

海上风电供应链结构分析与研究

丁鹏程² 孙晓明¹ 董玉新¹ 乔琪² 秦章原² 肖彬²

1. 中国长江三峡集团有限公司 湖北武汉 430010; 2. 上海勘测设计研究院有限公司 上海 200050

DOI:10.32629/ems.v8i5.20197

[摘要] 在“双碳”目标与能源安全战略双重驱动下,我国海上风电产业加速向深远海、规模化方向演进,产业链供应链的复杂性与脆弱性持续凸显。本文系统剖析海上风电产业链四大核心环节的结构特征,识别全链条关键堵点与风险传导路径,构建涵盖对外依存度、设备故障率等核心指标的可量化风险预警体系。研究成果可为海上风电产业链安全防控提供理论支撑,丰富新能源供应链风险管理的学术体系。

[关键词] 海上风电; 供应链韧性; 风险预警; 指标体系; 供应链安全

1 引言

全球能源格局深度变革,清洁能源替代进程持续加速,海上风电凭借资源储量大、发电效率高、不占用陆地空间等核心优势,成为全球能源转型的核心抓手。我国海岸线绵长、海上风能资源禀赋优异,海上风电已成为落实“双碳”目标、保障国家能源安全的战略性产业。

截至2025年9月底,我国海上风电累计并网容量达4461万千瓦,新增并网容量连续7年稳居全球首位,全球装机占比超45%^[2],产业已迈入规模化发展新阶段。但随着产业向深远海持续拓展,核心技术壁垒高、关键材料供应集中、施工运维难度大、国际贸易环境波动等问题持续凸显,供应链稳定性与韧性面临严峻考验。

《“十四五”现代能源体系规划》明确将“增强能源供应链稳定性和安全性”作为核心目标^[3],党的二十届四中全会着重强调“提升产业链供应链韧性和安全水平”。海上风电作为能源转型关键领域,其供应链安全直接关系到国家能源战略落地。现有研究多聚焦产业链单一环节的风险分析,缺乏全产业链系统性考量,预警机制以定性分析为主,缺少量化指标与实证验证,难以满足产业实践需求。本研究通过系统剖析产业链结构与风险特征,构建全链条、可量化的风险预警体系,填补现有研究空白。

2 海上风电产业链结构解析

海上风电产业链是风电与海洋工程技术深度融合的复杂网络,具有技术密集、资本密集、环节协同性强、空间跨度大的核心特征。本文结合产业实践,将其划分为四大核心环节,形成“四环节三维度”立体结构:物理层级覆盖“主系统-子系统-零部件-原材料”,时序维度贯穿“设计-

生产-测试-运维”,风险维度涵盖“技术-供应-市场-政策”,各环节关联紧密,风险传导效应显著^[4]。

2.1 上游:原材料与核心零部件环节

该环节是产业的基础支撑,也是技术壁垒最高、风险最集中的环节,直接决定核心装备的性能与可靠性,分为两大核心板块:一是核心原材料,包括叶片用环氧树脂、碳纤维、巴沙木芯材,海缆用超净XLPE绝缘料、特种防腐钢材等,高性能材料的供应呈现头部企业高度集中的特征^[5];二是核心零部件,包括叶片、齿轮箱、发电机、主轴轴承、变流器等,合计占风机总成本的75%-80%,其中大兆瓦主轴轴承、高压大容量IGBT模块、高精度控制芯片等核心器件,市场供应高度集中于少数国际头部企业。

2.2 中游:装备制造与工程施工环节

该环节是产业链的核心枢纽,衔接上游生产与下游项目落地,分为三大核心板块:一是风电机组整机制造,我国已具备大兆瓦海上机组的规模化集成能力,如远景能源、金风科技、明阳智能等头部企业,单机容量技术水平与国际同步;二是配套装备制造,包括海底电缆、海上升压站、柔直换流站等,其中超高压海缆、深远海柔直换流装备是深远海开发的关键支撑,技术壁垒高、定制化特征显著^[5];三是工程施工安装,涵盖勘察设计、基础施工、风机吊装、海缆敷设等全流程,核心作业装备的效率与可靠性直接决定项目的施工周期与成本。

2.3 下游:并网输电与开发运营环节

该环节是项目实现商业价值的核心,分为两大核心板块:一是海上并网与输电系统,包括场内集电系统、海上升压站、柔性直流输电系统等,是电力安全送出的核心保障^[9];二是

