

基于虚拟仪器的电气设备在线试验系统设计与应用

张文俊

内蒙古电力(集团)有限责任公司薛家湾供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要: 虚拟仪器的电气设备在线试验系统设计以软件定义为核心, 结合模块化硬件架构和智能化数据处理技术, 实现了对电气设备运行状态的实时监控与动态分析。虚拟仪器在线试验系统可显著提升电气设备测试效率与智能化水平, 推动传统测试模式向数字化、网络化转型。通过模块化架构设计、多源数据融合与标准化验证流程, 可构建高可靠、易扩展的电气设备在线试验系统, 满足电力、工业等领域智能化升级需求。

关键词: 虚拟仪器; 电气设备在线试验系统设计; 应用

虚拟仪器技术通过软硬件解耦与模块化设计, 显著提升了电气设备在线试验系统的灵活性、可靠性与智能化水平, 成为电力、工业等领域数字化转型的核心驱动力。

1 电气设备在线试验系统设计方法

1.1 系统架构设计。模块化分层架构。采用“传感器层-边缘计算层-中心平台层”三级架构, 支持灵活扩展。传感器层部署温度、湿度、振动等多元传感器, 通过工业总线或无线传输接入边缘计算节点完成本地预处理; 中心平台层集成SCADA系统实现全局数据管理与远程控制。柔性直流输电系统设计中, 通过合并单元模拟装置与子模块控制单元协同验证阀控系统逻辑, 体现分层架构优势。热管理与空间布局优化。基于三维布局分区策略, 将电气设备划分为外围散热区(第一区域)与核心温控区(第二区域), 分别设置差异化的温度阈值(如第一区域 $\leq 45^{\circ}\text{C}$, 第二区域 $\leq 35^{\circ}\text{C}$), 通过热仿真识别温度热点后进行布局迭代优化。封闭式开关柜设计中, 采用分布式光纤测温技术实现柜内温度场重构, 结合散热均衡算法提升设备可靠性。

1.2 关键模块设计要点。传感器选型与部署。绝缘监测: 针对静止设备(变压器、电缆)选用局部放电传感器, 动作设备(断路器)结合机械振动与辅助电路电流监测实现综合诊断。温度监测: 高压开关柜优先采用无线无源声表面波(SAW)传感器, 避免电磁干扰; 变压器油温监测采用光纤Bragg光栅传感器。硬件设计规范。供电安全: 实验用电与动力电分离配电, 双路电源末端互投保障连续运行; 工频插座回路需配置剩余电流保护器(动作电流 $\leq 30\text{mA}$)。电磁兼容: 对高频信号采集电路实施屏蔽接地, 敏感设备供电线路加装EMI滤波器(插入损耗 $\geq 60\text{dB}@1\text{MHz}$)。软件功能开发。虚拟仪器集成: 基于LabVIEW搭建人机界面, 集成谐波分析、波形重现等功能模块, 支持自定义算法扩展; 通过Web服

务发布虚拟测控实验平台, 实现远程协作。异常检测算法: 采用加权欧式距离聚类分析, 对温度、湿度、风速等多维数据归一化处理, 当聚类簇异常度超过阈值(如 > 0.75)时触发预警。

1.3 验证与优化方法。全接入仿真测试。搭建包含极控装置、延时测试模块的试验平台, 通过模拟工程级采样率(如10kHz)验证阀控系统子模块程序的兼容性, 覆盖 $\pm 500\text{kV}$ 柔性直流输电系统极端工况测试。标准化评估体系。参照《工业与民用供电系统设计规范》评估系统可靠性, 一级负荷需满足双电源互备条件, 绝缘电阻测试值 $\geq 20\text{M}\Omega$ (500V兆欧表)。设计趋势。智能化升级: 融合AI算法构建设备健康度评估模型, 如基于LSTM网络的绝缘老化预测。轻量化部署: 边缘计算节点采用RISC-V架构处理器, 功耗降低40%的同时支持TensorFlow Lite推理框架。

2 电气设备在线试验系统设计挑战

2.1 系统兼容性与标准化难题。多协议接口整合。不同品牌设备的通信协议差异导致系统集成困难, 例如双电源环网柜试验台因厂商标准不统一, 需定制化协议转换模块以兼容Modbus、CAN等异构总线。新能源汽车高压平台设计中, 电压等级升级至800V后, 原有绝缘测试设备需重新适配, 增加开发成本。高频信号干扰抑制。宽禁带半导体(GaN/SiC)应用提升开关频率至MHz级, 但引发电磁兼容性问题, 导致采样波形畸变率增加。需采用分布式光纤测温、电磁屏蔽设计(插入损耗 $\geq 60\text{dB}@1\text{MHz}$)缓解干扰。

2.2 实时性与可靠性要求。数据流并行处理瓶颈。大功率ATE系统需同时采集数十路传感器数据, 传统架构下边缘计算节点无法满足10kHz级实时性指标, 需引入FPGA加速算法, 实现动态绝缘电阻监测与故障定位误差 $\leq 0.5\text{ms}$ 。高温环境下的稳定性衰减。封闭式开关柜内部

