

DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2308201

海上风电的发展现状与前景展望

林玉鑫^{1,2}, 张京业^{1,3}

- (1. 中国科学院电工研究所, 北京市海淀区 100190; 2. 中国科学院大学, 北京市石景山区 100049;
3. 齐鲁中科电工先进电磁驱动技术研究院, 山东省济南市 250000)

摘要: 近几年在“碳达峰、碳中和”目标下, 可再生能源领域得以巨大发展, 海上风电技术凭借其资源丰富、可利用前景大的优势, 有望成为未来绿色能源来源的中流砥柱; 但是, 目前海上风电场尤其是深远海风电场仍面临建设难度大、风电消纳技术不成熟等问题。为此, 首先介绍海上风电的发展现状, 分析目前应用于海上风电输送技术的优势与不足, 介绍当前海上风电领域内出现的新技术, 分析总结海上风电制氢技术及氢气的转运技术。结合发展趋势, 总结未来海上风电的发展应分近海和深远海两条主线的走向, 提出深远海风电与氢能源发展紧密结合的观点, 引入海上风电与储氢储能结合的思路, 并分别对深远海和近海的风电前景进行展望, 可为解决海上风电场所面临的问题提供思路, 也可为海上风电的进一步发展提供参考。

关键词: 可再生能源; 海上风电; 输电技术; 海水制氢; 氢气储运; 储能

中图分类号: TK 89; TM 61 文献标志码: A

Development Status and Prospect of Offshore Wind Power

LIN Yuxin^{1,2}, ZHANG Jingye^{1,3}

- (1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Shijingshan District, Beijing 100049, China;
3. Institute of Electrical Engineering and Advanced Electromagnetic Drive Technology, Qilu Zhongke, Jinan 250000, Shandong Province, China)

ABSTRACT: In recent years, under the goal of “carbon peak and carbon neutrality”, the field of renewable energy has made great progress. Offshore wind power technology is expected to become the mainstay of green energy sources in the future due to its advantages of abundant resources and large utilization prospects. But at present, offshore wind farms, especially far-reaching offshore wind farms, are still faced with problems such as difficulty in construction and immaturity of wind power consumption technology. This paper first introduces the current development status of offshore wind power, analyzes the advantages and disadvantages of current offshore wind power transmission technology, introduces the current new technologies in the field of offshore wind power, analyzes and summarizes the offshore wind power hydrogen production technology and hydrogen transfer technology. Combined with the development trend, this paper summarizes the development of offshore wind power in the future, which should be divided into two main lines: offshore wind power and far-reaching offshore wind power, puts forward the view that the development of offshore wind power and hydrogen energy should be closely combined, introduces the idea of combining offshore wind power with hydrogen storage and energy storage, and forecasts the prospect of offshore wind power and far-reaching offshore wind power respectively, which can provide ideas for solving the problems faced by offshore wind power sites. It can also provide reference for the further development of offshore wind power.

KEY WORDS: renewable energy; offshore wind power; transmission technology; hydrogen production from seawater; hydrogen storage and transportation; energy storage

基金项目: 国家自然科学基金项目(51721005); 齐鲁中科电工先进电磁驱动技术研究院科研基金项目(重力势能储能的关键技术研究)

Project supported by National Natural Science Foundation of China (51721005); Research Foundation of Institute of Electrical Engineering and Advanced Electromagnetic Drive Technology of Qilu Zhongke (Research on Key Technology of Gravity Potential Energy Storage)

0 引言

自工业革命以来,全社会对能源的依赖程度逐渐加深,所需能源总量也在不断增加;目前,在“碳达峰、碳中和”的目标要求之下,我国能源须在总量满足所需的前提下进行大规模的结构调整,以期达到以环境友好型的可再生能源取代高碳排放的传统能源。电力领域在此次结构调整中必先拔头筹,国家能源局、科学技术部也在发布的《“十四五”能源领域科技创新规划》中明确提出,要引领可再生能源占比逐渐提高的新型电力系统建设^[1]。

目前,在电力领域中应用较为成熟的可再生能源发电方式有太阳能发电、风力发电、水力发电、生物质发电、地热能发电等。

太阳能发电主要以光伏发电为主,光伏发电利用太阳能电池板直接将太阳能转换成电能,经过控制直流逆变后接入电网,不产生其他排放,但其能量来源特点决定发电主要集中在白天且与天气和地域有关。水力发电是利用水的重力势能转换为机械能驱动发电机进行发电的过程,虽然我国水利资源丰富,目前多个大型水电站已投入运行,运行效益可观,且兼具抗灾减灾的功能,但因其建设所需地形及水资源要求较高,总体来看可供建设水电站的资源有限。生物质发电和地热发电较为新颖,未来随着相关技术的突破会有进一步大范围的应用。

风力发电通过风能驱动发电机产生电能,具有清洁、利用率高、装配灵活等特点。根据装机位置不同,可将风力发电分为陆地风力发电和海上风力发电两种。目前,我国大部分风力发电机组分布在陆地,随着近几年可再生能源发电的大力推广,陆地风力发电已形成规模^[2-3],其具有安装、检修方便等优点,但其中不乏因盲目投资而造成的浪费^[4];另外,由于风能具有波动性,导致风力发电的不稳定风险较大,存在一定量的“弃风”现象^[5],从而造成浪费。为获得更好的风力条件,风电机组选址较为考究,导致机组安装成本难以降低^[6],且因其噪音及转动特性会造成生态环境的破坏^[7]。相比之下,海上风电具有风速更大、静风期更短、节约土地资源且免于考虑噪音等污染的优点^[8]。尽管如此,我国风电仍然存在建设成本高、能源利用率低、输送困难等问题,且目前投产的海上风力发电项目多位于近海,风电资源更为丰富的远海风电还未得到充分