风电场开发与运营,参与主体以大型电力央企、地方能源国企为主,负责项目核准、投资、运营全流程,其投资节奏与项目核准政策直接影响上游环节的市场景气度。

2.4 全生命周期:运维服务环节

随着我国首批规模化海上风电项目陆续走出质保期,已成为产业链的重要组成部分,分为常规运维、故障检修、技改升级三大板块。深远海场景下,运维作业面临海况复杂、窗口期短、成本高、安全风险大等挑战,对运维装备、技术、备件供应的及时性提出极高要求,是保障项目全生命周期发电效益的关键。

3 海上风电供应链关键堵点卡点与风险归因

3.1 全链条关键堵点卡点分析

基于实地调研、德尔菲法与案例研究,本文识别出海上风电供应链 22 个关键堵点,这些堵点呈现“技术依赖 - 产能约束 - 标准壁垒 - 生态缺失”的链式传导特征,在深远海场景下进一步放大,核心矛盾是技术供给能力与产业高质量发展需求的不匹配,按三大环节拆解如下:

3.1.1 规划设计与建安环节

规划设计软件壁垒突出,风资源评估与风电场设计核心软件长期被国外产品垄断,本土软件在复杂场景算法精度、工程认证应用上仍有差距;高端勘察设备高度依赖国际厂商,国产装备难以适配深远海精细化勘察需求;施工装备核心子系统供给受限,动力定位系统控制器、大型液压打桩锤等核心部件高度依赖进口,同时勘察、设计、施工环节“数据孤岛”问题突出,进一步加剧供应链风险^[6]。

3.1.2 机组设计与研发环节

叶片用高等级环氧树脂、巴沙木芯材等核心原材料产能集中于国际厂商,本土替代材料尚未完成全生命周期验证,供应波动风险突出^[8];叶片气动设计与结构仿真软件依赖国外产品,大兆瓦机组主轴轴承的设计、加工、热处理全链条存在外部依赖,高速级轴承稳定供给能力不足;变桨偏航系统 DSP 芯片、变流系统 FPGA 芯片等核心元器件长期依赖国外品牌,本土产品高压场景可靠性验证不足。

3.1.3 并网与输电系统环节

500kV 超高压海缆用超净 XLPE 绝缘料进口依存度超 75%,深海铠装钢丝长效防腐技术尚未突破;300MVA 以上大功率有载分接开关、合成酯绝缘油等主变压器核心部件进口依赖度超 70%;高压大容量 IGBT 模块被英飞凌、三菱垄断,

柔直换流阀核心部件存在供给短板。

3.2 风险归因分析

基于风险分解结构法(RBS),结合全链条堵点的传导特征,本文将海上风电供应链风险划分为六大类。具体分类与核心逻辑如下:

关键技术风险(权重 35%):供应链风险的核心源头,也是其他风险的底层诱因。产业链上游核心材料、核心元器件,中游设计仿真工业软件、施工装备核心子系统,下游数字化运维底层算法等关键环节,均存在不同程度的对外技术依赖,形成“技术不自主 - 标准被锁定 - 市场难验证 - 替代无空间”的恶性循环。

政策风险(权重 20%):供应链风险的关键触发因素,贯穿全产业链全生命周期。国际贸易层面,部分国家针对高端芯片、特种材料、精密装备的出口管制,可直接切断关键环节的供应渠道,引发供应链“断链”;国内外认证标准不互认,大幅推高本土产品出海的合规成本,限制了产业全球化布局空间。

产能风险(权重 15%):供应链风险的核心供给端载体,核心表现为结构性供需失衡。一方面,大兆瓦核心轴承、超高压海缆、高压 IGBT 模块等高端产品产能严重不足,无法匹配产业规模化、深远海发展需求,形成刚性供给瓶颈;另一方面,中小功率机组、常规尺寸叶片等中低端产品产能过剩。

质量风险(权重 10%):供应链风险的核心落地表现,贯穿制造、施工、运维全流程。受核心材料、核心部件技术短板影响,海上核心装备质量一致性不足;施工环节工艺标准化程度低,工程质量波动大,为后续运维埋下隐患;设备早期故障率偏高、运维环节重复性缺陷多发。

标准化壁垒风险(权重 20%):供应链风险的重要放大因素,核心源于标准体系建设滞后于产业发展。国内标准与 IEC 国际标准对接不畅,认证互认难度大,制约了本土技术与装备的国际化发展;行业标准更新迭代滞后于技术快速发展,无法为新技术、新产品的规模化应用提供合规支撑,延缓了本土替代进程,进一步放大了技术依赖带来的供应链风险^[7]。

