

海上风力发电技术的优化与挑战

刘 涛

(东营市垦利区海洋科技开发有限公司, 山东 东营 257500)

摘要: 海上风电是我国清洁能源的重要组成部分, 正处于快速发展时期, 但也面临着技术的挑战。本文分析了我国海上风电的发展情况、技术优化方向、面临的挑战以及应对策略, 通过行业内创新合作和政策支持, 我国海上风电产业将持续健康发展, 相关核心技术将不断进步, 从而为实现能源转型和碳中和目标作出重要贡献。

关键词: 海上风电; 技术挑战; 发展趋势; 创新合作; 能源转型

中图分类号: P751

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2024.11.024

我国可再生能源产业中, 海上风电以其丰富的风能资源和友好的环境效益备受关注^[1]。它正处在快速增长的黄金发展期, 在带动能源结构优化的同时, 也面临着技术难题和成本压力的挑战。本文在概述海上风电发展现状基础上, 重点分析了技术路线图与优化方向, 并展望了未来发展前景, 旨在为推进我国海上风电产业持续快速而健康的发展提供参考^[2]。

1 海上风力发电的基本情况

海上风力发电是利用海域风能进行发电的技术, 它与陆上风力发电相比, 具有风速更大、风况更佳的特点^[3]。目前, 我国海上风电装机容量约 5GW, 预计到 2025 年将达到 20GW。海上风电场多布局在近海区域水深 5m-50m 的海域, 单机容量一般在 5MW-10MW。拟建和在建的海上风电项目有三峡江西海上风电、江苏如东海上风电等。海上风电的建设和运行成本要高于陆上风电, 主要体现在海上风机、海底电缆、运维船舶等方面^[4]。但随着相关技术的进步, 成本正在逐步降低。比如三星重工开发的 10MW 级海上风电机组, 其内置式轻质换流器可减轻重量达 30%, 这有助于降低运维难度和成本。数据显示, 我国近海风电场的上网电价已从 2017 年的 0.75 元/kW·h 下降至 2020 年的 0.45 元/kW·h。

2 海上风力发电技术的主要优化方向

2.1 风力发电机组的优化

海上风电机组面临着腐蚀、台风等严苛环境的考验, 结构和材料必须具备足够的抗风抗浪能力^[5]。我国在 10MW-15MW 级海上风电机组设计和制造方面已取得长足进展。值得关注的是华创风电开发的 10MW 全钢腰式结构海上风力机组, 不仅整机重量比铸铁机组减轻 35%, 还采用全封闭薄壁铸件结构, 大大提高了防腐性。这些技术进步有助于我国海上风电机组向更大单机容量、更高可靠性的方向发展^[6]。但是, 我国海上风电机组大多为 3MW-5MW 级, 与发达国家相比总体上仍存在容

量较小、关键技术和可靠性有待提高的短板。为此, 要继续加大关于大功率海上风电机组的技术攻关, 通过材料替代、结构优化、控制策略改进等手段, 使机组的防腐性能、抗台抗风性能和故障自恢复能力达到更高水平。同时, 要加强海上风电机组条件监测和故障预警技术的研发应用, 实现对机组健康状态的实时评估, 为运行维护决策提供依据。

2.2 海上风电场的布局优化

海上风电场的合理布局, 要综合考虑场址风能资源分布、水深条件、地形地貌等多方面因素^[7]。比如中海油海上风电项目通过多次数值模拟分析, 对风电机组和电缆的布置方案进行优化, 最终确定更具经济性的布局, 预计发电量将增加 4.5%。随着计算机仿真技术的发展, 基于多目标优化的海上风电场布局设计方法有望进一步成熟和推广。但目前我国在这方面的经验和技术还比较薄弱。未来要加大布局优化软件和仿真平台建设, 充分利用高性能计算机资源, 建立包含机组-电网-环境多个子系统的数字化仿真测试平台。在此基础上, 可以针对不同海域和不同规模的海上风电场, 开展风场模拟、发电量评估、经济性分析、环境影响评价等工作, 以期实现布局方案的全面优化, 确保海上风电场建设和运行的技术经济指标达到最优^[8]。

