

独立式海上风电制氢工艺设计

桂薇^{1,2,✉}

(1. 惠生(南通)重工有限公司, 江苏南通 226009; 2. 上海惠生海洋工程有限公司, 上海 201210)

摘要: [目的] 文章旨在为充分利用深远海优质的风资源, 解决海上风电的弃风问题以及对未来新能源船舶提供一种可能的海上氢气燃料供给方式。[方法] 论述了一种依托于独立式海上平台的海上风电耦合海水制氢技术的工艺流程, 主要对关键设备——质子交换膜电解水制氢系统、氢气压缩机、氢气储罐及部分辅助设备的工艺设计问题进行阐述, 简略说明了制氢平台的控制方案, 并且对其经济性进行了初步分析。[结果] 从工艺设计的角度对海上风电制氢平台上的设计仅在较为前期的阶段, 关键设备的供应链市场处于发展初级时期且大部分供应商未进军海工市场, 表明现今海上浮式制氢的工程设计到工程化还不成熟且可再生能源制氢经济性较差。[结论] 目前, 海上风电还无法做到平价上网, 海洋风电耦合氢能应用还需要一个长期过程, 进行工程试验是大规模工程化的前提。

关键词: 氢气; 风电制氢; 工艺流程; 工艺设计; 海洋工程

中图分类号: TK91; TQ116.2 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)04-0040-07

开放科学(资源服务)二维码:



Process Design of Independent Offshore Wind Power Hydrogen Production

GUI Wei^{1,2,✉}

(1. Wison (Nantong) Heavy Industry Co., Ltd., Nantong 226009, Jiangsu, China;

2. Shanghai Wison Offshore & Marine Co., Ltd., Shanghai 201210, China)

Abstract: [Introduction] The research aims to make full use of the high quality wind resources in the deep sea, solve the problem of wind abandonment of offshore wind power, and provide a possible offshore hydrogen fuel supply for future new energy ships. [Method] The process flow of offshore wind power coupled seawater hydrogen production technology relying on an independent offshore platform was discussed. The key equipment proton exchange membrane water electrolysis hydrogen production system, hydrogen compressor, hydrogen storage tank and some auxiliary equipment process design problems were described, with a brief description of the control scheme of hydrogen production platform, and a preliminary analysis of its economy. [Result] From the angle of process design, the design of offshore wind hydrogen production platform just in a relatively early stage. The supply chain of key equipment is in the initial development period and most of the suppliers did not enter the marine market, suggesting that current process from engineering design to the engineering of offshore floating hydrogen production is not yet mature and the economic benefit of hydrogen production from renewable energy is low. [Conclusion] At the moment, offshore wind power cannot be connected to the grid at a reasonable price, and the application of coupled hydrogen energy of offshore wind power still has a long way to go. Engineering tests are the prerequisite for large-scale engineering.

Key words: hydrogen; wind power hydrogen production; process flow; process design; offshore engineering

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着日益突出的环境变化问题, 各国逐步开始构建新的全球性能源网络, 推进第三次能源技术革

命^[1-2]。而清洁能源与储能技术相结合的模式也在我国有许多的工程项目落地^[3]。为配合国家“双碳”战略, 并达到对部分深远海地区发展潜力较大的风能资源的有效利用^[4], 将能量密度高、相对独立、无

污染的氢能技术引入海上风电系统,可实现电解水制氢的大规模储能,提高常规输电并网的经济性及稳定性,加深能源产业的联系^[4-5]。目前,深远海海上风电仍处于发展阶段,还无法做到平价上网^[6],再加上可再生能源制氢相较于传统制氢成本偏高^[7],氢能产业现大部分处于国家补贴的政策下。由于绿氢从政治、能源转型等层面而言整体价值较高,且随着制氢设备国产化及规模化的逐步提高,未来制造成本的降低必将会推动海上风电制氢平台的发展。

