

发电厂变配电设备状态监测与故障诊断方法

朱丽颜

大唐山西发电有限公司太原第二热电厂 山西 太原 030041

摘要：发电厂变配电设备状态监测与故障诊断技术是确保电力系统稳定运行的关键。该技术通过传感器实时收集设备运行数据，利用信号处理技术分析设备状态，及时发现潜在故障。故障诊断方法包括振动信号诊断、油中气体分析、红外监测等，可精确定位故障点并预判故障程度。结合信息技术和智能技术，实现远程监控与诊断，提高诊断效率和准确性。此方法的应用有助于减少停电时间，保障电力供应质量，对提升发电厂运行的安全性和可靠性具有重要意义。

关键词：发电厂变配电设备；状态监测；故障诊断方法

引言：随着电力工业的不断发展和智能电网建设的深入推进，发电厂变配电设备的运行稳定性和安全性成为确保电力供应质量的关键。传统的定期检修模式已难以满足现代电力系统对设备可靠性和经济性的高要求。因此，开展发电厂变配电设备的状态监测与故障诊断研究，实现设备的预知性维护和智能化管理，对于提高电力系统运行效率、降低运维成本具有重要意义。本文将深入探讨相关技术方法，旨在为电力行业的设备管理工作提供有益的参考。

1 发电厂变配电设备概述

1.1 变配电设备分类与功能

变配电设备是发电厂电力系统的核心组成部分，承担着电能的变换、分配与控制重任，其分类及功能如下：（1）变压器。作为电能转换的关键设备，主要功能是改变电压等级。通过电磁感应原理，将发电机输出的低压电升压至高压以减少输电损耗，或把高压电降压至适宜等级供厂用设备及用户使用，确保电能高效传输与合理分配。（2）开关设备。包括断路器、隔离开关等，是电力系统的“闸口”。断路器可在正常运行或故障时快速切断电路，保护设备和系统安全；隔离开关则用于隔离带电部分，保障检修工作的安全，二者配合实现电路的通断控制。（3）互感器。分为电流互感器和电压互感器。电流互感器将大电流转换为小电流，电压互感器将高电压转换为低电压，便于测量仪表、继电保护装置等安全准确地获取电气参数，为系统监控和保护提供基础数据。（4）保护装置。如继电保护装置、熔断器等，是设备和系统的“安全卫士”。能实时监测电力参数，当出现短路、过负荷、过电压等故障时，迅速发出指令切断故障电路，防止故障扩大，保障设备和系统的稳定运行。

1.2 变配电设备运行原理与特点

（1）各设备的运行原理简述：变压器基于电磁感应定律，通过原副线圈的匝数比实现电压变换；开关设备依靠机械操作或电磁作用完成触头的分合，断路器还具备灭弧功能；互感器利用电磁感应或电容分压原理实现信号转换；保护装置通过检测电气量的异常变化，触发预设的保护动作。（2）设备在发电厂中的地位与作用：这些设备是发电厂电能输出的“枢纽”。变压器连接发电与输电环节，决定电能传输效率；开关设备控制电力潮流，保障系统灵活运行；互感器是监测与保护的“桥梁”；保护装置则是防止事故、维持系统稳定的最后一道防线，共同确保发电厂安全、可靠、高效地向电网输送电能。

2 发电厂变配电设备状态监测的关键技术

2.1 信号采集技术

（1）传感器类型与选择原则。常用传感器类型需根据监测参数特性划分：温度监测多采用热电偶、光纤光栅传感器，前者适用于高温环境，后者抗电磁干扰能力强；振动监测以压电加速度传感器为主，可捕捉设备机械振动的微小变化；局部放电监测则常用超高频（UHF）传感器和超声波传感器，分别针对不同频段的放电信号。选择原则需遵循适配性（如高压设备优先选绝缘型传感器）、精度与灵敏度（满足微弱信号检测需求）、环境耐受性（抵御粉尘、湿度、电磁干扰等）及经济性（平衡监测成本与设备重要性）。（2）信号采集方法与采样策略。信号采集方法分为在线实时采集与离线周期性采集：关键设备（如主变压器）需采用在线采集，通过固定传感器持续获取数据；次要设备可采用离线采集，定期人工巡检记录。采样策略需结合信号特性设计：对稳态信号（如温度）采用等间隔采样，采样频

率通常为信号最高频率的2~5倍；对瞬态信号（如短路冲击产生的振动）需采用高频触发采样，确保捕捉突变过程。同时，需设置采样时长冗余，避免遗漏关键特征（如变压器铁芯谐振的周期性信号）^[1]。

