

火力发电厂电气设备绝缘状态评估与试验技术应用研究

李达豪

广东省粤泷发电有限责任公司, 广东 云浮 527300

DOI:10.61369/WCEST.2026030041

摘 要 : 本研究围绕火力发电厂电气设备的绝缘状况评估以及试验技术展开系统性研究, 整合介损测试、局部放电检测等多方面试验, 关联设备的运行环境和过往数据, 建立评估、试验、反馈的闭环管理方案, 加强故障预警的时效性, 降低非计划停机的几率, 为电厂的安全运行提供技术支撑, 未来需深入推动人工智能与在线监测模型的融合及改进。

关 键 词 : 火力发电厂; 电气设备绝缘状态评估; 试验技术

Research on the Application of Insulation State Evaluation and Testing Technology for Electrical Equipment in Thermal Power Plants

Li Dahao

Guangdong Yuelong Power Generation Co., Ltd., Yunfu, Guangdong 527300

Abstract : This research conducts a systematic study on the insulation condition assessment and testing technology of electrical equipment in thermal power plants. It integrates various tests such as dielectric loss testing and partial discharge detection, and correlates the operating environment and past data of the equipment to establish a closed-loop management scheme for assessment, testing, and feedback. This aims to enhance the timeliness of fault warning and reduce the probability of unplanned shutdowns, providing technical support for the safe operation of power plants. In the future, it is necessary to further promote the integration and improvement of artificial intelligence and online monitoring models.

Keywords : thermal power plant; assessment of insulation status of electrical equipment; experimental technology

引言

火力发电厂电气设备绝缘状态是保障机组稳定运行的主要要素, 其评估与检测技术的提高对于降低非计划停机风险、提高运行效率具有重要意义。随着电力系统向高可靠性、智能化方向发展, 传统绝缘评估方法在应对复杂工况下的早期缺陷识别难题时, 存在精确性不足、响应滞后等局限。2023年发布的《火力发电厂电气设备状态检修导则》明确指出需强化多参数融合评估以及在线监测技术的应用, 推动绝缘管理从定期检修向预知性维护转变。根据该政策导向, 本文深入研究绝缘状态评估的基本原理以及试验技术方案, 结合实际现场实例分析常见情形, 提出故障防范与技术优化措施, 旨在为火力发电厂电气设备的绝缘安全管控提供科学根据和实践帮助。

一、电气设备绝缘状态评估基础理论

(一) 绝缘状态评估基本原理

电气设备绝缘状态评估的基础理论是以绝缘材料的老化机理为主, 通过分析绝缘劣化过程中的物理化学变化, 建立劣化模型来量化绝缘性能的衰减规律。绝缘材料在长时间运行过程中, 受

电力、热力、机械力以及环境等因素共同影响, 会出现分子结构降解、局部放电累积等老化现象, 这些变化直接导致绝缘电阻、介质损耗因数等主要参数产生改变^[1]。评估程序需根据行业标准中针对绝缘参数的限定条件, 通过试验数据与模型的对比, 判断绝缘状态是否处于安全范围之内。该原理重点对绝缘情况实施动态监测以及多参数融合分析, 既关注单个指标的变化趋势, 也通过

多方面数据交叉验证来确保评估结果的准确性，为火力发电厂电气设备的状态检修提供科学的理论根据，实现从定期检修向预知性维护的转变。

（二）试验技术理论基础

在电气设备绝缘状态评估的基础理论领域中，试验技术的理论基础是根据绝缘测试的原理、状态监测的技术以及诊断标准建立起核心方案。绝缘检测的原理包括绝缘电阻、介质损耗因数、局部放电等参数的测定方法，通过分析绝缘材料在电场作用下介电特性的变化，反映其老化或者存在的缺陷情况^[2]。状态监测手段通过传感器以及数据采集系统，实现对设备运行期间绝缘情况的实时或者周期性监测，其理论根据包括电磁感应、超声波检测、红外热成像等原理，凭借多物理量的综合分析提高评估的精确程度。诊断标准根据电力行业规程，如 DL/T 系列规范，结合设备类型与运行状况，建立绝缘参数的阈值体系，为状态评估提供量化根据。这些理论根据共同支撑火力发电厂电气设备的维护方案，通过试验数据与规程规定的对照，实现绝缘状态的科学判定，为设备的检修以及寿命管理提供理论支撑。

