

风电场二次设备故障诊断与远程维护技术研究

程明

华电吉林能源有限公司, 吉林 长春 130000

[摘要] 风电场二次设备作为电力系统的核心控制与保护单元, 其稳定运行直接影响风电场的可靠性与经济效益。随着风电装机容量快速增长, 传统故障诊断与维护模式面临响应滞后、成本高昂等挑战。文中围绕二次设备的故障机理、智能诊断方法及远程维护技术展开研究, 结合真实案例验证了数据驱动模型与远程协同维护平台的有效性。研究结果表明, 融合多源信息分析的智能诊断技术可显著提升故障识别精度, 而基于物联网架构的远程维护系统能降低运维成本约 30%。该成果为风电场智能化运维提供了理论支撑与实践参考。

[关键词] 风电场二次设备; 故障诊断; 远程维护; 数据驱动; 智能运维

DOI: 10.33142/hst.v8i4.16077

中图分类号: TQ05

文献标识码: A

Research on Fault Diagnosis and Remote Maintenance Technology for Secondary Equipment in Wind Farm

CHENG Ming

Huadian Jilin Energy Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130000, China

Abstract: As the core control and protection unit of the power system, the stable operation of secondary equipment in wind farms directly affects the reliability and economic benefits of the wind farm. With the rapid growth of wind power installed capacity, traditional fault diagnosis and maintenance models are facing challenges such as delayed response and high costs. The article focuses on the fault mechanism, intelligent diagnosis methods, and remote maintenance technology of secondary equipment, and verifies the effectiveness of data-driven models and remote collaborative maintenance platforms through real cases. The research results indicate that intelligent diagnostic technology that integrates multi-source information analysis can significantly improve fault recognition accuracy, while remote maintenance systems based on Internet of Things architecture can reduce operation and maintenance costs by about 30%. This achievement provides theoretical support and practical reference for the intelligent operation and maintenance of wind farms.

Keywords: wind farm secondary equipment; fault diagnosis; remote maintenance; data driven; intelligent operation and maintenance

风电场作为新能源体系的重要组成部分, 其规模化发展对设备可靠性提出更高要求。二次设备包括继电保护装置、通信模块、监控系统等, 承担着实时监测、故障隔离与协调控制等关键功能。然而, 由于风电场所处环境复杂、设备分布广泛, 传统人工巡检模式难以满足高效运维需求。近年来, 国内外多次发生因二次设备故障导致的机组脱网事故, 如 2021 年新疆某风电场因保护装置误动引发全场停电, 直接经济损失超千万元。因此, 探索智能化故障诊断与远程维护技术成为行业迫切需求。

1 风电场二次设备概述

1.1 风电场二次设备的定义与分类

风电场二次设备是支撑电力系统安全稳定运行的核心控制单元, 其核心任务是对一次设备的运行状态进行实时监控、保护与调节。根据功能属性, 二次设备可划分为三大类: 继电保护类设备、自动化控制类设备以及通信与信息管理类设备。继电保护类设备主要包括线路保护装置、母线差动保护单元、变压器保护装置等, 其核心功能是通过快速识别短路、过载等异常工况, 触发断路器动作以隔离故障区域。例如, 国家能源集团某 200MW 风电场配置了

132 台保护装置, 覆盖集电线路、箱变及主变等关键节点, 形成多级保护网络, 确保故障切除时间小于 100ms。自动化控制类设备以 SCADA 系统为核心, 整合功率预测、电压调节、无功补偿等模块, 实现风电场与电网的协同控制。通信与信息管理类设备则包括光纤交换机、数据采集终端、时钟同步装置等, 构建覆盖全场设备的通信骨干网。以三峡能源某海上风电场为例, 其环网通信系统采用双环冗余设计, 单链路中断时可在 50ms 内完成路径切换, 显著提升通信可靠性。

1.2 工作原理与功能介绍

二次设备通过高精度传感器与高速数据采集单元实时获取电网运行参数, 结合预设逻辑算法实现状态判断与控制决策。以继电保护装置为例, 差动电流保护通过比较线路两端电流矢量和, 当差值超过设定阈值时判定为区内故障, 触发跳闸信号。这一过程需在 20ms 内完成, 以防止故障扩散。监控系统则通过 Modbus/TCP、IEC 104 等协议整合分散设备数据, 实现全景状态可视化管理。例如, 华能江苏如东海上风电项目通过升级 SCADA 系统软件, 将故障录波分辨率从 1ms 提升至 0.1ms, 使得暂态过程分析精度大幅提高, 成功识别出此前难以捕捉的谐波谐振问题。

