

风电机组振动监测与故障诊断技术探究

余维

华润电力技术研究院有限公司, 广东 东莞 523000

DOI: 10.61369/TACS.2025080044

摘 要 : 随着可再生能源在能源结构中占比的持续提升, 风力发电作为其中的重要组成部分, 其设备的稳定运行对能源供应的连续性具有关键意义。风电机组长期处于户外复杂环境中, 易受气流、温度、湿度等因素影响, 各类故障的发生不仅会导致发电效率下降, 还可能引发安全隐患与经济损失。振动作为反映风电机组运行状态的重要物理量, 能够及时、准确地体现设备内部结构的异常变化, 基于振动信号的监测与故障诊断技术因此成为保障风电机组可靠运行的核心手段之一。本文从风电机组的基本结构与常见故障入手, 分析振动与故障之间的内在关联, 深入剖析不同类型的故障诊断方法, 并对该领域技术的未来发展趋势进行展望, 旨在为风电机组运维技术的优化提供理论参考, 推动风力发电行业的稳定发展。

关 键 词 : 风电机组; 振动监测; 故障诊断; 运行状态; 技术趋势

Exploration of Vibration Monitoring and Fault Diagnosis Technology for Wind Turbine Units

Yu Wei

China Resources Power Technology Research Institute Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523000

Abstract : With the continuous increase in the proportion of renewable energy in the energy structure, wind power generation, as an important part of it, the stable operation of its equipment is of crucial significance to the continuity of energy supply. Wind turbine units are long-term in complex outdoor environments and are easily affected by factors such as air flow, temperature, and humidity. The occurrence of various faults will not only lead to a decline in power generation efficiency, but also may cause potential safety hazards and economic losses. Vibration, as an important physical quantity reflecting the operating status of wind turbine units, can timely and accurately reflect the abnormal changes in the internal structure of the equipment. Therefore, the monitoring and fault diagnosis technology based on vibration signals has become one of the core means to ensure the reliable operation of wind turbine units. Starting from the basic structure and common faults of wind turbine units, this paper analyzes the internal connection between vibration and faults, deeply examines different types of fault diagnosis methods, and looks forward to the future development trend of technology in this field. It aims to provide theoretical reference for the optimization of wind turbine unit operation and maintenance technology and promote the stable development of the wind power generation industry.

Keywords : wind turbine units; vibration monitoring; fault diagnosis; operating status; technology trend

随着世界范围内对可再生能源开发应用, 风电成为一种清洁、可再生能源, 并且风电机组是其关键技术装备, 风机运行状态直接影响到风力发电系统的整体效率^[1]。然而, 由于风电机组通常安装在野外、海面等环境恶劣地区, 易受外部交变载荷、强风作用、温度变化等影响, 同时, 风电机组内部设备长时间运行, 会导致设备本身机械、螺栓等发生磨损、疲劳、松动等问题, 从而引发设备故障, 不但致使整个风电机组出现停机状态, 影响发电量, 并且易造成设备故障范围扩大, 进而引发不必要的运维维修成本增加, 甚至引发区域环境污染、对周边人群人身安全构成威胁, 因此需要能够在线实时监控风电机组的工作状态、对设备故障进行有效诊断, 降低运维成本发挥重要作用。

一、风电机组结构与常见故障分析

(一) 风电^[2]机组基本结构

风电机组是实现风能向电能转化的关键设备, 结构复杂且各

部件协同工作。风轮作为核心部件, 由多个叶片组成, 负责捕获风能并转化为机械能, 其设计、材料及安装角度直接影响风能捕获与转化效率。传动系统承担能量传递职责, 通过齿轮箱、联轴器部件将风轮低速转动转化为发电机所需的高速转动, 须具备

高精度与高可靠性以减少能量损耗。偏航系统依据风向传感器信号驱动机舱旋转，使风轮始终正对风向，其响应速度与精度关乎发电效率。电动系统负责叶片变桨控制、刹车制动等，通过电机驱动实现精确控制；刹车系统则在紧急或停机时使风轮停转，保障安全。发电机是机械能转电能的核心，有异步、同步等类型，性能决定发电质量与效率。控制系统如同“大脑”，分析传感器数据并调整叶片角度、转速等参数，确保机组在最佳状态运行。机舱容纳发电机、齿轮箱等关键设备，提供稳定工作环境并保护设备；塔架作为支撑结构，其高度与强度需结合风资源及地形设计，保障机组稳定。

