

海上风电制氢技术发展现状与建议

李雪临, 袁凌*

(国电联合动力技术有限公司, 北京市 海淀区 100039)

Development Status and Suggestions of Hydrogen Production Technology by Offshore Wind Power

LI Xuelin, YUAN Ling*

(Guodian United Power Technology Company Ltd., Haidian District, Beijing 100039, China)

摘要: 可再生能源制氢是达成碳达峰目标、实现碳中和愿景的重要路径。海上风电制氢作为可再生能源制氢的重要组成部分, 具有巨大的市场潜力和广阔的发展前景。首先, 介绍了2种不同的海上风电制氢系统方案; 其次, 阐述了适用于海上风电应用场景的电解水制氢技术和氢储运技术, 梳理了国际海上风电制氢典型项目和我国海上风电制氢产业布局; 最后, 从氢能顶层设计、海上风电制氢技术攻关和标准体系建设等方面提出发展建议, 为我国海上风电制氢技术创新和高质量发展提供参考。

关键词: 海上风电; 氢能; 可再生能源; 绿氢; 电解水制氢

ABSTRACT: Hydrogen production by renewable energy is an inevitable path to achieve the goal of carbon peak and realize the vision of carbon neutralization. As an important part of green hydrogen, hydrogen production by offshore wind power has huge market potential and broad development prospects. Firstly, two different schemes of hydrogen production system by offshore wind power were described. Then, the hydrogen production technologies by water electrolysis and hydrogen storage and transportation technologies suitable for offshore wind scenarios were stated. The typical international hydrogen production projects by offshore wind power and the layout of China's hydrogen production industry by offshore wind power were untangled. Finally, the development suggestions were put forward from the aspects of top-level design, tackling key technologies and standard system construction, so as to provide reference for the technological innovation and high-quality development of

offshore wind power hydrogen production in China.

KEY WORDS: offshore wind power; hydrogen energy; renewable energy; green hydrogen; hydrogen production by water electrolysis

0 引言

氢能是极具发展潜力的清洁能源, 被越来越多的国家上升至国家能源战略高度^[1]。“双碳”目标下, 氢能作为清洁、高效、灵活的二次能源, 是实现交通运输、工业和建筑等领域大规模深度脱碳的重要路径^[2-3]。同时, 氢能与可再生能源相辅相成, 是长周期、高安全的可再生能源储能载体, 共同在能源结构调整中发挥重要作用^[4-5]。

按照生产来源和制取过程中的碳排放强度, 氢被分为灰氢、蓝氢和绿氢。其中: 灰氢指由天然气、煤等化石燃料生产的氢气, 制取技术成熟, 成本最低, 但碳排放强度高, 在全球氢源供应中占比约96%^[6]; 蓝氢指工业副产氢, 或在灰氢生产环节中加入碳捕获与封存技术, 能够减少90%左右的碳排放, 是从灰氢向绿氢的过渡; 绿氢主要指利用风能、太阳能等可再生能源电解水制氢和核能制氢, 目前技术成熟度较低, 成本最高, 但真正实现了生产源头的无碳化, 是未来可持续发展的必然趋势^[7-8]。根据中国氢能联盟数据, 我国目前氢源供给中约有77.3%来自于灰氢, 21.2%来自于工业副产氢, 仅1.5%源于可再生能源电解水制氢^[9]。但到2050年, 可再生能源电解水制氢的占比将达到70%^[10], 绿氢市场前景广阔。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1506700); 国家能源投资集团有限责任公司科技项目(GJNY-18-11)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2020YFB1506700); Science and Technology Project of CHN ENERGY (GJNY-18-11).

海上风电制氢是未来绿氢生产的主力军之一^[11]。全球范围内已经公布的电解水制氢项目储备总规模达到3 200万kW,约有一半来自于海上风电制氢。其中,德国、荷兰、丹麦等欧洲国家均已具有百万千瓦级以上的海上风电制氢规划。我国海上风电发展势头迅猛,国家能源局发布的最新数据显示,2021年我国风电和光伏发电新增装机容量达到1.01亿kW,其中风电新增装机容量达到4 757万kW。海上风电异军突起,全年新增装机容量为1 690万kW,是此前累计建成总规模的1.8倍,目前累计装机容量达到2 638万kW,超过英国,跃居世界第一,接近全球海上风电累计装机容量的一半。预计至2030年年底,中国海上风电累计并网装机容量将达到97 GW,平准化度电成本将比2021年水平下降46%。

