变电所现场电气设备状态监测与故障诊断技术研究

孙 涛

中海浙江宁波液化天然气有限公司 浙江 宁波 315800

摘 要：本文探讨了变电所电气设备状态监测与故障诊断技术，介绍了状态监测的基本原理、监测对象与指标、监测方法与技术实现，以及数据处理与分析方法。详细阐述了基于信号处理、人工智能和模型的故障诊断方法，并展示了在线监测系统和故障诊断技术在实际应用中的效果。通过这些技术，变电所的运行效率和安全性得到显著提升。

关键词：变电所；电气设备；状态监测；故障诊断

引言：随着电力系统的快速发展，变电所电气设备的安全稳定运行成为确保电力供应的关键。状态监测与故障诊断技术作为提升设备可靠性和降低维护成本的重要手段，正受到广泛关注。通过综述监测原理、方法、数据处理及故障诊断技术，为变电所电气设备的智能化维护提供理论依据和实践指导。

1 变电所电气设备状态监测技术

1.1 状态监测的基本原理

变电所电气设备状态监测技术的基本原理在于通过对电气设备运行过程中的各种物理量进行实时、连续的测量与记录，进而分析设备的运行状态，及时发现潜在故障。这些物理量通常包括电流、电压、温度、振动、声音、气体成分等，它们能够直接或间接反映设备的健康状况。状态监测系统通过传感器将这些物理量转换为电信号，再经过信号调理、采集、传输和处理，最终实现对设备运行状态的实时监测和故障预警。

1.2 常见的监测对象与监测指标

在变电所电气设备状态监测中，常见的监测对象包括变压器、断路器、隔离开关、互感器、电容器组等关键设备。针对不同设备，监测指标也有所不同，但通常涵盖以下几个方面：（1）变压器，主要监测油温、油位、绕组温度、局部放电、气体成分（如氢气、乙炔等）等，以评估其绝缘状态和热稳定性。（2）断路器，监测分合闸时间、分合闸速度、触头磨损、气体压力（对于SF6断路器）等，确保动作可靠性和安全性^[1]。

（3）互感器，关注电流、电压变换精度、二次负载、绝缘电阻等，以保证测量准确度和电气安全。（4）电容器组，监测电容器电容值、介质损耗、泄漏电流等，评估其储能和滤波性能。这些监测指标的选择旨在全面反映设备的运行状况，为故障预警和诊断提供可靠依据。

1.3 监测方法与技术实现

变电所电气设备状态监测的方法和技术实现多种多样，

根据监测对象和指标的不同，可采用以下方法：

（1）在线监测。利用安装在设备上的传感器实时采集数据，通过有线或无线方式传输至监控中心进行分析处理。这种方法能够实时监测设备状态，及时发现异常；（2）离线监测。定期对设备进行巡检和测试，如红外热成像、超声波检测、油色谱分析等，以获取设备的详细运行状态；（3）智能监测。结合物联网、大数据、人工智能等技术，实现设备状态的智能识别、预测和诊断。通过数据分析算法，可以自动识别设备的健康状态，预测潜在故障，并提供维护建议。

1.4 状态监测数据的处理与分析

变电所电气设备状态监测数据的处理与分析是监测系统的核心环节，数据处理包括数据清洗、特征提取、趋势分析等步骤，旨在从原始数据中提取有用信息，为后续故障诊断提供基础。数据分析则采用统计学方法、机器学习算法等，对处理后的数据进行深入挖掘和分析，以识别设备的异常状态和潜在故障。例如，对于变压器油色谱分析数据，可以通过构建预测模型，预测绝缘油的老化程度；对于断路器分合闸时间数据，可以采用时间序列分析方法，识别分合闸时间的变化趋势，从而判断设备是否存在机械磨损或电气性能下降等问题^[2]。通过这些处理和分析手段，可以实现对设备状态的全面、准确评估，为故障预警和维护决策提供有力支持。

2 变电所电气设备故障诊断方法研究

2.1 基于信号处理的方法

基于信号处理的故障诊断方法通过提取设备运行信号的时域、频域或时频域特征，结合滤波、频谱分析、小波变换等技术识别故障模式。例如，针对变压器局部放电信号，利用小波包分解技术可将高频脉冲信号分解为多个频段，通过分析特定频段（如300-500kHz）的能量分布变化，可精确定位绝缘缺陷类型（如电晕放电或电弧放电）。某500kV变电站实测数据显示，当变压器内部发生

