

# 大规模海上风电并网送出策略研究

张占奎<sup>1,2</sup>, 石文辉<sup>1</sup>, 屈姬贤<sup>1</sup>, 白宏<sup>1</sup>

(1. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192;  
2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 海上风电是世界风电未来发展的重要方向, 经济高效地解决大规模海上风电并网问题是海上风电建设面临的核心挑战之一。本文总结了世界海上风电的发展现状、我国海上风电发展环境及行业进展, 归纳了海上风电的全球性发展趋势; 从海上风电场单场典型并网、大规模海上风电集群送出两类典型情景出发, 梳理了相关技术特征及其代表性应用。在凝练我国海上风电并网送出面临问题的基础上, 提出了我国海上风电并网的整体发展策略, 并就两类典型情景的送出方案开展适应性分析和评价。研究建议, 摸清资源储量、确定统一规划理念, 加强自主创新、突破并网关键技术, 完善体制机制、确保高质量发展, 加强国际交流、促进国际产业合作, 以此谋划和建设一流水平、契合国情的海上风电并网送出工程, 更好支撑我国能源转型发展。

**关键词:** 海上风电; 集群; 并网送出; 规划方案; 适应性分析

**中图分类号:** TM72   **文献标识码:** A

---

## Grid Connection and Transmission Scheme of Large-Scale Offshore Wind Power

Zhang Zhankui<sup>1,2</sup>, Shi Wenhui<sup>1</sup>, Qu Jixian<sup>1</sup>, Bai Hong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Offshore wind power is an important direction of global wind power development. Economical and efficient grid connection of large-scale offshore wind power is a core challenge faced by offshore wind power construction in China. This article first summarizes the development status of offshore wind power in China and abroad and the global development trends. Subsequently, it elaborates the technical characteristics and representative applications of two typical scenarios: grid connection of single offshore wind farms and transmission of large-scale offshore wind power clusters. After analyzing the challenges faced by the grid connection and transmission of offshore wind power in China, we propose an overall development strategy and conduct adaptability analysis on the grid connection and transmission schemes under the aforementioned scenarios. To build first-class offshore wind power grid connection and transmission projects that adapt to China's national conditions and to promote energy transformation, we propose that

---

**收稿日期:** 2021-04-15; **修回日期:** 2021-07-02

**通讯作者:** 张占奎, 中国电力科学研究院有限公司高级工程师, 研究方向为新能源发电及并网技术; E-mail: zkzhang@epri.sgcc.com.cn

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“海上风电支撑我国能源转型发展战略研究”(2019-ZD-15)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

China should conduct unified planning after verifying its national resource reserves of offshore wind power; strengthen independent innovation to break through the key technologies; improve the supporting mechanism to ensure high quality development of offshore wind power; and promote international industrial cooperation.

**Keywords:** offshore wind power; cluster; grid connection and transmission; planning scheme; adaptability analysis

## 一、前言

海上风电是世界风电发展的重要方向。从 2010 年到 2020 年, 全球海上风电年均增长速度近 30%。到 2020 年年底, 全球已投运的海上风电累计装机容量达到 35.2 GW, 其中 2020 年新增装机容量为 6.07 GW, 连续保持高增长态势。根据国际可再生能源机构 (IRENA) 预测, 未来海上风电有望保持高速发展态势, 2050 年世界海上风电装机容量可达 1000 GW。

从世界海上风电建设与规划来看, 由于离岸距离大于 100 km、水深超过 50 m 的深远海域具有更为丰富的海域和风能资源, 海上风电未来将呈现规模化、集群化、深远海化的特点。以德国、英国为代表的欧洲海上风电技术强国已率先布局深远海风电。相比陆上风电, 海上风电的并网送出工程更为复杂; 离岸距离越远的项目, 并网送出工程的成本越高, 且不同的并网送出方案也会影响项目的收益。经济高效地解决大规模海上风电并网送出问题成为海上风电建设面临的核心挑战之一。

我国海上风电正在进入快速发展阶段, 2020 年新增装机容量超过 3 GW (占世界新增装机容量的 50%), 海上风电累计装机容量位列世界第二 (见图 1、图 2) [1]。随着碳达峰、碳中和目标的提出, 我国新能源发展面临重要的历史性机遇, 构建以新

能源为主体的新型电力系统成为迫切要求, 海上风电及其并网送出发展前景可期。结合近年来海上风电高速发展态势, 针对新型电力系统发展亟需, 本文开展我国大规模海上风电并网送出策略研究。梳理国内外海上风电发展态势, 总结海上风电并网送出技术与应用进展, 结合国情特征探讨我国海上风电并网送出策略, 以期为行业规划、技术发展、产业合作提供基础参考。

