

绿氢示范项目模式分析与发展展望

张丝钰[✉], 张宁, 卢静, 时庆, 代红才
(国网能源研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: [目的] 新能源的高比例接入对电力系统的安全稳定运行和电力可靠供应提出了更高的要求。氢能与电能终端应用场景上有较好的互补特性, 以新能源制氢为主体的“绿氢”将成为新型能源体系中重要组成部分, 助力新型电力系统建设。目前, 国内外绿氢示范项目方兴未艾, 但项目模式与未来发展趋势尚不明晰。文章旨在厘清现有绿氢项目的模式, 并提出破解绿氢项目规模化推广及电-氢协同效应充分发挥的瓶颈性问题。[方法] 首先, 系统梳理国内外现有绿氢示范项目, 并针对各类项目特征进行全面剖析; 在此基础上, 研判未来绿氢示范项目的发展趋势。之后, 分析当前发展所面临的关键问题与挑战, 并提出重点举措。[结果] 研究表明: 当前示范项目主要有配用电侧/微网侧电氢耦合项目、新能源基地规模化制氢与综合利用项目以及氢能灵活调节项目三大类, 其规模化推广的关键问题在于: 缺乏针对电、氢系统的协同规划与统筹、绿氢经济竞争力较低以及部分核心技术、设备、材料依赖进口。[结论] 应加强协同规划与顶层设计、研究制定配套政策体系、健全相关市场机制、加快标准制定、部署重点项目为关键着力点构建重点举措体系, 推动绿氢项目推广与电-氢协同发展。

关键词: 绿氢; 模式; 电-氢协同; 协同规划; 经济性; 标准

中图分类号: TK91; F416

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0089-08

开放科学(资源服务)二维码:



Analysis and Development Outlook on the Typical Modes of Green Hydrogen Projects

ZHANG Siyu[✉], ZHANG Ning, LU Jing, SHI Qing, DAI Hongcai
(State Grid Energy Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: [Introduction] The increasingly high proportion of renewable power sources raises higher requirements for the safe and stable operation of the power system and the reliable supply of electricity. Hydrogen and electricity are complementary in many scenarios of energy consumption. Green hydrogen produced by renewable power will become an important component of the new energy system, which can also facilitate the construction of the new power system. Recently, green hydrogen demonstration projects in China and abroad are burgeoning. However, the typical modes and future development trends are not clear. This paper aims at clarifying the typical modes for green hydrogen projects and providing solutions to issues faced by the large-scale application and the full play of power-hydrogen coupling. [Method] In this paper, the existing green hydrogen demonstration projects in China and abroad were systematically analyzed. The characteristics of the three groups were studied, based on which, the development trends of green hydrogen demonstration projects were proposed. Then, the key problems and challenges were analyzed, and key measures were proposed. [Result] Through the study, the green hydrogen projects are grouped into three categories, which are power-hydrogen coupling projects on the distribution/micro-grid side, large-scale hydrogen production near renewable basis and utilization projects and hydrogen-based flexible adjustment projects. Key issues lying ahead include the lack of coordinated planning between the power and hydrogen system, the less economic competitiveness of green hydrogen and some of the key technologies, equipment and materials are dependent on imports. [Conclusion] To solve these issues and promote the development of green hydrogen projects, the coordinated planning of power and hydrogen system should be strengthened, formulated a set of supporting policies, improved the relevant market mechanisms, accelerated the standards and deployed

收稿日期: 2023-02-03 修回日期: 2023-03-16

基金项目: 国网能源研究院自研项目“面向新型电力系统的电氢协同生产模拟模型构建与实证研究”(526700220006)

some essential projects.

Key words: green hydrogen; mode; power-hydrogen coupling; coordinated planning; economy; standards

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

氢能具有来源广泛、清洁无碳、灵活高效、应用场景丰富等特点,世界主要发达国家都在积极布局氢能产业,期望发挥其在能源转型、脱碳减排、经济增长与产业带动等方面的重要作用^[1-3]。当前全球已有 30 多个国家针对氢能发展制定了战略规划、技术路线与投资计划等,中国、日本、德国等将氢能上升至国家能源战略的高度^[4-6]。2022 年 3 月 23 日,国家发改委发布《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》,首次明确氢能是未来我国能源体系的重要组成部分,确定可再生能源电解制氢是主要发展方向。

我国氢能发展呈现新一轮热潮,相关企业加快制-储-输-用全产业链布局,总体处于初步商用阶段;高校与研究机构等加快技术研发,重点突破制氢、氢燃料电池等关键技术^[7]。

