

# 风力发电机组运行中的故障诊断与维护技术

杨晓峰, 周九奎, 彭文书, 王洪涛, 何宇哲

(华能盘锦风力发电有限公司, 辽宁 盘锦 124000)

**摘要** 风力发电机组的故障诊断技术涵盖了振动监测、电信号分析、润滑油油液分析、红外光谱分析, 以及针对特定部件如叶片和发电机的专门维护策略。每一种技术都有其独特的优势, 能够从不同角度揭示设备的健康状况。维护技术不断发展, 从传统的定期维护向预测性维护转变, 借助于大数据、云计算和人工智能等先进技术, 实现对设备状态的实时监测与智能分析。本文就风力发电机组运行中的故障诊断与维护技术展开探讨, 以期为相关人员提供参考。

**关键词** 风力发电机组; 故障诊断; 振动监测技术; 电信号监控技术; 润滑油油液分析技术

**中图分类号**: TM315; TM307.1

**文献标志码**: A

**文章编号**: 2097-3365(2024)12-0037-03

风力发电机组在长时间、高强度的运行过程中, 难免会遇到各种故障与挑战。这些故障不仅影响发电效率, 更可能危及设备安全, 增加运维成本。因此, 高效、准确的故障诊断与维护技术成为确保风力发电系统稳定运行的核心要素。这不仅能够提前发现潜在故障, 还能精准定位问题所在, 为制定高效的维护策略提供科学依据, 最大限度地减少非计划停机时间, 提升整个风电场的运行效率和经济收益。

## 1 风力发电机组运行中的故障诊断

### 1.1 振动监测技术的应用

振动监测技术作为预测性维护的重要组成部分, 在确保大型机械设备高效稳定运行方面发挥着不可或缺的作用。它不仅限于风力发电机组, 还广泛应用于石油化工、航空航天、轨道交通以及各类制造业的复杂设备中。这项技术的核心价值在于其能捕捉到设备微小的异常变化, 及时预警潜在故障, 避免突发性的设备停机, 减少经济损失和安全隐患。在风力发电领域, 振动监测是保障风机长期稳定运行的关键技术之一。随着物联网、大数据和人工智能技术的发展, 现代振动监测系统已经超越了简单的数据采集与分析阶段。先进的算法, 如机器学习和深度学习, 被应用于振动信号的处理与分析中, 使系统能够自动识别更复杂、更细微的故障特征。通过对历史数据的学习, 算法不断优化其故障诊断模型, 提高诊断的准确性和自适应性。此外, 云平台的应用使得跨地域、多机组的振动数据得以集中管理和分析, 便于运维团队远程监控, 及时制定维护策略。

### 1.2 电信号监控技术的应用

电信号监控技术作为现代工业设备状态监测与故障诊断的核心手段之一, 其应用范围远不止于涡轮机械、多级齿轮和感应式电机, 还深入了航空航天、汽车制造、能源电力等多个关键领域。在电信号监控技术的演进历程中, 信号处理方法的不断进步起到了至关重要的作用。傅里叶变换是最为基础且广泛应用的方法, 它能够揭示信号中隐藏的频率成分, 帮助识别与特定故障模式相关的谐波和次谐波。例如, 在风力发电领域, 通过分析电流信号的频谱, 可以有效识别发电机定子绕组的局部短路、转子失衡或电网谐波污染等问题。瞬时功率 FFT 法则进一步扩展了传统傅里叶变换的应用, 尤其适用于含有非线性负载的电力系统。它通过计算瞬时有功功率和无功功率的频谱, 能更精确地定位到电气设备中的非线性损耗或不平衡负载引起的故障, 这对于提升风力发电系统的稳定性和效率尤为关键。相较于傅里叶变换专注于频域分析, 小波变换则在时频两域都展现了卓越的分析能力, 特别适合于含有瞬态特性的电信号分析。在复杂机械设备的故障诊断中, 小波变换能够捕获到短暂且随时间变化的故障特征, 如齿轮箱的冲击故障、电机启动过程中的电流突变等, 提供更为精细的时间-频率局部信息, 极大地增强了故障检测的灵敏度和准确性。

### 1.3 润滑油油液分析技术的应用

在油质成分分析中, 技术人员关注的不仅是润滑油本身的质量退化, 更重要的是通过分析油中含有的机械杂质、水分、酸碱度和黏度变化等指标, 间接反

映设备的磨损状况和工作环境的影响。例如，水分的增加可能是密封不良的信号，而酸碱度的改变则可能预示着油品氧化或内部腐蚀的发生。通过定期监测这些参数，可以评估油品的适用性，及时采取措施，比如换油或调整维护计划，以防止进一步的损害。油液中的微粒分析通过光谱分析和颗粒计数技术，对油液中磨损金属颗粒、非金属污染物等进行量化和定性分析。这些微小的“信使”携带了关于设备磨损模式和程度的重要信息。光谱分析能够识别不同元素的种类及其浓度，有助于判断磨损部件的材质；颗粒计数则关注于磨粒的尺寸分布，大颗粒往往指示着严重的冲击磨损，而小颗粒增多则可能意味着渐进磨损或过滤系统的失效。通过对这些数据的综合分析，可以精确定位设备中磨损最严重的部分，为针对性的维修提供直接依据。随着传感器技术、物联网和大数据分析的发展，润滑油油液分析技术正逐步向智能化、在线监测方向迈进。