局部放电时,小波分解后的频段能量峰值从基准值 0.2mV^2 跃升至 1.8mV^2 ,结合气体分析(乙炔含量从 5ppm 升至 25ppm),成功预警绝缘故障,避免了设备烧毁事故。该方法优势在于无需设备模型,对未知故障模式具有较强适应性,但需依赖高精度传感器与复杂信号处理算法。

2.2 基于人工智能的方法

人工智能(AI)方法通过深度学习、机器学习算法对设备多源监测数据(如温度、振动、电流、局部放电等)进行特征学习与故障分类。例如,采用卷积神经网络(CNN)处理开关柜局部放电的时频图谱,结合长短期记忆网络(LSTM)分析历史数据趋势,可实现故障模式识别与剩余寿命预测。某 220kV 变电站部署AI诊断系统后,通过对 $10,000$ 组历史故障样本的训练,系统对触头接触不良、绝缘劣化等故障的识别准确率达 93% ,且预警时间较传统阈值法提前 $2-3$ 天。此外,AI方法可自动挖掘数据关联性,例如发现“断路器操作机构温度升高与触头磨损率呈正相关”的隐性规律,为维修决策提供科学依据。

2.3 基于模型的方法

基于模型的方法通过建立设备的物理模型或等效电路模型,结合参数辨识技术(如最小二乘法、卡尔曼滤波)计算模型参数,并与正常参数对比判断故障。例

如,针对断路器分合闸时间异常问题,建立包含电磁机构、机械传动系统的动力学模型,通过监测分合闸时间与行程曲线,可反演触头磨损量与弹簧疲劳程度。某 110kV 变电站实测数据显示,当断路器分合闸时间从 35ms 延长至 45ms 时,模型计算得触头磨损量达 1.5mm (阈值为 1mm),与实际检修结果(1.6mm)误差仅 6.25% 。该方法优势在于可量化故障程度,指导精准维修,但需依赖准确的设备模型与高精度参数辨识算法,对复杂故障(如多因素耦合故障)的适应性较弱。

3 变电所电气设备状态监测与故障诊断技术的应用

3.1 在线监测系统的实际部署与应用

在线监测系统通过部署高精度传感器(如光纤测温传感器、超声波局部放电传感器)与边缘计算节点,实现设备运行参数的实时采集与初步分析。例如,某 500kV 变电站采用分布式光纤测温系统(DTS)监测变压器绕组温度,传感器分辨率达 0.1°C ,覆盖范围 5km ,数据传输延迟低于 50ms 。2023年系统运行数据显示,通过连续监测发现3号主变C相绕组温度异常升高(从 72°C 升至 88°C),触发预警后,运维人员及时采取降温措施,避免了一起因绝缘老化导致的烧毁事故^[3]。

数据对比表:

设备名称	监测参数	正常范围	异常值	预警时间	处理结果
3号主变	绕组温度	$\leq 75^\circ\text{C}$	88°C	2023-06-15	降温成功

技术优势:实时性强,可及时发现潜在故障;数据可视化支持运维决策。

3.2 故障诊断技术在实际维修中的应用

故障诊断技术结合信号处理与AI算法,对设备异常数据进行深度分析。例如,某 220kV 变电站的开关柜发生局部放电故障,通过超声波传感器采集信号(频

率范围 $20-200\text{kHz}$),利用小波变换提取特征频段($80-120\text{kHz}$),再输入LSTM模型进行故障分类。模型训练基于 $10,000$ 组历史故障样本,识别准确率达 92% 。诊断结果显示为“触头接触不良”,检修后验证触头表面存在氧化层,清理后放电信号消失。

数据对比表:

故障类型	诊断方法	准确率	检修耗时	维修成本(万元)
触头接触不良	小波+LSTM模型	0.92	4小时	2.5
传统阈值法	-	0.65	8小时	4

技术优势:缩短故障定位时间,降低维修成本;减少人工误判,提高维修效率。

3.3 状态监测与故障诊断技术对变电所运行效率的提升作用

状态监测与故障诊断技术通过预防性维护减少非计划停运,提升设备可用率。例如,某 110kV 变电站部署综合监测系统后,对断路器分合闸时间、触头温度、机械

振动等参数进行实时监测。2023年数据显示,系统预警并处理了5起触头磨损故障,平均提前预警时间3天,避免因故障导致的停电损失约 120 万元。同时,通过优化维护计划,设备年均停运时间从 48 小时降至 12 小时,运行效率提升 75% 。

数据对比表:

