

海上风电场及其关键技术发展现状与趋势

徐彬¹, 薛帅^{2*}, 高厚磊¹, 彭放¹

- (1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东省 济南市 250061;
2. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北省 唐山市 063000)

Development Status and Prospects of Offshore Wind Farms and It's Key Technology

XU Bin¹, XUE Shuai^{2*}, GAO Houlei¹, PENG Fang¹

- (1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education(Shandong University), Jinan 250061, Shandong Province, China; 2. Tangshan Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Tangshan 063000, Hebei Province, China)

摘要:近年来,海上风电产业发展十分迅速,海上风电场数量不断增加、规模不断扩大。首先对正在运行的风电场主要组成部分的特点和风电场的规模进行了综述,然后,对风电机数量、装机容量、离岸距离和水深等海上风电场布局参数进行相关性分析。此外,还综合考虑了在建海上风电项目的相关数据,讨论了与海上风电场项目相关的海上风能技术的发展。数据显示,海上风力发电场规模和风力发电机额定容量在持续增长,同时海上风电场将向离岸更远、水深更深处发展。最后,对未来海上风电场的布局和容量等进行了展望。

关键词:海上风电场;基础结构;全球海上风电项目;可再生能源;风电场布局

ABSTRACT: In recent years, the development of offshore wind power industry is very rapid, the number of offshore wind farms is increasing and the scale is expanding. This paper first reviewed the operating wind farms, the characteristics of the main components and the scale of the wind farms. Then, the correlation analysis of the layout parameters of offshore wind farms, such as the number of wind turbines, installed capacity, offshore distance and water depth, was carried out. In addition, this paper also comprehensively considered the relevant data of offshore wind power projects under construction, and discussed the development of offshore wind energy technologies related to the wind farm projects under construction. The data shows that the scale of wind farms and the rated capacity of wind turbines continue to grow, while offshore wind farms will

develop farther offshore and deeper. Finally, this article looked forward to the future layout and capacity of offshore wind farms.

KEY WORDS: offshore wind farms; infrastructure; gloable offshore wind power projects; renewable energy; wind farm layout

0 引言

工业化以来,全球能源发展面临的挑战愈发严峻,全球气候变化、环境污染和化石能源枯竭日益成为各国各政府亟需解决的现实问题。根据美国能源情报署2019年的报告,2018—2050年全球能源需求将持续增长近50%。其中可再生能源将以每年3%的速度增长,成为世界上增长最快的能源形式,并于2050年成为世界一次能源的主要来源^[1]。国家发改委的《可再生能源发展“十三五”规划》^[2]中也指出“可再生能源已成为全球能源转型及实现应对气候变化目标的重大战略举措”。可见,面对越来越严峻的能源形势,调整能源结构、转向可再生能源资源的开发已经逐渐成为各个国家的共识。

在可再生能源技术中,风力发电是最成熟、最具大规模开发条件和商业化发展前景的发电方式之一^[3-5]。与陆上风电相比,由于海洋环境的特殊性,海上风电的开发仍然存在一些问题^[6-7],如施工难度大、运营维护困难以及成本更高等。但海上风电的优点也同样明显:海上风速通常较陆

基金项目:国家自然科学基金项目(51877127)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51877127).

上风速更高，因而同等条件下海上风力发电机的发电量要高于陆上；海上很少有静风期，因而海上风电具有更高的利用小时数；与陆地复杂的地形相比，海上的环境简单，更均匀的风速对设备损坏更小；海上风电不需要占用土地资源，更适宜大规模开发；与陆上风电相比，海上风电一般更靠近负荷中心，可以减少输电损失，电力的消纳也有保障。凭借这些优点，海上风力发电将成为未来风电技术研究的重心和前沿，并成为未来风电产业发展的主要方向。

近10年来，海上风电产业的发展十分迅速，海上风电场的数量不断增加、规模不断扩大。据全球风能理事会的研究统计，到2025年，全球海上风电每年新增装机容量将突破20 GW，到2030年将突破30 GW，未来10年新增海上风电装机容量将超过205 GW^[8]。与此同时，我国海上风电的建设工作也将得到长足发展，到2020年年底，海上风电的装机容量已达到30 GW^[9]。我国首部海上风力发电场国家标准《海上风力发电场设计标准》^[10]于2019年10月1日起开始实施，这一国家标准的发布，将更好地指导我国海上风电场设计工作，对于我国海上风电事业的发展将起到重要促进作用。可以预见，海上风电将会成为未来能源系统的重要组成部分，其发展也会在世界范围内得到大力推动。

本文旨在通过对全球海上风电场的数据库资料进行收集汇总和整理，从海上风电场的布局、风力发电机组、海上风电场的并网方式和保护控制方式等方面对当前海上风电行业发展的总体形势进行分析，并预测未来海上风电的发展趋势。

