

风力发电场电气设备运行维护关键技术研究

王绍金¹ 卢立娜²

1. 山东智合电力有限公司 山东 日照 276800

2. 山东万鸿能源集团有限公司 山东 日照 276800

【摘要】：风力发电场多建于偏远地区、海上等复杂环境，电气设备长期承受高低温循环、湿度变化、风沙侵蚀及交变载荷等恶劣条件，其运行稳定性直接决定风电场的发电效率与安全效益。本文围绕风力发电场电气设备运行维护关键技术展开研究，首先分析风电场电气设备的组成及核心设备的常见故障类型与成因；进而从状态监测技术、故障诊断方法、预防性维护策略三个维度，深入探讨风电场电气设备运行维护的关键技术路径；最后结合工程实例，验证所提出维护技术体系的应用效果，为提升风电场电气设备运行可靠性、降低运维成本提供理论支撑与实践参考。

【关键词】：风力发电场；电气设备；运行维护；状态监测；故障诊断

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.077

1 引言

截至2023年底，全国风电累计装机容量突破4.5亿千瓦，年发电量超过8000亿千瓦时，在保障能源安全、应对气候变化等方面发挥着重要作用。多数风电场选址于草原、戈壁、沿海等区域，地理位置偏远、自然环境恶劣，且风机单机容量不断增大、机组数量持续增多，电气设备的运行工况日益复杂。因此，开展风力发电场电气设备运行维护关键技术研究，对于提升设备运行可靠性、延长使用寿命、降低运维成本具有重要现实意义。

2 风力发电场电气运行设备环境及常见故障分析

2.1 风力发电场电气运行设备环境

陆上风电场多面临高低温循环、强风沙、高湿度、雷暴等极端天气；海上风电场则承受高盐雾、高湿度、强腐蚀等环境影响，易导致设备绝缘老化加速、金属部件腐蚀、密封性能下降。多数风电场建于山地、丘陵、草原等地形复杂区域，交通不便，设备运输与检修难度大，故障处理时间长。风速的随机性导致风机输出功率频繁波动，电气设备需承受持续的交变载荷与电压、电流冲击，易引发部件疲劳损坏与绝缘劣化。风电场为实现发电效益最大化，通常采用24小时连续运行。

2.2 常见故障类型及成因

发电机故障主要包括定子绕组绝缘损坏、转子断条、轴承磨损、集电环火花过大等。成因包括风速波动导致的电磁力冲击、轴承润滑不足、集电环表面氧化或磨损、绕组散热不良等。变压器常见故障有绝缘油劣化、绕组过热、局部放电、铁芯多点接地等。长期高温运行导致绝缘老化、绕组匝间短路、绝缘油受潮或污染、铁芯接地不良等。变频器故障主要表现为IGBT模块损坏、电容鼓包、滤波器故障、散热系统失效等。电压电流冲击、散热风机故障、电容老化、电路板受潮或粉尘污染等。开关设备机械故障与电气故障较为常见。成因包括机构磨损、润滑失效、绝缘材料老化、雷击过电压等。控制系统故障包括

传感器失灵、通信中断、控制器故障等。传感器受电磁干扰、通信线路老化或破损、控制器电源故障等。

3 风力发电场电气设备状态监测关键技术

3.1 监测技术参数选取

根据电气设备的故障特征与运行规律，选取关键监测参数，实现设备状态的全面感知。各核心电气设备的具体监测参数及核心指标如下表所示。

表1 监测技术参数选取

设备类型	监测参数	核心监测指标
发电机	轴承温度、振动参数、绕组温度、绝缘电阻	轴承温度与振动；绕组温度与绝缘电阻
变压器	顶层油温、绕组温度、绝缘油介损、绝缘油击穿电压、局部放电量、三相电流、三相电压、分接开关位置	绝缘油参数、局部放电量
变频器	IGBT模块温度、直流母线电压、输出电流、输出电压、谐波含量、散热风机转速、电容电压	IGBT模块温度、直流母线电压波动
开关设备	触头温度、绝缘电阻、操作机构行程、分合闸时间、局部放电量	触头温度、操作机构参数
控制系统	传感器输出信号、通信链路状态、控制器CPU负载、电源电压	传感器输出信号、通信链路状态；控制器CPU负载

3.2 传感器布置与数据采集技术

3.2.1 传感器布置原则

遵循关键部位优先、兼顾全面性、避免相互干扰的原则，针对设备故障高发部位进行传感器布置。例如，发电机轴承处安装温度传感器与振动传感器，变压器绕组采用光纤光栅传感器监测温度，开关设备触头安装红外温度传感器。

3.2.2 数据采集技术

采用分布式数据采集架构，结合有线与无线传输方式，实

现监测数据的实时采集与传输。对于风机机舱内的设备，采用有线传输确保数据稳定性；对于偏远区域的设备，采用无线传输技术降低布线成本。数据采集器需具备高采样率、抗干扰能力强、低功耗等特点，支持多协议接入，实现不同类型传感器数据的统一采集。

