

6kV 开关柜局部放电检测方法比较

任海冬

浙江宁波长三角电力工程有限公司 浙江 宁波 315612

【摘要】：6kV开关柜作为电力系统配网环节的核心设备，其运行稳定性直接影响电网供电可靠性。局部放电是开关柜绝缘劣化的重要征兆，及时准确检测局部放电信号对预防设备故障具有关键意义。本文梳理了当前应用于6kV开关柜局部放电检测的主流方法，包括超声波检测法、特高频检测法、脉冲电流法、红外热成像法及超高频-超声波联合检测法。从检测原理、设备构成、技术特性、适用场景等方面对各方法进行系统分析，结合实际检测案例对比不同方法的检测灵敏度、抗干扰能力、操作难度及成本投入，最终提出不同应用场景下的检测方法选择建议，为6kV开关柜局部放电检测工作提供技术参考。

【关键词】：6kV开关柜；局部放电；检测方法；性能对比；应用选择

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.041

1 引言

局部放电检测是识别开关柜绝缘隐患的有效手段，通过捕捉放电过程中产生的电、声、热、光等信号，可实现对绝缘状态的精准评估。近年来，局部放电检测技术不断发展，各类检测方法层出不穷，但不同方法的检测原理、技术特性存在显著差异，适用场景也各有侧重。因此，系统对比分析主流检测方法的优劣，明确其适用范围，对提高6kV开关柜局部放电检测效率和准确性具有重要的现实意义。本文针对当前应用较广的几种检测方法展开深入对比研究，为检测人员选择合理的检测方案提供依据。

2 6kV开关柜局部放电主流检测方法

2.1 超声波检测法

2.1.1 检测原理

超声波检测法基于局部放电的声学特性实现检测。开关柜内部发生局部放电时，放电能量会使周围介质发生瞬时膨胀，产生机械冲击波，该冲击波以超声波的形式向四周传播，其频率范围通常在20kHz~200kHz。超声波检测法通过在开关柜外壳布置超声波传感器，捕捉放电产生的超声波信号，经信号放大、滤波及数据分析后，实现对局部放电的定位和强度评估。

2.1.2 设备构成

该方法的检测设备主要由超声波传感器、信号采集器、数据处理器及显示终端构成。传感器通常采用压电陶瓷材质，具备较高的灵敏度和频率响应范围，可直接吸附在开关柜金属外壳上，安装操作简便。检测过程中，传感器将超声波信号转换为电信号，经采集器放大和滤波处理，去除环境中的干扰信号，再由处理器对信号的峰值、幅值及频谱特征进行分析，最终以波形或数值形式在终端显示。

2.1.3 技术特性

超声波检测法的核心优势在于抗电磁干扰能力强，由于超声波信号与电网电磁信号属于不同类型的信号，不会受到电网

频率及周围电磁环境的干扰，适合在复杂电磁环境下开展检测。同时，该方法可实现对局部放电的精准定位，通过在开关柜不同位置布置多个传感器，结合信号到达各传感器的时间差，可确定放电点的具体位置。但该方法也存在明显不足，超声波在传播过程中会因介质衰减导致检测距离有限，通常有效检测距离不超过1m，对于柜体内部深处的放电信号可能无法有效捕捉；此外，开关柜外壳的密封性能、金属材质厚度也会影响超声波信号的传输，导致检测灵敏度下降。

2.2 特高频检测法

2.2.1 检测原理

特高频检测法利用局部放电产生的电磁辐射信号进行检测。局部放电本质是一种瞬时的电荷转移过程，会激发高频电磁脉冲，其频率范围通常在300MHz~3GHz，该频段的电磁信号被称为特高频信号。特高频检测法通过安装特高频天线或传感器，接收开关柜内部局部放电产生的特高频电磁信号，经信号调理、采集及分析，判断局部放电的存在及严重程度。

2.2.2 设备构成

检测设备主要包括特高频传感器、信号调理模块、数据采集卡及分析软件。传感器类型分为外置式和内置式，外置式传感器可安装在开关柜观察窗或外壳缝隙处，无需拆解设备，适用于在运开关柜的带电检测；内置式传感器则需在开关柜制造过程中预装在柜体内部，检测灵敏度更高，但对安装工艺要求较高。调理模块主要负责对传感器接收的微弱信号进行放大和滤波，去除环境中的杂波信号，采集卡则将模拟信号转换为数字信号，传输至计算机进行分析。

2.2.3 技术特性

特高频检测法的突出优势是检测灵敏度高，可捕捉到微弱的局部放电信号，适用于开关柜绝缘隐患的早期检测；同时，该方法的检测距离较远，外置式传感器的有效检测距离可达数米，可实现对多个开关柜的快速扫描检测。但该方法的抗电磁干扰能力较弱，周围环境中的无线电信号、雷达信号等高频电

磁信号会对检测结果产生干扰，导致误判；此外，开关柜外壳的金属材质会对特高频信号产生屏蔽作用，若柜体密封性能良好，外部传感器可能无法有效接收内部放电信号，影响检测效果。

