

电力设备在线监测与故障诊断技术研究

诸葛福金

国网山东省电力公司莘县供电公司 山东省临沂市 276000

摘要: 电力设备的安全稳定运行对电力系统的可靠性和经济性具有重要影响。传统的定期检修方式难以满足现代电网对高效、精准维护的需求,而电力设备在线监测与故障诊断技术通过实时监测设备运行状态、识别潜在故障并预测设备健康状况,提高了运维管理的智能化水平。本文从电力设备在线监测技术的基本概念、主要监测手段及其在电网中的应用展开分析,重点探讨温度监测、局部放电监测、振动监测等核心技术及其对设备健康评估的作用。旨在推动电力设备在线监测与故障诊断技术的发展,提升电力系统的安全稳定运行水平。

关键词: 电力设备;在线监测;故障诊断;智能运维;人工智能

1. 引言

电力系统作为现代社会的重要基础设施,其安全稳定运行关系到国民经济的正常运转和人民生活的保障。电力设备是电力系统的重要组成部分,其运行状态的监测与故障诊断直接影响到整个系统的安全性和可靠性。随着智能化技术的发展,电力设备在线监测与故障诊断技术日益受到关注。本文将围绕电力设备在线监测技术、故障诊断技术及其应用等方面展开研究,分析当前技术的进展、挑战及未来发展方向。

2. 电力设备在线监测技术分析

2.1 在线监测技术的基本概念

电力设备在线监测技术(Online Monitoring Technology for Electrical Equipment)是指在设备运行过程中,利用传感器技术、信号处理技术、通信技术和智能数据分析技术,对设备的关键运行参数进行实时监测,以评估设备健康状态、预测潜在故障并提高电力系统运行的可靠性。传统的定期检修方式主要依赖人工巡检和定期维护,由于检修周期较长,设备可能在检测间隔期间发生故障,影响供电安全。

完整的电力设备在线监测系统通常由传感器与数据采集单元、信号处理与数据传输单元、数据分析与故障诊断单元以及智能决策与预警系统等组成。其中,传感器与数据采集单元主要负责获取电力设备的温度、电流、电压、振动、局部放电、油中气体等状态参数,常用的传感器包括红外传感器、光纤光栅传感器、超声波传感器和电磁传感器等。信号处理与数据传输单元对采集到的原始信号进行放大、

滤波、去噪和特征提取,采用小波变换(Wavelet Transform, WT)、快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)等技术进行处理后,通过无线通信或光纤传输方式传送至远程监控中心。数据分析与故障诊断单元则借助人工智能(Artificial Intelligence, AI)、机器学习(Machine Learning, ML)和专家系统(Expert System)等智能算法,对监测数据进行分析,识别异常模式,预测设备故障趋势并生成维护建议。智能决策与预警系统则依据设备健康评估结果触发预警机制(Early Warning Mechanism),并向运维人员发送报警信息,以便及时采取应对措施,避免设备故障导致供电中断。第一,该技术能够提高供电可靠性,通过实时监测设备运行状态,提前识别异常情况,降低设备突发故障的概率,从而减少电力系统的非计划停机。第二,在线监测技术有助于降低运维成本,通过智能分析设备健康状态,减少不必要的定期检修工作,优化维护资源配置,提高设备运维效率。

2.2 主要在线监测技术

根据不同类型电力设备的运行特性,在线监测技术涵盖多个监测对象和方法。当前电力行业主要采用温度监测、局部放电监测、振动监测等核心在线监测技术,以提高设备健康管理水平和运行效率^[1]。温度监测技术在电力设备运行状态评估中具有重要作用,因温度异常往往预示着设备可能存在过载、接触电阻增大、散热不良或绝缘老化等问题。常见的温度监测技术包括红外热成像技术(Infrared Thermography, IRT)、光纤光栅传感器(Fiber Bragg Grating, FBG)和热电偶测量技术。红外热成像技术利用红外摄像机

检测设备表面热辐射特性,生成热成像图像,识别热点区域,广泛应用于变压器、高压开关、母线接头等设备的在线监测。热电偶和热敏电阻技术则基于不同金属材料的温差电动势特性或电阻随温度变化的特性进行温度测量,主要用于电缆、变压器油温等监测应用。

