

基于物联网技术的新能源风电场电气自动化监控系统设计

何良涛

国家电投集团宁夏能源铝业中卫新能源有限公司 宁夏 中卫 755000

摘 要：本文基于物联网技术，针对新能源风电场电气自动化监控系统展开设计研究。分析传统监控系统在数据采集、传输及功能层面的不足，结合物联网全面感知、可靠传输与智能处理的特性，明确系统设计目标与功能需求。阐述物联网在设备监测、能源管理、安全管控等典型场景的应用，介绍数据采集传输、设备监控控制等系统总体设计方案。该设计可提升故障预判、发电效率与应急响应能力，为风电场智能化发展提供技术支撑。

关键词：物联网技术；新能源风电场；电气自动化监控系统

1 物联网与新能源风电场相关理论基础

1.1 物联网技术原理与特点

物联网（IoT）作为数字化核心技术，通过感知层、网络层与应用层协同，实现物理实体智能化管理。感知层部署振动、红外、气体等传感器，可监测风力发电机组齿轮箱磨损、发电机绕组温度及变压器绝缘状态。网络层采用互补通信技术：LoRa、NB-IoT满足风电场分散设备远程数据回传需求；5G以低时延、高速率保障设备控制指令传输；光纤通信则确保监控中心与升压变电站间数据稳定交互。应用层融合大数据、机器学习等算法，将数据转化为决策依据，如基于设备历史数据建立故障预测模型，提前7-15天预警潜在故障；运用强化学习优化能源调度。凭借全面感知、可靠传输与智能处理特性，物联网为工业领域带来显著赋能。

1.2 新能源风电场概述

新能源风电场是全球能源转型关键，2023年全球新增风电装机118GW，累计超900GW。其主要由风力发电机组、集电系统、升压变电站及监控系统组成，10MW级海上机组单台年发电量可达4000万度^[1]。风电场按地理位置分为陆上与海上，前者装机占比82%但面临土地与噪音问题，后者风能密度更高，如福建平海湾海上风电场年等效满负荷小时数达4000小时。按规模划分，大型风电场常集群开发并配套储能。我国风能技术可开发量57亿千瓦，2023年风电占比8.5%，但仍面临西北弃风、关键部件国产化率低（主轴轴承不足40%）及极端天气威胁设备可靠性等挑战。

1.3 电气自动化监控系统在风电场的作用

电气自动化监控系统是风电场运行的“神经中枢”，借助SCADA、DCS技术实现设备全生命周期管理。在实时监测上，系统每秒采集超10万条数据，曾通过振动频谱分析提前28天预警500MW风电场齿轮箱故

障，避免200万元损失。智能控制方面，MPPT算法提升风机发电效率3-5%，风速超25m/s时0.5秒内完成叶片顺桨；升压站“五防闭锁”确保倒闸操作零失误。管理决策依托大数据平台，可生成设备健康报告，优化检修计划降低18%运维成本，还能与电网调度交互，实现AGC与AVC功能，保障电网稳定运行。

2 基于物联网技术的监控系统设计需求分析

2.1 风电场电气自动化监控系统现状分析

当前风电场监控系统普遍存在三大瓶颈：数据采集方面，传统系统仅覆盖80%的关键设备参数，对齿轮箱油液颗粒度、轴承润滑状态等微观指标监测不足；某风电场因未实时监测发电机轴承润滑脂含水量，导致轴承卡死事故，停机损失达300万元。通信传输层面，70%的陆上风电场仍采用光纤通信，易受地质灾害影响，年均故障时长超20小时；协议兼容性差导致不同厂商设备难以互联互通，形成数据孤岛。系统功能层面，现有故障诊断多依赖阈值报警，误报率高达25%，无法实现故障根源追溯；能源管理系统缺乏动态优化能力。安全监控系统存在盲区，对人员违规操作、设备外部入侵等异常行为的识别率不足60%。

2.2 物联网技术在风电场监控中的优势分析

物联网技术为监控系统升级提供破局之道。在数据采集领域，部署智能传感器网络可将监测参数种类扩展至200余项，瑞士ABB公司的智能断路器通过内置传感器，可实时监测触头磨损、局部放电等12项指标。数据传输方面，5G+MEC（移动边缘计算）架构使数据处理时延缩短至50ms，满足实时控制需求；工业物联网协议OPCUA实现跨厂商设备互操作，提升系统集成度。在数据分析维度，AI算法可实现故障预测准确率提升至92%，丹麦维斯塔斯公司的AI运维平台通过分析10万小时的设备数据，使风机可利用率提高至98.5%。能源管理系统借

