

风力发电系统机电故障诊断与电气健康管理技术应用进展

范 涛

东方电气自动控制工程有限公司 四川 德阳 618000

摘 要：风力发电系统作为清洁能源的核心装备，其稳定运行依赖于高效的机电故障诊断与电气健康管理技术。本文概述了风力发电系统的组成与工作原理，分析了常见机械故障和电气故障的特征。重点阐述了基于振动分析、温度监测、油液分析及电气参数监测的故障诊断技术，以及状态监测系统、数据分析处理、故障预测与剩余寿命评估及维护决策支持等健康管理技术的应用进展。研究表明，融合多源数据与智能算法的诊断管理体系，可显著提升系统故障预警精度与健康管理效率，为风力发电系统的可靠性提升与经济性优化提供技术支撑。

关键词：风力发电系统；机电故障诊断；电气健康；管理技术；应用

引言：随着全球能源转型加速，风力发电在能源结构中的占比持续攀升，但风力发电系统长期暴露于复杂工况下，机电部件易因疲劳、腐蚀等因素发生故障，导致停机损失与安全风险。据统计，风力发电机的机械与电气故障占总故障的70%以上，其中齿轮箱、发电机及变流器的故障维修成本最高。传统故障诊断依赖人工巡检，存在滞后性与主观性，难以满足大规模风电场的运维需求。因此，发展精准的机电故障诊断技术与全生命周期电气健康管理技术成为关键。系统梳理风力发电系统的故障特征、诊断方法及健康管理技术的最新进展，旨在为提升风电装备可靠性、降低运维成本提供理论与技术参考，推动风电产业向高效化、智能化发展。

1 风力发电系统概述

1.1 系统组成

风力发电系统主要由风轮系统、传动系统、发电系统、控制系统及支撑结构组成。风轮含叶片与轮毂，负责捕获风能；传动系统包括主轴、齿轮箱和联轴器，将风轮的低速旋转转化为发电机所需的高速运动；发电系统以同步或异步发电机为核心，完成机械能到电能的转换；控制系统通过传感器与执行器实现转速调节、偏航对风等功能；支撑结构含塔架与基础，为整机提供稳定支撑。各子系统紧密关联，任一环节失效都可能导致系统停机。

1.2 工作原理

风力发电系统的工作流程始于风能捕获：当风吹过叶片时，气流在叶片表面形成压力差，推动风轮旋转（即空气动力学原理）。风轮的机械能通过主轴传入传动系统，若为变速机组，齿轮箱会将转速提升至发电机额定值（直驱机组则省去齿轮箱）。发电机在电磁感应作用下将机械能转化为交流电，经变流器整流、逆变

后，输出符合电网标准的电能。

1.3 常见机电故障类型

1.3.1 机械故障

机械故障多集中于传动系统与风轮部件。齿轮箱常因润滑不良出现齿面磨损、断齿或轴承过热，主轴可能因交变载荷产生弯曲变形或裂纹；叶片易受风沙侵蚀导致表面损伤、结构疲劳开裂，极端情况下发生断裂；联轴器可能因安装偏差出现弹性元件老化或连接松动。此外，偏航系统的轴承卡涩、制动装置失效也属于常见机械故障，表现为机组对风不准或停机时制动延迟。

1.3.2 电气故障

电气故障主要涉及发电与变流系统。发电机可能因绝缘老化、转子滑环磨损引发短路或接地故障，定子绕组过热烧毁也较为常见；变流器中的功率器件（如IGBT）易因过电压、过电流导致击穿，电容老化则会造成直流母线电压波动；控制系统的传感器失灵（如风速计、转速传感器）会导致数据失真，继电器、接触器等低压电器的触点氧化可能引发控制指令失效^[1]。

2 机电故障诊断技术

2.1 基于振动分析的诊断方法

基于振动分析的诊断方法是机械故障检测的主流技术，其原理是通过振动信号特征识别部件异常。风电场中常用加速度传感器安装在齿轮箱、轴承座等关键部位，采集振动位移、速度或加速度信号，经傅里叶变换转化为频谱图。若齿轮出现断齿，频谱中会出现啮合频率的高次谐波；轴承滚道磨损则表现为特定频率的冲击脉冲信号。该方法可有效诊断旋转部件的早期故障，如齿轮箱异响、轴承游隙过大等，且响应速度快，能在故障未扩大时发出预警。但受环境振动干扰较大，需结合滤波算法剔除噪声，适用于陆上风电场的常规巡检。

