

10kV开关柜局部放电带电调试技术研究

钮玉锋 杨新良

嘉兴市恒光电力建设有限责任公司南湖分公司 浙江 嘉兴 314033

摘要：本文聚焦10kV开关柜局部放电带电调试技术。先剖析局部放电机理、信号特性及带电调试干扰因素，阐述多传感器融合检测、信号处理与特征提取、带电调试流程设计等关键技术。针对抗干扰、缺陷定位精度、安全性保障及数据标准化等关键问题提出解决方案。最后展望未来技术升级、标准化建设及在新能源场景的适应性研究方向，为10kV开关柜安全稳定运行提供技术支撑。

关键词：10kV开关柜；局部放电；带电调试

引言：10kV开关柜作为电力系统关键设备，其运行稳定性至关重要。局部放电是影响开关柜绝缘性能、引发设备故障的重要因素。带电调试技术能在不中断供电的情况下检测局部放电，及时发现潜在缺陷，避免事故发生。然而，该技术面临干扰因素多、缺陷定位难等问题。深入研究10kV开关柜局部放电带电调试技术，对保障电力系统安全运行、提升供电可靠性具有重要现实意义。

1 10kV 开关柜局部放电机理与特征分析

1.1 局部放电产生机理

10kV开关柜局部放电是绝缘介质在电场作用下，局部区域发生的非贯穿性放电现象，其产生核心是绝缘系统存在缺陷或电场分布不均。开关柜内部绝缘部件（如绝缘子、电缆终端、母线接头）若存在气隙、杂质、老化破损等问题，会导致局部电场强度超过介质击穿场强，引发电子雪崩效应，进而产生局部放电。具体而言，气隙类缺陷中，气体绝缘强度低于固体介质，电场集中时先发生放电；沿面缺陷会因表面脏污、潮湿导致电场畸变，引发沿面放电；电树枝缺陷则由长期电场作用下绝缘内部电荷积累、分子链断裂形成，逐步发展为局部放电^[1]。局部放电的产生还与电压等级、环境温湿度、绝缘材料性能密切相关，其本质是电能的局部释放过程，长期存在会加速绝缘老化，最终可能导致开关柜绝缘击穿，引发设备故障。

1.2 局部放电信号特性

10kV开关柜局部放电信号具有明确的时域、频域及相位特性，是识别放电类型、判断缺陷程度的核心依据。时域上，局部放电信号呈现脉冲性，单次放电持续时间极短（通常为纳秒至微秒级），脉冲幅值与缺陷类型、严重程度正相关，气隙放电脉冲幅值较小且分布均匀，电树枝放电脉冲幅值随老化程度逐渐增大。频域

上，放电信号包含宽频分量，主要分布在几十kHz至数MHz之间，不同缺陷类型的信号频谱存在差异，气隙放电以低频分量为主，沿面放电高频分量更丰富。相位特性上，局部放电信号与外加电压相位密切相关，呈现明显的相位分布规律，正常绝缘无放电信号，不同缺陷的放电相位谱具有独特特征，如气隙放电多集中在电压峰值附近，沿面放电则在相位0°、180°附近更为明显，这些特性为后续信号检测与缺陷识别提供了重要支撑。

1.3 带电调试的干扰因素

10kV开关柜带电调试过程中，干扰信号会严重影响局部放电检测的准确性，主要分为内部干扰和外部干扰两类。内部干扰源于开关柜自身及关联设备，包括设备内部电磁耦合、接触不良产生的电晕放电、金属部件振动引发的虚假脉冲，以及绝缘材料热噪声等，其中电晕放电干扰与局部放电信号频率接近，易造成误判。外部干扰主要来自周围环境，如高压线路电晕、附近设备启停产生的电磁辐射、电网谐波、接地不良引发的电位差干扰，以及测试线缆接触不良、仪器自身噪声等。另外，现场温湿度、灰尘、电磁屏蔽效果不佳等因素，也会加剧干扰影响。这些干扰信号会掩盖真实的局部放电信号，导致检测数据失真，影响缺陷判断的准确性，因此抗干扰是带电调试过程中必须解决的关键问题。

2 带电调试技术原理与方法

2.1 多传感器融合检测技术

10kV开关柜带电调试中，多传感器融合检测技术通过整合多种传感器的检测优势，提升局部放电检测的准确性和可靠性，其核心原理是利用不同传感器对放电信号的响应差异，实现互补检测。常用传感器包括超声波传感器、特高频传感器、暂态地电压传感器及高频电流传感器。超声波传感器检测局部放电产生的机械波信号，可定位放电位置；特高频传感器捕捉放电产生的特