#### 1.4 红外光谱分析技术的应用

红外光谱分析技术作为一项强大的非破坏性分析工具，凭借其对分子结构高度敏感的特性，在材料科学、化学、生物医学乃至环境监测等领域展现出了广泛的应用潜力。

在机械磨损监测与故障诊断中，该技术与润滑油油液分析技术的结合，更是开辟了设备状态监测的新途径，特别是对于像风力发电机组这类大型、复杂机械系统的维护尤为重要。红外光谱分析基于分子振动和转动对红外辐射的选择性吸收原理，不同化学键和官能团在特定波长范围内展现出特征吸收峰，这些吸收峰如同分子的指纹，能够揭示样品中化合物的种类和含量。相比其他分析技术，红外光谱分析具有无需样品预处理、检测速度快、灵敏度高以及能够同时分析多种组分的优点，尤其适合于复杂体系中微量成分的鉴定。

风力发电机组的润滑系统是确保其高效稳定运行的关键，而润滑油作为设备健康状况的“晴雨表”，其成分变化直接反映了机械部件的磨损状况。通过红外光谱技术对油液样品进行分析，可以识别出因磨损产生的金属微粒、氧化产物、水分以及油品本身的劣化产物，如酯类的降解、添加剂的消耗等。例如，特定波段的吸收峰强度变化可以指示铜、铁等磨损金属的存在，而羟基吸收峰的增强则可能意味着油液中水分的增加，这些都是早期磨损和潜在故障的重要标志<sup>[1]</sup>。

## 2 风力发电机组运行中的维护技术

### 2.1 叶片故障分析与维护

叶片作为风力发电机组中直接捕获风能的关键组件，其性能与完好性直接影响到整个系统的效率与安全运行。雷击作为一种自然现象，对风力发电机叶片构成严重威胁，可能导致叶片断裂、表面损伤乃至电子系统故障，严重影响发电量和设备寿命。维护策略上首要任务是确保叶片的防雷系统有效可靠<sup>[2]</sup>。这包括定期检查叶片的防雷导线与接闪器（如避雷针）是否完好连接，以及叶片表面的防雷涂层是否有脱落或损坏，特别是叶片的前缘、后缘和叶尖区域，这些部位因暴露面积大、形状突出，更容易遭受雷击。采用专业的检测设备如绝缘电阻测试仪，对叶片的接地电阻进行测量，确保其低于规定值，以保证雷电流能够迅速导入地面，减少对叶片的损害。除了雷击防护，还需重视叶片的日常巡检与维护，包括监测叶片是否存在裂纹、腐蚀、变形等迹象，这些都可能是叶片疲劳、材料老化或极端天气条件下的结果。利用无人机搭载高清摄像头或红外热像仪进行空中巡检，能够高效且安全地识别出肉眼难以察觉的问题，结合地面的详细目视检查，形成叶片健康状况的全面评估。一旦发现叶片存在损伤，应立即采取措施，根据损伤程度选择修复或更换叶片。轻微损伤可采用树脂填充、表面修补等技术进行现场修复，而对于严重损伤，则需更换叶片以确保风电机组的安全运行。此外，对叶片损伤案例进行记录和分析，建立数据库，有助于优化设计、改进材料选用及提升维护策略，长远来看，能够显著提升风力发电系统的稳定性和经济性。

### 2.2 变桨系统故障分析与维护

变桨角度差异是变桨系统常见的故障之一，其根源在于编码器读数与叶片角度计数器的不一致。由于叶片角度计数器属于机械结构，易受外界震动干扰，导致计数误差。首先执行复位操作，此步骤旨在消除因瞬时干扰引发的错误报警。如果复位后故障依旧，应仔细检查电气连接是否牢固，防止因接触不良造成信号失真。进一步确认编码器本身是否存在物理损坏或电子故障，必要时更换编码器，以恢复精确的角度移测量<sup>[3]</sup>。

当叶片未能按照预定轨迹到达停机位置，表明控制系统与执行机构之间存在协调性问题。此时，紧急停机并手动确认叶片实际位置，验证限位开关功能有效性，这是确保安全停机机制的关键。限位开关故障

则需立即更换, 随后重新进行叶片角度的精确标定, 以校正控制逻辑中的偏差, 恢复系统的自动调节能力。

电机高温或电流异常往往是变桨系统过载或机械阻塞的征兆。首先, 要排查减速机是否运转顺畅, 避免因机械卡滞导致电机负载过大。其次, 检查电机刹车装置, 确保刹车适时释放, 未形成不必要的能耗。同时, 检查刹车回路的完整性, 避免电路问题引起刹车误动作。在排除外部因素后, 考虑电机内部绝缘状况, 老化或损坏的绝缘层会降低电机效率, 增加发热风险, 这时可能需要专业维护或更换电机。

