

Research on Online Monitoring Technology of Smart Grid Transmission Lines

Jing Lin

State Grid Intelligent Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

With the accelerated development of the global energy internet, smart grids have become the core infrastructure for ensuring energy security and promoting clean energy integration. As the “arteries” of the power grid, transmission lines directly impact power supply reliability. Traditional manual inspection methods suffer from inefficiency, extensive blind spots, and delayed responses, failing to meet the real-time and precision requirements of smart grids. In this context, online monitoring technologies based on IoT, big data, and AI have emerged as a critical pathway to overcome these challenges. By dynamically monitoring operational parameters and proactively warning of potential faults, these technologies can significantly reduce unplanned outages and support the evolution of power grids toward intelligent capabilities including “self-awareness, self-diagnosis, and self-decision-making.” This paper first elaborates on the technical framework of online monitoring for smart grid transmission lines, then analyzes core technologies from multiple perspectives, followed by detailed discussions on system architecture design and optimization. Finally, it summarizes technical application challenges and countermeasures, aiming to provide valuable references for related research.

Keywords

Smart grid; Transmission line; Online monitoring technology

智能电网输电线路的在线监测技术研究

林静

国网智能科技股份有限公司，中国·山东 济南 250000

摘要

随着全球能源互联网加速建设，智能电网已成为保障能源安全、推动清洁能源消纳的核心基础设施。输电线路作为电网的“动脉”，其运行状态直接影响供电可靠性。传统人工巡检模式存在效率低、覆盖盲区多、响应滞后等问题，难以满足智能电网对实时性、精准性的要求。在此背景下，基于物联网、大数据与人工智能的在线监测技术成为突破瓶颈的关键路径。通过动态感知线路运行参数、提前预警潜在故障，可显著降低非计划停电风险，支撑电网向“自感知、自诊断、自决策”的智能化方向演进。本文先是详细阐述了智能电网输电线路在线监测技术体系，随后从多方面具体分析了输电线路在线监测的核心技术，紧接着具体阐述了在线监测系统的架构设计与优化，最后总结了相关技术应用挑战与对策，以期为相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

智能电网；输电线路；在线监测技术

1 引言

智能电网的规模化发展使输电线路面临更复杂的运行环境（如极端天气、高比例新能源接入），其故障率较传统电网上升 15%-20%。据统计，我国每年因线路故障导致的经济损失超百亿元，其中 70% 可通过提前干预避免。现有监测技术存在三大短板：一是传感器精度受环境干扰显著；二是数据传输延迟导致预警滞后；三是状态评估依赖人工经验，误判率高达 18%。本文以提升监测系统“感知 - 传输 - 决策”全链条效能为目标，研究多技术融合的在线监测方法，

重点解决复杂场景下的数据可靠采集、实时处理与智能分析问题，为输电线路运维模式转型提供理论依据。

2 智能电网输电线路在线监测技术体系

2.1 监测对象与核心参数

输电线路运行状态受电气、机械、环境三方面因素共同制约，需通过多维度参数监测实现故障精准溯源与风险量化评估。电气参数监测方面，电流 / 电压监测利用电流互感器（CT）与电压互感器（PT）实时采集线路负载数据，结合谐波分析技术识别过载、短路等异常工况，当电流突增超额定值 20% 时触发过载预警，防止导线过热老化^[1]；绝缘子泄漏电流监测则通过高精度传感器捕捉表面电流变化，结合湿度数据构建泄漏电流 - 污秽度模型，当电流超 $500 \mu A$

【作者简介】林静（1987-），女，中国山东菏泽人，本科，工程师，从事电力工程技术方向研究。

阈值时判定积污严重，需及时清扫或更换以避免闪络。机械参数监测中，导线张力与弧垂监测采用张力传感器或图像识别技术动态跟踪受力状态，张力超设计值 80% 或弧垂偏差超 $\pm 5\%$ 时预警断股、杆塔变形风险；杆塔倾斜监测通过倾角传感器或北斗/GPS 定位实时监测倾斜角度，铁塔超 3° 、水泥杆超 1.5° 时定位故障杆塔并评估倒塔风险。环境参数监测部署温湿度、风速、雨量等传感器构建微气象网络，风速超 25m/s 时预测导线舞动，覆冰达 15mm 时触发融冰装置；同时整合雷电定位与地质传感器，实时获取雷击位置、地震加速度等数据，为防雷设计与抗震加固提供科学依据。

