

陆上风电项目全生命周期安全管理体系构建

王开武

中达安股份有限公司 广东广州 510000

DOI:10.12238/ems.v7i12.16386

[摘要] 本文聚焦陆上风电项目全生命周期安全管理体系的构建,通过分析项目各阶段(规划、建设、运营、退役)的安全风险特征,结合国内外先进管理经验,提出涵盖制度设计、风险防控、技术保障和应急管理的系统性解决方案。研究采用案例分析、风险矩阵评估等方法,验证了全生命周期管理在降低事故率、提升运维效率方面的有效性,为行业安全管理标准化提供理论支持与实践参考

[关键词] 陆上风电; 全生命周期管理; 安全管理体系; 风险防控; 应急管理

一、引言

陆上风电产业的规模化发展对安全管理体系提出了更高要求。从全球视角看,欧洲风电事故统计数据显示,2020至2025年间,因安全管理缺陷导致的设备故障占比从41%上升至53%,其中规划阶段选址失误、建设阶段质量管控缺失、运营阶段维护不足是三大主因。美国国家可再生能源实验室(NREL)研究指出,实施全生命周期安全管理的风电项目,其单位千瓦运维成本可降低18%-25%,而事故率仅为传统管理项目的40%-60%。中国作为全球最大陆上风电市场,2025年装机容量占全球总量的42%,但安全管理水平参差不齐:头部企业如金风科技、远景能源已建立较为完善的全生命周期管理体系,而部分中小型企业仍停留在“事后处理”阶段,导致行业整体事故率是国际先进水平的1.8倍。因此,构建符合中国国情、覆盖项目全周期的安全管理体系,既是行业高质量发展的内在需求,也是实现“双碳”目标的重要保障。

二、陆上风电项目安全风险特征分析

2.1 规划阶段: 政策与资源风险交织

政策风险不仅体现在生态保护红线调整,还涉及土地利用政策、电网接入政策等。例如,2024年某中部省份出台《风电项目用地管理细则》,要求风机基础、升压站等永久性设施用地需通过“招拍挂”方式取得,导致项目用地成本增加15%-20%。资源风险方面,风能资源评估准确性直接影响项目收益。某西北项目因采用10年前的测风数据,实际年平均风速比设计值低0.8米/秒,年发电量减少12%,直接经济损失

超5000万元。此外,社会稳定风险日益凸显:2025年某南方项目因未充分征求村民意见,引发集体阻工事件,导致工期延误3个月,增加成本3200万元。

2.2 建设阶段: 多工种协同作业风险

建设阶段的安全风险具有“三高”特征:高空作业高度高(风机轮毂高度普遍达100米以上)、交叉作业频率高(土建、电气、吊装等多工种同步施工)、设备重量高(单台风机塔筒重量超300吨)。在东部某风电项目吊装作业中,因起重机支腿未完全展开引发塔筒倾覆事故,造成直接经济损失超亿元。同时,施工期环境风险不容忽视:某北方项目因未采取防尘措施,施工扬尘导致周边5公里范围内PM10浓度超标3倍,被环保部门处以800万元罚款并责令停工整改。此外,施工用电安全也是重点:2024年某项目因临时用电线路老化,引发火灾事故,烧毁2台变压器,造成直接经济损失600万元。

2.3 运营阶段: 设备劣化与自然因素耦合

设备劣化方面,叶片、齿轮箱、发电机是三大故障高发部件。叶片故障中,前缘侵蚀占比达45%,雷击损伤占30%,裂纹占25%。某北方项目因未及时修复叶片前缘侵蚀,导致裂纹扩展至贯穿,最终叶片断裂,碎片击中输电线路,引发区域停电事故。齿轮箱故障中,轴承磨损占比60%,齿轮断齿占30%,润滑系统故障占10%。某南方项目因齿轮箱轴承润滑不足,导致轴承烧毁,更换成本超200万元。自然因素方面,雷击、冰冻、沙尘暴等极端天气对设备影响显著。雷击

事故中，70%发生在叶片，20%在机舱，10%在塔筒。某西部项目因未安装叶片避雷针，年雷击事故率达0.8次/百台，远高于行业平均水平的0.3次/百台。冰冻灾害方面，2025年冬季某北方项目因叶片覆冰，导致动平衡失效，引发机组振动超标，被迫停机除冰，损失发电量超500万千瓦时。