对电力系统而言,氢能可作为灵活性资源、长周期储能和外送新载体,电-氢协同有望破解新能源大规模发展后电力系统的灵活调节问题^[8-10]。部分学者从宏观规划出发,构建区域级电-氢协同规划优化模型^[11-12];部分学者从微观出发,重点关注微观项目设备配置^[13-15],以及各设备运行方式^[16-18]。目前,以电制氢设施为关键元素的各类绿氢示范项目逐渐增多,以电制氢设施为接口和载体,电力系统和氢能系统的关联将日趋紧密,电-氢协同效应将逐步凸显^[19]。

文章将针对国内外现有的绿氢示范项目,根据项目关键特征与侧重点的不同,总结提炼典型的绿氢示范项目模式,并针对其未来发展趋势进行研判。在此基础上,研究限制电-氢协同效应充分发挥的关键因素,剖析关键问题并提出针对性的重点举措,推动电-氢协同快速发展,为新型电力系统建设提供强大助力。

1 绿氢示范项目模式分析

目前,国内外已建成众多绿氢示范项目,大体上可分为 3 类,分别是配用电侧/微网侧电氢耦合项目、新能源基地规模化制氢与综合利用项目以及氢能灵

活调节项目。

1.1 配用电侧/微网侧电氢耦合项目

配用电侧/微网侧电氢耦合项目的关键特征是:利用氢电耦合技术开展制氢、储氢、用氢全流程示范。此类项目的电-氢耦合模式基本一致,氢能流主要包括:电解水制氢→储氢罐→氢燃料电池汽车加氢+燃料电池发电用氢;电能流主要包括:可再生能源发电+氢燃料电池发电→电化学储能→质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)电解水制氢用电+电动汽车快充用电,示意图如图 1 所示。不同项目中设备配备的容量参数不同,具体如表 1 所示。

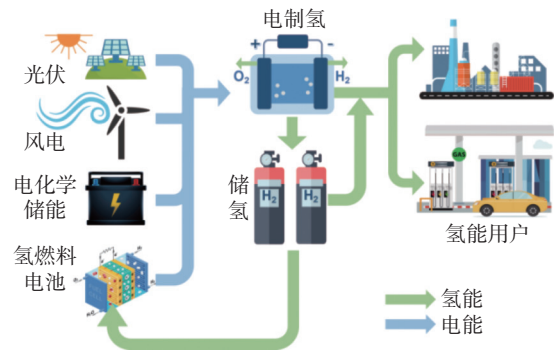


图 1 配用电侧/微网侧电氢耦合项目示意图

Fig. 1 Schematic diagram of power-hydrogen coupling projects on the distribution/micro-grid side

表 1 代表性配用电侧/微网侧电氢耦合项目具体参数

Tab. 1 Specifications of representative power-hydrogen coupling projects on the distribution/micro-grid side

项目	制氢	储氢	用氢
宁波慈溪氢电耦合直流微网示范工程 ^[20]	PEM电解水制氢功率为400 kW 氢产能 $\geq 6 \times 10^5 \text{ Nm}^3/\text{a}$	储氢罐	10辆氢燃料电池车、240 kW氢燃料电池
杭州亚运低碳氢能示范工程 ^[21]	碱性电解水氢产能为200 Nm^3/h	储氢罐	燃料电池发电、氢燃料电池车
台州大陈岛氢利用示范工程 ^[22]	PEM电解水制氢功率为100 kW	储氢容量200 Nm^3	氢燃料电池热电联供100 kW、氢燃料电池车
丽水缙云水光氢生物质零碳能源示范项目 ^[23]	水电解制氢	储氢罐	燃料电池、氢能叉车及天然气提纯

不同项目各具特色, 宁波慈溪氢电耦合直流微网示范工程是国内首个电-氢-热-车耦合的±10 kV 直流互联系统, 同时充分利用燃料电池发电产生的热能供热^[20]; 杭州亚运低碳氢能示范工程建成柔性直流配电网, 并与格力电器合作, 进一步研究直流充电、空调变频等典型近用户侧技术应用^[21]; 丽水缙云水光氢生物质零碳能源示范项目通过电网供电制氢, 氢气应用场景更加多元化, 包括利用绿氢“提纯”沼气制取生物天然气^[23]。

1.2 新能源基地规模化制氢与利用项目

新能源基地规模化制氢与综合利用项目的关键特征是: 规模化制氢与多元化利用。此类项目基本分布在风光水电资源丰富地区, 主要由风电/光伏发电、电解水制氢、氢气利用三大系统单元组成, 示意图如图2所示。