2.2 关键技术组成

在线监测技术的实现依赖传感器、通信、计算、决策等多环节协同创新，其技术体系可分为四层：传感器技术通过多类型融合实现高精度感知，光纤传感基于布里渊/拉曼散射原理支持温度、应变等参数的 50km 长距离分布式监测，无线传感网络（WSN）采用 LoRa、NB-IoT 技术构建自组网节点，在山区等复杂地形替代有线传感器以降低布线成本，多传感器融合则通过数据级、特征级算法整合电气、机械、环境数据，例如结合导线张力与风速数据可精准区分自然松弛与断股异常；数据采集与传输技术采用边缘计算架构，在靠近传感器的边缘节点部署轻量化模块，实现数据预处理与本地决策，如实时识别绝缘子泄漏电流突变并仅上传异常数据，同时优化 5G/LoRa 通信协议，通过时分多址技术提升长距离、低功耗场景下的通信可靠性；数据处理与分析技术依托大数据挖掘构建历史数据库，分析覆冰与温湿度的关联性以优化融冰策略，并利用 CNN、LSTM 等深度学习模型实现故障自动识别与剩余寿命预测，实验显示诊断准确率超 92%；状态评估与决策支持技术通过层次分析法生成 0-100 分健康指数，低于 60 分时标记为“亚健康”，同时结合蒙特卡洛模拟生成分级预警信息，红色预警触发时自动推送抢修工单至最近班组，形成“感知-传输-分析-决策”的完整闭环。

3 输电线路在线监测的核心技术分析

3.1 传感器技术深度解析

输电线路监测中，传感器技术选型需综合考量环境适应性、监测精度与成本。耐候性方面，光纤传感基于布里渊散射原理，可实现 50km 长距离分布式监测，抗电磁干扰强，适用于高压线路；无线传感网络（WSN）采用 LoRa、NB-IoT 技术，能在偏远山区或复杂地形部署，降低布线成本^[2]。精度上，多传感器融合技术通过数据级、特征级或决策级算法整合多源数据，如结合导线张力与风速数据，可精准区分自然松弛与异常断股，故障诊断准确率超 92%。成本上，无线传感器网络通过自组网节点降低成本，而高精度光纤传感器虽成本较高，但适用于关键节点长期监测。分布式架构通过部署多个监测单元实现全面覆盖，具备高可靠性、强扩展性和强实时性；集中式架构依赖中心处理单元，适用于小

范围、高精度场景，但存在单点故障风险且扩展性受限。

3.2 数据传输与通信协议优化

输电线路在线监测中，数据传输与通信协议优化需兼顾技术选型与安全保障。通信技术方面，电力线载波通信（PLC）依托现有电力线路实现低成本传输，但易受电网噪声干扰，适用于短距离、低速率场景；无线专网中，LoRa 以长距离、低功耗特性覆盖偏远地区温湿度监测，5G 则满足低延迟、高带宽需求，如视频监控，其中基于 LoRa 的分层方案可降低节点功耗 62.2%、缩短延迟 62.5%；卫星通信作为补充手段，覆盖无地面网络区域，但成本较高。数据压缩环节采用边缘计算架构，在传感器节点完成数据预处理，如滤波、压缩，仅上传绝缘子泄漏电流突变等异常数据，有效降低云端传输压力与带宽需求；数据加密则通过防火墙、入侵检测系统及 AES、RSA 等加密技术构建安全防线，例如某系统采用端到端加密传输，确保监测数据的完整性与机密性，防止网络攻击与数据泄露。

3.3 智能算法在状态评估中的应用

智能算法在输电线路状态评估中应用广泛且成效显著。基于机器学习的故障模式识别里，卷积神经网络（CNN）擅长处理图像，能借杆塔倾斜图像自动识别故障，准确率超 92%，可区分导线断股、绝缘子污秽等异常；长短记忆网络（LSTM）则用于分析时序数据，如某系统利用其分析历史数据，提前预测覆冰厚度与温湿度关联性以优化融冰策略。数字孪生技术通过实时采集导线张力等数据构建模型，模拟不同工况动态行为，还能对比仿真与实际数据动态调整控制策略。多源数据融合的决策模型构建中，采用多种算法整合多源数据提升一致性，再基于融合数据构建健康指数模型，生成分级预警信息，为运维资源优先调配提供有力指导。

4 在线监测系统的架构设计与优化

4.1 系统总体架构

在线监测系统采用分层设计理念，由感知层、网络层、平台层与应用层构成。感知层是数据源头，部署了温度、湿度、电流等各类传感器，能精准采集输电线路的运行参数与环境信息^[3]。网络层承担数据传输任务，综合运用电力线载波通信、无线专网（如 LoRa、5G）以及卫星通信等技术，保障数据稳定高效地传输至平台层。平台层作为核心枢纽，对海量数据进行汇聚、处理与分析，挖掘数据潜在价值。应用层基于平台层处理结果，为用户提供直观便捷的操作界面，可实现故障预警、状态评估、运维决策等功能。此外，系统还采用模块化与标准化接口设计。模块化设计把系统划分为数据采集、处理、通信等多个功能独立模块，便于开发、维护与升级；标准化接口设计则让不同模块能无缝对接，提高了系统的兼容性与扩展性，降低了系统集成成本。

