

高质量推进中国漂浮式海上风电发展国际经验镜鉴

崔丹, 纪颖茹, 郑佳, 孟浩

(中国科学技术信息研究所, 北京 100038)

摘要: 本文全面分析了美国、英国和韩国漂浮式海上风电的发展现状、面临的挑战和发展策略, 针对我国漂浮式海上风电存在的配套政策不完善、技术研发薄弱、配电网智能化程度较低、设备供给能力薄弱等问题, 本文借鉴美英韩在税收抵免、技术研发、供应链建设等方面的经验, 提出推动我国漂浮式海上风电高质量发展的策略建议。

关键词: 漂浮式海上风电; 国际经验; 高质量发展

中图分类号: P74; TK89 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2022.10.006

联合国环境规划署预测 21 世纪末全球平均气温将至少上升 2.7 摄氏度^[1]。面对世界严峻的气候形势, 碳减排和碳中和已成为全人类迫在眉睫的行动目标。当前世界能源生产碳排放量约占碳排放总量的 75%, 加大可再生能源的开发和利用、优化能源结构已成为各国缓解气候变化行动的普遍共识。海上风电凭借其稳定、低碳和可持续的性能优势已成为全球脱碳的中心支柱, 而漂浮式海上风电作为一种可大规模部署的海上风电, 正迅速成为海上风电市场的新增长点^[2]。2020 年 3 月, 英国启动新一轮的国家《漂浮式海上风能卓越中心》计划, 加速漂浮式海上风电场建设; 2020 年 7 月, 韩国政府颁布《韩国新政综合计划》, 加大对海上风电(包含漂浮式海上风电)的研究和投资; 2022 年 1 月, 美国政府发布《海上风电战略》, 大规模规划和部署漂浮式海上风电。

当前我国的海上风电装机容量居全球首位, 海上风电发展已进入了由高速增长向高质量发展迈进的新阶段。在全球掀起漂浮式海上风电开发热潮的大背景下, 实现漂浮式海上风电高质量发展已成为

我国海上风电发展的迫切任务。

1 全球漂浮式海上风电发展现状

近年来, 固定式海上风电项目增长显著, 但是受制于海水深度、海床条件等, 很多国家在固定式海上风电发展上潜力有限, 纷纷开启了深远海域漂浮式海上风电探索和开发之路。自 2009 年挪威 2.3 兆瓦漂浮式海上风电机组 Hywind1 安装并网以来, 截至 2021 年底, 全球漂浮式海上风电项目已有 17 个, 累计装机容量 142.37 兆瓦^[3]。全球风能理事会预测, 2021—2025 年全球漂浮式海上风电新增装机容量复合增长率将高达 104.7%, 2025 年装机容量将达到 1.2 吉瓦; 2026—2030 年的复合增长率为 59.6%, 即每年预计新增漂浮式海上风电装机容量 1 吉瓦, 2030 年全球漂浮式海上风电装机容量将达到 16.5 吉瓦。

就地区分布而言, 2021—2025 年, 欧洲的漂浮式海上风电装机容量将领跑世界(见图 1), 新增装机容量将占全球总装机容量的约 68.2%, 亚洲和北美洲紧随其后, 新增装机容量将分别占全球

第一作者简介: 崔丹(1985—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为人才研究、科技政策与区域经济。

通讯作者简介: 郑佳(1982—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为科技政策与产业发展研究。邮箱: zhengj@istic.ac.cn

项目来源: 2022 年度中国科学技术信息研究所创新研究基金青年项目“双碳目标下区域科技创新监测评估体系构建”(QN2022-21)。

收稿日期: 2022-08-29

总装机容量的 21.4% 和 10.4%。2025 年之后, 亚洲的漂浮式海上风电新增装机容量将翻倍增长, 年均新增装机容量将引领全球。2030 年亚洲的累计装机容量将占全球总容量的 45%, 欧洲将占全球总容量的 47%, 北美洲的占比约为 8%。就国家而言, 2021—2025 年, 英国、葡萄牙、日本、挪威、