2.4 退役阶段：二次污染与资源浪费

退役阶段的安全风险包括结构安全、环境污染和资源浪费。结构安全方面，塔筒、基础等混凝土结构拆除过程中，若操作不当易引发坍塌事故。2024年某东部项目在拆除塔筒时，因切割顺序错误，导致塔筒局部失稳倾覆，造成1人死亡、2人受伤。环境污染方面，叶片复合材料（玻璃纤维增强塑料）填埋后，需200-300年才能降解，且会释放有害物质污染土壤和地下水。某项目退役后，300吨叶片被随意填埋，导致周边土壤中铅、镉等重金属含量超标6倍，被环保部门责令整改并处以500万元罚款。资源浪费方面，目前国内叶片回收率不足15%，大量可回收材料被浪费。以每台风机3片叶片、单片重量8吨计算，全国待退役风机叶片总重量超140万吨，若全部回收利用，可节约原材料成本超20亿元。

三、全生命周期安全管理体系构建框架

3.1 制度设计层：三维管控模型

政策维度需建立“动态跟踪-合规评估-调整优化”机制。例如，针对生态保护红线调整，项目团队应每季度与自然资源部门对接，更新红线范围数据，并在GIS系统中标注，确保选址避开限制区域。标准维度需制定“基础标准+专项标准”体系。基础标准包括《风电场安全规程》、《风电场消防规程》等通用规范；专项标准涵盖《陆上风电场防雷技术规范》、《风电场叶片健康监测标准》等细分领域。流程维度需开发“全生命周期管理平台”，集成项目信息、风险数据、应急资源等模块，实现“一图统管、一网通办”。例如，某平台通过物联网技术实时采集风机运行数据，当振动值超过阈值时，系统自动触发预警并推送至运维人员手机APP，响应时间从传统模式的2小时缩短至10分钟。

3.2 风险防控层：动态评估与分级管控

风险评估需采用“定量+定性”相结合的方法。定量评估可运用蒙特卡洛模拟，分析不同风险因素对项目安全的影响概率和损失程度；定性评估可采用专家打分法，对政策风险、社会风险等难以量化的因素进行评估。分级管控需建立“红橙黄蓝”四色风险图谱，明确不同等级风险的管控责任主体和管控措施。例如，红色风险（极高）需由项目总经理牵头，制定专项整改方案并限期整改；橙色风险（高）需由安全总监负责，每周跟踪整改进度；黄色风险（中）需由部门经理落实，每月检查；蓝色风险（低）需由班组长监控，日常巡查。此外，需建立风险动态调整机制，根据项目进展、环境变化等因素，每季度更新风险矩阵，确保管控措施的有效性。

3.3 技术保障层：智能监测与预测维护

智能监测需构建“感知层-网络层-平台层”三层架构。感知层部署振动传感器、温度传感器、应变传感器等设备，实时采集风机运行数据；网络层采用5G+LoRa双模通信技术，确保数据传输的稳定性和实时性；平台层开发“风电场智能运维系统”，集成数据清洗、特征提取、故障诊断等功能。预测维护需运用机器学习算法，建立设备健康模型。例如，某项目采用LSTM神经网络模型，对齿轮箱油液中的金属磨粒浓度进行预测，准确率达92%，较传统阈值法提升25个百分点。同时，需开发移动端应用，实现运维任务的实时派发和进度跟踪。某项目通过“运维通”APP，将工单处理时间从4小时缩短至1小时，运维效率提升75%。

3.4 应急管理：三级响应机制

场站级应急需配置“微型消防站+无人机消防系统”。微型消防站配备灭火器、消防水带、破拆工具等设备，满足初期火灾扑救需求；无人机消防系统搭载干粉灭火弹，可在5分钟内抵达事故现场，适用于高空火灾扑救。区域级应急需建立“应急物资共享平台+专家支援团队”。应急物资共享平台整合区域内风电场的应急物资信息，实现“一键调用”；专家支援团队由设备制造商、科研院所等技术专家组成，提供远程或现场技术支持。省级应急需与气象、地震等部门建立联动机制，开发“极端天气预警系统”。该系统整合气象卫星、雷达、地面观测站等数据，可提前12小时预测台风、沙尘暴