2.2 数据传输技术

（1）数据传输方式。有线传输以光纤、以太网为主，具有传输速率高（光纤可达10Gbps以上）、抗干扰能力强的优势，适用于站内固定设备的大规模数据传输，但布线成本高、灵活性差。无线传输包括LoRa、5G、Wi-Fi等技术：LoRa适用于低速率、长距离传输（如厂区内分散设备），功耗低且覆盖范围广；5G则支持高速率、低时延的实时传输，满足动态监测需求，但受基站覆盖限制。实际应用中常采用“有线为主、无线为辅”的混合模式，平衡传输性能与部署成本。（2）数据完整性与安全性保障。数据完整性通过校验机制实现，如采用CRC循环冗余校验检测传输错误，对丢失数据采用插值法或时间序列预测法补全。安全性需从传输层与应用层双重防护：传输层采用加密协议（如AES-256）防止数据泄露；应用层通过访问权限管理、数据脱敏技术（如设备ID匿名化）限制非授权操作，同时定期进行传输链路的抗干扰测试（如电磁兼容试验），避免恶意攻击或环境干扰导致的数据篡改。

2.3 数据处理与分析技术

（1）数据预处理与特征提取。预处理旨在消除噪声与异常值：采用滑动平均法平滑高频噪声，通过 3σ 准则识别并剔除异常数据（如传感器故障导致的跳变值），对缺失数据采用基于相关性的插值填充。特征提取需针对设备故障模式筛选关键指标：如变压器油中气体分析（DGA）提取甲烷、乙炔等特征气体浓度；振动信号提取峰值、峭度、均方根等时域特征，为后续分析奠定基础。（2）常用的数据处理方法。频谱分析通过傅里叶变换将时域信号转换为频域，识别振动、噪声中的特征频率（如轴承故障的特征频率），适用于稳态信号分析。相关分析用于研究变量间的关联性，如通过分析变压器油温与负荷的相关性判断散热系统是否正常。小波分析具备多分辨率特性，可同时捕捉信号的时域与频域特征，尤其适用于非平稳信号（如局部放电脉冲、电机启动冲击信号）的故障定位。此外，机器学习方法（如支持向量机、神经网络）正逐步应用于数据分类与预测，通过训练模型实现设备状态的智能评估^[2]。

3 发电厂变配电设备故障诊断方法与技术

3.1 故障信号特征量选取

（1）不同故障类型的特征量分析。变压器故障中，

绝缘老化可通过油中糠醛含量、介损因数（ $\tan\delta$ ）表征；绕组变形则对应短路阻抗变化率、振动信号的100Hz谐波幅值。开关设备故障里，断路器机械卡涩表现为分合闸时间延长、操作机构电流异常波动；触头过热可通过红外测温的温升速率、接触电阻值判断。互感器故障中，电流互感器匝间短路伴随二次侧电流畸变，电压互感器铁芯饱和则体现为励磁电流突增、波形失真。（2）特征量的选择与优化。选择需遵循敏感性（如局部放电量对绝缘缺陷的敏感程度）、特异性（如乙炔气体是电弧放电的特异性指标）、可测性（优先选取易通过传感器获取的参数）原则。优化可通过主成分分析（PCA）降维，剔除冗余特征（如温度与负荷的强相关特征）；采用互信息法筛选与故障关联度高的特征量，提升诊断效率，例如在变压器故障诊断中，可从20余项特征量中优化保留5~8项核心指标。

3.2 故障诊断方法

（1）基于规则的故障诊断。以专家经验和行业标准为基础，建立“if-then”逻辑规则库。例如，当变压器油中乙炔含量 $>5\mu\text{L/L}$ 且总烃 $>150\mu\text{L/L}$ 时，判定为电弧放电故障。该方法简单直观、响应快速，适用于常见故障（如断路器拒动）的初步诊断，但对复杂故障（如多因素耦合故障）的适应性较差，规则库需定期更新以覆盖新故障模式。（2）基于模型的故障诊断。通过构建设备正常运行的数学模型（如变压器等值电路模型、电机振动力学模型），将实测数据与模型预测值对比，差值超过阈值则判定故障。例如，基于有限元模型计算开关设备触头温度场分布，与红外实测温度对比定位过热区域。该方法诊断精度高，但建模难度大，对非线性、时变特性强的设备（如电抗器）适用性有限^[3]。（3）基于人工智能的故障诊断。神经网络通过多层非线性映射学习故障特征，适用于变压器、GIS等设备的多类故障分类，如采用BP神经网络识别绝缘老化、局部放电等7类故障，准确率可达90%以上。支持向量机（SVM）在小样本数据下表现优异，可有效诊断互感器的早期微弱故障。深度学习（如卷积神经网络）则能自动提取振动、图像等非结构化数据的深层特征，进一步提升复杂故障的诊断能力。