## 二、国内外海上风电发展情况

### (一) 国外海上风电发展现状

欧洲的海上风电起步较早, 是世界最大的海上风电市场, 以英国、德国、丹麦为代表 [2~5]。

2020 年, 英国新增海上风电装机容量为 483 MW, 占欧洲新增的 16.6%, 但增幅降至近 5 年的低点。英国目前有 4 个海上风电场项目开始海上施工, 预计未来 3 年陆续并网, 新增装机容量超过 3 GW [2]。

2020 年, 德国新增海上风电装机容量为 219 MW, 占欧洲新增的 7.5%。EnBW Albatros 风电场距离德国北海海岸 105 km, 成为目前世界离岸距离最远的海上风电场 [2,3]。

丹麦是世界上发展海上风电最早的国家, 但近几年增速有所下滑。2019 年, 丹麦新增海上风电装

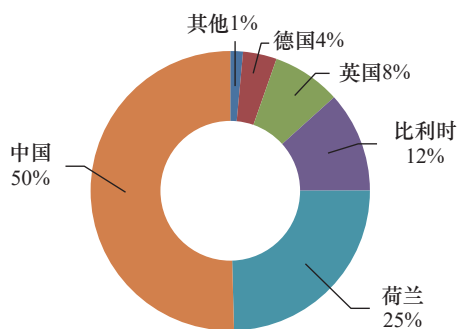


图 1 全球海上风电新增装机份额 (2020 年)

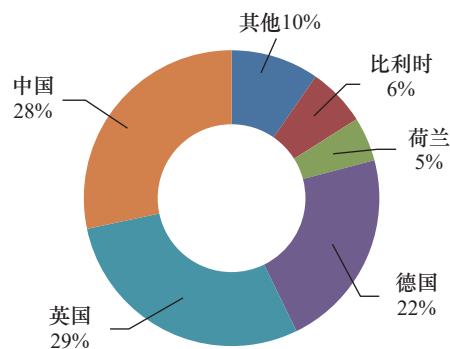


图 2 全球海上风电累计装机份额 (2020 年)

机容量为 374 MW，占欧洲新增的 10%；2020 年没有新增海上风电，数个大型海上风电场均在建设当中。预计在 2027 年之前，丹麦将建成单场装机容量达 800 MW 的海上风电场 [2]。

### （二）我国海上风电发展情况

近年来，我国海上风电保持了快速发展势头。根据国家能源局统计数据，截至 2021 年 4 月底，海上风电并网容量达到 10.42 GW；根据风电行业统计，海上风电年平均利用小时数约为 2500 h，比陆上风电高出约 500 h；2021 年 1—4 月，海上风电发电量为  $9.94 \times 10^9$  kW·h。此外，海上风电累计在建装机容量超过 10 GW，预计 2021 年年底海上风电累计装机容量将超过英国，跃居世界第一位。

具体到代表性项目层面，2021 年 6 月，我国装机规模最大的中国华能集团有限公司江苏如东海上风电项目建成投运，是目前国内规模最大、国产化程度最高的海上风电场，总装机容量为 700 MW。作为国内第一个批量化、规模化应用 5 MW 级国产机组的海上风电场，安装机组实现了一级部件 100% 国产、所有元器件级零件国产化率超过 95%。项目实施投运对于助力碳达峰、碳中和目标实现，追赶国际高端装备技术前沿，实现海上风电全产业链国产化、海上风电平价化具有积极意义。

### （三）世界海上风电发展趋势

海上风电机组单机额定容量逐步提高，已经进入 15 MW 时代。自 2014 年以来，欧洲新增装机的单机平均额定容量每年增长 16%，2020 年达到 8.2 MW。单机额定容量为 8~10 MW 的海上风电机组已具备批产能力，部分厂家推出了单机额定容量约 15 MW 的风电机组方案。

单个海上风电场容量越来越高，已投运最大容量超过 1 GW，规模化开发趋势凸显。欧洲海上风电场的平均容量规模从 2010 年的 313 MW 提高到 2020 年的 788 MW，2019 年并网的英国 Hornsea One 海上风电场装机容量达到 1.218 GW。

风电场离岸距离和水深不断增加，分别超过 100 km、100 m，深远海化趋势明显。英国 Hornsea One，德国 EnBW Hohe See、EnBW Albatros 风电场的离岸距离都超过了 100 km，建设中的德国 Sandbank、DanTysk 海上风电场更是达到 160 km。