2.2 基于温度监测的诊断方法

基于温度监测的诊断方法通过追踪设备温度变化判断潜在故障，其理论依据是故障部件往往伴随异常发热。实践中，采用热电偶、红外传感器或光纤测温装置，实时监测齿轮箱油池温度、发电机定子绕组温度、变流器散热片温度等关键测点。例如，轴承润滑不良会导致摩擦加剧，温度在短时间内上升5-10℃；发电机匝间短路则表现为局部绕组温度骤升。该方法操作简便，可通过温度阈值设定实现自动报警，广泛应用于电气设备与高速旋转部件的监测。

2.3 基于油液分析的诊断方法

基于油液分析的诊断方法主要针对传动系统的油液介质进行检测，通过分析油液中的磨粒、污染物及化学特性判断机械磨损状态。具体包括铁谱分析（分离油液中的金属磨粒，根据形状、尺寸判断磨损部位，如齿轮磨粒呈片状、轴承磨粒为球状）、光谱分析（测定油液中金属元素浓度，量化磨损速率）及理化性能检测（如黏度、酸值变化，评估油液劣化程度）。该方法能早期发现齿轮箱、液压系统的隐性磨损，例如当油液中铁元素浓度突然升高30%以上时，可预判齿轮啮合面异常。但检测周期较长（通常为每周或每月一次），难以实时监测，且对分析人员的经验依赖性较强，适用于计划性维护中的深度故障排查。

2.4 基于电气参数监测的诊断方法

基于电气参数监测的诊断方法聚焦发电与控制系统的电气信号变化，通过分析电压、电流、功率等参数的畸变特征识别电气故障。例如，发电机转子绕组短路会导致三相电流不平衡，电流谐波含量增加；变流器IGBT故障表现为直流母线电压波动、输出电流波形畸变。实际应用中，通过智能电表、电流互感器采集实时数据，结合傅里叶变换、小波分析等算法提取故障特征，可快速定位短路、绝缘损坏等问题。该方法与电力系统兼容性强，能直接接入风电场SCADA系统实现远程监测，且响应速度快，可实时捕捉瞬时故障（如雷击导致的过电压损坏）。但受电网波动干扰较大，需通过数据校准消除电网谐波的影响，适用于电气子系统的在线诊断^[2]。

3 电气健康管理技术

3.1 状态监测系统

3.1.1 传感器技术

传感器技术是状态监测系统的“神经末梢”，其性能决定了数据采集的质量。针对风力发电系统的复杂工况，常用传感器包括电气类（霍尔电流传感器、电压传感器、功率传感器）、环境类（温湿度传感器、风速

风向传感器）及物理量类（振动传感器、红外温度传感器）。例如，在发电机定子绕组中植入光纤光栅传感器，可实现高温环境下的分布式温度监测，精度达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；变流器的IGBT模块表面安装热电偶，能实时捕捉功率器件的温度波动。为适应海上高湿度、高盐雾环境，传感器需采用防腐密封设计，防护等级不低于IP67，同时具备低功耗特性，支持长周期免维护运行。

3.1.2 数据采集与传输

数据采集与传输是状态监测系统的“血管系统”，负责将传感器获取的信息高效传递至数据中心。采集环节需满足高频同步性，例如对发电机电流、电压的采集频率不低于2kHz，以捕捉谐波畸变特征；对齿轮箱振动信号的采集需达到10kHz以上，避免遗漏高频冲击成分。采集设备通常采用分布式架构，通过工业以太网或无线Mesh网络实现组网，支持多通道并行采集。传输环节需根据数据类型选择不同方案：实时性要求高的控制信号（如桨距角指令）采用5G专网传输，时延控制在10ms以内；海量历史数据（如长期温度趋势）则通过边缘节点缓存后，利用光纤宽带批量上传。为保障数据完整性，传输过程中需采用加密协议（如TLS1.3），并通过边缘计算节点对异常数据进行过滤与补全，减少无效数据占用的带宽资源。

3.2 数据分析与处理

3.2.1 数据清洗与预处理

风力发电系统电气健康管理涉及大量来自传感器、监控设备的数据，但原始数据质量参差不齐，数据清洗与预处理是保障数据分析准确性的关键步骤。数据清洗主要处理数据中的噪声、缺失值和异常值。风力发电环境复杂，传感器易受干扰产生噪声数据，可采用滑动平均滤波、卡尔曼滤波等方法平滑数据，降低噪声影响。对于缺失值，若数据缺失较少且呈随机分布，可用均值、中位数填充；若缺失较多，可借助回归模型、插值算法预测填充。异常值检测方面，利用统计方法如格拉布斯准则，或机器学习中的聚类算法识别并修正异常数据。数据预处理还包括数据标准化，将不同量纲的数据按比例缩放，使其落入特定区间，消除量纲差异对分析的干扰；数据归一化则将数据映射到[0,1]或[-1,1]范围，提升模型训练效率和收敛速度。