高频电磁信号,灵敏度高,能识别微弱放电;暂态地电压传感器检测放电引发的地电位变化,安装便捷,适合现场带电检测;高频电流传感器通过检测接地线上的高频电流信号,反映放电强度^[2]。通过数据融合算法,对各传感器检测到的信号进行筛选、校准和融合,剔除干扰信号,提取真实放电特征,有效解决单一传感器检测的局限性,提高缺陷识别的准确率和定位精度。

2.2 信号处理与特征提取

局部放电信号处理与特征提取是带电调试的核心环节,目的是从复杂的干扰信号中分离出真实放电信号,并提取能反映缺陷类型和严重程度的特征参数。信号处理主要包括预处理、滤波、降噪三个步骤:预处理通过幅值阈值、脉冲宽度筛选,剔除明显的虚假脉冲;滤波采用数字滤波技术,过滤掉与放电信号频率无关的干扰分量,保留有效信号;降噪通过小波分析、傅里叶变换等算法,抑制噪声干扰,提升信号信噪比。特征提取则基于处理后的信号,提取时域(脉冲幅值、脉冲计数、放电时间间隔)、频域(特征频率、频谱峰值)及相位(放电相位分布、相位谱密度)特征参数,构建特征向量。这些特征参数能有效区分不同类型的局部放电缺陷,为后续缺陷评估和诊断提供数据支撑,确保带电调试结果的准确性。

2.3 带电调试流程设计

10kV开关柜带电调试流程需遵循“安全优先、分步实施、全面检测”的原则,确保调试过程安全、高效、准确,具体流程分为前期准备、现场检测、数据处理、缺陷诊断四个阶段。前期准备阶段,需检查调试仪器性能、校准传感器,确认开关柜运行状态,清理现场环境,做好安全防护措施。现场检测阶段,按照预设方案布置传感器,分别采用多传感器融合技术进行局部放电信号采集,记录检测数据、环境参数及设备运行参数,确保数据的完整性和规范性。数据处理阶段,对采集到的信号进行预处理、滤波、降噪及特征提取,剔除干扰数据,整理有效信息。缺陷诊断阶段,结合提取的特征参数、设备运行历史数据,对比标准阈值,判断是否存在局部放电缺陷,明确缺陷类型、严重程度及位置,形成调试报告,提出针对性处理建议,确保开关柜安全稳定运行。

3 带电调试关键问题与解决方案

3.1 抗干扰技术

针对10kV开关柜带电调试中的干扰问题,需采用“屏蔽、滤波、接地、信号分离”相结合的综合抗干扰技术,确保检测信号的真实性和完整性。电磁屏蔽方面,对调试

仪器、传感器及测试线缆进行屏蔽处理,采用屏蔽线缆减少外部电磁辐射干扰,将开关柜外壳可靠接地,形成等电位屏蔽,抑制内部电磁耦合干扰。滤波技术方面,采用自适应滤波、小波滤波等算法,根据干扰信号的频率特征,针对性过滤掉电网谐波、电晕干扰等无关分量,保留局部放电有效信号。接地处理方面,优化接地系统,确保传感器、调试仪器、开关柜接地良好,避免接地不良引发的电位差干扰。信号分离方面,利用多传感器融合算法,结合不同传感器的信号响应特性,分离真实放电信号与干扰信号,同时通过设置合理的阈值,剔除虚假脉冲,进一步提升抗干扰效果,保障调试数据的准确性。

3.2 缺陷定位精度提升

提升缺陷定位精度是10kV开关柜带电调试的关键目标,可通过优化定位算法、改进传感器布置及结合多源数据融合实现。定位算法方面,基于超声波传感器与特高频传感器的协同定位,利用超声波信号与特高频信号的传播速度差异,计算放电点到各传感器的距离,通过三角定位法确定缺陷位置,优化算法迭代过程,减少定位误差。传感器布置方面,根据开关柜结构特点,合理布置多个传感器,确保传感器覆盖开关柜所有关键部位,避免检测盲区,同时校准传感器安装位置,减少安装偏差对定位精度的影响^[3]。结合暂态地电压信号的分布特征,辅助定位缺陷区域,通过多源数据融合,整合不同传感器的定位信息,修正定位结果,将缺陷定位误差控制在合理范围内,为后续缺陷处理提供精准依据。

3.3 带电调试安全性保障

10kV开关柜带电调试涉及高压设备,安全性是首要前提,需从人员防护、设备防护、流程规范三个方面构建全方位安全保障体系。人员防护方面,调试人员需穿戴绝缘手套、绝缘鞋、绝缘服等专用防护用品,经过专业培训,熟悉高压设备操作规范,严禁违规操作。设备防护方面,调试前检查开关柜绝缘性能、接地系统及运行状态,确认设备无异常后再开展调试;调试过程中,避免测试仪器、传感器与高压部件直接接触,防止短路、触电事故;合理设置安全警示区域,禁止无关人员进入调试现场。流程规范方面,严格遵循带电调试操作流程,明确各环节操作标准,调试过程中实时监测设备运行参数,若出现异常情况,立即停止调试,切断电源,排查故障后再恢复操作,确保调试过程安全可控。