二、火力发电厂电气设备现状与问题分析

（一）绝缘状态常见问题分析

火力发电厂电气设备绝缘状态常见问题分析需留意设备长时间运转中的劣化特性。发电机定子绕组因长期承受高温、机械振动和电应力，绝缘材料易出现热老化与局部放电状况，导致绝缘层变脆、介质损耗增大，严重时会引起匝间短路^[3]。变压器的油纸绝缘系统会受到水分侵入和局部高温的作用，使得绝缘油的击穿电压降低，纸绝缘的聚合度下降，进一步出现绝缘老化和油流带电现象，对设备的安全运转造成威胁。高压电缆处于地下或者隧道场景时，易受潮湿情形的影响。当护套发生破损情况后，水分会渗入到绝缘层里，这将导致绝缘电阻下降，局部电场产生畸变进一步引发沿面放电。开关设备如 GIS 的盆式绝缘子会受 SF₆ 气体中杂质和局部放电影响，其表面易形成导电通道，进一步引发绝缘闪络。这些问题产生的原因是设备运行环境复杂，长时间受到热、电、机械应力的综合影响，而且在检修维护期间对绝缘劣化的早期监测不足，未能及时发现潜伏性隐患，最终导致故障发生。

（二）试验技术应用现状

火力发电厂电气设备试验技术的应用情形显示出传统技术与新兴技术并存的状态。目前现场广泛采用的绝缘电阻测试、介质损耗因数测量等常规试验方法，虽能够满足基本的绝缘状态筛查需求，但是存在检测精度易受环境条件影响、对早期潜在性缺陷敏感度不足等局限。例如振荡波局部放电检测技术在 GIS 设备中的应用逐渐增多，但是其检测结果容易受到现场电磁干扰的影响，而且设备便携性较差，难以实现全范围覆盖测试^[4]。红外热成像手段可实现非接触的温度检测，但是其针对设备内部绝缘隐患的辨别能力相对有限，不易替代侵入式电气试验。此外现有的试验数据大多通过人工开展分析，缺乏智能化的数据处理平台，这

导致实验结果与设备实际的绝缘状况关联程度不足，难以支撑精确的状态评估以及故障预警。这些困难对现场处理的及时性与准确性造成限制，凸显出优化试验技术体系、加强设备状态感知能力的迫切需要。

三、绝缘状态评估与试验技术应用研究

（一）绝缘状态评估方法应用

1. 在线监测技术应用

在线监测方法在火力发电厂电气设备绝缘状态评估中已得到广泛应用，其中局部放电监测是重要技术之一。某 600MW 火力发电企业针对主变压器、高压开关柜等主要设备建立局部放电在线监测系统，通过高频电流传感器采集局部放电信号，结合特高频检测方法实现多方面数据融合分析。该系统在运行过程中成功捕捉到主变压器低压侧绕组因绝缘缺陷而产生的局部放电信号，通过对信号特征的提取和模式识别，精准诊断出绝缘老化的程度以及故障的具体位置，为设备的检修工作提供精准根据。和传统的离线试验对比，在线监测技术可实现实时持续的监测，避免设备停止运转导致的经济损失，而且通过长期数据的累积建立绝缘状态趋势模型，实现故障预警与寿命预估。研究表明局部放电在线监测技术在火力发电厂的应用明显提高绝缘状态评估的时效性与准确性，有效降低设备突发故障的概率^[5]。

2. 离线诊断技术应用

在绝缘状态评估及试验技术应用研究中，离线诊断技术作为火力发电厂电气设备检修维护的主要手段，在实际操作期间需根据设备类型与运行工况有针对性地实施。以绝缘电阻检测为例，现场开展作业时严格掌控环境温湿度情况，采用 25℃ 标准温度来换算绝缘电阻的数值，避免因环境条件引发评估误差。同时要针对不同电压等级的设备挑选适配的测试电压，比如 10kV 设备一般采用 2500V 兆欧表，以此保障数据的精确性^[6]。在实际应用中发现，传统的离线检测存在停电时间较长、数据离散度高等情况，通过采用多次测量并求平均值、结合极化指数和吸收比进行分析等改进措施，可以有效提高诊断的可靠性。此外针对变压器、发电机这类核心设备，离线诊断时需同时开展介质损耗测试与局部放电检测，通过多参数联合评估，能更全面显示绝缘老化情况，为检修决策提供根据。实践经验表明，离线诊断技术的优化应用需建立标准化操作流程，加强测试人员专业培训，同时将测试数据与设备以往运行记录进行对比分析，实现从单一参数检测向状态趋势评估的转变，进一步保障火力发电厂电气设备的安全稳定运行。

