

电力系统电气试验技术研究

谢玉宇

中国电建集团福建工程有限公司 福建 福州 350018

摘要：电力系统电气试验技术是保障电网安全稳定运行的核心手段，涵盖绝缘性能检测、耐压试验、特性参数测试及智能诊断等关键领域。本文系统阐述了电气试验技术的基础理论，分析了绝缘电阻测试、介质损耗测量、局部放电检测等核心技术的原理与应用场景。研究指出，随着智能化、数字化转型加速，电气试验技术正向在线监测、大数据分析方向演进，显著提升了设备状态评估的精准性与运维效率。

关键词：电力系统；电气试验；关键技术

引言：电力系统的稳定运行是国家能源安全与经济发展的基石，而电气试验技术在预防事故、延长设备寿命方面具有不可替代的作用。基于电气试验技术的状态检修通过实时监测设备绝缘性能、机械特性等关键参数，实现了从“被动抢修”到“主动维护”的转变。本文从电力系统运行特性出发，结合绝缘理论、电磁理论及信号处理技术，深入剖析电气试验技术的核心方法与应用实践，旨在探索智能化、数字化背景下试验技术的创新路径，为电力设备全生命周期管理提供理论支撑与实践指导。

1 电力系统中电气试验技术的作用

电力系统的稳定运行关乎国计民生，而电气试验技术作为保障其安全可靠的核心手段，发挥着以下作用。

（1）保障设备安全运行。电气试验技术能及时发现设备潜在隐患。通过绝缘电阻测试、耐压试验等，可检测设备绝缘性能是否良好，避免因绝缘老化、受潮引发短路、漏电等故障。以变压器为例，定期开展油色谱分析，能依据油中气体成分，判断内部是否存在过热、放电等问题，防止设备突发故障，降低停电风险。

（2）提高设备可靠性。在电力设备投入运行前，需通过电气试验验证其性能指标是否达标。如断路器的机械特性试验，可确保触头分合闸时间、速度等参数符合要求，保证断路器在故障时能可靠动作。运行中的预防性试验，也能掌握设备性能变化趋势，提前安排检修维护，提升设备长期运行的可靠性。

（3）为设备状态检修提供依据。传统定期检修存在盲目性，而电气试验技术支持下的状态检修，能依据试验数据判断设备实际健康状况。在线监测技术实时采集设备运行参数，结合离线试验结果，构建设备状态评估模型，实现精准检修，降低维护成本，提高检修效率。

（4）助力新设备和新技术应用。新型电力设备或技术研发阶段，需严格电气试验验证性

能和安全性。如新能源并网设备，通过短路试验、功率特性试验等，确保其满足电网接入要求，推动电力系统技术创新与发展^[1]。

2 电力系统电气试验的基础理论

2.1 电力系统的基本组成与运行特性

电力系统由发电、输电、变电、配电和用电五个环节构成。发电环节包含火力、水力、风力、太阳能等多种发电形式；输电系统依托高压输电线路，将电能远距离传输；变电环节通过变压器实现电压等级转换；配电系统负责将电能分配至终端用户。各环节紧密相连，形成复杂的网络系统。

电力系统具有瞬时性、连续性和稳定性的运行特性。电能的生产、传输和消费需瞬间完成，任一环节故障都可能引发连锁反应。同时，系统需保持频率、电压稳定，以保障各类设备正常运行。

2.2 电气试验的定义与目的

电气试验是运用特定技术和设备，对电力系统设备的性能、状态进行检测和评估的过程。根据试验目的和阶段不同，可分为型式试验、出厂试验、预防性试验等。型式试验用于验证新产品是否符合设计要求和相关标准，是新产品定型的关键环节；出厂试验在设备生产完成后进行，确保每一台设备在交付前性能达标；预防性试验则是对运行中的设备定期检测，通过分析试验数据，提前发现设备潜在缺陷，预防故障发生。还有交接试验、特殊试验等，共同构成完整的电气试验体系，为电力设备全生命周期管理提供保障。

2.3 电气试验技术的理论基础

电气试验技术的理论基础包含以下：（1）电磁理论。在电力系统中，电磁现象广泛存在，试验过程涉及电磁感应、电磁场分布等原理。变压器的变比试验基于电磁感应定律，通过测量原副边电压，验证绕组匝数比

是否符合要求。(2) 绝缘理论。电力设备的绝缘性能直接关系到系统安全, 绝缘理论研究绝缘材料的电气特性、击穿机理等。绝缘电阻测试、介质损耗因数测量等试验, 均基于绝缘理论, 用于评估设备绝缘状态, 预防绝缘故障。(3) 信号处理理论。在局部放电检测、在线监测等试验中, 采集的信号往往包含大量噪声, 需通过滤波、频谱分析、特征提取等信号处理技术, 获取有效信息, 从而准确判断设备状态^[2]。随着数字信号处理技术发展, 电气试验的准确性和可靠性不断提升。