海上风电制氢是解决海上风电大规模并网消纳难、深远海电力送出成本高等问题的有效手段,我国目前尚处于探索起步阶段,缺乏产业顶层设计、示范项目经验和成熟的商业模式,急需借鉴国际海上风电制氢发展战略规划和项目开发经验,因地制宜探索科学合理的海上风电制氢系统方案,开展关键核心技术的国产化攻关,完善海上风电制氢配套基础设施建设。为此,本文从并网型陆上电解水制氢和离网型海上电解水制氢系统方案的发展趋势分析入手,阐述电解水制氢和氢储运技术的主要类别、对海上风电的适用性,以及最新研究进展和趋势,介绍国外已开展的典型海上风电制氢项目和我国海上风电制氢产业布局情况,并提出产业发展建议,以期为我国海上风电制氢技术创新和高质量发展提供参考。

1 海上风电制氢系统方案

海上风电制氢系统主要由海上风力发电机组、电解水制氢系统和氢储运系统组成。按照电解水制氢系统所处的位置不同,主要有2种不同的解决方案:一种是陆上电解水制氢方案,如图1所示;另一种是海上电解水制氢方案。而根据海上电解水制氢系统形式的不同,后者又可进一步分为集中式电解水制氢和分布式电解水制氢2种系统方案^[12],分别如图2、3所示。

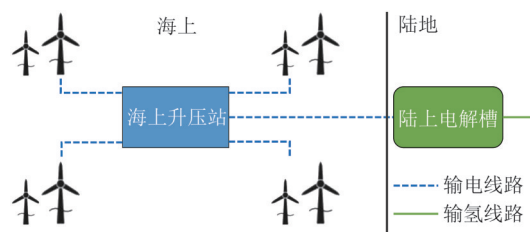


图1 陆上电解水制氢方案

Fig. 1 Hydrogen production scheme by onshore water electrolysis

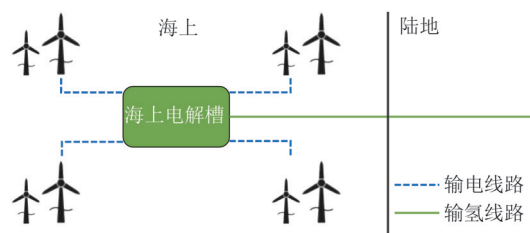


图2 海上集中式电解水制氢方案

Fig. 2 Centralized hydrogen production scheme by offshore water electrolysis

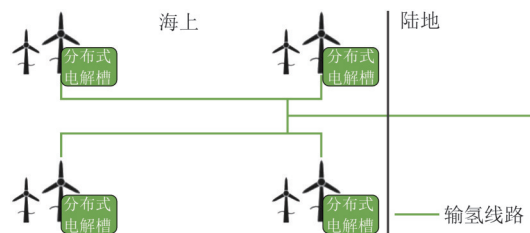


图3 海上分布式电解水制氢方案

Fig. 3 Distributed hydrogen production scheme by offshore water electrolysis

对于陆上电解水制氢方案,海上风电机组产生的电力经海底电缆、升压站等设施输送至陆上电解水制氢系统,其优点是具有较高的灵活性,制氢系统可以作为电网调峰的有效手段^[13],在陆上完成氢气的制取和储运,也具有系统安装维护方便的优势。但是在我国海上风电开发不断向远海深入的必然趋势下,海底电缆成本及海上升压站或换流站的建设运维成本不断增加,且在电力传输过程中存在一定的损耗。对于海上高压交流(high voltage alternating current, HVAC)输电系统,当风电场装机容量500~1 000 MW、离岸距离50~100 km时,海缆损耗为1%~5%。对于海上高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电系统,考虑到不同的风电场容量和离岸距离,海缆损耗为2%~4%^[14-15]。相比之下,海上输气管道的传输

损耗低于0.1%，同时，与传输相同能量的等效海缆相比，海上管道的建设成本更低^[16]。因此，海上电解水制氢方案受到广泛关注，海上风电制氢开始从输电向输氢方向转变。

在海上集中式电解水制氢方案中，海上风电机组产生的电力通过风电场集电海缆汇集到海上电解水制氢平台，在该平台完成制氢后，经由输气管道传输至岸上^[17-18]。其优点是可以借助已有的海上油气平台或油气管道，将油气平台改造为制氢平台，有效降低项目投资成本。而在海上分布式电解水制氢方案中，不需要建设海上电解水制氢平台，取而代之的是在每台风电机组塔底平台上安装模块化的制氢设备，直接在风电机组侧制氢，产生的氢气通过小尺寸输气管道汇集到收集歧管，在这里压缩或直接通过更大直径管道传输至岸上。该方案最大程度地用输氢管道替换了海上输电设施，降低了能量送出成本，但风电机组侧模块化电解水制氢技术还有待进一步优化。