法国的漂浮式海上风电装机容量将位列全球前五; 2030 年, 韩国的漂浮式海上风电装机容量将位列世界第一, 日本、挪威、法国、英国、中国和美国将紧随其后。

由于美国具有较高的漂浮式海上风电技术开发潜力, 而英国和韩国的漂浮式海上风电装机容量

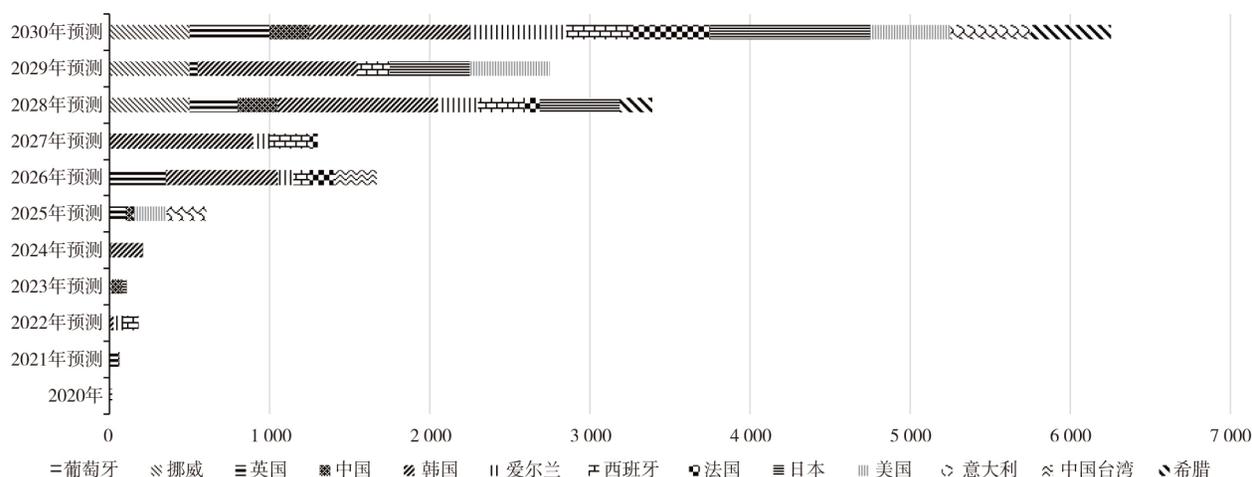


图 1 2020—2030 年全球主要国家每年新增漂浮式海上风电装机容量预测

注: 纵轴表示年份, 横轴表示各个国家每年的漂浮式海上风电装机容量 (MW) 预测。

资料来源: 2021 年 6 月全球风能理事会的市场情报。

也将领跑世界, 因此本文以美国、英国和韩国为案例, 剖析美英韩漂浮式海上风电发展的现状、面临的挑战和应对策略, 以期为中国漂浮式海上风电高质量发展提供参考和借鉴。

2 美英韩漂浮式海上风电发展的现状和经验分析

2.1 美国

2.1.1 发展现状

美国拥有 2.27 万公里的海岸线, 60% 的海上风能资源位于 60 米或更深海域, 漂浮式海上风电可开发资源约 1 000 吉瓦^[4]。当前由于太平洋水域快速下沉, 传统的固定式海上风机已不再适用, 美国发展漂浮式海上风电势在必行。

一是国家战略计划及配套政策支持。2015 年 5 月, 美国政府通过夏威夷计划, 提出 2045 年要实现 100% 可再生能源供应目标^[5], 并于 2020 年 12 月通过可再生能源投资税收抵免计划, 为 2026 年之前部署的可再生能源项目提供 30% 的投资成本

抵免。2022 年 1 月, 美国政府发布《海上风电战略》, 加大对漂浮式海上风电的投资税收抵免并扩大税收抵免范围, 推动漂浮式海上风电大规模开发和部署^[6]。

二是项目实施现状。美国漂浮式海上风电发展仍处于起步阶段。2019 年 11 月, 美国缅因州通过了新英格兰地区的 Aqua Ventus 1 海上风电场与售电企业签订的购电协议 (PPA), 标志着美国首个漂浮式海上风电项目的开发^[7]。该项目由 2 台 6 兆瓦的风机组成, 总装机容量 12 兆瓦, 计划于 2022 年完工。

此外, 美国还计划推出了其他漂浮式海上风电项目。2019 年, 开发商 Magellan Wind 提出在西海岸加州水域进行漂浮式海上风电项目开发。该项目运用丹麦 Stiesdal 海上风电公司开发的 Tetraspar 机组, 总装机容量 30 兆瓦, 计划 2023 年完工^[8]。2021 年 5 月拜登政府宣布开放加州近海水域风能计划, 为该项目的推进和实施奠定基础。

2022 年, 开发商 Trident Winds 计划在华盛顿

州建立 Olympic Wind 漂浮式海上风电场，总装机容量为 2 000 兆瓦。此外，美国计划推出的漂浮式海上风电项目还包括 Oahu North、Oahu South、Castle Wind 等（见表 1）。

2.1.2 面临挑战

美国漂浮式海上风电发展仍处于起步阶段，在项目推进和实施过程中仍面临一些问题和挑战：

一是美国现有电网基础设施的容量有限，电网

表 1 美国计划推出的漂浮式海上风电项目

| 开发商 | 项目名称 | 场址 | 总装机容量 | 计划交付年份 |
|--|---------------------|-------------------------|------------|--------|
| Alpha Wind Hawaii Wind | Oahu North | 夏威夷海域 | 400 兆瓦 | 2026 |
| Alpha Wind Hawaii Wind | Oahu South | 夏威夷海域 | 400 兆瓦 | 2028 |
| Progression Hawaii Offshore Wind | Progression South | 夏威夷海域 | 400 兆瓦 | 2025 |
| Redwood Coast | Redwood Coast | 太平洋联邦水域莫罗湾 | 150 兆瓦 | 2024 |
| Magellan Wind | Magellan Stiesdal | 加州水域 | 30 兆瓦 | 2023 |
| Castle Wind | Castle Wind | 加州中部莫罗湾 | 1 吉瓦 | 2025 |
| 缅因大学和开发商 New England Aqua Ventus (NEAV) 合作开发 | Aqua Ventus 1 的后续项目 | 缅因州离岸约 48 千米约 39 平方千米海域 | 单机容量 15 吉瓦 | 待定 |
| Trident Winds | Olympic Wind | 华盛顿州 | 2 000 兆瓦 | 待定 |
| 美国海洋能源管理局 | — | 俄勒冈州和加利福尼亚海岸的联邦水域 | 3 吉瓦 | 2030 |