利用。

本文介绍海上风电的国内外发展现状及应用情况,分析目前海上风电的利用方式和相关领域发展趋势,并结合海上风电特点和我国可再生能源发展趋势对未来海上风电的发展状况做出展望。

1 海上风电发展概况

自1990年瑞典出于实验目的在水深6 m,离岸350 m的海上安装了第一台海上风电机组之后,世界范围内的风电技术发展就步入了快车道。丹麦于1991年在洛兰岛西北沿海建成并投入使用全球首个海上风电场,该电场包含11台450 kW的风电机组,可满足2 000~3 000户居民的用电需求^[9]。2000年,海上风电项目开始加入兆瓦级发电机组,使海上风力发电项目开始具有商业化应用价值。丹麦在2002年建成第一座拥有80台2 MW风电机组的大型海上风电场,装机容量达到160 MW。随后欧洲各国也相继加入投资建设海上风电项目的阵营中,世界范围内风电装机容量稳步增长。

我国海岸线全长18 000多 km,拥有丰富的海上风能资源。但我国海上风力资源开发较欧美国家相比起步较晚,导致我国海上风电应用时间较晚;不过通过多年的研究和探索,经历了海上风电开发起步时期后迎来了海上风电开发快速发展时期^[10-11]。目前,海上风电已成为我国能源战略的重要产业,也是我国实现能源结构优化过程的重要工具。2010年,作为我国首个海上风电场的图1所示东海大桥风电场,在上海开工建设,随后我国海上风电项目逐年增长,之后我国海上风电装机规模逐渐达到世界先进水平。



图1 东海大桥海上风电场俯瞰

Fig.1 Aerial view of Donghai Bridge Offshore Wind Farm

全球风能协会(global wind energy council, GWEC)发布的《全球风能报告 2022》的数据显示:2021 年全球新增风电容量为 93.6 GW, 仅比 2020 年的记录低 1.8%; 总装机容量达到 837 GW, 比 2020 年增长 12.4%; 同时, 2021 年海上风电并网量达到 21.1 GW, 是 2020 年的 3 倍, 创下海上风电并网总容量 57.2 GW 的新记录。其中, 我国海上风力发电的贡献十分突出, 2021 年我国连续第 4 年保持海上风电装机量首位, 年新增装机容量近 17 GW, 累计海上风电装机容量达到 27.7 GW, 与欧洲近 30 年发展水平相当^[12]。

虽然部分受到政策变化的影响, 即从 2022 年 1 月 1 日起, 政府终止对海上风电的补贴, 且 2019 年之前批准的项目必须在 2021 年底之前完全并网, 才能享受 0.85 元/(kW·h) 的电价, 进而出现海上风电机组抢装潮; 但整体来看, 我国海上风力发电在向电网平价时代过渡期间虽会面临激烈的竞争, 在“十四五”规划和“碳达峰、碳中和”的目标下发展前景依然向好。另外, 海上风电技术随着应用的成熟逐步呈现出如下特点: 首先, 机组容量大型化, 单机容量进一步提高至 16 MW, 叶轮直径 250 m 以上^[13-14]; 其次, 场区建设深远化, 在水深大于 50 m、场区中心离岸距离大于 70 km 的深远海, 依据更加充裕的风能建设深远海风电。同时, 随着海上风电项目的增多, 相关配套产业也得到巨大发展, 例如, 我国是世界上最大的风力发电机制造中心, 占全球风力发电机机舱和关键部件(包括变速箱、发电机和叶片)产量的 60%~65%, 企业间竞争压力导致售价降低且积极研发更大功率的风力发电机, 推动技术的进步, 利好风力发电市场。海上风电安装船、风力机组检修船等, 及海缆、输电装置等相关配套设施也取得极大发展^[11, 15-18]。

2 海上风电的应用现状

海上风电资源虽然极为丰富, 但相应的建设成本和建设难度也会有很大的提高。伴随着海上风电的迅速发展, 海上风力发电机组建设问题也在相关领域突破的基础上得到不断解决, 更为安全、高效的海上风电机组也在逐步走向成熟; 随着海上风电发电容量的进一步增大, 深远海风力发电更加成熟, 在风电传输与利用方式上也出现了新的技术和方式。

2.1 海上风电场的建设

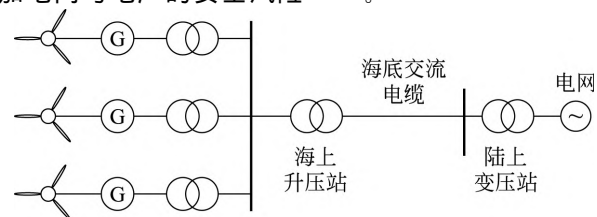
由于海上环境特殊, 海上风电机组与陆上风电机组有极大不同, 而且, 海上风电机组所处海洋环境远比陆地环境恶劣, 因此对海上风电机组的技术有着更高的要求。目前, 国内外采用的风电机组根据其基础结构是否接触海底分为固定式和漂浮式两种, 固定式机组根据其基础不同又分为重力式、单桩基础和套管式等, 漂浮式则根据浮体不同分为半潜型、立柱型和张力腿(拉杆)型; 固定式机组稳定性高、应用早, 技术较为成熟, 成本较低且安装难度小, 已在近岸浅海得到广泛应用^[19]。但随着海上风电发展逐渐深远海化, 固定式风电机组已无法满足应用要求, 新型漂浮式海上风电机组得到了极大发展。

2.2 海上风电的电能送出方式

目前, 海上风电的送出还是以电力输送方式为主, 随着电力输送技术的发展, 结合海上风电的特点, 用于输送海上风电的技术主要有高压交流输电、高压直流输电、分频输电(fractional frequency transmission system, FFTS)和船运电池输电技术等^[20-22], 不同输电技术依据其性能特点, 与风电场的电力特性进行匹配选择, 以追求输电性能与价格的平衡。

