

变电站高压电气试验设备技术优化措施

汪 洋

国家能源集团元宝山发电有限公司 内蒙古 赤峰 024076

摘 要：随着电网规模扩大与电压等级提升，变电站高压电气设备的可靠性成为保障电力供应的核心。本文聚焦变电站高压电气试验设备，先概述设备分类、功能、在变电站中的作用及技术发展历程。接着分析现状，指出存在精度不足、智能化水平低、安全防护薄弱、便携性差等问题。针对这些问题，提出技术优化措施，包括提升设备精度保障数据可靠性、推进智能化升级提高试验效率、强化安全防护降低试验风险、改善便携性增强设备适应性以及优化运维管理延长设备寿命，旨在为变电站高压电气试验设备的优化提供参考。

关键词：变电站；高压电气试验设备；技术优化

引言：变电站作为电力系统的关键枢纽，其安全稳定运行至关重要。高压电气试验设备是检测变电站电气设备性能、保障其可靠运行的重要工具。然而，当前部分变电站的高压电气试验设备在技术层面存在诸多不足，影响了试验结果的准确性和试验工作的效率，也给变电站的安全运行带来一定隐患。在此背景下，深入研究变电站高压电气试验设备的技术优化措施，提升设备性能与试验水平，成为保障电力系统稳定运行、提高供电质量的迫切需求。

1 变电站高压电气试验设备概述

1.1 设备分类与功能

变电站高压电气试验设备按功能可分为耐压试验、绝缘检测、局放监测三大类。耐压试验设备以变频串联谐振装置为核心，适用于电力电缆、变压器、GIS等大容量设备的交流耐压试验，通过LC谐振原理实现高压输出，覆盖6kV至1000kV电压等级。绝缘检测设备包括绝缘电阻测试仪、介质损耗测试仪等，可量化变压器油温、开关分合闸位置等参数，评估设备绝缘老化状态。局放监测设备采用高频电流法、超声波法等技术，精准定位电缆、GIS内部的绝缘缺陷。

1.2 设备在变电站中的作用

高压电气试验设备是变电站安全运行的“诊断工具”。其通过耐压试验验证设备绝缘强度，避免因绝缘击穿引发停电事故；通过局放监测提前发现设备内部缺陷，延长设备使用寿命；通过绝缘参数检测掌握设备健康状态，指导运维人员制定检修计划。介质损耗测试仪能检测变压器套管绝缘老化，预防因绝缘劣化导致的故障。这些设备的应用显著提升了变电站运行的可靠性和经济性。

1.3 设备技术发展历程

高压电气试验设备技术经历了从机械式到数字化、智能化的演变。20世纪60年代，我国通过仿制苏联技术，建成首批高压电器试验基地，实现110kV以下设备的自主检测。80年代，随着500kV超高压输电工程推进，西安高压电器研究所等机构研发出具有国际先进水平的冲击电压发生器、大容量短路发电机等设备，填补了国内技术空白^[1]。进入21世纪，智能化技术成为主流，嵌入式智能组件逐渐替代外置式设备，实现数据就地数字化测量与传输。

2 变电站高压电气试验设备现状分析

2.1 精度不足，数据可靠性低

当前部分变电站高压电气试验设备存在测量精度缺陷，直接影响试验数据可靠性。例如，传统介质损耗测试仪因抗干扰能力弱，在复杂电磁环境下易产生测量误差，导致绝缘评估结果失真；部分老旧耐压试验设备因电压调节稳定性差，输出高压波动范围超过 $\pm 5\%$ ，无法满足精密试验要求。此外，传感器老化问题普遍，如电容型设备介损测试中，长期运行的电流互感器因绝缘劣化导致测量值偏移，而缺乏定期校准机制进一步加剧数据偏差。部分设备采用模拟信号输出，经长距离传输后信号衰减明显，数据采集环节引入额外误差。

2.2 智能化水平低，效率低下

多数变电站高压电气试验设备仍以传统机械式或基础数字式为主，智能化程度不足。例如，耐压试验需人工记录电压、电流等参数，再通过手动计算分析试验结果，过程耗时且易出错；局放监测设备缺乏自动定位功能，需技术人员结合声电信号人工判断缺陷位置，效率低下。部分设备虽具备数据存储功能，但无法实现与站控层系统的实时交互，需通过U盘等介质手动导出数据，导致信息传递延迟。此外，设备间缺乏协同能力，如绝