（二）常见故障类型及危害

由于环境、机械应力、风电机组长时间运转造成的磨损等问题，风电机组运行期间会出现各种各样的故障。风电机组叶片损坏是一种比较普遍的故障，通常在强风、雷击、腐蚀等因素下，或是由于生产制造上的原因、安装过程中的疏漏、维护检修不及时等原因，极大地降低风能的摄取，会引起机组转速不稳定、风机急剧振动，严重的甚至出现风机叶片断裂，危及环境和人身安全的问题。风机机组箱体过热通常会出现转子不平衡的问题，而这一问题多发于在长时间运转过程中由于风机散热、通风不畅等原因，其内部的电气元件受到老化、绝缘性变差，增加了短路和漏电的概率，严重时会造成火灾。风机转子不平衡多是由于叶片的质量差异、安装误差、磨损程度不一致，而在运行期间出现剧烈的振动，其结果不但会加剧轴承和齿轮磨损、寿命降低，还会导致结构件疲劳损坏，以致影响运行的稳定甚至造成倾覆等问题^[3]。

（三）振动与故障的关联

由于风电机组自身的特性，其运行过程中不可避免地会出现一些振动，当风电机组在正常的工作运行过程中出现稳定且一致的振动幅度、频率等参数；而当故障发生时故障部件运动或受力状态发生变化，故障元件的振动特征也随之发生变化，因此振动信号相当于风电机组的故障“晴雨表”。风电机组出现异常振动是由于以下4类因素导致的：不平衡振动，振动频率和部件的转动频率相同，且幅度随转速的提升而增大；不对中振动，振动频率为转动频率的1-2倍，伴随轴向振动程度加剧；冲击振动，产生脉冲信号，频域处出现冲击频率和谐波峰值；松动振动，振动频率低且幅度随机组的载荷程度有随机性。每一种故障都会对应一种振动特征，振动信号的变化也能反映故障发展过程，持续监测分析振动数据可判断故障类型、位置及严重程度，并为维修提供依据^[4]。

二、风电机组振动监测与故障诊断技术剖析

（一）基于振动信号分析的诊断方法

基于振动信号的诊断方式是当前风电齿轮箱故障诊断的主要手段，基本思路是时域、频域特征的提取、设备运行状态的分析、故障的诊断。其中时域分析中的幅值、峰值、均值为主要判断因素，幅值大小与设备振动强弱息息相关，如果超出正常幅值

范围，则很可能是故障问题；峰值可以检测故障存在突发冲击性影响的特征；均值反映设备振动总体走向，与历史、标准值进行对比判断异常状况。峭度指标对振动中冲击成分非常敏感，一旦出现轴承点蚀、齿轮断齿等故障造成冲击振动，则峭度指标增大明显，可以随时发现相关故障的隐患。自相关分析技术可以反映信号不同时刻的相关信息，从复杂信号中提取其周期性信号，从而更加准确、快捷地反映故障相关特征信号，区分周期性振动与噪声的差别^[5]。

（二）基于机器学习的诊断方法

机器学习法是以数据驱动为核心人工智能诊断技术的一种，多用于处理大数据集，采用如支持向量机、人工神经网络、决策树、随机森林等算法。SVM是一种以统计学习理论为基础的分类算法，通过寻找一个或多个最优分类超平面将数据分成两部分，根据不同机组振动信号特征参数自动将振动信息划分为正常、故障等；ANN具有非线性映射和自适应泛化功能，通过大量数据学习训练正常和故障振动信号特征规律，依据振动信号对机组诊断实时有效分类，经过大量的训练可调整每个神经元的连接权值和阈值改变以提高诊断故障的准确性；决策树以树形结构对振动信号不同的幅值、频率、相位等值判断是否异常和故障等，决策树参数较易调整；随机森林则是对多个决策树集成在一起的模式分类，通过大量决策树综合获得更加有效的判断分析结果。各类诊断算法的数据训练是其运行的必要条件：需要获取足够量的包含各种不同工况、环境和故障类型的正常振动数据以及故障振动数据，经过清洗、去噪、归一化处理等预处理从而提供数据的准确性和可靠性，然后分成训练样本集和测试样本集，训练样本用于对模型进行训练^[6]。

（三）其他诊断方法

风电机组故障诊断除了以上两类方法之外，还有不少较为有效的方法，分别从不同角度监测分析机组状态，辅助振动监测技术，提高故障诊断的准确性和可靠性。其中，油液分析技术是监测和判断设备磨损和运行状况的技术，借助对润滑系统中油液的检测：风力发电机运行过程中，在齿轮箱、轴承等部件磨损过程中，会引入一些颗粒杂质，通过对颗粒的大小、形状、材质等分析可了解磨损程度及磨损类型，例如对润滑油的铁谱分析可使这些颗粒分离出来，并在显微镜下通过粒状物的宏观和微观物理图像进行观察，从而得出结论来判断相应的异常磨损部位、类型及原因^[7]。另外通过检测油液的黏度、酸值、含水量等理化指标可了解润滑系统中油液质量的变化情况，从而及时发现一些油液污染及氧化等原因引起润滑系统中的故障，并为设备维护维修提供支撑；红外线热成像技术则是基于红外物体辐射原理的非接触温度检测技术，可及时有效观察和发现风力发电机组部件之间的温度异常。通过该技术可分析不同部件之间的温度关系和变化，对出现温度异常的部件可快速定位其产生故障的部位，并判断发生原因，如检测发电机时通过测量发电机电流产生的磁滞损耗和铜损等部件温度等快速准确定位发电机电流导致的绕组局部过热；在对塔筒、叶片进行热成像测温时，也能够及时发现结构缺陷或由结构缺陷、应力集中现象导致的设备结构温度异常变化，并判断

