

风力发电机设备故障与维修策略分析

于杨 李洪涛 王禹 牛帅

华能新能源股份有限公司 河北分公司

摘 要：风力发电机设备在运行的过程中，由于受到复杂自然环境、长期高负荷运转及部件老化磨损等因素影响，设备常出现叶片损伤、传动系统卡滞、液压系统泄漏等故障，不仅降低发电效率，还可能引发安全事故。为确保风力发电机设备稳定运行能力，本文在分析风力发电机设备结构特征基础上，解析了风力发电机设备常见故障类型及成因，同时从叶片系统的定期探伤与防腐处理、传动系统的油液监测与部件校准、液压系统的密封检查与压力调控等方面提出相关的维修策略。

关键词：风力发电机；设备结构；故障类型；针对性维修；运维优化

引言

“双碳”目标的制定与实施使全球范围内风电装机容量呈现出不断增长趋势，风力发电在能源结构中比例不断增加。然而风力发电主要安装在草原、高原、海上等区域，这些区域在风电机组运行中存在温差大、风沙、雷击、沙尘的恶劣天气影响造成设备故障频发。通过研究风力发电机的结构特性、故障类型确定适宜维修策略，能够降低故障发生率、缩短停机时间，对保证风电项目稳定运行、降低运维成本有积极作用，也能推动风电行业高速发展。

1 风力发电机设备结构特征

1.1 叶片系统

风力发电机叶片系统的作用是捕捉风能，一般包含玻璃纤维增强复合材料或者碳纤维增强复合材料制作的 2~3 片叶片形成，其特点是强度高、质量轻、耐腐蚀性强。风力发电机叶片采用流线翼型设计方式，能够最大限度上捕捉风能。叶片根部通过法兰和主轴刚性连接，使叶片旋转达到稳定的状态；叶片内部配置有防雷系统、加强筋等，能够防止叶片旋转时发生雷击损坏，也能利用加强筋使叶片具备较强的抗扭转性能、抗弯曲性能。然而有些风力发电机组叶片还安装有变桨机构，能够根据风向调整叶片角度以提高风能捕捉效率^[1]。

1.2 传动系统

风力发电机组传动系统包含齿轮箱、主轴、联轴器等部分，其作用是将叶片旋转动能传输到发电机。主轴一侧和叶片法兰连接，另外一侧通过轴承支撑在机舱底座上，能够平稳传输叶片的低速旋转运动；齿轮箱一般选择使用多级增速结构，将主轴的低速、高

扭矩动力转变为高速、低扭矩动力，能够满足发电机发电需求，并且在齿轮箱内配置有冷却、润滑等系统防止出现严重磨损现象；联轴器将发电机输入轴和齿轮箱输出轴连接，它能够弥补两轴安装偏差以吸收振动、减小荷载，一般选择弹性柱销联轴器或膜片联轴器等类型。

1.3 电气与控制系统

风力发电机组电气与控制系统是其核心组成部分，它的作用是完成能量输出，主要组成部件是发动机变流器、控制柜、传感器等。发动机一般选择双馈异步发动机或永磁同步发动机，能够将传动系统获取的机械能转变为电能；变流器的作用是把发电机输出的不稳定交流电转变为符合电网需求的稳定交流电，进而达到并网需求；控制柜内有 PLC 控制器、继电器、接触器等元件，能够直接获取传感器的温度、转速、压力等参数，使变桨、制动、并网等动作按照程序完成；传感器安装在设备关键部件，能够及时掌握风力发电机组运行参数，并且传感器具备报警、故障监测等功能以提高风力发电机组运行安全性。

2 风力发电机设备故障类型

风力发电机设备结构复杂，长期在野外复杂环境运行，故障类型多样且影响深远。从核心的叶片、传动系统，到关键的液压、电气系统，均易因环境侵蚀、负荷作用等出现故障，不仅会降低发电效率，还可能引发停机甚至安全事故，明晰各系统故障类型及成因是精准维修的前提。

2.1 叶片系统故障

风力发电机叶片系统故障比较普遍，一般为裂纹、表面损伤、雷击损坏等。裂纹一般出现在叶片的叶根、

前缘、翼型转折等位置,这主要是因为叶片长期受到交变载荷、应力集中导致疲劳裂纹,一旦没有采取处理措施会导致整个叶片断裂;叶片表面损伤主要为前缘磨损、涂层脱落等,这主要是因为沙尘、昆虫残骸的摩擦导致前缘磨损,而紫外线照射、雨水冲刷造成叶片涂层老化脱落,两者都会导致叶片气动性能降低而影响风能捕获效率;雷电损坏一般出现在多雷区,如果风力发电机组防雷系统接触不良或失效,导致雷击电流不能有效释放击穿叶片复合材料,进而导致叶片结构损坏甚至火灾^[2]。