1 海上风电制氢平台工艺流程

海上风电制氢平台离岸 50 m 以上,水深 50 m 以上,可以是半潜、张力腿等各种可能的浮体,产氢规模为 $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$,负荷范围为 $0\% \sim 100\%$,年运行 4000 h,无三废排放,平台实行半自动化生产,无常驻人员。主要流程为:海水使用海水提升泵进入平台直接进行海水淡化及循环水冷却,淡化后的海水部分用于循环水补充,部分采用反渗透(Reverse Osmosis, RO)+电渗析(Electro Deionization, EDI)的处理方式对其去离子化后通过压力型质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)电解水制氢系统发生分解反应产生氢气和氧气,氧气不回收直接排空,氢气经分离、除氧、干燥后进入氢气压缩机,加压后进入氢气储罐,等待吊装到船舶上运输至陆地,所述流程如图 1 所示。

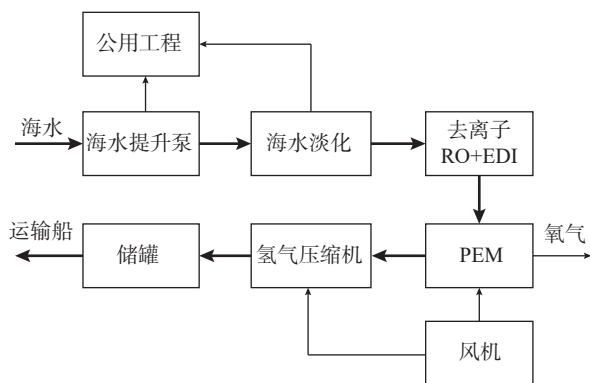


图 1 海水制氢平台流程图

Fig. 1 Flow diagram of seawater hydrogen production platform

此为可再生能源与清洁能源耦合的一种方案,采用独立式海上风电制氢平台,制氢装置耗电量为 3 MW,风机发电量 $8 \text{ MW} \sim 10 \text{ MW}$,即每个平台配置一套制氢装置,实现互不影响的分布式运行,海上

风电场总装机数量待定。此设计主要基于市场上 PEM 产氢规模受限与无大型高压氢气储罐,且集中式平台制氢工艺流程与独立式差别较小,主要设备选型一致,仅处理量及储氢方式有所区别,若市场上可提供大型制氢撬块,则经济性更加优化。海上 3 MW 独立式风电制氢方案效果图如图 2 所示。

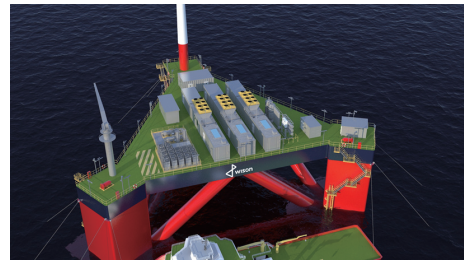


图 2 3 MW 独立式风电制氢方案效果图

Fig. 2 Effect diagram of 3 MW independent wind power hydrogen production scheme

风电制氢平台布置方案如图 3 和图 4 所示,包括(1)浮式平台、(2)风机、(3)电解水制氢模块、(4)海水淡化模块、(5)淡水纯化模块、(6)海水提升泵、(7)消防控制室+应急发电机室+临时休息区、(8)变电站、(9)氢气压缩模块、(10)储氢气瓶组、(11)吊机、(12)压缩空气和氮气模块。

2 主要设备及管道基本设计

$60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ 的甲板目前主要承载了风机、3 MW 的电解水制氢装置及辅助设备,使用集成式设计最大限度地减少占地面积,有效降低了平台布置的复杂度,节约了建筑材料,拥有更大的设计裕度。关于海洋腐蚀、晃动等问题对设备及工艺技术的影响,现今部分设备在海工应用上较为薄弱,可使用陆上类似技术,在此基础上增强可靠性及防腐蚀性,其具体设备改造依托于设备厂家,临时休息室尽量远离含氢设备。总重量小于 500 t,暂不考虑甲板上重量带来的结构问题。

2.1 主要设备设计

2.1.1 氢气储罐设计

氢气的储存和运输是氢气产业链上的一个关键环节。由于氢气的质量能量密度是汽油的 3 倍,但是体积能量密度只是汽油的 $1/4$,因此氢气的储存密度低,相对来说耗费较大^[1]。氢气的储存主要有压缩储存,液体储存,金属氢化物储存和地下,废弃油气

