

电气自动化技术在新能源风电设备故障诊断与维护中的应用

孙 杨

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：随着新能源产业发展，风电设备高效运行至关重要。电气自动化技术凭借实时监测、数据采集分析、故障预警诊断及远程维护管理等功能，应用于风电设备全流程。通过传感器与算法实现精准故障诊断，借助分层架构系统完成设备维护，有效提升风电设备可靠性与风电场运营效率，降低故障损失与运维成本，推动风电行业智能化发展。

关键词：电气自动化技术；新能源风电设备；故障诊断；设备维护

1 新能源风电设备概述与故障特点

1.1 新能源风电设备的基本组成

新能源风电设备作为风能转化电能的核心装置，由风轮、传动、发电、偏航、液压、控制及塔架七大系统构成。风轮系统由2-3个空气动力学优化设计的叶片与轮毂组成，负责捕获风能并转化为机械能；传动系统含主轴与齿轮箱，将风轮低速旋转增速后传递至发电机；发电机系统常用双馈异步或永磁同步发电机，实现机械能到电能的转换。偏航系统通过风向传感器、偏航电机及减速器，调整风轮对准来风方向；液压系统用于紧急制动和变桨控制，保障机组安全运行。控制系统作为“大脑”，采集风速、转速等数据，协调各系统运作；塔架根据风能资源与地形，为设备提供稳固支撑，各系统协同作业实现高效发电。

1.2 风电设备常见故障类型

风电设备长期暴露于复杂户外环境，承受高转速、高载荷，易引发机械、电气和控制三类故障。机械故障中，齿轮箱的齿轮磨损、齿面胶合及轴承损坏最为常见，会降低传动效率甚至停机；主轴可能出现疲劳裂纹影响扭矩传递；偏航系统的电机卡死、减速器故障导致对风不准，减少发电量；液压系统的油泄漏、泵故障则影响制动与变桨功能^[1]。电气故障多发生于发电机、变流器和电缆，发电机绕组短路、绝缘老化，变流器功率器件损坏，电缆绝缘破损、接头松动，均会威胁机组稳定运行。控制故障源于软硬件缺陷，软件逻辑错误、参数不当，硬件传感器失准、控制器故障，都可能造成设备运行异常甚至失控。

2 电气自动化技术在风电领域的应用特点

2.1 实时监测与控制

电气自动化技术在风电领域的实时监测与控制功能，极大提升了风电机组的运行可靠性与效率。通过在风电设备关键部位部署大量传感器，如转速传感器、温度传感器、振动传感器、压力传感器等，可实时采集设备运行参数。这些传感器将物理量转换为电信号，传输至控制系统进行处理。控制系统依据预设的控制策略和阈值，对采集到的数据进行分析判断，实时调整设备运行状态。例如，当风速超过额定风速时，控制系统通过调节叶片桨距角，限制风轮转速，避免设备因过载而损坏；当检测到齿轮箱温度过高时，控制系统启动冷却风扇或油泵，降低齿轮箱温度。这种实时监测与控制能够及时响应设备运行状态变化，确保风电机组在各种工况下安全、稳定运行。

2.2 数据采集与分析

电气自动化技术具备强大的数据采集与分析能力。除了采集设备运行参数外，还可收集环境数据，如风速、风向、温度、湿度等。这些数据通过现场总线、工业以太网等通信方式传输至数据中心进行存储和处理^[2]。利用数据分析技术，可挖掘数据背后的潜在信息。通过对风速-功率曲线的分析，评估风电机组的发电性能；对比不同时间段设备运行数据，发现设备性能变化趋势，提前预判故障发生的可能性。通过大数据分析还能优化风电场的运行策略，如根据风速预测调整机组的启停顺序，提高风电场整体发电效率。

2.3 故障预警与诊断

基于电气自动化技术构建的故障预警与诊断系统，能够在故障发生前及时发出预警，减少停机时间和维修成本。该系统通过对设备运行数据的实时监测和分析，结合故障诊断算法，识别设备运行状态的异常变化。当

检测到数据偏离正常范围时,系统会根据异常程度发出不同级别的预警信号,并提供可能的故障原因及解决方案。例如,当振动传感器检测到齿轮箱振动幅值异常增大时,系统通过分析振动频率和波形,判断是否存在齿轮磨损或轴承故障,并通知维护人员进行检查和维修。这种故障预警与诊断功能提高了设备的可维护性和可靠性。

2.4 远程维护与管理

电气自动化技术实现了风电设备的远程维护与管理,突破了地理空间限制。通过互联网和通信技术,维护人员可远程访问风电机组的控制系统,实时查看设备运行状态、历史数据和故障信息。利用远程控制功能,维护人员可对设备进行参数调整、程序升级等操作,无需亲临现场。另外,远程维护与管理系统还能对多台风电机组进行集中监控和管理,实现资源优化配置。例如,通过远程调整机组的功率输出,平衡风电场内各机组的负载,提高整个风电场的运行效率。

