

海上风电产业现状及未来发展趋势分析

吕涛涛

中国电建集团湖北工程有限公司 湖北武汉 430040

摘要：近年来，由传统化石能源消费引起的全球环境污染、温室气体排放及其造成的不利气候变化问题引起了广泛关注，为了实现经济可持续发展及控制温室气体排放，各国开始积极行动使用可再生能源替代传统能源，海上风电作为一种资源丰富且绿色环保的可再生能源，具有广阔发展前景，推动全球海上风电资源有效利用已成为重要共识，海上风电将成为全球绿色能源转型的重要一环。海上风电行业发展已取得一定发展成果且进入加速发展阶段，但仍面临产业高端设备及配套施工技术升级的技术难题以及海上风电投资开发成本较高至无法实现全面市场化的困难。因此文章主要围绕海上风电机组、基础类型与输变电系统等海上风电项目主要系统构成对海上风电产业现状与未来发展趋势进行分析，梳理产业发展机遇以及可能面临的挑战，希望为行业相关人士提供相应参考。

关键词：海上风电；产业现状；未来发展

引言

海上风电的开发、建设与运营与项目风资源及自然条件、风电装备技术、施工技术、运行维护技术、项目所在国法律政策、项目所在国产业政策密切相关，海上风电项目的成功开发与建设须保证政策合法性、技术可行性与经济可行性。本文主要围绕海上风电机组、基础类型与输变电系统等海上风电项目主要系统构成对海上风电产业现状与未来发展趋势进行梳理及分析。

一、海上风电发展前景与必要性

海上风电作为一种资源丰富且绿色环保的可再生能源，具有广阔发展前景，推动全球海上风电资源有效利用已成为重要共识，海上风电将成为全球绿色能源转型的重要一环。根据全球风能理事会（GWEC）发布的《2023年全球海上风电报告》，2022年全球海上风电新增装机8.8GW，累计装机64.3GW；2023-2033年，欧洲和亚太地区作为全球海上风电发展的主要区域，海上风电新增装机总计分别为157GW、186GW。2022年中国海上风电新增装机5.16GW，累计装机30.51GW，中国已连续两年居首全球海上风电累计装机规模。中国拥有1.8万公里漫长海岸线，海上风电开发潜力大，根据世界银

行能源报告，中国海上风电潜在开发总容量达2982GW，其中近海固定式风电为1400GW，远海漂浮式风电为1582GW。2022年1月，国家发展改革委、国家能源局印发的《“十四五”现代能源体系规划》中提出：要积极推进东南部沿海地区海上风电集群化开发，重点建设广东、福建、浙江、江苏、山东等海上风电基地，各省也提出了相应的发展目标。

二、海上风电产业现状及未来发展趋势

1. 全球海上风电机组呈现大型化趋势

包括维斯塔斯、西门子歌美飒、通用电气、金风科技、明阳智能、远景能源、中国海装、电气风电、东方电气、运达股份等在内的全球海上风电机组主要制造商均在大型海上风电机组研发与生产方面提前布局，且以可靠性更高的直驱或半直驱技术为主。提高海上风电机组单机容量可减小海域使用区域、提升发电效率、降低单位建造成本，从而有效降低风电场平均度电成本以提升项目

