

风光耦合制氢系统典型设计方案研究

孙翔^{1,✉}, 刘成良¹, 牛霞¹, 赵陆尧²

(1. 中能建氢能源有限公司, 北京 100027; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的]随着风光耦合制氢项目规模的增大和数量的增多, 为了满足可再生能源制氢系统设计、主设备选型和经济方案比选需要, 文章结合多个风光氢储一体化项目设计经验, 提炼出风光耦合制氢系统典型设计方案, 给出设计选型的依据。[方法]文章从风光氢储装机容量配置方案、电解制氢设备性能、整流电源选型、氢氧分离和纯化设计, 以及经济性和绿氢市场等方面介绍风光耦合制氢设计方案。[结果]装机容量配置可通过约束条件采用开发的设计软件匹配优化; 制氢设备选型现阶段仍以碱性电解装备为主, 质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)电解装备可做小规模工程示范; 晶闸管和绝缘栅双极型晶体管(IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor)整流电源各有优点, IGBT整流逐渐有工程应用; 氢氧分离和纯化可根据项目规模特点作相应配置优化, 节约投资; 风光制绿氢市场规模巨大, 随着化石能源价格高企和风光制氢系统造价降低, 加之产品的绿色属性, 绿氢已初具经济性。[结论]风光耦合制氢项目仍处于起步示范阶段, 需要装备技术进步、设计方案优化和一定的政府政策支持, 共同促进绿氢产业发展。

关键词: 风光耦合; 制氢; 碱性; 质子交换膜; 设计方案

中图分类号: TK91; TM61

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0112-08

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Typical Design of Wind-Solar Coupled Hydrogen Production System

SUN Xiang^{1,✉}, LIU Chengliang¹, NIU Xia¹, ZHAO Luyao²

(1. China Energy Engineering Group Hydrogen Energy Co., Ltd., Beijing 100027, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] As wind-solar hydrogen production projects expand in scale and number, there is a growing demand for the design, equipment selection, and economic comparison of green hydrogen production systems. This paper, based on the design experience of multiple similar projects, extracts the typical design of wind-solar coupled hydrogen production system and provides the design selection. [Method] This paper introduced design scheme of wind-solar coupled hydrogen production from the aspects of wind-solar hydrogen storage capacity configuration scheme, electrolysis hydrogen production equipment performance and rectifier comparison, hydrogen and oxygen separation and purification system design, and green hydrogen market and economy analysis. [Result] Capacity configuration can be optimized according to the developed design software through constraint conditions. alkaline electrolysis equipment is the preferred choice for hydrogen production, while proton exchange membrane (PEM) electrolysis equipment can be used for small-scale engineering demonstration. Both thyristor and insulated gate bipolar transistor (IGBT) power rectifiers have their own advantages, and IGBT rectification is gradually being applied in engineering practice. For saving investment, separation and purification can be optimized according to the scale of the project. The market for green hydrogen is huge. As fossil fuel prices continue to rise and the costs of wind-solar coupled hydrogen production systems decrease, coupled with its eco-friendly characteristics, green hydrogen has already become economically competitive. [Conclusion] The wind-solar coupled hydrogen production project is still in the initial demonstration stage, which requires equipment technology progress, design scheme optimization and government policy support to promote the

收稿日期: 2023-04-12 修回日期: 2023-04-19

基金项目: 中电工程 2022 年度公司企业技术标准编制项目“可再生能源电解水制氢系统设计导则”(DG1-D01-2022)

development of green hydrogen industry.

Key words: wind-solar coupled; hydrogen production; alkaline; proton exchange membrane ; design schemes

2095-8676 © 2023 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

“双碳”目标开启了我国化石能源向风光水氢储等清洁能源转变的能源革命。氢能是多能耦合的中心,是实现传统能源高效利用的有效途径;作为新型储能介质,是支撑高比例可再生能源发展的重要保障;其能源+原料双重属性是助力交通、建筑、石油化工等领域深度脱碳的重要载体,发展氢能产业对实现碳达峰、碳中和目标意义重大^[1-2]。氢能作为二次能源,可以通过化石能源制取,可以来自焦化、氯碱、钢铁等工业副产,也可以利用电解水制取;特别是可再生能源发电与电解水制氢结合,不仅实现全生命周期绿色清洁,更拓展了可再生能源的利用方式,解决可再生能源间歇波动问题。我国可再生能源制氢潜力巨大:在资源方面,我国已连续9年成为全球可再生能源最大投资国,风电、光伏等可再生能源装机容量均为世界第一,2022年可再生能源的装机总量历史性超过煤电,占比达到47.3%^[3];在电解槽装备方面,我国碱性电解槽性价比全球领先,1000 Nm³/h级碱性电解槽技术逐渐成熟,工程化应用案例全球第一^[4];在示范工程方面,进入2023年以来,国内绿氢项目如雨后春笋,仅内蒙古一个省份具备实施条件的风光制氢一体化项目就达到15个,总投资近500亿元;在经济性方面,随着煤炭、天然气等化石能源价格高企,风电、光伏、制氢造价下降,在风光资源禀赋好的地区,可再生能源制绿氢相对于传统煤制氢、天然气制氢已初步具有经济竞争性;在市场方面,中国氢能联盟发布的《中国氢能及燃料电池产业白皮书2020》预测到2030年我国氢气的年需求量将达到3715万t,可再生氢产量约为500万t,部署电解槽装机约80 GW^[1],对应的风光可再生能源装机约为200 GW。可再生能源绿电和衍生的绿氢,替代化石能源在电力、交通、化工、冶炼等领域的应用,是实现“双碳”目标的重要途径^[5-7]。