3.3 数据预处理与融合技术

3.3.1 数据预处理

由于监测数据易受环境干扰、传感器误差等因素影响，需进行预处理以提高数据质量。主要包括数据清洗、数据标准化、数据平滑。例如，采用小波阈值去噪法对发电机振动信号进行处理，有效去除环境噪声，保留故障特征信息。

3.3.2 数据融合技术

基于多源传感器数据，采用分层融合策略，实现设备状态的综合评估。底层融合采用数据级融合方法，对同一参数的多传感器数据进行融合，提高数据准确性；中层融合采用特征级融合方法，提取不同参数的故障特征，构建特征向量；顶层融合采用决策级融合方法，结合特征向量与故障诊断模型，输出设备状态评估结果。

3.4 在线监测系统构建

构建风电场电气设备在线监测系统，实现监测数据的集中管理与可视化展示。系统主要包括数据采集层、传输层、数据处理层、应用层四个部分。数据采集层由各类传感器与数据采集器组成，完成监测参数的采集与初步处理。传输层采用有线+无线混合传输网络，将采集数据传输至数据中心。数据处理层部署数据预处理、融合算法与故障诊断模型，对监测数据进行深度分析，生成设备状态评估报告。应用层通过 Web 端与移动端向用户提供设备状态监测、故障报警、历史数据查询等功能，支持运维人员实时掌握设备运行状态。

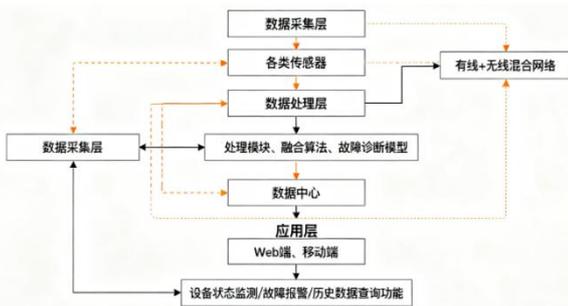


图1 风电场电气设备在线监测系统流程

4 风力发电场电气设备故障诊断关键技术

4.1 传统故障诊断方法

4.1.1 基于信号处理的方法

通过对监测信号进行分析，提取故障特征，实现故障诊断。例如，对发电机振动信号进行傅里叶变换、小波变换，提取特

征频率，判断轴承磨损、转子断条等故障；对变压器局部放电信号进行频谱分析，识别绝缘故障类型。该方法操作简单、实时性强，但对复杂故障的诊断精度有限。

4.1.2 基于规则的专家系统

将领域专家的经验总结为诊断规则，通过匹配监测数据与规则库，实现故障诊断。专家系统由知识库、推理机、数据库、解释器组成，具有逻辑清晰、易于理解的特点。但规则库的构建依赖专家经验，难以覆盖所有故障类型，且对新故障的适应性差。

4.2 基于机器学习的故障诊断方法

随着人工智能技术的发展，机器学习算法凭借强大的特征学习与模式识别能力，在电气设备故障诊断中得到广泛应用。本文提出一种基于改进 BP 神经网络的故障诊断模型。对预处理后的监测数据进行特征提取，采用主成分分析法降低特征维度，保留关键故障特征，构建特征向量。收集风电场电气设备的历史故障数据与正常运行数据，分为训练集、验证集与测试集，其中训练集用于模型训练，验证集用于参数优化，测试集用于模型性能评估。针对传统 BP 神经网络收敛速度慢、易陷入局部最优的问题，采用自适应学习率与动量因子优化算法，提高模型训练效率与泛化能力。同时，引入 Dropout 层防止模型过拟合。将训练集输入改进 BP 神经网络，通过反向传播算法调整网络权重与阈值，以验证集的诊断准确率为目标，优化网络结构。将测试集数据输入训练好的模型，输出故障类型与故障严重程度。

4.3 故障诊断系统实现

开发风电场电气设备故障诊断系统，集成数据接入、特征提取、模型推理、结果展示等功能。系统支持多设备故障诊断，可根据不同设备类型自动调用对应的诊断模型；具备故障定位功能，能够精准识别故障部件与故障原因；提供故障趋势分析，通过历史数据预测故障发展趋势，为维护决策提供依据。

5 风力发电场电气设备预防性维护策略

5.1 设备状态评估方法

基于状态监测数据与故障诊断结果，从电气性能、机械性能、绝缘性能、环境适应性等维度，构建设备状态评估指标体系，明确各指标的权重的权重。将各指标的监测数据转化为模糊评价矩阵，结合指标权重，通过模糊合成运算得到设备状态评价结果，将设备状态划分为良好一般较差故障四个等级。

5.2 预防性维护策略制定

根据设备状态评估结果，结合设备全生命周期成本分析，制定差异化的预防性维护策略。状态良好的设备采用定期巡检+趋势监测模式，延长维护周期，减少不必要的维护工作，降低维护成本。状态一般的设备加强状态监测频率，缩短巡检周

期,针对性地进行部件检查与维护,防止故障扩大。状态较差的设备制定专项维护计划,及时更换故障隐患部件,进行全面检修与测试,确保设备恢复正常运行状态。故障设备启动应急维修流程,快速组织抢修,减少停机时间;维修完成后,进行全面的性能测试与状态评估,避免故障再次发生。

