

超高压GIS设备局部放电信号特征提取与故障定位技术优化

王 涛

上海昌鹭智能技术有限公司 上海 201613

摘 要：本文探讨了超高压GIS设备局部放电信号特征提取与故障定位技术的优化策略，概述了GIS设备的结构和局部放电的机理，分析了当前局部放电信号特征提取和故障定位存在的难题，针对这些问题，文章提出了基于改进小波包变换的信号去噪、多维度特征提取体系等解决方案。这些优化策略提升了特征提取的准确性和故障定位的精度，为超高压GIS设备的状态监测与故障诊断提供了有效技术支持。

关键词：超高压GIS设备；局部放电信号；故障定位技术

1 超高压 GIS 设备局部放电理论基础

1.1 GIS设备概述

气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）是将断路器、隔离开关、互感器等电力设备集成于金属封闭外壳内，充以SF₆绝缘气体的高压配电装置。超高压GIS设备（电压等级 $\geq 500\text{kV}$ ）凭借占地面积小、受环境影响小、维护工作量少等优势，成为特高压输电工程、城市电网核心枢纽的关键设备。其典型结构由母线室、断路器室、隔离开关室等组成，各腔体通过盆式绝缘子或套管分隔，SF₆气体的绝缘与灭弧性能直接决定设备运行可靠性。然而，生产制造中的工艺缺陷（如金属杂质残留）、安装过程中的操作不当（如绝缘子损伤）及长期运行中的老化降解，易引发局部放电，逐步侵蚀绝缘性能，最终可能导致设备击穿故障。

1.2 局部放电产生机理

局部放电是指GIS设备绝缘内部或表面局部区域发生的非贯穿性放电现象，其产生与绝缘缺陷类型密切相关。常见缺陷主要包括三类：一是自由金属颗粒，多源于制造或安装过程中残留的金属碎屑，在电场作用下悬浮并撞击绝缘表面，引发局部电场畸变而产生放电；二是绝缘内部气隙，SF₆气体中混入空气或绝缘材料内部存在气泡，气隙的介电常数低于周围介质，电场强度集中，当电场达到气隙击穿场强时发生放电；三是沿面放电，因绝缘子表面污秽、受潮或电场分布不均，导致放电沿绝缘子表面发展。从物理过程看，局部放电始于电子崩阶段，自由电子在强电场作用下加速运动，碰撞气体分子产生电离，形成电子崩；随着电子崩发展，空间电荷积累改变电场分布，进而形成流注放电，最终表现为脉冲式电信号与电磁辐射信号^[1]。

1.3 局部放电信号特征

超高压GIS设备局部放电信号具有丰富的时域、频域及时频域特征。在时域上，信号表现为一系列非周期性脉冲，脉冲幅值通常在mV级至V级，脉冲宽度为几十ns至几百ns，脉冲间隔具有随机性；不同缺陷类型的时域特征存在差异，如金属颗粒放电的脉冲幅值较大且间隔不均匀，而气隙放电的脉冲幅值相对稳定。在频域上，局部放电信号的频率分布范围较宽，涵盖几十kHz至数GHz，其中超高频（UHF，300MHz-3GHz）信号因抗干扰能力强、传播距离远的特点，成为主流检测对象；自由金属颗粒放电的频域能量集中在1GHz以下，而沿面放电的高频分量更丰富。在时频域上，通过小波变换等方法可观察到信号能量在不同时间和频率范围内的分布规律，如气隙放电的时频能量分布较集中，而金属颗粒放电的能量分布更分散，这些特征为缺陷类型识别提供了关键依据。

2 超高压 GIS 局部放电信号特征提取与故障定位的现存问题

2.1 局部放电信号特征提取的主要难题

2.1.1 强干扰下信号信噪比低

超高压GIS设备运行环境复杂，局部放电信号易受多种干扰影响，导致信噪比显著降低。干扰源主要包括两类：一是电力系统内部干扰，如断路器操作产生的暂态电磁干扰、变压器局部放电信号的交叉干扰、高压电缆的局部放电耦合等，这类干扰的频率与局部放电信号重叠，难以直接分离；二是外部环境干扰，如无线电广播、电视信号、工业设备产生的电磁辐射等，尤其是在变电站附近，干扰信号强度可能远超局部放电信号。

2.1.2 特征提取针对性不足

当前特征提取方法多采用单一维度特征或通用特征组合,缺乏针对超高压GIS设备不同缺陷类型的针对性设计。一方面,现有研究常选用峰值、脉冲宽度、频谱熵等通用特征,未充分考虑超高压场景下缺陷放电的特殊性,如SF₆气体压力变化对放电信号特征的影响;另一方面,对多缺陷共存场景的特征提取研究不足,当GIS设备同时存在金属颗粒与气隙缺陷时,两类信号特征相互叠加,传统特征难以区分各自的放电特性,导致缺陷识别准确率低于70%,无法满足工程应用需求^[2]。