2.2.1 高压交流输电技术

高压交流输电技术凭借其结构简单、成本低廉、技术成熟等优点已被广泛用在近海海上风力发电的电力传输工程中。该技术拓扑结构如图 2 所示, 其主要原理为: 首先将各风电机组输出的电压幅值、频率波动的交流电经过换流器转换为恒压的工频交流电, 经过海上升压变压器升压后汇入海底电缆, 传输至陆地并入电网。受到电缆线路电容充电的影响, 此种输电方式无功损耗较大, 电缆有效负荷率低, 因此只能短距离、小容量传输电能, 一般还需要增加无功补偿器, 且直接与电网相连也会增加电网与电厂的安全风险^[23-27]。



海上风电场

图 2 海上风电高压交流输电技术拓扑图

Fig.2 Topology of offshore wind power HVAC transmission technology

2.2.2 高压直流输电技术

高压直流输电技术主要有两种拓扑：一种是基于线换相换流器(line commutated converter, LCC)的传统高压直流输电(LCC-high voltage direct current, LCC-HVDC),其拓扑结构如图 3 所示；另一种是基于自换相电压源换流器(voltage source converter, VSC)的柔性直流高压输电(VSC-high voltage direct current, VSC-HVDC),其拓扑结构如图 4 所示。二者主要工作原理类似,即将风电机组输出的交流电能经过海上换流器转换为直流后,经过海底直流电缆传输至陆上,再经陆上换流站将电能转换为工频交流电后并入电网。LCC-HVDC 具有单变流器容量大、成本低、可靠性高、技术成熟等优势,但也存在易产生谐波、需要无功补偿、易受交流系统干扰导致换相失败等问题,导致无法更大范围应用。随着电力电子技术的发展,更多成熟的电力电子器件及技术也进入大功率输电领域；VSC-HVDC 具有不易发生换相失败、稳定性强、可对有功无功功率单独控制等优势,且具备黑启动能力、可接入无源网络供电等优势,在克服早期采用两电平、三电平换流器而产生谐波含量高、损耗大等问题之后,采用模块化多电平换流器技术使得性能得到极大提升。目前,国内外已有大批运用 VSC-HVDC 技术的输电项目示范工程,其应用技术有望得以大幅度提高；但其成本高、开关频率高导致变流器功耗大、系统整体成熟度低等问题也不可忽

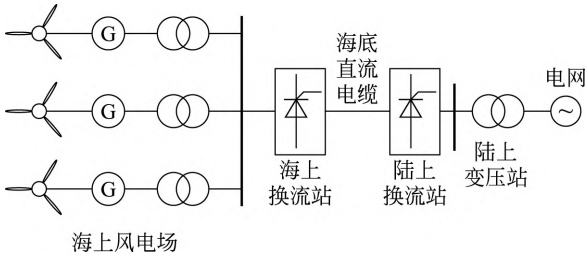


图 3 海上风电传统高压直流输电技术拓扑图

Fig.3 Topology of offshore wind power LCC-HVDC transmission technology

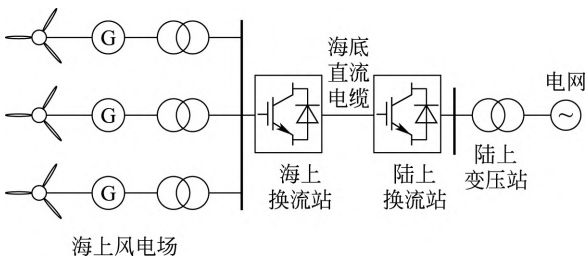


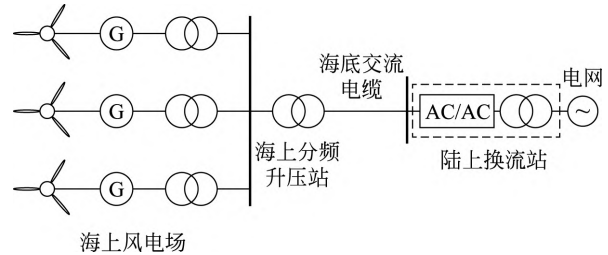
图 4 海上风电柔性高压直流输电技术拓扑图

Fig.4 Topology of offshore wind power VSC-HVDC transmission technology

视。随着技术的不断迭代,直流输电线两端其一为 LCC,另一端为 VSC 的混合直流输电技术和采用 3 个及以上换流站组成的多端直流输电(multi-terminal direct current, MTDC)技术有望进一步提升高压直流输电的性能^[21,25,28]。

2.2.3 FFTS 技术

FFTS 技术由王锡凡院士提出,旨在通过降低交流电频率减小输电电缆电容效应导致的充电电流的影响,其拓扑结构如图 5 所示。研究表明,如果只考虑交流海底电缆电容充电电流的影响,在 50、16、15、10、5 和 1 Hz 频率下,有功最大传输距离分别为 140、437、465、630、1 280 和 14 945 km,因此该方法可极大减小工频交流输电的无功影响,延长交流电能输送里程和电缆使用寿命,也可相应减少风电机组齿轮箱增速比,简化结构的同时降低成本^[28]；但也需考虑降频之后带来的相应变压器体积、重量变大的问题及全场风力发电机运行的效率问题。



