

深远海海上风电规模化开发关键技术

林士凯

广东华电福新阳江海上风电有限公司 广东 阳江 529500

摘要：深远海海上风电规模化开发是推动能源转型与实现可持续发展的重要方向。本文围绕深远海海上风电规模化开发展开系统论述。首先阐明其在优化能源结构、应对气候变化、带动产业发展及保障能源安全方面的重要意义。其次深入分析了风机大型化、浮式基础、柔性直流输电及智能化运维等关键技术的发展现状与需求。最后从政策规划引导、技术创新与人才培养、产业协同与资源整合三个维度提出规模化开发策略，旨在为我国深远海海上风电产业高质量发展提供理论参考与实践支撑。

关键词：深远海；海上风电；规模化开发；关键技术

引言

随着全球能源转型加速推进，深远海海上风电凭借资源丰富、不占用陆地资源等优势，已成为实现清洁低碳发展的重要方向。然而，深远海复杂海况对风机大型化、浮式基础、柔性直流输电及智能运维等关键技术提出了更高要求，同时在政策规划、技术创新、产业协同等方面也面临诸多挑战。本文系统阐述深远海海上风电规模化开发的重要意义，深入分析各项关键技术的发展现状与需求，并从政策支持、技术创新与人才培养、产业协同与资源整合三个维度提出开发策略，为我国深远海海上风电产业高质量发展提供参考。

1 深远海海上风电规模化开发的重要性

(1) 深远海海上风电规模化开发对于优化能源结构和推动能源转型具有重要作用。传统化石能源在开采和使用过程中存在资源储量有限、环境污染严重等问题，同时化石能源的大量消耗导致能源供应面临枯竭风险。深远海区域风能资源储量大、风速稳定且不占用陆地土地资源，规模化开发能够在整体能源供给中提升清洁能源所占比例，减少对化石能源的消耗，推动能源体系向清洁低碳方向转变，这一转变对于完成能源结构调整目标具有基础性作用。(2) 应对气候变化是当前全球的核心任务，减少温室气体排放是实现气候目标的关键路径。深远海海上风电在运行阶段不排放二氧化碳及其他温室气体，大规模建设风电场能够直接替代部分化石能源发电量从而降低碳排放总量，同时风电开发带动上下游清洁能源产业发展，形成产业间的协同效应，在发电端、输配电端和用电端全面推进减排，助力全球减排目标的实现。(3) 深远海海上风电开发涉及风机制造、海上施工、输电设备制造、海底电缆铺设、运维服务等多个环节，能够带动完整产业链发展并创造就业岗位和经

济收益。深远海恶劣环境对设备性能提出更高要求，推动风机制造技术升级，海上施工、船舶制造、海底电缆铺设等产业获得发展空间，运维服务市场的兴起为风电场长期运行提供保障，这些环节共同构成新的经济增长点，促进沿海地区经济发展^[1]。(4) 传统能源供应受地理条件分布和国际政治局势等因素影响，存在供应中断和价格波动等不确定性。深远海海上风电属于本土化清洁能源，开发利用不受国际能源市场价格波动影响，规模化开发有助于构建多元化能源供应体系，降低对单一能源品种的依赖程度，提高能源供应的稳定性。对于能源进口依赖度较高的国家，发展深远海海上风电能够降低能源进口风险，增强国家能源安全保障能力。

2 深远海海上风电规模化开发的关键技术

2.1 风机大型化与高效化技术

深远海区域风速更高、风况更复杂，对风机的可靠性和发电效率提出了更高要求，风机大型化成为必然趋势。更大的扫风面积和发电能力可有效降低单位发电成本，提升项目整体经济性。在风机设计方面，需采用先进的空气动力学设计理念，对叶片形状和结构进行系统优化，提高风能转换效率，同时加强风机塔筒、基础等关键部件的结构强度设计，确保其在台风、巨浪等恶劣海况下能够安全稳定运行。在制造工艺方面，需采用高精度加工设备和碳纤维复合材料等先进材料，提升叶片、齿轮箱、发电机等核心部件的制造质量和运行可靠性，支撑单机容量向20兆瓦以上级别发展。在高效发电技术方面，永磁直驱技术可省去齿轮箱等中间传动环节，减少机械损耗，提升整体发电效率。在控制策略方面，通过智能控制算法对风速、风向等环境参数进行实时采集与分析，动态优化风机运行状态，实现最大功率跟踪控制。变桨距控制技术可根据风速变化自动调整叶