漂浮式风电项目 Hywind demo、Hywind Scotland、Windfloat Atlantic 的水深均超过 100 m。

竞价上网成为海上风电发展新模式，海上风电成本稳步下降。近年来，欧洲国家广泛使用招标模式开发海上风电项目，相关补贴水平大幅下降。相比 2012 年，当前的海上风电成本下降了约 25%，预计到 2025 年将进一步降低 8%~10%。

## 三、海上风电并网送出技术及应用进展

### （一）海上风电场单场典型并网技术

研究较多的技术方案有高压交流输电（HVAC）系统、基于晶闸管相控变换器的高压直流输电（LCC-HVDC）系统、基于电压源变换器的高压直流输电（VSC-HVDC）系统、分频输电（FFTS）系统等。LCC-HVDC 系统又称常规直流输电系统，VSC-HVDC 系统又称柔性直流输电系统。

高压交流输电系统技术成熟、经济性好、应用广泛，但高压交流电缆充电无功问题会制约线路输送的容量和距离，且需配置无功补偿设备。常规直流输电系统需要安装滤波装置、无功补偿设备，增大了海上升压平台的施工量和复杂度，至今并无海上风电送出的实际应用。柔性直流输电系统采用全控型器件来避免换相失败问题，可实现有功和无功功率的解耦控制，提高故障穿越能力，目前德国已有多个实际工程应用案例。除了交直流输电方式外，分频/低频输电技术、基于不控整流器件的相关技术等也是探讨方案 [6~17]。

### （二）大规模海上风电集群送出技术

对现有海上风电单场并网输电技术进行综合利用，形成可用于大规模海上风电集群并网送出的集成方案，主要有场间交流并联集群整体交流送出方案、场间交流并联集群整体柔直送出技术方案、多端柔性直流输电技术方案、混合直流输电方案 [18]。

目前，国内外集中送出的风电场群容量通常为 1 GW 级别。从技术经济性角度看，近海风电使用交流输电技术具有明显优势；随着深远海风电开发规模的扩大化，一些工程开始采用直流送出方案 [19]。例如，德国 SylWin1 工程汇集了 3 座容量均为 288 MW 的海上风电场，直流电压等级为

$\pm 320$  kV, 送出线路包括 160 km 长度的海底电缆、45 km 长度的陆上电缆。

随着海上风电的发展和直流技术的进步, 多端柔性直流输电、混合直流输电方案获得越来越多的关注 [20~24]。混合多端直流输电技术应用仍然面临挑战, 如快速直流故障清除与恢复、多端混合直流控制保护策略设计与优化等 [25~28]。

### (三) 海上风电场并网技术应用现状

英国已投运的海上风电场主要采用交流并网方式。如 Hornsea One 海上风电场, 因离岸较远、输电损耗大, 最终采用 3 座海上升压站 +1 座海上无功补偿站的方案; 无功补偿站建在离岸约 60 km 处, 是世界首个海上无功补偿站; 海上风电场发出的电能经场内汇集后, 接入 3 个海上升压站的低压侧, 升压后经 3 回交流海缆送出 (见图 3)。

德国注重对海上风电进行集中开发, 对并网送出工程进行统一规划, 以此充分利用通道资源, 自 2012 年起在北海投运了 9 项高压直流并网工程。2019 年, 容量为 900 MW 的 BorWin3 海上高压换流平台投入运行, 风电场发出的电力升压至 155 kV 后, 经交流电缆接入直流换流站, 转换为  $\pm 320$  kV 的直流, 后经长度为 130 km 的海底海缆、长度为

30 km 的陆上电缆送至陆上电网 (见图 4) [4]。

丹麦投运的海上风电场主要采用交流并网送出方式, 场内集电系统的电压一般为 33 kV, 经海上升压站升压至 155 kV 或 220 kV 后, 送出至陆上电网。

在我国, 已投运的海上风电场均采用交流汇集、交流送出的并网方式, 送出电压等级以 110 kV 和 220 kV 为主。如鲁能集团有限公司江苏东台海上风电场, 场区中心离岸距离约为 36 km, 装机容量为 200 MW, 以 1 回 220 kV 交流海缆送出。多个处于规划建设中的海上风电场, 拟采用柔性直流送出技术方案。

综上, 国内外已投运的海上风电场并网工程都是采用高压交流、柔性直流技术方案 [5]。长远来看, 多种输电技术、多种并网结构共存是未来海上风电并网系统发展的主导趋势。

