

大数据环境下变配电设备状态评估与故障诊断方法研究

张高峰

(淮南万泰电气有限公司, 安徽 淮南 232001)

摘要 变配电设备是电力系统的核心组成部分, 其安全稳定运行至关重要。本文针对当前大数据环境下变配电设备状态评估与故障诊断面临的机遇与挑战, 构建了基于大数据分析的状态评估模型和故障诊断方法, 旨在通过海量运行数据的深度挖掘, 实现设备状态的精准评估和潜在故障的早期预警及有效指导状态检修决策, 从而提高电网智能化运维水平。

关键词 变配电设备; 状态评估; 故障诊断; 大数据分析

中图分类号: TM73; TP18

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.19.009

0 引言

随着电网规模不断扩大和供电可靠性要求的提高, 变配电设备的健康状态监测与智能诊断已成为该领域研究的重点。大数据时代为变配电设备状态评估与故障诊断带来了新的发展机遇。如何克服数据质量参差不齐、数据维度灾难等技术瓶颈, 构建面向工程应用的状态评估与故障诊断模型是关键。本文聚焦大数据环境下变配电设备智能运维的关键技术, 探讨实现设备状态的精准评估和潜在故障的早期预警。

1 大数据环境下变配电设备状态评估与故障诊断面临的机遇与挑战

1.1 机遇

大数据时代的到来为变配电设备状态评估与故障诊断开启了崭新的篇章。传统的状态评估与故障诊断方法主要依赖于专家经验和定期试验数据, 存在主观性强、实时性不足等局限。而大数据分析技术则为克服这些局限提供了契机。通过先进的数据挖掘算法, 可以从设备的海量运行数据中提取隐藏的特征模式, 揭示设备状态演变规律, 实现状态的实时动态评估。基于数据驱动的建模方法, 能够克服经验模型的主观性, 学习刻画设备状态与各影响因素间的内在关联, 形成更加准确、客观地评估结果。在故障诊断方面, 大数据分析可以充分利用多源异构的监测数据, 融合振动、放电、油色谱等多模态信息, 从复杂工况中识别故障征兆, 显著提升故障诊断的精准度。数据挖掘技术直接从数据中学习故障机理, 弥补专家经验知识

的不足, 扩充和优化诊断规则, 基于数据的故障溯源分析, 也为消除诊断盲区, 防范故障误判提供了新的视角。

1.2 挑战

尽管大数据蕴含着丰富的应用价值, 但变配电设备要真正实现数据驱动的状态评估与故障诊断, 还需攻克一系列技术难题。第一, 变配电设备运行过程中产生的数据种类繁多, 格式各异, 时空粒度不一, 给数据处理和关联分析带来巨大挑战。如何打通不同专业系统间的数据壁垒, 构建一套统一的数据标准规范, 是大数据应用的首要前提。高效的数据清洗、集成、压缩和索引技术需突破, 以实现海量异构电力大数据的快速检索、关联和融合计算。第二, 受设备故障、通信中断、人为误操作等因素影响, 实际采集的数据普遍存在缺失、异常、不一致等质量缺陷。这些“脏数据”若不经处理直接用于分析, 极易误导评估和诊断结果。然而, 针对电力场景开发合适的数据修复、异常检测等数据质量提升技术尚需攻关。第三, 变配电设备状态评估与故障诊断涉及时间序列预测、空间关联分析、因果推断等复杂问题, 非线性、非平稳的数据特性对建模方法提出了更高要求。深度学习虽然在特征学习上展现出优势, 但其可解释性不足, 模型泛化能力有待提高。如何在确保精度的同时兼顾模型的计算效率, 平衡好复杂度和可解释性, 是一大挑战。第四, 目前的研究大多侧重算法层面, 缺乏面向工程应用的顶层设计。如何围绕设备全生命周期管理构建