可再生能源制氢已成为全球统一的氢气制取发展方向。大规模可再生能源电解水制氢技术方面,电力设计院和化工设计院都处于起步阶段,技术水平各有特点。电力设计院在上游新能源设计、制氢

电力系统配置和能量管控方面具备优势;化工设计院在制氢站工艺流程、布置、安全等化工体系规范设计方面具有优势。

2021年至今,内蒙古分3批批复了多个风光制氢一体化工程,多采用自发自用余电上网模式,风光新能源发电量80%以上用于制氢消纳,20%以内上网^[8],项目主要收益为售氢及衍生品和售电。以内蒙古为先例,吉林、河北等省份也陆续批复制氢和上网电量消纳8:2比例的风光制氢一体化项目。

风光耦合制氢系统电源部分包括风电、光伏、储能、升压站、输电线路等,制氢站包括电解水制氢工艺流程(整流变压器、整流柜、电解槽、气液分离、气体纯化等)以及配套辅助系统,典型系统方案配置如图1所示。

1 装机容量配置方案

风光耦合制氢设计首先要考虑风电、光伏、储能、制氢装机容量相互匹配,这几个主要因素的匹配决定了项目技术经济的合理程度。

1.1 风电、光伏匹配

风电、光伏是新能源制氢的主要的电源,风光之间的容量配比需结合当地风光资源拟合的风光出力曲线特性。风资源随机性大,通常具有夜间出力大、白天出力小的特点;光伏白天有夜间无;光伏的稳定性相对优于风电;风电平均度电成本低于光伏;合理配置风光配比,使电价综合成本更低,设备有效利用小时数更高,出力曲线更平滑,减少电量波动。根据三北地区多个工程项目匹配经验,在条件允许的情况下,光伏容量占总装机容量的10%~30%效果较好。

1.2 制氢装置容量配置

电解水制氢装置是制氢站的主要生产设备,增大制氢的装机规模可以提高可再生能源的消纳水平,提高氢产量,减少弃电率。但会导致制氢装置利用率降低,增加了设备投资和维护成本。主流的电解水制氢设备有碱性电解水装置和PEM电解水装置,两者价格差别大,负荷动态响应速度不同,两者容量