2 国内外海上风电制氢技术发展现状

2.1 海上风电电解水制氢技术

目前电解水制氢主要分为碱性电解水制氢、质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解水制氢、固态氧化物电解水制氢和固体聚合物阴离子交换膜电解水制氢4种技术路线^[19]。其中：固态氧化物电解水制氢效率最高^[20]，但工作温度高(700~900℃)，寿命较低，电解槽启停不便，目前仍处于初期示范阶段，不适合应用于海上风电制氢；固体聚合物阴离子交换膜电解水制氢工作温度较低(40~60℃)，能够实现快速启停，现尚处于实验室研发起步阶段，短期内无法应用于海上风电制氢^[21]。目前，可用于海上风电应用场景的电解水制氢技术主要是碱性电解水制氢和PEM电解水制氢技术。

碱性电解水制氢是已充分产业化的成熟技术，工作温度适中(70~90℃)，但启停响应时间较长，电流密度较低，存在渗碱污染环境问题，且需要对碱性流体进行复杂的维护^[22]。此外，生产氢气的输出压力较低，储运时需要额外加压，一定程度上削弱了初期投资成本较低的优势。综合来看，

碱性电解水制氢技术更适用于陆上电解水制氢方案。

PEM电解水制氢是未来极具发展前景的绿氢制取技术^[23]，现已进入初步商业化阶段，与碱性电解水制氢相比，工作温度更低(50~80℃)，启动时间更快，电流密度增加到5倍，运行更灵活，利于快速变载，与波动性和间歇性较强的海上风电具有良好的匹配性。而且电解槽结构紧凑，占地面积更小，氢气输出压力更高，无腐蚀性介质污染，更加安全可靠，因此特别适合应用于海上集中式或分布式电解水制氢。PEM电解水制氢的主要瓶颈在于成本和寿命，因其电极、涂层及催化剂多采用贵金属，目前价格还是比碱性电解水制氢高，并且寿命偏低。但随着对PEM电解槽的贵金属催化剂、阳极扩散层、双极板等高成本部件的深入研究和推广应用，其成本有望快速下降。刘一蒲等^[24]针对PEM电解水技术商用析氧催化剂二氧化铈中稀有金属铈储量低、成本高的问题，开展了高活性兼具高稳定性的新型低铈催化剂研究，重点研究了异原子掺杂 $\text{IrO}_2(\text{IrO}_x)$ 基催化剂、钙钛矿型铈基催化剂及烧绿石型铈基催化剂3类常见低铈催化剂，及其在材料结构特征与催化本征性能方面的关联性。范芷萱等^[25]针对PEM电解槽常用的镀铂多孔钛板阳极扩散层与双极板成本高昂的问题，利用涂敷-焙烧还原法在钛纤维毡表面制备铈钨混合氧化物涂层，将其应用于PEM电解阳极扩散层，并分析了涂层最佳组成比例、钛纤维毡厚度及膜电极组件制备方法对电解池性能的影响，验证了贵金属氧化物涂层在降低PEM电解槽成本方面的可行性和有效性。Tajuddin等^[26]开发了一种替代铂基催化剂的低成本、耐腐蚀、高稳定性的非贵金属催化剂，采用石墨烯包覆的NiMo合金作为PEM电解槽的非贵金属催化剂电极，通过调节氮掺杂石墨烯的层数为4~8层，在酸性环境中实现了阴极催化活性和化学稳定性之间的平衡，为PEM电解槽中贵金属催化剂的低成本替代提供了一条新途径。

国内外研究者对PEM电解水制氢的技术经济性也进行了对比分析和预测。郭秀盈等^[27]对比了碱性与PEM电解水制氢的平准化成本，研究了规

模效应、氢气压力、压缩与液化及可再生能源波动性对2种制氢方式的影响。结果表明:随着低功率(<20%额定功率)波动性的增加,PEM的平准化成本可以低于碱性电解水制氢。Lucas等^[28]针对位于葡萄牙的全球首个漂浮式海上风电场WindFloat Atlantic,采用PEM电解槽制氢进行了技术经济性分析,考虑了2种不同场景:场景1,当前25.2 MW装机容量,无输氢基础设施;场景2,未来150 MW装机容量,有输氢基础设施。结果表明:场景2是能够盈利的解决方案,电解槽容量与风电场容量之比对经济性有重要影响,该比例约30%时具有最低的制氢成本。D'Amore-Domenech等^[29]基于5种多准则决策方法,采用由社会、环境和经济性等因素构成的指标体系,对海上直接电解水制氢、碱性电解水制氢、PEM电解水制氢和固态氧化物电解水制氢4种技术路线进行了经济性评估,结果表明:PEM电解水制氢技术综合评分最高;碱性电解水制氢经济性表现最佳,但因强腐蚀性电解液潜在的泄漏风险,其在社会和环境方面评分较低。