1 海上风电发展现状

1.1 海上风电场规模

自从世界上第一座海上风电场 Vindeby 于1991年在丹麦实现并网运行后，全球海上风电一直以较快的速度发展，预计在接下来几年还会继续高速增长。据统计，目前世界上共有199个海上风电场项目已经投入运行，此外还有71个项目处于在建阶段或前期准备阶段^[11-12]。

截止到2020年年底，全世界已投运海上风电

场装机容量达到了32.66 GW，其中欧洲装机容量最大(25.15 GW)，其次是亚洲(7.48 GW)和美洲(0.04 GW)。在欧洲，英国和德国在发展海上风电场方面占据主导地位，两国的总装机容量占欧洲的72.06%。在亚洲，中国处于显著的领先地位，海上风电总装机容量占亚洲的94.36%。美洲大陆只有美国一个国家建设有海上风电场，总装机容量为0.04 GW。全球海上风电场装机容量及分布情况如图1和表1所示。

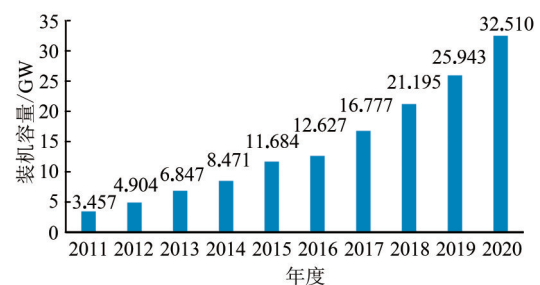


图1 2011—2020年全球累计海上风电装机容量

Fig. 1 Global cumulative offshore wind capacity from 2011 to 2020

表1 全球海上风电场及风力发电机分布

Tab. 1 Distribution of global offshore wind farm and wind turbines

大洲	国家/地区	海上风电场 数量/个	风力发电机 数量/台
欧洲	英国	39	2 128
	德国	26	1 454
	丹麦	14	559
	比利时	10	399
	荷兰	10	538
	西班牙	4	11
	瑞典	6	81
	法国	2	5
	芬兰	3	19
	挪威	3	5
	爱尔兰	2	10
亚洲	葡萄牙	1	5
	中国	49	1 763
	日本	12	36
	韩国	5	34
	中国台湾	2	22
美洲	越南	2	62
	美国	2	7

如图1所示，在2011—2020年，全球海上风电累计装机容量从3.457 GW增长到了32.51 GW，

增长幅度达到943.9%。仅2020年一年,全球海上风电新增装机容量就达到了6.567 GW,是2017年全球累计装机容量的31.04%。

与其他国家相比,中国海上风电的起步较晚,但发展速度较快。2007年,中海油公司利用废弃的渤海湾绥中海上油田导管架基础,建立了中国第一座海上风机,拉开了中国海上风电事业发展的序幕。2010年,中国第一个大型海上风电场—上海东海大桥项目完成并网,至此,中国海上风电进入快速发展阶段。在随后的10年间,中国海上风电的累计容量从2010年的150 MW增长到2020年的7.06 GW,增长约46倍。截止到2020年年底,中国海上风电累计装机容量位于全世界第三,占全球装机容量的21.6%。

随着海上风力发电技术的不断进步,海上风电场逐渐朝着大型化和规模化发展。1991年,丹麦的Vindeby风电场并网时,只有11台450 kW的风机,而到2020年,在英国并网的Hornsea Project One风电场已包含174台风机,总装机容量达到了1 218 MW。

图2给出了1995—2020年不同时间段投入运行的海上风电场的平均装机容量和平均风机数量。可以看出,1995—2020年海上风电场的风机数量和装机容量显著增加,这不仅得益于海上风电技术的进步,更是海上风电产业发展的必然要求。

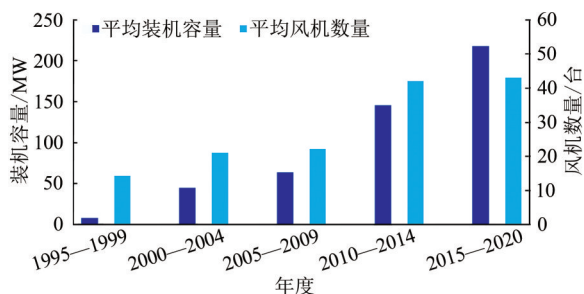


图2 1995—2020年全球海上风电场规模

Fig. 2 Global offshore wind farm scale capacity from 1995 to 2020

成本问题一直是海上风力发电的最大痛点,由于海上环境的特殊性,海上风电的安装、发电和运行维护成本远远高于其他能源,而增加海上风电场的规模有利于降低成本。一方面,大规模的海上风电场统一并网,可以分摊并网建设成本;另一方