3 电力系统电气试验的关键技术与方法

3.1 绝缘性能试验技术

绝缘性能试验技术其核心目标是精准评估设备绝缘材料和结构的电气性能, 具体如下: (1) 绝缘电阻测试。基于欧姆定律, 通过向设备施加直流电压, 测量流经绝缘介质的微弱电流, 进而计算绝缘电阻值。在实际应用中, 高阻计的量程可达 $10^{14}\Omega$ 量级, 配合屏蔽技术, 可有效消除表面泄漏电流干扰, 使测量精度达到微安级。该方法通过对比绝缘电阻的历史数据与行业标准, 能够直观反映绝缘介质是否存在受潮、老化等缺陷, 其检测结果对绝缘状态的早期预警具有重要意义。(2) 介质损耗测试。以介质损耗因数($\tan\delta$)为核心指标, 利用电桥法或数字测量技术, 在工频电场下量化绝缘介质的能量损耗。该技术基于介电理论, 通过分析介质在电场作用下的极化和电导过程, 能够识别绝缘内部的整体劣化趋势。对于电容型设备, 如套管、电流互感器等, 介质损耗测试可有效检测其小电容单元的局部缺陷, 其灵敏度可达 10^4 量级, 显著优于传统绝缘电阻测试。(3) 局部放电检测技术。通过捕捉设备内部放电产生的多物理场信号实现缺陷预警。电脉冲检测基于脉冲电流法, 通过耦合电容或罗氏线圈采集放电产生的脉冲电流, 其带宽可达数MHz, 能够分辨纳秒级的放电脉冲。超高频检测技术则利用局部放电产生的300MHz-3GHz频段电磁波, 通过特制天线进行信号接收, 该方法具有抗干扰能力强、定位精度高的特点, 配合阵列式传感器布局, 可实现毫米级的缺陷定位。

3.2 耐压试验技术

耐压试验技术旨在验证电力设备在高电压环境下的绝缘耐受能力, 其包含以下工频耐压、冲击耐压和谐振耐压三种典型试验方式。(1) 工频耐压试验。采用50Hz或60Hz正弦电压, 通过试验变压器将电压升至设备额定电压的1.0-1.5倍, 持续时间通常为1-5分钟。该试验模拟设备长期运行时承受的工作电压应力, 通过监测泄漏电流、局部放电等参数, 评估绝缘的整体性能。其试验电

压波形严格遵循IEC标准, 畸变率控制在3%以内, 确保试验结果的准确性和可比性。(2) 冲击耐压试验。利用冲击电压发生器产生标准雷电波(1.2/50 μ s)或操作波(250/2500 μ s), 模拟设备在实际运行中可能遭遇的瞬态过电压。试验过程中, 通过分压器和示波器精确测量冲击电压的峰值、波前时间和半峰值时间, 其测量误差控制在 $\pm 3\%$ 以内。(3) 谐振耐压试验。基于串联谐振或并联谐振原理, 通过调节试验回路的电感和电容参数, 使回路达到谐振状态, 从而产生高电压。该技术具有设备容量小(仅为试验容量的1/10-1/30)、试验波形好($\text{THD} < 1\%$)的显著优势。在现场试验中, 通过变频电源调节频率, 可适配不同电容参数的被试设备, 有效解决了传统试验设备体积大、搬运困难的问题, 特别适用于电缆、发电机等大容量设备的交流耐压试验。

3.3 特性参数测试技术

特性参数测试技术聚焦于获取电力设备的关键性能指标, 以保障设备的正常运行和性能优化。(1) 变压器变比测试。基于电磁感应原理, 通过测量原副边电压比验证绕组匝数是否符合设计要求。现代测试仪器采用高精度电压互感器和数字信号处理技术, 其测量精度可达0.01%。该测试不仅用于验证变压器的电压变换精度, 还可通过分析变比误差曲线, 检测绕组是否存在匝间短路、分接开关接触不良等故障。对于多绕组变压器, 三相变比不平衡度的测量可进一步揭示绕组结构的对称性问题。(2) 断路器动作特性测试。通过测量分合闸时间、速度、同期性等参数, 评估断路器的机械和电气性能。采用高精度光电传感器和计时装置, 分合闸时间的测量分辨率可达毫秒级, 速度测量精度达到0.1m/s。试验过程中, 通过模拟断路器的分合闸操作, 记录触头运动轨迹和行程曲线, 结合动力学模型分析触头弹跳、超程等参数, 为设备的维护和性能优化提供数据支撑。对于高压断路器, 分合闸同期性误差需控制在 $\pm 2\text{ms}$ 以内, 以确保三相电路的同步开断, 避免过电压和过电流的产生。