4 海上风电供应链风险预警指标体系构建

4.1 指标体系设计原则与框架

构建“基础指标 - 综合指标 - 预警等级”三级预警体系,基础指标覆盖对外依存度、运行可靠性、供应稳定性、

替代弹性四大维度, 综合指标聚焦供应链健康度实现风险精准量化, 最终形成“指标—阈值—预警—处置”的闭环运行机制。

4.2 核心指标定义与算法

4.2.1 基础指标

关键环节对外依存度: 采用专家评分加权法, 从核心技术自主度、关键部件供应能力、供应集中度、技术壁垒突破难度、供应可持续性 5 个维度评分, 权重分别为 0.25、0.25、0.2、0.15、0.15, 加权后取值 0-1, 数值越高风险越大, 按季度更新。

72h+ 设备故障率 (关键部件): 计算公式为“当月关键部件单次停机 \geq 72h 的总时长 / 当月场站正常运行总时长”, 按季度更新, 反映关键部件可靠性与运维有效性。

备品备件折损率: 计算公式为“实际库存消耗量 / (期初库存 + 入库量)”, 按季度更新, 衡量备件库存管理水平。

供需指数: 定义为“(可用库存 + 供应商可交付能力) / 储备定额需求”, 阈值为 $S/D < 0.9$ (供不应求)、 $0.9-1.1$ (供求平衡)、 $S/D > 1.1$ (结构性冗余), 按季度更新。

可替代性指数: 基于信息熵计算, 公式为 $U=H/H_{max}$, 其中 $H=-\sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln(p_i)$, $H_{max}=\ln(n)$, U 取值 0-1, 越接近 1 代表供应商分布越均匀、替代能力越强, 按季度更新。

4.2.2 综合指标

供应链健康度采用层次分析法确定权重, 综合得分公式为: 供应链健

康度其中, w_i 为各基础指标权重, x_i 为标准化后的指标取值。健康度取值 0-

100 分, 划分为四级预警: 绿色 (≥ 80 分, 低风险)、黄色 (70-79 分, 一般风

险)、橙色 (60-69 分, 较高风险)、红色 (< 60 分, 高风险), 按季度更新,

可按部件、项目、区域钻取分析。

4.3 指标验证与阈值校准

基于 28 家调研企业 2023-2024 年运营数据实证验证, 关键环节对外依存度与供应链中断风险显著正相关 ($r=0.78$, $p < 0.01$), 72h+ 设备故障率与运维成本显著正相关 ($r=0.65$, $p < 0.05$), 可替代性指数与供应中断概率显著负相关 ($r=-0.62$, $p < 0.05$), 验证了指标体系的有效性。

通过历史数据分位数法与专家校准, 确定核心预警阈值:

可替代性指数 $U < 0.3$ 为红色预警, 供需指数 $S/D < 0.9$ 为缺口预警, 关键环节对外依存度 > 0.7 为红色预警。

5 研究结论

本文解构了海上风电产业链“四环节三维度”的复杂结构, 系统识别出全链条关键堵点卡点, 发现堵点整体呈现“技术依赖-产能约束-标准壁垒-生态缺失”的链式传导特征。基于供应链相关理论, 本文构建了全链条风险预警体系, 通过信息熵与层次分析法实现风险量化分级, 可为海上风电产业链安全防控提供理论支撑, 丰富新能源供应链风险管理的学术体系。

本研究仍存在局限性: 预警指标的长期有效性需更大样本量的长期数据验证, 尚未构建风险传导动态仿真模型, 无法量化风险传导的具体路径与强度, 这也是后续研究的重点方向。

[参考文献]

- [1] 顾云娟, 赵玉奇, 季颖. 全产业链框架下海上风电发展的国内外经验分析 [J]. 中国海洋经济, 2023 (01): 64-82.
- [2] 全球风能理事会 (GWEC). 2025 全球海上风电报告 [R]. 布鲁塞尔: 全球风能理事会, 2025.
- [3] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划 [Z]. 2022.
- [4] 陈立敏, 周材荣. 全球风电产业链的贸易格局演变与风险传导模拟 [J]. 资源科学, 2024, 46 (09): 1822-1835.
- [5] 中国电器工业协会. 中国海缆行业发展白皮书 (2024) [R]. 北京: 中国电器工业协会, 2024.
- [6] 江伟, 王楠, 曹少鹏. 供应链中断风险的度量与应用: 基于词嵌入模型的分析 [J]. 南开管理评论, 2025, 28 (02): 45-56.
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 船舶和海上技术 海上风能 供应链信息流: GB/T 39215-2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [8] 未来智库. 2025 年中国海上风电产业市场深度调研及未来发展趋势报告 [R]. 北京: 未来智库, 2025.
- [9] 赵勇, 李炜, 何奔, 等. 中欧漂浮式海上风电关键技术产业链合作路径研究 [J]. 发电技术, 2025, 46 (03): 421-431.