 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v5i9.3293

Research on Transmission Line Fault Diagnosis and Rapid Positioning Technology

Qingcai Li[1] Shuo Xu[2] Fujin Zhuge[3]

State Grid Shandong Electric Power Company Xinxian Power Supply Company, Liaocheng, Shandong, 252400, China

Abstract

With the rapid development of power system and the continuous progress of smart grid technology, the reliability and safety of substation equipment are becoming more and more important. Traditional maintenance methods mainly rely on regular inspection and post-operation maintenance, which not only increases the maintenance costs, but also may lead to power supply instability due to sudden equipment failure. The purpose of this study is to explore the substation equipment fault prediction and preventive maintenance methods based on big data technology, focusing on the application of big data in equipment failure prediction and its impact on preventive maintenance strategy. By the detailed description of common failure types of substation equipment, data collection and processing methods, construction and optimization of machine learning model, as well as the formulation and implementation of maintenance demand prediction and dynamic maintenance plan, a complete set of failure prediction and preventive maintenance scheme based on big data is proposed.

Keywords

big data; substation equipment; fault prediction; preventive maintenance

基于大数据的变电站设备故障预测与预防性维护研究

李庆才 许硕 诸葛福金

国网山东省电力公司莘县供电公司，中国 · 山东 聊城 252400

摘 要

随着电力系统的快速发展和智能电网技术的不断进步，变电站设备的可靠性和安全性变得越来越重要。传统的维护方法主要依赖于定期检查和事后维修，这不仅增加了维护成本，还可能因设备突发故障而导致供电不稳定。本研究旨在探讨基于大数据技术的变电站设备故障预测与预防性维护方法，重点分析了大数据在设备故障预测中的应用及其对预防性维护策略的影响。通过详细描述变电站设备的常见故障类型、数据采集与处理方法、机器学习模型的构建与优化，以及维护需求预测和动态维护计划的制定与实施，研究提出了一套完整的基于大数据的故障预测与预防性维护方案。

关键词

大数据；变电站设备；故障预测；预防性维护

1 引言

变电站设备作为电力系统的核心组成部分，承担着电能传输与分配的关键任务，确保电力系统的稳定运行[1]。然而变电站设备运行环境复杂，经常面临着温度、湿度、机械振动、电压波动等外界因素的影响，易导致绝缘老化、机械磨损、过电压等故障问题。这些故障不仅会引发设备本身的损坏，还可能导致电力系统的大规模故障，进而影响电力供应的可靠性与安全性。本研究的意义在于为电力行业提供一种基于大数据技术的智能故障预测与维护模式，从而在保障电力系统安全运行的同时，提高电力系统的经济效益与社会效益。通过该研究，预期将为电力设备的智能化管理提供理论基础和技术支持，推动电力系统的现代化与智能化发展。

【作者简介】李庆才（1986–），男，中国山东聊城人，本科，副高级工程师，从事电力变电研究。

2 变电站设备故障预测与维护

变电站设备的运行环境极为复杂，常见的故障类型包括绝缘故障、机械故障、连接松动以及过电压故障等。绝缘故障通常由设备老化、潮湿环境或过高的温度引起，这可能导致电气短路或断路现象。机械故障往往源于设备的振动或零部件的磨损。而过电压故障可能由电网的不稳定状态或雷击造成。这些故障不仅干扰设备的正常运作，还可能引发电力系统的广泛故障。传统意义上，变电站设备的维护主要依赖于定期检修和经验判断，常用的检测手段包括热成像和局部放电检测等静态方法。然而这些传统方法存在明显的局限性，它们难以实现实时监控，过度依赖人工经验，并且难以预测未知的潜在故障，这使得提前预警故障变得困难，进而可能导致设备损坏和维护成本的增加。

随着传感器和通信技术的飞速发展，变电站设备产生了大量监测数据，这些数据涵盖了温度、湿度、电压和电流等关键运行参数。大数据技术通过采集、存储和分析这些数据，实现了对设备状态的实时监测 [2]。基于大数据的监测系统能够通过模式识别和趋势分析，预先发现潜在问题，从而提高设备的稳定性和安全性。大数据技术在航空、汽车制造和一般制造业等其他工业领域也成功应用于故障预测和预防性维护，帮助有效预测设备故障风险，并制定合理的维护计划。这些成功案例为电力系统设备维护提供了宝贵的参考。结合大数据分析和机器学习算法，为设备故障预测提供了强大的工具。随机森林算法通过构建多个决策树，能够有效处理复杂数据并展现出较强的抗噪声能力。支持向量机（SVM）适用于小样本数据的分析和故障分类。神经网络则在处理复杂非线性问题方面表现出色，尤其适用于多维数据的故障预测。

