

风电场电气设备中风力发电机的运行维护

项 军 田宏野 杨国晟

华能营口仙人岛热电有限责任公司 辽宁 营口 115009

摘 要: 在风电场电气设备中, 风力发电机作为核心部件, 其稳定运行对于整个风电场的高效发电起着决定性作用。本文首先阐述其基本原理与结构, 包括工作原理及各组成部分。深入剖析常见故障, 涵盖机械、电气与控制系统故障及其成因。进而提出运行维护策略, 从日常巡检、定期维护、状态监测与故障诊断到部件更换与维修等多方面详细论述。旨在通过全面系统的运行维护措施, 保障风力发电机稳定高效运行, 提升风电场发电效益与可靠性, 推动风力发电技术在能源领域的持续发展与应用。

关键词: 风电场电气设备; 风力发电机; 运行维护

引言: 随着全球对清洁能源需求的不断攀升, 风力发电在能源结构中的地位日益凸显。风力发电机作为风电场核心电气设备, 其运行状况直接影响发电效率与供电稳定性。然而, 风力发电机运行环境复杂, 面临多种故障风险。因此, 深入研究其基本原理与结构, 精准分析常见故障原因, 并制定科学有效的运行维护策略, 对确保风力发电机可靠运行、延长使用寿命、降低运维成本以及促进风电场可持续发展具有极为重要的意义。

1 风力发电机的基本原理与结构

1.1 风力发电机的工作原理

风吹动风轮叶片, 使风轮绕轴转动, 进而带动与之相连的发电机主轴旋转。对于双馈式风力发电机, 主轴转动经齿轮箱增速后促使发电机转子旋转, 切割磁感线, 在定子绕组中产生感应电动势, 借助变频器控制输出电压频率与电网匹配实现并网发电。而直驱式风力发电机, 风轮直接驱动永磁同步发电机发电, 产生的交流电经电力电子装置处理后入网。整个过程中, 控制系统根据风速、风向等实时调整风轮转速、叶片桨距角及发电机工作状态, 以达最佳发电效率与稳定运行。

1.2 风力发电机的结构组成

风轮是捕获风能的核心部件, 由若干叶片与轮毂连接而成, 其设计旨在高效利用风能。机舱内安装着众多重要设备, 发电机负责将机械能转换为电能, 双馈式配备的齿轮箱用于增速, 还有控制系统、液压系统与冷却系统等。控制系统犹如“大脑”, 监控与调控整个发电过程; 液压系统实现风轮的刹车、偏航和变桨等操作; 冷却系统保障设备运行温度适宜。塔架承担支撑机舱和风轮的重任, 使其升至合适高度获取风能, 基础则将塔架牢固固定于地面, 承受各类荷载, 确保整体结构稳定^[1]。

2 风力发电机的常见故障及原因分析

2.1 机械故障

2.1.1 叶片故障。叶片故障较为常见, 主要表现为裂纹、断裂、腐蚀与磨损。长时间受交变载荷, 材料易疲劳产生裂纹甚至断裂。在潮湿、盐碱环境中, 叶片防护涂层受损会引发腐蚀。与空气、沙尘摩擦导致磨损。

2.1.2 齿轮箱故障。齿轮箱故障在双馈式风力发电机中频发。如齿轮磨损、齿面胶合、轴承损坏及箱体渗漏等。高速重载下, 润滑不良、油质污染、接触应力过大致使齿轮磨损与齿面胶合。轴承因选型、安装问题或长期振动冲击而损坏。箱体渗漏源于密封件老化、损坏或箱体铸造缺陷。这些故障会降低传动效率, 引发异常噪声与振动, 严重时导致停机甚至设备损坏。

2.1.3 主轴故障。主轴故障主要有轴颈磨损、裂纹与变形。轴颈磨损多因与轴承摩擦, 润滑不佳或轴承故障会加剧此情况。承受过大扭矩、弯矩、冲击载荷, 以及材料缺陷或加工工艺不合理, 易引发主轴裂纹与变形。主轴故障会影响风轮与发电机间的动力传递, 降低发电效率, 产生异常振动与噪声, 若不及时处理, 可能导致整个风力发电机系统故障, 造成巨大经济损失。

2.1.4 偏航系统故障。偏航系统故障包含偏航电机、减速器、制动器及传感器故障。偏航电机过载、短路、绝缘损坏会使其失效。减速器润滑不良、齿轮磨损, 影响偏航精度与顺畅性。制动器制动片磨损、卡滞, 无法有效制动或松开。传感器故障使偏航系统无法精准感知风向, 不能正确偏航。这些故障导致风力发电机无法对准风向, 降低风能利用率, 还可能因偏航失控引发安全事故。