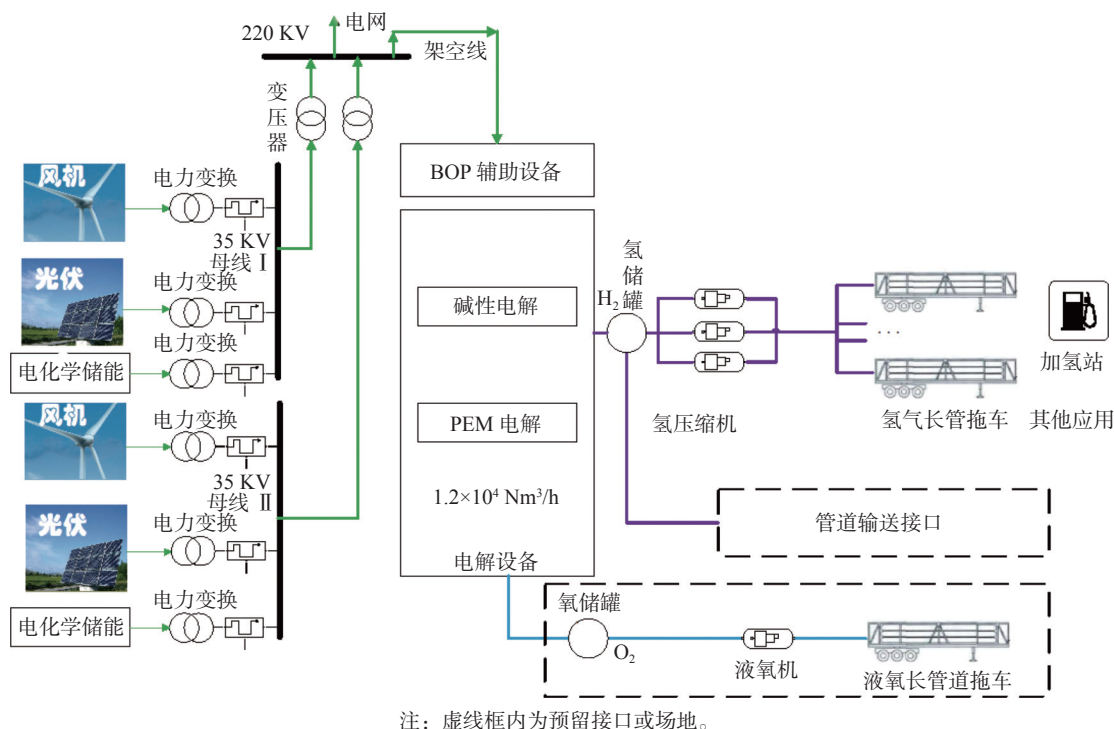


图 1 风光耦合制氢典型系统方案图

Fig. 1 Typical scheme diagram of wind-solar coupled hydrogen production system

也需要合理设置匹配。若有电化学储能, 需要考虑碱性电解水装置、PEM 电解水装置、电化学储能的合理配置, 既能优化动态响应时间, 减少用能波动, 同时做到造价最优。

1.3 电学储能配置

碱性电解水装置动态响应速度较慢, 电化学储能配置可以减缓可再生能源瞬时波动造成碱性电解水装置无法跟踪响应问题, 减少制氢站对上网电量的依赖, 降低使用上网电量所要缴纳的容量电费和电量电费。电化学储能还能优化碱性电解水装置和 PEM 电解水装置之间的配比, 综合优化项目投资。碱性电解水装置单价约 1 万元/ Nm^3 , PEM 电解水装置单价约 3 万元/ Nm^3 , 以一套 5 MW ($1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$) 电解装置为例, 价格差 2000 万元; 热态条件下碱性和 PEM 的动态响应时间差约 10 min, 储能按照 1 h 配置, 5 MWh 储能设备投资约 1000 万元, 因此抛开电化学储能生命周期相对较短的因素外, 在当前电解装置价格水平下, 配置电化学储能应对电源波动的解决方案的经济性优于 PEM 电解水装置。

1.4 匹配原则

风电、光伏、储能、制氢系统装机容量匹配需要

综合考虑系统安全稳定运行、可再生能源的弃电率低、制氢系统利用率高、氢气储存量优、整体投资收益率大、满足电力系统调度要求等因素^[9-11]。风光耦合制氢系统装机容量匹配方案可以在匹配对象和匹配原则之间建立数学模型, 利用数学方法进行最优化求解。目前中国能建多家设计院已研发出具有独立知识产权风光氢储一体化项目匹配软件^[12-13], 设计阶段根据风光资源条件, 外加制氢设备特性、价格、电价等边界条件和优化目标优先级、敏感性, 合理配置风光氢储容量比例, 使项目各项指标达到最优; 运行阶段通过高精度风光出力预测, 结合电网调度信号, 根据风光功率预测对制氢系统进行前馈控制, 实现风、光、储、氢一体化可调可控, 保障项目最优运行, 如图 2 所示。

2 制氢设备选型

电解水制氢技术主要有碱性电解水装置、PEM 电解装置和固体氧化物电解水装置 (Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC) 3 种。现阶段, 我国碱性电解水装置技术成熟, 市场份额高, 但动态响应速度较慢。PEM 电解水装置国内刚刚起步, 性能尤其是寿命尚