缘电阻测试与介质损耗测试需分别操作，无法形成综合诊断报告。

2.3 安全防护薄弱，风险较高

变电站高压电气试验设备的安全防护机制存在明显短板。部分老旧设备未配备过压、过流保护装置，在试验过程中若出现电压突升或设备故障，可能直接损坏被试品甚至引发安全事故；接地系统设计不完善，如临时接地线截面不足或连接不可靠，导致试验时接地电阻超标，增加人员触电风险。此外，设备绝缘防护等级较低，部分高压引线外层绝缘老化开裂，在潮湿环境下易发生漏电；安全警示标识缺失或模糊，操作人员难以快速识别危险区域。

2.4 便携性差，适应性不足

当前高压电气试验设备在便携性与环境适应性方面存在局限。大型耐压试验设备（如变频串联谐振装置）体积庞大、重量超标，需通过专用车辆运输，且现场组装耗时较长，难以满足紧急检修需求；部分设备采用固定式设计，无法灵活调整试验参数以适应不同电压等级设备，导致在多电压等级变电站中需配备多套设备，增加成本。此外，设备对环境条件的适应性较差，如低温环境下电池续航能力下降，高温导致电子元件性能衰减，潮湿环境易引发绝缘故障^[2]。

3 变电站高压电气试验设备技术优化措施

3.1 提升设备精度，保障数据可靠性

（1）需从硬件层面优化传感器与测量模块。采用高精度、低噪声的电子式传感器替代传统电磁式传感器，例如使用光纤传感器监测局放信号，其抗电磁干扰能力较传统电容传感器提升3倍以上，可有效降低复杂电磁环境下的测量误差。同时，升级A/D转换模块精度至16位及以上，配合低温漂、高稳定性的参考电压源，确保电压、电流等基础参数采集误差控制在 $\pm 0.1\%$ 以内，从源头提升数据准确性。（2）强化设备抗干扰能力与校准机制。针对变电站强电磁干扰场景，在设备外壳采用屏蔽层设计，并优化内部布线以减少串扰；引入自适应滤波算法，动态抑制工频干扰及谐波噪声，使介质损耗测试等精密试验的信噪比提升20dB以上。此外，建立定期校准制度，配备高精度标准源（如0.01级标准电容器、500kV标准电压源），每季度对设备进行全量程校准，确保长期运行后测量偏差不超过允许范围。（3）推动数据传输与处理环节的数字化升级。采用高速以太网或光纤通信替代传统模拟信号传输，避免长距离传输中的信号衰减与失真；在设备端集成边缘计算模块，实时对原始数据进行滤波、补偿与误差修正，例如通过温度补偿算

法消除环境温度对绝缘电阻测试的影响，使最终输出数据可靠性提升40%以上。通过硬件、算法与通信的三重优化，全面保障高压电气试验数据的精准度。

3.2 推进智能化升级，提高试验效率

（1）需构建智能感知与自动控制体系。通过集成多类型传感器（如温度、湿度、局部放电传感器），结合物联网技术实现设备状态实时感知，例如在耐压试验中自动监测环境温湿度并调整试验参数，避免因环境因素导致试验中断。同时，引入嵌入式智能控制模块，替代传统手动操作，实现电压调节、数据采集等环节的自动化控制，如变频串联谐振装置可根据被试品参数自动匹配最佳试验频率，将试验准备时间缩短60%以上。（2）开发智能诊断与决策支持系统。利用机器学习算法对试验数据进行深度分析，例如通过历史数据训练模型，自动识别介质损耗、局放信号等关键指标的异常模式，实现缺陷类型与严重程度的智能判定。此外，集成专家知识库，根据诊断结果生成检修建议，如针对变压器绝缘老化问题，系统可推荐油色谱分析或绕组变形测试等后续试验项目，减少人工分析耗时，提升决策效率。（3）推动设备互联与协同作业。通过5G或Wi-Fi6通信技术实现试验设备与站控层系统的实时数据交互，例如将局放监测数据同步上传至监控平台，结合SCADA系统信息生成综合试验报告。同时，支持多设备协同控制，如绝缘电阻测试仪与介质损耗测试仪可共享被试品信息，避免重复接线与参数设置，使单次试验流程耗时从2小时压缩至40分钟内，显著提升整体试验效率。

3.3 强化安全防护，降低试验风险

（1）需完善设备本体安全防护机制。针对高压试验设备，应采用双重绝缘设计，在关键电路（如高压输出端、测量回路）增设绝缘监测模块，实时检测漏电流并触发报警，当漏电流超过5mA时自动切断电源，防止人员触电。同时，优化接地系统，使用低电阻、高耐腐蚀性的铜排作为接地主干，确保接地电阻 $\leq 0.5\Omega$ ，并通过接地状态传感器实时监测连接可靠性，避免因接地不良引发设备损坏或电弧闪络。（2）构建多层级安全预警与应急体系。在设备操作界面集成声光报警装置，当试验参数（如电压、电流）超出安全阈值时，立即发出警报并锁定操作按钮；引入AI视觉识别技术，通过摄像头监测操作人员与高压设备的距离，若检测到违规靠近（如进入1米危险区），自动触发语音提示并暂停试验。此外，配备便携式应急断电装置，操作人员可随身携带，在突发故障时快速切断局部电源，将事故响应时间从传统30秒缩短至5秒内。（3）强化安全培训与虚拟仿真应