海上风电场

图 5 海上风电 FFTS 技术拓扑图

Fig.5 Topology of offshore wind power FFTS transmission technology

2.2.4 船运电池输电技术

随着海上风电场逐渐向深远海化发展,输电线路建设成本大幅提高。近年来,电力储能技术取得快速发展,特别是锂电池技术的成熟和相关产业的发展,采用船运电池进行深远海电力输送成为可能。与传统输电线路输送相比,船运电池输电技术无电缆铺设问题,不受输电距离的限制,具有灵活性强、建设投资成本低等优点^[24]；目前来看,输送容量偏小、损耗费用偏高等是限制其发展的主要因素,但其仍为深远海风电输电方式的研究提供了新的思路。

2.3 海上风电制氢技术

随着海上风电场的规模逐渐增大,特别是深远海风电的发展,海上风电容量相应增大；面对日益增大的风电容量,除了逐步提高输电技术以求更加高效的陆上电网消纳外,也可尝试发展海上风电机

解海水制氢就地消纳技术。该技术既可改善海上风电输电的劣势,也顺应当前能源结构“绿色化”的发展潮流^[29]。

2.3.1 海上风电制氢原理及现状

近年来,随着能源与环境问题的突出,清洁能源的利用备受关注,其中,氢能的有效利用被认为是清洁能源发展的重要组成部分。然而目前,工业中氢气的制取大部分还是通过化石燃料加工,即为“灰氢”,约占 77.3%;来自工业副产的“蓝氢”约占 21.2%,真正清洁的可再生能源制取的“绿氢”仅有 1.5%^[25, 30-31]。大力发展清洁能源制氢、提高绿氢比例亟需一种“破局之术”。远海风电场具有大量风电资源和得天独厚的水资源,深远海风力发电电解海水制氢有望成为绿氢的重要来源。

海上风电制氢系统可根据其电解系统的位置不同,分为陆上电解水制氢和海上电解水制氢;海上电解水制氢又根据电解系统与风电机组位置,分为集中式电解水制氢和分布式电解水制氢。其中,陆上电解水制氢依据前述海上风电输电系统,将电能传输至陆上,再完成电解工作,对于近岸浅海风电较为友好,具有灵活性高等特点,但不符合新型风电深远海化的趋势。海上电解水制氢中的集中式电解水制氢是将分布的海上风电机组电能汇聚到图 6 所示海上制氢平台后进行电解,之后由能源管道输送至陆上储存应用;分布式电解水制氢则不对各机组电能进行汇聚,而是依据风电机组塔底平台上的电解制氢设备模块就地电解制取氢气,之后经过小流量管道将氢气汇聚至大容量管道后输送到陆地,其目的主要是采用损耗较小的能源管道输送替代损耗较大的电力输送,以提高能量利用率^[32-33],但目前分布式电解制氢模块技术还需进一步发展^[34]。

根据电解水的来源不同可将海上风电制氢系

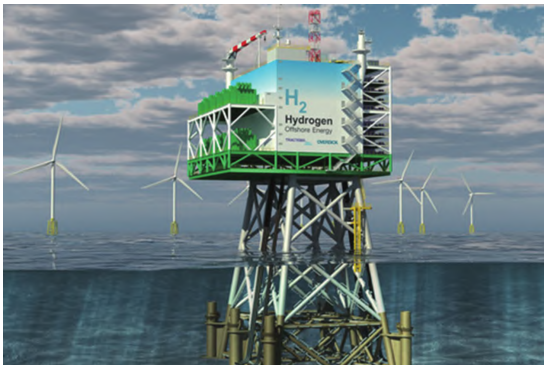


图 6 海上制氢平台效果图

Fig.6 Effect drawing of offshore hydrogen production platform

统分为海水直接电解制氢和海水间接电解制氢两种。海水直接电解制氢是将海水经过简单处理后直接引入电解槽中进行电解,其面临的主要问题是海水中蕴含的大量阳离子(Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等)、细菌、微生物和小颗粒等杂质在电解反应过程中会吸附在电极和催化剂上,导致昂贵的催化剂中毒、失去活性,引起电解速率下降等问题。海水间接制氢是指在海水进行电解之前,除了要进行简单的处理外,还要经过淡化过程去除其中的离子,成为淡水后再进行电解。间接电解海水制氢相比于直接电解海水,能很大程度上保护电解池中的催化剂,提升电解速率和效率,且可应用陆地上相对成熟的淡水电解经验,虽然淡化海水有成本,根据柯善超等人的研究,理想情况下采用反渗透方式淡化海水所需要的能量仅占海水分解总能量的 0.02%,占海水电解能量的 0.7%,且电耗占反渗透淡化海水成本的 50%~75%,占产水成本的 40%~60%。目前,海水淡化的成本已可控制在 4~4.5 元/t^[35],随着海上风电成本的进一步降低,其经济性将会更加乐观^[36-39]。另外,根据郑澳辉等人的研究,运用压缩空气储能驱动反渗透海水淡化系统有望将淡水生产成本再降低 4.4%^[40]。

2.3.2 氢储运技术

储氢技术可分为物理储氢、化学储氢和多孔材料吸附储氢 3 大类,其中海上风电制氢的储存主要运用物理储氢技术,物理储氢技术又可分为高压气态、低温液态和低温高压储氢 3 种^[41]。高压气态储氢运用较多,但其储氢密度较低,储存容器的选择有常见的人造复合材料压力容器和含水层、盐穴等天然结构利用两种。盐穴储氢具有低成本、高性能特性,多个国家已开展相关应用研究。低温液态储氢是将氢气进行低温处理至 $-253\text{ }^\circ\text{C}$,将其液化储存,其储存密度为 70 kg/m^3 ,国外已将该技术进行商业化应用(其中,韩国林德氢气液化装置如图 7 所



图 7 韩国林德氢气液化装置

Fig.7 Hydrogen liquefaction unit of South Korea Linde

示),但国内在核心技术和装备方面还有较大发展空间^[42-45]。低温高压储氢技术则兼顾上述两技术的特点,在提高存储密度和降低能耗方面有一定前景,但截至目前还尚未应用^[46-48]。