面,集群化的海上风电场有利于工作人员进行统一的运行维护,降低了平均维护成本。同时,伴随着海上风电产业的成熟,政策补贴将逐渐退坡,这将导致成本问题更加凸显^[13]。在这种背景下,不断规模化、集群化、大型化,通过规模效应降低非技术成本将是未来海上风电发展的必然趋势。

1.2 离岸距离和水深

海上风电场的离岸距离和水深影响建设投资支出和运行维护成本,具有重要的经济意义。海上风电场一般经海上升压站采用海缆方式上岸,离岸距离直接影响海缆长度及费用,风电场距离海岸线越远,与安装过程和并网相关的成本就越高。此外,由于荷载的增加,更深的水域处风电机组的结构规模更大,这将导致风机基础、海上升压站平台基础相关的建设成本上升。欧洲风能协会的研究表明,浅水风机基础的成本(包括安装费用)大约在150万~200万欧元/MW,该成本随水深增加呈指数级升高^[14]。

图3为全球正在运行的海上风电场的离岸距离和水深示意图,其中气泡的尺寸代表该海上风电场的风机总数。可以看出,已投运的海上风力发电场基本位于离岸距离50 km以内,其中大部分位于离岸20 km以内、平均水深小于30 m的海域内。

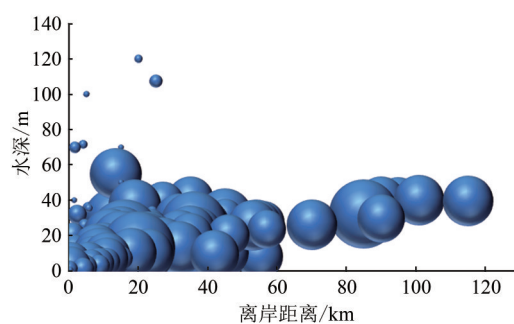


图3 正在运行的海上风电场的平均离岸距离和水深

Fig. 3 Average water depth and distance to shore of operational offshore wind farms

然而,远海具有更高、更平稳的风速、更少的紊流和更开阔的空间,风能质量更高^[15]。同时,相较于近海风电,远海风电无需过多考虑环境保护以及影响海岸线、占用航线等问题。不同时间段投运风电场的平均离岸距离和水深如图4所示,

可以看出，在海上风电的发展过程中，海上风电场所处水域的水深和离岸距离均呈现显著增加的趋势。随着海上风电产业的发展，近海风电资源的开发将逐步趋于饱和，因此，未来海上风电产业势必向深水区发展。

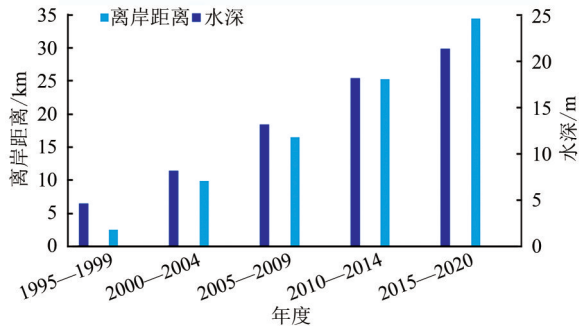


图4 不同时间段投运风电场的平均离岸距离和水深
Fig. 4 Average water depth and distance to shore of offshore wind farms put into operation in different time periods

2 海上风电场关键技术

2.1 基础类型

与陆上风电相比，海上风电建设处在更为复杂的海洋环境中，海上风机的结构基础除其

结构自重、风荷载之外，还受波浪力、水流力等因素的影响，因此海上风机基础的结构与陆上风电有较大差异。同时，根据风机的大小、杆塔尺寸、离岸距离和水深等建设条件的不同，发展出了不同的基础结构类型。通常海上风电机组基础结构形式有重力式基础、单桩基础、高桩承台基础、三脚桩基础、导管架基础、负压桶基础和浮式基础等类型^[16-17]，目前已投运的海上风电场中主要使用的基础结构类型如图5所示，每种结构类型的特点和适用条件如表2所示^[18-19]。