2.2 传动系统故障

风力发电机传动系统故障主要是齿轮箱、主轴、联轴器等问题,这对机组运行产生较大影响。由于齿轮箱在运行过程中所受荷载较大,极易存在轴承损坏、齿轮磨损、渗漏等情况,造成外部杂质侵入或者内部润滑不良引发动力传递无法达到要求;轴承损坏的形成原因是润滑失效、安装偏差以及冲击荷载,导致轴承出现异响或过热而引发卡死;齿轮箱渗漏是螺栓松动、密封件老化造成的润滑油泄漏,这会引发齿轮箱内部件磨损严重。主轴故障是因为阵风冲击、叶片平衡失衡等造成的弯曲变形,或者主轴轴径间隙配合过大、润滑不良等引发磨损加剧,进而影响整个机组的稳定性。联轴器故障现象是弹性元件损坏、螺栓松动,这会导致系统运转时振动加剧、间隙增大^[3]。

2.3 液压系统故障

风力发电机组液压系统故障主要为泄漏、油液污染、压力异常等,其形成原因如下:①泄漏一般分为外泄漏与内泄漏,外泄漏是因为密封件损坏、接头松动等造成油位下降,而内泄漏则是因为内部密封件不良导致压力损失而影响制动、变桨等动作精度;②油液污染是润液压系统内存在有固体颗粒、化学污染物、水分等导致部件磨损加剧,或者直接堵塞节流孔引发元件卡滞;③压力异常是因为液压系统负载过大、溢流阀失效等引发压力升高,进而造成管路爆裂,而液压系统油位不足、液压泵磨损加剧等导致压力过低,无法满足风力发电机组的制动与变桨要求。

2.4 电气系统故障

风力发电机电气系统中发电机、变流器、控制系统故障率较高,进而影响整个机组的运行效果。发动机作为复杂性的结构部件,其故障类型包含转子绕组故障、绝缘损坏、轴承故障等,进而影响发动机的性能;转子绕组故障往往因为滑环与电刷接触不良导致电流不稳定;轴承故障一般形成原因是安装偏差、润滑不良导致过热磨损。变流器故障为多功率模块损坏、

电容老化,这会导致整个系统电压波动范围较大而影响电能转换效率。风力发电控制系统中传感器、PLC系统都容易发生故障问题,一般是由接线松动、老化等引发。传感器故障或者电磁干扰、电源波动等造成PLC故障,无法满足风力发电机组运行需求^[4]。

3 风力发电机设备故障维修策略

风力发电机多部署于野外,长期受复杂环境与高负荷运转影响,叶片、传动系统等易出现故障,直接关系到发电效率与安全,故障维修策略是保障设备稳定运行的关键,以下针对风力发电机设备故障维修策略分析。

3.1 叶片系统故障维修策略

风力发电机叶片故障需要采取修补技术为基础,再应用新型辅助手段以提高叶片系统维修效率与质量。叶片存在轻微裂纹选用“红外加热+真空灌注工艺”进行修复,一般需要在裂纹位置加热到40℃~50℃,然后通过真空负压将增强树脂灌入到裂缝内部,经过固化之后达到叶片修复强度的要求。叶片表面的前缘磨损采用“金属机耐磨涂层+纳米陶瓷颗粒”的涂层厚度0.8~1.2mm,能够提高叶片耐磨擦性以使寿命延长30%。叶片雷击损坏后需要安装“分布式雷电监测传感器”,能够及时获取叶片雷电冲击数据,并结合云端平台分析雷击风险以便制定应对策略。此外,需建立叶片定期巡检机制,每季度利用无人机搭载高清摄像头与红外热像仪,对叶片表面及内部结构进行全面检测,提前发现隐性损伤;维修完成后还需进行24小时载荷测试与发电效率验证,确保修复后的叶片性能达标,避免因维修不彻底导致故障反复。

3.2 传动系统故障维修策略

风力发电机传动系统故障采用“精准诊断+智能润滑”处理,能够有效修复损伤且防止发生二次损坏。齿轮箱齿轮磨损维修前需要通过“声发射检测+油液金属光谱分析”的措施进行磨损位置确定以及程度分析,轻微磨损使用激光熔敷技术修复齿面,确保修复后厚度0.2~0.5mm、硬度HRC55以上,防止整体更换部件;齿轮严重磨损选用3D打印定制齿轮方式缩短备件周期。轴承修复引入智能润滑系统掌握振动参数、轴承温度等,确定适宜润滑脂加注频率和加注量,防止润滑不足或过度。轴承维修后采用“动态平衡测试+轴心轨迹分析”方式检验轴承稳定性,确保主轴和齿轮箱同轴度偏差在0.05mm以下。联轴器故障维修后安装扭矩监测传感器,掌握扭矩波动变化情况,一旦扭矩波动超过15%立即进行检修或更换部件处理^[5]。此外,现场维修时需携带便携式油液检测仪,维修后