资料来源：根据美国政府官网、能源网站等自行整理。

集成和传输挑战会在一定程度上抑制行业增长。目前美国严重缺乏将海上风电输送至人口密集区的电网设施，而且美国电网运营商审批及建设流程较慢，当前美国海上风电并网所需费用 90% 由开发商承担，这严重影响了美国漂浮式海上风电发展。

二是美国海上风电设备供应链不完善，劳动力短缺等因素严重影响美国漂浮式海上风电项目部署。美国为保护本土造船业而推行的《琼斯法案》^①，限制了外国安装船的进入，随着漂浮式海上风电项目的发展，用于组装涡轮机部件的风力涡轮机安装船将面临短缺。截至 2021 年，美国卡车司机缺口高达 8 万人，仓库行业劳动力职位空缺数十万^[9]。

三是海上风电场建设中产生的噪声等会对海洋环境产生一定影响。漂浮式海上风电场的建设将会产生海洋噪声污染，增加水质污染因子超标率，这对浮游生物、底栖生物影响较大。

2.1.3 发展策略

针对美国漂浮式海上风电发展存在的问题和挑战，近年来美国政府有针对性地提出了一些发展策略：

一是通过国家战略引领支持输电网发展。美国《海上风电战略》提出规划高效可靠的电网集成，支持高压交流和高压直流电的海上风电传输研究，推动每个项目单独连接至海岸（也称为辐射线或发电机引线）的研究。

二是通过技术创新推动供应链建设。2018 年美国能源部高级研究计划署向国家可再生能源实验室提供 570 万美元资金，支持其进行 ATLANTIS 计划^[10]，旨在通过优化控制和设计研发来降低漂浮式海上风电涡轮机的重量，实现成本优化。

三是通过吸引投资和减免税收，以及加强劳动力队伍建设来推动供应链发展。美国《海上风电战

① 1920 年的《商船法》称为《琼斯法案》，是一项联邦法规，要求在美国境内两点之间运输商品的船舶必须在美国制造、注册和被拥有，并由美国公民或居民担任船员。

略》提出定制海上风港和船舶, 建立物流网络并吸引进一步投资, 延长所有海上风电部署的税收抵免以降低供应链开发的成本, 加速新工厂的开发或现有工厂的重组以巩固海上风电供应链。美国还通过制定海上风电劳动力路线图以及开展劳动力培训活动, 构建漂浮式海上风电劳动力队伍。

四是开展海上风电对环境和野生动物的影响研究, 为开发大规模漂浮式海上风电项目做准备。2021年10月美国能源部拨款1350万美元, 用于收集关键的植被和野生动植物分布数据, 并监测分析漂浮式海上风电开发对环境的影响, 在尽可能保护渔业、海洋生物以及文化资源的同时, 为漂浮式海上风电项目选址提供参考^[11]。

2.2 英国

2.2.1 发展现状

英国海域面积广阔, 且大风天气频繁, 年平均风速为8米/秒, 平均风功率密度达到750瓦/平方米, 海床结构单一, 适合漂浮式海上风电作业。

一是国家战略计划支持。2020年10月, 英国公布了海上风电新目标: 到2030年拥有40吉瓦海上风电装机容量(包括1吉瓦的漂浮式海上风电)^[12]。2020年11月, 英国政府发布了“绿色工业革命10点计划”^①, 进一步加大漂浮式海上风电场的部署^[13]。2022年4月, 英国政府又发布了《英国能源安全战略》, 提出到2030年实现50吉瓦海上风电装机容量(包括5GW漂浮式海上风电)的

新目标^[14]。

二是项目实施现状。英国目前已有两座漂浮式海上风电场成功并网, 其中2017年在苏格兰北海海域投入运行的Hywind Scotland风电场, 是全球首个漂浮式海上风电场^[15]。2021年在苏格兰北海成功并网的Kincardine风电场, 是世界上第一个使用容量超过9兆瓦风力发电机的漂浮式海上风电项目^[16]。

此外, 英国还拥有多个在建的漂浮式海上风电项目(见表2)。如2016年12月, Forthwind公司获批建造两台总容量不超过18兆瓦的海上风力涡轮机, 但由于技术改进, 对项目重新评估后, Forthwind公司将装机容量提高至29.9兆瓦, 并于2019年5月获得许可变更^[17]。

由Hexicon公司开发的Dounreay Trì项目于2017年获批建造, 拟构造半潜式海上平台并安装两个5兆瓦风力涡轮机, 预计建成后能为近8000个家庭提供电力^[18]。2020年, 丹麦基金管理公司哥本哈根基础设施合作伙伴(CIP)计划收购Dounreay Trì项目并与Hexicon公司合作建设100兆瓦的漂浮式海上风电场^[19]。

2.2.2 面临挑战

英国的漂浮式海上风电起步较早, 在政府的支持下, 英国漂浮式海上风电已推出多个项目, 但在项目推进和实施过程中仍面临一些问题和挑战:

一是风电项目审查过程较为繁琐, 审批时间过

表2 英国推出的漂浮式海上风电项目

| 开发商 | 项目名称 | 场址 | 总装机容量 | 计划交付年份 |
|------------------------------|------------------------------------|-------|--------|--------|
| Equinor | Hywind Scotland | 苏格兰北海 | 30兆瓦 | 2017 |
| Pilot Offshore, Cobra | Kincardine Phase1 | 苏格兰北海 | 2兆瓦 | 2018 |
| Pilot Offshore, Cobra | Kincardine Phase2 | 苏格兰北海 | 48兆瓦 | 2020 |
| Katanes Floating Energy Ltd. | Katanes Floating Energy Park-Array | 苏格兰海域 | 32兆瓦 | 2022 |
| CIP, Hexicon | — | 苏格兰北海 | 100兆瓦 | 待定 |
| CIERCO | Forthwind | 苏格兰海域 | 29.9兆瓦 | 待定 |
| Hexicon | Dounreay Trì | 苏格兰北海 | 12兆瓦 | 暂停 |

资料来源: 根据英国能源网站、项目官网等自行整理。

① “绿色工业革命10点计划”包括: 海上风电, 低碳氢能, 先进核能, 电动汽车, 绿色公共交通, 净零航空与绿色航运, 绿色建筑, 碳捕集、利用与封存技术, 保护自然与环境, 绿色金融与创新。

长,极大地影响了风电项目的开发进度。英国政府对风电项目的审查形式复杂、内容繁琐,包括对风电项目和开发地环境的平衡度考察,以及对自然环境是否有冲击、对文化遗产是否有破坏等方面的审查,且审查时间过长,严重影响了风电项目的开发进度。

二是漂浮式海上风电成本较高。建造同等装机容量风机,漂浮式基础结构所需钢材是固定式的两倍多。此外,为克服潜流、不利的海床条件等,还需要较大的技术成本投入,受零部件成本、技术水平、供应链等因素影响,浮式风机成本要比固定式风机高出5倍左右^[20]。

三是漂浮式海上风电商业化应用仍处于初期阶段,大型风力涡轮机深海区域技术仍在探索阶段。动态应用的高压输出和阵列间电缆技术、可拆卸浮标系泊系统、大规模动态电缆保护和辅助设备、新型模块化浮体装配方法、数字孪生和先进监控系统等一系列创新技术仍处在研究和探索阶段。此外,漂浮式风电基础设备多为国外制造,英国制造技术相对落后。

2.2.3 发展策略

基于当前英国漂浮式海上风电发展中存在的问题和挑战,英国政府出台了一系列政策及应对措施。

一是简化审批流程,缩短审批时间。2022年4月,英国政府发布《英国能源安全战略》,将海上风电场的审批时间从4年缩短至1年,从整体上对审批流程进行精简,从根本上减少新项目投入建设所需的时间,以实现其2030年海上风电目标。

二是改革招标体系,降低项目运行成本。2020年3月,英国政府对差价合约^①机制进行修改,将漂浮式海上风电项目作为独立的合格技术引入竞标体系^[21]。2021年12月,英国商业、能源及产业战略部发布第四轮差价合约分配预算通知,可再生能源的三个技术类别^②共获得2.85亿英镑(约24亿元人民币)的年度预算补贴,其中漂浮式海上风电每年获得2400万英镑补贴^[22]。

三是定向资金投入,推动漂浮式海上风电技术研发。2021年3月,英国政府宣布拨款2000万英镑用于漂浮式海上风电技术创新^[23]。2021年10月,英国首相宣布提供1.6亿英镑资金用于开发和新建漂浮式海上风电港口,并且通过大规模生产和安装漂浮式海上风力涡轮机,减少对进口设备的依赖^[24]。2022年1月,英国商业、能源和工业战略部宣布投入3160万英镑用于动态电缆、锚定和系泊、浮体和基座等漂浮式海上风电技术研发^[25]。

2.3 韩国

2.3.1 发展现状

韩国三面环海,具备开发海上风电所需的地理条件。其中蔚山沿海区域海上风速可达8米/秒,蔚山还拥有大量风力发电、电缆和电力系统领域企业,以及世界级造船和海上设备企业,是韩国发展漂浮式海上风电的重点区域^[26]。

一是国家战略计划支持。2017年6月,韩国政府提出“可再生能源3020实施计划”,旨在到2030年实现可再生能源在总能源消耗中的比例达到20%^[27]。2020年7月,韩国政府颁布了《韩国新政综合计划》,内容包括数字新政、绿色新政、安全网建设三个方面,其中“绿色新政”板块重在加快可再生能源领域的发展^[28]。2020年10月,韩国政府宣布到2050年实现“碳中和”的目标。2021年5月,韩国政府提出到2030年建成世界最大的漂浮式海上风电场目标。

二是项目实施现状。随着韩国“绿色新政”的颁布,韩国大型企业纷纷投入海上风电项目,同时也吸引了TotalEnergies、Shell等国际知名开发商的加盟。

2019年5月,Equinor公司与蔚山市政府签订协议,合作开发蔚山800兆瓦的Firefly漂浮式海上风电场,并计划于2025年开始建造,2026年投入商业运营^[29]。同年9月,Equinor、韩国国家石油公司(KNOC)和韩国东西电力公司(EWP)宣布成立财团,联合开发200兆瓦容量的Donghae 1漂浮式海上风电项目。Donghae 1项目计划于2022年