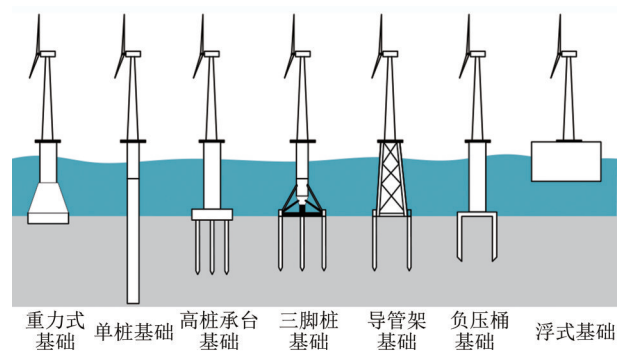


图5 海上风电场基础类型

Fig. 5 Offshore wind turbine foundations

表2 海上风机基础特征总结

Tab. 2 Summary of characteristics of offshore wind turbine foundations

基础类型	适用深度/m	平均水深/m	占比/%	特点
重力式基础	<10	9.54	4.68	结构简单，成本较低，抗风浪性能好；施工周期长，安装不易，对地质条件要求较高
单桩基础	0~30	19.29	75.38	结构简单，安装难度低，成本低且适应性强；海床较为坚硬时，钻孔难度大，成本较高
高桩承台基础	0~20	6.25	6.25	造价低，施工可靠方便，适应不同地质条件；桩基相对较长，总体结构偏于厚重
三脚桩基础	10~30	37.63	3.28	稳定性和可靠性高，对海床条件要求不高，适用范围大；总质量大，不利于制作和运输
导管架基础	25~50	22.45	9.37	基础强度高，安装技术成熟，质量轻；需要大量的钢材，制造周期长，成本较高
负压桶基础	0~25	25.18	0.62	节省钢材，海上施工时间短，可重复利用；沉放、调平难度大
浮式基础	>50	74.89	0.43	成本低，安装灵活，易移动拆卸；基础不稳定，只适用于风浪小的海域

从表2可以看出，单桩基础是已投运海上风电场中应用最为广泛的风机基础，采用单桩基础的风机占全部海上风机的75.38%。然而，随着海上风电向深水区发展，单桩基础不能很好地适应更深水域的要求，面对新的场景、新的海洋气候环境，需要新的、更先进的基础结构。对于20~50 m水深的海域，可以采用三脚桩基础和导管架式基础来提供更好的稳定性和基础强度；对于50 m以上的深水海域，固定式基础的技术性不完善且经济性较差，可以采用浮式基础。

2.2 风力发电机

风力发电机作为将机械能转化为电能的设备，是海上风电场的重要组成部分。在过去10年中，能源生产需求呈指数级增长，导致海上风电机组安装数量和装机容量持续增长，机组额定功率已突破10 MW^[20]。表3显示了按风电机组容量划分的已投运风电机组数量和这些风机所在海上风电场的数量。全球风力发电机的平均容量在3~4 MW，这一区间包括了全球43个风电场，共2 366台风电机，占全球正在运行的风力发电机总数的近50%。

表 3 不同风机容量下风机数量和风电场数量

Tab. 3 Number of turbines and wind farms under different turbine capacities

风机容量/MW	风机数量/台	风电场数量/个
(0, 2]	113	18
(2, 3]	745	17
(3, 4]	2 366	43
(4, 5]	647	10
(5, 6]	373	5
(6, 7]	623	15
(7, 8]	91	1
(8, 9]	37	3

此外，自 1995 年以来，海上风力发电机的容量也获得了巨大提升，全球平均风力发电容量系数从 2010 年的不到 22% 提高到 2017 年的超过 24%^[17]。如图 6 所示，在过去 25 年风力发电机组容量从第一批海上风电场平均约 70 kW 的额定容量提升到 2020 年额定容量为 5 MW 或更高。

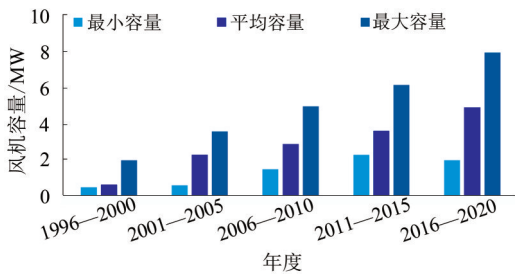


图 6 海上风力发电机容量发展历程

Fig.6 Development of offshore wind turbine capacity

风力发电机种类繁多，从总体上可以分为恒速恒频风力发电机和变速恒频风力发电机；按工作原理不同，可以分为同步风力发电机和异步风力发电机。目前投入商业运行的风力发电机组主要采用鼠笼式风力发电机、双馈式风力发电机和永磁同步发电机 3 种类型，如表 4 所示。

表 4 海上风力发电机类型

Tab. 4 Types of offshore wind turbine

风机类型	风机数量占比/%	平均容量/MW	最大容量/MW
鼠笼型	41.36	3.54	4.0
双馈型	17.08	3.46	6.2
永磁同步型	40.38	5.38	14

在这 3 种类型的风机中，鼠笼式风力发电机结构简单、控制灵活，能很好地满足风电场对系统提出的高可靠、免维护的性能要求，但需要额

外的无功补偿装置，电压和功率因数控制也比较困难^[21]；双馈式风力发电机具有变频器容量小、成本低、易于维护、发电机变速运行范围宽的优点，但因为滑环、电刷的存在，容易产生摩擦损耗，降低了可靠性，且控制回路多、控制较复杂、要求变频器具有低电压穿越等并网运行能力^[22]。与异步式发电机相比，永磁同步发电机由于其效率高、功率密度大、拓扑结构灵活多样、重量轻且可靠性高等诸多优点，已经成为大容量风力发电机组的主力机型之一^[23]。