片桨距角,使风机在切入风速到额定风速再到切出风速的全运行区间内均保持高效运行^[2]。此外,还需发展柔性直流输电技术解决深远海长距离输电损耗问题,并研究抗台风智能控制策略,使风机在极端工况下能够主动降载或偏航避让,降低结构载荷,保障设备安全,为深远海风电规模化开发提供完整的技术体系支撑。

2.2 海上风电基础结构创新技术

深远海区域水深超过50米,海底地质条件复杂,传统单桩基础和导管架基础在经济性与适用性方面已无法满足工程需求,需研发新型基础结构形式。浮式基础是当前主要技术方向,通过锚链系统与海底锚固连接,适应深水及复杂地质条件。浮式基础设计需综合考量浮体水动力性能、整体稳定性、抗倾覆能力及与塔筒的连接方式,同时配套研发海上安装与运维技术。浮式基础按结构形式分为半潜式、单柱式、张力腿式等类型,各类型在水深适应性、运动响应及安装难度方面存在差异,需根据场址条件选型。浮体与锚链系统的耦合动力分析是设计核心,需考虑波浪、海流、风荷载的联合作用。锚链疲劳寿命是制约可靠性的关键因素,需优化锚链布置与预张力控制策略降低疲劳损伤。基础与塔筒连接处设置转塔或铰接结构,适应浮体运动带来的附加位移与转角。材料方面,深远海环境高盐雾、高湿度、强腐蚀,需研发高强度钢材、耐腐蚀合金,提升承载强度与耐久性能。防腐采用涂层与阴极保护相结合方案,抑制电化学腐蚀与微生物附着,将设计寿命延长至25年以上。需建立全生命周期监测体系,对结构应力、腐蚀状态、锚链张力等参数实时监测,结合数据分析与损伤评估模型,实现结构健康状态动态评估与预警,确保基础结构全服役期安全运行。

2.3 柔性直流输电技术

深远海海上风电规模化开发中,柔性直流输电技术是解决远距离大容量海上输电问题的核心技术。该技术基于电压源换流器实现高压直流输电,具有可控性强、响应速度快、能够向无源网络供电等优势。在深远海海上风电场景中,随着风电场离岸距离增加和并网容量增大,传统交流输电方案面临海缆充电电流过大、无功补偿困难、电压调节复杂等技术瓶颈,柔性直流输电可实现风电场与大陆电网灵活连接,减少输电损耗,提高输电效率,是深远海大容量风电并网的技术路径。柔性直流输电系统具备黑启动能力,可在电网故障后独立恢复海上风电场供电,提升运行可靠性和稳定性。在关键设备方面,电压源换流器、直流断路器、直流变压器等核心装备需满足深远海高盐雾、高湿度、强腐蚀环境下的

性能与可靠性要求,需在设计和制造环节考虑海洋环境特殊工况。在系统集成方面,需攻克柔性直流输电系统与海上风电场集群及大陆电网的协调运行技术,建立控制与保护策略,实现故障快速隔离与系统稳定恢复,保障系统全运行工况下安全稳定运行^[3]。换流站需采用模块化多电平换流器拓扑结构,降低谐波含量并提升换流效率。直流海缆需解决绝缘材料在高压直流电场下的空间电荷积聚问题,保障电缆长期运行可靠性,系统控制需实现风电场侧与电网侧的功率协调分配,在海况恶劣导致风机出力波动时维持直流系统电压与功率稳定。保护系统需配置直流断路器实现毫秒级故障切除,防止故障电流扩散影响系统安全。

2.4 智能化运维技术

智能化运维技术包含监测诊断、决策调度与数据支撑三个层面。在监测与诊断层面,需建立覆盖风机、基础结构和海洋环境的全要素监测系统,利用传感器与物联网技术实时采集风机运行数据、基础结构应力应变数据及海洋环境数据,通过数据分析与处理实现设备健康状况监测与故障诊断。振动分析技术用于检测齿轮箱、发电机等关键部件运行异常,应变监测技术用于掌握基础结构受力状态并发现结构损伤与变形。在智能运维决策与调度层面,需基于监测诊断结果构建运维决策模型,综合故障类型、严重程度及海洋环境条件等因素安排运维任务与资源配置,提升运维效率并降低成本。同时配备无人机与水下机器人等智能装备执行巡检与维护任务,无人机完成风机外观检查与叶片状态检测,水下机器人执行海底电缆维修与更换作业,降低人工海上作业的安全风险。此外需建设数据中台与云计算平台,实现运维数据的统一存储、管理与共享,支撑远程监控与协同运维,并引入数字孪生技术构建风电场虚拟模型,在数字空间中模拟设备运行与故障演变过程,辅助运维人员制定预防性维护策略,推动运维模式从被动维修向主动预防转变,提升深远海风电场的智能化运维水平与长期运行可靠性。