2.2 电气故障

2.2.1 发电机故障。发电机故障对风力发电影响显

著。定子绕组易出现短路、断路、接地故障，多因绝缘老化、受潮、过电压、机械损伤等，致使发电异常或无法发电。转子绕组故障在绕线式异步发电机中常见，如电刷与滑环接触不良产生火花，损坏绕组绝缘，或因制造焊接缺陷引发短路、断路。电刷磨损、接触不良会使励磁不稳定，影响电能输出质量与效率，需及时检测维修以保障发电机正常运行。

2.2.2 变频器故障。功率模块长期处于高电压、大电流环境，散热不良、过电压、过电流时易损坏。电容老化、电解液干涸、过电压会导致容量下降或击穿，影响变频器性能。控制电路故障常因电子元件损坏、电磁干扰、软件程序错误，使变频器控制失灵，无法准确调节发电机转速与输出电压频率，导致发电不稳定，甚至引发系统停机，增加运维难度与成本。

2.2.3 电气连接故障。电气连接故障不容忽视。电缆接头松动、氧化、腐蚀，接线端子接触不良等较为常见。松动或不良的连接使电阻增大，电能损耗增加，引发局部发热，严重时可致电气火灾。同时，影响信号传输与设备间协同工作，导致控制信号失真、设备误动作，降低风力发电机运行可靠性与效率。定期检查维护电气连接部位，确保连接紧密、可靠，对保障风电场安全稳定运行至关重要。

2.3 控制系统故障

2.3.1 传感器故障。传感器故障在风力发电机控制系统中较为常见。风速传感器、风向传感器、转速传感器及温度传感器等若出现问题，会使控制系统接收错误信息。故障原因包括传感器质量不佳、长期使用老化、受环境因素（如温度、湿度、沙尘）干扰以及电磁干扰等。这将导致控制系统发出错误指令，影响风力发电机的运行效率，如不能精准实现最大功率跟踪、偏航控制失误等，降低发电性能并可能引发安全隐患^[2]。

2.3.2 控制器故障。硬件方面，电子元件质量缺陷、过电压、过电流冲击或电磁干扰可能导致电路损坏。软件层面，程序设计漏洞、病毒感染或数据丢失会使软件崩溃或死机。控制器故障将使整个控制系统瘫痪，无法对风力发电机各部件进行有效监控与调节，造成风轮转速失控、发电功率不稳定等问题，严重时可能损坏设备，极大地影响风电场正常运行与经济效益。

2.3.3 通信故障。通信故障会破坏风力发电机控制系统内部及与监控中心的信息交互。通信线路损坏、接口松动、通信协议不匹配以及电磁干扰等都可能引发故障。这将导致数据传输受阻或中断，使得监控中心无法实时掌握风力发电机运行状态，也使控制系统内部各部件间协同

失调。例如，无法及时传递故障报警信息，延误维修时机；不能准确传达控制指令，影响设备正常运行，最终降低风电场运维效率与可靠性，增加安全风险。

3 风力发电机的运行维护策略

3.1 日常巡检

3.1.1 外观检查。外观检查是风力发电机日常巡检的基础环节。巡检人员需仔细查看风轮叶片，留意是否存在裂纹、变形、腐蚀或磨损痕迹，同时确认叶片表面防护涂层的完整性。检查机舱外壳有无破损、渗漏现象，舱门关闭是否严实。对塔架进行全面检查，查看其是否倾斜、变形，表面涂层是否剥落。还要关注基础部分，检查有无沉降、开裂等问题。

3.1.2 设备运行状态检查。巡检时，要认真聆听发电机、齿轮箱、液压系统、冷却系统等设备运行时的声音，以此判断内部是否存在异常摩擦、碰撞等状况。借助振动测量仪或用手触摸设备外壳，感知设备的振动幅度，过大的振动可能预示着设备存在不平衡、松动或故障。利用红外测温仪测量设备关键部位，如发电机绕组、轴承、齿轮箱油液、液压系统油温等的温度，温度过高往往意味着散热不良、过载或润滑故障等问题，以便及时采取措施加以解决，确保设备稳定运行。

3.1.3 电气系统检查。需重点检查电气连接部位，查看是否有松动、氧化、腐蚀等现象，电缆是否存在破损、老化问题。检查发电机的电刷磨损程度以及电刷与滑环之间的接触状况，保证良好的电气传导。查看变频器的显示屏，确认是否有报警信息，并检查各参数是否处于正常范围。对控制系统的传感器也要进行检查，查看其是否正常工作，接线是否牢固。

3.2 定期维护

3.2.1 润滑维护。定期进行润滑维护，可确保风力发电机各部件顺畅运转。需对齿轮箱、主轴轴承、偏航及变桨减速器等部位按时加注或更换润滑油、脂。依据设备运行时长与油液状态，精确定义更换周期。更换时，彻底清洁润滑系统，防止杂质残留。优质的润滑能显著降低部件摩擦与磨损，减少能量损耗，延长设备使用寿命，为风力发电机稳定高效运行提供有力保障。