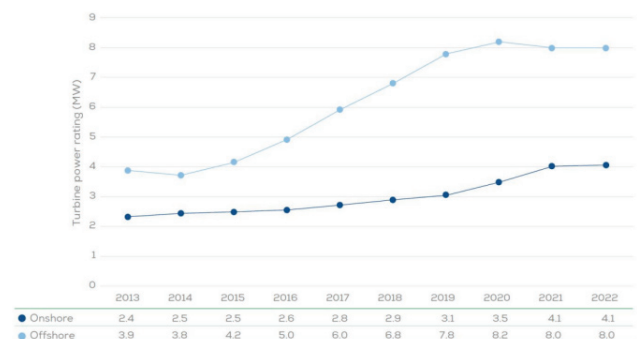


图1 欧洲海上风电机组平均单机容量变化趋势

作者简介：吕涛涛（1988.12——），男，湖北潜江人，硕士研究生，工程师，主要从事国际电力工程市场开发工作以及国际风电、光伏和生物质行业发展研究工作。

经济性，因此全球海上风电机组呈现明显大型化趋势。

根据欧洲风能组织发布的统计报告，欧洲已并网海上风电项目的平均风机单机容量由2013年的3.9MW逐步提升至2020年的8.2MW，2021年及2022年维持在8.0MW水平。根据欧洲风能组织统计的数据，2020年共计11个海上风电项目实现并网，风机单机容量介于6.2MW-9.5MW，其中荷兰Borssele 1&2 752MW海上风电项目采用西门子歌美飒8.0MW风机，Borssele 3&4 722MW海上风电项目与Borssele 5 19MW海上风电项目则采用维斯塔斯9.5MW风机。目前国际主流海上风电机组制造商仍在进行更大机组的升级研发、测试及量产工作，预计海上风电机组单机容量会冲击至20MW。西门子歌美飒于2020年发布SG14.0-222DD海上风电机型，单机容量14.0MW，通过其PowerBoost功率提升技术最大容量可高至15.0MW，2024年开始量产，苏格兰Moray Firth 882MW海上风电项目将安装60台SG14.0-222DD风机。通用电气2021年签署英国Dogger Bank C项目87台Haliade-X 14MW风机供货合同，同时正在研究Haliade-X 18MW海上风电机型。维斯塔斯2021年发布海上风电机组V236-15.0MW样机，2022年12月完成样机安装并开始运行测试，计划2024年开始量产。



图2 中国海上风电机组平均单机容量变化趋势

根据《风能》杂志统计数据，中国已并网海上风电项目的平均风机单机容量从2012年的2.8MW提高至2022年的7.4MW；根据单机容量不同，在2022年新安装的海上风电机组中，8.0-9.0MW（不含9.0MW）风电机组容量占比达到最大的43.9%。与全球趋势一致，中国主流海上风电机组制造商在大型机的升级研发、测试及量产处于加速阶段。2023年，金风科技研发及生产的GW252-16海上风电机型在福建平潭外海海上风电项目成功并网发电，该机型容量达到16MW，关键核心部件已实现全面国产化。明阳智能延续其海风机组技术积累于2023

年成功生产并下线其自主研发的单机容量为18MW的MySE18.X-20MW海上风电机型。中国海装于2023年在山东省东营经济开发区海上风电产业园成功研制单机容量为18MW的H260-18MW海上风电机型。

2. 海上风电风机基础呈现适用性多样化趋势

海上风电风机机组根据项目特点及应用广泛性，主要分为以下几种类型：单桩基础、多桩承台基础、导管架基础及漂浮式基础。吸力桶基础一般与单桩基础及导管架基础技术相结合。重力式基础与多脚架式基础在欧洲0-30m水深海上风电项目有一定应用，在中国海上风电项目应用不广泛。

因结构简单、施工技术装备成熟且效率高、成本相对较低等优点，单桩基础是目前最常用的海上风电基础型式，超过海上风电基础市场50%份额，主要适用于水深0-30m近海海域，分为有过渡段单桩基础与无过渡段单桩基础。电建华东院2012年成功设计了我国第一座大直径无过渡单桩基础，达到世界先进水平，在国内外得到迅速推广应用。为应对特定项目海况与地质条件，大直径嵌岩单桩基础、大直径单桩-桶复合基础等新型式也在相应项目中试用或应用。为适用大型或超大型海上风机，单桩基础呈现超大直径趋势，目前英国Moray West项目14.7MW风机配套单桩直径已到达10m、重约2000吨，大金重工已签订供货合同。

多桩承台基础技术成熟，一般应用在深度为0-30m水深的软土海床地基风电项目，上海东海大桥100MW海上风电示范项目是中国首个使用多桩承台基础的海上风电项目。由中国电建承建的越南金瓯350MW潮间带海上风电项目、越南薄寮-3 141MW潮间带海上风电项目也采用多桩承台基础。

导管架基础一般适用于水深30-60m或地质条件较复杂的海域，随着海上风电开发逐步由近海向深远海发展，导管架基础应用将逐渐广泛。应用项目有英国East Anglia One 483MW海上风电项目、三峡阳江青洲六海上风电项目。吸力桶式导管架是桩基导管架型式的延伸，目前英国Seagreen海上风电项目采用了海油工程中海福陆重工34套吸力桶式导管架，项目水深53-58m。