2.3 海上风电支撑结构的优化

我国不同海域的波浪、流冰特征差异较大, 这对海上风电基础结构提出了不同要求^[9]。东方电气正在研制适用于深水区的新型浮式支撑结构, 采用模块化桨叶式设计, 既符合南方海域情况, 又可通过调整桨叶数量适应北方更严苛的环境, 实现支撑结构的标准化定制化。这类结构优化设计, 将降低我国海上风电建设的区域差异化水平。但目前我国在浮式支撑结构设计和制造等方面与国外领先企业仍存在较大差距, 关键部件和材料依赖进口。因此, 要加强自主创新, 开发适合我国海域条件的浮式支撑结构技术, 实现重要部件的国产化替代。在结构形式上, 可以探索半潜式、折臂式等新型浮式支撑结构, 以适应更深水域的建设需求; 在性能指标上, 要提高结构的环境适

应性,确保在风浪流冰等极端条件下机组的安全运行^[10]。同时,要建立完善的设计分析和试验测试手段,使浮式支撑结构的抗风抗浪抗冰性能指标不断提升。只有不断强化这类基础性技术,我国海上风电才能在南北各海域实现更大规模发展。

2.4 海上电网和输电技术的优化

海上风电场规模化发展的关键在于输电接入和远距离外送。目前,国内外普遍采用交直流混联的海上风电输电方案。如三峡南京海上风电项目中,远海风电场通过直流电缆将电力汇集到近海变电站,然后通过交流电缆接入陆上电网。为扩大电网规模和承载能力, $\pm 800\text{kV}$ 超高压直流输电系统填补了我国乃至全球的技术空白,为建设千万千瓦级海上风电基地奠定坚实基础。然而,我国在海上高压直流输电网络规划、稳定控制等关键技术上还存在短板。今后要加快攻关特高压直流输电系统集成优化技术,完善直流系统运行控制和保护手段,确保系统安全稳定运行;还要加强海上交直流输电网络的协调控制研究,提高系统抗风抗浪抗冰能力及供电可靠性,只有不断强化海上风电输电体系的技术实力,才能保障未来数万MW级海上风电基地的并网运行。

3 海上风力发电面临的主要挑战

3.1 海洋环境的挑战

我国海上风电设备面临极为复杂的海洋环境,这已然成为产业快速发展的最大瓶颈。台风、风浪、海冰等极端天气频繁发生,设备面临巨大安全运行风险。与欧洲相比,我国海域遭遇超强台风的可能性更大,风电设备需要承受更大的风荷载。近海海水含盐量高,严重的腐蚀问题几乎难以避免。南北方环境差异巨大,北方海域的流冰对设备影响也更大。最关键的是,海上环境导致的故障维修难度大、成本高。这些极为复杂的海洋环境因素,使我国海上风电的安全运行面临严峻考验。目前我国在应对复杂海洋环境的能力上还非常薄弱,不论是关键技术还是配套装备都严重不足,无法有效抵御海洋环境带来的负面影响。这已成为阻碍我国海上风电产业获得更快发展的重要制约因素。今后一定要加大科技研发投入力度,突破相关核心技术,大力提升设备抗台抗风抗冰的综合适应性。

3.2 高昂的建设和维护成本

我国海上风电的建设和维护成本远高于陆上风电,这已经成为严重制约产业发展的瓶颈。海上施工作业条件差,建设周期长。风电设备及配套设施的海上安装,必须依赖于大型浮吊设备和工作船舶。受海况影响,施工可利用率低,工期难以保证。设备运输船舶和施工平台的高昂租金,也推高了前期投入。远海设备维护依赖坞仓及大型运维船只,日常巡检维修需要动用直升机,这些特殊运维保障条件大大增加了后期运行成本。此外,海上环境的复杂性也导致设备故障率较高,维修工作量大,