3.4 数据标准化与评估体系

建立统一的数据标准化与评估体系,是解决10kV开关柜带电调试现存问题的关键举措。当前,带电调试

数据存在不规范情况,缺陷评估也缺乏一致性,这极大地影响了调试结果的通用性与可靠性。在数据标准化层面,需详细明确局部放电信号采集的各项参数标准。同时,规范数据格式,统一采用易于处理和共享的格式;明确存储方式,保障数据安全且便于检索;优化传输流程,保证数据及时、准确传递。建立严格的数据校验机制,运用先进算法和人工审核相结合的方式,剔除异常数据,从源头上保障数据的准确性和完整性,使不同设备、不同现场的调试数据具备可比性。在评估体系方面,紧密结合开关柜绝缘性能标准以及局部放电缺陷等级划分标准,构建多指标评估模型。从放电强度、缺陷类型、发展趋势等多个维度,对开关柜绝缘状态进行全面、综合评估,精准明确缺陷等级及处理优先级。

4 未来发展趋势与展望

4.1 技术升级方向

未来10kV开关柜带电调试技术将向智能化、高精度、轻量化方向升级,核心聚焦于检测技术、信号处理及设备集成的优化。检测技术方面,研发高灵敏度、多维度传感器,提升微弱局部放电信号的捕捉能力,开发无线传感器检测技术,解决传统有线传感器安装不便、布线复杂的问题,实现开关柜内部全方位、无死角检测。信号处理方面,引入人工智能、机器学习算法,实现干扰信号的自动识别与剔除、放电缺陷的智能分类与诊断,提升调试效率和准确性,减少人工干预。设备集成方面,开发小型化、一体化调试设备,整合检测、数据处理、缺陷诊断功能,提升现场调试的便捷性;结合物联网技术,实现调试数据的实时传输、远程监控,便于运维人员及时掌握设备状态,实现精准运维。

4.2 标准化与规范化建设

随着10kV开关柜应用范围的扩大,带电调试的标准化与规范化建设将成为未来发展的重点,旨在统一调试标准、规范操作流程,提升行业整体调试水平。一方面,完善行业标准体系,明确带电调试的技术要求、检测方法、数据标准及评估准则,统一不同厂家、不同类型开关柜的调试规范,解决当前调试标准不统一、结果可比性差的问题。另一方面,加强行业培训与监管,规范调试人员的操作行为,提升调试人员的专业技能和安

全意识,建立调试资质认证体系,确保调试人员具备相应的操作能力。同时,推动调试数据的共享与互通,建立行业数据库,整合不同现场的调试数据,为标准优化、技术升级提供数据支撑,实现带电调试行业的规范化、标准化发展。

4.3 新能源场景下的适应性研究

随着新能源的快速发展,10kV开关柜在新能源场景中的应用日益广泛,其带电调试技术需针对性开展适应性研究,满足新能源场景的特殊需求。新能源场景下,开关柜运行环境复杂,且存在谐波含量高、电压波动大等问题,传统调试技术难以满足检测需求^[4]。未来需研发适应新能源场景的抗干扰检测技术,提升调试设备对谐波、电压波动的抗干扰能力;针对新能源开关柜的结构特点,优化传感器布置和调试流程,实现对新能源设备接口、储能模块等关键部位的精准检测。同时研究局部放电与新能源设备运行状态的关联关系,建立适配新能源场景的缺陷评估模型,为新能源场景下开关柜的安全稳定运行提供技术保障,推动带电调试技术与新能源产业的协同发展。

结束语

10kV开关柜局部放电带电调试技术对于保障电力系统稳定运行意义重大。通过对其机理、干扰因素、关键技术及问题解决方案的研究,有效提升了检测的准确性与可靠性。未来,随着技术升级、标准化建设推进以及在新能源场景适应性研究的深入,该技术将不断完善,能更精准地检测开关柜局部放电,为电力设备运维提供有力支持,推动电力行业朝着更安全、高效的方向发展。

参考文献

- [1]陈健.10kV开关柜局部放电在线监测运维技术[J].通信电源技术, 2025, 42(21): 231-233.
- [2]曹华斌.10kV开关柜局部放电检测技术分析[J].通信电源技术, 2024, 41(10): 232-235.
- [3]宋立伟,王海兵.10kV开关柜改造可行性研究[J].电力安全技术, 2022, 24(10): 48-52.
- [4]石中奇.10kV开关柜故障原因与应对措施研究[J].中国高新科技, 2025(17): 64-66.