2.1.3 信号去噪效果不佳

传统的滤波方法(如低通、高通滤波)仅能滤除特定频率范围的干扰,对与放电信号频率重叠的干扰效果有限;小波阈值去噪方法因阈值选取依赖经验,易出现“过去噪”或“欠去噪”问题——过去噪会丢失局部放电信号的细节特征,欠去噪则无法有效抑制干扰。例如,采用固定阈值的小波去噪方法处理某超高压GIS设备的局部放电信号时,对高频干扰的抑制率不足40%,去噪后信号的信噪比提升仅5-8dB,仍难以提取有效特征。

2.2 故障定位技术面临的挑战

超高压GIS设备的故障定位技术在实际应用中面临多重挑战,一是定位精度受信号传输特性影响显著,GIS设备的金属外壳与内部腔体形成复杂的电磁波传播环境,局部放电产生的UHF信号在传播过程中会发生反射、折射与衰减,导致信号到达不同传感器的时间差计算误差增大,传统时差定位算法的定位误差可达1-2米,无法满足设备内部缺陷的精准定位需求。二是多缺陷定位能力不足,当设备内存在多个缺陷同时放电时,不同缺陷的信号在时域和频域上相互耦合,传感器难以区分信号来源,导致定位结果出现混淆或漏判。三是动态缺陷定位响应滞后,自由金属颗粒等动态缺陷的放电位置随颗粒运动而变化,传统定位技术依赖静态信号采集,定位结果无法实时反映缺陷位置变化,响应延迟超过10秒,难以实现动态跟踪。

2.3 支撑体系存在的短板

局部放电信号特征提取与故障定位的支撑体系尚未完善,制约技术落地应用。在硬件支撑方面,现有UHF传感器的灵敏度与一致性不足,不同厂家生产的传感器在相同放电条件下的信号采集差异可达20%以上,影响特征提取的稳定性;同时,高速数据采集卡的采样率(通常为1-2GS/s)难以满足超高压GIS设备高频放电信号的采集需求,导致信号细节丢失。在软件与标准方面,缺乏统一的数据处理与特征定义标准,不同研究团队的特征提取算法与定位模型难以兼容;此外,数据分析软件的

智能化程度较低,需人工干预调整参数,无法实现全自动特征提取与定位分析。

3 超高压GIS局部放电信号特征提取技术优化

3.1 基于改进小波包变换的信号去噪优化

针对传统去噪方法的不足,提出基于改进小波包变换的去噪优化方案。首先,选取db8小波作为基函数,对局部放电信号进行5层小波包分解,将信号分解至不同频率子带,实现干扰与有效信号的初步分离。其次,改进阈值函数设计,采用基于信号方差的自适应阈值替代固定阈值,阈值计算公式为: $\lambda = \sigma \sqrt{(2 \ln N)}$,其中 σ 为噪声标准差,N为信号长度;同时,将硬阈值函数与软阈值函数结合,构建混合阈值函数,当分解系数绝对值大于 λ 时,采用硬阈值处理(保留系数原值),小于 λ 时采用软阈值处理(系数收缩至零),既避免硬阈值的振荡问题,又减少软阈值的信号失真^[3]。最后,通过能量熵判据筛选有效子带,计算各子带的能量熵,保留能量熵大于阈值的子带(对应有效信号),剔除低能量熵子带(对应干扰),再进行小波包重构。仿真实验表明,该方法对超高压GIS设备局部放电信号的去噪效果显著,信噪比提升可达15-20dB,干扰抑制率超过85%,且能有效保留信号的脉冲特征。

3.2 多维度特征提取体系构建

构建涵盖时域、频域、时频域及非线性特征的多维度提取体系,提升特征针对性。在时域特征方面,除传统的峰值、脉冲宽度外,新增脉冲上升时间、脉冲间隔标准差等特征,反映超高压放电的脉冲形态差异;在频域特征上,引入中心频率偏移量、频带能量占比等特征,量化不同缺陷信号的频率分布差异,如沿面放电在1.5-2GHz频带的能量占比超过40%,而金属颗粒放电在该频带的占比不足20%。在时频域特征中,采用小波包能量熵、希尔伯特黄变换边缘谱峰值等特征,捕捉信号能量的时频分布规律。另外,增加非线性特征(如关联维数、Lyapunov指数),反映局部放电的混沌特性,区分多缺陷耦合信号。通过主成分分析(PCA)对多维度特征进行降维,剔除冗余特征,保留贡献率前80%的主成分,构建精简且有效的特征向量。