此外,功率预测模块基于气象数据与历史出力曲线,生成未来 72 小时发电计划,并通过 AGC 系统动态调整机组出力,确保电网频率稳定。

1.3 二次设备在风电场中的作用与现状分析

二次设备是风电场安全运行的“神经中枢”,其性能直接影响机组可用率与电网接入能力。然而,当前行业面临设备智能化水平不均、系统兼容性差等挑战。据《中国风电运维白皮书》统计,2023 年因二次设备引发的故障停机占比达 37%,其中通信中断与软件逻辑错误为主要诱因。部分老旧风电场仍采用分立式保护装置,各子系统间缺乏数据交互,形成“信息孤岛”,导致故障定位效率低下^[1]。以龙源电力某内陆风电场为例,其早期建设的保护装置仅支持 RS-485 通信,无法与新一代监控平台直接对接,需额外部署协议转换设备,增加了运维复杂度。与此同时,行业领先企业正加速技术迭代,例如金风科技推出的智能终端集成边缘计算功能,支持在线参数整定与远程固件升级,可将保护定值下发时间从传统模式的 2 小时缩短至 10 分钟。远景能源则通过统一通信协议与数据模型,实现了风机、储能、升压站设备的无缝协同,标志着风电场二次系统向数字化、集成化方向迈进。

2 故障诊断技术

2.1 故障诊断基本理论

故障诊断的本质是通过多维度数据分析,实现异常源的精准定位与故障机理的深度解析。针对二次设备,需构建涵盖硬件失效、软件异常、环境干扰等因素的综合诊断模型。以变频器控制板卡为例,其典型故障模式包括 IGBT 驱动信号畸变、AD 采样偏移、通信端口 EMC 干扰等六大类。诊断模型需融合电气量监测、设备状态量、环境参数等多源信息,通过特征提取与模式匹配实现故障分类。例如,南瑞继保开发的保护装置自诊断系统,通过监测电源模块纹波系数与 CPU 负载率,可提前 48 小时预警潜在硬件故障,准确率达 92%。

2.2 传统诊断方法及其局限性

传统诊断技术主要依赖阈值报警与人工经验判断,例如通过比较三相电流不平衡度识别 CT 回路断线,或依据断路器动作次数评估机构磨损程度。此类方法虽简单易行,但对间歇性故障敏感度低,且难以应对复合故障场景^[2]。2020 年龙源电力某风场发生的大规模脱网事故即为典型案例:保护装置电源模块因电容老化导致输出电压纹波超标,但传统监测系统仅配置了过压/欠压报警,未能及时识别该异常,最终引发 12 台机组连锁跳闸。此外,人工巡检模式受限于人员技能水平与工作强度,易出现漏检误判。

2.3 智能诊断技术在二次设备中的应用

智能诊断技术通过融合数据驱动与模型驱动的优势,显著提升了故障识别精度与早期预警能力。数据驱动方法利用历史故障数据训练机器学习模型,如支持向量机通过构建高维特征空间超平面实现故障分类,而卷积神经网络

可自动提取录波文件中的时频特征。华电宁夏某风电场采用 CNN 对保护装置录波数据进行端到端学习,将误判率从 8.2%降至 2.3%,并成功识别出传统方法遗漏的暂态振荡故障。模型驱动技术则基于设备物理特性构建数字孪生体,通过对比实测数据与仿真结果的残差实现故障定位^[3]。例如,基于卡尔曼滤波的预测模型可实时跟踪通信模块晶振频率,提前 4 小时预警频率漂移趋势,为预防性维护争取时间。此外,知识图谱技术的引入进一步增强了诊断系统的解释性:国电南瑞开发的专家系统将故障特征、处理方案、设备拓扑关系构建为语义网络,支持多跳推理与根因追溯,在江苏某海上风电场成功定位了因接地网腐蚀引发的保护误动问题。