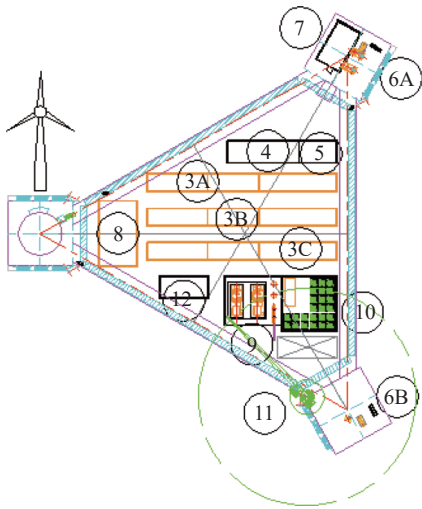


图3 方案俯视图

Fig. 3 Top view of the scheme

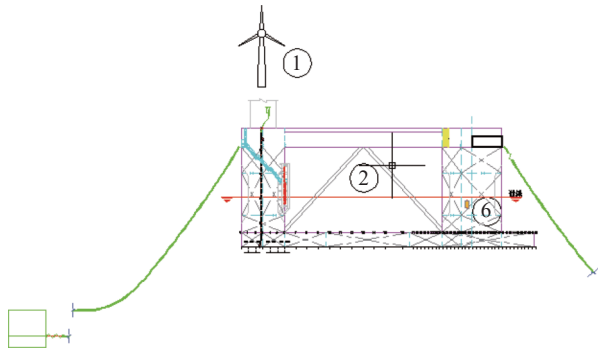


图4 方案侧视图

Fig. 4 Side view of the scheme

田和盐穴储存(压缩储存的一种特殊形式)等。每一种储存方式都有优缺点,例如液态储存能量密度高,但是需要低温储罐和耗能大的液化设备^[7]。

受限于平台面积及对比各储氢技术的优劣后,文章采用高压储氢作为储存方式。但目前国内市场上没有研发出适用于海上短途运输的35 MPa高压储氢瓶组,因此选购时参考加氢站的高压氢气储罐的安全设计。为保证储罐在平台上正常工作,设计需符合GB 4962^[8]中第6节、ISO 11114-4^[9]的相关规定,暂不考虑运行、运输过程中带来的疲劳、碰撞等问题。每组储存量约为14~25 m³,以7天为一个周期为计算基准,每天全负荷运行8 h,平台上共放置8~12组。

正常操作时,储罐工作温度处于30~40℃,设计温度应在-40~85℃之间,环境温度不应超过50℃,

工作压力若为35 MPa/70 MPa,则设计压力不超过45 MPa/90 MPa。为实现自动控制、监测的功能,每组氢气储罐需单独设置温度、压力、流量仪表及氢气探测,流量监测具有系统集成高,体积小,响应时间为秒级,精度高的特点,压力监测需配备记录装置,对超过20%操作压力的次数进行长期记录。当到达充装上限时,罐内压力过高,自控系统提醒操作人员手动且自动切断进料,设有高限报警(40 MPa/80 MPa),紧急切断(45 MPa/90 MPa)。

为防止外部介质漏入罐内,在未充入氢气时保持微正压状态。

每个周期下氢气储罐由吊机放置在氢气运维船上,再运送至岸边,供给当地用户或再进行陆地运输至下游用户,不排除为便于运输将氢气就地再处理变更其他储氢方式的可能性,若未来存在建造海上加氢站的方案,则可将氢气运输至海洋平台作为可选项。

2.1.2 氢气压缩机设计

国内加氢站大部分选用隔膜式压缩机,其具有清洁度高、密封性能好、压缩比高的优势,但隔膜式压缩机需要稳定的工作环境及进料,同时频繁启停很大程度上影响膜片和曲柄的寿命,其技术问题未从设计层面得到更好的解决方案。国外则离子液压缩机运用较多,国内还处于研发阶段,目前受制于进口成本较高和技术封锁^[10-12]。现今,国内某厂商研发出了某型号液驱活塞式压缩机,解决了氢气易受“污染”的问题,且最高可实现出口压力75 MPa,其维护成本、使用寿命、占地面积等具有一定优势,仅需1人花费1~2 h就能完成常规的保养维护,同时易于调节流量,可随时启停,适应非连续工况^[13]。