从表 4 中可以看出，由于可靠性高、维护要求低的特性更加适应海上风电复杂环境的需求，鼠笼式风力发电机是全球已投运海上风电场中应用最为广泛的风机类型，占全部风机数量的 41.36%。但随着海上风电向深水区发展，能源需求不断提高，更大容量的海上风机成为未来发展的趋势。由表 4 可知，永磁同步风机与另 2 种风机类型相比，其平均容量和最大容量均显著增大。尤其在近些年，永磁同步海上风电机组发展极为迅速，在 2015—2019 年新增的海上风电场中，投运的永磁同步发电机占发电机总数的 69.09%。可见，永磁同步风机将是未来海上风电机组大型化研究的重要方向。

2.3 集电系统

集电系统是海上风电场电气系统的重要组成部分，包含的设备、元件繁多，连接方式复杂，其总成本占整个海上风电场建造成本的 15%~30%，仅中压海底电缆所占比例就高达 5%^[24]。

由于海上风电场运行条件十分恶劣，集电系统一旦发生故障，其维护、检修工作难度更大，耗时更长。因此，海上风电场集电系统的优化设计关系着整个海上风电场的安全与经济运行，成为工程技术人员关注的焦点之一。

集电系统的优化设计主要包括集电系统的拓扑优化、设备选型等方面，目前相关研究成果较多，但还需结合工程实际来检验和改进。海上风电场集电系统任务是将各风电机组输出的电能通过中压海底电缆汇集到海上变电站的汇流母线。海上风电场常用的集电系统拓扑结构有以下 5 种：放射形结构、星形结构、单边环形、双边环形及复合环形。

近年来有不少学者从设计、优化及评估等方面对集电系统的拓扑结构进行了初步研究，并提出了集电网络优化模型。文献[25-26]使用标准遗传算法对海上风电场电气系统进行了优化设计，得出了若干风电场电气系统整体配置的优化方案；文献[27]对前述算法特性进行了分析；文献[28]在海上风电场基本电气结构确定的基础上给出了冗余设计方法，并以成本最低为目标，利用不同的算法对风电场内部电气连接进行了优化。此外，还有基于最小生成树算法的优化方法以及基于模糊C均值聚类的优化方法等^[24]。相关优化算法以集电系统拓扑结构的经济性或可靠性为优化目标，得出满足相关条件的优化结果。

2.4 并网方式

海上风电的并网方式可以主要分为高压交流输电技术(high voltage alternating current, HVAC)和高压直流输电技术(high voltage direct current, HVDC) 2种，分别适用于不同的工程情况。风电场额定容量在400 MW以内，离岸距离在70 km之内可考虑采用高压交流输电方式，但HVAC对于长距离、大容量的输电存在一定问题^[29]。当HVAC技术不能满足并网需求时，可以采用高压直流输电的方式来进行并网。与HVAC相比，HVDC技术具有输送距离远、运行调控灵活等优点，是未来海上风电并网技术的趋势。图7为高压直流并网风电场的典型结构示意图。

