

机电风力发电系统故障诊断与预测技术探讨

朱博峰

运达能源科技集团股份有限公司, 浙江 杭州 310000

摘要: 随着全球对清洁能源需求的不断增长, 风力发电作为一种重要的可再生能源发电方式, 得到了广泛应用。然而, 机电风力发电系统长期运行在复杂恶劣的环境中, 容易发生各种故障, 影响发电效率和系统可靠性。本文深入探讨了机电风力发电系统的故障诊断与预测技术。首先分析了常见的故障类型及成因, 包括机械故障(如齿轮箱故障、轴承故障等)和电气故障(如发电机故障、变流器故障等)。接着详细阐述了故障诊断技术, 如基于振动分析、油液分析、温度监测和电气信号分析的诊断方法, 以及故障预测技术, 包括基于数据驱动、模型驱动和知识驱动的预测方法。研究表明, 综合运用多种故障诊断与预测技术, 能够及时发现风力发电系统的潜在故障, 提前采取维护措施, 降低维修成本, 提高系统的可靠性和发电效率, 对推动风力发电行业的可持续发展具有重要意义。

关键词: 机电风力发电系统; 故障诊断; 预测技术探讨

DOI: 10.63887/jad.2025.1.3.25

1 引言

1.1 研究背景

在能源危机和环境问题日益严峻的背景下, 风力发电作为清洁、可再生的能源发电方式, 受到了全球各国的广泛关注和大力发展。近年来, 风力发电装机容量持续增长, 在能源结构中的占比不断提高。机电风力发电系统作为风力发电的核心设备, 其运行状态直接关系到发电效率和可靠性。然而, 风力发电系统通常安装在偏远地区, 如海上或高山等, 运行环境恶劣, 承受着复杂多变的风载、温度变化和湿度等因素的影响, 容易发生各种故障。一旦发生故障, 不仅会导致发电量下降, 还可能引发严重的安全事故, 造成巨大的经济损失。因此, 开展机电风力发电系统故障诊断与预测技术的研究具有重要的现实意义。

1.2 研究意义

提高发电效率: 通过及时准确地诊断和预测风力发电系统的故障, 可以在故障发生前采

取相应的维护措施, 避免故障扩大, 减少停机时间, 从而提高风力发电系统的发电效率, 增加发电量。

降低维修成本: 传统的定期维护方式往往存在过度维护或维护不足的问题, 导致维修成本增加。故障诊断与预测技术能够实现按需维护, 根据设备的实际运行状态进行维护, 避免不必要的维修工作, 降低维修成本。

增强系统可靠性: 有效的故障诊断与预测可以提前发现设备的潜在故障隐患, 及时进行处理, 防止故障的突然发生, 提高风力发电系统的可靠性和稳定性, 保障电力供应的安全。

推动风力发电行业发展: 故障诊断与预测技术的不断进步将促进风力发电设备的设计、制造和运行管理水平的提高, 推动风力发电行业向智能化、高效化方向发展, 增强风力发电在能源市场中的竞争力^[1]。

2 机电风力发电系统常见故障类型及成因

2.1 机械故障

2.1.1 齿轮箱故障

齿轮箱是风力发电系统中将风轮的低速旋转转换为发电机高速旋转的关键部件，运行过程中承受着较大的载荷和复杂的应力。常见的齿轮箱故障包括齿轮磨损、点蚀、断齿，轴承损坏等。齿轮磨损主要是由于长期运行中齿轮之间的相对滑动和摩擦导致的；点蚀是由于齿轮表面在高接触应力作用下，润滑油膜破裂，产生局部疲劳裂纹并扩展形成的；断齿则可能是由于过载、制造缺陷或疲劳损伤等原因引起。轴承损坏主要表现为轴承内圈、外圈滚道或滚动体出现磨损、剥落、保持架损坏等，主要原因是润滑不良、过载、安装不当等。

2.1.2 轴承故障

风力发电系统中的轴承广泛应用于风轮、齿轮箱、发电机等部件中。轴承故障的原因主要包括润滑不足、异物侵入、过载、安装误差和疲劳等。润滑不足会导致轴承摩擦增大，温度升高，加速轴承的磨损和损坏；异物侵入轴承内部会划伤滚道和滚动体，影响轴承的正常运转；过载会使轴承承受的应力超过其承载能力，导致轴承变形或损坏；安装误差会导致轴承受力不均匀，产生附加应力，降低轴承的使用寿命；疲劳则是由于轴承在长期交变载荷作用下，材料内部产生微裂纹并逐渐扩展，最终导致轴承失效。