## 四、我国海上风电基本特征与并网送出面临挑战

### (一) 我国海上风电基本特征

我国位处西北太平洋, 海岸线长、海域面积广, 海上风能资源储备丰富。我国海上风电具有不同于

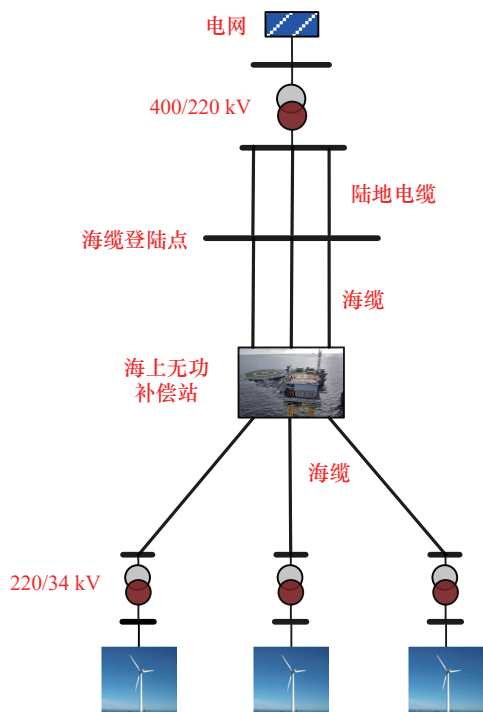


图 3 英国 Hornsea One 海上交流并网送出工程示意图

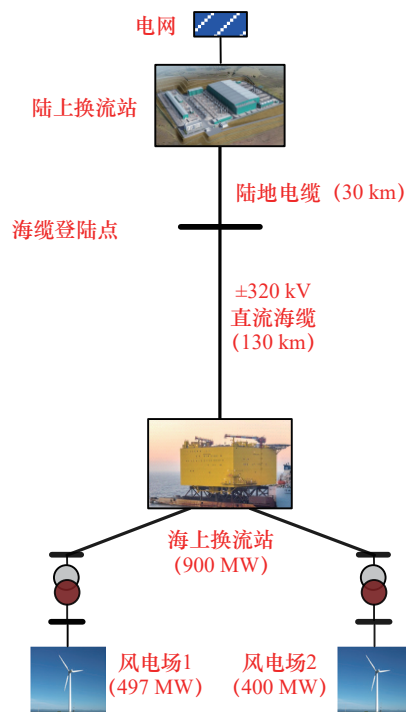


图 4 德国 BorWin3 海上柔直送出工程示意图



欧洲市场的特征。

我国海上风能的平均风速为 6.5~11 m/s，欧洲北海海上风能的平均风速为 9~12 m/s。在平均风速整体明显偏低的情况下，为达到相近的海上风电发电量占比，我国需要更高的装机容量，从而带来更大的电网平衡难度。

我国海岸线长，沿海地区的海床结构差异明显，因海洋 / 地质环境不佳而导致海上风电开发难度较高。例如，黄河、长江出口为冲积海床，含泥量高、承载力较低，而欧洲海上风电所在海域基本以砂质海床为主，承载力高。风电机组以及并网输电系统的基础结构在风、波浪、洋流等多种荷载作用下会承受巨大的水平力和倾覆力，必须伸入到更深层的海床中才能抵抗这些作用力；恶劣且多样化的地质条件加大了技术难度和工程造价，对并网系统经济性有着明显影响。

大规模海上风电接入我国东南沿海负荷中心电网，加之电网特高压直流落点多、分布式光伏大量接入，电网安全稳定问题相对突出。例如，江苏省、广东省、山东省、浙江省的最高用电负荷均超过  $9 \times 10^7$  kW，落地华东地区的特高压直流线路已经超过 10 条，核电机组也有较多分布并基荷运行。多种新能源、核电、外来电力均不参与电网调峰，对调峰资源造成挤兑，交流故障造成大规模新能源连锁脱网、多回直流同时闭锁的风险也在加大，都对海上风电消纳带来挑战。

### （二）我国海上风电并网送出面临挑战

我国海上风能资源主要分布在东南沿海经济发达地区。海洋活动频繁，用海需求多样，海上风电的用海需求与交通、海事、渔业、国防、环境保护等相互交织，可用于海上风电开发及并网送出的通道资源趋于紧张。

现有海上风电项目集中在近海，密集接入当地电网，对电网的接入、送出能力带来挑战。以江苏省为例，风电项目主要分布在长江以北的沿海地区，盐城、南通、连云港 3 市的占比超过全省的 75%；苏北电源集中，苏南负荷集中，接入网架强度、南北过江通道输电能力均直接影响海上风电的并网送出。