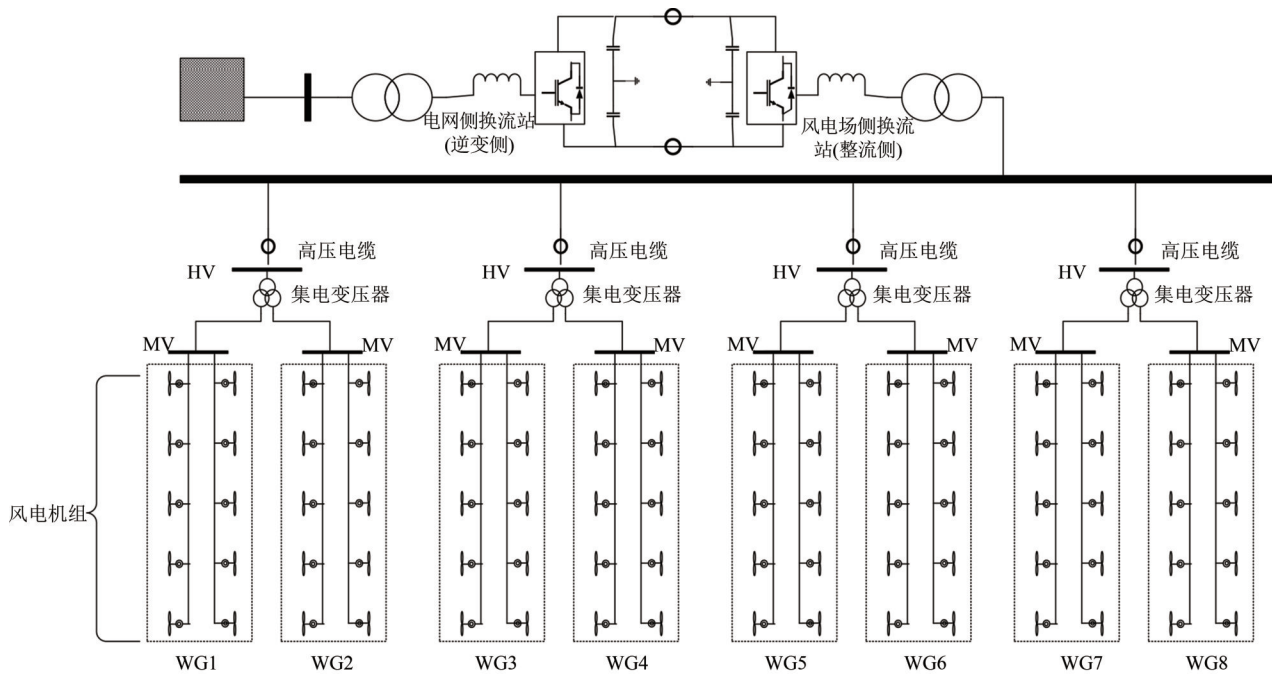


图7 典型的高压直流并网海上风电场结构

Fig. 7 Typical structure of HVDC grid-connected offshore wind farm

HVDC技术按照器件类型可以分为基于晶闸管的电网换相换流器(line commutated converter, LCC)型LCC-HVDC输电方式和基于电压源换流器(voltage source converter, VSC)的VSC-HVDC输电方式。与LCC-HVDC输电技术相比，VSC-HVDC输电技术可以通过稳定的电压和频率独立地控制有功和无功，能够连接非常弱的系统甚至是无源网络，因此，目前世界上采用直流输电的海上风电场均采用VSC-HVDC技术^[29]。VSC-HVDC技术根据风电场集电系统运行频率又可以进一步细分，

当采用的交流频率为低频(10~20 Hz)时，海上风电场为低频电网，线路无功电流大幅减少，可以解决远海风电送出问题；当采用的交流频率为中频(100~400 Hz)时，海上风电场为中频电网，变压器和滤波器的体积和重量得以大幅减小，集电系统建设的经济性得以提高^[30]。此外，文献[31]提出了直流集电系统的高压直流并网海上风电场设计，能够实现更小的集电系统损耗，并且省去了集电系统的无功补偿设备及笨重的变压器设备，其结构如图8所示。

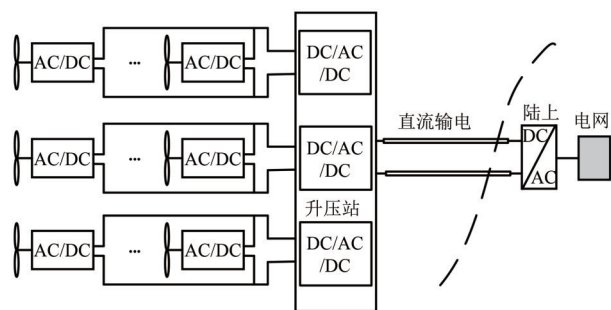


图8 采用直流集电系统的高压直流并网海上风电场结构

Fig. 8 Structure of HVDC grid-connected offshore wind farm using DC collector system

按照换流器的拓扑类型，VSC-HVDC可以划分为基于两电平、三电平技术的VSC-HVDC输电技术、以及基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的MMC-HVDC输电技术，其中，早期多以两电平和三电平为主，但其存在谐波含量高、开关损耗大等缺陷。MMC技术通过多个开关器件的串联，允许子模块使用较低的开关频率，减少了器件的损耗，此外，通过使用更多的电平降低了电压的谐波含量，从而省去了滤波器的配置要求。

由于MMC换流站占地空间及建造成本均较LCC换流站要大，文献[32]提出了采用混合直流输电技术，即海上变电站采用VSC技术，岸上变电站采用LCC技术，该技术不但可以保留柔性直流输电技术的绝大部分优势，而且可以优化工程造价，对于海上风电的并网具有很大优势。进一步地，为了减少海上风电场高压直流换流站的能源消耗及建设难度，文献[33]提出了将海上VSC换流站替换为晶闸管，而陆上换流站依然采用VSC型输电结构，使传输损耗和建造成本分别下降了20%和30%。

考虑到技术的成熟性，在已投运的风电场中，只有德国和中国的部分风电场采用了VSC-HVDC并网的技术，其他风电场均采取的是不同电压等级的高压交流并网。同时，在德国的海上风电场中，VSC-HVDC并网的比例很高。在已投运的19座德国风电场中，有5座采用的是高压柔直并网的方式。在建的风电场中，所有来自德国的项目采用的均是高压柔直并网的方式。可见，VSC-HVDC并网技术在德国的大规模海上风电场项目