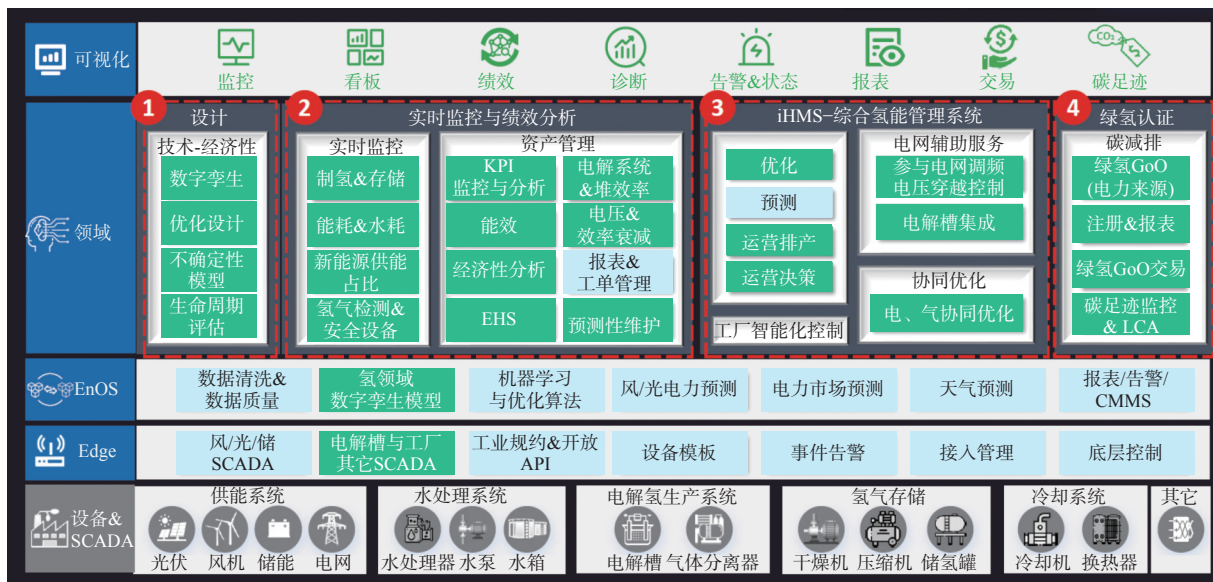


图2 风光氢储一体化项目匹配和运行优化软件

Fig. 2 Interface of matching and operation optimization software for wind-solar-hydrogen-storage integration projects

缺少规模化工程化验证, 整体上落后于欧美等发达国家。SOEC 电解装置采用水蒸汽电解, 高温环境下工作, 能效最高, 但尚处于实验室研发阶段, 文章不展开讨论。

2.1 碱性电解水装置

碱性电解水技术是最为成熟, 也是目前应用最广泛的电解水制氢技术^[14]。10 Nm³/h 级的碱性电解水装置已经在大型电厂发电机氢冷系统中应用多年^[15]。随着绿氢产业发展和碱性电解水技术进步, 1000 Nm³/h 级的碱性电解水装置已成为规模化新能源制氢的主流设备, 操作负荷范围也得到大幅提升。由于碱性电解池的阳极和阴极两侧上的压力需时刻保持均衡, 以防止氢、氧气穿过多孔的隔膜混合引起爆炸, 使得碱性电解槽较难快速的启动和负荷调整, 快速跟踪响应风光光伏随机波动电源的能力较弱^[16]。近年来随着技术进步, 碱性电解水装置对供电负荷波动的响应速度已经有了长足进步。

2.2 PEM 电解水装置

PEM 电解水装置因其动态响应速度快、占地面积小、效率高、环保等优点而备受关注。近年来欧盟、北美涌现了很多 PEM 电解水设备企业, 推动了 PEM 电解技术的发展。2021 年以来, 国内 PEM 电解技术有了一定的突破, 但与国际先进水平差距较大, 正处于从实验室研发向工程化应用转化的阶段^[17-18]。PEM 电解水装置价格高, 限制了其大规模

应用, 适合在土地有限的大城市、临时场所、独立的产业园区中使用, 特别适用于小型制氢项目, 如城市的制氢加氢一体站, 体积小, 装运方便。

2.3 碱性和 PEM 电解水装置比较

碱性电解水装置具备工艺技术成熟、投资运营费用低等优势, 其劣势在于相比 PEM 电解水装置在风光波动电源的响应时间和可调范围方面有一定差距。以下将从技术成熟度、效率、动态响应速度、负荷调节范围、经济性等方面对碱性和 PEM 水电解设备进行比较分析。

2.3.1 技术成熟度

碱性电解水设备技术成熟度高, 在发电机氢冷、晶硅生产、浮法玻璃等领域有大量的应用业绩, 我国碱性电解水技术和设备在全球属于领先地位, 1000 Nm³/h 级碱性电解槽技术逐渐成熟, 工程化应用案例全球第一。国内 PEM 电解水装备处于商业化初期, 技术成熟度目前需要工程化验证。

2.3.2 效率

稳态运行碱性和 PEM 电解水装置效率相当; 波动负荷运行时, PEM 的动态响应速度快, 碱性由于电解槽电解反应的迟滞和保温需求, PEM 较碱性高 5% 左右。

