高压电气设备状态检测与故障诊断技术应用研究

范哲友

国电投宁夏能源铝业有限公司　宁夏　银川　750004

摘　要：高压电气设备对电力系统稳定运行至关重要。状态检测技术涵盖传统绝缘检测、红外热成像、超声波、局部放电在线监测和气体成分检测等，各有优势与要点，能及时发现设备潜在问题。故障诊断技术包括阈值判断、神经网络、模糊理论和故障树分析等方法。阈值判断通过数据与标准比对诊断；神经网络可自适应学习，精准识别故障；模糊理论解决非线性关系界定；故障树分析能清晰呈现故障因果。这些技术综合应用，可有效提高高压电气设备故障诊断的准确性和效率，保障设备可靠运行。

关键词：高压电气设备；状态检测；故障诊断技术；应用研究

引言：在现代电力系统中，高压电气设备是保障电力稳定供应的基石，如变压器、开关柜等承担着电能传输、分配和控制的重任。然而，高压电气设备长期在高电压、大电流环境下运行，易受电气、机械、热和环境等因素影响，出现绝缘老化、过热等故障。一旦发生故障，不仅影响电力供应，还可能引发安全事故，造成巨大经济损失。因此，对高压电气设备进行有效的状态检测和故障诊断十分必要。

1 高压电气设备基本概念

高压电气设备在电力系统中占据着核心地位，是保障电力稳定传输和分配的关键要素。一般而言，额定电压在一千伏及以上的电气设备被定义为高压电气设备，像变压器、开关柜等都属于此范畴。从功能角度来看，高压电气设备主要用于电力系统中电能的传输、分配和控制。变压器能够将一种电压等级的交流电能转换成另一种电压等级，以满足不同负载的需求；开关设备负责电路的开合操作，实现对电能的分配和保护；测量设备则用于监测电力系统的运行状态，为运行人员提供必要的参数。高压电气设备具有一些独特的运行特点，由于其电压等级高、电流大，运行时会产生较强的电磁场，这不仅会对周围环境产生一定影响，也会影响设备本身的性能。同时，这类设备对绝缘性能要求极高，一旦绝缘出现损坏，就可能引发短路或电击等严重事故[1]。此外，高压电气设备的操作和维护必须严格遵守安全规程，以防止人员触电或设备损坏。鉴于高压电气设备在电力系统中的重要性，对其进行科学管理和维护至关重要。在日常运行过程中，需要密切关注设备的运行状态，及时发现并处理潜在的安全隐患，确保设备始终处于良好的运行状态，为电力系统的安全稳定运行提供坚实保障。

2 高压电气设备状态检测技术

2.1 传统绝缘检测技术要点

传统绝缘检测技术历经长期工程实践检验，具有方法成熟、判据明确与成本可控的突出优势，是高压电气设备状态检测体系的基础支撑，其应用必须严格遵循规范化操作要点。（1）绝缘电阻测量要点：采用兆欧表测量前充分放电，按设备电压等级选择测量电压，读取 15 秒与 60 秒绝缘电阻值，吸收比不低于 1.3 方为合格。（2）介质损耗因数测试：通过西林电桥测量介质损耗，测试电压不超过额定电压的 1.1 倍，损耗值与历史数据比较增幅超过 30%即判定绝缘受潮劣化。（3）泄漏电流试验要点：在直流试验电压下测量泄漏电流，逐级升压并每级停留 1 分钟，泄漏电流不平衡系数大于 2 时应查明原因后方可继续试验。（4）交流耐压试验控制：严格按规程确定试验电压与持续时间，升压过程平缓均匀，耐压前后绝缘电阻对比下降不超过 30%，防止发生绝缘击穿事故。（5）检测数据综合研判：建立设备绝缘历史档案，采用纵横比对法分析试验数据变化趋势，结合温度湿度修正测量结果，确保诊断结论准确可靠。

2.2 红外热成像检测应用

红外热成像检测凭借非接触、不停电与直观高效的独特优势，已成为高压电气设备过热缺陷普查的重要手段，其检测效果高度依赖于规范化的作业流程与精准的温升分析。（1）检测时机科学安排：选择负荷高峰期与环境温度稳定的时段开展检测，要求负荷率不低于 30%，避开阳光直射与风雨天气，确保测温数据真实有效。（2）发射率参数准确设定：根据设备材质设定对应发射率，金属氧化层取 0.7 至 0.9，涂漆部位取 0.9 至

0.95，消除参数失准引起的温度测量偏差。（3）缺陷判定分级处置：采用相对温差法与同相对比法分析热点，温差超过 15 摄氏度判定为严重缺陷，超过 30 摄氏度立即安排停电检修消缺。（4）检测范围全面覆盖：重点检测接头、线夹、套管与断路器触头等易发热部位，巡检周期按设备等级确定，重要设备每周检测，一般设备每月一次。（5）热像档案动态管理：建立设备热像图谱数据库，纵向比对历史温升趋势，横向比对同类设备温差，实现缺陷早期预警与检修决策精准支撑。