3 海上风电的发展前景和展望

海上风电资源储量十分丰富,但目前得以利用的仅为少数,且还存在缺少规划、分布不合理等问题。伴随着我国能源低碳化趋势的发展,海上资源的利用将是未来的发展重点。短期来看,虽然英国、德国、丹麦等欧洲国家比我国有更加成熟的发电及应用技术^[8,49],但是我国特殊的沿海高用电负荷的地理特征决定我国未来风电能量需求远大于上述国家,即我国海上风能资源的利用总量将十分庞大,海上风电具有巨大的应用前景。根据图 8 所示的 GWEC 数据,我国 2021 年新增海上风电装机量占据世界总新增装机量的 80%,未来随着技术的进一步成熟,我国大陆地区特别是沿海城市地区巨大的用电需求将有望由海上风电供给;同时,伴随着海上风电制氢技术的成熟与应用,海上风电的优势将更加明显。自改革开放以来,我国科学技术的发展突飞猛进,加之近几年风电热潮的积极孵化作用,我国在风电领域已经出现成熟的技术应用,各地政府也在积极鼓励与引导,简化程序,助力项目落地。江苏、广东、浙江、上海、海南、山东等省市也出台相关政策,以推动海上风电进一步发展^[50]。例如,《浙江省能源发展“十四五”规划》中提出,在“十四五”期间大力发展生态友好型非水可再生能源,实施“风光倍增”工程,着力打造百万 kW 级海上风电基地,预计到 2025 年全省海上风电装机容量新增 455 万 kW 以上,力争达到 500 万 kW,并在宁波、温州、舟山、台州等海域建造百万 kW 级的海上风电基地 3 个;《上海市能源发展“十四五”规划》也指出大

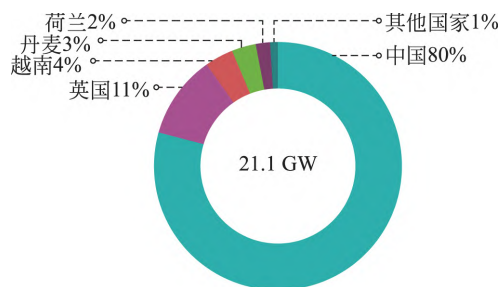


图 8 2021 年新增海上风电装机容量分布

Fig.8 Distribution of new offshore wind power installed capacity in 2021

力发展可再生能源,发展方式向集中式与分布式发展并重转变,推进奉贤、南汇和金山 3 大海域作为近海风电的示范,积极探索深远海域的风电开发,力图新增 180 万 kW 风力规模;海南省则坚持以项目为核心,积极招商促进项目落地,引进明阳、申能、上海电气、大唐、东方电气、中电建等多家海上风电企业共同发展,有望在 2023 年下半年下线第一台风电整机并实现出口,据《海南省风电装备产业发展规划(2022—2025 年)》,海南将争取到 2025 年基本形成风电装备产业集群,实现产业链 550 亿元产值。

海上风电的发展在规模上取得进展的同时更应注重其发展的科学性与合理性,以实现以最小代价、最高效率应用海上风电资源的目的。据此,海上风电的进一步发展应根据不同风电工程项目的特点,大致分为近海风力发电项目和深远海风力发电项目两条主线;未来,随着储能技术的大力发展,海上风电可结合水下压缩空气储能等技术^[51],基于不同技术路线,继续开发海上风电的应用潜力,完善配套技术、构建多技术结合的综合系统^[52-53],在满足多元应用需求的基础上实现更加高效、更加灵活的消纳。

3.1 近海风力发电项目

近海风电项目是目前建成投产海上风电项目的主要形式。根据第 2 节分析,近海风电场的电能应输送至陆上电网进行消纳,这与目前建设应用情况基本相符。未来,随着更大容量机组的投入应用,依托换流技术、直流输电技术等技术的迭代和发展,将采用更加先进的直流输电或其他更为新型的输电技术,以进一步降低建设成本、减少电能损耗,近海风力发电有望成为可再生能源的重要来源。

3.2 深远海风力发电项目

深远海风电具有更大的资源储量,但受其建设和运行成本制约还未大量应用,另外能源高输送成本和低效率也是制约其发展的重要原因。深远海风力发电未来的发展除了要着眼于提升技术、降低建设成本外,还应结合未来能源发展趋势。由于现有海上风电输电系统应用于更加深远海海域风场存在诸多问题,本文认为深远海风电能源宜采用就地转化的方法,其中一条思路就是利用深远海风电的大容量优势和海水取用便利的优势,加之目前相对成熟的电解水技术优势,就地低成本淡化海水,就地高效电解海水制氢,直接将能量密度更高的氢能源通过船运方式输入陆上,随着氢燃料电池技术

的发展,亦可使用氢气为能量来源的运输用船,真正实现无碳化“绿氢”生产^[54]。未来,随着分布式海上风电制氢技术的进一步成熟,可采用低温液化储氢的方式将氢气降温液化储存,届时液氢 20.268 K 的低温特性一方面为超导风力发电机的应用提供了基础^[55],超导风力发电机又凭借其体积小、重量轻、效率高、功率密度大等特性进一步增大容量,提高发电效率和氢气产量;另一方面也为采取更加高效的超导能源管道从而实现输电和输氢同时进行,以提供更大容量的风电传输提供了条件^[56]。长远来看,该技术更加适用于我国未来氢产业发展的布局,我国水资源丰富,海上风电制氢技术可在不利用陆地宝贵淡水资源的条件下实现氢气的大量制备,这将有利于氢燃料电池的普及和发展,推动氢能替代传统燃煤进程以及燃油工业进程,这是诸如光伏发电、水力发电等可再生发电技术不具备的。