助数字孪生技术,构建风电场虚拟模型,通过仿真优化调度策略,可将风能利用率提升4-6%。安全管理方面,物联网+AI视频分析系统对人员违规行为识别率达95%,入侵检测响应时间缩短至3秒。

2.3 系统设计目标与功能需求确定

基于行业痛点与技术优势,新型监控系统以“三化三提”为设计目标:设备监测全面化,提升故障预判能力;能源调度智能化,提高发电效率;安全管理可视化,提增应急响应速度^[2]。系统需具备五大核心功能:数据采集与传输功能要求实现分钟级设备状态更新,采用边缘计算技术减少90%无效数据传输;设备监控与控制功能支持远程在线调试,具备多机组协同控制能力;故障诊断与预警功能构建基于深度学习的故障树模型,实现故障定位准确率 $\geq 90\%$;能源管理与优化功能集成短期(0-4小时)、中期(4-24小时)、长期(1-7天)风能预测模型,优化机组功率分配策略;安全管理功能融合人员定位、设备状态、环境监测数据,建立三维可视化安全管控平台。

3 物联网技术在风电场监控中的典型应用场景

3.1 设备状态监测与故障预警

物联网技术构建的设备健康管理体系,深度融合多源异构数据,通过智能算法实现精准的故障预测与诊断。在齿轮箱监测领域,振动频谱分析能够捕捉齿轮啮合过程中的细微振动变化,结合油温数据判断润滑状态,再利用油液铁谱技术分析磨损颗粒,最后借助长短期记忆网络(LSTM)神经网络模型,可提前6个月预判齿轮疲劳故障,极大降低突发停机风险。对于发电机,分布式光纤测温技术对1000个测温点进行实时监测,精度达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,能够敏锐察觉绕组局部过热隐患,避免因温度过高导致绝缘损坏。预测性维护平台依托数字孪生技术,为每台设备构建虚拟镜像,通过实时数据驱动,精准模拟故障演变过程。故障诊断采用分层架构:边缘层对原始数据进行清洗与初步异常检测,减轻网络传输压力;平台层运用机器学习算法,如随机森林、支持向量机等,对数据进行深度分析与故障分类;应用层则根据诊断结果自动生成维修工单,并智能推荐所需备件清单,形成从监测、诊断到维修的闭环管理体系,全面保障风电场设备稳定运行。

3.2 能源管理优化与调度

能源管理系统基于物联网实时感知的气象、设备运行及电网数据,构建“风-机-网”协同优化模型。在风能预测环节,结合中尺度气象预报(分辨率1km)与微尺度流场模拟(分辨率10m),可准确预测未来15分钟的风能

变化趋势,进而动态调整机组桨距角与转速,使功率波动降低30%,有效提升风能捕获效率。在电网互动方面,系统支持车网互动(V2G)技术,实现电动汽车与电网的双向能量流动;同时具备需求侧响应功能,在负荷高峰时段可快速响应电网调度,灵活调节出力 $\pm 15\%$,增强电网稳定性。在储能系统与风电协同控制上,采用模型预测控制(MPC)算法,综合考虑风电功率预测误差、实时电价波动以及储能系统充放电状态,优化储能充放电策略。系统还集成碳资产管理功能,实时核算风电项目的碳减排量,为企业参与碳交易市场提供数据支撑,助力实现经济效益与环境效益的双赢。

3.3 安全管理与预警系统

物联网赋能的安全管控体系实现对人员、设备和环境的全要素、全时段监测。在人员管理方面,智能安全帽集成超宽带(UWB)定位技术,定位精度达 $\pm 10\text{cm}$,可实时追踪人员位置;同时配备跌倒检测、有害气体报警功能,一旦人员进入危险区域或发生意外,系统立即通过AR眼镜推送警示信息,并通知管理人员。设备安全监测采用毫米波雷达,对设备振动进行实时监测,对塔架倾斜、叶片结冰等异常状态的识别准确率达98%,提前预警设备结构安全隐患。环境安全监测构建起由气象雷达、红外热成像仪与无人机巡检系统组成的立体防护网络。台风预警系统基于高精度数值天气预报模型,可提前72小时发布预警,并自动启动防风预案,保障设备安全^[3]。火灾监测采用多光谱图像分析技术,能在起火初期的阴燃阶段0.5秒内报警,极大缩短火灾响应时间。智能视频分析系统运用YOLO算法,对周界入侵、设备漏油、人员违规操作等15类异常行为进行实时监测,有效防范安全事故发生,为风电场安全生产保驾护航。