2.3 超声波检测技术优势

超声波检测技术在高压电气设备状态检测中优势显著。它具有非接触式检测的特点，无需与设备直接接触，避免了对设备正常运行的干扰，也降低了检测过程中对设备造成损坏的风险，适用于各种复杂环境下的高压电气设备。检测灵敏度高是其另一大优势，能够检测到设备内部微小的缺陷和损伤，如早期的绝缘劣化、局部放电等问题，可在故障萌芽阶段及时发现，为设备的维护和检修提供依据，有效预防重大事故的发生[2]。检测速度快，能在短时间内完成对大面积设备的检测，提高了检测效率，减少了设备停机检测的时间，降低了对电力供应的影响。该技术对人体无害，检测过程中不会产生辐射等危害人体健康的因素，保障了检测人员的安全。而且超声波检测技术不受设备表面状况的影响，即使设备表面存在污垢、油漆等，也能准确检测到内部缺陷，具有很强的适应性和可靠性。

2.4 局部放电在线监测方法

局部放电是高压电气设备绝缘劣化的重要征兆，对其进行在线监测能及时发现设备潜在故障，保障设备安全运行。脉冲电流法是常用的监测方法，通过检测阻抗、接地线或绕组中的脉冲电流获取视在放电量，灵敏度高且能定量，但易受电磁干扰，需结合滤波技术提升抗噪能力，常用于变压器、电缆接头等设备的在线监测。特高频检测法利用局部放电激发的特高频电磁波，通过 UHF 传感器接收信号，抗干扰能力强，适合在强电磁环境下对 GIS、变压器等设备内部放电进行定位。暂态地电压检测法通过电容耦合传感器测量金属外壳上的电压脉冲，适用于开关柜等封闭设备的局部放电检测，在 10kV-35kV 高压开关柜触头接触不良监测中应用较多。高频电流互感器法在设备接地线上套装 HFCT 检测高频电流，安装便捷、抗干扰强，常用于电缆、GIS 等设备接地线监测。综合利用多种方法，可提升监测准确性和可靠性。

2.5 气体成分检测技术应用

气体成分检测技术在高压电气设备状态检测中应用广泛且成效显著。在变压器检测方面，当变压器内部出现故障时，绝缘材料会因过热、放电等分解产生多种气体，如氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等。通过检测这些特征气体的成分和含量，能准确判断故障类型和严重程度。例如，当乙炔含量急剧增加，可能预示存在严重的放电故障。对于 SF_6电气设备，气体成分检测同样关键。SF_6气体在正常运行时化学性质稳定，但在电弧、电晕等作用下会分解产生多种低氟化物和金属氟化物。检测这些分解产物的含量和种类，可评估设备内部的绝缘状况和运行状态[3]。若检测到大量 SO_2、H_2S 等气体，表明设备可能存在绝缘故障。气体成分检测技术还能实现对设备的实时在线监测，通过安装气体传感器，持续采集气体数据并传输至监测系统，运维人员可及时了解设备状态，提前制定维护计划，避免故障扩大化，保障高压电气设备的安全稳定运行。

3 高压电气设备故障诊断技术应用

3.1 阈值判断诊断法

阈值判断诊断法作为高压电气设备故障诊断中最基础且应用最广泛的手段，其核心在于将检测数据与标准限值进行比对以判定设备健康状态，必须建立科学严谨的比对规则。（1）基准阈值科学确定：依据国家与行业预防性试验规程，结合设备电压等级与绝缘材料特性，划定各项状态量的注意值与警示值作为诊断基准线。（2）检测数据规范采集：严格遵循测试仪器操作导则，记录试验环境温度与湿度，对绝缘电阻与泄漏电流等参数进行温度换算，确保数据可比性。（3）绝对阈值越限评估：将换算后的实测数据直接与规程注意值对比，一旦测量结果超过警示限值，即判定设备存在明显缺陷并发出告警指令。（4）纵向趋势阈值分析：建立设备历史数据档案，计算相邻两次测试数据的相对变化率，当数据变化幅度超过预设阈值时，判定设备性能劣化。（5）综合阈值协同诊断：将不同试验项目的阈值判断结果交叉关联，如绝缘电阻与介质损耗协同评估，消除单一阈值误判，提高诊断准确度。

3.2 神经网络故障诊断

神经网络故障诊断在高压电气设备领域展现出强大优势与广泛应用前景。它具备高度的自适应性和自学习能力，能依据大量的设备运行数据进行自主学习和训练，精准捕捉数据中的复杂规律与特征。在故障诊断过程中，神经网络可对高压电气设备的各类状态信息，如