4 结论

海上风电储量丰富,具有极大的发展前景。本文介绍了国内外海上风电的发展状况,针对海上风电场风电机组的建设方式和电能送出方式进行分析,总结包括高压交流输电技术、高压直流输电技术、FFTS技术和船运电池输电技术的优缺点及使用条件,介绍了海上风电制氢技术的原理和发展状况,对海水直接电解制氢和间接电解制氢方式进行比较,分别介绍了集中式电解制氢和分布式电解制氢的区别,介绍了氢气的储存和输送技术,对海上风电的发展前景做出展望,得到以下结论:

(1) 近海风电场的电能宜通过电能输送线路直接并入陆上电网消纳,且电能输送线路应使用柔性直流输电等性能较好的输电技术。借助其距离陆地较近的特点,可充分发挥输电线路的优势;输电线路直接与陆上电网相连,传统高压交流输电直接接入电网会提高电网安全风险,柔性直流输电技术则没有上述问题;海上风能并入电网消纳,亦能提高电网中新能源的比例,符合当前清洁能源发展趋势。

(2) 海上风电的发展趋势为场区深远海化和机组大型化。目前,几乎全部拥有海上风电开发经验的国家和地区都在积极探索开发深远海上风电资源,在深远海风力发电领域提前布局,相关企业在积极研发单机容量更大的发电机组,近年来也出现一批典型示范项目。

(3) 未来海上风电和氢能的发展紧密相连。无论是从经济性上还是从长远能源发展的角度来看,海上风电电解海水制氢都是极具竞争力的“绿氢”生产方式,伴随着未来氢能源逐渐大范围取代化石能源,海上风电制氢技术将会得到巨大的发展和应用。

参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局 科学技术部关于印发《“十四五”能源领域科技创新规划》的通知[EB/OL]. (2021-11-29)[2022-06-16]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-11/29/c_1310540453.htm.
- [2] 李志川, 胡鹏, 马佳星, 等. 中国海上风电发展现状分析及展望[J]. 中国海上油气, 2022, 34(5): 229-236.
LI Zhichuan, HU Peng, MA Jiaying, et al. Analysis and prospect of offshore wind power development in China [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 229-236.
- [3] 薛海峰, 武晓云. 基于离散多目标蜻蜓算法和改进 FCM 的风电协调输电网扩展规划研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 83-90.
XUE Haifeng, WU Xiaoyun. Extended planning of wind power coordinated transmission network based on discrete multi-objective dragonfly algorithm and improved FCM [J]. Smart Power, 2021, 49(6): 83-90.
- [4] 黄加明. 风力发电的发展现状与前景探讨[J]. 应用能源技术, 2015(4): 47-50.
HUANG Jiaming. Development status and prospect of wind power generation [J]. Applied Energy Technology, 2015(4): 47-50.
- [5] 邢耀宏. 弃风弃光储能调度优化方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
XING Yaohong. Abandon the abandoned light energy storage scheduling optimization method research [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [6] 彭莉, 仇欣. 基于山脊线提取的山地风电选址及自动布机研究[J]. 科技和产业, 2022, 22(1): 363-368.
PENG Li, QIU Xin. Research on mountain wind power location and automatic dispensing machine based on ridgeline extraction [J]. Science Technology and Industry, 2022, 22(1): 363-368.
- [7] 关晓晴, 丁霞. 河北衡水某风电项目噪音问题评估与解决方案[J]. 神华科技, 2019, 17(8): 64-68.
GUAN Xiaoping, DING Xia. Evaluation and solution of noise problem of a wind power project in Hengshui, Hebei Province [J]. Shenhua Science and Technology, 2019, 17(8): 64-68.
- [8] 李铮, 郭小江, 申旭辉, 等. 我国海上风电发展关键技术综述[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 186-197.
LI Zheng, GUO Xiaojiang, SHEN Xuhui, et al. Review on key technologies of offshore wind power development in China [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 186-197.
- [9] 黄海龙, 胡志良, 代万宝, 等. 海上风电发展现状及发展趋势[J]. 能源与节能, 2020(6): 51-53.

