

# 海上风电运行维护策略研究

刘佳鑫

华电科工股份有限公司 广东 阳江 529823

**摘要:** 海上风电运行维护面临复杂海洋环境与特殊设备运行特点带来的多重挑战。本文系统分析海上风电运行环境特征与设备维护需求,深入研究状态监测、故障预测及远程运维等关键技术,构建包含预防性维护、预测性维护和应急维护的综合策略体系,并提出组织管理、资源保障与信息化建设的实施路径,为提升海上风电运维水平、保障风电场安全稳定运行提供理论支撑与实践指导。

**关键词:** 海上风电; 运行维护; 状态监测; 预测性维护; 运维策略

引言: 随着能源需求增长与能源结构转型,海上风电作为清洁能源重要组成部分,发展迅速。但海上风电场处于恶劣海洋环境,强风、海浪、海流及海洋腐蚀等对设备运行与维护提出严峻挑战。设备故障不仅影响发电效率,还会增加运维成本与安全风险。深入研究海上风电运行维护策略,提升运维水平,对保障海上风电产业可持续发展具有重要意义。

## 1 海上风电运行特点与维护需求分析

### 1.1 海上风电运行环境特点

海上风电场处于复杂海洋环境中,面临多种气象条件考验。强风是常见现象,平均风速可达8-12m/s,极端风速超过50m/s。持续强劲风力考验风机叶片强度与韧性,并对整体结构稳定性提出高要求。海浪不断冲击风机基础,浪高通常在2-5米,长期作用可能引发基础松动,影响风机垂直度与运行精度<sup>[1]</sup>。海流产生持续侧向力,流速一般在0.5-2m/s,增加基础疲劳损伤风险。台风来袭时,极端风速与恶劣海况可能对风机造成毁灭性打击。海底地质条件对基础结构稳定性影响显著。不同地质类型承载能力差异较大,砂质地质松软,承载能力约50-100kPa,基础需特殊加固;岩质地质坚硬,承载能力达500-1000kPa以上,施工难度大但稳定性好。若地质勘察不准确,长期运行可能出现不均匀沉降。海洋腐蚀环境是设备面临的重大挑战。盐雾在设备表面形成导电膜,加速金属部件电化学腐蚀,沉降率一般1-5mg/(cm<sup>2</sup>·d)。潮湿环境为腐蚀反应提供水分条件。风机塔筒、叶片等长期暴露在腐蚀环境中,表面涂层在3-5年内可能剥落,金属部件生锈,导致设备性能下降、寿命缩短。

### 1.2 海上风电设备运行特点

海上风机通过风力驱动叶片旋转,经增速箱提升转速实现电能转换。运行中需实时监测风速、转速等关键参数。风速在3-25m/s时风机正常运行,超过25m/s需停

机保护。海上特殊环境下,风机易因强风过载、海浪冲击导致叶片裂纹、齿轮箱磨损等故障。叶片裂纹超过0.5米将影响安全运行,齿轮箱磨损量超0.1毫米需维修更换。海上风电场电气系统包含变压器、开关设备和电缆等。变压器将发电机输出的690V电压升至35kV进行传输,电缆长度可达数十公里。海洋环境中,电气设备易受盐雾腐蚀导致绝缘性能下降。正常绝缘电阻应大于100MΩ,低于10MΩ则存在安全隐患。辅助设备对风电场运行至关重要。监控系统实时采集数据,频率达每秒数次;通信系统保障信息传输,延迟控制在毫秒级;消防系统响应时间应小于30秒。这些设备需定期维护,确保功能正常。

### 1.3 海上风电运行维护需求分析

海上风电运行维护中,保障人员与设备安全是首要任务。恶劣天气增加海上作业风险,如强风导致人员落水、海浪冲击使作业平台摇晃等,需制定严格安全规程,配备专业防护装备。提高设备可靠性对风电场发电效率与经济效益意义重大。设备频繁故障会导致发电中断,降低发电量,增加维修成本。需通过定期巡检、状态监测等手段,及时发现潜在故障隐患,采取预防性维护措施。降低运行维护成本是提高风电场经济效益关键。运行维护成本涵盖设备维修、人员薪酬、船舶租赁等多方面。在保证安全与可靠前提下,优化运维流程、提高运维效率、合理配置资源,可有效降低成本。

## 2 海上风电运行维护关键技术

### 2.1 状态监测技术

传感器技术是海上风电设备状态监测的基础。振动传感器捕捉运行振动信号,通过分析频率和振幅等参数,可及时发现叶片不平衡或齿轮磨损等隐患。温度传感器实时监测设备温度变化,对电气元件过热和轴承润滑不良等异常进行预警<sup>[2]</sup>。这些传感器在叶片、齿轮箱及发电机等关键部位应用广泛。应变传感器通过测量结构应变,