2.2 海上风电制氢储运技术

储氢技术主要分为物理储氢、化学储氢和多孔材料吸附储氢3类^[30]。目前,应用于海上风电制氢的储氢技术主要是物理储氢。物理储氢主要包括高压气态储氢、低温液态储氢和低温高压储氢3种方式^[31]。

高压气态储氢技术成熟度高,存储压力一般是20~100 MPa,但储氢密度较低。高压气态储氢具体又分为2种,一种是成熟商业化的压力容器存储,其技术挑战在于压力容器的安全性设计、材料选择和制造工艺。为了满足商业化储氢密度要求,通常需要采用全复合材料压力容器,该容器内部采用塑料或金属衬里,外部采用聚合物碳纤维复合材料缠绕制成,工作压力可以达到70 MPa^[32]。此外,采用该储氢方式时还应关注可能引起的氢脆和氢腐蚀问题^[33-34]。另一种是采用地下天然结构(如含水层或盐穴)储氢^[35-36],可解决海上储氢空间成本高的问题,被认为是储存大量气态氢最具成本效益的方式。其中,含水层储氢的密封性不如盐穴,因氢气分子小,导致泄漏率明

显增加。盐穴是比较理想的地下储氢结构,具有施工成本低、泄漏率低、提取和注入速度快,以及细菌活动少(某些细菌会分解氢,造成氢纯度降低)等优点;其缺点是受到地质条件限制,无法大范围推广。目前,在美国、欧盟多个国家已经开展了盐穴储氢的研究和实际应用。

低温液态储氢类似于液化天然气的制备和存储,-253℃的低温使氢液化,密度高达70 kg/m³^[37],但能耗和成本较高。目前,欧美和日本的液氢储运技术已进入商业化应用阶段,已开展了利用海上风电在海上制备液氢运回陆上或为船舶补充燃料的可行性研究^[38]。而国内受核心技术与装备依赖进口以及高成本的限制,液氢还是主要应用于航天领域。

低温高压储氢技术则同时采用了降温和压缩2种处理方式,相比于高压气态储氢,提高了储氢密度,相比于低温液态储氢,降低了能耗^[39],但目前该技术尚处于研发阶段。

另外,利用海上油气平台及管道基础设施,将氢气与天然气混合输送至陆上,在用氢端对富氢天然气进行分离和提纯,是实现快速、低成本储运氢的重要方向。据研究,在现有天然气管道中掺混10%左右的氢气,其对管道的影响可以忽略,如荷兰的PosHYdon项目。从富氢天然气中分离出氢气的方法主要有变压吸附法、膜分离方法和电化学分离法3种^[40]。其中,变压吸附法和膜分离方法都能实现99.99%纯度的氢气提取,变压吸附技术成熟,但设施占地面积大;膜分离技术经济性较好,设施占地面积小,但高运行温度(≥300℃)限制了它的应用^[41]。综合2种方法优势的集成膜吸附技术是用氢端分离氢气的技术发展方向之一^[42]。

2.3 国外海上风电制氢典型项目

国外海上风电制氢的典型项目主要集中在欧洲^[43-46],北海海域有大量的已建或待建海上风电项目作为支撑,最先进的绿氢全产业链技术在这里持续孵化。

荷兰的NortH2项目是截至目前全球规模最大的海上风电制氢项目之一,该项目计划到2030年在北海建成3~4 GW的海上风电场,完全用于绿

氢生产，并在荷兰北部港口埃姆斯哈文或其近海区域建设一座大型电解水制氢站；计划到2040年实现10 GW海上风电装机规模和年产100万t绿氢的目标。

类似地，德国的AquaVentus项目旨在2035年就达成10 GW海上风电装机和年产100万t绿氢的目标。该项目包括了关于海上绿氢“制储输用”全产业链上的多个子项目，其中第1个子项目AquaPrimus计划于2025年在德国赫尔戈兰海岸附近安装2个14 MW的海上风电机组，每台风电机组的基础平台上都安装独立的电解水制氢装置；AquaSector子项目建设德国首个大型海上氢园区，计划到2028年安装300 MW的电解槽，年产2万t海上绿氢，并通过AquaDuctus子项目铺设的海底管道将绿氢输送到赫尔戈兰。