布置时前后需设置氢气缓冲罐用于适应风力波动时期不稳定的氢气产量,罐上有氢气进出口、压力仪表口、气相出口、底部出口、人孔等6个接管口,其容量按PEM系统10 min最高产氢体积设置。

压缩机前管道设置紧急切断,并连接至安全联锁系统进行紧急停车。

2.1.3 PEM设计

与碱性水溶液电解(Alkaline Water Electrolysis, AWE)相比,PEM水电解制氢纯度高,工作电流密度高,转换效率预计接近70%,占地面积小,与波动性和随机性较大风电匹配性较好,但国内处于商业化

初期,虽然过去5年电解槽成本已下降了40%^[14-15],投资和运行成本相对高昂(PEM水电解槽比碱性电解槽贵50%~60%)、如何提高电解槽的效率和寿命仍然是PEM亟待解决的主要问题^[16]。AWE技术较成熟,运行寿命可达15年之久,投资、运行成本低,但难以快速启动或变载,与风电适配性较差,并且对于无人值守的海洋浮式平台而言要解决碱液补充及操作问题就必然需要增加装置安全性的设计成本及人工成本,碱液的回收处理也相较于陆地有更多不便之处。

平台上放置3个PEM系统,每台耗电量1MW,氢气产量最高总产量600Nm³/h,工作压力为0MPa~3MPa。整套在线PEM系统内部,设置了多种压力传感器,氢气泄漏传感器、水流传感器等,用以随时监测系统内部的运行参数,可根据系统内压力变化,实现系统的自动跟踪,可实现1min内快速开停车,在停止运行一段时间后再次开车不超过10min,保证整套装置的良好运转。工艺流程图如图5所示。

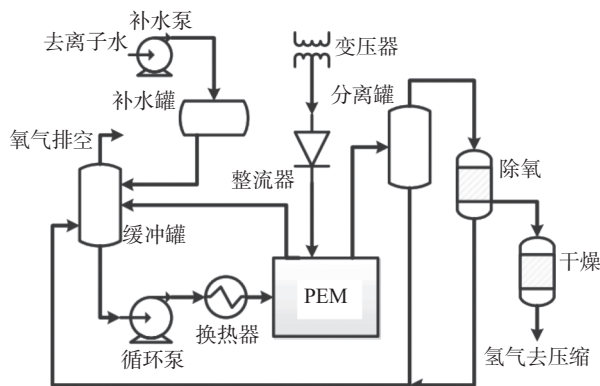


图5 PEM工艺流程图

Fig. 5 Proton exchanger electrolysis process flow chart

集装箱外的去离子水通过泵或电磁阀进入补水罐内,补水罐内设有水质探测,保证水质达到GB/T 37562^[17]第5.1.2.8节中的水质要求,缓冲罐内的水通过循环水泵进入换热器后再到电解槽内电解,通过膜与电流作用,将氢气和氧气的分离,其中氧气和大部分水返回至缓冲罐,氧气可通过压控进行排空。氢气则通过阴极端口进入分离罐进行氢气和少量水的预分离。预分离后,氢气进入纯化系统进行干燥提纯,该纯化系统采用TSA变温吸附技术、三缸循环加热再生方式进行干燥,保证氢气输出稳定。经过纯化后,可将原料氢的纯度提高至99.999%。

为最大程度保护电解槽和其他部件的良好适应性、可操作性,仅采用集装箱式设计,集装箱内不设置氢气储存及压缩设备,氧气不回收直接放空,海水管道使用904L,冷却水管道及管道材料使用316/316L。热启动时控制系统反应时间为秒级,冷启动时间为10min以内,操作弹性为0%~100%,可适应风机的不稳定性与波动性。此外,PEM在运行过程中平台的晃动可能会对两相流工艺设备的可操作性和效率产生影响,因此需要提高可靠性。