即时抽样检测油液状态,确保无杂质残留或润滑性能不达标问题;针对更换的齿轮、轴承等部件,现场需通过试运转测试,观察1~2小时内传动系统运行噪声、振动数值,确认无异常后再完成装机复位,避免维修后即时出现二次故障。

3.3 液压系统故障维修策略

风力发电机液压系统故障中,油液污染处理采用“三级过滤+污染溯源分析”组合方案,如下:通过高精度颗粒计数器确定污染类型,明确密封件磨损颗粒、金属碎屑等杂质组分;结合污染物特性分析污染物来源,进而明确液压泵磨损导致的金属颗粒,或者管路锈蚀引发氧化杂质,再根据具体的损坏部件进行更换以达彻底根除的目的;同时,油箱中安装油液监测器掌握油液水分含量、黏度、颗粒浓度变化等指标,如果超出规定阈值则立即发出警报并进行更换处理。液压系统泄漏需要结合不同原因选择适宜维修措施,如下:管路接头泄漏频率较高,采用“厌氧胶密封+双卡套固定”工艺,需要先在接头螺纹位置涂抹厌氧胶以提高结构密封性,然后利用双卡套进行固定以防振动引发接头松动;液压阀门内泄漏选用电液比例阀在线校准技术能够精准调节阀芯行程,使阀内密封面精度合格以解决阀芯偏移造成的泄漏。而在液压系统的压力异常问题中,需要安装压力脉动缓冲装置,能够结合液压系统压力变化进行参数调整,防止因为负载波动产生严重冲击,确保液压阀、液压泵等部件运行状态合格,延长设备使用寿命。

3.4 电气系统故障维修策略

风力发电机组电气系统维修需要采用“数字化诊断+防干扰优化”的组合技术,能够提高系统检查与维修精准性,能够满足电气系统运行需求。发电机绕组检修前采用“局部放电检测+绝缘介损测试”组合方式,能够及时确定绝缘损坏位置以便进行部件更换。如果电气系统绝缘损坏中老化较为轻微,则选择使用纳米绝缘涂料浸涂技术时,涂料均匀覆盖绕组表面以增强机组绝缘性能;如果绝缘层损坏严重,则利用低温固化绝缘漆重新进行绕组制作,并在低温条件下固

化缩短烘干时间、降低对机组运行影响。变流器维修结合不同故障模块,需要利用模块在线检测平台获取各项数据信息,掌握各模块电流、电压、功率等参数以便进行及时更换。同时,变流器中安装电磁屏蔽罩能够有效阻隔外界电磁信号与电网谐波干扰影响,确保变流器运行稳定。风力发电机控制系统维修后需要进行PLC程序的“冗余备份+在线升级”,能够实现PLC控制系统运行精度提升。该系统采用双重备份方式避免出现程序丢失现象,在线升级能保证程序功能与设备运行需求同步;传感器故障需要建设传感器校准数据库,确保每次校准数据精度误差传输到云端,并构建故障模型以便及时获取故障信息采取处理措施。

4 结语

风力发电机设备故障率较高,需要结合故障情况制定维护策略以保证风力发电机组运行状态合格。本文从风力发电机设备运行中叶片传动、液压、电气系统故障情况进行分析,就故障情况制定维修策略,从而提高风力发电机组运行稳定性与可靠性。在今后清洁能源领域发展速度不断加快的背景下,风力发电设备安装逐步向大型化、海上化发展,这就需要进一步融入智能化技术进行风力发电机设备故障与维修的全面监控,并且逐步将风力发电机组运维“事后修复”向“主动防御”转型,能够有效促进现代风力发电领域的长远发展。

参考文献:

- [1] 萨锦炜.风力发电机状态监测与故障诊断技术分析[J].绿色环保建材,2021(7):177-178.
- [2] 吴永强.风力发电机组电气与控制系统快速检修思路探索[J].科技视界,2015(25):259+283.
- [3] 唐书良.风电场电气设备中风力发电机的运行维护[J].通信电源技术,2020,37(4):220-221.
- [4] 李绵基.海上风电场风力发电机运行维护策略研究[J].光源与照明,2022(12):222-224.
- [5] 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(6):66-68+74.