荷兰PosHYdon项目是全球首个海上风电制氢示范项目，为了实现海上风电、天然气和氢能综合能源系统的一体化运行，选择海王星能源公司(Neptune Energy)完全电气化的Q13a-A平台作为试点，计划安装1 MW电解槽，验证海上风电制氢的可行性，并将氢气与天然气混合，通过现有的天然气管道馈入国家天然气管网。

欧洲OYSTER项目在欧盟委员会推出的“燃料电池和氢能联合计划”资助下，开展了将海上风电机组与分布式电解槽直接连接，以及将绿氢运输到岸的可行性研究。该电解槽系统采用紧凑型设计，集成海水淡化和处理工艺并安装在海上风电机组基础平台上。该项目计划于2024年底投产。

丹麦风电巨头沃旭能源宣布了SeaH2Land项目，计划到2030年建造总容量1 GW的电解槽，并与荷兰北海计划中2 GW海上风电场直接连接，生产的绿氢将通过位于荷兰和比利时之间的跨境管道进行分配。SeaH2Land一期工程包括500 MW的电解槽容量，第2阶段将扩展到1 GW，届时需要连接到国家氢主干网。

德国Westküste 100项目于2020年从德国联邦经济和能源部获得了3 000万欧元的资金支持，其目标是通过海上风电制氢使工业、航空、建筑和供暖在未来更加可持续。该项目第1阶段计划建

造30 MW电解槽，最终目标是实现包括700 MW电解槽系统在内的大规模行业耦合。

西门子能源牵头一个为期4年的Power-to-X研究项目，名为“H2Mare”，旨在研究海上风电就地转化低碳能源的全产业链，具体包含4个子项目，其中，OffgridWind子项目研究海上风电机组，H2Wind子项目开发一种适合近海环境并能够适配海上风电机组的PEM电解水制氢系统。该项目获得了德国联邦教育及研究部1亿欧元的资金支持。

瑞典大瀑布集团Vattenfall正在加紧开展名为Hydrogen Turbine 1 (HT1)的海上风电就地制氢示范项目，该项目计划在欧洲海上风电部署中心B06号风电机组的过渡段扩展平台上放置长度约12 m的集装箱，集装箱内安装一套氢电解槽、海水淡化设备以及压缩机，产生的氢气再通过海底管线输送到岸上。该项目预计最早在2024年投入运营，运营时间为8~10 a。

挪威Deep Purple项目是全球首个漂浮式海上风电制氢项目，旨在利用漂浮式海上风电技术生产绿氢并储存在海底储罐中，从而使用氢燃料电池替代大型燃气轮机，为石油天然气平台提供稳定的可再生能源供应，并为其他行业提供氢气，计划到2024年基本实现挪威油气生产的零排放。

英国Dolphyn项目是目前规模最大的漂浮式海上风电分布式制氢项目，计划在北海开发4 GW漂浮式海上风电场，拟采用10 MW机型，每个漂浮式平台都安装单独的电解槽，产生的氢气通过管道外送，不需要海底电缆或海上制氢站。风电机组内部配备足够的备用电源，以保证检修、停机后重启的需求。该项目计划于2026年前实现在10 MW机型上制氢。

2.4 国内海上风电制氢产业布局

我国海上风电制氢从2020年起步^[47-48]，但在“双碳”目标和相关政策指引下，各级政府以及企业加快相关布局，海上风电制氢项目也正蓄势待发。

地方规划方面，广东省印发《促进海上风电有序开发和相关产业可持续发展的实施方案》，提出推动海上风电项目开发与海洋牧场、海水制氢

等相结合；福建省漳州市印发《漳州市国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》，提出将加快开发漳州外海浅滩千万千瓦级海上风电，布局海上风电制氢等氢能产业基地，发展氢燃料水陆智能运输装备，构建形成“制氢—加氢—储氢”的产业链；《浙江省可再生能源发展“十四五”规划》提出，集约化打造海上风电+海洋能+储能+制氢+海洋牧场+陆上产业基地的示范项目；《山东省能源发展“十四五”规划》提出，积极推进可再生能源制氢和低谷电力制氢试点示范，培育风光+氢储能一体化应用模式。