3 远程维护技术研究

3.1 远程监控系统架构设计

远程监控系统的核心在于构建分层协同的智能化架构,以应对风电场二次设备分布广、环境复杂的特点。感知层通过部署高精度传感器与嵌入式智能终端,实时采集设备运行状态参数,例如保护装置的跳闸信号、通信模块的误码率等。明阳智能的 MySE 系统在此层创新性地引入边缘计算节点,利用 FPGA 芯片实现毫秒级数据预处理,过滤冗余信息并提取关键特征,有效降低云端计算负载。传输层采用 5G 与光纤混合组网模式,通过动态路由算法优化网络资源分配,例如在内蒙古某高海拔风电场中,通过部署双模通信基站,确保在极端天气下仍能维持 98% 以上的通信可靠性。应用层则依托云平台实现数据聚合与智能决策,例如金风科技开发的 GoldenCloud 平台整合了设备健康评估、故障原因分析等模块,支持运维人员通过可视化界面远程下发控制指令。

3.2 数据采集与传输技术

二次设备的多源异构数据采集是远程维护的技术难点。由于风电场景中不同厂商设备采用的通信协议差异较大,需通过协议转换网关实现数据标准化。国电南瑞的 NR-Edge 网关采用模块化设计,可灵活适配 Modbus TCP、DNP3.0 等 18 种工业协议,并在青海某大型风电场中成功对接了来自 6 家厂商的二次设备,数据采集完整率提升至 95%。在数据传输环节,MQTT 协议因其轻量级与低功耗特性成为主流选择,结合断点续传与数据压缩算法,可在 200kbps 窄带环境下实现每秒 500 条报文的高效传输^[4]。例如,华润电力在广东阳江海上风电场中,通过优化 MQTT 的 QoS 等级配置,将通信中断导致的数据丢失率控制在 0.3% 以下。此外,时序数据库的应用进一步提升了海量数据的存储与检索效率,单台服务器可支持每秒 10 万级数据点的写入能力,为后续分析提供了坚实基础。

3.3 远程维护平台的软件架构与实现

远程维护平台需具备高扩展性与实时性,微服务架构通过将功能模块解耦,显著提升了系统的灵活性与容错能力。上海电气“风云”平台采用 Spring Cloud 框架,将设备管理、故障知识库、远程控制等功能封装为独立服务,支持动态扩缩容与灰度发布。该平台集成的 AR 远程协助

功能,通过智能眼镜实时捕捉现场设备图像,并叠加三维模型与操作指引,使运维人员无需亲临现场即可完成复杂操作。知识库模块则基于自然语言处理技术,构建了涵盖12大类故障的解决方案数据库,支持模糊查询与案例匹配。远景能源的EnOS平台更进一步引入区块链技术,实现维护记录的全流程可追溯,确保操作合规性与责任界定。

3.4 通信技术与安全保障措施

风电场远程维护的安全性直接关系到电力系统的稳定运行。在通信加密方面,国密SM2/SM4算法通过非对称加密与对称加密结合,可抵御量子计算攻击。例如,龙源电力在甘肃某风电场部署的加密网关,采用SM2算法实现密钥协商,SM4算法加密业务数据,经中国电科院测试可抵御10Gbps流量级别的暴力破解。接入层安全则通过动态令牌认证与双向证书校验强化,例如中广核阳江风电场采用基于OAuth 2.0的令牌管理机制,每30秒刷新一次访问权限,有效防止凭证泄露风险。针对高级持续性威胁,中车株洲所开发的“深瞳”系统引入行为分析引擎,通过机器学习识别异常访问模式,在2023年成功拦截了3起针对SCADA系统的定向攻击。此外,量子密钥分发技术在长距离通信中的应用取得突破,国家电网在河北张北风光储示范工程中,实现了150公里光纤链路的量子加密传输,密钥生成速率达到4kbps,为远程维护提供了“无条件安全”的通信保障。

