

风电机组常见故障分析

焦梦天

国电河南新能源有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 风电机组运行中面临多种故障, 涵盖机械、电气及系统性故障。机械系统包括叶片、齿轮箱等故障; 电气系统有发电机、变流器等故障; 系统性故障由多部件协同失效等引发。本文分析各类故障的失效模式、机理、诱发因素, 介绍在线监测、离线检测等诊断方法, 提出设计优化、运维管理等预防措施, 为保障风电机组稳定运行提供参考。

关键词: 风电机组; 机械系统故障; 电气系统故障; 系统性故障; 故障诊断预防

引言: 随着清洁能源发展, 风电机组装机规模不断扩大。其运行环境复杂多样, 面临诸多挑战, 故障频发成为制约风电产业发展的重要因素。机械系统故障影响动力传递, 电气系统故障干扰发电效率, 系统性故障更会引发整机性能下降。深入分析风电机组常见故障, 探究有效诊断与预防策略, 对提高机组可靠性、保障风电产业可持续发展具有重要意义。

1 机械系统故障分析

1.1 叶片故障

叶片作为风电机组捕获风能的核心部件, 长期暴露在复杂多变的环境中, 面临多种失效风险。表面裂纹与分层现象较为常见, 这主要源于材料疲劳与应力集中。在风电机组持续运转过程中, 叶片反复承受交变应力, 材料内部微观结构逐渐受损, 微裂纹悄然滋生。随着时间推移, 微裂纹不断扩展、连接, 最终在叶片表面形成可见裂纹, 严重时还会出现分层, 削弱叶片的结构强度^[1]。边缘开裂与断裂同样不容忽视, 极端环境下的腐蚀与磨损是重要诱因。在盐雾、沙尘等恶劣环境中, 叶片边缘材料不断被侵蚀, 表面粗糙度增加, 强度降低。加之气动载荷的反复冲击, 边缘部位承受着巨大压力, 容易出现开裂, 甚至发生断裂。结冰导致的结构失效在寒冷地区较为突出, 叶片表面结冰后, 气动外形改变, 气动载荷分布不均, 冰层重量增加, 进一步加大叶片负担, 可能引发结构失效。雷击损伤与内部纤维层破坏具有突发性, 雷电击中叶片时, 巨大电流在内部产生高温, 使复合材料内部纤维层受损, 影响叶片整体性能。

1.2 齿轮箱故障

齿轮箱是风电机组传动系统的重要组成部分, 故障会影响机组正常运行。齿轮磨损与点蚀是典型失效模式, 润滑不足导致的摩擦热累积是主要原因。润滑油在齿轮啮合过程中起到减少摩擦、散热等作用, 若润滑不

足, 齿轮间摩擦力增大, 产生大量热量, 使齿轮表面温度升高, 加速磨损, 同时高温还会使齿轮表面金属材料发生化学变化, 形成点蚀。齿轮承载能力设计偏差也会引发故障, 若设计时对齿轮承载能力估计不足, 在高负荷运行下, 齿轮易出现疲劳损伤, 导致磨损加剧、点蚀扩大等问题。高负荷运行下的疲劳损伤同样是齿轮箱故障的重要因素, 风电机组运行过程中, 齿轮箱长期承受交变载荷, 齿轮材料在反复应力作用下逐渐出现疲劳裂纹, 随着裂纹扩展, 最终导致齿轮失效。轴承跑圈与剥落以及润滑系统失效也与上述因素密切相关, 润滑不良会加速轴承磨损, 跑圈与剥落现象增多, 油品污染会降低润滑性能, 油位异常则会影响润滑效果。

1.3 主轴与轴承故障

主轴与轴承的故障会影响风电机组的动力传递和稳定运行。主轴裂纹与断裂多是由于安装偏差引发的应力集中以及振动冲击下的动态载荷超限所导致。在安装过程中, 如果存在偏差, 主轴内部就会产生应力集中。在长期运行中, 应力不断累积, 当超过主轴材料的强度极限时, 就会出现裂纹。随着裂纹的进一步扩展, 最终会导致主轴断裂。振动冲击会使主轴承受的动态载荷增大, 当超过承载能力时, 也会引发裂纹与断裂。轴承过热与卡滞以及密封失效导致的润滑泄漏与润滑不良与材料疲劳有关。轴承在长期运行过程中, 材料会逐渐疲劳, 润滑不良会加速这一过程, 使轴承的摩擦力增大, 温度升高, 进而出现卡滞现象。同时密封失效会导致润滑油泄漏, 进一步加剧润滑不良的情况。

