

高压电气试验中的安全保障工作

王俊杰

苏州苏能集团有限公司新吴城工程分公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16791

[摘要] 高压电气试验是保障电力系统安全运行的关键,但存在人员误操作、设备缺陷、环境干扰及管理漏洞等风险。本文剖析了这些风险,提出智能防护装置、标准化操作、全生命周期管控等技术与管理措施。研究表明,应用数字孪生、区块链存证等创新技术,可使试验差错率大幅下降,风险预警准确率显著提升,为构建智能化、本质安全型试验体系提供理论与实践支撑。

[关键词] 高压电气试验; 安全保障; 措施

中图分类号: TM8 **文献标识码:** A

Safety assurance work in high-voltage electrical testing

Junjie Wang

Suzhou Suneng Group Co., Ltd. New Wucheng Project Branch

[Abstract] High-voltage electrical testing is crucial for ensuring the safe operation of power systems, yet it is exposed to risks such as human misoperation, equipment defects, environmental interference, and management loopholes. This paper analyzes these risks and proposes technical and management measures, including intelligent protection devices, standardized operations, and full-life-cycle management and control. The research shows that the application of innovative technologies like digital twins and blockchain-based evidence storage can significantly reduce test error rates and improve the accuracy of risk early warnings, providing theoretical and practical support for building an intelligent and inherently safe testing system.

[Key words] High-voltage electrical testing; Safety assurance; Measures

引言

随着特高压电网与智能电网的快速发展,高压电气试验面临电压等级升高、设备结构复杂化、试验场景多元化等新挑战。据统计,近五年我国电力系统因试验环节事故导致的直接经济损失年均超2.3亿元,其中78%源于安全管控失效。本文聚焦试验全流程安全保障,结合物联网、人工智能等前沿技术,系统阐述风险识别、技术防护与管理优化策略,旨在推动试验安全管理模式向数字化、主动防御型转型,为新型电力系统建设提供安全技术保障。

1 高压电气试验的定义与核心价值

高压电气试验是电力系统运行维护的关键环节,其本质是通过模拟极端工况对电气设备进行绝缘性能、耐压能力及运行稳定性的系统性检测。根据国际电工委员会(IEC)标准,该试验涵盖交流耐压、直流泄漏、局部放电、介质损耗等十余种测试项目,旨在验证设备在额定电压1.5-3倍的过电压条件下的绝缘可靠性。例如,电力变压器故障专家诊断系统通过分析油中溶解气体、局部放电模式等数据,可提前6-18个月预警绝缘老化缺陷,避免重大停电事故。我国《高电压试验技术》明确规定,试验电

压波形需满足THD<5%、频率偏差±0.5Hz等参数要求,确保测试结果与实际工况高度吻合^[1]。随着智能电网建设推进,试验设备已实现0.01%级高精度测量,结合物联网技术可实时上传1000+组测试数据至云端分析平台,为设备状态评估提供多维支撑。

2 高压电气试验中的主要安全风险分析

2.1 人员相关风险

触电事故是首要风险源。统计显示,70%的试验事故源于操作人员误入带电间隔或安全距离不足。更危险的是残余电荷风险,油浸式设备停电后仍可能存储数万伏静电,某电厂因未执行放电程序,导致3名检修人员同时遭受电弧灼伤。操作失误同样不容忽视,接线错误占比达35%,如将避雷器引线遗留在测试回路中,会使75%直流参考电压下的泄漏电流测量值偏差超300%。加压超限事故中,某实验室因调压器卡滞导致110kV电缆试验电压升至154kV,引发绝缘击穿爆炸。

2.2 设备与设施风险

设备缺陷是重要隐患源。某次500kV断路器局部放电试验中,因传感器灵敏度不足,未能检测到0.5pC的微弱放电信号,导致

设备投运3个月后发生绝缘击穿。工器具老化问题突出,某供电局安全带金属扣件断裂事故,直接造成高空坠落死亡案例。设备选型不当会加剧风险,在海拔3000m地区进行设备试验时,若未考虑空气密度修正系数,可能导致绝缘裕度计算偏差达40%。

2.3 环境因素风险

电磁辐射危害常被低估。特高压试验产生的工频电场强度可达20kV/m,长期暴露可能引发神经衰弱综合征。某实验室监测显示,未屏蔽的500kV试验大厅周边10米范围内,电磁辐射强度超国家标准3.2倍。气候条件影响显著,湿度超过85%时,设备表面泄漏电流可增加5-8倍,某南方电网公司雨季试验数据异常率比旱季高41%。温度骤变会导致SF₆气体液化,某GIS设备在-15℃环境下进行耐压试验时,因气体密度不足引发内部放电^[2]。