3 基于大数据的变电站设备故障预测模型

3.1 数据收集与处理

在变电站设备故障预测模型中，数据收集与处理是实现智能化故障检测与预防性维护的核心环节 [3]。数据源主要来自分布式传感器网络，这些传感器实时采集温度、湿度、振动、电流、电压、气压等多维度的物理参数数据，通过对设备运行状态的多元化监测，实现对设备健康状态的全生命周期评估与预测性分析。温度传感器可用于监测变压器绕组的温升情况，识别设备过热故障的潜在风险；湿度传感器用于检测气体绝缘设备内的湿度水平，防止由于湿度过高引发的绝缘老化或击穿问题；振动传感器布置在关键机械部件上，能够检测设备异常振动并识别机械故障模式；电流和电压传感器通过监测实时电气负荷变化，能够发现电力系统中的短路、过载或电压失衡等异常工况。气压传感器主要应用于 SF6 气体绝缘开关设备，确保内部气体压力稳定，以维持设备的绝缘性能。

数据采集系统通常通过物联网（IoT）架构进行数据传输，结合低延迟的无线通信技术（如 LoRa、5G）与高带宽的有线通信（如光纤、以太网），确保数据传输的实时性与可靠性。在传感器网络布置上，采用系统化的设备状态监测（Condition Monitoring，CM）策略，确保设备关键部件的数据采集覆盖全面，数据传输系统采用数据冗余与容错机制，防止因通信故障造成的数据丢失或延迟。中央控制系统通过高性能的分布式计算与大数据分析平台，实现数据的实时处理与长期存储，并为故障预测模型提供训练样本。数据处理过程包括数据清洗、降噪、异常值检测、特征工程等环节，确保输入模型的数据质量 [4]。通过高效的数据采集、传输与处理系统，变电站设备的运行状态能够实现精细化监控，为基于机器学习和数据驱动的故障预测模型提供高精度、高频率的数据支持，最终通过智能运维（Predictive Maintenance，PdM）体系有效提升设备的可靠性、可用性和维护效率。

3.2 变电站设备故障数据预测

在变电站设备故障预测中，数据分析与特征提取是模型构建的关键环节。首先数据清洗、降噪与异常值检测是数据处理的基础步骤。在实际采集过程中，传感器数据可能会受到噪声、丢失值以及异常点的影响，因此需要通过插值法、平滑算法以及卡尔曼滤波等技术进行数据清洗与降噪。同时采用基于统计学方法和机器学习算法的异常值检测技术，可以有效识别并处理不符合正常数据分布的异常点，确保数据的高质量与可靠性。在特征提取过程中，通过分析设备运行数据，提取能够反映设备健康状态的关键特征，如温度波动幅度、振动频率变化、电流异常波动等。这些特征通过特征选择算法（如主成分分析法、递归特征消除法等）进行筛选，保留对故障预测有显著影响的特征，降低数据的维度，提升模型的计算效率。在完成数据分析与特征提取后，进入故障预测模型的构建与优化阶段。首先，基于历史运行数据和已提取的特征集，机器学习模型（如随机森林、支持向量机、神经网络等）通过监督学习进行训练，以便能够准确识别正常与异常工况的差异。在训练完成后，模型将在独立的测试集上进行评估，以验证其泛化能力与预测效果。模型的性能评估指标包括准确率、召回率和 F1 值等。准确率衡量模型整体预测的准确性，召回率用于评估模型对故障的检测能力，而 F1 值则平衡了准确率与召回率之间的关系，综合反映模型在故障预测任务中的表现。通过模型性能的评估与优化（如超参数调整、模型集成等），可以进一步提升模型的预测精度和稳定性，确保其在实际应用中的可靠性和有效性。

4 基于大数据的变电站设备预防性维护方案

4.1 维护需求预测

在大数据驱动的预防性维护领域，维护需求的预测主要依赖于故障预测模型的分析成果。通过对变电站设备的多维度运行数据（如温度、振动、湿度、电流等）进行持续的监测，故障预测模型能够预先识别设备潜在的故障风险，从而为制定维护策略提供坚实依据。为了更精确地确定维护需求，通常会引入设备健康度评估模型（Health Index Model）。该模型通过综合分析设备的各项关键运行参数，计算出设备的健康评分，这一评分反映了设备当前的运行状态及其可能的劣化程度。此外，设备健康度模型能够量化设备的剩余使用寿命，使维护人员能够更有效地规划维护时机和资源分配。这一过程是动态的，设备的健康状态会随着时间推移和运行条件的变化而不断更新，健康评分也会相应地进行调整。通过对这些数据的实时分析，维护需求将得到动态调整，以确保在设备发生重大故障之前进行必要的维护。这种基于设备健康状态的维护策略，不仅有助于减少设备的