考虑资源潜力、消纳能力、近海海域用地紧张

等因素，深远海风电必然是未来海上风电发展的重要方向。相关的基础性、前瞻性研究已陆续展开，但与近海风电场相比，送出通道、并网方式面临更为严苛的要求。以柔性直流为代表的深远海大规模海上风电并网送出技术在我国尚处于试验示范阶段，符合国情的深远海风电开发利用仍有诸多技术难题有待解决。

受西北太平洋季风影响，我国外海台风灾害频发。据统计（1949 年以来），我国共有 600 多次台风登陆，覆盖沿海所有省份，平均每年约 7 个；广东省、福建省、浙江省是我国台风重灾区。台风等恶劣天气，对海上风电并网送出系统的可靠性、安全性构成直接挑战，运营维护难度明显加大。

## 五、我国海上风电并网送出策略

### （一）整体策略

#### 1. 统一规划、集中送出

在海上风电并网送出方面，应及早对风电场建设、并网进行规划引导，从场址资源分配方面进行源头把控；统一调配输电走廊资源，最大限度降低海上风电开发对自然环境的影响；优化海上风电并网送出成本，避免低效和重复投资。

#### 2. 加强网架、电网互联

海上风电规模化发展对降低海上风电成本具有重要作用。为实现大容量海上风电的规模化并网送出，应配套建设更高电压等级的电网、开展更大范围的互联，加强电网结构和强度，支撑大规模海上风电的可靠接入。

#### 3. 交直结合、因地制宜

不同国家海上风电所处的发展阶段、电网结构、经济承受能力不尽相同，对输电方案的需求各异：有些项目风电规模小、离岸近，多采用交流方案；有些项目风电规模大、离岸远，宜采用柔直方案。我国的海上风电建设，应因地制宜地选用相应的并网送出技术方案，确保海上风电安全可靠、经济高效地并网运行。

#### 4. 经济可靠、统筹兼顾

海上风电场采用交流还是直流方式并网，经济性是重要考量因素，但也不是唯一因素。海上风电规模大、造价高，所在区域环境恶劣、可达性差，

运维难度大、周期长，必须高度重视并网送出方案的可靠性。在规划设计、方案比选、运行维护等各个阶段，采取必要的技术措施来保障恶劣环境条件下大规模并网送出系统的可靠性，减少因可能故障导致的潜在重大损失。

## （二）海上风电场单场并网送出情景

从技术成熟度、方案经济性、工程实用性等方面进行比对分析，我国在“十四五”乃至更长时期内，将主要采用高压交流、柔性直流输电技术来实现海上风电并网送出。

在输送功率相等、可靠性相当的可比条件下，直流输电的换流站投资高于交流输电的变电站投资，而直流输电线路投资低于交流输电线路投资；随着输电距离的增加，交/直流输电存在等价距离（见图 5）。一般而言，当输电距离大于等价距离时，采用直流输电较为经济；反之，采用交流输电较为经济。不同容量、不同电压等级输电系统，交/直流输电的等价距离不尽相同，通常认为约在 50~75 km 范围 [29~31]。随着电力电子技术发展、换流装置价格下降，交/直流输电的等价距离还会进一步缩短。

综合考虑技术经济和可靠性，建议我国海上风电场单场送出采取如下方案：①风电场装机容量在 200 MW 以内、离岸距离小于 50 km 时，采用高压交流输电方式；②风电场装机容量为 400~600 MW，处于深远海区域，建议采用基于电压源变换器的高压直流输电方式；③风电场装机容量为 200~400 MW，建议根据离岸距离进行技术

经济对比分析，再选择适用的并网送出方式。

## （三）大规模海上风电集群送出情景

### 1. 高压交流方案

对于总装机容量在 1 GW 左右的风电场群，如离岸距离较近，建议采用高压交流并网送出方案。考虑到 35 kV 场内电缆的送电距离、220 kV 海底电缆的送电容量（截面为 1600 mm<sup>2</sup>，核定载流量为 1320 A，容量约为 500 MW），建议将单个风电场容量控制在 300~400 MW；每个风电场设置 1 座海上升压站，采用多回 220 kV 海底电缆送入电网。鉴于 500 kV 海底电缆的输送容量可达吉瓦级（截面为 1800 mm<sup>2</sup>，核定载流量为 1411 A，容量约 1.2 GW），在 500 kV 海底电缆技术成熟后，也可考虑采用单回 500 kV 海底电缆送入电网；同时关注线路无功补偿和谐振问题。