进一步提高了运维成本。可以说,高投入高风险已经成为困扰我国海上风电发展的“绝对瓶颈”,如果这一核心问题得不到有效解决,我国海上风电产业发展前景堪忧。

3.3 电网连接和系统集成的难题

中国在推动大规模海上风电并网利用的过程中,面临着严峻的电网连接和系统集成挑战。海上风电资源的间歇性和随机性特征对电网的调度控制能力提出了前所未有的挑战。大规模的海上风电并网会显著增加电网系统调峰和调频的难度,同时也对电网频率的稳定性构成威胁。这就要求电网企业必须提高运维水平,以应对这种复杂性的增加。由于海上风电基地通常远离负荷中心,大容量电能的送出对电网短时准入能力提出了严峻考验。这不仅涉及电力传输的技术难题,还包括如何有效地管理和分配这些电能的问题。中国在电网调控和大容量风电消纳技术方面的技术积累尚不足,这增加了应对这些挑战的难度。目前,中国在处理间歇性能源的并网问题、保证电网稳定性和优化电力资源配置方面仍需进一步的技术创新和实践积累。海上风电作为一个复杂的工程系统,其关键子系统间的匹配和集成也存在技术难题。中国在自主设计和集成优化方面的能力还很有限,这限制了海上风电系统的整体性能和效率。

3.4 运营管理和维护的挑战

与陆基风电场相比,海上风电设备和风场的运维保障更具挑战性。海上风电场远离陆地,维护运输船舶和人员投送困难大。海上环境复杂多变,设备故障率高,维修工作量大。我国缺乏系统化的海上风电运维体系和配套设施建设。这些短板问题严重制约着我国海上风电的安全高效运行。远海风电设备和场区的维保难度大,运输时间长,这将大幅增加维修费用和时间成本。复杂海况下作业风险高,对运维人员的资质与经验要求更高。缺乏专门的运维基地、设备和救援体系,无法对运维工作进行有效保障,我国海上风电规模化发展的前景堪忧,亟需从运维体系建设入手尽快加以解决。

4 应对挑战与发展趋势

4.1 先进材料和结构设计的应用

海上风电设备长期暴露于波浪、风浪、海水腐蚀等复杂环境中,对材料性能和结构可靠性提出了极高要求。但是我国在适应海洋环境的先进材料和特殊环境下的结构优化设计方面还比较薄弱,这将严重制约我国海上风电设备的自主化发展。我国没有形成完整的适海材料和关键装备体系。抗腐蚀涂料、耐腐蚀金属、复合材料等高性能材料无法实现自主供应,关键材料仍然高度依赖进口。这不仅增大了风电设备的生产成本,也无法根据我国海域特点进行材料定制化设计。我国没有完全自主可控的风电机组结构设计和计算分析平台。不能针对我国海域的风浪流冰情况开展定制化的结构优化,无法提高机组的环境

适应性。这影响了大功率海上风电机组的研制，也制约了我国海上风电的自主化发展。

4.2 数字化和智能化技术的发展

数字化和智能化技术是实现海上风电减人增效、降本增效的重要手段，但我国在这些前沿技术领域的创新与应用都面临巨大挑战。核心装备自主可控水平有限，难以满足数字化建设的需要。数字化运营依赖各类传感器、通信设备、云计算平台等，但这些前沿技术设备我国依然高度依赖进口。系统集成和数据应用能力不足，数字化需要不同系统间的数据融合，但我国缺乏这方面的积累，很难将新技术应用于工程实践。数字化和智能化技术推广需要成功案例的复制和积累，但我国应用示范案例还很少。简而言之，核心装备依赖进口、系统集成能力不足、应用案例不足等因素制约了我国海上风电数字化和智能化技术的发展。这些短板问题难以在短期内解决，需要持续技术创新和管理创新，才能实现海上风电的减人增效和降本增效。