评估基础在风浪下的受力状态,为结构稳定性监测提供依据。数据采集与传输是状态监测的重要环节。采集系统由传感器和数据采集器组成,分别负责数据采集和初步处理。无线传输灵活但易受环境干扰,有线传输稳定可靠但成本较高。实际应用中需根据具体需求选择合适的传输方式。数据分析与诊断是挖掘数据价值的关键。时域分析可直接观察信号变化趋势,频域分析通过频率成分识别故障特征,小波分析则适用于非平稳信号处理。综合运用这些方法可实现准确的故障诊断和状态评估,为维护决策提供支持。

## 2.2 故障预测与健康管理技术

故障预测模型建立依托历史数据与机器学习算法。神经网络模型具有强大的非线性映射能力,可处理复杂设备故障数据,通过大量历史数据训练,能准确预测设备故障发展趋势,但模型训练过程复杂,对数据质量要求高。支持向量机模型在小样本数据情况下表现优异,能有效避免过拟合问题,适用于数据量相对较少的故障预测场景。不同模型各有优劣,需根据设备特点、数据条件等因素选择合适模型。健康管理策略制定基于设备状态监测与故障预测结果。根据设备当前状态与未来故障趋势,科学制定设备维护计划,合理安排维护时间与内容,避免过度维护或维护不足。优化维修决策,对于可能发生严重故障的设备提前安排维修,对于故障风险较低的设备适当延长维修周期。通过全生命周期健康管理,实现设备运行状态实时掌控,延长设备使用寿命,提高风电场运行效益。

## 2.3 远程运维技术

远程监控与操作技术提升海上风电运维效率。远程监控系统集成多种监测功能,可实时采集设备运行数据、视频图像等信息,运维人员通过监控中心大屏或移动终端即可掌握设备运行状态。远程操作功能允许运维人员在陆上对海上设备进行启停、参数调整等操作,减少海上作业次数,降低运维风险与成本。虚拟现实与增强现实技术为海上风电运维带来新机遇。在设备维修培训中,利用虚拟现实技术创建逼真设备模型与维修场景,让学员在虚拟环境中进行维修操作训练,提高培训效果与安全性。增强现实技术可将设备维修指导信息实时叠加在真实设备上,为远程故障诊断指导提供直观可视化支持,帮助现场人员快速准确完成维修任务,但目前这两项技术在应用中还面临设备成本高、技术成熟度有待提升等挑战。

# 3 海上风电运行维护策略制定

## 3.1 预防性维护策略

定期维护计划是保障海上风电设备稳定运行的基础。鉴于设备长期处于恶劣海洋环境,需依据实际运行状况制定维护计划。维护周期应综合考虑设备类型、运行强度及环境因素。海上风机叶片受强风盐雾侵蚀严重,需每3-6个月进行全面检查维护;相对稳定的辅助设备维护周期可延长至1-2年<sup>[3]</sup>。维护内容涵盖设备清洁、紧固件检查和润滑保养等,执行标准严格遵循行业规范,确保每次维护达到预期效果,有效预防设备故障。关键部件维护对设备安全运行至关重要。风机叶片长期承受强风冲击与盐雾腐蚀,易产生裂纹磨损;齿轮箱在能量传递中承受巨大载荷,内部齿轮轴承易损坏;发电机绝缘性能易受潮湿环境影响。针对这些部件需制定专门维护策略,增加监测频次至每周数次,采用无损检测、油液分析等精细手段,及时发现隐患并采取针对性措施,确保关键部件保持良好运行状态。

## 3.2 预测性维护策略

基于状态监测的预测性维护能提前发现设备故障迹象。借助状态监测技术实时采集设备运行数据,结合故障预测模型,对设备故障发展趋势进行精准预测。当监测数据显示设备某项参数出现异常波动时,通过模型分析判断可能引发故障的原因及发展趋势,提前安排维护工作。在设备故障初期进行干预,避免故障扩大化,有效减少非计划停机时间,提高设备可用率与风电场发电效率。基于大数据分析的预测性维护为维护决策提供更科学依据。海上风电场在长期运行过程中积累了海量运行数据,这些数据蕴含着设备运行规律与潜在问题信息。通过大数据分析技术,对这些数据进行深度挖掘与分析,找出影响设备运行的关键因素与故障特征模式。依据分析结果优化维护策略,实现维护资源精准配置,提高维护工作针对性与有效性,进一步提升海上风电设备运行可靠性与经济性。