局部放电(Partial Discharge, PD)是电力设备内部绝缘劣化的重要信号,长期局部放电可能导致绝缘击穿,进而引发设备损坏或电力事故。因此局部放电在线监测对于高压开关、GIS、变压器等设备的安全运行至关重要。常见的局部放电监测技术包括超声波检测(Ultrasonic Detection)、超高频(Ultra High Frequency, UHF)检测、脉冲电流法(Pulse Current Method, PCM)和电磁波检测(Electromagnetic Emission Detection)。超声波检测采用超声波传感器测量局部放电过程中产生的高频声波信号(通常在20kHz–300kHz范围内),通过频谱分析判断局部放电的位置和强度。脉冲电流法通过高频电流传感器测量局部放电产生的高频脉冲电流信号,并结合时频分析(Time-Frequency Analysis)技术提取放电特征,实现精准诊断。

振动监测技术主要用于监测电力设备的机械健康状态,特别是发电机、变压器、电动机和高压开关设备等。振动异常可能由机械结构松动、不平衡、轴承磨损等原因引起,若不能及时发现和处理,可能导致设备机械部件的损坏甚至系统性故障。常见的振动监测方法包括加速度传感器(Accelerometer)检测、激光测振技术(Laser Doppler Vibrometry, LDV)和电涡流测量技术(Eddy Current Sensor)。加速度传感器检测采用压电加速度计测量设备振动的加速度信号,并利用快速傅里叶变换(FFT)分析振动频谱,识别设备故障模式。

3. 电力设备故障诊断技术

3.1 故障诊断的基本概念

电力设备故障诊断技术是基于信号处理、数据分析和人工智能等方法,对电力设备运行状态进行监测、识别潜在故障,并评估设备健康状况,以减少非计划停机,提高电网运行的安全性和经济性。现代电力系统规模庞大,设备类型众多,包括变压器、断路器、电缆、发电机等,这些设备长期运行可能因老化、过载、短路、环境因素等发生故障,例如变压器绕组绝缘老化可能引发局部放电,电缆接头接触不良则可能导致温升异常。传统的定期检修方式难以精准掌握设

备健康状况,容易导致维护资源浪费或故障未能及时发现,因此智能化故障诊断技术成为电力设备运维管理的关键。数据采集依赖于各种传感器,如电流互感器、电压传感器、红外热像仪、局部放电检测装置等,通过SCADA(数据采集与监控系统)或PMU(同步相量测量装置)实现远程监测和数据传输。特征提取利用信号分析方法,如快速傅里叶变换(FFT)、小波变换(WT)等,从复杂信号中提取关键信息,如在变压器油色谱分析中, C_2H_2 (乙炔)含量异常升高通常表明绝缘击穿或局部放电故障。模式识别阶段,采用机器学习或基于专家知识的方法对不同故障类型进行分类,并结合历史数据进行健康评估,预测设备剩余寿命,确保维护决策的科学性。

3.2 主要故障诊断技术

目前,电力设备故障诊断技术主要包括基于信号分析、人工智能、专家系统和数据驱动的方法,这些技术各具优势,通常需要结合使用,以提高故障检测的准确性和实时性。基于信号分析的方法通过处理电流、振动、温度、局部放电等信号识别异常特征,例如在滚动轴承故障检测中,频域分析可识别特征频率,如外圈故障频率 $f_o = \frac{n}{2} f_r (1 - \frac{d}{D} \cos \theta)$ (其 n 为滚动体个数, f_r 为转速, d 为滚动体直径, D 为节圆直径, θ 为接触角),小波变换(WT)在输电线路故障检测中用于识别短路和断线故障,提高定位精度。基于人工智能的方法能够从海量数据中自动提取特征,实现智能诊断,如支持向量机(SVM)在变压器油色谱分析中可用于预测故障类型,诊断准确率可达90%以上;CNN(卷积神经网络)可用于红外热成像数据分析,检测高压电缆接头的局部过热现象,提高诊断智能化水平;LSTM(长短时记忆网络)在电力系统暂态稳定性预测中表现优异,可提前识别电压塌陷等故障,提高电网安全性。基于专家系统的方法依赖知识库和推理机制,通过规则推理或模糊逻辑进行故障诊断,例如在SF6断路器泄漏诊断中,当压力下降速率超过0.1MPa/年且湿度高于200 μ L/L时,系统可判定存在泄漏风险,虽然专家系统在知识库完善的情况下表现良好,但其知识获取成本较高,难以适应复杂多变的运行环境,因此在实际应用中常与其他方法结合使用。基于数据驱动的方法强调利用大数据分析技术,从设备运行数据中提取故障特征,例如主成分分析(PCA)可用于风力发电机轴承故障诊断,提高故障分类精度;孤立森林(Isolation Forest)可用于无监督的故障检测,

