

风电场智能故障诊断技术研究

戚溯源

华能营口仙人岛热电有限责任公司 辽宁 营口 115200

摘要: 风电场作为清洁能源重要组成部分,其安全稳定运行至关重要。风电机组机械部件故障、电气系统故障及控制系统故障频发,严重影响发电效率与设备寿命。基于振动分析、油液分析、机器学习及物联网的智能故障诊断技术,通过多维度数据采集与分析,实现故障的精准识别与定位。随着多源数据融合、智能化自动化水平提升、远程监测普及及故障预测健康管理发展,风电场智能故障诊断技术将为风电产业高质量发展提供有力支撑。

关键词: 风电场;智能故障诊断;技术

引言

在全球能源结构加速向清洁化转型的背景下,风电场已成为保障能源安全、推动可持续发展的关键力量。风电机组复杂的运行环境与系统结构,致使机械、电气及控制系统故障隐患丛生,传统诊断方式难以满足运维需求。本文聚焦风电场智能故障诊断技术,系统梳理常见故障类型,深入剖析基于多技术手段的诊断方法,并对其发展趋势进行前瞻性探讨,旨在为提升风电场运维效率与可靠性提供理论与技术参考。

1 风电机组常见故障类型

1.1 机械部件故障

风电机组机械部件长期处于高转速、重载荷且多变的工况环境,承受复杂交变应力,致使故障频发。叶片作为捕获风能的核心部件,易受风沙侵蚀、雷击及气动载荷作用,出现表面涂层剥落、结构内部裂纹甚至断裂等损伤。当裂纹扩展至临界尺寸,将破坏叶片气动外形,降低风能转换效率,严重时引发叶片折断事故。传动系统中的齿轮箱,因齿轮啮合过程存在齿面磨损、点蚀,轴承润滑不良、疲劳剥落等问题,造成传动效率下降、振动加剧及异常噪声。高速运转下,齿轮箱油温升高,若散热系统失效,润滑油性能劣化,进一步加剧部件磨损。主轴承承受着叶片传递的巨大扭矩与弯矩,长期运行可能产生轴系弯曲变形、键槽磨损,引发轴系对中不良,导致联轴器异常振动与传动失效,威胁机组安全稳定运行。

1.2 电气系统故障

风电机组电气系统承担着能量转换与传输的关键功能,复杂的电磁环境与频繁的功率波动易引发故障。发电机作为机电能量转换的核心设备,定子绕组绝缘层在电、热、机械应力联合作用下逐渐老化,出现局部放电、绝缘击穿现象,致使相间或匝间短路,中断电能输

出。转子滑环与碳刷在长期摩擦中,碳刷磨损加剧、接触电阻增大,产生火花放电,加速滑环表面氧化,导致发电性能下降。变流器在实现电能频率、电压变换过程中,功率器件如IGBT模块因过流、过压及散热不良,发生热失控、器件损坏,造成变流器输出波形畸变、功率调节失效。电缆作为电能传输的载体,长期受环境温度变化、机械振动影响,绝缘层出现龟裂、老化,引发电缆接地或相间短路故障,影响电力输送可靠性与机组正常运行。

1.3 控制系统故障

风电机组控制系统通过传感器实时监测机组运行状态,协调各部件精准运行,传感器故障将直接影响控制精度与可靠性。风速风向传感器因长期暴露在户外,受沙尘、盐雾侵蚀,内部电子元件性能下降,导致测量数据偏差或信号丢失,使机组无法根据实际风况优化运行参数,降低发电效率。温度、振动传感器若出现线路接触不良、零点漂移,将输出错误监测信号,引发控制系统误判,触发不必要的停机保护或错过故障预警时机。控制器作为控制系统的核心,在复杂电磁干扰环境下,其内部程序可能出现逻辑紊乱、死机现象,致使控制指令无法正常发送或执行。通信系统负责各部件间数据交互,网络接口松动、通信协议不匹配或电磁干扰导致数据传输中断、丢包,使机组各子系统间协同失效,严重时引发机组失控,危及设备与人身安全。

2 风电场智能故障诊断技术

2.1 基于振动分析的故障诊断技术

(1) 基于振动分析的故障诊断技术以风电机组运行时产生的振动信号为研究对象,借助加速度传感器、速度传感器等设备,在齿轮箱、发电机、轴承等关键部件表面采集振动数据。这些振动信号蕴含着设备运行状态的丰富信息,正常工况下振动信号呈现特定规律,而当