4.2 关键模块功能实现

在线监测系统的关键模块功能实现各有侧重。数据采集模块为保证准确性与可靠性采用冗余设计，既部署多个同

类型传感器对同一参数采集，经比对校验剔除异常数据提升质量；又用不同原理传感器采集关键参数，如同时用光学与电学传感器测绝缘子污秽程度，一种故障时另一种仍能工作，保障数据连续性。边缘计算节点部署在靠近数据源处，能初步处理分析数据，减轻云平台压力。在输电线路沿线依长度、密度等确定节点数量与位置，关键区域如杆塔、变电站部署多个形成冗余提高容错能力，实时处理数据后仅上传关键数据，降低传输量、提高响应速度。云平台采用分布式存储技术，将海量数据存于多个节点，提高可靠性与扩展性，还运用压缩与加密技术保障安全，并提供丰富可视化工具图表，让用户直观查看线路状态与故障信息，便于运维决策。

4.3 系统可靠性保障机制

在线监测系统有着完善的可靠性保障机制。在抗干扰设计上，该系统需应对电磁干扰和极端天气等干扰因素。于电磁兼容方面，运用屏蔽、滤波、接地等技术降低电磁干扰对传感器和通信设备的影响，像给传感器外壳用金属屏蔽材料，在通信线路加滤波器，保障设备在强电磁环境下正常运作^[4]。针对极端天气，选用具备良好耐候性的传感器与设备，如防水、防尘、防腐蚀的传感器，能在高温、低温、暴雨、大风等恶劣天气下稳定运行。此外，系统具备自诊断与自恢复功能。自诊断功能可实时监测自身运行状态，自动检测诊断硬件故障、软件异常等问题，检测到故障就及时发出警报通知运维人员。自恢复功能则针对软故障，如软件死机、通信中断等，能自动重启或重新连接，像边缘计算节点软件故障时自动重启软件、初始化参数，减少停机时间，提高系统可靠性与可用性。

5 技术应用挑战与对策

5.1 主要挑战分析

输电线路在线监测系统技术应用面临诸多挑战。一是复杂环境下的传感器稳定性问题，其处于高山、丛林等多样地理区域，高温会使电子元件性能下降、测量误差增大甚至损坏，低温会改变材料物理性质影响精度；强电磁干扰会干扰信号传输致数据失真；风雨侵蚀、盐雾腐蚀会加速外壳及内部结构损坏，影响数据可靠性与稳定性。二是海量数据的实时处理压力，随着在线监测系统广泛应用，传感器数量与数据量剧增，采集频率也提高，传统集中式数据处理因服务器计算负担重，易出现处理延迟，影响故障预警与快速响应，

威胁电网安全。三是跨部门数据共享与隐私保护矛盾，输电线路监测涉及多部门，数据共享意义重大，但各部门数据含用户隐私与商业机密，泄露会带来严重损失，如何保障安全隐私下有效共享数据亟待解决。

5.2 针对性解决方案

为解决输电线路在线监测系统面临的问题，有系列针对性方案。针对复杂环境影响传感器稳定性，材料上选耐温、抗电磁干扰材料，如高温陶瓷做外壳，特殊电磁屏蔽材料包裹；封装工艺采用密封技术，用防水胶密封接口缝隙，对环境要求高的传感器用双重封装，还涂覆防尘涂层。应对海量数据实时处理压力，采用分布式计算，在输电线路沿线布局边缘计算节点，对数据进行预处理，提取关键信息上传云平台；同时部署轻量化模型，用模型压缩和量化技术优化，降低计算复杂度和存储需求，实现数据实时处理分析。对于跨部门数据共享与隐私保护矛盾，构建基于区块链的数据共享平台，数据加密存储，用智能合约明确使用权限和规则，利用区块链不可篡改特性保证数据真实完整，实现安全共享。

6 结语

总的来说，本文聚焦智能电网输电线路在线监测技术展开全面研究，成功构建起涵盖监测对象、关键技术等方面的整体技术体系。对传感器、数据传输、智能算法等核心技术进行了深度剖析，设计出分层架构的在线监测系统，并针对性地提出可靠性保障机制。同时，针对技术应用过程中面临的复杂环境影响传感器稳定性、海量数据处理压力大、跨部门数据共享与隐私保护矛盾等挑战，给出了切实可行的解决方案。展望未来，在物联网、人工智能等技术不断进步的推动下，在线监测技术将朝着更高精度、更智能化的方向大步前行，传感器性能与智能算法持续优化，跨部门数据共享机制日益完善，助力输电线路运维工作更加高效、安全。

参考文献

- [1] 田智多.基于智能电网技术的输电线路状态监测及故障诊断[J].大众用电,2025,40(04):65-66.
- [2] 李奔,张宇东.在线监测技术在智能电网输电线路中的应用[J].光源与照明,2024,(11):69-71.
- [3] 银得.智能电网输电线路中的在线监测技术应用[J].中华建设,2024,(05):169-171.
- [4] 董威佐.智能电网输电线路的在线监测技术[J].江西电力职业技术学院学报,2022,35(08):4-6.