① 差价合约是英国政府激励开发商投资支持低碳能源发电的主要机制。

② 三个技术类别分别为:成熟技术类别(包括陆上风电、太阳能光伏、水电等),海上风电技术类别和新兴技术类别(包括漂浮式海上风电、潮汐能、地热能等)。

开始建设, 2024年前投入运营^[30]。

2021年8月, TotalEnergies和麦格理的绿色投资集团(GIG)在韩国蔚山海岸的1.5吉瓦的漂浮式海上风电项目获得电力经营许可证, 项目正式投运后预计可为150万户家庭供电。该项目的第一阶

段(504兆瓦)预计于2024年正式开工建设^[31]。此外, 韩国的海上风电项目还包括MunmuBaram项目、KF Wind(Korea Floating Wind)项目等(见表3)。

2.3.2 面临挑战

在韩国政府的大力支持下, 韩国的官产学研正

表3 韩国推出的漂浮式海上风电项目

| 开发商 | 项目名称 | 场址 | 总装机容量 | 计划交付年份 |
|---------------------------|------------|--------|-------|--------|
| Equinor, KNOC, EWP | Donghae 1 | 韩国蔚山海岸 | 200兆瓦 | 2024 |
| Equinor, Technip Energies | Firefly | 韩国蔚山海岸 | 800兆瓦 | 2026 |
| KFWind | KFWind | 韩国蔚山海岸 | 1.2吉瓦 | 2028 |
| GIG, TotalEnergies | — | 韩国蔚山海岸 | 1.5吉瓦 | 待定 |
| Shell, CoensHexicon | MunmuBaram | 韩国东南海 | 1.3吉瓦 | 待定 |

资料来源: 根据韩国能源网站、项目官网等自行整理。

努力合作, 共同推进漂浮式海上风电发展, 但在项目推进和实施过程中面临一些问题和挑战:

一是缺乏大规模海上风电项目的开发经验。韩国的海上风电项目多为小容量兆瓦级, 在开发大容量兆瓦级以及吉瓦级海上风电项目方面缺少经验和技术支持。

二是漂浮式海上风电技术还不成熟。把大型风力涡轮机的浮动平台固定在海底需要缆绳, 这些缆绳既要方便拆卸, 也要承受长时间的风机拉力, 韩国目前还缺乏生产这种缆绳的技术。此外, 韩国还缺乏先进的海上并网、输电技术, 这都会制约韩国海上风力发电项目的进展。

三是漂浮式海上风电项目的开发缺乏透明度和清晰的路线图。韩国政府偏袒本土企业, 不与德国西门子等拥有全球先进技术的企业合作, 导致韩国的海上风电项目进展缓慢、效率低下、成本较高。

2.3.3 发展策略

针对韩国漂浮式海上风电发展存在的问题和挑战, 近年来韩国政府有针对性地提出了一些发展策略:

一是学习和借鉴国外大型海上风电项目的开发经验。如韩国电力公司通过分析和借鉴500兆瓦以上装机容量的国外海上风电项目经验, 降低开发经费, 加速韩国新的海上大型风电场的开发工作。

二是企业、研究院联合研发大规模海上风电,

共同推进风机的建设以及商业化开发。如斗山重工和韩国船舶与海工装备研究所、韩国高等科学技术研究院、韩国南东电力公司等机构组成联盟, 致力于漂浮式海上风机的建设、商业化运行地点的识别等。2022年1月, 该联盟完成了“8兆瓦级漂浮式海上风机”的安装, 该风机总高度达232.5米, 塔架高130米, 叶片长100米, 在6.5米/秒风速下的利用率可达30%以上^[32]。2021年8月, 韩国海洋大学宣布与韩国船级社合作共同推进漂浮式海上风电制氢设备的开发应用, 以解决海上风电并网消纳难、输电成本高等问题^[33]。

三是韩国政府和企业与国外企业签署谅解备忘录来发展漂浮式海上风电。2019年1月, 韩国蔚山市政府与四家国内外企业和联合体签订了谅解备忘录, 以在蔚山海域开发漂浮式海上风电场, 并致力于打造韩国“漂浮式海上风电”产业链^[34]。2022年6月, 斗山重工与西门子歌美飒签署谅解备忘录, 两家公司将在海上风机安装、配件供应、风机维修等方面进行交流分享, 并合作探讨韩国海上风电供应链以及产业化发展等问题^[35]。

2.4 小结

综上所述, 美国、英国和韩国都具有较大的漂浮式海上风电发展潜力, 但也面临电网结构薄弱、供应链不完善、许可审批程序繁琐复杂、技术不成熟、成本较高等挑战。美英韩三国分别通过加快输

电网开发、搭建国内供应链、简化许可审批程序、官产学研联合推进技术研发、改革招标体系并给予预算补贴等措施，加大漂浮式海上风电部署，这对推进我国漂浮式海上风电高质量发展具有重要参考价值。