正在建设中的中国三峡新能源（集团）股份有限公司阳西沙扒海上风电项目即采用该种方案。项目总装机容量为 1.7 GW，共分五期建设，一期项目（300 MW）已并网发电；二期至五期项目规划装机容量 1.4 GW，建设 2 座海上升压站；风电机组发出的电能通过 35 kV 集电海底电缆接入海上升压站，升压至 220 kV 后通过 2 回 3×500 mm<sup>2</sup> 海底电缆、3 回 3×1000 mm<sup>2</sup> 海底电缆接入陆上集控中心，再升压到 500 kV 送出。

### 2. 柔性直流方案

如果风电场群离岸距离较远（大于 100 km），建议采用柔性直流并网送出方案。对于总装机容量在 1 GW 左右的风电场群，考虑经济性，可以在多

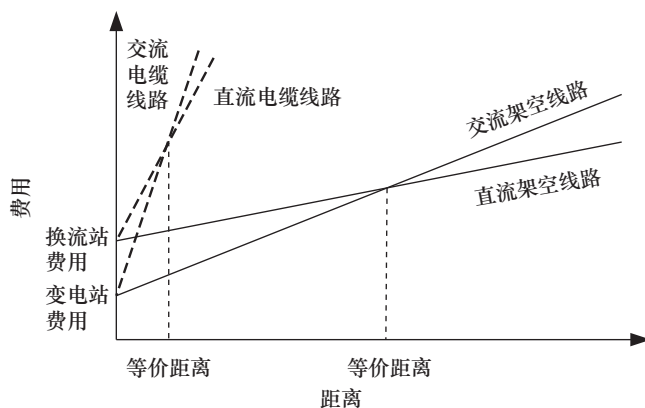


图 5 交/直流输电的等价距离示意图

个升压站汇集后接入1座公共海上换流站，采用1回高压柔性直流海缆接入陆上主网。

正在建设中的中国三峡新能源（集团）股份有限公司、中广核风力发电有限公司江苏如东海上风电项目即采用该种方案。3个风电场配套新建3座220 kV海上升压站，3个风电场的电能汇集于海上换流站后，以1回±400 kV直流电缆送往陆上换流站。项目直流海底电缆的输电距离超过100 km，建成后将是我国电压等级最高、输送距离最长的海上风电柔性直流并网送出工程。

随着海上风电机组单机额定容量提高、风电场海域面积增加，场内汇集距离加大，为了提高输送容量并降低损耗，66 kV场内集电系统已开始示范应用，90 kV及更高电压等级的集电系统也正在技术研发。随着更高等级场内汇集电缆的应用，可采用（舍弃交流海上升压站的）“两站并一站”方案，直接将海上风电机组以66 kV或更高电压等级的交流海底电缆接入海上换流平台，然后并网送出。

### 3. 远期拓展方案

随着柔性直流输电技术在海上风电送出工程中的不断应用，利用海上直流送出系统构建高压直流电网成为可行的技术途径；作为含有“网孔”的直流输电系统，海上直流电网冗余度大、可靠性高，可以实现海上风电基地的大规模接入并明显减小功率波动对电网的影响。海上风电综合能源岛的概念也是极具潜力的技术方向，将海上风电与储能设施、制氢系统或其他电气转换技术进行有机整合，依托输电、输氢、电氢混合传输等方式实现海上风电的电力外送与综合利用。

按照“应用一批、研究一批、储备一批”的技术发展规律，超前谋划并前瞻布局，立足海上风电、直流技术的发展进步，开展多端柔性直流、混合直流等新型海上风电并网送出技术方案的设计、试验、示范应用；积极开展海上风电直流电网、海上风电综合能源岛相关的前沿技术探索与实践。

## 六、对策建议

### （一）摸清资源储量，确定统一规划理念

在未来海上风电大规模开发利用之前，应准确把握海上风电的资源储量、分布特性，资源评估应

先行。我国海岸线长，各地海洋/地质环境差异大、开发条件各异；随着开发技术的快速迭代，需要对现有的资源数据进行更新，确定最新的技术经济可开发量。由近海走向远海、由浅海走向深海，是海上风电未来发展的必然趋势。需要尽早掌握深远海的风能资源储量、分布情况，采用统一规划的理念来指导海上风电规模化开发和利用，从源头做好各类区域的整体规划、项目布局。

### （二）加强自主创新，突破并网关键技术

我国海上风电经过多年的发展，已经从潮间带、近海逐步转向深远海，需要在深远海风电技术领域提前谋划、早作储备。经济高效地解决大规模海上风电并网问题是核心挑战之一，需要加强自主创新，在交/直流并网技术经济分析、并网关键技术研发、运行控制优化、新型技术运用等方面开展深入且系统的研究。构建海上风电并网技术研发体系，形成兼具引领性和创新性的综合应用示范平台，突破部分关键技术装备“卡脖子”问题。