3.2.2 特征提取与挖掘

在完成数据清洗与预处理后，需从海量数据中挖掘出能反映风力发电系统电气健康状态的特征。时域特征提取方面，可计算信号的均值、方差、峰值、峭度等统计量，这些特征能反映信号的能量分布和波动情况，例

如峭度值增大可能预示设备出现故障冲击。频域特征提取借助傅里叶变换将时域信号转换为频域信号,提取主频、频带能量等特征,通过分析频谱变化可判断设备是否存在频率异常。时频分析方法如短时傅里叶变换、小波变换,能同时获取信号的时域和频域信息,提取更具时变性的特征。此外,利用机器学习算法进行特征挖掘,如通过主成分分析降低数据维度,提取主要特征;采用深度学习中的卷积神经网络自动学习数据的深层特征。

3.3 故障预测与剩余寿命评估

3.3.1 基于模型的预测方法

基于模型的故障预测与剩余寿命评估方法,依赖于对风力发电系统物理过程的深入理解和精确建模。通过建立系统的数学模型,如机械结构的动力学模型、电气系统的电路模型等,结合系统的运行参数和边界条件,模拟系统在不同工况下的运行状态。利用这些模型可以预测系统性能的退化趋势,当模型预测结果与实际监测数据出现偏差时,可判断系统可能存在故障。在剩余寿命评估方面,基于模型的方法通过分析模型参数的变化,结合失效准则,估算系统从当前状态到失效的时间。该方法优点是物理意义明确,能深入揭示故障机理,但缺点是建模过程复杂,对系统参数的准确性要求高,且难以考虑所有不确定因素。

3.3.2 基于数据驱动的预测方法

基于数据驱动的故障预测与剩余寿命评估方法,无需深入了解系统的物理模型,而是利用大量历史数据和实时监测数据来挖掘系统状态与故障之间的潜在关系。通过机器学习算法,如神经网络、支持向量机、决策树等,对数据进行训练和学习,建立预测模型。这些模型能够自动识别数据中的模式和特征,从而预测系统故障的发生时间和剩余寿命。例如,利用风力发电机组的历史振动数据和故障记录,训练神经网络模型,实现对轴承故障的提前预测。数据驱动方法的优势在于适应性强,能够处理复杂的非线性问题,且对系统先验知识要求较低。然而,其性能高度依赖数据的质量和数量,可能存在过拟合或欠拟合问题,需要不断优化模型和更新数据。

3.4 维护决策支持系统

3.4.1 制定维护策略

制定科学合理的维护策略是风力发电系统电气健康管理中维护决策支持系统的关键环节。基于故障预测与剩余寿命评估结果,结合风力发电设备的运行特点、重要性以及历史维护数据,可制定多种维护策略。预防性维护策略根据设备的关键程度和故障发生概率,提前安排定期检修,更换易损件,降低突发故障风险。预测性维护则依据实时监测数据和预测模型,在设备故障即将发生前进行针对性维护,减少非计划停机时间。还有状态维修策略,通过对设备状态的持续监测,当状态指标超出阈值时实施维修。

3.4.2 资源优化配置

资源优化配置在风力发电系统维护决策支持系统中起着重要作用,旨在以有限的资源实现最佳的维护效果。首先要合理分配人力资源,根据维护任务的紧急程度、复杂程度以及技术要求,安排具备相应技能和经验的维护人员,提高工作效率。物资资源方面,建立科学的库存管理系统,根据设备维护需求预测和历史消耗数据,合理储备备品备件,避免库存积压或缺货。同时,优化维护设备的配置,确保其性能满足维护需求且高效利用。时间资源上,制定详细的维护计划,合理安排维护时间窗口,减少对风力发电系统正常运行的影响^[3]。

结束语

风力发电系统机电故障诊断与电气健康管理技术对于保障风力发电稳定运行、提升发电效率与降低运维成本意义重大。当前,该领域在故障诊断方法上日益多元,电气健康管理技术也逐步完善,从数据采集到维护决策形成完整体系。然而,面对风力发电系统愈发复杂、运行环境多变等挑战,现有技术仍有提升空间。未来,需进一步融合多学科知识,创新诊断与管理方法,提高技术的智能化与精准化水平。

参考文献

- [1]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,2021,33(08):98-104+112.
- [2]陈磊,张倩.基于风力发电系统状态监测和故障诊断技术探究[J].百科论坛电子杂志,2020(6):1978-1979.
- [3]张正廉.风力发电系统状态监测和故障诊断技术探究[J].魅力中国,2020(40):407.