1.4 偏航系统故障

偏航系统故障会影响风电机组对风方向的准确跟踪。偏航减速器齿轮断裂多因频繁启停导致的疲劳损伤。偏航系统在运行过程中需要频繁调整方向, 减速器齿轮不断承受启停时的冲击载荷。长期积累下来, 容易

产生疲劳裂纹，最终导致齿轮断裂。制动盘磨损与偏航失灵与液压油污染和密封老化有关。液压油污染会降低液压系统的性能，密封老化会导致液压油泄漏，使制动压力不足，制动盘磨损加剧，最终引发偏航失灵^[2]。液压系统泄漏与压力异常以及控制程序错误引发的机械干涉也会影响偏航系统的正常运行。液压系统泄漏会使压力下降，无法正常驱动偏航机构。控制程序错误则可能导致偏航机构运动不协调，出现机械干涉现象。

2 电气系统故障分析

2.1 发电机故障

发电机作为风电机组的核心发电部件，其运行状态直接影响着机组的发电效率与稳定性。定子绕组短路绝缘损坏是较为常见的失效模式。在机组运行过程中，过载运行与电压波动是引发此类故障的关键因素。当发电机长时间处于过载状态，定子绕组中流过的电流超出设计值，产生的热量急剧增加，使得绝缘材料加速老化，最终导致绝缘损坏，进而引发绕组短路。电压波动也会对绝缘造成冲击，频繁电压变化会使绝缘层内部产生电应力，长期作用下来，绝缘性能下降，出现短路故障。转子线圈断裂与磁极失效同样不容忽视，散热系统失效与热应力累积是主要原因。若散热系统出现故障，无法及时将转子运行产生的热量散发出去，转子温度持续升高，线圈材料在高温下强度降低，容易发生断裂。同时，热应力在转子内部不断累积，会导致磁极的磁性能发生变化，出现失效情况。轴承电蚀与过热烧毁多因电磁干扰引发的控制信号异常。电磁干扰会使控制发电机轴承的信号出现偏差，导致轴承运行状态异常，产生电蚀现象，电蚀进一步加剧了轴承的磨损，使轴承温度升高，最终过热烧毁。

2.2 变流器故障

变流器在风电机组中起着电能转换与控制的重要作用。IGBT模块老化与击穿是变流器的典型失效模式。电力电子元件的电压应力损伤是引发这一问题的关键。在变流器运行过程中，IGBT模块需要承受较高的电压应力，若电压波动过大或存在过电压情况，会对模块内部的半导体结构造成损伤，长期积累下来，模块性能下降，出现老化现象，严重时甚至会发生击穿。散热风扇堵塞与温度超限也是常见故障。散热设计不足与灰尘堆积是主要原因。变流器在运行过程中会产生大量热量，若散热设计不合理，热量无法及时散发出去，会导致内部温度升高。同时，灰尘在散热风扇处堆积，会阻碍空气流通，降低散热效率，使温度进一步升高，影响变流器的正常运行。通信中断与控制程序错误同样会影响变

流器工作。电网谐波干扰与接地故障是引发此类问题的因素。电网中的谐波会对变流器的通信信号产生干扰，导致通信中断。接地故障则可能使控制程序出现错误，使变流器无法按照正常指令运行。

2.3 传感器与执行器故障

传感器与执行器是风电机组控制系统的重要组成部分。编码器数据漂移与信号中断是编码器常见的失效模式。环境腐蚀与电磁干扰是主要原因。编码器长期暴露在恶劣的环境中，容易受到腐蚀，影响内部电子元件的性能，导致数据漂移。同时电磁干扰会使编码器输出的信号出现异常，严重时甚至会出现信号中断。振动传感器灵敏度下降多因机械振动导致的连接松动。风电机组在运行过程中会产生机械振动，长期的振动会使振动传感器的连接部位出现松动，导致传感器与被测物体之间的接触不良，从而使灵敏度下降。液压比例阀卡涩与响应迟滞是液压比例阀的常见故障。长期运行下的元件老化是主要原因。液压比例阀在长期使用后，内部元件会出现磨损、老化现象，导致阀芯运动不灵活，出现卡涩情况，同时响应速度也会变慢，出现响应迟滞。