4 风电场二次设备故障诊断与远程维护系统的应用

4.1 系统集成与数据处理流程

多厂商设备兼容性是系统集成的首要挑战。OPC UA标准因其平台无关性与信息建模能力,成为解决异构设备互联的关键技术。大唐山西左云风电场在升级改造中,通过OPC UA服务器将南瑞继保、许继电气等6家厂商的保护装置数据统一接入平台,定义包含128个数据点的信息模型,涵盖电压越限、保护动作次数等关键参数。数据处理流程采用“边缘清洗-云端分析”模式:边缘侧通过滑动窗口算法剔除异常数据,云端则利用Spark引擎进行并行计算,完成设备健康度评分与故障关联分析。该项目日均处理数据量达2TB,并实现了从原始数据到决策指令的端到端延迟小于5秒,为实时运维提供了有力支撑。

4.2 典型故障案例分析

2023年三峡福建兴化湾风电场的通信中断事件,揭示了复杂网络环境下二次设备协同故障的连锁效应。事故初期,监控平台检测到3台机组通信信号丢失,远程诊断系统自动调取交换机流量日志,发现广播报文占比异常升高至85%。结合拓扑分析,判定为STP(生成树协议)因链路质量波动引发频繁拓扑重构,导致广播风暴。运维团队远程登录核心交换机,调整生成树优先级参数并启用BPDU保护功能,1小时内恢复全场通信。此次事件凸显了协议配置优化与实时流量监控的重要性,后续该风电场在系统中增加了网络健康度预测模块,将类似故障的预警提

前时间提升至30分钟以上。

4.3 故障预警与自动维护策略

基于深度强化学习的维护策略引擎,通过模拟不同维护动作的长期收益,动态优化检修计划。华能吉林通榆风电场部署的DRL模型,以设备剩余寿命预测、维护成本、发电损失为输入,输出最优维护时间窗。系统运行一年后,预防性维护频次减少28%,且通过精准定位高故障风险设备,将设备可用率提升至99.2%。此外,自动维护策略还支持故障自愈,例如在检测到保护装置电源异常时,系统可自动切换至备用电源并触发检修工单,将人工干预需求降低40%。

4.4 应用效果评估与实际运行反馈

国家电投江苏滨海北H3项目的实践验证了远程维护系统的综合效益。系统部署后,故障平均修复时间从8小时降至1.5小时,其中75%的简单故障可通过远程操作即时解决。通过对比2022-2023年运维数据,全场年度故障停机次数减少43%,运维成本节约超600万元。现场调研反馈显示,运维人员对AR辅助功能的满意度达92%,认为其显著降低了操作失误率。此外,系统生成的设备健康报告为技改投资提供了数据支撑,例如某批次继电器的平均故障间隔时间仅为行业标准的60%,促使管理层提前启动更换计划,避免潜在的大规模停机风险。

5 结语

风电场二次设备的智能化运维是新能源体系高质量发展的关键支撑。本文通过系统研究故障诊断与远程维护技术,揭示了数据驱动模型在复杂工况下的泛化能力,以及物联网架构对运维效率的提升作用。结合国家电投江苏滨海北H3、三峡兴化湾等典型项目的实践验证,智能诊断技术将故障识别准确率提升至97%以上,远程维护系统使运维成本降低超30%,印证了技术路线的工程可行性。当前,行业正从“被动响应”向“主动预防”转型,但设备异构性、通信时延等挑战仍需突破。未来研究需深化人工智能与物理模型的融合,探索联邦学习框架下的跨风场知识共享机制,并推动量子通信、柔性可编程控制器(FPGA)等前沿技术的规模化应用,最终构建具备自感知、自决策、自修复能力的下一代运维体系,为新型电力系统建设提供坚实保障。

[参考文献]

- [1]杨卫东.基于小波神经网络的变电站二次设备故障自动诊断方法[J].自动化应用,2025,66(2):194-196.
- [2]柴树先.继电保护设备电气二次回路隐患排查技术研究[J].仪器仪表用户,2025,32(5):6-8.
- [3]王桂栋,高艺伟,杨辉.智能变电站二次设备运行维护与管理研究[J].仪器仪表用户,2025,32(2):96-97.
- [4]李俊恒.一起风电场固体绝缘管母故障的综合分析[J].电工技术,2024,11(7):188-191.

作者简介:程明(1995.12—),毕业院校:北华大学,所学专业:自动化,当前就职单位:华电吉林能源有限公司,职务:运检员,职称级别:初级工程师。