变桨驱动与主控间的通信中断直接影响系统的协调控制, 常见于滑环故障。滑环作为旋转部件与固定部件间信号传递的关键, 其性能直接影响通信质量。油污侵入滑环可形成绝缘层, 阻碍信号传输。对此, 应细致检查滑环清洁度, 必要时进行清洗或更换, 同时利用电参数信号测量通讯链路的完整性, 逐一排查中间环节, 确保数据传输的连续性和准确性。

变桨错误和失效通常指示控制器硬件或软件存在问题。现代变桨系统配备有详细的错误代码对照表, 通过查阅设备手册, 可以快速定位故障点, 如内存错误、程序执行异常等。基于错误代码的指导, 进行精准维护, 如更新固件、更换故障模块或调整控制参数, 是恢复系统正常功能的关键步骤。这一过程强调了维护人员对设备手册的熟悉度以及对现代风电控制系统深入理解的重要性<sup>[4]</sup>。

### 2.3 发电机故障分析与维护

发电机作为风力发电系统的核心组成部分, 其稳定性和效率直接决定了风能转换的整体表现。在实际运行中, 绕组和轴承的超温问题, 以及振动和超速现象, 是影响发电机性能和寿命的主要因素, 需进行细致的故障分析与维护。

绕组高温通常是由于冷却系统效能下降或负载过大引起的。发电机内部的绕组在高电流通过时会产生大量热量, 依赖于冷却风扇或水冷系统维持适宜的工作温度。一旦冷却系统出现故障, 如风扇损坏、水路堵塞或循环泵效率下降, 绕组温度就会上升, 严重时会导致绝缘材料老化加速, 甚至发生绝缘击穿, 影响发电机的稳定运行。因此, 定期检查冷却系统的运行状态, 确保空气流通或水流畅通, 是预防绕组高温的关键措施<sup>[5]</sup>。轴承高温则多由润滑不足、轴承损坏或过载等因素造成。轴承作为支撑和减少摩擦的关键部件, 其工作状态直接影响到发电机的稳定性和效率。

当润滑油脂干涸、污染或轴承本身磨损严重时, 摩擦力增大, 产生过多热量。超过一定阈值(如 110 °C), 不仅会触发保护机制导致跳机, 还会对轴承和周围结构造成永久性损伤。因此, 定期检查轴承的润滑情况, 按时补充或更换润滑油脂, 并对轴承进行振动监测, 是预防轴承高温的有效手段。过大的振动不仅会加速发电机各部件的磨损, 还可能引起结构疲劳, 严重时导致部件松动甚至断裂<sup>[6]</sup>。振动超限的常见原因包括转子不平衡、轴承损坏、联轴器对中不良等。解决振动问题需从根源入手, 通过动平衡测试、对中调整、更换损坏部件等方式, 确保发电机运行平稳。发电机超速则是指其转速超过了设计允许的最大值, 这种情况通常与控制系统故障、制动系统失效有关。超速不仅会增加机械应力, 缩短设备寿命, 还可能引发安全事故<sup>[7]</sup>。为此, 必须定期检查和测试发电机的控制系统, 确保超速保护功能有效, 同时维护好制动系统, 确保其在紧急情况下能迅速响应, 限制发电机转速。

### 3 结束语

随着物联网、5G 通信、边缘计算等新技术的融合应用, 风力发电领域的故障预测与健康管理的变革将迎来前所未有的变革。从实时数据流中提取有价值的信息, 结合深度学习算法对故障模式进行自主学习和迭代优化, 将使得故障诊断更加迅速准确, 维护决策更加科学合理。展望未来, 风力发电机组的故障诊断与维护技术将继续向着更高精度、更智能化的方向迈进。

### 参考文献:

- [1] 俞勤新, 杨晓峰. 基于卷积神经网络和传感器数据的风力发电机转子断裂故障诊断 [J]. 微特电机, 2024, 52(05): 35-39.
- [2] 王子顺. 基于简易声源定位法的风力发电机组塔筒基础松动故障诊断 [J]. 发电设备, 2024, 38(03): 189-193.
- [3] 谢彤彤, 刘颖明, 王晓东, 等. 基于 CNN-LSTM 的永磁同步风力发电机转子偏心早期故障诊断 [J]. 电器与能效管理技术, 2024(03): 1-6.
- [4] 吉思良, 张峰, 孙海星, 等. 基于支持向量机的风力发电机组故障诊断预警模型 [J]. 电工技术, 2024(06): 66-68, 74.
- [5] 蓝瑛, 吴治坚. 风力发电机组状态监测和故障诊断技术的应用研究 [J]. 应用能源技术, 2023(11): 38-42.
- [6] 李沿君. 风力发电机组状态监测和故障诊断技术研究 [J]. 光源与照明, 2024(02): 100-102.
- [7] 张轶东. 风电场中风力发电机组运行故障与维护 [J]. 电气技术与经济, 2024(06): 328-329, 337.