2.2 氢气管道设计

1)考虑到氢的特性以及海洋工况造成的特殊条件,管道及管件材质选择应符合GB 50177^[18]的有关规定,建议选用的设备及管道材料最好避免或降低氢脆、氢腐蚀、因应力产生裂纹、海水带来的混合腐蚀等情况,因此建议均选择奥氏体不锈钢。

2)所有放空管道均设置阻火器,适当设计安全阀。

3)氢气管道布置符合GB 4962^[8]中第4.4节、GB 50516^[19]中第6.5节的有关规定。

4)设计压力不应小于操作压力的1.1倍,若氢气管道设计压力低于20MPa,管道连接可使用螺纹焊接或法兰连接,若设计压力高于20MPa,其设计标准可参考GB 50516^[19]中的汽车加油加气加氢站标准附录D。

5)当设计压力为0.1MPa~3.0MPa时,氢气不锈钢管道内最大流速为25m/s^[20]。

3 部分辅助设备设计

3.1 集装箱设置

相比于传统建造方式造价高、周期长、材料消耗大、现场管理难的特点,集装箱预制减少了设计及安装的工作周期,且能实现对空间的有效利用,实现批量化生产,能达到最佳的配置效果。对于安装难度较高,工程分散,交通不便的海洋环境而言,现场安装和组对较为简便,其防火、防爆性能也有相应的保障。虽然集装箱化设计一次投入较高,但是综合建造周期考量及后期运行管理使得相较于传统的施工方法能够在一定程度有效降低成本且更灵活高效。

任何以集装箱形式布置在平台上的单元安装时都必须接地。Prasad^[21]研究表明,受限空间下强制通风相比于自然通风更能快速降低氢气体积分数,从而使风险水平下降。因此箱体顶部需装有独立的

通风设备,如排气扇,必要时可设置多个,排气次数 ≥ 12 次/h,与氢气浓度报警装置联锁,使其内部压力始终保持 50 Pa 的风压,材料为厚度 ≥ 0.6 mm 的不锈钢板或镀镍钢板,具有一定的强度及抗腐蚀性,能承担海上运输、安装、运行过程中的震动和海水冲蚀,安装完成后固定在平台上,避免因平台晃动产生过大的滑动及碰撞。箱体内部建议设置火灾探测、热源探测、氢气探测、水泄漏探测。

3.2 电力设置

平台上主要电力设备为风机、压缩机、泵、计量撬块、PEM、安全检测设备、应急电源等。风机将海上优质风能转换为电能,大部分电能整流后被用于 PEM,每台 PEM 需单独配备整流柜和变压器,其电路系统应独立设计,不得与其他电路混用。

在本次设计中,风机发电稳定性不高,无法长时间供应满负荷电力,因此指定小型氢燃料电池用于泵与其他设备的低负荷运转、备用电源系统用于事故停机。最常见的事事故停机原因是海上恶劣天气条件阻止了风机发电,此时应自动启动备用电源控制消防系统及应急照明,常见的海上平台的备用电力供应解决方案是使用柴油发电机。

3.3 放空设计

放空设计主要为手动放空、超压安全阀放空及紧急停车放空。手动放空一般在设备和管道维修或长时间停车时,将系统内氢气泄压,确保检修维护时的安全性。超压安全阀放空及紧急停车放空主要由设备故障及外部环境等因素引起,发生机率相对较低^[22]。

放空总管材料为不锈钢尺寸需大于 DN80,设计压力为 1.6 MPa,总泄放速率应低于 0.23 kg/s,考虑冷放空^[23],若因后续加大氢气产量导致总排放量超过安全处理范围,经软件模拟计算及安全评估后决定是否更换为火炬。为避免高速喷出与空气接触产生火花造成回火,管道出口设置阻火器和防雨帽。

4 控制方案

本设计所述的平台搭建了海上风电制氢智能控制系统,实现平台无人员常驻、定期巡检以及船舶调度^[24],提高运维效率及质量。管理系统采用分层控制的方式,中央控制室与各自控制系统间存在通讯联系,中央控制室对各风电平台控制系统内的电源

及负荷的发电量、需求量、状态量和其他运行参数进行采集、处理、决策后发给各个子控制单元,基本达到对海上风电机组、制氢装置、氢气压缩机、高压储罐等负荷的自动/手动控制,保证安全运行和制氢效益最大化。