企业布局方面，国家能源投资集团有限责任公司与山东省港口集团签署战略合作协议，联合探索“海上风电+海洋牧场+海水制氢”融合发展模式；如东县人民政府、国家能源集团国华能源投资有限公司、国家能源集团北京低碳清洁能源研究院、江苏中天科技股份有限公司签订氢能产业项目四方战略合作协议，共同打造绿氢产业链；华能集团与漳州市政府签署协议，将着力引进海上风电、氢能应用等相关装备制造龙头企业；中国海洋石油总公司与林德合作并成立氢能运输联盟，与同济大学共同开展海上风电制氢工艺流程及技术经济可行性研究；中国船舶集团风电发展有限公司与大船集团、中国科学院大连化学物理研究所、国创氢能科技有限公司四方签约，共同推进海上风电制氢/氨及其储运技术与装备的研发及产业化；青岛深远海200万kW海上风电融合示范风电场项目将推动海上风电+制氢储氢融合试验与示范应用；大连市太平湾与三峡集团、金风科技联合宣布将共同建设新能源产业园，重点发展海上风电、氢能为主要的新能源产业，计划通过风电制氢、储氢、运氢以及氢能海洋牧场利用等培育氢能产业链条。

3 中国海上风电制氢产业发展建议

中国海上风电制氢市场潜力巨大，是促进海上风电产业可持续发展、构建现代化能源系统的重要模式，地方政府和企业积极性较高，但目前实现商业化发展仍需要解决政策规划、技术突破、

产业配套、经济可行等多方面问题。为了推动中国海上风电制氢产业高质量发展，提出以下建议：

1) 加强氢能产业顶层设计，广泛参考和借鉴国际上已发布的氢能发展战略、规划或路线图，制定我国的国家氢能战略及发展路线图，进一步健全完善氢能产业政策和监管法规，明确海上风电制氢的发展目标及实现路径，引导海上风电制氢行业有序发展，避免重复建设和盲目竞争。

2) 加强海上风电制氢“制储输用”关键核心技术攻关，加快海上低成本、模块化PEM电解水制氢技术，以及高可靠、低成本储运技术研究、示范、规模化应用，推动产学研用相结合，以龙头企业统筹跨行业资源联合攻关，强化专业人才培养，形成具有自主知识产权的技术创新体系。

3) 建立健全海上风电制氢标准和检测体系，加强海上风电制氢全产业链管理部门的统筹协调，建立完整、先进的海上风电制氢全链条标准规范，完善海上风电制氢系统安全体系。充分利用现有海上油气基础设施，稳妥有序推进海上风电制氢基础设施建设，切实提高氢能制备和储运的安全性和经济性。

4 结论

海上风电与氢能融合发展是规模化生产绿氢的主力军之一，也是深远海风电开发的破局关键。随着我国海上风电向远海集中连片规模化开发，离网型的集中式或分布式制氢方案是未来发展的主要方向。

电解水制氢技术和氢储运技术是海上风电制氢系统的关键核心技术。其中，PEM电解水制氢技术因响应速度快、占地面积小、与可再生能源匹配性好等优势，而成为海上风电制氢技术发展的热点。氢储运技术方面，物理储氢是应用于海上风电场景的主要方式。其中，高压气态储氢是目前最成熟的储氢技术，压力容器的安全性设计、材料选择和制造工艺是该项技术的研究重点，而地下天然结构高压气态储氢则被认为是大规模储氢的最佳方式。另外，利用现有海上油气基础设施，混合输送氢气与天然气是快速、低成本储运

氢的重要方式。我国海上风电制氢处于起步阶段,亟需在高效、低成本PEM制氢技术,物理储氢国产化自主研发,以及对富氢天然气的高纯度、低成本分离技术等方面大力开展创新性研究。

从2019年起,以欧洲为主的多个国家已经制定了氢能发展战略规划或路线图,并在此基础上启动了多个海上风电制氢项目,聚焦固定式及漂浮式海上风电与氢能耦合场景下的氢气制取、储运、使用技术的提升以及示范项目的稳步推进。我国海上风电装机规模位列全球首位,且将保持快速发展态势,国家、地方及企业也在加快对氢能技术和产业链的布局,海上风电制氢发展前景广阔。因此,建议加强氢能产业顶层设计,加大海上风电制氢全链条核心技术自主攻关力度,建立健全海上风电制氢标准体系,完善基础设施建设,保障海上风电制氢产业安全高质量发展。

