

高压开关柜局部放电在线监测技术应用研究

姜勇民

(辽宁石化职业技术学院, 辽宁 锦州 121000)

摘 要 面向金属封闭高压开关柜内电磁屏蔽强、空间受限与噪声复杂的运行环境, 本文构建了超高频与超声一体化的局部放电在线监测技术体系, 形成传感器、采集与通信电源分层的硬件架构, 配套 FPGA 与 ARM 异构处理、PTP 对时与 IEC 61850 接入的软件链路, 并以小波多尺度去噪、相位对齐与多指标融合实现事件识别与定位。实验室舱体试验采用电晕与沿面缺陷模型和标准脉冲校准, 验证最小可检出放电量不高于 10 pC, 超高频对隐蔽缺陷更敏感, 超声对沿面活动更具响应。现场在某变电站 24 面柜体连续运行三个月, 数据传输成功率保持在 99% 以上, 分级预警准确率约 96%, 融合判据能有效抑制门禁与风机等机械噪声误触发, 并对电缆终端与母线室的弱放电实现稳定捕获与粗定位。结果表明, 本文所提方案兼顾早期缺陷发现、抗干扰与工程可实施性, 可为开关柜状态运维提供可量化支撑。

关键词 高压开关柜; 局部放电在线监测; 超高频; 超声; 多源融合

中图分类号: TM835

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.003

0 引言

局部放电是高压绝缘老化与失效的早期表征之一, 金属封闭开关柜长期承受电应力、热循环与振动, 受导电颗粒、尖端毛刺、表面潮湿污染及场畸变影响, 更易出现隐匿性放电活动。一旦持续发展, 将引发绝缘劣化、臭氧与局部热积累, 最终可能演化为相间短路事件。因此, 面向运行状态的在线监测与早期预警具有显著工程意义。然而, 封闭柜体构成屏蔽腔体, 工频与无线电干扰并存, 机械噪声与空间布局不规则, 使单一通道与单一判据的方法在灵敏度、抗扰性与定位能力上存在不足。超高频方法可在电磁域捕获放电脉冲, 超声方法可在声学域体现沿面与表面电晕特征, 将二者在硬件、时钟与算法层面深度融合, 有望在保证安装可行与运维便利的前提下, 提升缺陷覆盖范围与定位精度。基于此, 本文围绕多源传感、异构采集、同步对时与特征融合, 提出面向开关柜的在线监测系统, 并在实验室与现场开展效果验证, 以期为开关柜状态检修与数字化运维提供方法与实践参考。

1 高压开关柜局部放电在线监测的技术原理

金属封闭高压开关柜长期承受电应力、热循环与振动的影响, 局部放电被界定为绝缘在未完全击穿条件下发生于局部的微放电。其主要缘由囊括导体尖端

与毛刺、导电颗粒游移、固体绝缘微孔及表面潮湿污染, 触头接触不良与场畸变亦会诱发活动。持续放电会把绝缘碳化并产生臭氧与局部热, 进而降低介质耐受并诱发相间短路风险^[1]。围绕该机理, 在线监测以捕获放电伴生的电磁与声学信息为核心。UHF 法把瞬态电流视作激发源, 金属柜体构成屏蔽腔体, 天线或电场探头耦合获取 300 MHz ~ 3 GHz 脉冲, 凭借包络能量、脉冲计数与到达时间来开展识别与定位, 抗工频与广播干扰能力较强, 适宜封闭母线室与断路器室, 安装多采用电磁窗或电容耦合端口。超声波法把气隙崩裂与介质微振动产生的声波作为目标, 传感器对 20 ~ 300 kHz 更敏感, 可选接触式压电或空气耦合布置, 依据幅频特征与多点到达差进行定位, 对表面电晕与沿面放电响应更灵敏, 但易受机械噪声与路径遮挡影响。从集成应用角度看, UHF 利于隐蔽缺陷早期发现, 超声便于运维通道内快速筛查, 二者融合能同步提升检测覆盖与定位精度。