3.3 融合多源信号的特征融合方法

为进一步提升特征提取的可靠性,提出融合UHF信号与超声波信号的多源特征融合方法。首先,同步采集超高压GIS设备的UHF信号(反映放电的电磁辐射)与超声波信号(反映放电的机械振动),通过时间戳实现两类信号的时空对准。其次,分别对UHF信号与超声波信号进行多维度特征提取,得到UHF特征子集与超声波特

征子集。然后,采用D-S证据理论进行特征融合,将两类特征子集作为证据体,计算各证据体的基本概率分配函数,通过证据合成规则融合概率分布,得到最终的融合特征向量。该方法充分利用两类信号的互补性——UHF信号对金属颗粒等放电敏感,超声波信号对气隙放电响应更明显,可有效提升复杂场景下的特征辨识度。

4 超高压 GIS 局部放电故障定位技术优化

4.1 基于时差校正的多传感器定位算法优化

针对传统时差定位算法精度不足的问题,提出基于时差校正的多传感器优化方案。优化传感器布局,采用“正四面体”布局方式在GIS设备外壳安装4个UHF传感器,确保传感器对设备内部各区域的信号覆盖无死角,同时通过校准实验获取各传感器的时间延迟参数,消除硬件差异导致的时差误差;改进时差提取方法,将互相关分析与小波变换结合,对去噪后的信号进行小波变换,选取模极大值点所在的尺度进行互相关计算,精确提取信号到达不同传感器的时间差(TOA),时差提取误差控制在1ns以内;引入信号衰减校正因子,根据SF₆气体压力、温度及设备结构参数,建立信号衰减模型,对不同路径的信号幅值进行校正,通过幅值加权优化定位方程求解,提升定位精度。仿真与现场测试表明,该算法的定位误差可缩小至0.3-0.5米,较传统算法精度提升60%以上。

4.2 多缺陷定位技术优化

为解决多缺陷定位混淆问题,提出基于信号分离与聚类分析的优化方法。采用盲源分离技术(如独立成分分析ICA)对多缺陷耦合信号进行分离,根据不同缺陷放电信号的统计独立性,将混合信号分解为多个独立的源信号,每个源信号对应单一缺陷的放电特征;对分离后的源信号进行多维度特征提取,得到各源信号的特征向量,通过K-means聚类算法对特征向量进行聚类分析,根据聚类结果区分不同缺陷类型;结合优化后的时差定位算法,分别对各源信号进行定位计算,得到每个缺陷的具体位置。在含金属颗粒与气隙双缺陷的GIS模拟平台测

试中,该方法可成功分离两类缺陷信号,定位准确率超过88%,有效解决了多缺陷定位混淆问题^[4]。

4.3 在线定位系统架构优化

构建“感知-传输-分析-预警”一体化的在线定位系统架构。在感知层,采用高灵敏度UHF传感器与10GS/s高速数据采集卡,实现放电信号的实时、高精度采集;同时集成温湿度、SF₆气体压力等环境传感器,为信号分析提供环境参数支撑。在传输层,采用5G+工业以太网的混合传输模式,确保海量数据的高速、可靠传输,传输时延控制在50ms以内。在分析层,搭建基于边缘计算的本地化分析节点,实现特征提取与定位计算的实时处理,同时通过云端平台实现多设备数据的汇总分析与模型迭代优化。在应用层,开发可视化监控界面,实时显示缺陷位置、类型及严重程度,并设置多级预警阈值,当缺陷放电强度超过阈值时,自动触发声光预警与短信通知。

结束语

随着超高压GIS设备在电力系统中的广泛应用,对局部放电信号特征提取与故障定位技术的优化研究显得尤为重要。本文提出的优化策略,不仅提高了局部放电信号的抗干扰能力和特征提取的针对性,还显著提升了故障定位的精度和实时性。未来,应继续深入研究局部放电的复杂机理,探索更加智能、高效的特征提取与故障定位方法,以进一步保障电力系统的安全稳定运行。

参考文献

- [1]高海峰.基于特征提取的电力GIS设备局部放电状态检测方法[J].电气技术与经济,2025,(04):201-204.
- [2]张强,郭斌,刁文正.基于特高频信号特征提取的GIS局部放电定位研究[J].电器工业,2025,(04):64-67.
- [3]漆苗.GIS局部放电的超高频在线监测系统设计与验证[J].光源与照明,2024,(09):180-182.
- [4]刘秀婷,李焱,高峰,等.高压电缆局部放电检测及识别系统研究[J].电子测量技术,2024,47(17):97-107.