产生故障的原因^[8]。

三、技术发展趋势展望

(一) 智能化发展方向

人工智能、大数据分析技术的进步促进了风电机组振动监测与故障诊断的智能化。智能化故障监测诊断主要通过先进技术对振动数据的分析,达到故障精准预测与诊断,并提高运维效率、可靠性。在故障预测上,通过基于人工智能的方法利用历史振动数据、历史运行工况进行运行趋势辨识,并建立高准确率的预测模型,实现对故障发生位置、故障类型、故障严重程度等的预测,以便运维单位能够及时制定有针对性的维修计划,降低停机损失;通过分析、解读预测出的故障的诊断结果自动生成检修预案与维修维护计划,通过历史故障信息、设备运行记录等生成有针对性的维护计划等,避免不必要的检修计划执行,降低运营维护成本;通过实时智能诊断评价当前的运行情况,实时监测振动及其他性能指标异常的早期识别,通过数据分析的方式,进行实时状态变化诊断,并通过建议调整参数设置进行运行状态调节,进而实现优化机组稳定运行^[9]。

(二) 主流技术在实际项目中的应用情况

1. 核心技术落地架构

实际项目中,振动监测系统已形成“传感器矩阵+智能算法+终端预警”的成熟架构。硬件上以加速度传感器为主力,在齿轮箱、发电机等关键部位部署,如某海上风电场采用16通道同步采集系统,采样率达100kHz,可捕捉0.1mm/s级的早期振动异常。信号处理则依赖FFT变换与小波分析,某项目通过该技术将故障诊断时间从4小时缩短至30分钟。

2. 智能诊断的实战效能

AI算法已成为故障诊断核心。中讯烛龙在风电项目中部署的LSTM时序预测模型,提前14天识别叶片螺栓松动,CNN图像识别对叶片裂纹准确率达95.2%。某科研机构的深度学习模型在100个风电场验证中,故障识别准确率达92%,曾提前12小时预警齿轮箱油膜破裂隐患。三级预警机制通过APP推送实现秒级响应,某项目借此将非计划停机时间缩短18%。

3. 典型项目价值体现

海上风电项目中,振动监测的经济效益尤为显著。某6MW级风电场部署振动-温度-油液联合监测系统后,齿轮箱故障预警提前30天,年维修成本下降65%,风机寿命延长3.2年。陆上项目中,明阳智能等企业的方案使故障检出率提升20%,某风电场通过该技术避免齿轮箱报废,减少直接损失200万元。当前国产化系统正加速替代,在传感器精度与抗干扰性上已接近国际水平^[10]。

四、结语

在当前世界能源向可再生能源转变发展的趋势下,风电机组振动监测及故障诊断技术是风电事业发展的重要保障。从对机组复杂结构的分析中,找到机组中各个部分的作用与故障问题;结合先进的振动监测技术,对设备在运行过程中状况及时、准确地感知把握;各类故障诊断方式对故障进行识别确定。该技术在今后的发展也极具潜力,智能化应用方向是指结合AI、大数据来提高对故障的预测诊断准确性、时效性,并最终做出智慧的判断;多技术综合应用方向是指借助物联网、新型材料等提高对机组设备的感知能力及管控的能力,进一步提升机组性能。

参考文献

- [1] 唐云,魏昂昂,童彤,等.面向风电机组行星齿轮箱故障诊断的振动监测技术研究综述[J].风能,2022,(08):92-95.
- [2] 赵海平.浅析风电机组振动监测与故障诊断系统研究[J].中国设备工程,2023,(16):149-150.
- [3] 李仕成.关于风电机组振动监测与故障诊断探究[J].电子测试,2022,(02):106-107.
- [4] 崔夕峰,王建梅,宁可.风力发电机组振动监测的超标问题研究[J].太原科技大学学报,2023,39(02):131-135.
- [5] 吉庆昌,刘文贵,李爱宁.风电机组振动监测与故障预测系统[J].科技风,2023,(08):105+107.
- [6] 任岩,张锴.风电机组传动链综合状态监测与故障诊断技术[J].排灌机械工程学报,2022,36(07):613-616+631.
- [7] 李浪,刘辉海,赵洪山.风力发电机振动监测与故障诊断方法综述[J].电网与清洁能源,2023,33(08):94-100+108.
- [8] 赵飞.风电机组振动监测与故障诊断研究[J].科技与创新,2023,(08):140.
- [9] 贾轶军.风力发电机组振动故障诊断与分析[J].内蒙古石油化工,2024,40(04):73-75.
- [10] 谢松汕,许宝杰,吴国新,等.基于状态监测与故障诊断在风电机组上的应用分析[J].电子测试,2023,(08):60-62.