2 高压开关柜局部放电在线监测系统的构建

2.1 监测系统的硬件架构设计

封闭金属开关柜的强电磁与空间受限场景需求下, 硬件被划分为传感器模块、数据采集模块、通信模块以及电源模块, 构成近端敏感、前端抗扰、后端联接

作者简介: 姜勇民 (1977-), 男, 本科, 实验师, 研究方向: 电气供电。

的分层架构。传感器模块含超高频与超声两类：超高频选用电磁窗或缝隙耦合探头，带宽 300 MHz ~ 1.5 GHz，在探头端集成 20 dB 低噪放与限幅，把 50 Ω 同轴短引至采集前端，单柜在母线室与断路器室各布 1 点至 2 点；超声采用压电接触与空气耦合组合，灵敏带宽 20 ~ 300 kHz，配套差分前置与屏蔽双绞线，安装贴近电缆终端与门板内侧。数据采集模块在射频侧设置包络与到达时间双路径：包络路径由带通、检波与 14 bit 125 MS/s 模数转换构成，用于能量与计数提取，到达时间路径采用高速比较器与 100 ps 量化精度时间数字转换进行多探头时差测量；超声侧配置 16 bit 500 kS/s 通道，前置含可编程增益与抗混滤波。底层处理选用 FPGA 与 ARM 异构系统，完成多通道同步与特征提取，时钟由温补晶振与 PTP 定时维持。通信模块提供千兆以太网与光纤环网，站内支持 IEC 61850 MMS 与 Modbus TCP，另设蜂窝链路用于远程维护，接口采用光电隔离与浪涌抑制。电源模块把站用 DC 220 V 隔离降压至 24 V，再级联 12 V 与 5 V，加入 EMI 滤波、TVS 与 SPD，配备 24 V 7 Ah 后备电池或超级电容维持掉电缓冲，机箱按 IP54 防护并单点接地。为降低串扰，把射频同轴与超声线缆分层布线并远离功率走线，模块连接在架构上形成闭环。

2.2 监测系统的软件功能实现

围绕异构硬件，软件系统被组织为实时采集、信号分析、异常报警与历史查询四层^[2]。实时采集层在 ARM 侧配置 DMA 与环形缓冲，把 UHF 包络、到达时间和超声波形聚合成一帧，时戳由 PTP 与本地时钟提供；驱动完成通道枚举与增益整定，以状态机对溢出、丢包和传感器开路进行自检与恢复。信号分析层由 FPGA 完成脉冲触发与粗筛，ARM 完成去噪、特征与融合：对 UHF 进行噪声门控与脉冲簇聚类，给出幅值、计数与脉宽并构建相位分辨局放图谱；对超声进行自适应增益与短时谱分析，提取幅频包络与到达时间差，借助多探头时差完成柜内粗定位，并把两类信息对齐后输出统一事件，同时设置广播频带抑制与机械噪声指纹比对以剔除非电气脉冲。异常报警层基于能量、重复率、相位分布与定位一致性形成多指标判据，阈值由设备基线与工况字典给定，分为提示、关注与告警三级，采用时间窗确认与抑制抖动策略，报警经 IEC 61850 MMS 与 Syslog 送至站控。历史查询层以时序库存储原始波形、特征与事件索引，建立站点—间隔—柜—传感器模型，提供按时间、柜号与级别的检索与 PRPD 回放，

同时选用分层压缩与按需回传并实施细粒度权限与审计，对外开放 MMS 与 REST 接口服务资产系统取数。

2.3 监测数据的预处理方法

鉴于金属封闭柜体内电磁耦合与机械噪声并存，预处理把原始通道数据进行去噪、干扰抑制、幅值与时基校准以及相位对齐，以支撑后续融合识别。UHF 通道先实施 300 MHz 至 1.5 GHz 带限并进行广播窄带抑制，超声通道选用 30 kHz 至 150 kHz 带限与自适应增益，再对两类数据开展基线漂移校正与饱和段剔除。核心去噪环节运用离散小波变换进行多尺度分解，结合中位绝对偏差估计噪声强度并对细节系数实施软阈值压缩，以在保留脉冲上升沿的同时抑制连续干扰。

$$c_{j,k} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] \frac{1}{\sqrt{2j}} \psi\left(\frac{n-2jk}{2j}\right) \quad (1)$$

式(1)中， $c_{j,k}$ 为尺度 j 与平移 k 下的小波系数， j 为分解层级， k 为离散平移索引， $x[n]$ 表示离散时间序列， $\psi(\frac{n-2jk}{2j})$ 为母小波函数， n 为采样点索引。

重构信号在脉冲簇附近获得较高信噪比，事件门控与相位标注因此得以稳定开展^[3]。预处理再把各通道时间标记与工频相位对齐，依靠 PTP 授时与相量参考把脉冲映射至 0 ~ 360 度区间，并以分位数阈值形成自适应触发。特征提取围绕时域与频域双线索展开，时域侧计算峰值、脉宽、上升沿时长、脉冲能量、计数以及相位分布集中度，频域侧给出谱质心、有效带宽、谱峭度与分段能量占比，同时在超声通道依据短时傅里叶变换获得时间频率包络。最终把多通道特征以稳健 z 分数完成归一化并进行异常点抑制，生成面向融合判据的特征向量。

3 高压开关柜局部放电在线监测技术的应用效果评估

3.1 实验室模拟环境下的效果验证

在线监测需在可控电磁环境中对灵敏度以及类型区分能力进行量化评估，本研究把金属封闭舱体搭建为被测场景，舱体内部布置母线室与断路器室等等效腔室，并把超高频电磁窗探头以及压电接触与空气耦合超声传感器要固定在腔壁与电缆终端附近^[4]。高压源选用 50 Hz 工频交流，输出范围覆盖 0 ~ 30 kV，用于可重复条件下激发不同缺陷模型。电晕工况把不锈钢针板电极作为放电体，针尖半径约 20 μm ，间隙约 10 mm；沿面工况把环氧板作为介质基体，尺寸约 200 mm × 200 mm × 10 mm，表面均匀铺设导电污染层并维持稳定