设备出现磨损、不平衡、不对中、松动等故障时,其振动频率、幅值等参数会发生明显改变。(2)通过傅里叶变换、小波变换等信号处理方法,将时域振动信号转换到频域或时频域,可更清晰地解析故障特征频率,从而精准识别故障类型与严重程度。例如,滚动轴承故障会在特定频率处产生振动峰值,通过对比标准频谱与实测频谱,能够快速定位故障轴承。(3)该技术凭借非侵入式检测特性,可在设备运行状态下实时监测,不影响机组正常发电。振动信号采集相对便捷,数据处理算法成熟,能有效降低故障诊断成本,在风电场长期运行监测与早期故障预警中发挥重要作用,为风电机组的可靠性运行提供有力保障^[1]。

2.2 基于油液分析的故障诊断技术

(1)基于油液分析的故障诊断技术利用润滑油在风电机组传动系统中的循环特性,将其视为设备运行状态的“液体活检样本”。润滑油在循环过程中,会携带设备零部件磨损产生的金属磨粒、污染物颗粒,以及因高温氧化、添加剂消耗等引起的理化性质变化信息。(2)采用铁谱分析、光谱分析、颗粒计数等手段对油液进行检测。铁谱分析通过高梯度磁场分离并沉积油液中的磨粒,在显微镜下观察磨粒的形态、尺寸和成分,可判断磨损类型与严重程度;光谱分析则利用原子发射或吸收光谱原理,定量分析油液中金属元素的含量,确定磨损部件材料;颗粒计数能统计油液中不同尺寸颗粒的数量,评估污染程度。(3)该技术能够提前发现设备潜在磨损故障,尤其适用于齿轮箱、液压系统等密闭部件的故障诊断。通过定期采集油液样本进行分析,可绘制设备磨损趋势曲线,为制定合理的维护计划提供科学依据,避免因突发故障导致的停机损失,提升风电场整体运维效率。

2.3 基于机器学习的故障诊断技术

(1)基于机器学习的故障诊断技术依托风电机组运行过程中产生的海量数据,涵盖振动、温度、电流、转速等多源异构数据。通过数据清洗、特征提取等预处理,构建包含正常运行状态与各类故障状态的数据集,为机器学习模型训练提供基础。(2)运用支持向量机(SVM)、随机森林、深度学习神经网络等算法,对数据特征与故障类型之间的映射关系进行学习。例如,卷积神经网络(CNN)可自动提取图像化数据(如振动信号时频图)的特征,实现故障的高精度分类;长短时记忆网络(LSTM)则擅长处理时间序列数据,捕捉设备运行状态的动态变化规律,有效预测故障发展趋势。(3)该技术具备强大的自适应学习能力,能够从复杂数据中

挖掘潜在故障模式,即使面对新的故障类型也能通过持续学习优化诊断模型。与传统方法相比,基于机器学习的故障诊断技术可大幅提高诊断准确率与效率,在风电场智能化运维中展现出显著优势,助力实现设备的精准维护与故障预测^[2]。

2.4 基于物联网的故障诊断技术

(1)基于物联网的故障诊断技术通过在风电机组各关键部位部署传感器节点,包括振动传感器、温度传感器、压力传感器等,构建覆盖整个风电场的物联网监测网络。这些传感器实时采集设备运行数据,并借助无线网络(如5G、LoRa等)将数据传输至云平台或数据中心。(2)在数据处理层面,利用边缘计算技术对采集到的数据进行初步分析与过滤,减少无效数据传输,降低网络负载。云平台则运用大数据分析技术,对海量数据进行存储、整合与深度挖掘,通过建立设备运行状态模型与故障预警规则,实现对风电机组故障的实时监测与智能诊断。(3)该技术打破了空间限制,运维人员可通过移动终端或电脑远程获取设备运行状态信息,及时响应故障报警。物联网系统可与风电场的SCADA(数据采集与监视控制系统)集成,实现多系统协同运行,优化风电场整体运维管理流程,提高风电场的自动化、智能化水平,保障风电机组安全稳定运行。

3 风电场智能故障诊断技术的发展趋势

3.1 多源数据融合

在风电场智能故障诊断领域,多源数据融合正成为提升诊断准确性与可靠性的关键路径。风电场运行过程中,设备传感器、SCADA系统、气象监测设备等产生海量异构数据,涵盖设备运行参数、振动信号、油温油压、风速风向等信息。这些数据从不同维度反映风电机组运行状态,单一数据源存在信息局限,难以全面捕捉设备故障特征。通过多源数据融合技术,将时域、频域、空间域等多维度数据有机整合,构建起完整的设备运行画像。以齿轮箱故障诊断为例,融合振动传感器采集的振动信号与温度传感器获取的油温数据,结合齿轮箱转速信息,可利用深度学习算法挖掘数据间隐藏关联,精准识别齿轮磨损、轴承故障等异常。在数据融合过程中,需解决数据采样频率不一致、时间同步偏差等问题,通过时间序列对齐、特征标准化等预处理手段,确保多源数据的有效融合。针对不同类型数据的特点,采用分布式存储与并行计算技术,提升数据处理效率,为故障诊断提供坚实的数据基础,实现从局部到整体、从片面到全面的故障诊断能力跃升。