### （三）完善运行机制，支持高质量发展

我国海上风电经过近年来的快速建设，装机容量已位居世界前列；受补贴退出政策的影响而出现的海上风电抢装潮，不利于海上风电的健康可持续发展。建议开展海上风电集中送出模式研究，探索推动吉瓦级示范项目建设，统一项目资源、电网规划，形成集中连片远距离送出的新态势。建议加快海上风电并网及各环节标准、规范研制，推动国家级海上风电检测认证基地建设；加强大功率海上风电机组、关键部件、基础支撑结构等关键装备的检测和认证，提升设备可靠性和海上风电利用率，保障海上风电高质量发展。

### （四）注重对外交流，促进产业国际合作

欧洲海上风电起步早，以电价政策为中心的全方位、体系化、长期性扶持政策发挥了关键作用；竞价上网已经成为海上风电发展的新模式，加快海上风电技术提升、成本降低成为社会共识。面对我国海上风电补贴政策即将退出的实际状况，建议加强对外的行业性交流，探讨并借鉴欧洲海上风电项目的竞争性配置办法，明晰我国中长期的竞争性发



展思路、技术发展路线。英国、德国、丹麦等欧洲国家在海上风电开发并网方面拥有丰富且有成效的经验,如高效的前期工作、管理机构“一站式”服务、新技术研发与应用支持等,也是值得我国行业发展参考的重要内容。借鉴成熟市场发展经验,探索产业高质量、可持续发展道路,促进海上风电产业平稳健康发展。

#### 参考文献

- [1] Lee J, Zhao F, Pek A, et al. Global wind report 2021 [R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2021.
- [2] Ramirez L, Fraile D, Brindley G, et al. Offshore wind in Europe—Key trends and statistics 2010 [R]. Brussels: WindEurope asbl, 2021.
- [3] International Energy Agency. Global offshore wind report 2019 [R]. Paris: International Energy Agency, 2019.
- [4] Deutsche WindGuard GmbH. Status of offshore wind energy development in Germany—First half of 2019 [R]. Varel: Deutsche WindGuard GmbH, 2020.
- [5] 李翔宇, Abeynayake G, 姚良忠, 等. 欧洲海上风电发展现状及前景 [J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 116–126.  
Li X Y, Abeynayake G, Yao L Z, et al. Recent development and prospect of offshore wind power in Europe [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 116–126.
- [6] 徐进, 金逸, 胡从川, 等. 海上风电集群电能组合输送方式研究 [J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 107–113.  
Xu J, Jin Y, Hu C C, et al. Research on combined power transmission scheme for offshore wind farm cluster [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 107–113.
- [7] Liu H C, Sun J. Voltage Stability and Control of Offshore Wind Farms With AC Collection and HVDC Transmission [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1181–1189.
- [8] 黄明煌, 王秀丽, 刘沈全, 等. 分频输电应用于深远海风电并网的技术经济性分析 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 167–174.  
Huang M H, Wang X L, Liu S Q, et al. Technical and economic analysis on fractional frequency transmission system for integration of long-distance offshore wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 167–174.
- [9] 张昭丞, 郭佳田, 诸浩君, 等. 基于全生命周期成本的海上风电并网方案优选分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 51–57.  
Zhang Z C, Guo J T, Zhu H J, et al. Optimization scheme of offshore wind power grid connection based on LCC model [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 51–57.
- [10] 沙志成, 张丹, 赵龙. 大规模海上风电并网方式的研究 [J]. 电力与能源, 2017, 38(2): 158–161.  
Sha Z C, Zhang D, Zhao L. Grid integration modes of large-scale offshore wind farm [J]. Power & Energy, 2017, 38(2): 158–161.
- [11] 王秀丽, 张小亮, 宁联辉, 等. 分频输电在海上风电并网应用中的前景和挑战 [J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 15–19.  
Wang X L, Zhang X L, Ning L H, et al. Application prospects and challenges of fractional frequency transmission system in offshore wind power integration [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 15–19.
- [12] 徐进, 韦古强, 金逸, 等. 江苏如东海上风电场并网方式及经济性分析 [J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 74–81.  
Xu J, Wei G Q, Jin Y, et al. Economic analysis on integration topology of Rudong offshore wind farm in Jiangsu Province [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 74–81.
- [13] 蔡旭, 施刚, 迟永宁, 等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2036–2048.  
Cai X, Shi G, Chi Y N, et al. Present status and future development of offshore all-DC wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2036–2048.
- [14] 袁兆祥, 仇卫东, 齐立忠. 大型海上风电场并网接入方案研究 [J]. 电力建设, 2015, 36(4): 123–128.  
Yuan Z X, Qiu W D, Qi L Z. Grid connected solution for large offshore wind farm [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(4): 123–128.
- [15] 高垚. 海上风电输电与并网关键技术研究 [J]. 河南科技, 2018 (19): 139–140.  
Gao Y. Research on key technologies of offshore wind power transmission and grid connection [J]. Henan Science and Technology, 2018 (19): 139–140.
- [16] 李飞飞, 王亮, 齐立忠, 等. 海上风电典型送出方案技术经济比较研究 [J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 140–144.  
Li F F, Wang L, Qi L Z, et al. Technical and economical comparisons of typical transmission schemes of the offshore wind farm [J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 140–144.
- [17] Flourentzou N, Vassilios Agelidis V G, Demetriades G D. VSC-based HVDC power transmission systems: An overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592–602.
- [18] 刘吉臻, 马利飞, 王庆华, 等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 149–159.  
Liu J Z, Ma L F, Wang Q H, et al. Offshore wind power supports China's energy transition [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 149–159.
- [19] 王秀丽, 赵勃扬, 黄明煌, 等. 大规模深远海风电送出方式比较及集成设计关键技术研究 [J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 138–145.  
Wang X L, Zhao B Y, Huang M H, et al. Research of integration methods comparison and key design technologies for large scale long distance offshore wind power [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 138–145.
- [20] 文劲宇, 陈霞, 姚美齐, 等. 适用于海上风场并网的混合多端直流输电技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 55–61.  
Wen J Y, Chen X, Yao M Q, et al. Offshore wind power integration using hybrid multi-terminal HVDC technology [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 55–61.
- [21] 廖勇, 王国栋. 双馈风电场的柔性高压直流输电系统控制 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 7–15.  
Liao Y, Wang G D. VSC-HVDC system control for grid-connection of DFIG wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 7–15.
- [22] Elliott D, Bell K R W, Finney S J, et al. A comparison of AC and HVDC options for the connection of offshore wind generation in