3.4 在线监测与智能诊断技术

在线监测与智能诊断技术是推动电气试验向智能化发展的核心力量。传感器技术作为在线监测的基础, 实现了对设备运行参数的实时采集。光纤传感器基于光的干涉、衍射原理, 能够在强电磁干扰环境下稳定测量局部放电信号、温度等参数, 其测量精度可达 0.1°C , 响应时间小于1ms。MEMS传感器则利用微机电系统技术, 实现了对振动、气体成分等参数的微型化、集成化测量, 其检测灵敏度达到 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 量级, 为设备状态的多维度感知提供了技术保障。数据分析算法是智能诊断的核心技

术,通过机器学习、深度学习等方法对海量监测数据进行处理。在特征提取方面,采用主成分分析(PCA)、经验模态分解(EMD)等算法,将原始信号转化为具有物理意义的特征向量。模式识别环节则利用支持向量机(SVM)、卷积神经网络(CNN)等模型,实现设备故障类型和严重程度的自动识别。通过构建设备状态评估模型,结合大数据分析技术,可对设备剩余寿命进行预测,其预测精度误差控制在10%以内。该技术推动电气试验从传统的预防性检修向基于状态的智能检修转变,显著提升了电力系统运维的效率和可靠性。

3.5 试验设备集成与便携式技术

试验设备集成与便携式技术是提升电气试验灵活性和现场适应性的关键。(1)在设备集成方面,采用模块化设计理念,将多种试验功能整合于同一设备平台。如将绝缘电阻测试、介质损耗测试、局部放电检测等功能集成,通过硬件复用和软件算法切换,实现一机多能,减少设备携带数量和操作复杂度。运用高速数据处理芯片和多通道同步采集技术,提升设备的数据处理能力和测试效率。(2)便携式技术。则着重于设备的轻量化与小型化。采用新型材料和优化电路设计,降低设备体积和重量,部分便携式试验设备重量可压缩至10kg以内,便于单人携带作业。配备长续航电池和无线通信模块,摆脱对外部电源和线缆的依赖,支持远程操控与数据传输,使试验人员在复杂现场环境中也能高效完成检测任务^[3]。

4 电力系统电气试验技术发展趋势

在科技飞速发展与电力需求持续增长的双重驱动下,电气试验技术正迈向全新的发展阶段,呈现出以下一系列显著趋势。(1)智能化。随着人工智能、机器学习算法的深度融入,试验设备将具备自主分析、诊断和决策能力。通过对海量历史试验数据及设备运行状态数据的挖掘学习,智能系统能够精准识别设备潜在故障模式,预测故障发展趋势,极大提升试验效率与诊断准确性。(2)数字化转型贯穿电气试验全流程。从试验数据采集、传输到处理、存储,均实现数字化运作。高精

度数字传感器的广泛应用,确保试验数据的精确采集,数据传输借助高速通信网络,实现实时、稳定传输。利用大数据分析技术,可对多源异构数据进行深度融合处理,挖掘数据背后隐藏的设备运行信息,为设备全生命周期管理提供全面、可靠的数据支持。在变压器试验中,通过对历年油色谱、绕组温度等数字化数据的综合分析,能够精准评估变压器绝缘老化程度与剩余寿命。

(3)随着新能源大规模接入电网,电气试验技术需适配新能源设备特性。针对风力发电机、光伏逆变器等新能源装备,研发专用试验技术与设备,如风电叶片无损检测技术、光伏组件性能在线监测技术等,确保新能源设备安全稳定运行。(4)在绿色环保理念引领下,电气试验技术注重降低能耗与减少环境污染。研发环保型试验设备与技术,如采用新型绝缘介质替代传统含氟、含油介质,减少环境污染风险;优化试验方法,降低试验过程中的能源消耗,推动电气试验行业可持续发展^[4]。

结束语:本文全面梳理了电力系统电气试验技术的理论体系与发展脉络,揭示了其在保障设备安全、优化检修策略中的核心价值。通过分析绝缘性能试验、耐压试验及智能诊断技术的关键突破,明确了试验技术向高精度、自动化、智能化演进的趋势。随着新能源占比提升与电网智能化升级,电气试验技术需进一步融合数字孪生、边缘计算等前沿技术,突破复杂工况下的检测难题,推动试验模式从“单点检测”向“系统评估”跨越。

参考文献

- [1]朱超平,李恒,贾天同,等.电力系统电气试验技术研究[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2020(6):4465-4466.
- [2]梁文平,马明,孙藏多杰,等.电气试验技术在电力系统中的应用与发展研究[J].数码设计,2023(21):122-124.
- [3]苏海艳.电力系统中高压电气试验要点研究[J].科技资讯,2025,23(4):108-110.
- [4]高心怡.电力系统高压电气试验技术要点探究[J].电工技术,2024(z1):137-139.