

变电站直流系统绝缘监测技术应用探讨

杨广智

嘉泽新能源股份有限公司 宁夏 银川 750001

【摘要】：变电站直流系统绝缘性能关乎电力设备安全稳定运行，绝缘监测技术是把控系统绝缘状态的关键手段。该技术在应用中存在技术瓶颈与运维难题，不同监测技术的原理特性决定其适配场景存在差异。通过优化技术方案、构建标准化管控体系、创新新技术融合模式，能够有效提升绝缘监测的精准性与稳定性，为变电站直流系统可靠运行筑牢技术防线。

【关键词】：变电站；直流系统；绝缘监测技术；技术应用；运行可靠性

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.090

1 变电站直流系统绝缘监测技术应用现状及核心问题

1.1 变电站直流系统绝缘监测技术应用基础现状

变电站直流系统绝缘监测已完成人工检测到自动化监测的初步转型，多数站点配备基础监测装置，集成于直流屏内的模块可实时采集正负极对地绝缘电阻并触发异常报警。核心变电站因设备重要性突出，监测技术部署更注重精准性与稳定性，中小型变电站也逐步推进装置安装，形成全域覆盖格局^[1]。但不同层级站点应用深度差异显著，部分中小型站点监测装置仅具备基础报警功能，数据的分析预判价值未被充分挖掘。不同厂家装置型号与技术标准不统一，数据接口、监测精度存在差异，对跨站数据整合与统一管控形成阻碍。

1.2 绝缘监测技术应用中的核心技术瓶颈

绝缘监测技术应用的核心瓶颈聚焦于故障识别精准性，传统技术在直流系统多点接地故障场景中，难以实现故障点的精准定位。面对高阻接地故障时，微弱的绝缘参数变化超出多数监测装置的信号采集灵敏度范围，易引发漏判或误判。变电站内部电磁设备运行产生的复杂干扰信号，易与监测检测信号叠加，造成数据失真，进一步影响绝缘状态判断准确性。直流系统负载动态变化会引发等效电阻波动，部分监测技术适应性不足，无法抵消该因素对绝缘电阻测算的影响，难以输出稳定准确的监测结果。

1.3 运维场景下绝缘监测技术应用的现实难题

运维场景中绝缘监测技术应用存在多重现实阻碍，监测装置产生的海量数据未得到深度挖掘分析，运维工作仍以报警信号为主要依据，难以通过数据趋势预判绝缘状态变化。新型监测技术操作逻辑与数据解读门槛较高，部分运维人员技术素养未能同步提升，无法充分发挥装置的全部功能。监测装置运维保障机制存在短板，部分变电站长期缺乏专业校准与维护，导致装置性能退化、监测精度下降，甚至故障无法及时发现。不同运维班组间技术交流与经验共享不足，难以形成统一的技术应用规范与故障处理方案，制约整体应用成效提升。

2 变电站直流系统主流绝缘监测技术原理及适配性

2.1 平衡电桥法绝缘监测技术原理及适配场景

平衡电桥法绝缘监测技术依托电桥平衡原理搭建监测电路，在直流系统正负极与地之间接入标准电阻作为两个桥臂，系统正负极对地绝缘电阻则构成另外两个桥臂。系统绝缘状态正常时，电桥保持平衡，桥臂两端电位一致，监测装置无信号输出；一旦某一极对地绝缘电阻下降，电桥平衡状态被打破，桥臂间产生电位差，监测装置可通过检测该电位差计算出绝缘电阻数值。该技术具备结构简单、成本低廉的特点，能满足基础绝缘电阻测算需求，适配负载稳定、电磁干扰小的中小型变电站直流系统。但面对负载频繁波动或强电磁干扰场景，其监测精度会显著下降，难以达到精准监测标准。

2.2 低频信号注入法绝缘监测技术原理及适配场景

低频信号注入法通过向直流系统注入特定频率的低频交流信号，利用信号在绝缘电阻与分布电容上的不同响应特性，实现对绝缘状态的监测。监测装置通过信号发生器产生低频信号，经耦合变压器注入直流系统，再通过检测装置采集系统正负极对地的信号幅值与相位信息。根据电路理论，低频信号在绝缘电阻上的衰减程度与绝缘电阻阻值呈正相关，通过分析采集到的信号参数，可精准计算出正负极对地绝缘电阻的数值^[2]。该技术具备较强的抗干扰能力，低频信号不易受变电站内高频电磁干扰的影响，同时能够有效克服分布电容对监测结果的干扰。其适配场景广泛，尤其适用于负载波动较大、电磁环境复杂的核心变电站直流系统，对于高阻接地故障的识别精度也明显优于平衡电桥法，能够满足精准监测与故障定位的需求。

2.3 高频信号注入法绝缘监测技术原理及适配场景

高频信号注入法以高频交流信号作为检测信号，其核心原理是利用高频信号的趋肤效应与频率特性，提升对微小绝缘缺陷的识别能力。监测系统通过高频信号源产生高频信号，经专用耦合装置注入直流系统，由于高频信号在低阻路径上的传输损耗较小，在绝缘缺陷处会形成明显的信号反射与衰减。监测装置通过接收反射信号与透射信号，分析信号的幅值、相位及频率变化，可精准判断绝缘缺陷的位置与严重程度。该技术的