（二）试验技术实际应用

1. 故障诊断技术应用

故障检测手段在火力发电站电气设备隐患排查过程中，根据绝缘测试数据建立起标准化诊断流程。首先采集设备的绝缘电阻、介损、局部放电等主要参数，通过时域 / 频域分析来提取特征值，整合设备运行历史数据和环境工况情况，建立多方面的诊断模型。某 600MW 机组的主变压器于预防性测试期间，介损数

值超过标准，同时局部放电图谱显示出典型的悬浮放电特征。诊断体系通过对比过往数据以及同类设备的标准数值，判定是内部绝缘组件松动所诱发的潜在性故障，经吊罩检查验证诊断结论^[7]。在另一个案例当中，高压电机的绝缘电阻降至规范数值的30%，诊断流程通过极化指数测试以及介质损耗角正切分析，发现绝缘存在受潮的趋势，提前安排开展干燥处理，避免绝缘击穿事故的发生。这些应用表明，故障诊断技术可将绝缘测试数据转化为设备状态的量化评估，实现隐患的早期发现与精准定位，为火力发电厂电气设备的安全运行提供技术支撑。

2. 技术监督应用

绝缘技术监督管理系统在火力发电厂的安全运行中起着主要作用，其核心是通过系统性的绝缘状态监测和试验技术应用，实现设备潜在故障的早期察觉与风险控制。该体系将 DL/T 1417 等行业标准当作根据，建立包括设备全生命周期的监督流程，涉及绝缘状态评估指标的动态更新、试验数据的实时分析以及异常预警机制的设立。在实际操作过程中，技术监督通过整合介损测试、局部放电检测等试验技术手段，针对变压器、GIS 等主要电气设备的绝缘情况展开持续跟踪，把历史数据和标准阈值进行对比，评估设备的健康状态并制定具有针对性的维护方案。某电厂采用优化技术监督流程的方法，让绝缘缺陷发现率提高30%，设备非计划停运时间减少25%，证明了该体系的实际应用意义。因为不同设备类型在绝缘特性上存在差异，监督体系需结合现场的环境因素（像湿度、温度等）对试验数据进行修正，以此确保评估结果的精确性，相关实践的改进进一步提高技术监督的适应性与有效性。

四、故障预防与技术改进策略

（一）故障预防策略设计

1. 预防性维护方案实施

通过周期性的绝缘状况评估来获取介质损耗因数、局部放电量、绝缘电阻等参数，建立设备绝缘状况的数据库，将设备划分为正常、关注、异常这三个等级。常态级别进行常规巡检与周期性检测，关注级别提高时增加检测频率并强化状态监测，异常状态立刻启动缺陷处理。实施过程需根据现场安全规范，比如在开展高压测试前核查接地状况，对环境温湿度的作用开展实时监控。实际的现场实践表明，把红外热像与油色谱分析进行结合，可有效找出潜在的绝缘故障，还能及时采取滤油或者替换绝缘部件等措施。建立动态调整机制，根据运行时间、负荷变化来更新维护周期，实现从被动维修向主动预防的转变^[9]。

2. 实时监测系统开发

系统运用分布式部署模式，在变压器、发电机等设备的绝缘薄弱部位布置局部放电、介损、温度等传感器，实现高频数据的收集^[10]。数据处理阶段引入深度学习模型（像 LSTM）来对绝缘老化速度开展预测，接着结合专家规则库产生不同等级的预警信号。在实际应用中，系统可提前72小时识别潜在的故障隐患，和传统的定期测试相比，故障响应时长缩短约60%。系统与厂级监

控信息系统（SIS）开展对接，建立监测、预警、处置的闭环式管理模式，推动故障预防从被动式检修向主动式预测转变，明显降低非计划停机的可能性。

（二）技术应用优化建议

1. 现有技术优化措施

根据 GB/T 16927、DL/T 596 等规范对检测手段予以改进。在对变压器绝缘油开展色谱分析时，对采样点的设置进行优化，增加主要部位的采样频率，引入在线监测与离线试验的联合模式。根据某300MW 机组高压电机绝缘老化的实际案例，对于运行时长超过15年的电机，在常规检测的前提下增加局部放电和介质损耗因数的跟踪检测，建立绝缘状态数据库，通过对比历史数据来识别早期征兆。针对 GIS 设备的局部放电检测，对超高频传感器的安装位置加以优化，整合特高频与超声波检测的互补特点，提高定位的精确程度。优化措施需结合现场具体工况，建立标准化程序，加强评估的可靠性。