漂浮式基础一般适用于水深大于60m的深海海域，研发及制造可靠且成本可控的漂浮式基础并保证其运营稳定性是开发更具资源潜力的深远海风电项目的必要条件，根据不同项目情况，考虑水深、洋流、潮汐、风资源及风机机型等因素，目前已应用漂浮式海上风电机组

基础主要分为四种类型：张力腿式、立柱式、驳船式、半潜式。其中，以半潜式及立柱式漂浮式基础技术较为成熟，但仍处于不断完善发展阶段。2021年并网发电的英国Kincardine海上风电示范性项目采用半潜式漂浮式风机平台，风机容量9.6MW。中国在漂浮式基础处于探索阶段且以半潜式技术路线为主，2021年中国三峡牵头研发的“三峡引领号”漂浮式平台在广东阳江海上风电场顺利安装并发电，安装1台5.5MW风机；2022年中国海装“扶摇号”漂浮式平台成功安装于广东湛江罗斗沙海域，平均水深65m，是中国首台深远海浮式风电装备，安装1台6.2MW风机；2023年中国海油“海油观澜号”漂浮式平台成功安装于距海南文昌136km的海上油田海域并发电，安装1台7.25MW风机，是中国第一个工作海域距离海岸线100km以上、水深超过100m的漂浮式风电平台，其建成投用使国家海上风电的自主开发能力从水深不到50m提升至100m以上；以上试验漂浮式海上风电机组平台为中国海上风电开发从浅海走向深远海、促进我国海上风电高端装备制造及其配套产业链升级、降低深远海漂浮式海上风电项目平均度电成本奠定坚实基础。但目前来看，中国深远海浮式风电的发展仍面临一些挑战，例如漂浮式风电平台系泊缆、电缆等高端产品的国内产业链还不完整，运维数据和经验积累相对不足；另外，漂浮式海上风电项目平均度电成本相较传统固定基础海上风电更高，仍需通过创新性技术进步及产业装备升级减低成本实现规模化及商业化。

3. 近海风电输变电系统技术成熟并向远海风电柔性高压直流输电技术探索

目前近海（含潮间带）风电项目交流输变电系统技术成熟，具体设计根据项目而定。随着风电项目逐步由近海向远海发展，传输距离超过90km，柔性高压直流输电系统因具备无源系统运行能力、在成本上的优势，成为大规模远海风电项目输电系统的新趋势，远海风电项目柔性高压直流输电系统组成一般为：海底电缆集电线路-海上换流站-高压直流海底电缆-陆上换流站-交流输电线路-电网对侧变电站。柔性高压直流输电技术已

在德国若干远海风电项目成功应用。2021年采用高压直流输电系统的江苏如东1.1GW海上风电项目成功并网发电，项目设计一座海上换流站、1回±400kV直流出线及一座陆上换流站，直流输电长度108km，此项目成功实施为中国大规模远海风电项目开发及完成稳定安全电力输出奠定坚实的技术基础。

结束语

积极开发资源丰富的海上风电是中国实现碳达峰碳中和目标的重要手段，也是实现全球绿色能源转型的重要措施之一。结合现阶段海上风电项目的发展现状、趋势以及困难，通过国家积极政策引导，加强大型且高效的海上风电机组自主研发与制造能力，强化安全且可靠的海上风电高端装备自主研发与制造能力，发挥中国在电网系统解决方案领域的技术优势，同步完善并升级海上风电投建营产业链，有效优化海上风电项目建设成本与运营成本以进一步降低海上风电项目平均度电成本，中国必将实现海上风电行业的市场化蓬勃发展。同时在“一带一路”倡议带动下，加强国际海上风电合作，为实现全球绿色可持续发展贡献重要力量。

参考文献

- [1]王峰, 逯鹏, 张清涛, 等.海上风电制氢发展趋势及前景展望[J].华电技术, 2022(005): 044.
- [2]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(010): 048.
- [3]涂亮, 刘斯明, 郑丹.基于海上风电产业发展的风电机组维修市场[J].2022.
- [4]李海波.深远海海上风电制氢场景及技术分析[J].低碳化学与化工, 2023.
- [5]李岩, 冯俊杰, 卢毓欣, 等.大容量远海风电柔性直流送出关键技术及展望[J].高电压技术, 2022, 48(9): 3384-3393.
- [6]陶建根, 陈怡, 黄博远.向深海迈进: 海上风电发展现状与趋势分析[J].能源工程, 2023.