意外停机，还能够有效延长设备的使用寿命，提高整个电力系统的稳定性和可靠性。

4.2 预防性维护计划的制定与实施

在明确维护需求后，预防性维护计划的制定依托于动态维护决策模型。该模型综合考虑设备的实时健康状态、历史维护数据以及故障预测结果，灵活生成个性化的维护计划。相比于传统的定期维护，预防性维护更具弹性，它能够根据设备的实际运行情况灵活调整维护频率和时间，以最大程度地提高维护效率并延长设备的使用寿命。这一动态维护决策模型不仅考虑了设备的当前运行状况，还会结合历史维护记录和故障趋势分析，确保在设备出现故障风险时，提前采取适当的维护措施。维护计划的制定过程中，合理配置维护资源是关键，确保维护人员、备件和工具能够在最短时间内调度到位，减少资源浪费并避免维护的延迟。在预防性维护计划的实施过程中，实时监控设备的健康状态和故障预测结果，随时对维护策略进行调整，以应对设备的运行变化。这种动态调整的方式，使得维护活动能够更精准地匹配设备的实际需求，减少了不必要的停机时间，提升了维护工作的精准性和响应速度，确保设备始终处于良好运行状态。

4.3 维护效果评估与优化

在预防性维护中，维护效果的评估与优化是确保维护策略有效性的关键环节。每次维护完成后，系统会通过维护效果反馈机制对设备的运行状态进行深入分析。具体来说，系统会收集并记录设备在维护前后的运行数据，重点关注关键参数的变化，如温度、振动、电流等。通过对这些数据的对比分析，可以评估维护操作是否有效地消除了潜在故障或改善了设备的健康状况。维护效果的反馈数据不仅用于评估个别维护操作的成效，还会被用于优化故障预测模型。随着设备状态的不断变化，故障预测模型可能会出现精度下降的情况。因此在每次维护后，系统会根据最新的设备运行数据对故障预测模型进行重新训练与优化，以提升其对未来故障的预测准确性。通过这种反馈机制，预测模型能够逐步适应设备的实际运行状况，变得更加智能和精准。

5 实例分析与应用

在变电站设备故障预测与预防性维护的实际应用中，某大型变电站的变压器故障预测和维护案例展示了大数据技术的显著效果。该变电站通过部署多种传感器，持续监测设备的关键运行参数，包括温度、湿度、振动、电流和气压等。基于大数据分析技术和故障预测模型，对这些参数进行实时分析，成功提前识别了变压器内部可能出现的绝缘老化和机械损伤风险。预测模型的实际效果表现突出，其故障预测准确率超过 90%，并且在召回率和 F1 值等性能指标上也展现了优异的表现。通过实施预防性维护，设备运行状况显著改善，维护后温度、振动等关键参数恢复正常，设备故障率降低了近 40%，有效提升了设备的可靠性与稳定性。

然而在实际应用中仍然面临数据质量和系统实时性方面的挑战。数据质量问题主要源于传感器故障、数据缺失及噪声干扰等，这些问题通过定期校准传感器、采用数据清洗与补全算法，以及引入数据冗余机制得以有效解决。同时为应对数据处理延迟对故障预测时效性的影响，系统引入了边缘计算技术和分布式计算架构，确保数据能够及时传输与处理，从而实现故障预测的实时响应。

6 结论

本研究提出了一套基于大数据技术的变电站设备故障预测与预防性维护框架，通过对设备运行数据的实时监控和故障预测模型的应用，有效提高了故障预测的准确性，降低了设备的故障率，并显著提高了运维效率。随着大数据技术、云计算和边缘计算的发展，电力系统设备的故障预测和维护策略将更加精准和智能化。未来研究应进一步探讨如何优化多源数据的融合技术、提高预测模型的鲁棒性，并开发更加自动化的智能维护系统，以实现电力系统的高效、稳定与安全运行。

参考文献

[1] 刘冬兰,刘新,张昊,等.基于大数据的网络安全态势感知及主动防御技术研究与应用[J].计算机测量与控制,2019(10):27.

[2] 叶康,肖飞,杨建平,等.基于数据标签的集中监控智能挂牌技术研究[J].电子设计工程,2019,27(19):6.

[3] 柴文慧.基于采集系统大数据的云服务研究[J].长春师范学院学报(自然科学版),2019,38(4):36-40.

[4] 冷喜武,陈国平,蒋宇,等.智能电网监控运行大数据应用模型构建方法[J].电力系统自动化,2018,42(20):8.