中已经得到了广泛的应用，也是德国海上风电场未来并网方式发展的主流。

对于其他国家的海上风电场，高压交流并网仍然是主要选择。但英国在建的Hornsea I和Hornsea II两个项目拟采用HVDC并网，可见更多的国家正意识到HVDC并网的优势。在海上风电驶向远海的背景下，HVDC并网技术将成为未来海上输电技术的热点。

3 结论

详细总结了全球海上风电的发展现状、未来趋势，并重点介绍了海上风力发电的关键技术，包括风力发电机组、风机基础结构、风电场集电系统以及海上风电场并网方式等。研究表明，当前海上风力发电产业正向着更深、更远海域发展，风电场向更大规模、更多风机发展，风力发电机组向更大装机容量发展，永磁同步风机成为未来海上风机的主要选择。

随着海上风电开发区域不断向深海拓展，有效降低开发成本至关重要。为克服现有技术缺陷并降低海上风电场开发成本，仍然需要学术领域开展持续的研究和创新。

参考文献

- [1] US Energy Information Administration. International energy outlook 2019[EB/OL]. (2019-12-15)[2021-12-20]. <https://www.eia.gov/ieo>.
- [2] 国家发展改革委. 可再生能源发展“十三五”规划[EB/OL]. (2017-05-16)[2021-01-20]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201612/W020190905497880506725.pdf>. National Development and Reform Commission. 13th Five-Year Plan for renewable energy development[EB/OL]. (2017-05-16)[2021-01-20]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201612/W020190905497880506725.pdf>.
- [3] 董文博, 顾秀芳, 陈艳宁. 风电并网价值分析[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 320-327. DONG W B, GU X F, CHEN Y N, et al. Value analysis of wind power integration[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 320-327.
- [4] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术,

- 2022, 43(1): 54-64.
- JIANG H L, LIU Y X, FENG Y M, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th Five-Year Plan under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(1): 54-64.
- [5] 周强, 马彦宏, 沈琛云, 等. 新时期中国西北地区新能源可持续发展反思与建议[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(6): 78-84.
- ZHOU Q, MA Y H, SHEN C Y, et al. Reflection and suggestions on sustainable development of new energy in northwest china in new era[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(6): 78-84.
- [6] 余浩, 肖彭瑶, 林勇, 等. 大规模海上风电高电压穿越研究进展与展望[J]. *智慧电力*, 2020, 48(3): 30-38.
- YU H, XIAO P Y, LIN Y, et al. Review on high voltage ride-through strategies for offshore doubly-fed wind farms[J]. *Smart Power*, 2020, 48(3): 30-38.
- [7] 薛帅, 高厚磊, 郭一飞, 等. 大规模海上风电场的双层分布式有功控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(3): 1-9.
- XUE S, GAO H L, GAO Y F, et al. Bi-level distributed active power control for a large-scale wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(3): 1-9.
- [8] GWEC. Global offshore wind: annual market report 2020[R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2020.
- [9] 文锋. 我国海上风电现状及分析[J]. *新能源进展*, 2016, 4(2): 152-158.
- WEN F. Developments and characteristics of offshore wind farms in China[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2016, 4(2): 152-158.
- [10] 国家能源局. 首部海上风力发电场国家标准将实施 [EB/OL]. (2019-08-21)[2021-01-25]. http://www.nea.gov.cn/2019-08/21/c_138326144.htm.
- National Energy Board. The national standard of the first offshore wind farm will be implemented[EB/OL]. (2019-08-21)[2021-01-25]. http://www.nea.gov.cn/2019-08/21/c_138326144.htm.
- [11] 4C Offshore. Global offshore wind farms database[EB/OL]. (2021-01-25) [2022-01-12]. <https://www.4c offshore.com/windfarms/>.
- [12] The Wind Power. Wind energy database[EB/OL](2020-10-15)[2021-12-25]. <https://www.thewindpower.net/>.
- [13] 财政部, 国家发展改革委, 国家能源局. 关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见[EB/OL]. (2020-10-12) [2021-01-29]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/03/content_5474144.htm.
- Ministry of Finance, National Development and Reform Commission, National Energy Board. Some opinions on promoting the healthy development of non-aqueous renewable energy power generation[EB/OL]. (2020-10-12)[2021-01-29]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/03/content_5474144.htm.
- [14] European Commission. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030[R]. Brussels: European Commission, 2014.
- [15] VOORMOLEN J A, JUNGINGER H M, VAN SARK W. Unravelling historical cost developments of offshore wind energy in Europe[J]. *Energy Policy*, 2016, 88: 435-444.
- [16] 袁汝华, 黄海龙, 孙道青, 等. 海上风电风机基础结构形式及安装技术研究[J]. *能源与节能*, 2018(12): 59-61.
- YUAN R H, HUANG H L, SUN D Q, et al. Research on basic structure and installation technology of offshore wind turbine[J]. *Energy and Conservation*, 2018(12): 59-61.
- [17] 刘晓辉, 高人杰, 薛宇. 浮式风力发电机组现状及发展趋势综述[J]. *分布式能源*, 2020, 5(3): 39-46.
- LIU X H, GAO R J, XUE Y, et al. Current situation and future development trend of floating offshore wind turbine[J]. *Distributed Energy*, 2020, 5(3): 39-46.
- [18] 徐荣彬. 海上风电场风机基础结构形式探讨[J]. *建材技术与应用*, 2011(7): 7-9.
- XU R B. On fan infrastructure form of wind power station at sea[J]. *Research & Application of Building Materials*, 2011(7): 7-9.
- [19] 张浩, 迟洪明. 海上风力发电基础形式及趋势[J]. *中国高新技术企业*, 2014(20): 76-78.
- ZHANG H, CHI H M. The basic and trend of offshore wind power generation[J]. *China High-Tech Enterprises*, 2014(20): 76-78.
- [20] SETHURAMAN L, MANESS M, DYKES K. Optimized generator designs for the DTU 10 MW offshore wind turbine using generator SE[C]//35th Wind Energy Symposium. Grapevine, USA: ASME, 2017: 922-931.
- [21] 张文元, 车向中, 刘金晶, 等. 基于自然坐标的鼠笼异步发电机控制策略研究[J]. *电气传动*, 2020, 50(11): 65-71.
- ZHANG W Y, CHE X Z, LIU J J, et al. Research on control strategy of squirrel cage induction generator based on natural coordinate[J]. *Electric Drive*, 2020, 50(11): 65-71.
- [22] 杨晨星, 杨旭, 童朝南. 双馈异步风力发电机低电压穿越的软撬棒控制[J]. *中国电机工程学报*, 2018,