5.3 维护计划优化与执行

结合风电场的发电负荷、天气条件、设备运行状态等因素,对维护计划进行动态优化。例如,在风速较低的时段安排维护工作,减少发电量损失;避开极端天气,确保维护人员安全。建立维护工作标准化流程,明确维护内容、操作规范、质量标准;采用移动运维系统,记录维护过程中的设备参数、更换部件信息、维护人员等数据,形成维护档案,为后续设备状态评估与维护策略优化提供依据。

6 工程实例验证

6.1 风电场概况

选取位于我国某内陆风电场作为验证对象,该风电场总装机容量 150MW,共安装 50 台 3MW 永磁同步风力发电机组,配套建设 1 座 110kV 升压站及相关附属设施。2021 年前年均故障停机时间达 82 小时,电气设备故障占总故障的 65%,其中变压器绝缘故障、变频器 IGBT 模块损坏、发电机轴承磨损等故障频发,年均运维成本约 1200 万元,严重影响风电场的发电效益与安全运行。为解决上述问题,该风电场于 2021 年引入电气设备运行维护技术体系,通过为期 2 年的实际应用,验证技术体系的可行性与有效性。

6.2 技术应用方案设计

6.2.1 状态监测系统部署

在每台风机发电机定子绕组布置 6 组光纤光栅温度传感器,前后轴承各安装 1 组振动加速度传感器与 1 组铂电阻温度传感器,集电环处安装红外测温传感器,同时通过风机原有测控系统采集三相电流、电压及功率因数数据。箱式变压器顶层油温采用铂电阻传感器监测,绕组温度部署光纤光栅传感器,绝缘油参数通过在线油质监测仪实时采集,局部放电采用超声波传感器与特高频传感器联合监测;主变压器额外增加油中溶解气体在线监测装置,实时监测甲烷、乙烯、乙炔等特征气体含量。在 IGBT 模块散热器安装温度传感器,直流母线侧布置电压传感器与电流传感器,滤波电容两端安装电压监测模块,散热系统配置风机转速传感器与风道温度传感器,同时采集输出电压谐波含量数据。在 SCADA 系统中增加通信链路状态监测

参考文献:

- [1] 秦玉磊.风力发电场中的电气可靠性分析与优化研究[J].电工技术,2024,(S1):384-387.
- [2] 蒲华侨.风力发电场风机维护[J].能源新观察,2025,(06):28-30.
- [3] 李保平,潘泮,胥刚,等.风力发电场施工期间对周边生态环境的影响研究[J].环境科学与管理,2024,49(11):190-194.

测模块,对传感器输出信号进行实时校验,在控制器电源侧安装电压稳定性监测装置。

6.2.2 故障诊断模型落地

收集 2018-2021 年风电场电气设备故障数据 128 例,包括变压器绝缘故障 32 例、变频器故障 45 例、发电机故障 31 例、开关设备故障 20 例,同时采集设备正常运行数据 5000 组,按 7:2:1 的比例划分为训练集、验证集与测试集。对监测数据进行预处理,通过主成分分析法对多维度监测参数进行降维处理,提取核心特征向量。模型训练与部署:基于 Python TensorFlow 框架搭建改进 BP 神经网络模型,模型训练完成后,部署至风电场数据中心服务器,与状态监测系统实时对接,实现故障数据的自动输入、诊断与输出。

6.2.3 预防性维护策略实施

结合风电场风速预测数据与设备状态评估结果,在风速低于 4m/s 的低发电负荷时段安排维护工作,避开冬季低温与强风沙天气。对状态一般的设备,缩短巡检周期至 3 个月,针对性补充轴承润滑油、清理设备散热通道;对状态较差的设备,72 小时内制定专项维护计划,更换老化部件。引入移动运维管理系统,维护人员通过移动端 APP 接收故障预警信息、维护任务与操作规范,现场维护数据实时上传至后台,形成设备全生命周期维护档案,包括部件更换记录、故障处理过程、性能测试结果等,为后续维护策略优化提供数据支撑。

6.3 应用效果分析

该体系对 42 例重大故障实现提前预警,预警提前时间为 24-72 小时,平均预警提前量 48.6 小时,为维护人员预留了充足的准备时间,避免故障扩大导致的长时间停机。2022-2023 年前年均故障停机时间降至 31 小时,较 2021 年前减少 51 小时,降幅达 62.2%。故障响应平均时间从 90 分钟缩短至 45 分钟,重大故障抢修完成时间从 8 小时缩短至 4.5 小时,维护效率提升 50%以上,主要得益于故障诊断模型的精准定位与移动运维系统的高效协同。

7 结论

综上所述,风力发电场电气设备运行维护技术的创新与应用,是提升风电场运行可靠性、降低运维成本、促进风电产业高质量发展的关键支撑。未来需持续推动理论研究与工程实践的深度融合,不断完善运维技术体系,为实现双碳目标提供坚实的技术保障。