3 电气自动化技术在风电设备故障诊断中的应用

3.1 基于传感器的实时监测技术

基于传感器的实时监测技术是风电设备故障诊断的基础。各类传感器如同设备的“神经末梢”,将设备运行过程中的物理量转化为可测量的电信号,为故障诊断提供原始数据。在机械部件监测方面,振动传感器被广泛应用于齿轮箱、发电机轴承等关键部位。通过监测振动信号的幅值、频率等参数,可判断机械部件是否存在磨损、不平衡、松动等故障。例如,当齿轮箱内齿轮出现磨损时,其振动信号的频谱会出现特定频率成分的异常增大。温度传感器则用于监测电机绕组、轴承、齿轮箱等部件的温度,温度异常升高往往是故障发生的先兆,如轴承润滑不良会导致轴承温度急剧上升。在电气系统监测中,电流传感器和电压传感器实时采集发电机输出电流、电压信号,用于分析发电机的运行状态和电能质量。绝缘监测传感器则可检测电缆、电机等设备的绝缘性能,预防电气短路和接地故障的发生。

3.2 数据分析与故障诊断算法

数据分析与故障诊断算法是从传感器采集的数据中提取故障特征、判断故障类型的核心技术。常用的数据分析方法包括时域分析、频域分析和时频域分析。时域分析通过对信号的均值、方差、峰值等统计参数进行分析,判断信号是否异常。频域分析则将时域信号转换为频域信号,通过频谱分析确定信号的频率成分,找出故障对应的特征频率。例如,滚动轴承故障会在频谱上产生特定的故障特征频率。时频域分析结合了时域和频域的优点,能够分析信号随时间变化的频率特征,适用于

分析非平稳信号,如启动、停机过程中的振动信号。故障诊断算法主要有基于阈值的诊断方法、基于模型的诊断方法和基于人工智能的诊断方法。基于阈值的诊断方法简单直观,将采集到的数据与预设阈值进行比较,超过阈值则判断设备出现故障,但该方法对早期故障诊断能力有限。基于模型的诊断方法通过建立设备的数学模型,将实际运行数据与模型预测数据进行对比,根据差异判断故障,但模型的准确性对诊断结果影响较大。基于人工智能的诊断方法,如神经网络、支持向量机等,能够自动学习故障特征,具有较强的自适应能力和泛化能力,在复杂故障诊断中表现出色^[3]。

3.3 故障预警系统的设计与实现

故障预警系统基于传感器实时监测技术和数据分析与故障诊断算法,旨在提前发现设备潜在故障,发出预警信号,避免故障扩大化。故障预警系统的设计首先需要确定监测参数和预警阈值。根据风电设备的结构特点和运行经验,选择关键的运行参数作为监测对象,并通过理论计算、试验测试和历史数据分析等方法确定合理的预警阈值。系统需要建立数据采集与传输模块,将传感器采集的数据实时传输至数据处理中心。在数据处理中心,运用数据分析与故障诊断算法对数据进行处理和分析。当检测到数据异常时,系统根据预设的预警规则发出不同级别的预警信号,如黄色预警表示设备可能存在潜在故障,需要密切关注;红色预警表示设备故障已经发生,需要立即停机维修。系统还应具备故障原因分析和处理建议功能,为维护人员提供参考。

4 电气自动化技术在风电设备维护中的应用

4.1 远程维护与管理系统的构建

远程维护与管理系统的构建是实现风电设备高效维护的关键,该系统犹如一个无形的“超级管家”,通过分层架构设计,实现对风电设备的全方位、智能化管理。其主要由现场设备层、通信网络层和远程监控中心层组成,各层相互协作,共同保障系统的稳定运行。现场设备层作为系统的“感知触角”,包含了风电设备的控制系统、传感器和通信模块等核心组件。控制系统实时采集设备运行过程中的关键数据,如转速、温度、振动电流、电压等,这些数据如同设备的“生命体征”。传感器则如同设备的“感官”,将物理量精准转化为电信号,为系统提供原始数据支持。通信模块则负责将采集到的数据及时、准确地传输至通信网络层。例如,在某大型风电场中,现场设备层的传感器能够在毫秒级时间内捕捉到齿轮箱振动异常,并将数据传输至后续层级进行处理。通信网络层是连接现场设备与远程监控中心