当制氢装置需要黑启动时,可以使用氢燃料电池作为启动电源。风机输出功率达到设定值时,制氢装置才可以开始工作。当出现风机输出电能大于风力高值、露点过高、氢气含量过高等情况时,制氢装置停止运行。风机输出电能一定范围时可保证制氢装置稳定运行,并且可以解决由于风速变化导致的风电宽功率的问题,由文章第 2.1.2 节及第 2.1.3 节所述,PEM 及氢气压缩机可适应频繁开停机。

以集装箱为单元采购的各设备应含有单独 PLC 控制及安全联锁系统,其信号连接至平台控制室,并输送至中央控制室,包括但不限于在以下位置实现数据采集及自动控制:

泵的最小回流控制,水罐的均压控制,罐的液位控制,氢气干燥塔再生控制,循环冷却水温度控制,水纯度控制(PEM)、电解槽温度、氢气纯度、压缩机出口压力。

安全联锁围绕以下原则进行设计:高温报警、超压保护、过流保护、火灾探测、氢气泄露监控等方面,注意氢脆和氢腐蚀。

5 经济性分析

2021 年光伏、风电上网平均价格为 0.3669 元/kWh 左右^[11],开发成本虽已大幅下降,但规模化产业还处于变革与发展的时期,整机成本在短时间内不会明显降低至陆上风电价格水平(此电价包括 10 MW 风机及平台的 CAPEX),PEM 系统制氢耗电量成本为 5.6 kWh/Nm³/h,不考虑输电线损率及终端销售价格,仅电价带来的成本约为 24.75 元/kg H₂。

按 15 年折旧计算,考虑时间成本因素,折现率(复利)为 4.7%,预计一台 3 MW 独立式海上风机制氢平台投入 5000 万元,其一年的运行费用(包括海上运输、运维、人工、管理费用)为 120 万元,项目拟定在北海附近海域进行,考虑机组大型化及技术进步的因素,预计年平均利用小时数为 4000 h,氢气产量 600 kg/d,成本为 30.02 元/kg H₂,此价格未考虑高压氢气储罐的陆上运价。具体测算结果如表 1 所示。

表1 氢气成本预测

Tab. 1 Hydrogen production cost forecast

成本	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
PEM制氢耗电量/(kWh·Nm ⁻³ ·h ⁻¹)	5.6	5.0	5.0	4.5
电价/[元·(kWh) ⁻¹]	0.3669	0.25	0.15	0.15
CAPEX/万元	5000	4000	4000	4000
OPEX/万元	120	108	108	108
系统折旧年限/a	15	15	15	15
年负荷/(h·a ⁻¹)	4000	4000	4000	4000
年平均氢气价格/[元·(kg) ⁻¹ H ₂]	55.77	40.48	34.45	33.55

主要影响氢气成本的因素有电价、PEM 电解槽关键材料价格、风机设备成本等,上述问题均可通过大规模工业化及国产化得到一定缓解。氢气压缩机虽大部分已实现国产化,但核心零部件部分需外购,如何打破国外的技术封锁实现自主研发是降低成本的重要一环。

6 结论

综上所述,以海上制氢平台为例,提出一种海上风电制氢设想方案包括但不限于设备配置如表2所示。整套制氢装置在生产过程中使用的原料仅为海水,动力来源为可再生能源风能,生产过程中基本上无三废排放,海水循环冷却系统进出口温度差小于5℃,因而对当地环境影响较小。

表2 600 Nm³/h 海上制氢平台推荐设备配置Tab. 2 Recommended equipment configuration for 600 Nm³/h offshore hydrogen production platform

设备名称	数量	工作压力/MPa	备注
风机	1台	—	8MW~10 MW
氢气储罐	8~12组	35/70	—
氢气压缩机	2台	35/70	2×50%, 含冷却系统
PEM	3台	3	3×33%
置换吹扫系统	1套	0.6~0.8	99.2%氮气
仪表风系统	1套	0.6~0.8	—
放空系统	1套	—	—