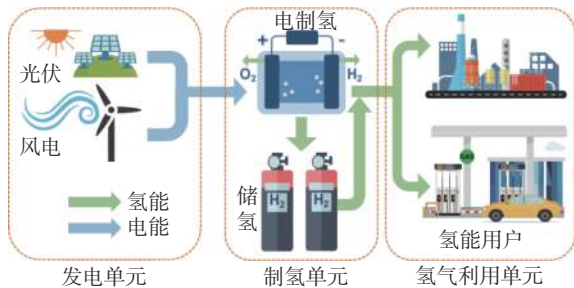


图2 新能源基地规模化制氢与利用项目示意图

Fig. 2 Schematic diagram of large-scale hydrogen production in renewable energy basis and utilization projects

表2中列举了代表性新能源基地规模化制氢与利用项目的关键参数。

表2 代表性新能源基地规模化制氢与利用项目具体参数

Tab. 2 Specifications of large-scale hydrogen production in renewable energy basis and utilization projects

项目	发电	制氢	用氢
甘肃液态太阳燃料合成示范项目 ^[24]	10 MW 光伏	电催化分解水制氢 单套电解槽 1 000 Nm ³ /h	二氧化碳催化加氢制甲醇
新疆阿克苏库车电制氢项目 ^[25]	300 MW 光伏	碱性电解水制氢 氢产能2×10 ⁴ t/a	供给炼化厂
宁夏宝丰能源太阳能电解制氢储能及综合应用示范项目 ^[26]	200 MW 光伏	碱性电解水制氢 氢产能2×10 ⁴ Nm ³ /h	供给煤化工生产系统

甘肃“液态太阳燃料合成示范项目”是国内首个太阳能燃料生产示范工程, 光伏电解水制取的氢

气与汽化后的二氧化碳在催化剂作用下反应合成甲醇, 可作为低碳运输燃料^[24]; 中石化新疆库车绿氢示范项目是全球在建的最大光伏绿氢生产项目, 项目生产的绿氢将供应中国石化塔河炼化, 开创绿氢炼化新发展路径^[25]; 宝丰能源一体化太阳能电解水制氢项目所产氢气, 供给加氢站, 以及化工系统生产聚乙烯、聚丙烯等上百种高端化工产品, 与现代煤化工耦合制高端化工新材料^[26]。

1.3 氢能灵活调节项目

氢能灵活调节项目的关键特征是: 将氢能作为电力系统的可调节资源。一方面, 电制氢装置可以在源侧直接追踪新能源波动性出力, 促进可再生能源的就地消纳; 另一方面, 电制氢装置可与储氢、燃气发电相配合, 在新能源出力不足、电力供应紧张时段提供发电出力, 保障新型电力系统全时段电力电量平衡, 示意图如图3所示。

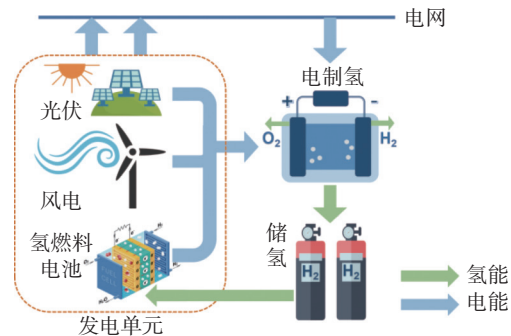


图3 氢能灵活调节项目示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hydrogen used for flexible adjustment projects

目前, 此类项目数量相对较少。安徽省六安市的兆瓦级氢能综合利用项目^[27]是电网领域首个兆瓦级 PEM 制氢示范, 电制氢装置作为可控负荷, 将过剩的电力转化为氢能进行储存, 并与兆瓦级燃料电池发电站相结合实现“削峰填谷”; 德国美因茨项目^[28]中, 制氢装置与中压电网及周围的4个风电场相连接, 当现货市场中可再生电力价格较低时, 则判定此时风电“过剩”, 并启动制氢设备, 其余时间风电机组则并网发电。

2 绿氢项目发展趋势研判

目前已开展的绿氢示范项目中, 或是侧重于制氢、储氢、用氢关键技术的全流程示范, 或是侧重于氢气规模化制取与利用, 尚未充分发挥氢能可作为

灵活性资源、长周期储能和新能源外送新载体的优势。未来,制氢厂商与电网企业应积极合作,通过实际运行验证电-氢耦合对追踪新能源出力、长周期系统调节的价值与作用,推进绿氢示范项目规划与落地,实现“双赢”。

2.1 如何实现“双赢”