端到端的状态评估与故障诊断流程,打通数据驱动与专家经验的壁垒,将数据分析与传统电气化验充分融合,是一个待探索的方向。

2 基于大数据分析的变配电设备状态评估模型

2.1 评估模型的总体框架

基于大数据分析的变配电设备状态评估模型采用模块化设计理念,构建了数据采集、数据预处理、指标体系构建、模型训练与验证、评估结果呈现等功能模块。首先,通过在变配电设备上部署各类传感器,实时采集设备的海量运行数据^[1]。其次,对采集的原始数据进行清洗、集成、变换等预处理操作,消除冗余和异常,提升数据质量。在此基础上,利用特征选择和层次分析等方法,构建全面反映设备健康状态的多层次评估指标体系。随后,将处理后的数据集随机划分为训练集和测试集,选择适当的机器学习模型对状态评估模型进行训练和验证。模型学习刻画出各评估指标与设备整体健康水平间的非线性关联关系。同时,引入时间序列分析等方法对设备的老化趋势进行预测。最后,根据模型输出的状态评估量化值,对设备健康等级进行划分,并通过可视化图表、健康报告等形式直观呈现评估结果,为检修决策和资产管理提供数据支撑。此外,该模型还支持对在线数据的实时解析和评估,实现设备状态的动态监控和预警,形成闭环的状态评估流程。

2.2 评估指标体系的构建

科学合理的评估指标体系是状态评估的基石,应从设备全生命周期管理视角出发,遵循全面性、针对性、独立性、可获取性等原则,构建涵盖部件层、单元层和设备层的多层次状态评估指标体系。在部件层,根据变配电设备的物理结构和功能,将其分解为若干关键部件,如变压器绕组、铁芯、油箱等。围绕各部件的电气、热学、机械等特性,界定反映其状态的特征参数,包括绕组电阻、铁芯接地电流、油中溶解气体等。单元层从系统互操作角度刻画设备的整体状态,引入设备负荷率、综合健康指数等宏观指标。设备层则融合主变压器、调压开关、冷却系统等各子单元的状态,形成顶层的状态评估指标。各层指标既独立描述局部特征,又能综合反映全局状况。在指标选取过程中,充分平衡了数据获取成本与指标重要性,剔除了信息冗余的评估参数。还考虑环境因素对设备运行状态的影响,将温度、湿度等作为状态修正因子纳入指标体系。通过定性与定量分析相结合的方式,合理设置各指标

权重,构建面向工程应用的实用评估指标集^[2]。

2.3 状态评估模型的训练与验证

大数据驱动的状态评估离不开机器学习模型的训练和验证,本文采集了大量变配电设备的历史运行数据作为样本集,通过数据挖掘和统计分析,初步筛选出与设备状态高度相关的特征参数。在数据预处理阶段,采用最大最小值归一化等方法对各特征分量进行无量纲化处理,消除数据尺度差异。对于缺失值,视其缺失机制和占比,灵活采用均值填充、回归插值等方式进行修正。时间序列数据则通过滑动窗口、序列分段等技术转化为适合建模的样本形式。借助层次聚类、相似性度量等方法剔除明显异常的样本,进一步提升数据质量^[3]。在此基础上,选择支持向量机、随机森林、LSTM等机器学习模型,对状态评估模型进行训练。根据评估指标的物理属性,创新性地设计了多种特征交互项,增强模型的表达能力。在测试集上对模型预测效果进行评估,引入平均绝对百分比误差、受试者工作特征曲线等指标,多角度刻画模型性能。

2.4 评估结果的呈现与应用

状态评估结果的呈现方式直接影响其应用价值。为满足不同层级管理者的使用需求,本文设计了多种评估结果展示方案。面向一线运维人员,状态评估量化值被转化为健康、注意、异常、严重等直观的健康等级,并以红黄绿灯信号形式实时推送到移动终端,便于快速感知设备状态变化。对于设备管理人员,评估报告则通过趋势曲线、雷达图等可视化图表,多维度展现各评估指标的时空演变特征。当设备健康水平波动或劣化趋势突出时,系统自动触发预警提示,生成设备健康体检报告,诊断劣化原因,提供检修决策参考^[4]。针对电网调度人员,状态评估结果被整合到配电网地理信息系统,以热力图、气泡图等形式直观呈现区域内设备健康分布,辅助制定网络级的风险防控策略。此外,状态评估结果还用于指导状态检修、备件管理、设备更新等业务,被嵌入设备全生命周期管理流程中。

3 基于大数据的变配电设备故障诊断方法

3.1 常见故障类型

变配电设备在长期运行过程中不可避免地会出现各类故障,其故障形式具有多样性和复杂性。以变压器为例,常见故障可分为绕组故障、铁芯故障、油脂绝缘故障、分接开关故障等几大类。绕组故障主要包括匝间短路、相间短路、脱扣等情况,其主要原因有