2.3.3 动态响应速度

碱性和 PEM 电解水装置的动态响应时间如表 1

所示,碱性电解水的动态响应速度很大程度上受制于电解槽的温度,电解槽热态情况下,碱性电解槽的动态响应速度约是 PEM 的 1/5。

表 1 碱性和 PEM 电解水装置动态响应速度
Tab. 1 Dynamic response speed of ALK and PEM

制氢设备	min			
	冷态启动	热态启动	热态升负荷	热态降负荷
碱性电解	0 ~ 100%	0 ~ 100%	50% ~ 100%	100% ~ 50%
碱性电解	60	20	10	5
PEM 电解	10	5	2	1

2.3.4 负荷调节范围

如表 2 所示,碱性电解水装置负荷调节范围为 (20%/25%/35%) ~ 100%,不同厂家给出的调节范围下限不同,低于负荷下限,氧气中的氢杂质含量较高,带来安全隐患。PEM 电解水装置调节范围部分厂家给出的数据是 0 ~ 100%,但在实际运行中,极低负荷下阀门、设备、仪表和控制精度都难以保证,制氢辅助系统用电占比高,制氢效率低,10% 负荷运行以下不具有经济性,运行稳定性也难以保证。

表 2 碱性和 PEM 电解水装置运行负荷调节范围
Tab. 2 Load adjustment range of ALK and PEM

负荷调节范围	PEM	碱性			
		A 厂数据	B 厂数据	C 厂数据	D 厂数据
比例值/%	10 ~ 125	20 ~ 100	20 ~ 100	25 ~ 100	35 ~ 100

大规模商业化工程应用,价格是设备选型的重要考量因素。前文已经描述,PEM 设备的单位造价是碱性的 3 倍,在绿电制氢经济性本身受限的情况下,企业很难承受大规模使用 PEM 带来的成本增加,降成本是 PEM 的当务之急。PEM 电解水装置组成包括变压器、整流柜、电解槽(电堆)、分离和纯化装置,与碱性电解装备相比差别最大的是电解槽,变压器、整流柜、分离和纯化装置类似,价格相近;碱性电解槽造价约 1200 元/kW,PEM 电解槽(电堆)造价高达 5000 元/kW。PEM 电解是 PEM 燃料电池的逆反应,当前 PEM 燃料电池电堆单位造价可降至 2000 元/kW,虽然 PEM 电解在电极、催化剂和质子膜等方面有特殊要求,但笔者认为 PEM 电解未来降价空间可朝着 PEM 燃料电池电堆价格努力,具有较大降价空间。随着国外 PEM 制氢设备厂家在国内合资建厂,国产化和规模化带来的成本下降空间可

期。风光耦合制氢站在设计时,为加快对新技术新设备创新应用探索、提高制氢系统动态响应速度、掌握工程数据、积累运行经验,在经济条件可行的情况下,可配一定规模的 PEM 电解水装置示范。

3 电解槽电源技术方案

整流变压器高压侧电源来自 35 kV 或 10 kV,低压侧经整流柜为电解水制氢装置供电。目前常见的整流变压器与电解水制氢装置的对应关系为 1 台整流变压器为 1 台或 2 台电解水制氢装置供电,1 对 1 的方案适用于电解水制氢装置台数较少,电解水制氢装置运行方式灵活的情况;1 对 2 的方案可降低变压器的投资;1 对多的方案当前尚无工程化应用。

电解水制氢装置的整流电源一般采用晶闸管整流器或 IGBT 整流器,晶闸管整流器在稳定工况条件下效率高,但对应波动负荷和多台电解槽同时运行时,效率问题和谐波问题逐步突显^[9]。随着电力电子元件的不断发展,以 IGBT 元件为基础的整流器已有多家生产商。

3.1 晶闸管整流系统方案

晶闸管整流器的优势为:成本低,体积小,稳态运行效率高(>98.5%),技术成熟度高。劣势为:网侧谐波较大,12 脉整流谐波约为 5%,24 脉整流协议约为 3%,功率因数低;需要有载调压整流变压器,谐波大导致整流变压器损耗大。

3.2 IGBT 整流系统方案

IGBT 整流器的优势为:网侧谐波小(<3%),功率因数高(0.97),动态响应好,不需要有载调压整流变压器。劣势为:成本高,体积大,稳态运行效率较晶闸管整流器低,当前正处于试运行阶段。

应综合考虑谐波、网侧功率因数、效率、经济性和产品成熟度等因素来确定整流器的选型。

4 分离和纯化装置配置

电解槽与气液分离装置以及纯化装置的配比可根据项目规模、投资、占地面积、整体动态响应速度、变负荷调节程度设置,以 1000 Nm³/h 电解槽为例,其与气液分离装置以及纯化装置可按照 1 对 1, 2 对 1 和 4 对 1 等配置,比例越大越节约投资和占地,但控制难度增大、动态响应速度变缓、可调负荷区间受限。