绿氢示范项目将不可避免地面临“新能源发电设备利用率高”与“氢能规模化生产设备利用率高”之间的矛盾。即便在风光资源禀赋较好的西北地区,光伏利用小时数基本不超过 2500 h,风电利用小时数不超过 3000 h^[29]。如果电制氢设备用电完全依赖新能源发电机组,较低的设备利用率将抬高氢气平准化成本,需考虑提高风电光伏与电制氢设备容量配比,或是在自建新能源电站出力不足或存在波动时从电网购电,以提高制氢设备利用率、降低氢气全生命周期平准化成本^[17-18]。

从电网企业的角度来看,大电网起到了为制氢设备调峰并提供备用的作用,在一定程度上是为波动性新能源“反向调峰”,将加大电网安全稳定运行压力。电网企业希望电制氢设施作为高度可调节负荷,通过灵活运行方式参与大电网调峰,有效缓解大电网消纳新能源的压力。

从制氢厂商的角度来看,电耗成本占据氢气平准化成本的 60% 以上^[16]。而电制氢设施作为“能上能下”的可调节负荷,动态响应能力优异,可结合自身负荷特性适时参与调峰、调频,并获得相应的经济补偿,将有效提升绿氢经济性。

因此,双方应围绕电制氢设备作为高度可调节负荷参与电网调峰、调频服务开展合作,并推进相关电-氢耦合模式落地应用与推广。

2.2 远期绿氢项目模式研判

远期来看,绿氢项目应包含自建光伏/风电电站、电制氢设施、储氢罐等 3 个关键组成部分,视设备成本高低以及利用小时情况决定是否配备电化学储能以及氢燃料电池(或燃氢汽轮机机组),同时具备辅助服务提供商和电力用户两种角色,并将电力价格作为绿氢项目中各设备启停的指导信号。当电力市场足够成熟时,价格信号将真实地反映电力商品在时间和空间上的供需关系,引导绿氢项目在辅助服务提供商、电力用户两种角色定位之间实时转换,以响应市场价格波动,赚取收益的同时提升电网调节

能力。

未来绿氢项目的结构与图 3 类似,其运营模式如下。

电制氢设备采用自建光伏/风电电站+电网+电化学储能联合供电模式,最大程度地降低电耗成本。当电网电价低于自建光伏/风电电站的度电成本时,此时电网中电能供给过剩,电制氢设备采用电网供电,自建光伏/风电机组所发电量存储于电化学储能中;当电网电价高于自建光伏/风电电站的度电成本时,电制氢设备采用自建光伏/风电电站供电,若自建光伏/风电机组所发电量不足时,由电化学储能机组补足缺口。电制氢设备制取的氢气或就地利用、或存储于储罐中。

当辅助服务市场中调频、调峰服务价格高于一定水平时,项目将由电力用户转变为辅助服务提供商。此外,当现货市场的电价较高时,此时电能缺口较大,电力供需关系紧张,电制氢设备关停,利用储罐中的氢气供给燃氢机组或氢燃料电池,向大电网“反送”电能。同时,项目自建风电、光伏电站所发电量全额上网,以赚取收益。

总体来看,绿氢项目未来的盈利空间与发展潜力巨大,但目前相关示范项目的模式种类较为单一,未能充分发挥氢能可以实现灵活调节与长周期存储的优势,电-氢协同效应尚未充分发挥。因此,制氢厂商亟需与电网企业通力合作,针对近期重点布局的新能源制氢示范项目,通过实际运行验证电制氢作为可调节负荷追踪新能源出力和支撑大电网灵活运行的可行性;中远期待电力市场逐步成熟后,将新能源制氢设备与储氢、燃氢发电机组相结合,验证电-氢-电“双向耦合”的经济性,迭代优化其适用场景与运营模式。

3 关键问题与重点举措

3.1 关键问题

目前,大部分绿氢项目仍处于示范阶段,为推动绿氢项目规模化应用,需重点解决以下 3 个关键问题。

1)从宏观层面来看,我国缺乏针对电、氢两种能源系统协同利用的科学规划与协调统筹,相关政策体系与标准体系仍不健全。电力、氢能产业呈现“各自为政”的状态,未考虑不同能源系统之间的耦合互动。例如:在进行电力系统规划时,仅考虑了电源、

电网之间的匹配情况, 未考虑电-氢协同背景下, 大量可再生能源制备成氢气后, 终端氢气的消费与利用问题。而目前输氢管道、加氢站等基础设施发展薄弱, 储运效率较低、成本居高不下, 进一步阻碍了绿氢项目的规模化推广。

