

风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究

陈彦丰

西安铁路职业技术学院 陕西西安 710026

DOI:10.12238/ems.v7i6.13844

[摘要] 随着风电产业的快速发展,风力发电机组的可靠性和安全性备受关注。风电机组状态监测与故障诊断技术可以有效提高风电场的运行管理水平,降低运维成本,保障风电机组安全、稳定、高效运行。本文重点分析了风力发电机常见故障类型,综述了振动、油液、声音、温度等状态监测技术的原理与应用,比较了基于信号处理、人工智能的故障诊断方法的特点和优缺点。在此基础上,对风电机组状态监测与故障诊断技术的发展趋势进行了展望。

[关键词] 风力发电机; 状态监测; 故障诊断; 可靠性

引言:

近年来,全球风电产业持续快速增长。随着单机容量不断增大,风电机组结构日趋复杂,运行环境日益恶劣,风电场远离人烟,运维难度加大。风电机组故障频发,导致风电场发电效率降低,运维成本升高,严重制约了风电产业的健康发展。因此,风力发电机状态监测与故障诊断技术受到学术界和工业界的广泛关注。及时、准确地掌握风电机组的运行状态,发现和诊断风电机组的典型故障和早期故障征兆,对确保风电设备安全经济运行,提高风电场发电效率具有重要意义。

一、风力发电机常见故障分析

风力发电机组由叶片、齿轮箱、发电机、变流器、偏航系统等关键部件构成,结构复杂,在恶劣的环境中长期运行,极易发生各类机械、电气故障。其中,叶片、齿轮箱、发电机故障发生率较高,且修复难度大,造成的经济损失最为严重。叶片故障包括开裂、脱粘、断裂等,主要由疲劳载荷、环境腐蚀、雷击和冰冻等因素引起,影响风轮气动性能,甚至导致叶片掉落。齿轮箱故障主要包括齿轮疲劳点蚀、齿面剥落,轴承磨损、保持架断裂等,传动效率降低,甚至引发连锁反应。发电机故障包括绕组匝间短路、转子碰摩、引出线断裂等,发电效率下降,乃至损坏报废。此外,变流器故障、偏航系统失效、塔筒倾斜也时有发生。

二、风力发电机状态监测技术

(一) 振动监测技术

风力发电机组由于其特殊的运行环境和工况,叶片、齿轮箱、发电机等关键部件长期承受交变载荷和环境因素影响,极易发生疲劳裂纹、磨损、碰摩等局部故障,而这些故障通常会引发振动异常。振动监测技术基于振动信号与故障模式间的内在联系,通过采集并分析风电机组的振动数据,评估设备健康状态。常用的振动传感器包括加速度传感器和速度传感器,合理布置于风电机组塔筒、机舱、齿轮箱等部位^[1]。

由于风电机组转速、载荷随风速变化剧烈,采集到的振动信号往往呈现非平稳特性,给特征提取带来挑战。先进的信号处理算法如阶次分析可从振动信号中分离出与转速相关的成分,消除了转速波动的影响。通过提取时域统计特征如均值、方差、峭度,频域特征如特征频率、边频带能量,再结合机器学习算法,即可准确识别叶片开裂、齿轮点蚀、转子碰摩等典型故障。此外,阶次分析、小波分析等方法还可揭示早期微小缺陷引起的弱故障特征,为风电机组状态监测提供了有力工具。

(二) 油液监测技术

齿轮箱是风力发电机组的核心传动部件,其故障率高、修复难度大,因此备受关注。润滑油是齿轮、轴承良好运转的基础,其物理化学性质的变化与齿轮箱磨损、腐蚀等故障息息相关。例如,油液黏度降低预示着油品老化,酸值升高意味着油液氧化,水分超标则易引发乳化和生锈^[2]。通过对齿轮箱油液进行采样分析,检测运行过程中油液理化指标的异常变化,可以敏感、及时地发现轴承点蚀、齿面微点蚀等早期疲劳故障征兆,从而实现预测性诊断与维护。油液颗粒物污染度分析也是评估齿轮箱磨损程度的有效方法。磨损产生的金属碎屑会混入润滑油中,其形貌、尺寸、成分受到磨损类型和程度的影响。采用光学显微镜对油液沉积物进行铁谱分析,可判别齿轮、轴承、箱体的材料去向,定量评估磨损严重程度。光谱分析还可测定油液中金属元素的含量,进一步揭示齿轮箱磨损的微观机理。油液监测为主动全面掌控齿轮箱健康状态提供了新思路。

(三) 声音信号监测技术

风力发电机组运行时,旋转部件相互咬合、转子气动噪声等会产生丰富的声音信号,蕴含设备状态特征信息。当叶片开裂、齿轮点蚀、轴承保持架断裂等局部故障发生时,结构振动将通过空气传播,在声音信号中留下故障印记。声音信号频带宽,易受环境噪声干扰,因此需合理布置拾音器,