5 风光耦合制氢市场和经济性

目前我国氢气的年产能约 3300 万 t, 图 3 为我国氢气产能分布情况^[20]。可以看出当前以灰氢为主的产能分布与我国风光资源分布^[21]基本一致, 主要集中在三北资源丰富地区。一方面, 由于区域分布的一致性, 减少了大规模的氢气储运的难度, 随着绿氢产能增长, 可以实现灰氢向绿氢市场的平稳过渡。另一方面, 三北风光资源丰富地区存在电力送出、电力波动等问题, 通过大规模制氢, 实现资源高价值转化和区域经济内循环; 同时, 制氢站是重要的可调节负荷, 《“十四五”新型储能发展实施方案》将氢能作为新型储能介质, 发展可再生能源制储氢(氨)、氢电耦合等氢储能示范应用, 通过风光耦合制氢平抑新能源电力波动问题。

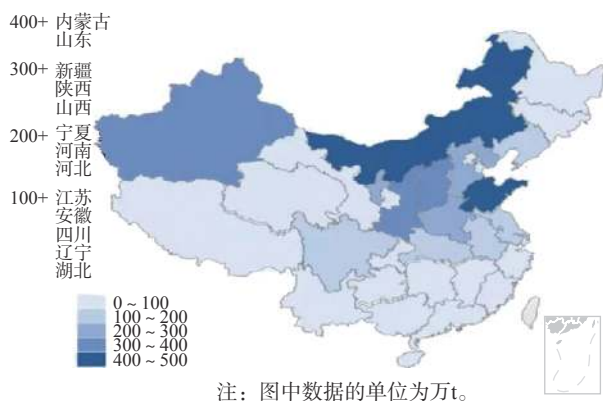


图 3 中国氢气产能分布^[20]

Fig. 3 Price list of hydrogen production in different methods^[20]

制氢价格如表 3 所示。随着世界百年未有之大变局加速演进, 化石燃料价格高企呈常态化趋势, 当前煤炭价格已经突破千元/t、进口天然气价格高进入 4 元/Nm³ 时代; 相比之下风电和集中式光伏造价持续降低, 加之碳税、电解水制氢副产氧价值、产品

表 3 制氢价格表

Tab. 3 Hydrogen price list from different methods

煤制氢		天然气制氢		电解水制氢	
煤价/ (元·t ⁻¹)	氢价/ [元·(kg) ⁻¹]	天然气价/ [元·(Nm ³) ⁻¹]	氢价/ [元·(kg) ⁻¹]	电价/ [元·(kWh) ⁻¹]	氢价/ [元·(kg) ⁻¹]
600	10.3	2.0	10.6	—	—
800	12.0	2.5	12.6	0.10	11.6
1000	14.0	3.0	14.9	0.15	14.5
1200	16.8	3.5	17.4	0.20	17.4
1400	20.0	4.0	20.3	0.25	20.4

绿氢等因素, 可再生能源制绿氢相对于传统煤制氢、天然气制氢已初步具有经济竞争性^[22-23]。

6 结论

可再生能源制氢是实现氢能产业链源头清洁化的重要路径, 氢电耦合也是支撑高比例可再生能源发展有效方式之一。文章从风光氢储装机容量配置方案, 电解制氢设备比选、整流电源、分离和纯化配置方案, 以及绿氢市场和经济性等方面介绍风光耦合制氢设计方案。随着风光耦合制氢项目规模的增大、数量的增多, 以及绿色合成氨、绿色甲醇等“绿氢+”项目的涌现^[24], 加速了电力和化工设计院的融合、对标和联合发展, 能源的耦合带动了电力和化工行业互动和技术融会贯通。

风光耦合制氢仍处于起步阶段, 需要一定的产业政策支持, 建议政府层面的氢能产业政策从燃料电池交通、加氢站向氢气清洁高效制取、氢能在能源体系中的耦合利用等“大氢能”产业扩展延伸。内蒙古出台的制氢消纳 80% 新能源电量、20% 以内上网政策, 开辟了新能源制氢自发自用余电上网的新模式, 也得到多个省份的纷纷效仿, 但笔者认为该政策过于强调就地消纳量, 降低了电网通道的利用率, 建议调整自消纳与上网比例至 50% : 50%, 充分发挥制氢站可调负荷特性和氢气储能属性, 实现氢电深度耦合; 在绿氢产业发展初期, 适当提高风光发电上网比例, 通过以电养氢的方式给予风光制氢项目政策红利。风电、光伏发电项目享受增值税“三免三减半”优惠政策, 风光发电制成氢气以及衍生的氨、醇等氢基化工品后, 电价的“三免三减半”优惠政策没能延伸到氢氨醇等化工产业, 建议政府相关部门给予新能源制氢及绿色氢基产品增值税“三免三减半”政策优惠。通过规划政策引领, 消除能源行业间壁垒, 促进能源产业融合, 构建清洁低碳、安全高效的现代综合能源体系。