参考文献

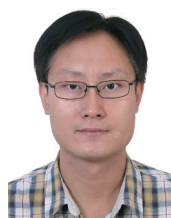
- [1] 杨浩. 氢在能源转型变革中的潜在优势分析[J]. 分布式能源, 2020, 5(3): 47-54.
YANG H. Potential advantages of hydrogen in transformation of energy resources[J]. Distributed Energy, 2020, 5(3): 47-54.
- [2] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 54-64.
JIANG H L, LIU Y X, FENG Y M, et al. Analysis 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.
- [3] 李健强, 余光正, 汤波, 等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 11-20.
LI J Q, YU G Z, TANG B, et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 11-20.
- [4] 干勇. 21世纪将是氢能时代[J]. 中国石油企业, 2021(3): 10-12.
GAN Y. The 21st century will be the era of hydrogen energy[J]. China Petroleum Enterprise, 2021(3): 10-12.
- [5] 王林, 曹宇. 国外氢能利用情况及对我国发展的启示[J]. 上海节能, 2021(5): 444-448.
WANG L, CAO Y. Utilization of hydrogen energy and its enlightenment to China's development[J]. Shanghai Energy Conservation, 2021(5): 444-448.
- [6] International Renewable Energy Agency. Hydrogen from renewable power: technology outlook for the energy transition[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2018.
- [7] 朱凯, 张艳红. “双碳”形势下电力行业氢能应用研究[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 65-72.
ZHU K, ZHANG Y H. Research on application of hydrogen in power industry under “double carbon” circumstance[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 65-72.
- [8] 雷超, 李韬. 碳中和背景下氢能利用关键技术及发展现状[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 207-217.
LEI C, LI T. Key Technologies and development status of hydrogen energy utilization under the background of carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 207-217.
- [9] 中国氢能联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书2020[R]. 北京: 中国氢能联盟, 2020.
National Alliance of Hydrogen and Fuel Cell. White paper on China's hydrogen energy and fuel cell industry 2020[R]. Beijing: National Alliance of Hydrogen and Fuel Cell, 2020.
- [10] Hydrogen Council, McKinsey Company. Hydrogen insights: a perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness[R]. Brussels: Hydrogen Council, 2021.
- [11] 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.
- [12] CRIVELLARI A, COZZANI V. Offshore renewable energy exploitation strategies in remote areas by power-to-gas and power-to-liquid conversion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45: 2936-2953.
- [13] CALADO G, RUI C. Hydrogen production from offshore wind parks: current situation and future perspectives[J]. Applied Sciences, 2021, 11(12): 5561.
- [14] NEGRA N B, TODOROVIC J, ACKERMANN T. Loss evaluation of HVAC and HVDC transmission solutions for large offshore wind farms[J]. Electric

- Power Systems Research, 2006, 76: 916-927.
- [15] PAPADOPOULOS A, RODRIGUES S, KONTOS E, et al. Collection and transmission losses of offshore wind farms for optimization purposes[C]//Proceedings of the 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Montreal, Canada: IEEE, 2015: 6724-6732.
- [16] MIAO B, GIORDANO L, CHAN S H. Long-distance renewable hydrogen transmission via cables and pipelines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(36): 18699-18718.
- [17] FRANCO B A, BAPTISTA P, RUI C N, et al. Assessment of offloading pathways for wind-powered offshore hydrogen production: Energy and economic analysis[J]. Applied Energy, 2021, 286(21): 116553.
- [18] BABARIT A, GILLOTEAUX J C, CLODIC G E, et al. Techno-economic feasibility of fleets of far offshore hydrogen-producing wind energy converters[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(15): 7266-7289.
- [19] ASGHARI E, ABDULLAH M I, FOROUGHI F, et al. Advance, opportunities, and challenges of hydrogen and oxygen production from seawater electrolysis: an electrocatalysis perspective[J]. Electrochemistry, 2022, 31: 100879.
- [20] LIU Z, HAN B B, LU Z Y, et al. Efficiency and stability of hydrogen production from seawater using solid oxide electrolysis cells[J]. Applied Energy, 2021, 300: 117439.
- [21] 徐硕, 余碧莹. 中国氢能技术发展现状与未来展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(6): 1-12.
- XU S, YU B Y. Current development and prospect of hydrogen energy technology in China[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 23(6): 1-12.
- [22] 孙鹤旭, 李争, 陈爱兵, 等. 风电制氢技术现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4071-4083.
- SUN H X, LI Z, CHEN A B, et al. Current status and development trend of hydrogen production technology by wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4071-4083.
- [23] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 146-152.
- YU H M, SHAO Z G, HOU M, et al. Hydrogen production by water electrolysis: progress and suggestions[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 146-152.
- [24] LIU Y P, LIANG X, CHEN H, et al. Iridium-containing water-oxidation catalysts in acidic electrolyte[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2021, 42(7): 1054-1077.
- [25] 范芷萱, 俞红梅, 姜广, 等. PEM水电解池低成本阳极钛纤维毡扩散层研究[J]. 电源技术, 2020, 44(7): 933-936.
- FAN Z X, YU H M, JIANG G, et al. A low-cost Ti felt anode gas diffusion layer for PEM water electrolysis [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(7): 933-936.
- [26] TAJUDDIN A A H, ELUMALAI G, XI Z, et al. Corrosion-resistant non-noble metal electrodes for PEM-type water electrolyzer[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46: 38603-38611.
- [27] 郭秀盈, 李先明, 许壮, 等. 可再生能源电解制氢成本分析[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 688-695.
- GUO X Y, LI X M, XU Z, et al. Cost analysis of hydrogen production by electrolysis of renewable energy [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 688-695.
- [28] LUCAS T R, FERREIR A F, PEREIRA R, et al. Hydrogen production from the wind float Atlantic offshore wind farm: a techno-economic analysis[J]. Applied Energy, 2022, 310: 118481.
- [29] D'AMORE-DOMENECH R, SANTIAGO O, LEO T J. Multicriteria analysis of seawater electrolysis technologies for green hydrogen production at sea[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 133: 110166.
- [30] 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.
- [31] BARTHELEMY H, WEBER M, BARBIER F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 42(11): 7254-7262.
- [32] AZEEM M, YA H H, ALAM M A, et al. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 49: 103468.
- [33] ABDALLA A M, HOSSAIN S, NISFINDY O B, et al. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: a review[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165: 602-627.
- [34] MORADI R, GROTH K M. Hydrogen storage and delivery: review of the state of the art technologies and