2) 绿氢相较于化石燃料制氢的经济竞争力较低, 且其作为调节资源的价值难以体现。目前, 电制氢的全生命周期平准化成本为 15~20 元/kg, 仍高于煤制氢价格^[16-18]。需通过市场化手段, 设计更细颗粒度的市场机制, 充分体现电制氢、储氢等设备的调节价值, 保证电-氢协同项目的经济性与可持续发展, 助

力各类灵活性资源充分发挥调节潜力。

3) 绿氢相关核心技术、设备系统等有待进一步提升, 部分设备所用关键材料仍依赖进口。例如: 国内质子交换膜电解水技术所用贵金属催化剂用量高于国际先进水平, 导致成本高昂; 氢液化系统核心设备仍然依赖进口; 燃料电池的综合效率、电堆功率和耐久性, 以及燃料电池车的加氢速度、续航里程方面与国际先进水平存在较大差距。

3.2 重点举措

针对目前制约绿氢项目规模化推广的瓶颈问题, 提出“五位一体”重点举措体系, 如图 4 所示。

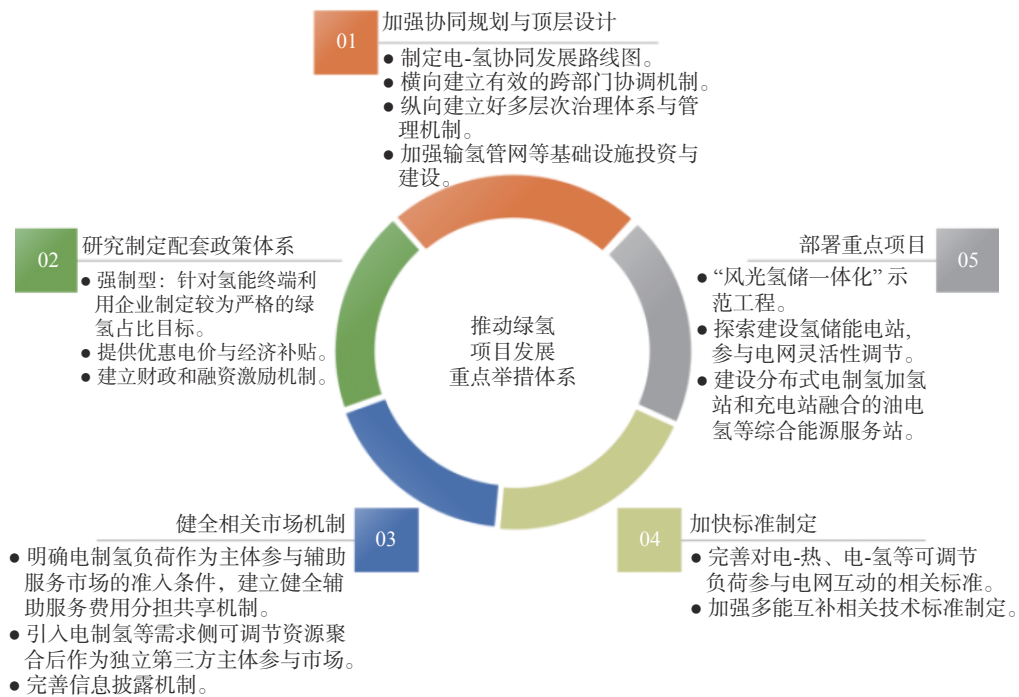


图 4 “五位一体”重点举措体系

Fig. 4 Set of key measures-to-take

1) 加强协同规划与顶层设计

统筹我国新型电力系统的灵活性资源需求发展趋势, 按照差异化的原则, 结合典型应用场景, 做好电能、氢能系统的协同规划。

首先, 在国家层面明确相关的牵头主管部门, 及该部门的权限与责任。具体应包括: 统筹制定电-氢协同战略发展路线图, 明确氢能的战略性新兴产业的定位, 提出氢能、电-氢产业协同发展基本原则及各阶段目标, 部署推动氢能、电-氢产业高质量发展的重要举措。

其次, 在横向建立有效的跨部门协调机制, 在纵向向省-市-区县-园区政策传导、实施和反馈机制。加强电力公司、氢能产业相关公司、管网公司等沟通协调, 建立联合工作小组, 克服行业壁垒等问题; 推动打造电-氢协同系统建设互动、共享、共赢的生态圈, 保障电-氢协同规划成果的快速有效落地。

此外, 应特别注意加强输氢管网等基础设施投资与建设。具体包括: 优化技术设施管理水平; 注重与已有氢气、电力和天然气基础设施资源的优化整合, 推动现有装置设备改良升级; 并建立相关基础设