3 我国漂浮式海上风电发展的现状和问题

随着海上风电发展从浅近海逐渐走向深海，实现漂浮式海上风电高质量和高水平发展已经成为我国海上风电发展的迫切任务。

3.1 发展现状

我国东海西南部、台湾海峡和东沙群岛区域，从近海到远海，都有良好的风资源条件，尤其是东南沿海深远海区域年平均风速达 9~11 米/秒，在风速、风功率密度等方面具有发展漂浮式海上风电的优势。

一是国家战略计划及配套政策支持。2013 年国家“863 计划”实施，旨在推动海上风电机组浮动基础关键技术研发。2016 年《能源技术革命创新行动计划（2016—2030 年）》等文件出台，要求开展漂浮式海上风电机组技术攻关等。同年 6 月，国家发展改革委、工业和信息化部、国家能源局发布《中国制造 2025—能源装备实施方案》，提出要攻克漂浮式海上风电机组和各种基础结构制造。2018—2020 年，国家能源局、发展和改革委员会、财政部相继发布了风电管理、财税补贴等政策，提出降低海上风电电价并逐步取消财政补贴。在这些政策支持下，中国沿海各省份积极规划漂浮式海上风电，并着力推动海上风电项目审批。如海南省海上风电“十四五”规划将万宁漂浮式海上风电项目列为重点实施工程；浙江省成立温州深远海漂浮式海上风电研发中心，着力加强漂浮式海上风电项目研发；广东省将重点开展漂浮式海上风电远距离输电技术、新型风机基础领域研发等；河北等多地将用海审核、审批权限下放；山东东营市推出“全程网办、零见面审批”，进一步简化海上风电项目审批程序。

二是项目实施现状。截至 2021 年 12 月，我国海上风电装机总容量 26.39 吉瓦，位居世界第一，但漂浮式海上风电则处于起步阶段，仅有一台漂浮式风电机组——明阳智能 MySE5.5 兆瓦机组成功实现并网发电。目前明阳智能已成功研发大型漂浮式

风电机组——MySE11-16 兆瓦系列机型，表明我国已经具备大容量漂浮式风电机组的自主研发能力。

3.2 面临挑战

我国的漂浮式海上风电起步较晚，在配套政策制定、技术研发、电网设施建设等方面与国外还有较大差距。

一是海上风电发展规划、配套政策不完善，尤其是海上风电补贴将有序退坡，漂浮式海上风电短期内成本压力过大。我国目前还未出台国家层面的漂浮式海上风电开发配套支持政策，沿海地区各省政府和相关部门关于漂浮式海上风电规划的编制也未完善细化。此外，2021 年为海上风电中央补贴最后一年，2022 年之后新增海上风电项目不再纳入中央财政补贴范围，因此漂浮式海上风电产业链将面临较大的成本压力。

二是装备研发和工程技术力量不足，尤其是漂浮式海上风电使用的直流换流平台、海上施工运输等技术研发还较为薄弱。由于海上风电对可靠性和智能化等性能的要求较高，目前我国大兆瓦风机中的关键部件还主要依靠进口。此外，我国对漂浮式海上风电的直流换流平台、海上施工运输、装备研发等方面的技术研究较少，与国外技术差距较大。

三是特高压输电通道和智能电网建设相对薄弱，难以支撑大容量漂浮式海上风电发展。目前我国的特高压建设已经取得了阶段性成果，“十四五”期间，预计特高压线路将从 2019 年的 28 352 公里增长到 40 825 公里^[36]，但目前的特高压输电通道建设还难以支撑大容量漂浮式海上风电发展。此外，我国配电网智能化程度还相对较低，配电网骨架不稳定，网架结构薄弱，智能化技术不成熟，智能电网建设还处在起步阶段。

四是漂浮式海上风电供应链相对薄弱。英国漂浮式海上风电运营能力世界第一，漂浮式海上风电设备供应能力也在不断增强。但我国漂浮式海上风电供应链相对薄弱，目前仅有明阳智能、三峡能源、中国海装等行业头部企业拥有漂浮式海上风电技术储备。

4 美英韩漂浮式海上风电发展对我国的启示

为了推动我国漂浮式海上风电的高质量发展，

应对挑战,提出以下发展策略:

一是强化海上风电发展顶层设计,建立和完善配套政策措施。借鉴美国《海上风电战略》、可再生能源投资税收抵免计划,以及《英国能源安全战略》和英国“绿色工业革命10点计划”等漂浮式海上风电发展的国家战略和计划,建议对接我国《“十四五”能源领域科技创新规划》及《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》,加强海上风电发展顶层设计,将漂浮式海上风电纳入全国海上风电统一规划之中,建立健全漂浮式海上风电管理体系,统筹东部沿海大容量漂浮式海上风电并网与区域电网的关系,并编制沿海各省市漂浮式海上风电发展路线图。制定漂浮式海上风电发展初期上网电价维持不变、投资税收抵免、财政补贴等政策措施。