突出优势是故障定位精度高，能够实现对多点接地故障的精准定位，同时监测响应速度快，可实时捕捉绝缘状态的动态变化。其适配场景主要为对绝缘监测精度与定位要求极高的超高压、特高压变电站直流系统，尤其适用于复杂拓扑结构的直流系统，能够为核心电力设备的安全运行提供精准的绝缘状态保障。但该技术的设备成本较高，对信号处理算法的要求也更为严格，在中小型变电站的普及应用存在一定限制。

3 绝缘监测技术应用核心问题的针对性解决路径

3.1 技术层面的故障识别精度提升方案

提升故障识别精度需从信号采集、算法优化与硬件升级三个维度推进。在信号采集环节，采用高精度信号采集模块，提升对微弱信号的捕捉能力，通过优化信号放大电路与滤波电路，减少电磁干扰对采集信号的影响，确保采集数据的真实性与稳定性。在算法优化方面，引入机器学习算法对监测数据进行深度分析，通过训练模型学习不同绝缘故障状态下的信号特征，实现对故障类型与严重程度的精准判断，同时利用算法补偿负载变化对监测结果的影响，提升技术的适应性。在硬件升级上，采用多传感器融合技术，整合不同类型传感器的监测数据，通过数据互补提升故障识别的全面性，针对高阻接地故障，优化监测装置的信号激励方式，增强对高阻故障信号的识别能力。通过标准化监测装置的技术参数，统一数据接口与通信协议，为数据整合与分析提供基础保障。

3.2 运维层面的监测数据应用优化策略

优化监测数据应用需构建完善的数据处理与应用体系，首先建立集中式数据管理平台，整合各变电站的绝缘监测数据，实现数据的统一存储、管理与共享，通过平台对数据进行分类梳理与标准化处理，消除不同设备间的数据差异。其次，开发数据可视化分析工具，将监测数据转化为直观的图表与曲线，清晰呈现绝缘状态的变化趋势，方便运维人员快速掌握核心信息，同时设置数据异常预警阈值，通过趋势分析实现对潜在故障的提前预警^[3]。强化数据与运维工作的深度融合，将监测数据纳入设备全生命周期管理体系，结合设备运行年限、维护记录等信息，制定个性化的运维方案，提升运维工作的针对性与有效性。建立数据驱动的运维决策机制，通过对历史监测数据的挖掘分析，总结绝缘故障的发生规律，为运维资源的合理配置与运维计划的制定提供科学依据。

3.3 环境干扰下的监测稳定性保障措施

保障环境干扰下的监测稳定性需从抗干扰设计、环境适应优化与装置防护三个方面落实。在抗干扰设计上，采用屏蔽技术对监测装置的电路与信号传输线路进行屏蔽处理，减少电磁信号的侵入，同时优化电路布局，避免不同电路模块之间的相互干扰，提升装置自身的抗干扰能力。在环境适应优化方面，针对变电站内温度、湿度等环境因素的变化，在监测装置中引

入温湿度补偿模块，通过算法修正环境因素对监测结果的影响，确保装置在不同环境条件下的监测精度稳定。在装置防护上，选用耐恶劣环境的元器件与外壳材料，提升装置的防尘、防潮、抗震性能，延长装置的使用寿命，同时定期对装置的保护状态进行检查与维护，及时处理防护破损问题。合理规划监测装置的安装位置，避开强电磁干扰源与易受环境影响的区域，从安装环节提升监测的稳定性。

4 变电站直流系统绝缘监测技术应用优化实践

4.1 监测系统的智能化升级改造实施要点

监测系统的智能化升级改造需以提升监测精准度与运维效率为核心目标，实施过程中首先需开展全面的现状调研，明确现有监测系统的短板与升级需求，结合变电站的实际情况制定个性化的升级方案。在硬件改造上，更换老旧的监测装置，选用具备智能化功能的新型装置，升级数据采集模块与通信模块，提升数据采集精度与传输效率，同时新增边缘计算节点，实现监测数据的本地实时处理，减少数据传输压力。在软件升级方面，开发智能化监测管理软件，整合数据采集、分析、预警、管理等功能，引入人工智能算法提升数据处理与故障识别能力，优化用户操作界面，提升运维人员的操作便捷性。升级过程中需注重新旧系统的兼容性，确保升级后的系统能够与原有直流系统及运维管理平台顺畅对接，同时开展充分的测试验证工作，确保升级后的系统运行稳定、功能可靠。

4.2 技术应用全流程的标准化管控体系构建

构建技术应用全流程标准化管控体系需覆盖技术选型、安装调试、运行维护、故障处理等各个环节。在技术选型环节，制定明确的选型标准，结合变电站的规模、设备重要性、环境条件等因素，确定适配的绝缘监测技术与装置型号，确保选型的科学性与合理性。在安装调试环节，规范安装流程与技术要求，明确安装位置、接线标准、调试步骤等关键要点，通过标准化调试确保监测装置的安装质量与监测精度^[4]。在运行维护环节，制定定期维护计划，明确维护内容、周期与技术标准，规范监测数据的记录与分析流程，建立维护档案，确保维护工作的规范性与连续性。在故障处理环节，制定标准化的故障处置流程，明确故障响应、排查、处理的步骤与方法，规范故障记录与复盘总结流程，通过标准化管控提升技术应用的全流程质量。