2.3 脉冲电流法

2.3.1 检测原理

脉冲电流法是基于局部放电产生的电流脉冲信号进行检测的传统方法，其检测原理符合 IEC 60270 标准。当开关柜内部发生局部放电时，放电电流会通过设备外壳或接地线形成脉冲电流，该电流脉冲的幅值较小，通常在微安级至毫安级。脉冲电流法通过在开关柜接地线或中性线上串联电流传感器，采集放电产生的脉冲电流信号，经信号放大、积分及分析，获取局部放电的电荷量、脉冲频率等关键参数，进而评估绝缘状态。

2.3.2 设备构成

检测设备主要由电流传感器、前置放大器、积分器、数据采集系统及分析终端组成。电流传感器通常采用罗氏线圈或电流互感器，具备较高的电流灵敏度和带宽，可精准捕捉微弱的脉冲电流信号。前置放大器用于放大传感器输出的微弱信号，积分器则将电流脉冲信号转换为电压信号，便于后续采集和分析。分析终端通过对电压信号的波形、幅值及电荷量进行计算，生成局部放电检测报告。

2.3.3 技术特性

脉冲电流法的核心优势是检测精度高，可准确测量局部放电的电荷量，为绝缘劣化程度的定量评估提供可靠依据；同时，该方法的检测原理成熟，设备技术规范，广泛应用于开关柜的离线检测和出厂试验。但该方法的局限性也较为明显，检测过程中需要断开开关柜的接地线或中性线，串联传感器，无法实现带电检测，影响设备的正常运行；此外，该方法对电磁干扰较为敏感，电网中的谐波电流、周围设备的启停电流等都会干扰检测信号，导致检测结果出现偏差。

2.4 红外热成像法

2.4.1 检测原理

红外热成像法基于局部放电的热效应实现检测。局部放电过程中会释放一定的热量，导致放电点周围的温度升高，形成局部热点。红外热成像法通过红外热像仪捕捉开关柜表面的红外辐射信号，将其转换为温度图像，通过分析图像中的热点分布及温度差值，判断局部放电的存在及位置。

2.4.2 设备构成

检测设备主要为红外热像仪，根据检测需求可分为便携式和在线式两类。便携式热像仪适用于现场巡检，操作灵活，可对多个开关柜进行快速检测；在线式热像仪则固定安装在开关柜周围，实时监测柜体表面温度变化，便于及时发现突发的局

部放电故障。热像仪的核心参数包括温度分辨率、空间分辨率及帧频，温度分辨率越高，越能捕捉到微小的温度变化，检测灵敏度越高。

2.4.3 技术特性

红外热成像法的优势在于检测范围广，可实现对开关柜整体的快速扫描，无需逐点检测，提高检测效率；同时，该方法为非接触式检测，无需接触开关柜外壳，安全性高，适用于高电压环境下的检测。但该方法的检测灵敏度较低，只有当局部放电强度较大、释放的热量足够多时，才能在柜体表面形成可识别的热点；此外，环境温度、柜体表面的灰尘覆盖、阳光照射等因素都会影响温度检测的准确性，导致热点识别困难。

2.5 超高频-超声波联合检测法

2.5.1 检测原理

超高频-超声波联合检测法结合了特高频检测法和超声波检测法的技术优势，通过同时采集局部放电产生的特高频电磁信号和超声波信号，实现对局部放电的协同检测和综合分析。该方法利用两种信号的互补性，有效弥补单一检测方法的不足，提高检测的准确性和可靠性。

2.5.2 设备构成

检测设备由特高频传感器、超声波传感器、信号同步采集模块、数据处理器及分析软件组成。检测过程中，特高频传感器和超声波传感器同时布置在开关柜的相应位置，同步采集放电信号，采集模块实现两种信号的同步触发和数据采集，避免信号时间差导致的分析误差。处理器对两种信号的特征参数进行联合分析，通过判断两种信号的关联性，排除环境中的干扰信号，提高局部放电识别的准确率。

2.5.3 技术特性

超高频-超声波联合检测法的优势在于抗干扰能力强，通过两种信号的协同验证，可有效区分局部放电信号和干扰信号，降低误判率；同时，该方法的检测灵敏度和定位精度都优于单一检测方法，可实现对微弱局部放电信号的精准捕捉和定位。但该方法的设备成本较高，需要同时配备特高频和超声波检测设备，且检测过程中需要同步布置两种传感器，操作难度较大，适用于对重要区域的开关柜进行精准检测。3 6kV 开关柜局部放电检测方法核心特性对比

为更清晰地展示各检测方法的差异，从检测原理、灵敏度、抗干扰能力、检测方式、定位精度、设备成本、操作难度及适用场景等核心特性进行对比，具体内容如表 1 所示。

表 1 开关柜局部放电检测方法核心特性对比

检测方法	超声波检测法	特高频检测法	脉冲电流法	红外热成像法	超高频-超声波联合检测法
------	--------	--------	-------	--------	--------------