施合作共享机制。

2) 研究制定配套政策体系

通过强制型、激励型政策措施的有机结合,为电制氢企业给予一定的补贴和优惠电价政策对冲前期运营成本,提高项目回报率,提高企业布局绿氢项目的积极性。

在强制型政策方面,通过为绿氢加贴“标签”以辨识,并针对氢能终端利用企业制定较为严格的绿氢占比目标。

在激励型政策方面,具体可包括:在产业发展初期为电制氢厂商提供优惠电价政策与经济补贴;为金融机构向相关企业发放碳减排贷款提供便利,提供贷款支持力度,降低贷款利率水平;对相关企业购进生产设备时所支付的增值税,实行即征即返、全额或部分返还的优惠政策,降低项目建设期资金负担;广泛吸收社会资金建立绿氢发展产业基金。

3) 健全相关市场机制

首先,完善“两个细则”,明确电制氢负荷作为主体参与辅助服务市场的准入条件;建立健全辅助服务费用分担共享机制,为电-氢互补模式通过辅助服务获得收益创造良好的市场条件;提升辅助服务市场品种的丰富性、价格信号的及时性、成本收益分摊的公平性等。

其次,建立需求响应常态化机制;引入电制氢等需求侧可调节资源聚合后作为独立第三方主体参与市场,挖掘需求侧资源调节电力供需平衡的能力。

最后,完善信息披露机制,发挥信息披露在吸引电-氢协同项目主体参与、引导资源优化配置、提高市场竞争效率等方面的作用。

4) 加快标准制定

首先,完善对电-氢等可调节负荷参与电网互动的相关标准。开展并网型制氢项目与电力系统间联络线运行方式的梳理工作;研究制定电制氢、储氢、燃氢机组等主体参与电力系统协同运行的管理办法,明确运行方式、运行界限、性能标准、技术规范和责任义务等;明确支持电制氢项目等自行配置一定容量的储能,提高其与电力系统互动能力,使之逐步成为电力系统灵活调节资源。

其次,加强多能互补相关技术标准制定和对外输出。制定电-氢等多能互补行业规范以及项目质量、安全、建设、测试等方面的标准;研究明确储氢

等设施的质量审查、消防验收、安全处置等环节与电网相关的安全责任划分。

5) 部署重点项目

统筹地方基础条件,因地制宜开展绿氢重点项目建设,推动电-氢协同模式的推广应用,建设电-氢互补的跨网互济示范工程。

首先,在新能源富集地区,建设“风光氢储一体化”示范工程,促进大规模产业集群化建设。

其次,在大规模新能源汇集等电网节点探索建设氢储能电站,参与电网灵活性调节。

最后,在重卡、物流车辆需求密集区,因地制宜建设分布式电制氢加氢站和充电站融合的油电氢等一体式综合能源服务站,探索与电网互动机制和商业模式可行性。

4 结论

文章基于对国内外现有绿氢示范项目的分析研究,明确了配用电侧/微网侧电氢耦合项目、新能源基地规模化制氢与综合利用项目以及氢能灵活调节项目3类典型模式与特征,并研判了其未来发展趋势。在此基础上,针对目前绿氢项目规模化推广与电-氢协同效应充分发挥所面临的关键问题与挑战,提出相应的解决措施。具体结论如下:

1) 配用电侧/微网侧电氢耦合项目的关键特征为利用氢电耦合技术开展制氢、储氢、用氢全流程示范;新能源基地规模化制氢与综合利用项目的关键特征为规模化制氢与多元化利用;氢能灵活调节项目的关键特征为将氢能作为电力系统的可调节资源。

2) 制氢厂商与电网企业应在近期重点布局新能源制氢示范项目,通过实际运行验证电制氢作为可调节负荷追踪新能源出力和支撑大电网灵活运行的可行性;中远期待电力市场逐步成熟后,将新能源制氢设备与储氢、燃氢发电机组相结合,验证电-氢-电“双向耦合”的经济性。

3) 为充分发挥绿氢项目的电-氢协同效应,应对电力与氢能产业进行协同规划,完善配套政策与标准,提高核心技术自主化水平,以提升绿氢经济性。

未来,研究团队将进一步开展电-氢协同相关的政策模拟仿真工作,以期明确我国绿氢产业发展路径,并助力新型电力系统建设。

参考文献:

- [1] International Energy Agency. The future of hydrogen: seizing today's opportunities [R/OL]. (2019-06-01) [2023-02-01]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf.
- [2] International Renewable Energy Agency. Hydrogen: a renewable energy perspective [R/OL]. (2019-09-01) [2023-02-01]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf.
- [3] Hydrogen Council, McKinsey & Company. Hydrogen insights: a perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness [R/OL]. (2021-01-01) [2023-02-01]. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>.
- [4] Bloomberg NEF. Hydrogen economy outlook: key messages [R/OL]. (2020-03-30) [2023-02-01]. <https://www.opuskinetic.com/wp-content/uploads/2021/01/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>.
- [5] International Renewable Energy Agency. Geopolitics of the energy transformation: the hydrogen factor [R/OL]. (2022-01-01) [2023-02-01]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf.
- [6] International Renewable Energy Agency. Green hydrogen supply: a guide to policy making [R/OL]. (2021-05-01) [2023-02-01]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA_Green_Hydrogen_Supply_2021.pdf.
- [7] 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. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.02.020.
- 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. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.02.020.
- [8] International Renewable Energy Agency. Innovation landscape brief: renewable power-to-hydrogen [R/OL]. (2019-06-01) [2023-02-01]. https://hydrogen-portal.com/wp-content/uploads/2021/12/IRENA_Power-to-Hydrogen_Innovation_2019.pdf.
- [9] International Renewable Energy Agency. Hydrogen from renewable power: technology outlook for the energy transition [R/OL]. (2018-09-01) [2023-02-01]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf.
- [10] International Renewable Energy Agency. Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal [R/OL]. (2020-12-01) [2023-02-01]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf.
- [11] JIN C, XIAO J Y, HOU J M, et al. Cross-regional electricity and hydrogen deployment research based on coordinated optimization: towards carbon neutrality in China [J]. *Energy reports*, 2022, 8: 13900-13913. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.09.191.
- [12] RAN L, MAO Y L, YUAN T J, et al. Low-carbon transition pathway planning of regional power systems with electricity-hydrogen synergy [J]. *Energies*, 2022, 15(22): 8764. DOI: 10.3390/en15228764.
- [13] 许传博, 赵云灏, 王晓晨, 等. 碳中和愿景下考虑电氢耦合的风光场站氢储能优化配置 [J]. 电力建设, 2022, 43(1): 10-18. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2022.01.002.
- XU C B, ZHAO Y H, WANG X C, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage for wind and solar power stations considering electricity-hydrogen coupling under carbon neutrality vision [J]. *Electric power construction*, 2022, 43(1): 10-18. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2022.01.002.
- [14] 袁铁江, 张昱, 栗磊, 等. 计及功率密度约束含氢储能的预装式多元储能电站容量优化配置研究 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 496-506. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191723.
- YUAN T J, ZHANG Y, LI L, et al. Capacity optimization configuration of pre-installed multi-energy storage power station considering power density constrained hydrogen storage [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2021, 36(3): 496-506. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191723.
- [15] 邵志芳, 吴继兰, 赵强, 等. 风电制氢效率分析模型及仿真 [J]. 技术经济, 2018, 37(6): 69-75, 129.
- SHAO Z F, WU J L, ZHAO Q, et al. Cost effectiveness analysis model for wind power produce hydrogen system and simulation [J]. *Technology economics*, 2018, 37(6): 69-75, 129.
- [16] ZHANG S Y, LIU L, LU J, et al. Research on the different interaction modes between hydrogen electrolyzers and the power grid [C]//Shanghai Jiaotong University. Proceedings of the 6th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, September 17-20, 2021. Shanghai, China: IEEE, 2021: 1285-1289. DOI: 10.1109/ICPRE52634.2021.9635205.
- [17] ZHANG S Y, ZHANG N, ZHANG X F, et al. Study on the optimization of system configuration of green hydrogen projects [C]//Shanghai Maritime University. Proceedings of the 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, September 23-26, 2022. Shanghai, China: IEEE, 2022: 1260-1263. DOI: 10.1109/ICPRE55555.2022.9960360.
- [18] ZHANG S Y, WANG C M, CHEN R, et al. Optimization of system configuration and production simulation for on-grid green hydrogen projects [C]//Tsinghua University. Proceedings of the 5th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, September 28-30, 2022. Beijing, China: IEEE, 2022: 397-401. DOI: 10.1109/REPE55559.2022.9948766.
- [19] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 89-99. DOI: 10.