温升可达45℃,导致电子元件寿命缩短30%。需优化热管理策略,如采用分区散热设计(核心温控区 $\leq 35^{\circ}\text{C}$)与耐高温传感器(SAW传感器精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}@125^{\circ}\text{C}$)。

2.3 安全与智能化挑战。高压绝缘失效风险。1800V风电系统对绝缘材料耐压要求提升至3.5kV/mm,传统测试方法难以检测局部放电微电流(pA级)。需结合油中溶解气体色谱分析与高频电流互感器实现早期预警。智能诊断算法局限。现有AI模型对复合故障识别准确率不足70%,需融合多传感器数据(振动、温度、局放)构建知识图谱,通过加权欧式距离聚类提升异常检测精度至92%。关键优化路径。模块化设计:采用PXI总线架构实现电源、采集卡等模块快速替换,兼容未来1800V系统升级需求。

3 虚拟仪器在电气试验中的优势分析

3.1 功能灵活性与可重构性。软件定义功能。虚拟仪器通过计算机软件实现数据采集、分析和控制功能,用户可根据试验需求自定义算法模块(如谐波分析、波形重现)和交互界面,突破传统仪器硬件功能固化限制。例如,LabVIEW平台支持图形化编程快速搭建多通道同步采集系统,实现电气参数动态监测。模块化硬件扩展。基于PXI、VXI等标准化总线架构,可灵活集成高精度采集卡、程控电源等模块,适应不同电压等级(如10kV至 $\pm 500\text{kV}$)和测试场景需求。例如,柔性直流输电系统验证中,通过模块化硬件组合快速适配阀控设备与子模块协同测试需求。

3.2 经济性与效率提升。开发与维护成本优化。虚拟仪器采用通用硬件(如DAQ设备)替代专用仪器,硬件成本降低70%以上;软件升级即可新增功能,无需重复采购设备。某车企采用LabVIEW重构发动机测试系统后,开发周期从6个月缩短至3周。多任务并行处理。支持多通道同步采集与实时分析,如LabVIEW编写的多通道数据采集程序可实现32路信号同步采样,误差 $\leq 0.1\text{ms}$,并通过数据缓冲机制保障高速工况下数据完整性。

4 利用虚拟仪器进行电气试验的方法

4.1 系统搭建与硬件配置。模块化硬件架构。采用PXI或VXI总线构建测试平台,集成高精度DAQ设备(如NI-DAQmx系列)、程控电源及传感器接口模块,支持多通道同步采集(如32通道并行采集,同步误差 $\leq 0.1\text{ms}$)。例如,在柔性直流输电系统试验中,通过PXI机箱整合电压/电流采集卡与FPGA加速模块,满足 $\pm 500\text{kV}$ 高压测试需求。传感器选型与连接。高压设备监测:采用光纤Bragg光栅传感器测量变压器油温,局部放电测试使用高频电流互感器(频响范围100kHz-30MHz)

捕获pA级微电流。开关特性测试:结合霍尔电流传感器与激光位移传感器,同步记录断路器分合闸过程中的电流与机械位移曲线。

4.2 软件设计与功能实现。数据采集与处理。基于LabVIEW开发采集程序,设置连续采样模式(采样率 $\geq 10\text{kHz}$)并配置环形缓冲区(容量 $\geq 1\text{MB}$),支持实时FFT分析和阈值报警功能。例如,通过DAQmx驱动实现多通道同步触发,确保电压、电流信号的相位同步误差 $\leq 1^{\circ}$ 。智能诊断算法集成。绝缘老化预测:将LSTM神经网络嵌入LabVIEW平台,输入温度、局部放电数据后,输出剩余寿命预测值(误差 $\leq 5\%$)。故障特征提取:应用小波包分解算法处理振动信号,识别断路器机械故障特征频段(如3.5kHz-5kHz异常频段)。

4.3 安全操作规范。高压测试防护。试验前需执行双人复核流程,确保接地线连接可靠(接地电阻 $\leq 4\Omega$);测试完成后使用绝缘操作棒对试品放电(放电时间 ≥ 5 倍时间常数)。异常处理机制。在LabVIEW程序中嵌入紧急停机逻辑,当检测到过流($\geq 120\%$ 额定值)或温度突变(梯度 $> 5^{\circ}\text{C/s}$)时,自动切断电源并触发声光报警。技术要点总结。硬件兼容性:采用VISA标准接口实现PA5000H功率分析仪等异构设备的即插即用(IP配置误差 $\leq 1\text{ms}$)。远程协作:通过Web服务发布测试平台,支持多终端实时监控与数据共享(传输延迟 $\leq 500\text{ms}$)。