此方案从工艺的角度对独立式海上风电制氢平台进行设计,其关键设备 PEM、氢气压缩机及储氢方式与风电的适配性好,工程上可行性较高,撬装化设计也能带来更短的工期及便捷的运输,整体设计无技术上的痛点。但由于供应链处于发展初级时期且部分供应商未涉及海洋工程,核心零部件的研发

存在瓶颈,成本缺乏透明度,且海上风电还无法做到平价上网即经济性较差,目前,可再生能源制氢市场应用还需要一个长期过程,从部署中吸取经验教训,并通过多个项目的执行优化设备的安装。

从规模和总量上看,我国风电装机量是世界前列,从国内趋势看,用电成本及制氢设备成本将不断下降,发展空间巨大,绿氢项目也趋于长周期、大规模发展,对此平台而言,解决风电消纳问题,借助陆地项目的经验拓展海上项目,采用风氢耦合的形式实现对能源的高效利用。本平台设计仍处于研发阶段,经济性不能与发展成熟的工业副产氢及煤制氢相比,但未来10年是绿氢的技术发展的关键期,氢能产业政策完善化及产业规模化必将极大推动可再生能源制氢的发展,成本问题必将随着未来我国工业化进程的加快而逐步下降,海上制氢必将成为氢能产业的一部分。

参考文献:

- [1] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书 [R]. 北京: 中国氢能联盟, 2019.
China Hydrogen Alliance. China hydrogen energy and fuel cell industry white paper [R]. Beijing: China Hydrogen Alliance, 2019.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
LIU Z Y. Global energy internet [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [3] 陈永翀, 李爱晶, 刘丹丹, 等. 储能技术在能源互联网系统中应用与发展展望 [J]. 电器与能效管理技术, 2015(24): 39-44. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2015.24.011.
CHEN Y C, LI A J, LIU D D, et al. Application and development of energy storage in energy internet system [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(24): 39-44. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2015.24.011.
- [4] 智研咨询. 2020—2026年中国海上风电行业发展态势与投资策略研究报告 [R]. 北京: 智研咨询, 2019.
Intelligence Research Group. Research report on the development trend and investment strategy of China's offshore wind power industry from 2020 to 2026 [R]. Beijing: Intelligence Research Group, 2019.
- [5] 赵波, 赵鹏程, 胡娟, 等. 用于波动性新能源大规模接入的氢储能技术研究综述 [J]. 电器与能效管理技术, 2018(16): 1-7. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2018.16.001.
ZHAO B, ZHAO P C, HU J, et al. Overview of hydrogen energy storage technology in large scale intermittent renewable energy integration application [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(16): 1-7. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2018.16.001.
- [6] 廖圣瑄, 陈可仁. 能源岛: 深远海域海上风电破局关键 [J]. 能源, 2021(5): 46-49.
LIAO S X, CHEN K R. Energy Island: the key to offshore wind power in the deep sea [J]. Energy, 2021(5): 46-49.
- [7] 张浩. 氢储能系统关键技术及发展前景展望 [J]. 国网技术学院学报, 2021, 24(2): 8-12. DOI: 10.3969/j.issn.1008-3162.2021.