绕组制造缺陷、绝缘老化、过电压冲击等^[5]。铁芯故障通常表现为铁芯多点接地、铁芯局部过热，多由叠片绝缘损坏、铁芯螺栓松动等因素引起。油纸绝缘故障则涉及绝缘电阻下降、介质损耗增大、极化指数降低等现象，其根源包括绝缘纸张老化、过负荷运行导致油纸加速劣化等。分接开关故障常见于调压范围超限、触头磨损等情况。变压器还会受到雷电过电压、环境温湿度异常等外部因素的影响而发生故障。对于

断路器、互感器等其他变配电设备，也存在相应的机械故障、绝缘故障等问题（如表 1 所示）。

3.2 基于大数据的变配电设备故障诊断思路

传统的变配电设备故障诊断主要依靠专家经验和定期试验，存在检测手段单一、诊断效率低下等不足。随着传感监测、物联网等技术的发展，设备运行过程中产生海量的多源异构数据，这为提升故障诊断能力带来新的契机。基于大数据的故障诊断总体思路是：

表 1 常见变配电设备故障类型

设备类型	常见故障类型	主要表现
变压器	绕组故障、铁芯故障、油纸绝缘故障、分接开关故障	匝间短路、铁芯多点接地、绝缘电阻下降、触头磨损等
断路器	机械故障、绝缘故障	操作机构卡涩、触头烧蚀、绝缘瓷套损坏等
互感器	绝缘故障、铁芯故障	绝缘油泄漏、铁芯饱和、二次绕组开路等

首先，通过在变配电设备上部署各类传感器，实时采集反映设备状态的关键参数，包括油中溶解气体、局部放电、铁芯接地电流等。其次，对多源数据进行清洗、集成和特征提取，并采用数据挖掘方法从海量历史故障数据中学习故障模式的特征规律，形成涵盖各故障类型的诊断知识库。再次，当设备出现异常时，及时采集故障征兆数据，调用相应的诊断规则或算法模型，快速匹配和识别潜在的故障模式，生成故障原因和部位的诊断结论。最后，诊断结果通过可视化手段直观呈现，辅以必要的原因分析和处置建议，并结合专家经验予以评估完善，形成可信的智能诊断方案。需要强调的是，大数据驱动的故障诊断贯穿设备全生命周期，通过持续积累和学习设备的各种运行工况，动态优化诊断模型和知识库，不断提高故障诊断与预警的精准度，最终实现设备故障的预防性检修^[6]。

4 大数据环境下变配电设备的案例分析

本文提出的基于大数据分析的变配电设备状态评估与故障诊断方法在某 220 kV 智能变电站的应用实践中得到了良好的验证。通过状态评估模型对主变压器运行状态进行实时评估，及时发现了局部过热等潜在故障征兆，评估结果准确反映了设备健康水平变化。引入故障诊断知识库对主变异常情况智能诊断，快速定位了铁芯多点接地故障，诊断结果与后续检修发现高度吻合。所提出的方法有效指导了变电站的状态检修决策，减少了盲目检修，提高了设备运行可靠性。该案例充分表明，大数据分析技术在变配电设备智能

运维中的应用前景广阔，对于提升电网资产管理水平，保障电力系统安全经济运行具有重要价值。

5 结束语

本研究针对大数据环境下变配电设备智能运维面临的技术挑战，创新性地构建了基于大数据分析的状态评估与故障诊断模型。然而，当前研究仍处于起步阶段，评估指标体系有待进一步完善，以更全面刻画设备健康状态。未来研究需进一步完善状态评估指标体系，优化故障诊断知识库的更新机制，并探索大数据分析与专家经验的深度融合，不断提升变配电设备运维的智能化水平。此外，深度融合数据驱动的分析模型和专家经验知识形成“人机结合”的协同诊断范式，有望进一步提升故障诊断的准确性和效率。

参考文献：

- [1] 周金生. 变配电设备的运行与维护要点的探析[J]. 家电维修, 2024(10):92-94.
- [2] 吴伟龙. 大数据技术在变配电系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2024,41(09):230-231.
- [3] 黄奕翔. 变配电系统智能监控与故障诊断技术研究[J]. 电气技术与经济, 2024(05):307-309.
- [4] 孙立飞, 支昊. 人工智能与大数据技术在变配电系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2024,41(01):260-261.
- [5] 许韦韦. 智能无功补偿技术在地铁变配电系统中的应用[J]. 光源与照明, 2024(10):222-224.
- [6] 盛伟光, 徐超. 智能技术在变配电系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2024,41(04):150-151.