3.3 信息技术在故障诊断中的应用

（1）大数据分析云计算的支持作用。大数据分析可处理海量监测数据（如单台变压器年数据量达TB级），挖掘隐藏的故障关联规律（如负荷波动与绝缘老化的滞后关系）。云计算提供弹性算力支持，通过分布式计算快速完成频谱分析、深度学习模型训练等耗时任

务,同时实现多厂站数据的集中存储与共享,为跨区域设备状态对比分析奠定基础。(2)远程监测与诊断系统的构建与应用。系统由前端传感器、边缘计算节点、云端诊断中心组成:边缘节点预处理数据并筛选异常信号,减少传输负荷;云端集成专家系统与AI诊断模型,实现实时诊断与故障预警。应用中,运维人员可通过移动端查看设备状态评估报告,专家远程指导故障排查,如对跨省电厂的GIS设备进行远程局部放电定位,缩短故障处理周期30%以上。

4 发电厂变配电设备状态监测与故障诊断技术的挑战与对策

4.1 技术挑战

(1)数据处理的复杂性与实时性要求。变配电设备运行产生的数据具有多源性与异构性,涵盖振动、温度、油色谱等数十种参数,且包含大量噪声与冗余信息,数据融合难度大。同时,电力系统故障往往突发且影响范围广,要求监测系统在毫秒级时间内完成数据解析与故障预警。传统集中式数据处理架构难以应对海量数据的并发处理需求,易导致诊断延迟,错失最佳故障处理时机。(2)高精度传感器的研发与应用难题。设备运行环境恶劣,高压、强电磁干扰、粉尘湿度等因素对传感器性能构成严峻考验。现有传感器存在精度不足(如局部放电检测误差超10%)、稳定性差(高温环境下漂移率达8%/年)等问题,难以捕捉设备早期微弱故障信号。此外,部分关键参数(如GIS设备内部气体微泄漏)缺乏有效测量手段,依赖间接推算易产生诊断偏差。(3)故障诊断模型的泛化能力与适应性。当前诊断模型多基于特定设备样本训练,对新型设备或复杂工况的适配性差。例如,针对老旧变压器开发的模型在智能化变压器上的故障识别率下降40%以上。同时,设备故障模式随运行年限动态演变,固定模型难以自适应更新,导致“漏诊”“误诊”现象频发,严重影响诊断可靠性。

4.2 对策与建议

(1)加强技术研发与创新,提升设备性能。重点突破抗干扰传感器技术,研发光纤光栅、微波谐振式传感器,将测量精度提升至 $\pm 0.5\%$ 以内,耐受电压等级提高至

500kV以上。构建“边缘计算+云计算”混合架构,边缘节点实现数据实时预处理(延迟 $< 50\text{ms}$),云端完成深度分析,提升数据处理效率。引入迁移学习算法,使模型在跨设备场景下的故障识别准确率保持在90%以上。

(2)完善监测与诊断体系,提高诊断准确性。建立多维度数据校验机制,通过卡尔曼滤波、小波去噪等技术降低数据噪声,采用关联分析剔除冗余信息。构建“三级诊断”体系:一级由AI模型自动初诊,二级结合设备历史数据复核,三级引入专家决策,形成闭环诊断流程。例如,变压器故障诊断需同步验证油色谱、振动、介损数据,确保诊断结果交叉印证^[4]。(3)推动技术标准化与规范化,促进技术应用与推广。制定传感器接口、数据传输协议等国家标准,统一不同厂商设备的通信规范,实现数据互联互通。建立故障案例库与模型评测体系,明确诊断技术的验证标准。开展跨区域技术培训与示范工程,在大型发电集团推广成熟方案,加速技术成果转化,形成“研发-应用-迭代”的良性循环。

结束语

综上所述,发电厂变配电设备状态监测与故障诊断方法的研究与应用,对于提升电力系统的稳定性、安全性和经济性至关重要。随着传感技术、数据处理技术、人工智能技术的不断进步,设备状态监测的准确性和故障诊断的效率将得到显著提高。未来,我们需继续深化技术研究,完善监测诊断体系,推动技术标准化,以促进发电厂变配电设备管理水平的全面提升,为电力行业的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]王志平,刘晓东.电力系统设备状态监测与故障诊断技术研究进展[J].电力系统保护与控制,2020,47(7):61-62.
- [2]王杨.发电厂电气设备运行管理措施分析[J].电气技术与经济,2024,(04):265-267.
- [3]李雪莲.发电厂电气设备运行效率提升策略研究[J].电气技术与经济,2024,(03):229-231.
- [4]杨铸,王瑞,隋洪波.发电厂智能化设备故障诊断方法[J].大众用电,2023,38(11):45-46.