参考文献:

- [1] 中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书2020 [R/OL]. (2022-04-21) [2023-04-12]. <http://h2cn.org.cn/publicati/215.html>. National Alliance of Hydrogen and Fuel Cell. White paper of hydrogen energy and fuel cell industry in China 2020 [R/OL]. (2022-04-21) [2023-04-12]. <http://h2cn.org.cn/publicati/215.html>.
- [2] 张灿, 张明震, 申升, 等. 中国氢能高质量发展的路径建议与政

- 策探讨 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 19-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.002.
- ZHANG C, ZHANG M Z, SHEN S, et al. Path suggestion and policy discussion for China's high-quality development of hydrogen energy [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 19-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.002.
- [3] 袁家海, 张浩楠. 历史性跨越: 中国可再生能源装机容量超过煤电 [EB/OL]. (2023-03-22) [2023-04-12]. <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202303/22/WS641adb2fa3102ada8b234d1e.html>.
- YUAN J H, ZHANG H N. A historic catch-up: China's renewable energy generation capacity has overtaken coal power capacity [EB/OL]. (2023-03-22) [2023-04-12]. <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202303/22/WS641adb2fa3102ada8b234d1e.html>.
- [4] 姚若军, 高啸天. 氢能产业链及氢能发电利用技术现状及展望 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(4): 9-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.002.
- YAO R J, GAO X T. Current situation and prospect of hydrogen energy industry chain and hydrogen power generation utilization technology [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(4): 9-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.002.
- [5] 罗志斌, 孙潇, 孙翔, 等. 氢能与储能耦合发展的机遇与挑战 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 32-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.003.
- LUO Z B, SUN X, XUN X, et al. The coupling development of hydrogen and energy storage technology: opportunities and challenges [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 32-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.003.
- [6] 史倩, 过良, 张永亮. 新能源制氢在传统炼化企业的应用 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 40-47. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.004.
- SHI Q, GUO L, ZHANG Y L. Application of water-electrolytic hydrogen production technology in traditional refinery and chemical enterprise [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 40-47. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.004.
- [7] 郑文棠. 车用氢燃料电池专用空压机 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(3): 69.
- ZHENG W T. Automotive hydrogen fuel cell dedicated air compressor [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 69.
- [8] 内蒙古自治区人民政府办公厅. 关于促进氢能产业高质量发展的意见 [EB/OL]. (2022-02-26) [2023-04-12]. https://www.nmg.gov.cn/zfbgt/zwgk/zzqwj/202203/t20220303_2012066.html.
- General Office of Inner Mongolia Autonomous Region People's Government. Opinions on promoting the high-quality development of the hydrogen energy industry [EB/OL]. (2022-02-26) [2023-04-12]. https://www.nmg.gov.cn/zfbgt/zwgk/zzqwj/202203/t20220303_2012066.html.
- [9] 唐司航. 基于风电功率最值预测的电解槽阵列轮换控制策略研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2022. DOI: 10.27107/d.cnki.ghbku.2022.000333.
- TANG S H. Research on control strategy of alkaline electrolyzer array with rotation mode based on best value forecast for wind power [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2022. DOI: 10.27107/d.cnki.ghbku.2022.000333.
- [10] 刘友葵. 风光水氢储一体互补的再生能源制造系统 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊1): 9-16. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.002.
- LIU Y K. Wind-solar-water-hydrogen-storage integrated complementary renewable energy manufacturing system [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(Suppl. 1): 9-16. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.002.
- [11] 王永江, 韩爽, 闫亚敏, 等. 风光制氢容量配置优化研究及绿氢经济性分析 [J]. 内蒙古电力技术, 2023, 41(1): 8-14. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0002.
- WANG Y J, HAN S, YAN Y M, et al. Research on optimization of capacity allocation of wind power and photovoltaic hydrogen production and economic analysis of green hydrogen [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2023, 41(1): 8-14. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0002.
- [12] 廖远旭, 董英瑞, 孙翔, 等. 可再生能源制氢综合能源管理平台研究 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 47-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.006.
- LIAO Y X, DONG Y R, SUN X, et al. Research on comprehensive energy management platform for hydrogen production from renewable energy [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 47-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.006.
- [13] 杨源, 陈亮, 王小虎, 等. 海上风电-氢能综合能源监控系统设计 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 35-40. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.005.
- YANG Y, CHEN L, WANG X H, et al. Design of integrated offshore wind power-hydrogen energy monitoring system [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 35-40. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.005.
- [14] 张明震, 吴秀山, 吕肖圆, 等. 碱性电解槽在新能源制氢项目中的应用 [J]. 中国电力企业管理, 2022(36): 70-71.
- ZHANG M Z, WU X S, LÜ X Y, et al. Application of alkaline electrolyzer in new energy hydrogen production project [J]. *China power enterprise management*, 2022(36): 70-71.
- [15] 李鹏, 肖建群. 电解水制氢在电厂和氢能项目的设计应用 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 41-45. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.006.
- LI P, XIAO J Q. Design and application of hydrogen production by electrolysis water in power plants and hydrogen energy projects [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 41-45. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.006.
- [16] 袁铁江, 万志, 王进君, 等. 考虑电解槽启停特性的制氢系统日前出力计划 [J]. 中国电力, 2022, 55(1): 101-109.
- YUAN T J, WANG Z, WANG J J, et al. The day-ahead output plan of hydrogen production system considering the start-stop characteristics of electrolytic cell [J]. *Electric power*, 2022,