3 深远海海上风电规模化开发的策略

3.1 政策支持与规划引导

在政策法规层面,政府应出台海上风电开发建设管理办法,明确深远海风电项目的用海审批、环境评估、施工管理等核心环节的制度要求,同时制定合理的电价补贴政策和税收优惠政策,降低企业前期投资压力和运营成本,引导社会资本积极参与深远海风电开发。在监管层面,需加强对海上风电开发全过程的监督管理,规范企业开发行为,严格执行海洋环境影响评价制度,保

障海洋生态环境安全。在规划引导层面,科学合理的规划是深远海海上风电规模化开发的前提。政府应组织相关部门和专家制定深远海海上风电发展规划,明确各海域的开发目标、空间布局和建设时序^[4]。同时,需加强与海洋功能区划、港口规划、渔业规划、军事管制区等的统筹协调,避免开发过程中产生用海冲突和资源矛盾。此外,应建立跨部门的协调机制,加强信息共享和协同工作,提高规划的实施效率和政策的执行力度。通过政策支持与规划引导的协同作用,为深远海海上风电规模化开发营造良好的制度环境。

3.2 技术创新与人才培养

在技术创新方面,企业应加大深远海海上风电关键技术研发的资金投入,建立产学研用深度融合的技术创新体系。加强与高校、科研机构的合作,围绕风机大型化、浮式基础、柔性直流输电、智能运维等核心领域开展联合攻关和前沿技术研究。建立技术创新激励机制,对取得重大技术突破的企业和团队给予奖励和资金支持。同时,应积极跟踪和引进国外先进技术与工程经验,加快缩小技术差距,推动我国深远海海上风电技术自主可控发展。在人才培养方面,深远海海上风电产业对专业人才需求迫切,政府和企业应协同构建多层次、多渠道的人才培养体系。高校和职业院校应开设海上风电相关专业和课程,系统培养风电技术研发、工程建设、运维管理等方向的专业人才。企业应加强内部培训体系建设,持续提升员工的业务能力和综合素质。同时,应制定具有竞争力的人才引进政策,积极吸引国内外高端技术人才和管理人才,为深远海海上风电规模化开发提供坚实的人才保障。

3.3 产业协同与资源整合

深远海海上风电开发覆盖风机制造、海上施工、输电设备、运维服务等多个产业领域,需推动各环节企业深度合作,搭建完整稳定的产业链体系。风机制造企业与海上施工企业需联合攻关深远海风机安装技术,攻克复杂海况下大型风电设备的安装难题。输电设备企业联动运维服务企业搭建智能运维平台,强化输电系统运行

稳定性,提升运维工作整体效率。依托产业协同实现资源共享、优势互补,压降深远海风电开发成本,夯实产业整体竞争实力。资源整合层面,政府与企业需统筹深远海风电资源配置,搭建标准化资源交易平台,推动风电资源优化流动与合理配置。支持企业通过兼并、重组实现集约化、规模化开发,提升资源利用率与产业集中度^[5]。同时,推进海洋能源综合开发利用,统筹整合海域空间、海洋风能、波浪能、潮汐能等各类海洋能源资源,结合海上风电项目推进多能互补布局,联动周边渔业、海洋产业融合发展,实现海洋资源多元化、高效化利用,最大化综合经济效益,为深远海海上风电规模化、产业化发展筑牢产业根基。

结语

综上所述,深远海海上风电规模化开发是实现能源转型、应对气候变化和保障国家能源安全的战略选择。本文系统梳理了风机大型化、浮式基础创新、柔性直流输电及智能化运维等关键技术,并从政策引导、技术创新和产业协同三个维度提出了开发策略。未来,随着各项关键技术的持续突破与政策体系的不断完善,深远海海上风电必将迎来大规模开发的新阶段,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供强有力的支撑,助力我国“双碳”目标的顺利实现。

参考文献

- [1]樊天慧,严心宽.海上漂浮式风电关键技术挑战[J].广东造船,2025,44(6):5-9.
- [2]张慧宁.深远海区域海上风电安装船技术适配性研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2026(1):182-185.
- [3]钟建英,李万杰,王之军,等.大规模深远海风电柔性直流输电技术综述[J].高电压技术,2026,52(3):997-1012.
- [4]樊肖杰,迟永宁,马士聪,等.大规模海上风电接入电网关键技术与技术标准的研究及应用[J].电网技术,2022,46(8):2859-2870.
- [5]王富强,郝军刚,李帅,等.漂浮式海上风电关键技术与发展趋势[J].水力发电,2022,48(10):9-12+117.