2.1.3 叶片故障

叶片是风力发电系统捕获风能的关键部件，长期暴露在自然环境中，受到风沙、雨雪、雷电、紫外线等因素的影响。常见的叶片故障有表面磨损、裂纹、雷击损伤和腐蚀等。风沙冲刷会使叶片表面粗糙度增加，降低叶片的气动性能；叶片在运行过程中受到交变载荷的作用，容易产生裂纹，裂纹如果不及时处理，会逐渐扩展，导致叶片断裂；雷击是叶片面临的严重威胁之一，雷击可能会使叶片的结构受损，甚至引发火灾；腐蚀主要是由于环境中的化学物质对叶片材料的侵蚀作用，降低叶片的

强度和使用寿命。

2.2 电气故障

2.2.1 发电机故障

发电机是将风能转化为电能的核心部件，常见的故障有定子绕组短路、断路、绝缘损坏，转子故障等。定子绕组短路可能是由于绕组绝缘老化、过热、机械损伤等原因导致绕组之间或绕组与铁芯之间发生短路，短路会产生较大的短路电流，损坏发电机；断路则会使发电机的输出功率下降，甚至无法发电；绝缘损坏会导致绕组对地短路，引发安全事故。转子故障主要包括转子绕组故障、转子不平衡等，转子绕组故障会影响发电机的电磁性能，转子不平衡会导致发电机振动加剧，影响发电机的正常运行。

2.2.2 变流器故障

变流器在风力发电系统中用于将发电机发出的变频交流电转换为适合电网的恒频交流电，或者实现能量的双向流动。变流器故障主要包括功率器件损坏、电容故障、控制电路故障等。功率器件（如 IGBT）在运行过程中承受着较高的电压和电流，容易因过压、过流、过热等原因损坏；电容故障主要表现为电容容量下降、漏液、击穿等，会影响变流器的滤波和储能性能；控制电路故障可能是由于电磁干扰、元器件老化等原因导致控制信号异常，使变流器无法正常工作。

2.2.3 电缆故障

风力发电系统中的电缆用于传输电能和信号，常见的故障有绝缘损坏、短路、断路等。电缆绝缘损坏可能是由于电缆长期运行中绝缘老化、机械损伤、过电压等原因引起，绝缘损坏会导致电缆漏电，甚至引发火灾；短路故障会使电缆中流过较大的电流，损坏电缆和电气设备；断路故障则会导致信号或电能传输中断，影响系统的正常运行。

3 机电风力发电系统故障诊断技术

3.1 基于振动分析的故障诊断技术

3.1.1 原理与方法

振动分析是通过测量风力发电系统各部件的振动信号,对信号进行处理和分析,提取故障特征信息,从而判断设备是否存在故障以及故障的类型和位置。常用的振动信号处理方法有时域分析、频域分析和时频域分析等。时域分析主要观察振动信号的幅值、均值、方差等统计特征参数;频域分析通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号,分析信号的频率成分,不同部件的故障会在特定的频率范围内产生特征频率;时频域分析则结合了时域和频域分析的优点,能够同时反映信号在时间和频率上的变化,如短时傅里叶变换、小波变换等^[2]。

3.1.2 应用实例

在齿轮箱故障诊断中,通过在齿轮箱的输入轴、输出轴和箱体上安装振动传感器,采集振动信号。当齿轮出现磨损、点蚀等故障时,振动信号中会出现与齿轮啮合频率及其倍频相关的特征频率成分,并且这些频率成分的幅值会发生变化。通过对振动信号进行频域分析,可以准确地识别出齿轮的故障类型和严重程度。对于轴承故障,轴承的不同故障模式(如内圈故障、外圈故障、滚动体故障)会产生具有特定频率特征的振动信号,利用包络分析等方法对振动信号进行处理,能够有效地提取轴承的故障特征,实现轴承故障的早期诊断。

3.2 基于油液分析的故障诊断技术

3.2.1 原理与方法

油液分析是通过对风力发电系统中润滑油或液压油的理化性能和磨损颗粒进行分析,来判断设备的磨损状态和故障情况。理化性能分析包括油的粘度、酸值、水分、污染度等指标的检测,这些指标的变化可以反映油的老化、污染和变质情况。磨损颗粒分析则通过铁谱分析、光谱分析等方法,检测油中磨损颗粒

的数量、大小、形状和成分,从而判断设备的磨损部位和磨损程度。铁谱分析是利用高梯度磁场将油中的磨损颗粒分离出来,并按照颗粒的大小排列在谱片上,通过显微镜观察和分析谱片上的颗粒特征;光谱分析则是利用原子发射光谱或原子吸收光谱技术,测定油中各种金属元素的含量,根据元素含量判断设备的磨损情况。