- HUANG Hailong, HU Zhiliang, DAI Wanbao, et al. Development status and trend of offshore wind power[J]. Energy and Energy Conservation, 2020(6): 51-53.
- [10] 戴瑜. 德国海上风电发展经验及启示[J]. 开放导报, 2021(2): 102-109.
DAI Yu. Development experience and enlightenment of German offshore wind power [J]. China Opening Journal, 2021(2): 102-109.
- [11] 江波, 肖晶晶, 闫峻明. 我国海上风电施工能力分析 [J]. 可再生能源, 2007, 25(4): 104-106.
JIANG Bo, XIAO Jingjing, YAN Junming. Analysis of offshore wind power construction capacity in our country[J]. Renewable Energy Resources, 2007, 25(4): 104-106.
- [12] GWEC. Global wind report 2022[R/OL]. (2022-04-04)[2022-06-16]. <https://gvec.net/global-wind-report-2022/>.
- [13] 福清新闻网. 亚洲单机容量最大风电机组在福清下线每年可输出 5000 万度清洁电能 [EB/OL]. (2022-02-25)[2022-06-17]. <https://www.fqxww.cn/out/20220225/S4f23u051c.shtml>.
- [14] 本刊讯. 三峡 全球单机容量最大 16 兆瓦海上风电机组下线 [J]. 中国工程咨询, 2022(12): 126.
- [15] 麦志辉, 李光远, 吴韩, 等. 海上风电安装船及关键装备技术 [J]. 中国海洋平台, 2021, 36(6): 54-58, 83.
MAI Zhihui, LI Guangyuan, WU Han, et al. Offshore wind power installation ship and key equipment technology [J]. China Offshore Platform, 2021, 36(6): 54-58, 83.
- [16] 王坤. 基于石油钻井平台的海上风电吊装技术研究 [J]. 电气时代, 2023(1): 98-103.
WANG Kun. Research on offshore wind power hoisting technology based on oil drilling platform [J]. Electric Age, 2023(1): 98-103.
- [17] 刘岚, 吴根峰, 秦小健, 等. 海上风电运维的技术现状及发展趋势 [J]. 中国水运: 下半月, 2022, 22(12): 47-49.
LIU Lan, WU Yinfeng, QIN Xiaojian, et al. Technical status and development trend of offshore wind power operation and maintenance[J]. China Water Transport: Second Half, 2022, 22(12): 47-49.
- [18] 张真, 殷爱鸣, 金绪良, 等. 海上风电腐蚀监测技术研究现状 [J]. 分布式能源, 2022, 7(5): 39-45.
ZHANG Zhen, YIN Aiming, JIN Xuliang, et al. Research status of corrosion monitoring technology for offshore wind power[J]. Distributed Energy, 2022, 7(5): 39-45.
- [19] 罗承先. 世界海上风力发电现状[J]. 中外能源, 2019, 24(2): 22-27.
LUO Chengxian. Current situation of offshore wind power generation in the world[J]. Sino-Global Energy, 2019, 24(2): 22-27.
- [20] 徐政. 海上风电送出主要方案及其关键技术问题[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 1-10.
XU Zheng. Main schemes and key technical issues of offshore wind power delivery [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 1-10.
- [21] 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(09): 3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects for flexible DC transmission of large-capacity offshore wind power [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.
- [22] 何建东, 邱情芳, 冯成. 大规模海上风电集成送出关键技术与发展趋势综述 [J]. 风能, 2022(12): 82-87.
HE Jiandong, QIU Qingfang, FENG Cheng. Summary of key technologies and development trends of large-scale offshore wind power integrated transmission[J]. Wind Energy, 2022(12): 82-87.
- [23] 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): 56-60, 55.
ZHANG Kaihua, ZHANG Zhiwei, WANG Jingqian, et al. Transmission system selection for offshore wind farm [J]. Solar Energy, 2019(2): 56-60, 55.
- [24] 朱家宁, 张诗钊, 葛维春, 等. 海上风电外送及电能输送技术综述 [J]. 发电技术, 2022, 43(2): 236-248.
ZHU Jianing, ZHANG Shita, GE Weichun, et al. Review on offshore wind power transmission and energy transmission technologies[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 236-248.
- [25] 李雪临, 袁凌. 海上风电制氢技术发展现状与建议 [J]. 发电技术, 2022, 43(2): 198-206.
LI Xuelin, YUAN Ling. Development status and suggestions of offshore wind power hydrogen production technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 198-206.
- [26] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述 [J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3691-3703.
LUO Kui, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Summary of reliability analysis and key technologies for offshore wind power grid connection[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3691-3703.
- [27] 黄宇昕, 倪世杰, 赵平, 等. 海上风电柔性直流系统变惯性协调控制策略 [J]. 分布式能源, 2022, 7(6): 1-10.
HUANG Yuxin, NI Shijie, ZHAO Ping, et al. Variable inertia coordinated control strategy for offshore wind power flexible DC system[J]. Distributed Energy, 2022, 7(6): 1-10.
- [28] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Comparison of grid-connection and transmission schemes for offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [29] 史铁, 张玉广, 宋时莉, 等. 海上风电制氢的现状和展望 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(5): 135-136, 139.
SHI Tie, ZHANG Yuguang, SONG Shili, et al. Current situation and prospect of hydrogen production from offshore wind power[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022, 40(5): 135-136, 139.
- [30] 王峰, 遯鹏, 张清涛, 等. 海上风电制氢发展趋势及前景展望 [J]. 综合智慧能源, 2022, 44(5): 41-48.