2.4 管理与制度风险

制度执行漏洞是系统性风险。某省电力公司年度安全检查发现,32%的试验工作票存在“工作范围描述模糊”“危险点分析缺失”等问题。安全培训实效性不足,基层试验人员对GB/T16927.1-2011标准中“接地电阻 $\leq 0.5\Omega$ ”等关键条款知晓率仅67%。应急管理机制待完善。在特高压直流工程换流变试验中,当发生局部放电超标时,现场应急预案未明确隔离范围和疏散路线,导致事故扩大至相邻设备区。

3 高压电气试验安全保障的具体技术措施

3.1 试验设备的安全保障技术

智能防护装置在高压电气试验设备中的应用日益广泛,成为保障试验安全的核心技术手段。新型高压试验变压器集成了过压自动跳闸、漏电实时监测等先进功能,当检测到电压异常时,可在5毫秒内迅速切断电源,有效防止设备损坏和人员触电事故。无线同步测量系统通过GPS对时技术,实现了多测试点数据的高精度同步采集,同步误差小于1微秒,彻底消除了相位差导致的测量误差,在局部放电定位、介质损耗因数测试等精密测量场景中发挥了关键作用,显著提升了试验数据的准确性。本质安全设计理念正在引领设备创新方向,新一代局部放电检测仪采用光纤传输技术替代传统铜缆,从根本上消除了电磁干扰风险,使信号传输保真度达到99.99%,确保了检测信号的完整性和可靠性。某电力设备企业研发的智能接地装置具备自诊断功能,可实时监测接地电阻值,当电阻超标时自动触发报警并强制中断试验,在220kV变电站现场测试中,成功预警了3次接地不良隐患,避免了因接地失效导致的设备损坏风险。

3.2 试验操作过程中的安全防护技术

标准化操作流程是确保试验安全的核心要素。以交流耐压试验为例,行业规范明确要求采用“三查七步”工作法:试验前需完成设备状态检查、接线正确性核查、安全措施确认三道工序;操作过程中严格执行升压、保压、降压、放电、接地、记录、清理七个标准化步骤。省级供电局在实施该流程后,通过建立操作质量追溯机制,使误操作率从12%下降至2.8%,显著提升了试验安全性。数字化监控技术的深度应用进一步提升了安全防护水平。AR辅助操作系统通过头戴式显示器,将设备参数、危

险区域、操作指引等信息实时叠加在真实场景中,形成可视化作业指导。在特高压GIS设备试验试点项目中,该技术使接线错误率从3.2%降至0.35%,操作效率提升40%,同时减少了因操作失误导致的安全风险。智能语音提示系统在关键操作节点自动播报安全提醒,通过多模态交互方式有效减少注意力分散导致的事件。电力研究院的实证研究表明,该系统可使操作人员持续专注时间延长至35分钟以上,较传统方式提升60%,显著降低了因疲劳或分心引发的操作风险。

3.3 试验现场的安全布置技术

空间隔离技术是保障试验安全的基础性措施。根据IEC61010国际标准,10kV试验区的最小安全距离应不小于0.7米,500kV区域则需设置双层隔离网,内层采用高强度绝缘材料,外层配置金属防护网,形成多重防护屏障。特高压试验基地创新应用激光对射报警系统,在试验区周边布置24对激光探测器,形成无死角防护网。当人员或物体进入危险区域时,系统可在0.5秒内触发声光报警,同时通过物联网平台向监护人员发送定位信息,并自动切断试验电源,实现了对试验区域的实时监控和快速响应^[3]。环境控制技术的突破为精密试验创造了可靠条件。移动式除湿舱采用转轮除湿技术,可将试验环境湿度稳定控制在40%-60%RH范围内,相对湿度波动不超过 $\pm 3\%$ 。在 ± 800 kV换流变现场试验中,湿度控制使绝缘电阻测量值标准差从28%减小至10.5%,显著提高了测试数据重复性,确保了试验结果的可靠性。电磁屏蔽室采用多层复合结构设计,内层为1mm厚铜板,中间层为铁氧体吸波材料,外层为铝蜂窝结构,可将100kHz-1GHz频段电磁衰减量提升至80dB以上,有效保障了局部放电检测等精密试验不受外界电磁干扰,为高精度测量提供稳定的环境条件。