二是由领军型企业牵头,构建我国漂浮式海上风电技术创新体系。借鉴英国和韩国官产学研合力推动漂浮式海上风电技术研发经验,结合我国已有的海上风电科研团队与研发部署,对接绿色低碳科技创新行动,通过政府引导与市场主导,由领军型企业牵头、产学研合作共同组建漂浮式海上风电技术创新体系,围绕漂浮式海上风电关键技术、海上工程装备等进行联合攻关。对比和验证立柱式、半潜式、张力腿式和驳船式等漂浮式海上风电技术的经济性和实用性,提升漂浮式海上风电装备研发和工程制造能力,进一步开发集运输和吊装功能于一体的船舶平台,培育专业化人才队伍,推动我国漂浮式海上风电技术革命。

三是提升输电网智能化水平,推动建设新型电力系统。提高特高压输电通道利用率,加快推进电网数字化、智能化建设,构建促进电网灵活调节的智能调控体系。积极支持“微网+储能”“海上风电+共享储能”等电源侧储能项目建设,大力发展电网侧储能建设。探索应用柔性直流等技术实现电网异同步互联,着力解决电网结构性问题,打造源网荷储一体化的新型电力系统,提升海上风电存储和消纳能力,有效支撑大容量漂浮式海上风电发展。

四是以供应链构建和升级为主线,加快打造漂浮式海上风电产业集群。借鉴美国通过构建国内生

产供应链推动海上风电设备本土供应的经验,集聚我国海上风电、海洋装备等优势力量,打造集研发、制造、运输、施工、运维于一体的漂浮式海上风电产业集群,加快研发深远海域漂浮式海上风电机组基础一体化设计、建造与施工技术,构建大规模漂浮式海上风电国内供应链,为实现规模化、集约化和智能化生产开发创造条件。■

参考文献:

- [1] The United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On[R/OL]. (2021-10-26)[2022-07-02]. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>.
- [2] Global Wind Energy Council. Floating Offshore Wind—A Global Opportunity[R/OL]. (2022-03-11)[2022-07-02]. <https://gwec.net/report-outlines-enormous-potential-for-floating-offshore-wind-in-energy-transition/>.
- [3] 赵靛. 全球漂浮式海上风电市场现状概览与发展潜力展望[J]. 风能, 2022(5): 54-58.
- [4] Barter G E, Robertson A, Musial W. A systems engineering vision for floating offshore wind cost optimization[J]. Renewable Energy Focus, 2020, 32: 1-16.
- [5] 谢璿. 夏威夷计划2045年实现100%可再生能源供应[EB/OL]. (2015-05-19)[2022-07-04]. <http://env.people.com.cn/n/2015/0519/c1010-27021610.html>.
- [6] U.S. Department of Energy. Offshore Wind Energy Strategies[R/OL]. (2022-01-22)[2022-07-04]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-01/offshore-wind-energy-strategies-report-january-2022.pdf>.
- [7] 北极星风力发电网. 购电协议(PPA)已通过! 美国首个浮式海上风电项目正式启动[EB/OL]. (2019-11-11)[2022-07-04]. <https://news.bjx.com.cn/html/20191111/1019750.shtml>.
- [8] 舟丹. 美国未来七大海上浮式风电项目[J]. 中外能源, 2020, 25(2): 63.
- [9] 李志伟. 美国供应链受阻问题日益凸显[N]. 人民日报, 2021-11-30(17).
- [10] International Energy Agency. Offshore Wind Outlook 2019[R/OL]. (2019-11-11)[2022-07-04]. <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>.
- [11] Department of Energy. Announces \$13.5 million for sustainable development of offshore wind[EB/OL]. (2021-