- WANG Feng, LU Peng, ZHANG Qingtao, et al. Development trend and prospect of hydrogen production from offshore wind power[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(5): 41-48.
- [31] MICHELE S, NOAH K. Optimizing hybrid offshore wind farms for cost-competitive hydrogen production in Germany[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(10): 6478-6493.
- [32] DOHYUNG J, KILWON K, KYONG-HWAN K, et al. Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation for green hydrogen production using offshore wind power plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 263: 115695.
- [33] 李佳蓉, 林今, 陈凯旋, 等. 考虑尾流效应的分布式海上风电制氢集群容量优化配置[J/OL]. *电力系统自动化*: 1-11[2023-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230220.1144.004.html>.
- LI Jiarong, LIN Jin, CHEN Kaixuan, et al. Optimal capacity allocation of distributed offshore wind power hydrogen production cluster considering wake effect[J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*: 1-11 [2023-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230220.1144.004.html>.
- [34] MARIO L, MONFORTI F A, DAVIDE A G, et al. Reversible solid oxide cell coupled to an offshore wind turbine as a poly-generation energy system for auxiliary backup generation and hydrogen production [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 14259-14273.
- [35] 柯善超, 陈锐, 陈刚华, 等. 风电耦合海水淡化制氢技术研究[J]. *分布式能源*, 2021, 6(4): 41-46.
- KE Shanchao, CHEN Rui, CHEN Ganghua, et al. Research on hydrogen production by wind power coupled seawater desalination[J]. *Distributed Energy*, 2021, 6(4): 41-46.
- [36] ZHIBIN L, XIAOBO W, HENG W, et al. Hydrogen production from offshore wind power in South China [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(58): 24558-24568.
- [37] ZHEN L, HE W, BOWEN Z, et al. Optimal operation strategy for wind-hydrogen-water power grids facing offshore wind power accommodation[J]. *Sustainability-Basel*, 2022, 14(11): 6871-6871.
- [38] WEI H, YI Z, SHI Y, et al. Case study on the benefits and risks of green hydrogen production co-location at offshore wind farms [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2265(4): 042035.
- [39] MIHIR M, MICHIEL Z, VON T D. Optimum turbine design for hydrogen production from offshore wind[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2265(4): 042061.
- [40] 郑澳辉, 曹峥, 徐玉杰, 等. 压缩空气储能驱动反渗透海水淡化系统 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1597-1606.
- ZHENG Aohui, CAO Zheng, XU Yujie, et al. Reverse osmosis desalination system driven by compressed air energy storage [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1597-1606.
- [41] 丁镠, 唐涛, 王耀萱, 等. 氢储运技术研究进展与发展趋势 [J]. *天然气化工—C1 化学与化工*, 2022, 47(2): 35-40.
- DING Liu, TANG Tao, WANG Yaoxuan, et al. Research progress and development trend of hydrogen storage and transportation technology[J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2022, 47(2): 35-40.
- [42] HIRSCHER M, YARTYS V A, BARICCO M, et al. Materials for hydrogen-based energy storage: Past, recent progress and future outlook [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 827: 153548.
- [43] BARTHELEMY H, WEBER M, BARBIER F. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 42(11): 7254-7262.
- [44] 张振扬, 解辉. 氢能利用—液氢的制、储、运技术现状及分析 [J/OL]. *可再生能源*: 1-8[2023-02-22]. <https://doi.org/10.13941/j.cnki.21-1469/tk.20220726.001>.
- ZHANG Zhenyang, XIE Hui. Hydrogen energy utilization-current situation and analysis of liquid hydrogen production, storage and transportation technology [J/OL]. *Renewable Energy Resources*: 1-8[2023-02-22]. <https://doi.org/10.13941/j.cnki.21-1469/tk.20220726.001>.
- [45] 屈莎莎, 谭粤, 李蔚, 等. 液氢储运容器用低温材料的研究进展[J]. *山东化工*, 2022, 51(20): 106-109, 113.
- QU Shasha, TAN Yue, LI Wei, et al. Research progress of cryogenic materials for liquid hydrogen storage and transportation vessels[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2022, 51(20): 106-109, 113.
- [46] NICOL B C, BORDBAR G N, GIANLUCA V. Assessment of offshore liquid hydrogen production from wind power for ship refueling [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(2): 1280-1291.
- [47] 赵延兴, 公茂琼, 周远. 气相低温高压储氢密度和能耗的理论分析及比较 [J]. *科学通报*, 2019, 64(25): 2654-2660.
- ZHAO Yanxing, GONG Maoqiong, ZHOU Yuan. Theoretical analysis and comparison of hydrogen storage density and energy consumption at low temperature and high pressure in gas phase[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(25): 2654-2660.
- [48] 桂薇. 独立式海上风电制氢工艺设计 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 40-46.
- GUI Wei. Independent offshore wind power hydrogen production process design[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(4): 40-46.
- [49] 颜畅, 黄晟, 屈尹鹏. 面向碳中和的海上风电制氢技术研究综述 [J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(5): 30-40.
- YAN Chang, HUANG Sheng, QU Yinpeng. Research review on hydrogen production technology of offshore wind power for carbon neutrality [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(5): 30-40.
- [50] 张洒洒, 杨伦庆, 刘强, 等. 广东省海上风电制氢产业发展研究 [J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(12): 185-188.
- ZHANG Sasa, YANG Lunqing, LIU Qiang, et al. Research on the development of offshore wind power hydrogen production industry in Guangdong Province [J]. *China*

- Resources Comprehensive Utilization, 2022, 40(12): 185-188.
- [51] 何青, 刘辉, 刘文毅. 风电—压缩空气储能系统火用和火用成本分析模型 [J]. 热力发电, 2016, 45(2): 34-39.
HE Qing, LIU Hui, LIU Wenyi. Exergy and exergy cost analysis model of wind power-compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 34-39.
- [52] 王志文. 水下压缩空气储能系统设计与能效分析[D]; 大连: 大连海事大学, 2018.
WANG Zhiwen. Design and energy efficiency analysis of underwater compressed air energy storage system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018.
- [53] 刘扬波, 陈俊生, 李全皎, 等. 海上风电水下压缩空气储能系统运行及变工况分析[J]. 南方电网技术, 2022, 16(4): 50-59.
LIU Yangbo, CHEN Junsheng, LI Quanjiao, et al. Operation and variable operating conditions analysis of offshore wind power underwater compressed air energy storage system[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 50-59.
- [54] 田甜, 李怡雪, 黄磊, 等. 海上风电制氢技术经济性对比分析 [J]. 电力建设, 2021, 42(12): 136-144.
TIAN Tian, LI Yixue, HUANG Lei, et al. Comparative analysis of technical and economic benefits of hydrogen production from offshore wind power [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 136-144.
- [55] 郑军. 高温超导电机技术的研究现状与应用前景浅析 [J]. 新材料产业, 2017(8): 60-65.
ZHENG Jun. Research status and application prospect of high temperature superconducting motor technology[J]. Advanced Materials Industry, 2017(8): 60-65.
- [56] 张国民, 陈建辉, 邱清泉, 等. 超导直流能源管道的研究进展 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4389-4398, 4428.
ZHANG Guomin, CHEN Jianhui, QIU Qingquan, et al. Research progress of superconducting DC energy pipeline[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4389-4398, 4428.



林玉鑫

收稿日期:2023-02-22

作者简介:

林玉鑫(1998),男,硕士研究生,研究方向为电工理论与新技术,linyuxin@mail.iee.ac.cn;

张京业(1976),男,硕士,副研究员,研究方向为电工理论与新技术。