- risk and reliability analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(23): 12254-12269.
- [35] MUHAMMED N S, HAQ B, SHEHRI D A, et al. A review on underground hydrogen storage: insight into geological sites, influencing factors and future outlook[J]. Energy Reports, 2022, 8: 461-499.
- [36] ELBERRY A M, THAKUR J, SANTASALO-AARNIO A, et al. Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46: 15671-15609.
- [37] ANDERSSON J, GRÖNKVIST S. Large-scale storage of hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(23): 11901-11919.
- [38] BONACINA C N, GASKARE N B, VALENTI G. Assessment of offshore liquid hydrogen production from wind power for ship refueling[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022(47): 1279-1291.
- [39] 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 Y X, GONG M Q, ZHOU Y. The storage of hydrogen based on low-temperature and high-pressure method[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(25): 2654-2660.
- [40] FAYE O, SZPUNAR J, EDUOK U. A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022(47): 13771-13802.
- [41] LU H T, LI W, MIANDOAB E S, et al. The opportunity of membrane technology for hydrogen purification in the power to hydrogen (P2H) roadmap: a review[J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2021, 15(3): 464-482.
- [42] LIEMBERGER W, HALMSCHLAGER D, MILTNER M, et al. Efficient extraction of hydrogen transported as co-stream in the natural gas grid: the importance of process design[J]. Applied Energy, 2019, 233/234: 747-763.
- [43] LEE J, ZHAO F. Global offshore wind report 2021 [R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2021.
- [44] 孙一琳. 海上风电+制氢, Gigastack 项目进展如何? [J]. 风能, 2020(3): 48-50.
- SUN Y L. Offshore wind power + hydrogen production: how is the Gigastack project going? [J]. Wind Energy, 2020(3): 48-50.
- [45] 吴瑾, 焦文强, 田倩, 等. 海洋氢能发展现状综述 [J]. 科技风, 2021(19): 129-131.
WU J, JIAO W Q, TIAN Q, et al. Review on the development of marine hydrogen energy[J]. Technology Wind, 2021(19): 129-131.
- [46] WU Y N, LIU F T, WU J H, et al. Barrier identification and analysis framework to the development of offshore wind-to-hydrogen projects[J]. Energy, 2022, 239: 122077.
- [47] 张长令. 国外氢能产业导向、进展及我国氢能产业发展的思考[J]. 中国发展观察, 2020(1): 116-119.
ZHANG C L. The orientation and progress of hydrogen energy industry abroad and thoughts on the development of hydrogen energy industry in China[J]. China Development Observation, 2020(1): 116-119.
- [48] 张丽, 陈硕翼. 风电制氢技术国内外发展现状及对策建议[J]. 科技中国, 2020(1): 13-16.
ZHANG L, CHEN S Y. Development status and countermeasures of hydrogen production technology by wind power at home and abroad[J]. Science and Technology in China, 2020(1): 13-16.

收稿日期: 2022-02-10.

作者简介:



李雪临

李雪临(1981), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为海洋能源综合利用, xuelin.li.e@chnenergy.com.cn;



袁凌

袁凌(1973), 女, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为新能源发电技术与装备, 本文通信作者, ling.yuan.g@chnenergy.com.cn。

(责任编辑 尚彩娟)