- Great Britain [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 798–809.
- [23] 陈霞. 基于多端直流输电的风电并网技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学(博士学位论文), 2012.  
Chen X. Wind power integration using multi-terminal HVDC technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology(Doctoral dissertation), 2012.
- [24] 张开华, 张智伟, 王婧倩, 等. 海上风电场输电系统选择 [J]. 太阳能, 2019 (2): 56–61.  
Zhang K H, Zhang Z W, Wang J Q, et al. Study on selection of offshore wind farm transmission system [J]. Solar Energy, 2019 (2): 56–61.
- [25] 冯明, 李兴源, 李宽. 混合直流输电系统综述 [J]. 现代电力, 2015, 32(2):1–8.  
Feng M, Li X Y, Li K. A review on hybrid HVDC system [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 1–8.
- [26] 刘亚磊, 李兴源, 曾琦, 等. 多端多电平柔性直流系统在海上风电场中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 9–14.  
Liu Y L, Li X Y, Zeng Q, et al. VSC-MTDC system based on MMC for offshore wind farms [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 9–14.
- [27] 杨志超. 混合三端直流输电系统的控制策略研究 [D]. 南京: 东南大学(硕士学位论文), 2018.  
Yang Z C. Research on control strategy of hybrid three-terminal HVDC system [D]. Nanjing: Southeast University(Master's thesis), 2018.
- [28] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156–167.  
Wang Y P, Zhao W Q, Yang J M, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156–167.
- [29] 杜海超. 海上风电场输电方式的经济性分析 [J]. 黑龙江电力, 2014, 36(6): 515–517.  
Du H C. Economic analysis of transmission mode of offshore wind farm [J]. Heilongjiang Electric Power, 2014, 36(6): 515–517.
- [30] 胡荣, 刘彬, 黄玲玲. 海上风电场输电方式经济性的比较 [J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(6): 549–553.  
Hu R, Liu B, Huang L L. Economic comparison of transmission system of offshore wind farm [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(6): 549–553.
- [31] 程斌杰, 徐政, 宣耀伟, 等. 海底交直流电缆输电系统经济性比较 [J]. 电力建设, 2014, 35(12): 131–136.  
Cheng B J, Xu Z, Xuan Y W, et al. Economic comparison of AC/DC power transmission system for submarine cables [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 131–136.