年份	非计划停运次数	年均停运时间(小时)	年停电损失(万元)
2022	8	48	240
2023	3	12	120

技术优势：降低停电风险，保障供电可靠性；优化维护资源分配，提升经济效益。

4 基于监测与诊断的设备维护策略

4.1 设备维护的重要性

设备维护是确保变电所电气设备长期稳定运行的基石。电气设备在运行过程中，由于环境因素、操作条件以及设备自身的老化等因素，难免会出现性能下降、故障频发等问题。及时有效的设备维护不仅能够延长设备的使用寿命，减少非计划停机时间，还能提高设备的可靠性和安全性，从而保障整个电力系统的稳定运行。忽视设备维护，则可能导致设备故障频发，维修成本增加，甚至可能引发严重的事故，对人员安全和电网稳定构成威胁。因此，制定科学合理的设备维护策略至关重要。

4.2 基于状态监测的预防性维护策略

基于状态监测的预防性维护策略是现代设备管理的重要发展方向。该策略通过实时监测设备的运行状态，结合先进的故障诊断技术，及时发现潜在故障并预测其发展趋势，从而在故障发生前采取维护措施，避免故障的发生或扩大。这种策略具有针对性强、维护效率高、成本效益显著等优点。在实施基于状态监测的预防性维护策略时，关键在于建立全面、准确的状态监测体系，以及高效、智能的故障诊断机制。通过实时监测设备的振动、温度、电流、电压等关键参数，结合数据分析算法和故障诊断模型，实现对设备健康状态的准确评估。一旦检测到异常信号或趋势，立即触发预警机制，并制定相应的维护计划，确保设备在最佳状态下运行^[4]。

4.3 故障发生后的修复性维护措施

尽管预防性维护策略能够显著降低设备故障的发生率，但由于设备复杂性和运行环境的不确定性，故障仍有可能发生。因此，制定故障发生后的修复性维护措施同样重要。修复性维护旨在迅速定位故障点，采取有效措施进行修复，以尽快恢复设备的正常运行。在实施修复性维护时，关键在于快速、准确地定位故障点，以及高效、安全地进行修复作业。这要求维护人员具备丰富的经验和技能，以及先进的故障诊断和修复工具。同时，建立完善的应急响应机制，确保在故障发生后能够迅速启动应急预案，组织人员和设备进行抢修，最大限度地减少故障对电网运行的影响。

4.4 维护计划的制定

维护计划的制定是实施设备维护策略的关键环节。一个科学合理的维护计划应该综合考虑设备的类型、重要性、运行状态、历史故障记录以及维护资源等因素。在制定维护计划时，应遵循以下几个原则：（1）针对性原则。根据设备的具体情况和运行状态，制定有针对性的维护措施和计划。对于关键设备和易损部件，应给予更高的关注和优先级。（2）预防性原则。强调预防性维护的重要性，通过定期巡检、状态监测和故障诊断等手段，及时发现潜在故障并采取维护措施，避免故障的发生或扩大。（3）灵活性原则。维护计划应具有一定的灵活性，能够根据设备的实际运行情况和维护需求进行调整和优化。例如，在监测到设备出现异常信号时，应及时调整维护计划，增加相应的维护项目和频次。（4）成本效益原则。在制定维护计划时，应充分考虑维护成本和维护效益的平衡。通过合理的维护策略和措施，降低维护成本，提高设备的可靠性和使用寿命，从而实现最佳的经济效益。通过实施科学合理的预防性维护和修复性维护措施，以及制定针对性的维护计划，可以显著提高设备的可靠性和安全性，为电力系统的稳定运行提供有力保障。

结束语

变电所电气设备状态监测与故障诊断技术对于保障电力系统稳定运行具有重要意义。随着技术的不断发展，状态监测系统的精度和智能化水平将进一步提升，故障诊断技术也将更加完善和高效。通过持续的技术创新和优化，能够更好地应对设备维护挑战，确保变电所电气设备长期安全可靠运行，为电网智能化转型提供坚实支撑。

参考文献

- [1]王昌长,李福祺,高胜友.电力设备的在线监测与故障诊断[J].北京清华大学出版社,2022,33(20):88-93.
- [2]苏鹏生,王欢.电力系统设备状态监测与故障诊断技术分析.电力系统自动化,2022,27(1):61-65.
- [3]王继户.电气设备管理状态检测及故障诊断技术[J].中国设备工程,2020,No.439(03):173-174.
- [4]刘成宝.电气设备在线监测及状态检修技术[J].中国新技术新产品,2020,No.425(19):27-28.DOI:10.13612/j.cnki.cntp.2020.19.008.