LEWIN P L, HUNTER J A, et al. Discrimination of multiple PD sources using wavelet decomposition and principal component analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1702-1711.
- [14] 王 辉, 宋思蒙, 钱 勇, 等. 基于 CLAHE 增强的 GIS 局放脉冲序列识别算法[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 3836-3844.
WANG Hui, SONG Simeng, QIAN Yong, et al. Recognition algorithm of GIS partial discharge phase resolved pulse sequence based on CLAHE enhancement[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3836-3844.
- [15] 贾亚飞, 朱永利, 高佳程, 等. 基于样本加权 FCM 聚类的未知类别局部放电信号识别[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 107-112.
JIA Yafei, ZHU Yongli, GAO Jiacheng, et al. Recognition of unknown partial discharge signals based on sample-weighted FCM clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 107-112.
- [16] 李君卫, 汤亚芳, 郝正航, 等. 聚类分析及其在电力系统中的应用综述[J]. 现代电力, 2019, 36(3): 1-10.
LI Junwei, TANG Yafang, HAO Zhenghang, et al. Survey of cluster analysis and its application in power system[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(3): 1-10.
- [17] 严英杰, 盛戈峰, 刘亚东, 等. 基于滑动窗口和聚类算法的变压器状态异常检测[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 4020-4025.
YAN Yingjie, SHENG Gehao, LIU Yadong, et al. Anomalous state detection of power transformer based on algorithm sliding windows and clustering[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 4020-4025.
- [18] ATTOUI I, BOUTASSETA N, FERGANI N. Novel machinery monitoring strategy based on time-frequency domain similarity measurement with limited labeled data[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 3500708.
- [19] 陈 晔, 叶兆平, 郑书生. GIS 套管对平面电磁波耦合特性的仿真分析[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 15-20.
CHEN Ye, YE Zhaoping, ZHENG Shusheng. Simulation and analysis of coupling characteristics of GIS bushing to plane electromagnetic waves[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 15-20.
- [20] 国家能源局. 变电设备在线监测装置检验规范 第 4 部分: 气体绝缘金属封闭开关设备局部放电特高频在线监测装置: DL/T 1432.4—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
National Energy Administration. Testing specification for on-line monitoring device for transformation equipment part 4: on-line partial discharge monitoring device for gas-insulated metal-enclosed switchgear based on ultra high frequency: DL/T 1432.4—2017[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2017.
- [21] 李端姣, 郑书生, 黎 量, 等. 人工电压脉冲与局部放电 UHF 信号的等效性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2900-2904.
LI Duanjiao, ZHENG Shusheng, LI Liang, et al. Analysis on equivalence between UHF discharge signals caused by voltage pulses artificially injected into GIS and that caused by actual partial discharge signals inside GIS[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2900-2904.
- [22] 徐 洋, 刘卫东, 高文胜. 局部放电偶发脉冲的测量、识别与记录

- 方法[J]. 华北电力大学学报, 2019, 46(2): 76-82, 90.
- XU Yang, LIU Weidong, GAO Wensheng. Measuring, distinguishing and recording methods for partial discharge pulses with low repetition rate[J]. Journal of North China Electric Power University, 2019, 46(2): 76-82, 90.
- [23] 陈泽伟, 曾庆宁, 谢先明, 等. 基于自相关函数的语音端点检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(6): 216-221, 256.
- CHEN Zewei, ZENG Qingning, XIE Xianming, et al. Speech endpoint detection method based on auto correlation function[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(6): 216-221, 256.
- [24] 赵江海, 杨 慧, 顾菊平, 等. 基于短时能量的声发射源定位方法研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(23): 110-114.
- ZHAO Jianghai, YANG Hui, GU Juping, et al. Acoustic emission source locating method based on short-time energy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(23): 110-114.
- [25] ILKHECHI H D, SAMIMI M H. Applications of the acoustic method in partial discharge measurement: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(1): 42-51.
- [26] 吴诗优, 郑书生, 钟爱旭, 等. 基于智能聚类算法的 UHF 法变电站空间多源局部放电定位方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4309-4318.
- WU Shiyou, ZHENG Shusheng, ZHONG Aixu, et al. Location method of multiple partial discharges sources in substation space by UHF method based on intelligent clustering algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4309-4318.
- [27] 周 凯, 饶显杰, 汪先进, 等. 基于距离的互相关算法在电力电缆局部放电定位中的应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2946-2954.
- ZHOU Kai, RAO Xianjie, WANG Xianjin, et al. Application of distance-based cross-correlation algorithm in partial discharge location of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2946-2954.
- [28] 齐 波, 张 鹏, 张书琦, 等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1522-1538.
- QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1522-1538.



DONG Bingbing
Ph.D.

Associate professor



XU Yuan
Ph.D., Professor
Corresponding author

董冰冰

1987—, 男, 博士, 副研究员, 硕导

主要从事电力设备在线监测与故障诊断、GIS 放电理论与试验研究

E-mail: bndong@126.com

许 渊(通信作者)

1981—, 男, 博士, 教高

研究方向为输变电设备状态检测与故障诊断技术

E-mail: xuyuan@epri.sgcc.com.cn

收稿日期 2022-05-30 修回日期 2022-09-14 编辑 卫李静