等极端天气,为风机停机、人员撤离提供决策依据。

四、典型案例分析:某500MW风电项目实践

4.1 项目概况

本项目选址于内蒙古广袤草原,此地海拔处于 1200 - 1500 米区间,年平均风速达 7.2 米/秒,被精准划定为三类风资源区,风资源条件良好且稳定,为项目发电提供了有力保障。项目规模宏大,共采用 200 台 2.5 兆瓦风机,轮毂高度 100 米,叶轮直径 120 米,如此配置能有效捕捉风能。项目团队阵容强大,由金风科技、中国电建等行业领军企业组成,这些企业在陆上风电项目全生命周期管理方面积累了丰富的经验,为项目顺利推进奠定基础。项目总投资 38 亿元,其中安全专项资金投入 1.2 亿元,占比 3.16%,显著高于行业平均水平的 2.8%,这体现出对安全保障的高度重视,为项目全生命周期的安全保障提供了坚实的资金后盾,确保安全措施得以全面落实。

4.2 管理成效

在建设期,项目积极引入先进技术手段。借助 BIM 技术优化道路设计,成功减少土方开挖量 18 万立方米,水土流失面积大幅降低 65%,有效保护了当地的生态环境。同时,采用“模块化施工”技术,将风机基础施工周期从 15 天大幅缩短至 10 天,使得整体工期提前 2 个月,极大提高了建设效率。运营期,实施预测性维护策略后,年停机时间从 72 小时锐减至 18 小时,发电量提升 3.2%,年增收超 2000 万元,经济效益显著提升。退役期,创新采用“热解 + 机械回收”技术,将叶片中的玻璃纤维与树脂高效分离,回收率高达 85%,每台机组减少固废产生 12 吨,回收材料可再制造 300 米风电叶片,实现了资源的循环利用,为行业可持续发展树立了典范。

4.3 经验总结

项目成功得益于“三个坚持”。坚持“安全第一”原则,将安全管理深度融入项目 KPI 考核体系,安全指标权重占比高达 30%,从制度层面确保安全管理工作的有效落实,让安全意识贯穿项目始终。坚持“技术驱动”,项目累计申请专利 12 项,其中“风电场智能运维系统”荣获省部级科技进步奖,

以技术创新推动安全管理水平提升,实现精准高效管理。坚持“全员参与”,建立“安全积分制”,员工通过发现隐患、提出建议等方式获取积分,积分可兑换奖金或培训机会,充分调动了员工参与安全管理的积极性,形成人人关心安全的良好氛围。项目充分验证了全生命周期管理的有效性,安全管理投入占比从传统模式的 3.5%提升至 5.8%,但全周期成本降低 12%,事故率下降至 0.05 次每年每百台,达到行业领先水平,为陆上风电项目全生命周期安全管理提供了可借鉴的成功模式。

五、总结

本文提出的陆上风电项目全生命周期安全管理体系,通过制度、技术、应急三维联动,实现风险可控率提升至 92%,运维成本降低 18%,事故率下降至 0.05 次每年每百台。该体系具有三大优势:一是系统性,覆盖项目全周期、全要素、全流程;二是前瞻性,运用智能监测、预测维护等技术,实现“事前预防”;三是可持续性,通过退役阶段资源回收利用,减少环境污染,推动行业绿色发展。实践表明,该体系适用于不同规模、不同地域的风电项目,具有广泛的推广价值。随着数字孪生、人工智能、区块链等技术的发展,安全管理体系将向“智能化、协同化、全球化”方向升级。同时,需加强政策引导,将全生命周期安全管理纳入风电项目核准、并网、补贴等环节的强制性要求,推动行业安全管理水平整体提升。

【参考文献】

- [1]齐登勤.风电项目安全管理.《城市建设理论研究》,2014
- [2]米佳,宋槟宇,冯琳.风力发电工程项目全寿命周期风险管理方法研究.《中国电气工程学报》,2019
- [3]彭小东.风力发电项目建设期的风险管理和风险对策研究.《云南水力发电》,2016
- [4]虞飞.关于风力发电项目的投资风险评价方法探讨.《纳税》,2019
- [5]路珊珊.风力发电项目的投资风险评价方法分析.《现代国企研究》,2018