的“信息高速公路”，采用工业以太网、4G/5G等通信技术，确保数据快速、稳定传输。工业以太网适用于风电场内部设备间的短距离高速通信，能够保障数据的低延迟和高可靠性；而4G/5G技术则突破地理限制，实现远程数据传输，使维护人员无论身处何地，都能实时获取设备运行状态。远程监控中心层是整个系统的“大脑中枢”，包括服务器、监控软件和维护人员操作终端。服务器承担着海量数据的存储与复杂处理任务，通过高效的数据管理和分析算法，挖掘数据背后的价值；监控软件具备强大的功能，可实现设备运行状态的实时可视化监控、智能故障诊断以及远程精准控制；维护人员通过操作终端，能够远程调整设备参数、升级控制程序，及时处理设备异常情况。为确保系统安全可靠运行，还需采用数据加密、身份认证、访问控制等安全措施，防止数据泄露和非法入侵。同时系统设计充分考虑扩展性和兼容性，能够无缝接入不同型号、不同厂家的风电设备，满足风电场不断发展的需求。

4.2 预防性维护策略的制定与实施

预防性维护策略基于设备运行状态监测和故障预测，是保障风电设备稳定运行、延长使用寿命的重要手段。其核心在于“防患于未然”，通过提前采取维护措施，避免设备故障发生，降低维修成本，提高风电场经济效益。制定预防性维护策略，首先要对风电设备进行全面深入的故障模式与影响分析（FMEA）。通过专业团队对设备结构、运行原理的研究，结合历史故障数据，系统梳理出设备关键部件的故障模式、故障原因和故障影响。在此基础上，结合设备运行实时数据和先进的故障预测算法，制定出科学合理的维护周期和维护内容。以齿轮箱为例，依据其运行时间、油温变化、振动频谱等数据，利用机器学习算法预测齿轮和轴承的磨损程度，提前规划润滑油更换、齿轮箱内部检查、轴承状态监测等维护工作，将潜在故障扼杀在萌芽状态。在实施预防性维护策略过程中，远程维护与管理系统发挥着不可或缺的作用。系统可根据维护计划自动生成提醒任务，推送给相关维护人员，确保维护工作按时完成。同时在维护过程中，系统详细记录维护时间、维护内容、更换部件等信息，形成完整的维护档案，为后续维护策略优化提供丰富的数据支持。借助人工智能技术对大量维护数据进行深度分析，能够发现维护工作中的规律和问题，如某些部件的实际使用寿命与预期不符，从而及时调整维护策略，使预防性维护更加精准、高效，进一

步提升风电设备的可靠性和稳定性。

4.3 智能备件管理系统的设计

智能备件管理系统借助信息化和智能化技术，致力于解决传统备件管理中存在的库存积压、备件短缺、管理效率低等问题，实现备件的高效管理，降低库存成本，提高设备维修效率，是风电设备维护体系中的重要一环。系统首先需要构建完备的备件数据库，详细记录备件的基本信息，包括名称、型号、规格、适用设备型号等；实时更新库存数量，确保数据准确反映备件库存状态；完整记录出入库记录，便于追溯备件流向；存储供应商信息，为备件采购提供参考。同时引入物联网技术，为备件安装RFID标签或传感器，实现对备件的实时跟踪和监控，无论是在仓库货架上，还是在运输途中，都能随时掌握备件的位置和状态信息。为实现备件的精准管理，系统利用数据分析和预测模型，结合设备运行状态、故障历史数据以及行业数据，预测备件的需求情况^[4]。系统具备完善的备件领用、归还、报废等流程管理功能，从备件申请、审批到领用出库，再到使用后的归还或报废处理，都实现了全流程的规范化和信息化管理。同时智能备件管理系统与远程维护与管理系统、供应商管理系统深度集成，实现备件需求信息的实时共享。当远程维护系统检测到设备故障需要更换备件时，备件需求信息立即同步至供应商管理系统，供应商可快速响应，安排发货，优化备件供应链，全面提升备件管理的整体效率和水平。

结束语

电气自动化技术在新能源风电设备故障诊断与维护中的应用意义深远。它不仅解决了风电设备复杂工况下的运行难题，还通过技术创新实现了运维模式升级。未来，随着技术的不断进步，电气自动化将与更多前沿技术融合，为风电行业的安全、高效、可持续发展提供更强有力的支撑。

参考文献

- [1]姜效诚.冶金企业电气自动化设备故障维修与维护研究[J].冶金与材料,2024,44(04):19-21.
- [2]齐日昊.冶金电气自动化设备故障诊断与维护探究[J].冶金管理,2023,(18):90-93.
- [3]凌瑜.基于物联网技术的电气自动化设备监测与故障诊断[J].电气技术与经济,2024,(06):150-152.
- [4]吕成泉.基于自动化系统下的电气设备维护及检修探析[J].清洗世界,2024,40(04):181-183.