4.3 多技术融合的绝缘监测模式创新探索

多技术融合的绝缘监测模式创新需立足不同技术的优势互补，构建综合化的监测体系。探索平衡电桥法与低频信号注入法的融合应用，利用平衡电桥法的低成本优势实现基础绝缘状态监测，通过低频信号注入法提升故障识别精度，形成“基础监测+精准识别”的双层监测模式。开展低频信号注入法与高频信号注入法的协同应用，利用低频信号的抗干扰优势实现

日常绝缘状态监测,借助高频信号的高精度定位优势实现故障精准定位,提升监测的全面性与精准性。融合绝缘监测技术与物联网技术,通过物联网实现监测数据的无线传输与远程管控,结合移动终端实现运维人员的实时响应与远程操作,提升运维效率。探索绝缘监测技术与数字孪生技术的结合,构建直流系统数字孪生模型,通过监测数据驱动模型运行,实现对绝缘状态的虚拟仿真与预判,为运维工作提供前瞻性指引。

5 绝缘监测技术应用成效评估及长效发展保障

5.1 技术应用成效的多维度评估指标构建

构建多维度评估指标需从技术性能、运维效率、安全效益三个核心维度出发,全面衡量绝缘监测技术的应用成效。技术性能维度的指标包括故障识别准确率、故障定位精度、监测数据准确率、抗干扰能力等,通过这些指标评估技术在实际应用中的性能表现,判断技术是否能够满足绝缘监测的核心需求。运维效率维度的指标涵盖故障响应时间、运维工作时长、监测数据处理效率、运维成本降低幅度等,用于衡量技术应用对运维工作的优化效果,评估其在提升运维效率、降低运维成本方面的作用。安全效益维度的指标包括绝缘故障发生率、故障造成的损失减少量、直流系统运行稳定性提升程度等,通过这些指标评估技术应用对保障直流系统安全运行、降低故障损失的实际成效。各维度指标需明确具体的计算方法与评估标准,确保评估结果的客观性与准确性。

5.2 基于评估结果的技术应用持续优化路径

基于评估结果的持续优化需建立“评估-分析-改进-验证”的闭环机制,首先对评估数据进行深入分析,明确技术应用中存在的不足与薄弱环节,结合评估指标的表现,定位问题产生

的根源。针对技术性能指标不达标的情况,从信号采集、算法优化、硬件升级等方面制定改进措施,优化技术方案,提升技术性能。对于运维效率提升不明显的问题,进一步完善数据应用体系与运维管理流程,加强运维人员的技术培训,提升数据应用能力与操作熟练度^[5]。针对安全效益未达预期的情况,优化故障预警与处置机制,强化技术应用的全流程管控,提升故障防范与处置能力。改进措施实施后,需通过再次评估验证优化效果,根据验证结果调整优化方向,形成持续改进的闭环,确保技术应用水平不断提升。

5.3 绝缘监测技术长效应用的保障机制建立

绝缘监测技术长效应用保障机制需从技术、管理、人员三个层面搭建全方位支撑体系。技术层面需建立动态更新迭代机制,密切追踪技术发展前沿,及时引入先进设备与理念,定期对现有监测系统开展升级优化,保障技术的先进性与场景适用性。管理层面要将绝缘监测技术应用纳入变电站常态化运维体系,明确各岗位职责边界,健全考核评价机制,推动各项管理要求落地见效。人员层面需构建专业化培养机制,定期组织技术培训与经验交流,搭建人才共享平台,同步建立技术应用效果定期评估反馈机制,及时优化调整,为技术长效运行筑牢根基。

6 结语

本文围绕变电站直流系统绝缘监测技术应用展开探讨,明确技术的核心价值与现存问题,梳理主流技术的原理及适配场景,提出针对性解决路径与优化实践方案。绝缘监测技术的优化升级需兼顾技术迭代与运维管理,通过多维度保障机制的构建,可切实提升技术应用成效,为变电站直流系统安全稳定运行提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 姜勇,焦浩峰.变电站直流系统常见接地故障分析及处理策略[J].电力设备管理,2025,(17):191-193.
- [2] 张健韬.变电站直流系统绝缘监测装置的研究与应用[D].合肥工业大学,2024.
- [3] 汪锐.变电站站用直流系统接地现象及辨识方法研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.第一届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集.国网安康供电公司,2024:154-156.
- [4] 姜坤,胡朗华,谢江媛,等.变电站直流系统主动综合保护技术研究与应用[J].电工技术,2023,(22):162-164.
- [5] 程媛,张健韬,李仲强,等.变电站直流系统接地故障查找策略综述[J].南方能源建设,2023,10(05):57-64.