- 55(1): 101-109.
- [17] 王雪泽, 袁先明, 李猛, 等. PEM电解水制氢装置宽功率波动适应性研究 [J]. 今日制造与升级, 2023(1): 37-38.
WANG X Z, YUAN X M, LI M, et al. Study on wide power fluctuation adaptability of PEM electrolysis water hydrogen production device [J]. *Manufacture & upgrading today*, 2023(1): 37-38.
- [18] 马晓锋, 张舒涵, 何勇, 等. PEM电解水制氢技术的研究现状与应用展望 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 420-427. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0360.
MA X F, ZHAGN S H, HE Y, et al. Research status and application prospect of PEM electrolysis water technology for hydrogen production [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(6): 420-427. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0360.
- [19] 孔卫江, 杨金彭, 魏灿, 等. IGBT开关斩波整流技术在水电解制氢中的应用 [J]. 电子制作, 2021(8): 18-19,8. DOI: 10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2021.08.006.
KONG W H, YANG J P, WEI C, et al. Application of IGBT switch chopping rectification technology in hydrogen production by water electrolysis [J]. *Practical electronics*, 2021(8): 18-19,8. DOI: 10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2021.08.006.
- [20] 平安证券. 氢能, 碳中和时代的零碳能源 [R/OL]. (2021-03-30) [2023-04-24]. <https://xueqiu.com/9508834377/176039342>.
Ping An Securities. Hydrogen, zero-carbon energy in the era of carbon neutrality [R/OL]. (2021-03-30) [2023-04-24]. <https://xueqiu.com/9508834377/176039342>.
- [21] 免费文档中心. 中国风能、太阳能互补分布图 [EB/OL]. [2023-04-24]. <http://www.mianfeiwendang.com/doc/0dabc78494beddee17d3af33>.
mianfeiwendang.com. Complementary distribution map of wind energy and solar energy in China [EB/OL]. [2023-04-24]. <http://www.mianfeiwendang.com/doc/0dabc78494beddee17d3af33>.
- [22] 王明华. 新能源电解水制氢技术经济性分析 [J/OL]. 现代化工: 1-11 (2023-03-31) [2023-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2172.TQ.20230331.0945.012.html>.
WANG M H. Technical and economic analysis of hydrogen production from new energy electrolytic water [J/OL]. *Modern chemical industry*: 1-11 (2023-03-31) [2023-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2172.TQ.20230331.0945.012.html>.
- [23] 张轩, 王凯, 樊昕晔, 等. 电解水制氢成本分析 [J]. 现代化工, 2021, 41(12): 7-11. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.12.002.
ZHAGN X, WANG K, FAN X Y, et al. Cost analysis on hydrogen production via water electrolysis [J]. *Modern chemical industry*, 2021, 41(12): 7-11. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.12.002.
- [24] 林海周, 罗志斌, 裴爱国, 杨晖, 王小博. 二氧化碳与氢合成甲醇技术和产业化进展 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 14-19. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.002.
LIN H Z, LUO Z B, PEI A G, et al. Technology and industrialization progress on methanol synthesis from carbon dioxide and hydrogen [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 14-19. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.002.

作者简介:



孙翔

孙翔 (通信作者)

1988-, 男, 安徽淮南人, 高级工程师, 硕士, 主要从事氢能产业和项目投建营一体化研究和咨询工作 (e-mail) xsun0411@ceec.net.cn。

(编辑 叶筠英)