3.2.2 部件紧固与调整。风力发电机运行时受振动冲击，螺栓螺母易松动。定期检查并紧固风轮叶片、机舱、塔架等各处连接部件，确保结构稳固。依据运行数据与标准规范，对叶片桨距角、偏航角度等可调整部件进行精细调校。合理的紧固与调整能有效预防部件松动引发的故障，保障风力发电机始终处于最佳运行状态，提升发电效率与安全性。

3.2.3 电气系统维护。电气系统维护关乎风力发电机的电力输出与运行安全。定期对发电机定子、转子绕组进行绝缘检测,排查短路、断路隐患,及时修复电刷与滑环的接触不良。仔细检查变频器功率模块、电容等元件的性能与连接状况,清理积尘,更新老化部件。强化电气连接部位的维护,防止松动、氧化导致的接触电阻增大。通过系统的电气维护,保障电能稳定供应,降低电气故障风险,确保风力发电机可靠运行。

3.2.4 防腐维护。防腐维护对风力发电机极为关键。因其长期处于恶劣环境,金属部件易腐蚀。定期检查风轮叶片、机舱、塔架等的防腐涂层,对剥落、损坏处及时修补或重新涂刷。在高腐蚀区域,如叶片根部、塔架底部,采用特殊防腐工艺,如加装防腐套、实施阴极保护等。有效的防腐措施可阻止金属氧化,增强结构强度,延长设备使用寿命,降低因腐蚀导致的维修成本与安全隐患,保障风力发电机长期稳定运行。

3.3 状态监测与故障诊断

3.3.1 状态监测技术。状态监测技术借助多种先进手段对风力发电机运行状态实时把控。如振动监测,通过在关键部位安置传感器,采集振动信号分析频率、幅值等,判断设备机械健康状况。温度监测利用红外测温仪等设备监控发电机、齿轮箱等部件温度,预防过热故障。油液监测分析油液中金属颗粒、水分等指标,洞悉设备磨损与润滑情形。还有电气参数监测,追踪电压、电流等数据,保障电气系统稳定运行。

3.3.2 故障诊断方法。故障诊断方法基于状态监测数据展开精准判断。基于模型的方法构建风力发电机数学模型,对比实际与模型输出差异定位故障。信号处理方法对监测信号频谱分析、小波分析等,提取特征参数关联故障类型。基于人工智能的方法,如人工神经网络、专家系统等,经大量数据训练学习,智能识别故障模式,预测故障发展,有效提升故障诊断准确性与效率,为风力发电机运维提供科学依据。

3.4 部件更换与维修

3.4.1 叶片维修与更换。对于叶片轻微损伤,如小面积裂纹或表面磨损,可采用复合材料进行修复,通过粘接、填充等工艺恢复其结构完整性与气动性能。但当叶

片出现严重断裂、大面积破损或无法修复的内部结构损伤时,则需更换叶片。更换时要严格匹配原叶片型号、规格与性能参数,按照专业安装流程操作,确保叶片安装精度与平衡度,使风力发电机恢复正常运行并保持高效发电效率。

3.4.2 齿轮箱维修与更换。齿轮箱出现故障时,先进行全面故障诊断评估。对于轻微齿轮磨损、个别轴承损坏等,可拆解维修,更换受损部件如齿轮、轴承、密封件等,并对内部进行清洁、调试。若遭遇严重箱体破裂、多齿轮严重损坏等情况,通常需整体更换齿轮箱。更换过程中要精细调整安装位置与同轴度,保证与主轴、发电机等部件的精准连接,确保动力传输平稳高效,降低设备振动与噪声。

3.4.3 发电机维修与更换。发电机维修主要针对定子绕组短路、断路可重新绕制绕组修复;转子绕组故障视情况修复或更换转子;电刷与滑环磨损严重时及时更换。当发电机损坏程度深、修复成本高或难以修复时,则需更换发电机。新发电机的功率、电压、转速等参数必须与风力发电机系统匹配,安装时严格遵循操作规程,调试至最佳运行状态,保障电能稳定、高效产出,维持风力发电机正常运行^[3]。

结束语

风力发电机的运行维护是风电场稳定高效运行的关键。通过深入了解其工作原理与结构,精准剖析各类故障及原因,我们制定了涵盖日常巡检、定期维护、状态监测与故障诊断以及部件更换维修的全方位策略。持续且科学的运行维护工作,不仅能延长风力发电机的使用寿命,减少故障停机时间,提高发电效率,还能降低运维成本与安全风险,为风电场创造更大的经济效益与环境效益,推动风力发电行业的可持续繁荣发展。

参考文献

- [1]张媛.风电场电气设备中风力发电机的运行维护策略[J].电子技术与软件工程,2019(22):223-225.
- [2]肖红军.风电场电气设备中风力发电机的运行维护措施[J].决策探索(中),2019(03):52-53.
- [3]傅畅.对于风电场电气设备中风力发电机的运行维护的措施[J].科技资讯,2019,16(33):50+52.