4 基于物联网技术的风电场电气自动化监控系统总体设计

4.1 数据采集与传输技术

在基于物联网的风电场监控系统中,数据采集与传输依托“云-边-端”协同架构,保障数据采集高效、传输可靠。终端层部署遵循IEEE1451标准的智能传感器,实现即插即用,降低系统部署与维护成本,且覆盖风速、振动、温度等多参数监测,为系统提供数据支撑。边缘层配备工业级网关,集成数据清洗、协议转换与边缘计算功能,可对90%的数据进行本地化处理,减轻云端压力,降低传输延迟。云端采用分布式存储系统,支持PB级数据存储,满足海量数据长期存储需求。通信网络采用“无线为主、有线为辅”的混合架构。短距离以蓝牙Mesh组网实现传感器低功耗互联;中距离利用5G切片网

络的低时延、高带宽特性传输实时控制数据；长距离则依靠光纤环网保障监控中心与风电场的数据交互稳定。数据安全方面，采用SM2/SM4国密算法加密，并引入区块链存证机制，防止数据篡改，确保数据完整、真实。

4.2 设备监控与控制技术

设备监控与控制技术以数字孪生为核心，构建与物理风电场1:1对应的虚拟模型，通过数字线程技术，实现物理设备与虚拟模型的实时映射。借助三维可视化技术，运维人员可直观查看设备运行状态、关键参数变化趋势，还能进行远程虚拟调试，提前验证控制策略的有效性，减少现场调试时间与风险。控制策略采用分层架构，各层分工明确、协同运作。就地控制层部署在设备现场，实现对设备的快速响应与紧急控制，确保设备安全运行；区域控制层负责协调同一区域内多机组的运行，根据风能资源变化与电网需求，优化机组功率分配；中央控制层与电网调度中心对接，执行电网指令，实现风电场与大电网的协调运行。系统支持远程固件升级（FOTA）技术，通过安全的远程更新机制，可在1小时内完成全场设备的软件更新，有效提升设备维护效率，降低运维成本，保障风电场设备始终运行在最佳状态。

4.3 故障诊断与预警技术

故障诊断与预警技术融合多源数据与智能算法，构建“特征提取-模式识别-故障定位”三级诊断模型。首先，利用小波变换与卷积神经网络对振动、电流、温度等数据进行特征提取，捕捉故障早期微弱信号；然后，借助贝叶斯网络进行故障概率推理，结合历史故障数据与实时监测信息，准确判断故障类型与发生概率；最后，运用知识图谱技术，关联设备结构、运行工况等信息，实现故障原因的快速溯源。预警机制设置“黄色预警-橙色预警-红色预警”三级响应体系，根据故障严重程度与发展趋势，通过短信、APP、语音等多渠道及时推送预警信息。同配套应急处置知识库，为运维人员提供详细的故障处理流程与操作指南，指导其快速、准确地处理故障。

4.4 能源管理与优化技术

能源管理与优化技术集成风能预测、功率优化、经济调度三大核心模块，助力风电场实现经济效益与发电效率的最大化。风能预测模块采用集合卡尔曼滤波（EnKF）算法，融合数值天气预报与实测数据，对未来72小时的风能资源进行预测，准确率达85%，为发电计划制定提供可靠依据^[4]。功率优化模块基于遗传算法，求解发电收益最大化、电网稳定性最优等多目标优化问题，动态调整机组发电功率，实现风能资源的高效利用。经济调度模块引入区块链技术，构建透明、可信的分布式电源交易平台，实现电力交易的自动化与智能化。系统支持与电力交易平台对接，参与现货市场与辅助服务市场交易，根据实时电价与电网需求，优化发电策略，提升风电场的市场竞争力与盈利能力。通过对发电数据、成本数据的综合分析，为风电场运营决策提供数据支持，促进风电场的可持续发展。

结束语

基于物联网技术的新能源风电场电气自动化监控系统，通过技术融合有效解决传统系统的痛点，实现风电场设备管理、能源调度和安全管控的智能化升级，对提高发电效率、降低运维成本、保障电网稳定具有重要意义。随着物联网、人工智能等技术的持续发展，未来该系统有望在预测精度、交互体验和市场协同等方面进一步优化，推动新能源风电场向更高效、更智能的方向迈进。

参考文献

- [1] 芦小雨,马全保.电力电气自动化设备物联网在线监测技术研究[J].中国新技术新产品,2023,(22):45-48.
- [2] 陶睿,孙菁烱.基于物联网技术的电气自动化二次设备远程监测系统的设计[J].自动化应用,2023,64(21):197-199+202.
- [3] 闫帅.基于物联网技术的电气自动化系统远程监控系统设计与实现[J].电气技术与经济.2024(1):90-92
- [4] 李良.基于物联网技术的起重机械电气自动化监测与远程控制系统设计[J].新潮电子.2024(09):88-90