- 02.003.
ZHANG H. Key technologies and development prospect of hydrogen energy storage system [J]. *Journal of Shandong Electric Power College*, 2021, 24(2): 8-12. DOI: 10.3969/j.issn.1008-3162.2021.02.003.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 氢气使用安全技术规程: GB 4962—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Technical safety regulation for gaseous hydrogen use: GB 4962—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [9] International Organization for Standardization. Transportable gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents — Part 4: Test methods for selecting steels resistant to hydrogen embrittlement: ISO 11114-4-2017 [S]. Geneva: IOS, 2017.
- [10] 陈如意, 简建明. 大型氢气隔膜压缩机的开发及应用 [J]. *压缩机技术*, 2014(3): 47-50. DOI: 10.16051/j.cnki.ysjjs.2014.03.013.
CHEN R Y, JIAN J M. Development and application of large type hydrogen diaphragm compressors [J]. *Compressor Technology*, 2014(3): 47-50. DOI: 10.16051/j.cnki.ysjjs.2014.03.013.
- [11] 刘泽坤, 郑刚, 张倩, 等. 加氢站用离子压缩机及离子液体简述 [J]. *化工设备与管道*, 2020, 57(6): 47-53. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3281.2020.06.012.
LIU Z K, ZHENG G, ZHANG Q, et al. Introduction of ionic compressor and ionic liquid used in hydrogen refueling station [J]. *Process Equipment & Piping*, 2020, 57(6): 47-53. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3281.2020.06.012.
- [12] American National Standards Institute (ANSI). Reciprocating compressors for petroleum, chemical, and gas industry services: ANSI/API 618-2008 [S]. New York: ANSI, 2008.
- [13] 郝加封, 张志宇, 朱旺, 等. 加氢站用氢气压缩机研发现状与思考 [J]. *中国新技术新产品*, 2020(11): 22-24. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2020.11.011.
HAO J F, ZHANG Z Y, ZHU W, et al. Development status and thinking of hydrogen compressor for hydrogenation station [J]. *New Technology & New Products of China*, 2020(11): 22-24. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2020.11.011.
- [14] 张彦, 陶毅刚, 张韬, 等. 氢能与电力系统融合发展研究 [J]. *中外能源*, 2021, 26(9): 19-28.
ZHANG Y, TAO Y G, ZHANG T, et al. Research on integrated development of hydrogen energy and power system [J]. *Sino-Global Energy*, 2021, 26(9): 19-28.
- [15] Bloomberg New Energy Finance (BNEF). Hydrogen economy outlook [R]. New York: BNEF, 2020.
- [16] AYERS K E, ANDERSON E B, CAPUANO C, et al. Research advances towards low cost, high efficiency PEM electrolysis [J]. *ECS Transactions*, 2010, 33(1): 3-15. DOI: 10.1149/1.3484496.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 压力型水电解制氢系统技术条件: GB/T 37562—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration. Technical conditions of pressurized water electrolysis system for hydrogen production: GB/T 37562—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [18] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 氢气站设计规范: GB 50177—2005 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Design code for hydrogen station: GB 50177—2005 [S]. Beijing: China Planning Press, 2005.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 加氢站技术规范: GB 50516—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for hydrogen fuelling station: GB 50516—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [20] 李保法. 电解水制氢系统安全设计 [J]. *化工设计*, 2011, 21(4): 16-18,48. DOI: 10.15910/j.cnki.1007-6247.2011.04.009.
LI B F. Safety design of hydrogen production through water electrolysis system [J]. *Chemical Engineering Design*, 2011, 21(4): 16-18,48. DOI: 10.15910/j.cnki.1007-6247.2011.04.009.
- [21] PRASAD K. High-pressure release and dispersion of hydrogen in a partially enclosed compartment: effect of natural and forced ventilation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(12): 6518-6532. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.01.189.
- [22] 张彦纯. 加氢站主要工艺设备选型分析 [J]. *上海煤气*, 2019(6): 10-13,27. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4709.2019.06.003.
ZHANG Y C. Analysis of main process equipment selection in hydrogen refueling station [J]. *Shanghai Gas*, 2019(6): 10-13,27. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4709.2019.06.003.
- [23] 李硕存, 陈静, 程久欢, 等. 海洋石油固定平台大气放空系统设计研究 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2018, 38(24): 5-6,9. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2018.24.002.
LI S C, CHEN J, CHENG J H, et al. Design and research of atmospheric venting system for offshore oil Fixed Platform [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2018, 38(24): 5-6,9. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2018.24.002.
- [24] 杨源, 汪少勇, 谭江平, 等. 海上风电场智慧运维管理系统 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(1): 74-79. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.011.
YANG Y, WANG S Y, TAN J P, et al. The Intelligent operation and maintenance management system for offshore wind farms [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(1): 74-79. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.011.

作者简介:



桂薇

桂薇 (通信作者)

1996-, 女, 广西桂林人, 工程师, 中国石油大学(北京)化学工程与工艺专业学士, 主要从事石油化工、清洁能源、浮式液化天然气研发及设计工作(e-mail)ekatsura@163.com。

(编辑 叶筠英)