用。开发高压试验VR模拟系统,还原真实试验场景(如220kV GIS耐压试验),让操作人员在虚拟环境中练习安全操作流程(如接地线装拆、高压引线连接),通过错误操作触发事故模拟(如电弧烧伤、设备爆炸),加深安全规范认知。同时,建立安全知识库,整合典型事故案例与应急处置方案,供试验人员随时查阅,从人员技能与意识层面降低试验风险。

3.4 改善便携性,增强设备适应性

(1) 需对设备进行模块化与轻量化设计。将传统一体式高压试验设备拆分为多个功能模块(如电源模块、测量模块、控制模块),各模块采用标准化接口,支持快速插拔与组合。例如,变频串联谐振装置可分解为谐振变压器、电抗器、分压器三个独立模块,单个模块重量控制在30kg以内,便于人工搬运;同时,选用高强度碳纤维或航空铝合金替代传统钢材制作设备外壳,在保证结构强度的前提下,使整体重量降低40%以上,显著提升便携性。(2) 开发多电压等级兼容技术。通过集成可调式高压发生器与智能参数匹配算法,使单台设备覆盖6kV至500kV电压等级的试验需求。例如,在介质损耗测试仪中内置电压自适应模块,可根据被试品电压等级自动调整输出信号幅值与频率,避免因电压不匹配导致的测量误差;同时,设计通用型高压引线接头,兼容不同电压等级设备的接口标准,减少现场更换线缆的耗时,使设备在多电压等级变电站中的适应性提升60%。(3) 优化设备环境适应能力。针对户外试验场景,采用密封防水设计,外壳防护等级提升至IP67,可抵御暴雨、沙尘等恶劣天气;内置温控系统,通过半导体制冷片与加热膜自动调节设备内部温度,确保在-20℃至50℃环境下稳定运行。

3.5 优化运维管理,延长设备寿命

(1) 需建立全生命周期运维管理体系。从设备采购阶段开始,记录其型号、参数、出厂日期等基础信息,并关联供应商技术文档,形成数字化档案;在运行阶段,通过物联网传感器实时采集设备状态数据(如温度、振动、绝缘电阻),结合SCADA系统生成运行日

志,实现从投运到退役的全过程追溯。例如,对耐压试验设备的谐振电抗器,可监测其温升曲线,当连续运行温升超过额定值10%时,自动触发预警并推荐检修窗口期,避免过热导致的绝缘老化加速。(2) 推行预防性维护与智能诊断结合的策略。基于设备历史运行数据与故障模式分析,制定差异化维护计划:对关键部件(如高压电容、IGBT模块)实施状态监测维护,通过油色谱分析、局部放电检测等技术提前发现潜在缺陷;对易损件(如传感器、电池)设定更换周期,并结合使用强度动态调整。同时,集成AI故障诊断模型,对运维数据深度挖掘,例如通过分析介质损耗测试仪的长期数据,预测变压器绝缘寿命,将计划外停机率降低50%以上。(3) 强化运维人员技能与工具支撑。开发移动端运维APP,集成设备操作指南、故障处理流程、备件库存查询等功能,使现场人员可快速获取技术支持;定期组织虚拟仿真培训,模拟高压试验设备故障场景(如电抗器匝间短路、控制模块死机),提升人员应急处置能力^[3]。

结束语

变电站高压电气试验设备的技术优化是保障电网安全稳定运行的关键举措。通过提升设备精度、推进智能化升级、强化安全防护、改善便携性及优化运维管理,可系统性解决传统设备存在的数据不可靠、效率低下、风险突出等问题。未来,随着物联网、人工智能等技术的深度融合,试验设备将向高精度、全自动化、自适应环境方向持续演进。这不仅有助于降低运维成本、延长设备寿命,更能为智能电网建设提供精准的数据支撑与可靠的技术保障,推动电力行业向更安全、高效、智能的方向迈进。

参考文献

- [1] 廖钧. 变电站高压电气试验设备现状及技术改进分析[J]. 通讯世界, 2022(09): 112
- [2] 于鑫龙. 变电站高压电气试验设备现状及技术改进分析[J]. 科技创新与应用, 2022(09): 123-134
- [3] 廖银娟. 高压电气试验设备现状分析及技术改进[J]. 技术与市场, 2021(10): 145-146