## 3.3 应急维护策略

应急预案制定是应对海上风电场突发情况的关键。针对台风、设备故障等状况,需制定全面应急预案。明确应急响应流程,确保突发情况下各部门能迅速行动,响应时间控制在1小时内;合理调配应急资源,包括维护设备、物资与人员,物资储备应满足至少3天需求;制定详细处置措施,针对不同类型事件提出解决方案,提升应急处置效果。通过预案制定与演练,可有效降低突发情况造成的损失。应急队伍建设与培训是提升应急维护能力的重要保障。组建专业海上应急维护队伍,成员需具备丰富作业经验,队伍规模一般不少于10人。加强人员培训与演练,每年组织2-3次模拟演练,提高队伍快速

响应与协同作战能力。通过持续培训,使应急人员熟悉预案流程与处置措施,在突发情况下能够迅速有效开展维护工作,最大限度降低对风电场运行的影响。

#### 4 海上风电运行维护策略实施与保障

##### 4.1 运行维护组织管理

运维团队组建与管理是海上风电运维工作顺利开展的基础。团队通常由专业技术人员与管理人员共同构成,技术人员涵盖电气、机械、自动化等领域,具备扎实的专业知识和丰富经验,能有效应对设备运行中的各类技术问题<sup>[4]</sup>。管理人员负责整体运维的规划、协调与监督,确保工作有序推进。人员配置需结合风电场规模、设备类型及任务量合理规划,做到岗责匹配。通过定期组织专业技能培训和团队协作训练,持续提升团队业务能力与协同效率,增强整体素质。运维流程优化对提升工作效率与质量至关重要。需全面梳理从日常巡检、故障报告、诊断分析到维修实施与验收各环节,明确职责与标准。例如,巡检人员须按规定路线细致检查并准确记录数据;诊断人员需依据监测信息快速判断故障原因;维修人员应严格按工艺要求操作,确保维修质量。通过流程优化,减少冗余环节,推进运维工作的规范化与标准化,保障高效有序开展。

##### 4.2 运维资源保障

物资保障是海上风电运维工作顺利进行的物质基础。建立完善的运维物资管理体系,对备品备件、工具设备等物资进行科学分类与存储管理。根据设备故障发生率与维修周期,合理确定物资储备量,确保关键物资充足供应。同时建立物资动态管理机制,实时监控物资库存情况,及时补充消耗物资,避免因物资短缺影响运维工作进度。技术保障为海上风电运维工作提供强大支撑。加强与科研机构、设备制造商等合作交流,及时了解行业前沿技术与设备发展动态。积极引进先进运行维护技术与设备,如智能监测诊断系统、高效维修工具等,提升运维技术水平与效率。通过技术合作与交流,培养自身技术创新能力,不断探索适合海上风电特点的运维技术与方法。

##### 4.3 运维信息化建设

运维管理系统开发与应用是提升运维管理信息化水平的关键。开发适用于海上风电运行维护的管理系统,集成设备档案管理、维护计划制定、故障报警处理、运维数据统计等功能。通过该系统,可实现对设备全生命周期管理,提前规划维护工作,实时掌握设备运行状态,快速响应故障报警,并对运维数据进行深度分析,为运维决策提供科学依据<sup>[5]</sup>。数据安全与隐私保护是运维信息化建设不可忽视的重要环节。海上风电运行维护数据包含设备运行参数、故障信息等敏感内容,面临网络攻击、数据泄露等安全风险。采取加强网络安全防护措施,如设置防火墙、入侵检测系统等,防止外部非法访问。同时对数据进行加密处理,限制数据访问权限,确保运维数据安全性和保密性,保障海上风电运行维护工作稳定可靠开展。

##### 结束语

海上风电运行维护策略研究对保障风电场稳定运行与提升经济效益至关重要。通过分析运行特点与维护需求,明确关键技术,制定全面且针对性强的维护策略,并从组织管理、资源保障与信息化建设方面提供实施保障。未来,随着技术进步,需持续优化运维策略,探索更高效智能的运维模式,推动海上风电产业向更高质量、更可持续方向迈进。

##### 参考文献

- [1]王双林.海上风电场风力发电机状态监测与运行维护策略[J].海峡科学,2024(8):48-51.
- [2]王昊,刘璐洁,陈龙,等.考虑故障关联不确定性的海上风电机组预防性维护策略优化方法[J].上海电力大学学报,2024,40(4):331-339.
- [3]李东亮.海上风电场通信电源系统稳定运行策略研究[J].通信电源技术,2024,41(20):113-115.
- [4]陈忠良.海上风电场风力发电机运行维护策略研究[J].建筑工程技术与设计,2023,11(19):136-138.
- [5]王建国.基于状态监测的海上风电设备预防性维护策略研究[J].机械工程学报,2024(5):102-108.