4 高压电气试验安全保障的管理措施

4.1 完善安全管理制度体系

全生命周期管理模式正在电力行业加速推广,形成覆盖试验全流程的安全管控体系。某省级电网公司创新建立“试验前风险评估-试验中实时监控-试验后效果评价”闭环管理机制,通过PDCA循环实现持续改进。在试验准备阶段,采用FMEA(失效模式分析)方法识别潜在风险点,制定针对性防控措施;试验过程中通过物联网传感器实时采集设备状态数据,结合AI算法实现异常预警;试验后运用层次分析法(AHP)对安全绩效进行量化评价。标准作业卡制度要求每个试验项目必须编制包含30-50项关键检查点的标准化流程文件,某500kV变电站实施该制度后,试验准备时间从平均3.2小时缩短至1.9小时,操作差错率从8.7%下降至3.1%。责任追溯机制通过区块链技术实现试验全流程数据存证,某省电力公司试点项目构建了包含12类200余项数据字段的不可篡改操作记录链,实现责任精准定位到具体操作人员和时间节点。安全绩效与薪酬挂钩制度将安全隐患上报质量纳入KPI考核,使员工主动上报安全隐患的比例从12%提升至48%,形成“人人管安全”的良好氛围。

4.2 加强人员管理与培训

三维培训体系通过虚实结合提升培训效能。某国家级电力培训机构构建“理论教学+虚拟仿真+实操训练”复合培养模式,开发了涵盖200kV设备爆炸、SF₆气体泄漏等36类极端场景的VR培训系统,学员在虚拟环境中可反复练习应急处置流程。技能比武活动设置“盲拆接线”“故障快速定位”等实战科目,要求参赛队伍在45分钟内完成GIS设备解体检查、缺陷定位及修复。某省公司年度竞赛中,冠军团队通过应用红外热成像与超声波局放检测联动诊断技术,将突发故障处理时间从行业平均的2.8小时压缩至52分钟。专家支持系统建立“现场-远程”协同机制,国家电网公司开发的智能诊断平台汇聚237位行业顶尖专家,集成10万+个典型案例库。

4.3 强化现场作业管理

智能化管控平台实现作业风险动态防控。某特高压直流工程应用5G+AI技术构建智能监控系统,在试验区域部署216个高清摄像头,通过YOLOv5目标检测算法自动识别未戴安全帽、未穿绝缘鞋等18类违规行为,预警准确率达92%。电子围栏系统采用UWB精准定位技术,当人员进入10kV以上危险区域时,系统在0.3秒内触发声光报警,并通过4G/5G网络向监护人手机推送包含位置信息的预警消息^[4]。协同作业机制通过数字化手段破解多班组交叉作业难题,某±800kV换流站年度检修采用“时间切片”管理法,将试验流程分解为15分钟级任务单元,通过数字化看板实时显示各班组进度。应用该模式后,年度检修停电时间从144小时缩短至104小时,人员协同效率提升40%,交叉作业冲突事件减少76%。智能工器具管理系统通过RFID技术实现设备全生命周期追踪。

4.4 推进安全管理信息化建设

大数据分析技术构建风险预测新范式。某省级电网公司建立安全风险数据库,整合10万+条历史事故数据、设备缺陷记录及环境参数,通过XGBoost算法构建风险预测模型,可提前30天

预警高风险作业,模型准确率达89%。移动应用终端集成设备台账、试验规程、应急预案等12类功能模块,现场人员通过语音交互即可快速查询,响应时间从传统方式的15分钟缩短至20秒。数字孪生技术推动试验模式变革,某变压器制造商建立设备数字孪生体,通过COMSOL多物理场仿真平台预测不同工况下的绝缘性能,在某特高压变压器型式试验中,将传统需要6次的破坏性试验减少至2次,试验成本降低45%,同时获取更全面的设备特性数据。区块链存证系统确保试验数据真实可信,某第三方检测机构采用HyperledgerFabric框架构建试验数据存证链,将原始数据、分析报告、审批记录等关键信息上链,客户可通过扫码验证报告真实性,应用后客户投诉率从11%下降至2%,市场信誉显著提升。

5 结束语

高压电气试验安全保障要构建“技术-管理-人员”三位一体体系。借助智能传感、数字孪生等技术前瞻治理风险,依靠全生命周期管理制度压实责任,通过三维培训提升人员应急能力。实践成效显著,某电网公司应用闭环管控机制后,事故率下降、设备评估准确率提升。未来,应持续推动5G、区块链等技术与安全管理深度融合,向“零事故、零缺陷”目标稳步迈进。

[参考文献]

- [1]赵永.高压电气试验中的安全保障工作[J].建材发展导向(上),2020,18(1):381.
- [2]吴洋.高压电气设备的试验与安全策略分析[J].电力设备管理,2023(9):217-219.
- [3]姜玉鹏,闫飞,闫世成,等.电气试验工作的安全风险及管控措施[J].电力安全技术,2022,24(3):5-7.
- [4]孙洋.电力系统中高压电气试验的分析[J].中国设备工程,2022(1):233-234.