3.2.2 应用实例

在齿轮箱的油液分析中,定期采集齿轮箱内的润滑油样本。当齿轮或轴承出现磨损时,会产生金属磨损颗粒进入润滑油中。通过铁谱分析可以观察到磨损颗粒的形态特征,如切削颗粒、疲劳剥落颗粒等,根据颗粒的形态和数量可以判断磨损的类型和严重程度;光谱分析能够准确测定油中铁、铜、铬等金属元素的含量,不同金属元素的含量变化可以对应到齿轮箱内不同的磨损部件,从而实现了对齿轮箱磨损故障的早期诊断和定位^[3]。

3.3 基于温度监测的故障诊断技术

3.3.1 原理与方法

温度监测是通过在风力发电系统的关键部件上安装温度传感器,实时监测部件的温度变化。当设备出现故障时,往往会导致局部温度升高或降低。例如,轴承故障时由于摩擦增大,会使轴承温度升高;电气故障如绕组短路会产生大量的热量,导致发电机或变压器温度异常升高。通过设定合理的温度阈值,当监测到的温度超过阈值时,发出报警信号,提示设备可能存在故障。同时,还可以对温度变化趋势进行分析,预测设备故障的发展趋势^[4]。

3.3.2 应用实例

在发电机温度监测中,在发电机的定子绕组、转子、轴承等部位安装温度传感器。正常运行时,发电机的温度在一定范围内波动。当定子绕组出现短路故障时,短路电流会使绕组温度迅速升高,温度传感器实时将温度数据传输到监控系统,一旦温度超过设定的报警阈

值,系统立即发出警报,通知运维人员及时处理故障,避免故障进一步扩大。对于齿轮箱,通过监测齿轮箱内润滑油的温度和轴承的温度,可以及时发现齿轮箱的过热问题,可能是由于润滑不良、过载等原因引起的,以便采取相应的措施进行调整和维修。

3.4 基于电气信号分析的故障诊断技术

3.4.1 原理与方法

电气信号分析主要是对风力发电系统中的电压、电流、功率等电气信号进行监测和分析,判断电气设备的运行状态和故障情况。例如,通过分析发电机的输出电压和电流波形,可以检测发电机的电气故障,如电压不平衡、电流谐波过大等。对于变流器,监测其输入输出电压、电流以及功率器件的开关信号等,利用傅里叶变换、小波变换等方法对信号进行处理,提取故障特征,判断变流器是否存在功率器件损坏、控制电路故障等问题。此外,还可以通过分析电气设备的绝缘电阻、介质损耗因数等参数,评估电气设备的绝缘状况。

3.4.2 应用实例

在发电机故障诊断中,利用电压传感器和

电流传感器采集发电机的三相电压和电流信号。当发电机定子绕组出现短路故障时,短路相的电压会降低,电流会增大,并且电流波形会发生畸变。通过对电压和电流信号进行实时监测和分析,结合故障特征数据库,可以快速准确地判断出发电机的故障类型和位置。对于变流器故障,通过监测变流器直流侧电压和交流侧电压电流的稳定性,以及功率器件的开关频率和占空比等参数,当发现电压波动过大、电流谐波含量超标或功率器件开关异常时,可以判断变流器可能存在故障,进一步分析故障原因并采取相应的维修措施^[5-6]。

结语

未来的故障诊断与预测技术将朝着多技术融合的方向发展,综合运用振动分析、油液分析、温度监测、电气信号分析以及数据驱动、模型驱动、知识驱动等多种方法,充分发挥各种技术的优势,提高故障诊断与预测的准确性和可靠性。例如,将振动信号分析与数据驱动的机器学习方法相结合,利用振动信号提取故障特征,再通过机器学习算法对故障进行分类和预测,能够更有效地识别复杂的故障模式。

参考文献

- [1] 孙佳叶. 风力发电系统设计优化与运行效率提升研究[J]. 中国战略新兴产业, 2025, (11): 126-128.
- [2] 王聪, 王海成. 储能技术在风力发电系统中的实践分析[J]. 中国战略新兴产业, 2022, (30): 66-68.
- [3] 陈惠林. 电气控制技术在风力发电系统中的应用探讨[J]. 科学与信息化, 2025(8): 67-69
- [4] 别见见. 浅谈液压技术在风力发电课程教学中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)教育科学, 2023(5): 149-152
- [5] 冯尔璋. 电气控制技术在风力发电设备中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(02): 112-114.
- [6] 王鹏瑜. 浅谈风电场电气设备中风力发电机的运行维护[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(3): 005-008