检测原理	捕捉放电产生的超声波信号	接收放电产生的特高频电磁信号	采集放电产生的脉冲电流信号	捕捉放电产生的热点红外信号	同步采集特高频和超声波信号	检修, 无需考虑设备带电运行, 可选择脉冲电流法, 通过定量测量局部放电电荷量, 评估设备绝缘质量。
灵敏度	中等	高	高	低	很高	
抗干扰能力	强(抗电磁干扰)	弱(易受高 频电磁干 扰)	中等(易受电 磁干扰)	强(抗电 磁干扰)	很强	
检测方式	非接触式、带电检测	非接触式、 带电检测	接触式、 离线检测	非接触式、 带电检测	非接触式、 带电检测	
定位精度	高	中等	低	中等	很高	
设备成本	低	中等	中等	中等	高	
操作难度	低	低	高	低	中等	

注: 表中“灵敏度”“抗干扰能力”“定位精度”“设备成本”“操作难度”均为相对对比结果, 基于 6kV 开关柜检测场景的实际应用情况评估。

4 检测方法选择策略及应用案例

4.1 检测方法选择策略

结合各检测方法的核心特性, 在实际检测工作中, 应根据检测目的、设备运行状态、环境条件及成本预算等因素, 合理选择检测方法或组合方案。若以开关柜日常巡检、快速排查明显故障为目的, 且现场电磁环境复杂, 可优先选择超声波检测法或红外热成像法。超声波检测法可精准定位放电点, 红外热成像法可实现整体快速扫描, 两者结合可提高巡检效率。若需早期发现绝缘隐患, 实现绝缘状态的精准评估, 可选择特高频检测法, 对于重要区域的开关柜, 建议采用超高频-超声波联合检测法, 确保检测结果的准确性。若为开关柜出厂试验或离线

4.2 应用案例分析

某工业园区 10kV 配电站内有多台 6kV 开关柜, 运行年限超过 8 年, 近期出现多次跳闸故障, 怀疑存在局部放电隐患。为明确故障原因, 采用多种检测方法进行联合检测。

首先采用红外热成像法对所有开关柜进行整体巡检, 发现 3 号开关柜柜顶存在明显热点, 温度较周围区域高出 8℃。随后采用超声波检测法对 3 号开关柜进行精准定位, 在开关柜正面中部位置检测到强烈的超声波信号, 幅值达到 80dB, 初步判断该位置存在局部放电。为进一步确认放电强度及绝缘劣化程度, 采用特高频检测法进行补充检测, 在该位置接收到明显的特高频信号, 信号幅值为 500mV, 结合超声波信号的关联性, 排除干扰信号影响。最后在设备离线检修时, 采用脉冲电流法对 3 号开关柜进行定量检测, 测得局部放电电荷量为 800pC, 远超标准阈值 (300pC), 确认该开关柜绝缘严重劣化。

对 3 号开关柜进行拆解检查, 发现内部母线接头处绝缘老化破损, 存在放电痕迹。更换绝缘部件后, 再次采用脉冲电流法检测, 局部放电电荷量降至 50pC, 符合运行标准, 设备恢复正常运行。该案例表明, 多种检测方法的联合应用可实现对局部放电隐患的精准识别和定位, 为设备检修提供可靠依据。

5 结论

本文对 6kV 开关柜局部放电检测的主流方法进行了系统对比分析, 得出以下结论: 超声波检测法抗电磁干扰能力强、定位精度高, 适用于现场带电巡检和放电点定位; 特高频检测法灵敏度高, 适合早期绝缘隐患检测; 脉冲电流法检测精度高, 可定量评估绝缘状态, 适用于离线检测和出厂试验; 红外热成像法检测范围广、操作简便, 适用于整体快速巡检; 超高频-超声波联合检测法综合性能最优, 抗干扰能力和检测精度均表现突出, 适用于重要区域设备的精准检测。在实际应用中, 单一检测方法难以满足所有场景的检测需求, 应根据检测目的、设备状态及环境条件, 选择合适的检测方法或组合方案, 以提高检测效率和准确性。

参考文献:

- [1] 卓凌荣,邵振华.基于 SE-ResNet 的开关柜局部放电模式识别方法研究[J].电工材料,2025,(06):27-35.
- [2] 宫成,李亦非,李天乐,等.基于改进 DQ-BETR 的多源局部放电类型识别方法[J].科学技术与工程,2025,25(34):14731-14741.
- [3] 龚罗文,谭力,周彦军.35 kV 充气式开关柜缺陷分析及定位[J].农村电工,2025,33(12):43-44.
- [4] 毛兴华,邹学伟,江明杰.一起开关柜二次线脱落致局部放电异常分析与处理[J].农村电工,2025,33(12):54-55.
- [5] 勇天泽,张沼源,苏亮,等.超高压开关设备局部放电故障检测及处理技术[J].电力设备管理,2025,(21):4-6.