并采用滤波、降噪等预处理措施。小波包分解可自适应地提取声音信号的时频域特征,揭示故障引起的瞬态冲击成分^[3]。经验模态分解则可将非线性、非平稳声音信号分解为固有模态函数,突出不同尺度下的故障模式。基于小波包能量熵、本征熵等特征参数,结合支持向量机等机器学习算法,可实现对风电机组齿轮磨损、轴承游隙等典型故障的有效诊断。声音信号频带更宽,传播距离更远,有望在叶片健康监测中发挥独特作用。然而,声音信号易受背景噪声、风切变等环境因素的影响,抗干扰能力有待进一步提高。

(四) 温度监测技术

温度反映了风力发电机组各部件的受热状态,是评估其运行健康水平的重要依据。齿轮啮合产生的摩擦热、轴承滚动体与滚道间的黏着传热,会引起局部热量聚集。当齿面、滚道发生微观疲劳剥落时,摩擦因数骤增,局部温度急剧攀升。同样,发电机定子绕组匝间短路、转子碰摩等电气故障,也会导致局部放热增多,引起温度异常。采用红外热成像仪、光纤光栅传感阵列等先进测温装置,对风电机组传动链、发电系统进行实时测温,可及时捕捉故障引起的早期微小温升。在温度时序数据中,异常多表现为阶跃、尖峰等非平稳波动,传统的时域统计分析难以全面刻画。多尺度熵可度量时间序列在不同尺度下的非线性复杂程度,灵敏地检测温度的动态异常变化。聚类分析则可自动将不同故障引起的温度异常模式划分为不同的簇,实现温度异常信号的自动分类。将温度数据异常检测、模式识别与机理分析相结合,可准确诊断风电机组的结构热故障和电气热故障,并溯源故障成因。

三、风力发电机故障诊断方法

(一) 基于信号处理的诊断方法

该方法通过对风电机组振动、声音等监测信号进行时域、频域、时频域分析,提取故障特征信息,并结合特征模式匹配等方法,实现故障定位与识别。时域分析主要针对统计特征值,如均值、方差、峰值、峭度等,适用于稳态工况下的故障诊断。频域分析如傅里叶变换可提取频谱特征,揭示周期性故障模式,但不适用于早期微弱故障。时频分析如短时傅里叶变换、小波变换兼具时域和频域分辨能力,可描述非平稳信号的局部时频特性,但计算量大,实时性难以保证。该类诊断方法直观、快速,但通常需要诊断人员具有丰富的领域经验和信号分析知识。

(二) 基于人工智能的诊断方法

该方法利用机器学习算法,从历史运行数据中自动提炼故障征兆,构建故障诊断知识库。专家系统综合振动、油液等多源异构数据,结合专家经验,形成诊断推理规则,但知识获取和表示困难。人工神经网络可从大数据中学习故障

模式,且容错能力强,但样本标注难度大,泛化能力有待提高。支持向量机可解决小样本、非线性分类问题,但参数调节复杂,诊断性能对核函数敏感。近年来,深度学习在图像、语音等领域取得重大突破,也为风机故障诊断带来新的思路。卷积神经网络可自动学习故障的多尺度空间特征,循环神经网络则可建模时序数据的长时依赖关系,大幅提升了故障诊断的准确性与泛化能力。

(三) 诊断方法比较与讨论

基于信号处理的诊断方法实现简便,适用于中后期显性故障,但特征构造依赖于人工,且抗噪性不足。基于物理模型的诊断方法从故障机理出发,建立部件故障-监测信号之间的解析关系,具有较强的可解释性,有助于故障成因分析与预后推演。然而,风电机组结构复杂、工况多变,获得全面准确的机理模型存在困难。基于人工智能的诊断可自动学习复杂的故障模式,容错能力强,但受限于样本质量,泛化能力不足。未来,融合机理建模、数据驱动,结合仿真、实测数据的诊断方法将成为主流趋势。此外,考虑风电机组运行工况,研发自适应、在线诊断算法,并纳入风电机组控制策略,实现主动防护,也是未来的重点方向。

结束语

随着风电产业的持续发展,风力发电机组状态监测与故障诊断技术面临新的机遇与挑战。以振动、油液、声音、温度为代表的状态监测技术,与信号处理、机理建模、人工智能等故障诊断方法深度融合,将极大提升对风电机组典型和早期故障的诊断与预警能力。未来,在线诊断、主动防护、协同优化将成为风电机组智能运维的新趋势。风电机组高可靠、低成本运行所需的状态监测、故障诊断与控制一体化技术,仍需要产学研用各界协同攻关,助力风电产业高质量、可持续发展。

[参考文献]

- [1] 孙红凯. 风力发电机组振动状态监测与故障诊断分析[J]. 家电维修, 2025, (02): 113-115.
- [2] 王仲, 姜娇. 风力发电机状态监测和故障诊断[J]. 辽宁科技学院学报, 2024, 26 (05): 40-44+59.
- [3] 王双林. 海上风电场风力发电机状态监测与运行维护策略[J]. 海峡科学, 2024, (08): 48-51.

作者简介: 陈彦丰, (1990.09-), 男, 汉族, 甘肃省通渭县, 西安铁路职业技术学院, 助教, 硕士研究生, 机电一体化技术。

基金课题 (须有编号): 西安铁路职业技术学院 2022 年度立项课题 (XTZY22G07)