- 10-13)[2022-07-04]. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-135-million-sustainable-development-offshore-wind>.
- [12] Government of the United Kingdom. New plans to make UK world leader in green energy[EB/OL]. (2020-10-06)[2022-07-04]. <https://www.gov.uk/government/news/new-plans-to-make-uk-world-leader-in-green-energy>.
- [13] Government of the United Kingdom. The ten point plan for a green industrial revolution[EB/OL]. (2020-11-18)[2022-07-04]. <https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution/title>.
- [14] Government of the United Kingdom. British energy security strategy[EB/OL]. (2022-04-07)[2022-07-05]. <https://www.gov.uk/government/publications/british-energy-security-strategy/british-energy-security-strategy>.
- [15] All Sustainable Solutions. Hywind Scotland: The first floating offshore wind farm in the world[EB/OL]. (2019-12-10)[2022-07-16]. <https://allsustainablesolutions.com/hywind-scotland-the-first-floating-offshore-wind-farm-in-the-world/>.
- [16] MarineLink. World's largest: Kincardine floating wind farm fully operational[EB/OL]. (2019-10-19)[2022-07-15]. <https://www.marinelink.com/news/worlds-largest-kincardine-floating-wind-491400>.
- [17] 4C Offshore. Upgraded Forthwind design put to Scottish Ministers[EB/OL]. (2021-08-30)[2022-07-16]. <https://www.4coffshore.com/news/upgraded-forthwind-design-put-to-scottish-ministers-nid24078.html>.
- [18] Future Power Technology. Dounreay Tri floating wind project[EB/OL]. (2017-01-18)[2022-07-16]. <https://www.power-technology.com/projects/dounreay-tr-floating-wind-project/>.
- [19] John O' Groat Journal. Floating offshore wind farm planned off Dounreay site[EB/OL]. (2020-09-25)[2022-07-16]. <https://www.johnogroat-journal.co.uk/news/floating-offshore-wind-farm-planned-off-dounreay-site-213144/>.
- [20] 北极星风力发电网. 漂浮式海上风电: 未来5年 [EB/OL]. (2022-03-11) [2022-07-07]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220311/1209684-2.shtml>.
- [21] Government of the United Kingdom. Millions more homes to be powered by renewables[EB/OL]. (2020-03-02)[2022-07-06]. <https://www.gov.uk/government/news/millions-more-homes-to-be-powered-by-renewables>.
- [22] Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Accompanying Note to the Budget Notice for the Fourth Contracts for Difference Allocation Round[R/OL]. (2021-11-25)[2022-07-06]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1035956/cfd-allocation-round-4-budget-notice-accompanying-note.pdf.
- [23] Government of the United Kingdom. Over £90 million government funding to power green technologies[EB/OL]. (2021-03-09)[2022-07-06]. <https://www.gov.uk/government/news/over-90-million-government-funding-to-power-green-technologies>.
- [24] Government of the United Kingdom. Scotland and Wales could be home to new floating offshore wind ports thanks to £160m UK government funding[EB/OL]. (2021-10-30)[2022-07-06]. <https://www.gov.uk/government/news/scotland-and-wales-could-be-home-to-new-floating-offshore-wind-ports-thanks-to-160m-uk-government-funding>.
- [25] Government of the United Kingdom. Floating offshore wind demonstration programme: Details of successful projects[EB/OL]. (2022-01-25)[2022-07-06]. <https://www.gov.uk/government/publications/floating-offshore-wind-demonstration-programme-successful-projects/floating-offshore-wind-demonstration-programme-details-of-successful-projects>.
- [26] 정부서비스. 울산 부유식 해상풍력 전략 보고 모두 발언 [EB/OL]. (2021-05-07)[2022-07-07]. <https://www.gov.kr/portal/gvrnPolicy/view/H210500000780697?policyType=G00301&srchTxt=%EC%9A%B8%EC%82%B0>.
- [27] 欧洲海上风电. 亚洲最具潜力新兴市场? 韩国可再生能源 3020 计划 详解! [EB/OL]. (2019-12-30)[2022-07-07]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Oo7oiEN1NhfMyHQmy5gLg>.
- [28] Ministry of Economy and Finance. Government announces overview of Korean new deal[EB/OL]. (2020-07-14)[2022-07-07]. <https://english.moef.go.kr/pc/selectTbPressCenterDtl.do?boardCd=N0001&seq=4940>.
- [29] Future Power Technology. Firefly offshore wind project,

- South Korea[EB/OL]. (2021-11-03)[2022-07-16]. <https://www.power-technology.com/marketdata/firefly-offshore-wind-project-south-korea/>.
- [30] Future Power Technology. Donghae 1 offshore wind farm, South Korea[EB/OL]. (2021-12-13)[2022-07-16]. <https://www.power-technology.com/marketdata/donghae-1-offshore-wind-farm-south-korea/>.
- [31] Green Investment Group. GIG & TotalEnergies obtain EBL for Korea's first floating offshore wind farm [EB/OL]. (2021-08-11)[2022-07-07]. <https://www.greeninvestmentgroup.com/en/news/2021/gig-and-totalenergies-obtain-eb-for-koreas-first-floating-offshore-wind-farm>.
- [32] Doosan. Doosan Heavy unveils Korea's largest offshore wind turbine in Yeonggwang[EB/OL]. (2022-01-27)[2022-07-12]. https://www.doosan.com/en/media-center/press-release_view/?id=20172365&page=0&.
- [33] 国际船舶网. 韩国船企组建联盟推进浮式海上风电制氢装备开发 [EB/OL]. (2021-08-12) [2022-07-14]. http://www.eworldship.com/html/2021/ShipbuildingAbroad_0812/173768.html.
- [34] 风能产业网. 韩国铁心打造“漂浮式”海上风电产业链 [EB/OL]. (2019-01-31) [2022-07-14]. <http://www.cweea.com.cn/xwdt/html/29095.html>.
- [35] 龙船风电网. 西门子歌美飒与韩国斗山能源签署海上风电谅解备忘录 [EB/OL]. (2022-06-28) [2022-07-14]. <https://wind.imarine.cn/news/40342.html>.
- [36] 东方财富网. 2021年中国智能电网特高压输电环节市场现状与发展趋势分析“十交十直”仍待开发 [EB/OL]. (2022-07-18) [2021-08-11]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1707786010507088392&wfr=spider&for=pc>.

International Experience of Promoting the Development of Floating Offshore Wind with High-Quality for China

CUI Dan, JI Ying-ru, ZHENG Jia, MENG Hao

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

Abstract: In the context of the global boom in the development of floating offshore wind, this paper comprehensively analyzes the current situation, challenges and countermeasures of the key markets of floating offshore wind in the United States, Britain and South Korea. Aiming at the problems of imperfect supporting policies, weak technology research and development, low intelligence of distribution network, weak equipment supply capacity of China's floating offshore wind, and drawing on the experience of the United States, Britain and South Korea in tax credit, technology research and development, supply chain construction, etc., this paper puts forward strategic suggestions to promote the high-quality development of China's floating offshore wind.

Keywords: floating offshore wind; international experience; high-quality development