在变电站设备监测中实现超过 95% 的检测率; 高斯混合模型 (GMM) 可用于电力电子设备的故障分析, 如逆变器开关故障检测, 提高诊断适应性。

4. 电力设备在线监测与故障诊断技术的挑战与发展趋势

4.1 电力设备面临的现存挑战

尽管电力设备在线监测与故障诊断技术在提升电网安全性和运维效率方面发挥了关键作用, 但在实际应用中仍面临诸多挑战。首先, 监测数据的准确性和完整性是技术落地的重要难点。电力设备运行环境复杂, 传感器可能受到外部电磁干扰、温度波动、机械振动等因素的影响, 导致数据采集误差较大, 影响监测和诊断的可靠性。其次, 大数据处理与智能分析能力不足。当前电力系统产生的监测数据量巨大, 涵盖温度、电流、电压、振动、局部放电等多种物理量, 数据维度高、动态变化快, 传统的人工分析或简单的统计方法难以满足智能运维的需求。如何利用人工智能、机器学习等技术, 实现实时、高效、精准的故障诊断, 是当前研究的重点问题。第三, 设备状态预测与寿命评估精度较低。目前常用的健康评估模型大多基于历史数据统计或简单的时间序列分析, 难以精准预测设备剩余寿命和潜在故障模式, 导致设备维护仍然具有较大的不确定性。

4.2 未来发展趋势

针对上述挑战, 未来电力设备在线监测与故障诊断技术的发展将主要集中在以下几个方向。多传感器融合与智能数据处理将成为主流趋势。通过集成红外热成像、光纤光栅、超声波、电磁波等多种传感技术, 并结合数据融合算法 (如卡尔曼滤波、贝叶斯估计等), 提升监测数据的准确性和完整性, 实现对设备状态的精准感知。基于人工智能的智能诊断与预测性维护将成为核心发展方向。深度学习、强化学习、迁移学习等人工智能技术的引入, 使得电力设备故障诊断能够摆脱对人工经验的依赖, 提高对复杂故障模式的识别能力。智能运维与自适应维护策略将逐步取代传统的定期维护模式。在未来的智能电网体系中, 电力设备的在线

监测与故障诊断系统将与智能运维系统深度融合, 通过大数据分析和机器学习算法, 对设备状态进行动态评估, 实时调整维护计划, 形成自适应维护策略 (Adaptive Maintenance Strategy), 避免过度维护或维护不足, 提高运维效率并降低成本。

结论

电力设备在线监测与故障诊断技术的应用对电力系统的安全稳定运行具有重要意义。通过在线监测技术可以实时掌握设备运行状态, 而故障诊断技术的应用能够有效降低设备故障率, 提高运维效率。相信随着智能化技术的深入发展, 该领域将迎来更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 马玲, 张天翔. 基于无线传感器网络技术的高压电力设备在线监测方法 [J]. 电气技术与经济, 2025, (01): 176-178.
- [2] 杨石林. 智能在线监测技术在电力设备检修中的应用 [J]. 电子技术, 2024, 53(12): 168-169.
- [3] 肖晶晶. 带电检测技术在变电运维中的应用 [J]. 电子技术, 2024, 53(12): 166-167.
- [4] 吕润. 基于无线通信的电力设备在线监测数据智能采集方法 [J]. 长江信息通信, 2024, 37(12): 152-154.
- [5] 孙振启, 杨文杰. 超高压智能变电站一次主设备在线监测系统的设计与运用研究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(22): 84-86.

作者简介:

客户姓名: 诸葛福金

出生年 --: 1992.04

性别: 男

民族 (汉族略): 汉

籍贯 (省、市/县): 山东临沂人

学历: 研究生

目前职称: 中级

所在单位: 国网山东省电力公司莘县供电公司

研究方向: 电力 - 变电.