湿膜，以形成可控的沿面放电通道。依靠步进升压与稳态保持来控制放电活性区间，把 UHF 包络、到达时间以及超声时频帧在统一时戳下进行采集，噪声门控、广播频带抑制以及机械噪声指纹比对在采集过程中保持开启。为对比电晕与沿面两类放电的响应差异，分析流程把 UH 脉冲计数、脉宽与相位分布集中度作为主判据，同时把超声谱质心、有效带宽以及分段能量占比纳入交叉验证，进而形成针对相位分辨图谱的识别框架。需重点关注的是，灵敏度校核采用标准脉冲校准器经由 50 pF 耦合支路注入等效电荷，分级设置 5 pC 以及 10 pC 级别，凭借事件门限、PRPD 簇稳定性以及多通道一致性作为通过判据，把最小可检测放电量不高于 10 pC 的目标转化为可检验的过程性要求。为评估抗扰场景适配性，在空载条件下引入舱体风机与继电器吸合等机械扰动，借助抖动抑制与时间窗确认对误触发进行审查，从而把系统在非电气脉冲背景下的触发稳定性纳入方法学验证范围。

3.2 现场实际应用中的效果分析

从园区的高负荷运行实际需求出发，本研究把某地江北新区高新变电站 10 kV 金属封闭开关柜作为应

用对象，覆盖母线、断路器与电缆出线共 24 面柜体，连续监测 3 个月^[5]。系统在站内以 IEC 61850 MMS 接入站控，采集 UHF 包络、到达时间与超声波形，依靠 PTP 授时完成相位对齐，并把分级告警上送。进一步观察发现，梅雨时段空气湿度升高使沿面活动更活跃，超声谱质心轻微上移，而 UHF 脉冲簇统计特性保持稳定，数据传输成功率维持在 99% 以上。需重点关注的是，融合判据把能量、重复率与定位一致性纳入联合约束后，对电缆终端与母线室内的弱电晕和沿面放电呈现更高敏感度，误触发主要来源于门禁闭合与风机启停的机械噪声，被时间窗确认与噪声指纹库有效抑制。从运维处置链条来看，预警准确率保持在 95% 以上，事件多集中于两处馈线间隔的电缆室，工单闭环把潮湿污染与接地不良作为主导风险。为便于复核，站端时序库按站点一间隔一柜一传感器组织索引，支撑 PRPD 图谱回溯与定位过程，关键统计见表 1。

4 结束语

本文提出了面向高压开关柜的超高频与超声融合在线监测方案，实现了传感器选型与布点、双路径采集、异构处理、时钟对齐与标准化通信的完整工程，

表 1 现场应用中局部放电监测数据统计

月份	监测 时长 h	数据传输 成功率 %	UHF 事件 计数	超声事件 计数	触发事件 总数	产生预警 条数	现场复核 确认条数	预警准确 率 %	误报 条数	最小等效 放电量 pC
2025-03	744	99.4	1 850	420	2 270	58	56	96.6	2	10
2025-04	720	99.2	2 120	560	2 620	71	68	95.8	3	10
2025-05	744	99.6	1 985	495	2 430	63	61	96.8	2	10

构建以小波多尺度去噪、噪声门控、相位分辨图谱与多指标融合的识别链条。实验室验证表明，系统在等效舱体内对电晕与沿面缺陷均保持稳定响应，最小可检出放电量不高于 10 pC，能够满足早期缺陷发现需求。现场三个月连续运行显示，数据链路稳定可靠，传输成功率超过 99%，融合判据在抑制机械噪声误触发的同时，维持约 96% 的预警准确率，对电缆终端与母线室弱放电实现了可复核的事件定位与回溯。研究为开关柜状态感知、告警分级与工单闭环提供了工程化路径，同时也暴露出传感器布点对定位精度的影响、环境噪声时变性对阈值自适应的挑战与长期运行下基线漂移等问题。后续工作将针对更宽频带与更高密度布点进行优化。

参考文献:

- [1] 李宣宸. 基于超声波的高压开关柜局部放电状态智能监测方法 [J]. 云南电力, 2026(02):29-35.
- [2] 陈蓉. 高压开关柜绝缘故障在线监测与安全预警技术研究 [J]. 产业创新研究, 2025(14):132-134.
- [3] 赵贤文, 马有德, 张远鸿, 等. 高压开关柜局部放电在线监测系统的分析与研究 [J]. 机器人产业, 2023(06):83-87.
- [4] 李钊枢, 林宪峰, 余佳玺, 等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测系统 [J]. 微型电脑应用, 2023,39(11):43-47.
- [5] 张精杉. 基于 VMD-PSOChOA-ELM 算法的高压开关柜内局部放电检测与模式识别研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.