3.2 智能化与自动化

智能化与自动化是风电场智能故障诊断技术发展的核心驱动力,旨在降低人工干预,提升诊断效率与精度。传统故障诊断依赖人工经验与简单规则判断,难以应对复杂多变的设备运行场景。随着人工智能技术的发展,机器学习、深度学习算法在故障诊断中广泛应用,赋予诊断系统自主学习与智能决策能力。深度神经网络能够自动提取设备运行数据的高阶特征,识别故障模式。例如,卷积神经网络(CNN)可对振动信号图像化处理后的数据进行特征提取,有效诊断机械部件故障;循环神经网络(RNN)及其变体LSTM网络,适合处理时序数据,能捕捉设备运行状态的动态变化,预测故障发展趋势。自动化诊断流程的构建,从数据采集、特征提取、故障识别到诊断结果输出,实现全流程自动化。借助智能算法与自动化技术,诊断系统可实时分析海量数据,快速定位故障源,减少故障诊断时间,提高风电场运维效率,保障设备安全稳定运行,使故障诊断从依赖人工经验的传统模式向智能化、自动化的现代模式转变^[3]。

3.3 远程监测与诊断

远程监测与诊断打破了空间限制,为风电场运维带来全新模式。风电场通常分布在偏远地区,设备数量众多且分散,传统现场巡检与诊断方式成本高、效率低。远程监测与诊断技术通过网络通信将风电机组运行数据实时传输至远程监控中心,运维人员可在千里之外对设备进行状态监测与故障诊断。高速稳定的通信网络是远程监测与诊断的基础,5G技术的应用为数据实时传输提供了保障,降低数据传输延迟,实现设备运行状态的实时感知。远程监控中心部署强大的数据分析与诊断平台,利用大数据分析、云计算等技术,对传输过来的数据进行深度挖掘与处理。通过建立设备健康状态评估模型,结合历史数据与实时监测数据,对设备故障进行预警与诊断。远程专家会诊功能进一步提升诊断准确性,不同地域的专家可基于共享数据,共同分析故障原因,制定解决方案,无需亲临现场即可完成设备故障诊断与维修指导,降低运维成本,提高风电场运维的及时性与有效性。

3.4 故障预测与健康管理(PHM)

故障预测与健康管理(PHM)从被动应对故障转向主动预防故障,是风电场智能故障诊断技术发展的前沿方向。传统故障诊断侧重于故障发生后的原因分析与修复,而PHM以设备全生命周期管理为目标,通过对设备运行数据的持续监测与分析,预测故障发生的可能性与时间节点,评估设备健康状态。在故障预测方面,基于数据驱动的预测模型结合物理模型,综合考虑设备运行工况、环境因素等影响,利用机器学习算法对设备退化过程进行建模。例如,通过分析设备振动、温度等参数的变化趋势,预测部件剩余使用寿命,提前制定维护计划。在健康管理层面,建立设备健康指标体系,将设备运行状态量化评估,实时掌握设备健康水平。根据健康评估结果,优化设备运行策略,合理安排维护资源,避免过度维护与欠维护现象。PHM技术的应用,不仅能减少设备故障停机时间,提高发电量,还能降低运维成本,实现风电场设备管理的科学化、精细化,推动风电场运维从“事后维修”向“预知维护”的根本性变革^[4]。

结语

综上所述,风电场智能故障诊断技术的研究对保障风电场高效、稳定运行意义重大。通过对常见故障类型的分析,以及多种智能诊断技术的应用,有效提升了故障诊断的准确性与及时性。随着多源数据融合等趋势的发展,未来研究应进一步深化技术融合创新,加强跨领域协同,探索更高效、智能的故障诊断与管理模式,推动风电产业向更高质量、更可持续方向发展。

参考文献

- [1]胡春雷.风电场设备智能监测与故障诊断分析[J].装备制造技术,2024(5):144-146,150.
- [2]卫飞飞,武鹏.基于人工智能的风电场电气故障诊断与自愈技术研究[J].中国战略新兴产业,2024(21):78-80.
- [3]钟瑞艳.风电场运行中的故障诊断与预防维护[J].科学与信息化,2024(12):138-140.
- [4]康宏,曹林.风电场故障诊断及预警专家系统[J].百科论坛电子杂志,2021(23):2887-2888.