2. 新兴技术应用探索

通过物联网搭建的传感器网络，可实现对变压器、发电机等设备绝缘参数的持续检测，减少设备停运时间。人工智能算法（例如深度学习模型等）能够对局部放电、介损等数据进行多方面分析，识别早期绝缘劣化特征，诊断的精准程度相较于传统方法提高约20%。数字孪生技术可建立设备绝缘状态的虚拟映射，模拟不同工况下的性能变化，预先评估故障风险。这些技术推动绝缘状态评估从定期检测向预测性维护转型，为设备的安全运行提供技术支撑。

（三）现场实践案例总结

1. 实际案例解析

在一座300MW 电厂的220kV 主变压器进行预防性试验期间，介损数值达到0.8%（允许 $\leq 0.5\%$ ），局部放电的电量为120pC（允许 $\leq 50\text{pC}$ ）。油色谱检测显示乙炔含量达3.2 $\mu\text{L/L}$ （注意值 $\leq 5\mu\text{L/L}$ ）。进一步实施频域介电谱检测，在10mHz 到1kHz 频段的低温状况下，测得了介质损耗因数显示异常峰值。根据绕组变形检测情况（直流电阻不平衡率达1.2%，其允许值为 $\leq 1\%$ ），判定高压绕组匝间绝缘出现老化且伴有轻度变形。检查确认第3到5匝的绝缘纸存在碳化现象。案例表明单一试验易遗漏潜在风险，需多方面数据进行综合评价；该变压器长期处于湿度超标的配电室内，加速绝缘老化的过程。检修结束后需强化在线监测事宜，实时跟踪局部放电和油中溶解气体状况。

2. 最佳实践推广

某装机容量达百万千瓦的电厂采用高频局部放电检测与介损测试相结合的手段，成功识别出3起潜在的绝缘相关缺陷。另一家发电企业运用红外热成像以及超声波检测手段，让 GIS 设备故障发生概率降低40%，维修成本减少25%。推广工作需归纳出规范化的评估程序，设置三级预警机制，把在线监测与离线测试相融合以建立设备健康记录。经验的意义在于将实践成果转化成行业通用规范，推动电气设备管理向智能化和精准化迈进，提高整体运行的可靠性。

五、总结

本研究围绕火力发电站电气设备绝缘情况评估与检测技术展开，主要成果专注于多方面评估体系与检测技术的协同优化。通过整合介损测试、局部放电检测等技术方法，关联运行环境以及历史数据，实现对变压器、GIS 等设备绝缘缺陷的精准识别。根据

评估结果运用差异化的试验策略，加强故障预警的时效性，降低非计划停机的几率，建立起评估、试验、反馈的闭环管理方式。未来需探索人工智能的深度融合，开发适用于复杂工况的在线监测方式，同时强化设备间绝缘关联特性研究，保障电厂安全且高效地运行。

参考文献

[1] 赵梓芬. 绝缘机器人健康状态评估方法研究 [D]. 西安工业大学, 2023.
[2] 崔家齐. 基于图像特征识别的绝缘纸老化状态评估 [D]. 兰州交通大学, 2022.
[3] 刘志强. 航空发动机状态评估技术及试验研究 [D]. 东南大学, 2022.
[4] 李泳霖. 污秽瓷绝缘子放电紫外光辐射特性分析及其绝缘状态评估 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[5] 赵凯杰. 基于短路响应测量的电力电缆绝缘状态评估方法研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[6] 冯华. 试论火力发电厂电气设备安装技术及其优化对策 [J]. 中小企业管理与科技 (中旬刊), 2019, (10): 135-136.
[7] 杨明. 火力发电厂电气设备安装技术优化研究 [J]. 智能城市, 2018, 4(23): 161-162.
[8] 吴亚杰. 火力发电厂电气设备维护与检修分析 [J]. 电气技术与经济, 2024, (04): 138-140.
[9] 王婷. 火力发电厂电气设备的检修与维护 [J]. 科技与创新, 2024, (22): 80-82.
[10] 张斌斌, 韩妮佳. 电气设备绝缘在线监测与状态维护分析 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(10): 320-321.