4.3 制度和政策支持

中国海上风电产业尽管发展迅猛，但仍面临着一系列挑战，这些挑战主要集中在市场化程度不足、投资回报机制不完善以及政策环境的不稳定方面。市场化程度不高的问题体现在电价政策和补贴机制上。海上风电的平价上网电价相对较高，这限制了其市场竞争力。同时，补贴政策的频繁调整增加了市场的不确定性，导致社会资本投入不足。海域使用和管理方面的效率问题成为项目开发的重大障碍。由于用海审批流程冗长、资源分配与管理机制不完善，项目开发进度被大大拖延，增加了前期投资成本。产业政策方面的不足也对行业发展构成影响。政策的系统性和协同性不足，以及相关标准规范的建立滞后，不仅影响了产品和服务的质量，还可能带来安全隐患。这些挑战共同制约了中国海上风电产业的健康和快速发展。为此，需要政府、企业和相关部门共同努力，改进政策环境，优化市场机制，加快资源分配与管理流程，以及加强产业政策的系统性和协同性，以确保海上风电产业能够在一个更加稳定、高效的环境中持续成长。

4.4 行业合作和整合

中国海上风电行业在推进行业合作和整合方面面临着显著的挑战。这个领域包括风机制造、平台建设、电网接入和运维服务等多个关键环节，而这些环节的企业在商业模式、运营理念和技术路线上存在显著差异。例如，风机制造商更重视技术创新，而电网企业则聚焦于基础设施建设，造成合作上的难度。同时，建设商追求项目进度的同时，运维商则专注于运营质量，这种目标差异进一步加剧了合作中的挑战。另一个关键问题是，中国在海工装备制造方面的整体实力相对较弱，很多关键技术

如风机吊装、电缆敷设和海上运维还依赖于进口。这种依赖限制了合作的深化，并阻碍了从风电设备导入国向制造强国的转变。为了实现这一目标，中国需要弥补这些技术短板，加强国内各环节企业间的沟通与协作，共同推动技术创新和产业升级，以促进海上风电行业的持续健康发展。

5 结论

海上风电作为我国可再生能源的重要组成部分，正在快速发展，但也面临海洋环境恶劣、建设和运维成本高等技术挑战。为有效应对这些挑战，行业内企业和科研院所正在强化创新合作，推动风电机组、支撑结构、电网输电等关键技术与装备的自主创新。展望未来，在国家政策支持下，我国海上风电产业将持续健康发展，相关核心技术与装备制造实力也将不断增强。海上风电有望成为经济实用的清洁能源，为我国能源转型和碳中和目标作出重要贡献。

参考文献：

- [1] 张国建,祁立.海上风力发电技术及研究[J].电子乐园,2019,9(13):349.
- [2] 骆文波.低碳经济视域下海上风力发电技术及发展探究[J].电力设备管理,2022,(17):119-121.
- [3] 秦冠博.海上风力发电技术研究[J].工程技术发展,2021,2(03):29-30.
- [4] 高峰,郑海.论述海上风力发电技术[J].华东科技:综合,2019,(09):338.
- [5] 王秀丽,赵勃扬,郑伊俊,等.海上风力发电及送出技术与就地制氢的发展概述[J].浙江电力,2021,40(10):1-12.
- [6] 陈巍博,李维运,徐大伟.海上风电场智能航保关键技术研究与应[J].中国科技成果,2023,24(13):4.
- [7] 徐彬,薛帅,高厚磊,等.海上风电场及其关键技术的发展现状与趋势[J].发电技术,2022,43(02):227-235.
- [8] 林盛,罗天怡.海上风力发电及相关技术[J].水电与新能源,2020,34(01):36-37.
- [9] 李岩,吴迪,洪畅,等.大型海上风电场风机排布优化策略研究[J].太阳能,2020,(02):67-74.
- [10] 郭兆敏.海上风力发电机组安装技术[J].中国科技期刊数据库(工业A),2021,(04):137-138.

作者简介:刘涛(1988-),男,山东东营人,工程师,大学本科,主要从事建设工程(海洋科技)研究。