- 38(8): 2487-2495.
- YANG C X, YANG X, TONG C N. An LVRT control strategy based on soft crowbar control for doubly fed induction wind power generations[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2487-2495.
- [23] BADR M A, ATALLAH A M, BAYOUMI M A. Comparison between aggregation techniques for PMSG wind farm[J]. Energy Procedia, 2015, 74: 1162-1173.
- [24] 陈宁, 曹家麟. 大型海上风电场集电系统优化研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2011.
- CHEN N, CAO J L. Research on optimization of large offshore wind farm collector system[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2011.
- [25] ZHAO M, CHEN Z, BLAABJERG F. Optimisation of electrical system for offshore wind farms via genetic algorithm[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(2): 205-216.
- [26] CHEN Z, ZHAO M, BLAABJERG F. Application of genetic algorithm in electrical system optimization for offshore wind farms[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: IEEE, 2008: 128-135.
- [27] ZHAO M, CHEN Z, HJERRILD J. Analysis of the behaviour of genetic algorithm applied in optimization of electrical system design for offshore wind farms[C]//IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. Paris, France: IEEE, 2006: 2335-2340.
- [28] YANG J, O'REILLY J, FLETCHER J E. Redundancy analysis of offshore wind farm collection and transmission systems[C]//2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing, China: IEEE, 2009: 1-7.
- [29] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.
- CHI Y N, LIANG W, ZHANG Z K, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3771.
- [30] 汤英杰, 张哲任, 徐政. 基于二极管不控整流单元的远海风电低频交流送出方案[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 44-54.
- TANG Y J, ZHANG Z R, XU Z. Diode rectifier unit based LFAC transmission for offshore wind farm integration[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 44-54.
- [31] ALAGAB S M, TENNAKOON S B, GOULD C A. A compact DC-DC converter for offshore wind farm application[J]. Renewable Energy and Power Quality, 2017, 1(15): 529-533.
- [32] TORRES-OLGUIN R E, MOLINAS M, UNDELAND T. Offshore wind farm grid integration by VSC technology with LCC-based HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 899-907.
- [33] BERNAL-PEREZ S, ANO-VILLALBA S, BLASCO-GIMENEZ R, et al. Efficiency and fault ride-through performance of a diode-rectifier- and VSC-inverter-based HVDC link for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2401-2409.

收稿日期: 2022-02-10。

作者简介:



徐彬

徐彬(1993), 男, 博士研究生, 主要研究方向为直流并网海上风电场的保护与控制, xubinsdu@163.com;



薛帅

薛帅(1995), 男, 硕士, 主要研究方向为大规模海上风电场有功控制, 本文通信作者, sh_xue@qq.com;



高厚磊

高厚磊(1963), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制, houleig@sdu.edu.cn;



彭放

彭放(1992), 女, 博士后, 主要研究方向为电力系统继电保护, houleig@sdu.edu.cn.

(责任编辑 辛培裕)