电压、电流、温度等进行综合分析。它能快速且准确地识别设备是否处于故障状态，还能进一步判断故障类型和位置，为维修人员提供明确的检修方向[4]。与传统诊断方法相比，神经网络故障诊断不受设备复杂结构和运行环境的限制，能有效处理非线性、不确定性问题。例如在变压器故障诊断中，它可根据油中溶解气体的成分和含量，准确判断变压器内部是否存在过热、放电等故障。随着技术的不断发展，神经网络故障诊断将与大数据、云计算等技术深度融合，进一步提升故障诊断的准确性和效率，为高压电气设备的可靠运行提供更有力的保障。

3.3 模糊理论诊断技术应用

模糊理论诊断技术有效解决了高压电气设备故障特征与绝缘状态之间非线性关系的模糊界定问题，为复杂工况下的设备健康评估提供了智能化路径，其应用必须构建科学的推理体系。（1）模糊隶属函数构建：根据设备绝缘参量分布特征，选取合适的隶属函数，将绝缘电阻、介质损耗等定量数据转化为 0 至 1 之间的隶属度，实现精确量的模糊化处理。（2）故障特征权重分配：利用层次分析法确定局部放电、局部过热等不同故障征兆的权重系数，权重之和等于 1，突出核心征兆对诊断结果的支配作用。（3）模糊推理规则设计：基于专家经验构建“如果征兆则故障”的多维规则库，规则数量覆盖主要故障类型与组合模式，确保推理逻辑贴合设备实际劣化机理。（4）模糊矩阵合成运算：将实测征兆隶属度向量与权重矩阵进行合成运算，采用加权平均模型计算各故障类型的隶属度，避免极值信息淹没导致的诊断失真。（5）诊断结果清晰化输出：按最大隶属度原则对模糊结论进行去模糊化处理，输出单一明确故障类型，当最高与次高隶属度差值小于 0.1 时触发多故障预警。

3.4 故障树分析诊断

故障树分析诊断在高压电气设备故障诊断领域具有重要价值。它以设备的特定故障事件作为顶事件，从系统的整体出发，通过对设备的工作原理、结构和运行环境等多方面进行细致剖析，找出导致顶事件发生的各种可能原因，构建起一个层次分明、逻辑严谨的树状结构。在构建故障树时，要充分考虑各种潜在因素，如电气元件老化、机械部件磨损、环境因素影响以及人为操作失误等。对故障树进行定性分析，能够找出导致顶事件发生的所有最小割集，明确系统的薄弱环节，为预防性维护提供方向。而定量分析则可计算出顶事件发生的概率以及各个底事件的重要度，从而评估设备的可靠性水平[5]。以高压变压器故障诊断为例，若将变压器过热作为顶事件，可能导致该故障的中间事件有绕组短路、铁芯损耗过大等，底事件则包括绝缘老化、散热风扇故障等。通过故障树分析，能清晰呈现各故障因素之间的逻辑关系。维修人员依据分析结果，可以快速定位故障根源，制定科学合理的维修方案，减少故障排查时间，提高设备的维修效率，保障高压电气设备的稳定运行。

结语

未来，高压电气设备状态检测与故障诊断技术将迎来更广阔的发展空间。检测技术会朝着高精度、高灵敏度、智能化方向迈进，多种检测技术融合将成为趋势，以获取更全面准确的设备状态信息。故障诊断方法会不断创新，人工智能、大数据等技术将深度融入，进一步提升故障诊断的准确性和及时性。同时，在线监测系统将更加完善，实现对设备的实时、远程监测与诊断，为设备的全寿命周期管理提供有力支持。此外，随着电力系统的不断发展，高压电气设备的结构和运行环境会更加复杂，对检测与诊断技术的适应性和可靠性提出更高要求，需持续探索和研究，以保障电力系统的安全稳定运行。

参考文献

[1] 张恩溥, 张静. 变电站高压电气试验设备故障运行状态检测技术研究 [J]. 电气技术与经济,2026,(6):380-383.

[2] 谈志兵, 梁德平, 黄磊. 高压电气设备局部放电检测与故障诊断技术分析 [J]. 科学界,2026,6(6):137-139.

[3] 刘璐璐. 面向高压电气设备绝缘性能的在线检测技术研究 [J]. 实验室检测,2025,3(20):74-76.

[4] 谢兆林. 高压电气设备柜故障诊断技术的应用研究 [J]. 能源新观察,2024,(12):45-47.

[5] 张红彬, 黄明辉, 乔亚飞. 高压电气设备局部放电在线监测技术与应用 [J]. 科技创新与应用,2025,15(17):182-185.