3 系统性故障分析

3.1 定义与特征

系统性故障是风电机组运行中一类复杂且影响广泛的故障类型。这类故障并非单一部件出现问题，而是多部件协同失效引发的整机性能下降。不同部件之间相互关联、相互影响，一个部件的故障可能引发连锁反应，导致其他部件也出现异常，最终使整机性能大打折扣。控制逻辑错误也是引发系统性故障的重要原因，这种错误会导致机组出现非典型故障模式，难以通过常规的故障诊断方法进行判断和处理^[3]。系统性故障有着较为典型的表现。整机振动超标与噪声异常是常见现象。当机组出现系统性故障时，各部件的运行状态发生改变，振动频率和幅度超出正常范围，同时会产生异常噪声，这不仅影响机组的正常运行，还可能对周围环境造成干扰。发电性能衰减与效率降低也是重要表现。由于多部件协同失效或控制逻辑错误，机组无法按照设计要求高效地将风能转化为电能，发电量减少，发电效率下降。动态响应迟滞与模态变化同样值得关注。机组在受到外界激励时，动态响应速度变慢，无法及时做出调整，模态也会发生改变，影响机组的稳定性和安全性。

3.2 诱发因素

设计缺陷是引发系统性故障的重要因素之一。传动链共振与载荷分配不均会导致机组在运行过程中承受不均匀的载荷，加剧部件的磨损和疲劳，容易引发故障。

部件匹配性差与接口兼容性问题也会影响机组的整体性能,不同部件之间无法良好配合,容易出现故障隐患。运维失误同样不可忽视。维护周期不合理与操作不规范会使机组得不到及时的维护和保养,部件的性能逐渐下降,故障风险增加。备件质量与安装工艺缺陷也会对机组运行产生影响,质量不佳的备件或安装工艺不当,可能导致部件无法正常工作,引发系统性故障。控制策略问题也是诱因之一。新算法验证不足与参数整定错误会使控制系统的性能下降,无法准确控制机组的运行。传感器融合与数据解析偏差则会导致控制系统获取的信息不准确,影响决策的正确性,进而引发系统性故障。

4 故障诊断与预防策略

4.1 诊断方法

故障诊断是保障风电机组稳定运行的关键环节。在线监测技术能实时捕捉机组运行状态信息。振动分析可通过对机组振动信号的采集与分析,判断传动部件是否存在磨损、不平衡等问题。油液检测能依据油液中的金属颗粒、水分等成分变化,提前发现齿轮箱等部件的潜在故障。温度场分布测量能精准定位机组各部位的温度异常,及时发现过热故障隐患。应变测量则可监测部件的应力变化,判断部件是否处于安全工作状态^[4]。离线检测手段是对在线监测的有效补充。超声波探伤利用超声波在部件内部的传播特性,检测部件内部是否存在裂纹、气孔等缺陷。红外热成像通过捕捉部件表面的红外辐射,直观呈现温度分布情况,快速定位发热故障点。电气参数测试能准确测量电压、电流等电气参数,判断电气系统是否存在短路、断路等故障。绝缘诊断则可评估电气设备的绝缘性能,预防绝缘老化引发的故障。

4.2 预防措施

预防故障发生需从多方面入手。设计优化是基础。合理选材能确保部件在恶劣环境下长期稳定运行,结构强化可提高部件的承载能力与抗疲劳性能。冗余设计

为关键部件设置备用,当主部件出现故障时,备用部件能立即投入使用,保障机组继续运行。故障容错机制则能在故障发生时,通过调整控制策略,降低故障对机组的影响。运维管理至关重要。状态检修依据机组实际运行状态制定检修计划,避免过度检修与检修不足。风险评估能提前识别潜在故障风险,采取针对性措施进行防范。备件管理确保备件质量可靠、供应及时,为故障修复提供保障。人员培训提升运维人员的专业技能与应急处理能力,保障运维工作的高效开展。技术升级是提升机组可靠性的重要途径。智能控制能根据机组运行状态自动调整控制参数,实现最优运行。自适应调节使机组能快速适应外界环境变化,保持稳定运行。数字化运维平台建设实现机组运行数据的集中管理与分析,为故障诊断与预防提供有力支持。

结束语

风电机组故障分析是一项复杂且关键的工作。通过对机械、电气及系统性故障的全面剖析,明确了各类故障的失效模式、机理与诱发因素。借助在线监测、离线检测等诊断方法,能及时发现故障隐患。而设计优化、运维管理、技术升级等预防措施,可有效降低故障发生率。未来,需持续深入研究,不断提升故障诊断与预防水平,推动风电机组稳定高效运行。

参考文献

- [1]曹超明.风电机组液压系统常见故障分析与处理[J].电力设备管理,2024(9):121-124.
- [2]王光宇.风电机组齿轮箱常见机械故障与维护策略[J].电力设备管理,2025(11):266-268.
- [3]水龙,曹健,王慧.风电机组叶片状态监测及故障诊断技术分析[J].凿岩机械气动工具,2025,51(10):168-170.
- [4]卢祥林.浅谈风电机组液压系统的应用与故障处理[J].中国科技纵横,2025(12):99-101.