

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 应急管理层: 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且宝贵的经验,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