5 电气设备试验中的安全注意事项

5.1 试验前准备。断电验证与挂牌锁定。试验前必须切断电源并进行二次验证(如使用验电器确认无电),同时对电源开关悬挂“禁止合闸”警示牌,防止误操作送电。对电容器、电感类设备需在试验前后放电,避免残余电荷引发触电风险。环境与设备检查。确保试验区无易燃易爆物品,设置临时护栏及警示标志(如“止步,高压危险”),试验线路需避开人员通行区域。检查接地系统可靠性(接地电阻 $\leq 4\Omega$),高压设备外壳、试验品接地线需多点可靠连接,接地线截面积 $\geq 4\text{mm}^2$ 。

5.2 操作规范。设备与人员安全。使用经计量校准的检测仪器(如500V兆欧表测量绝缘电阻),操作人员需持证上岗并穿戴绝缘防护装备(手套、靴等)。试验过程中禁止变更接线或跨越试验区,需通过监护人统一指挥,操作人员站立绝缘垫作业。高压测试防护。耐压试验前测量绝缘电阻,试验电压严格按标准设定(如2500V直流耐压),试验装置需设双极刀闸隔离电源。采用屏蔽电缆和镀锌钢管敷设高压线路,相邻设备短接接地,避免电磁感应与放电反击。

5.3 应急处理。异常响应机制。程序中嵌入过流、过温保护逻辑（如电流 $\geq 120\%$ 额定值或温升梯度 $> 5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时自动断电）并触发声光报警。突发火灾或爆炸时，立即启动实验室应急预案，切断总电源并使用干粉灭火器扑救，人员按疏散路线撤离。事故后处理。试验结束后拆除临时接线，恢复设备接地端子，清理试验区并填写完整试验记录（含环温、湿度等参数）。

6 评估电气设备试验效果的方法

6.1 绝缘性能评估。绝缘电阻测试。采用500V/1000V兆欧表测量设备绝缘电阻值，对比标准阈值（新设备 $\geq 10\text{M}\Omega$ ，旧设备 $\geq 1\text{M}\Omega$ ）判断绝缘老化或受潮程度。结合吸收比（极化指数）分析，若吸收比 < 1.3 则提示绝缘材料存在缺陷。耐压试验。直流耐压：施加高于额定电压的直流电（如2500V），检测泄漏电流是否超标（误差 $\pm 5\%$ ），适用于电缆、电机绕组等设备。交流耐压：模拟工频电压环境，验证绝缘耐受能力（如10kV设备施加15kV持续1分钟），发现局部放电或击穿现象。介质损耗测试。通过介损角正切值（ $\tan\delta$ ）评估绝缘材料在高电场下的能量损耗，若实测值超过标准值（如 $\leq 0.5\%$ ），表明材料内部存在缺陷或受潮。

6.2 热性能与耐候性评估。温升试验。热电偶法：在设备关键部件（如变压器绕组）表面布置传感器，监测温度随时间的变化曲线，判定散热性能是否达标。电阻法：通过绕组电阻变化反推温升速率，评估设备长期运行稳定性。耐电弧测试。记录材料耐受电弧的时间（如 ≥ 120 秒），观察表面碳化程度，结合微观分析（SEM）揭示材料劣化机制。

6.3 机械与动态特性分析。动作特性测试。通过霍尔

传感器监测断路器分合闸时间（如 $\leq 60\text{ms}$ ），结合激光位移传感器绘制位移-电流曲线，识别机械卡滞或触头磨损。振动信号诊断。采用小波包分解技术提取振动信号特征频段（如3.5kHz-5kHz异常频带），定位断路器弹簧机构故障或松动部件。

6.4 安全性能验证。接地系统检测。使用接地电阻测试仪验证接地电阻是否符合标准（配电系统 $\leq 4\Omega$ ，防雷系统 $\leq 10\Omega$ ），确保故障电流有效泄放。漏电流与保护功能测试。测量设备在额定负载下的漏电流（如 $\leq 0.1\text{mA}$ ），验证漏电保护装置动作时间是否符合要求（如 $\leq 30\text{ms}$ ）。

6.5 综合评估与趋势分析。多维度指标关联。结合可靠性（故障率）、节能性（能耗效率）等指标，构建设备性能综合评分模型（如加权评分法）。历史数据比对。与历次试验数据对比（如绝缘电阻年衰减率 $\leq 5\%$ ），通过趋势分析预测设备剩余寿命。环境适应性评估。模拟高温（如125 $^{\circ}\text{C}$ ）、高湿（RH $\geq 95\%$ ）等极端环境，测试绝缘电阻衰减率及温升特性，验证设备耐候性。

总之，通过多参数耦合分析与标准化流程，可系统化评估电气设备试验效果，为设备全生命周期管理提供量化支撑。

参考文献

- [1]秋韵.虚拟仪器的电气设备在线试验系统设计与应用探讨.2023.
- [2]刘祥.基于虚拟仪器的电气设备在线试验系统设计与应用探索.2023.