- 15302/J-SSCAE-2022.03.010.
- XU C B, LIU J G. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: application value, challenges, and prospects [J]. *Strategic study of CAE*, 2022, 24(3): 89-99. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.010.
- [20] 毛航银, 叶夏明. 宁波慈溪氢电耦合直流微网示范工程正式完工 [EB/OL]. (2022-12-30) [2023-02-01]. http://www.cnenergynews.cn/dianli/2022/12/30/detail_20221230129598.html.
- MAO H Y, YE X M. Ningbo Cixi hydrogen-electric coupling DC microgrid demonstration project was officially completed [EB/OL]. (2022-12-30) [2023-02-01]. http://www.cnenergynews.cn/dianli/2022/12/30/detail_20221230129598.html.
- [21] 浙江在线. 风和光变成电和氢 钱塘江畔开建的“零碳”园区有啥奥妙? [EB/OL]. (2021-10-18) [2023-02-01]. https://guoqi.zjol.com.cn/yw/202110/t20211018_23236919.shtml.
- ZJOL. Wind and light turn into electricity and hydrogen, what is the mystery of the "net-zero" park built on the banks of the Qiantang River? [EB/OL]. (2021-10-18) [2023-02-01]. https://guoqi.zjol.com.cn/yw/202110/t20211018_23236919.shtml.
- [22] 浙江在线. 全国首个海岛“绿氢”示范工程正式投运 年产氢气73000标方 [EB/OL]. (2022-07-08) [2023-02-01]. https://zjnews.zjol.com.cn/zjnews/202207/t20220708_24491791.shtml.
- ZJOL. China's first island "green hydrogen" demonstration project was officially put into operation, with an annual output of 73 000 standard meters of hydrogen [EB/OL]. (2022-07-08) [2023-02-01]. https://zjnews.zjol.com.cn/zjnews/202207/t20220708_24491791.shtml.
- [23] 新华网. 乡村氢能生态示范工程在浙江丽水投运 [EB/OL]. (2022-11-02) [2023-02-01]. http://zj.news.cn/2022-11/02/c_1129095172.htm.
- XINHUANET. The rural hydrogen energy ecological demonstration project was put into operation in Lishui, Zhejiang [EB/OL]. (2022-11-02) [2023-02-01]. http://zj.news.cn/2022-11/02/c_1129095172.htm.
- [24] 兰州新区报. 全球首套规模化液态太阳燃料合成示范项目在新区试车成功 [EB/OL]. (2020-01-21) [2023-02-01]. <http://www.lzxq.gov.cn/system/2020/01/21/030013586.shtml>.
- China Lanzhou New Area. The world's first large-scale liquid solar fuel synthesis demonstration project was successfully commissioned in the new area [EB/OL]. (2020-01-21) [2023-02-01]. <http://www.lzxq.gov.cn/system/2020/01/21/030013586.shtml>.
- [25] 中国石化新闻网. 中国石化新疆库车绿氢示范项目启动建设 [EB/OL]. (2021-12-01) [2023-02-01]. http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2021-12/01/content_7009010.html.
- Sinopecnews. Sinopec Xinjiang Kuqa Green Hydrogen Demonstration Project started construction [EB/OL]. (2021-12-01) [2023-02-01]. http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2021-12/01/content_7009010.html.
- [26] 中国日报网. 全球最大电解水制氢项目在宁夏投产 宝丰能源或于 2040 年实现“碳中和” [EB/OL]. (2021-04-20) [2023-02-01]. <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202104/20/WS607e8888a3101e7ce974a381.html>.
- China Daily. The world's largest hydrogen electrolysis project put into operation in Ningxia, Baofeng Energy may achieve "carbon neutrality" by 2040 [EB/OL]. (2021-04-20) [2023-02-01]. <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202104/20/WS607e8888a3101e7ce974a381.html>.
- [27] 新华网. 兆瓦级氢能综合利用示范站在六安投运 [EB/OL]. (2022-07-07) [2023-02-01]. http://ah.news.cn/2022-07/07/c_1128812184.htm.
- XINHUANET. The megawatt-level hydrogen energy comprehensive utilization demonstration station was put into operation in Lu'an [EB/OL]. (2022-07-07) [2023-02-01]. http://ah.news.cn/2022-07/07/c_1128812184.htm.
- [28] 中国能源报. 林德集团开展“风电制氢”项目 [EB/OL]. (2015-07-20) [2023-02-01]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2015-07/20/content_1589744.htm.
- China Energy News. Linde Group carries out hydrogen production projects from wind power [EB/OL]. (2015-07-20) [2023-02-01]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2015-07/20/content_1589744.htm.
- [29] International Renewable Energy Agency. Global hydrogen trade to meet the 1.5 climate goal: part III-green hydrogen cost and potential [R/OL]. (2022-05-01) [2023-02-01]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Global_Hydrogen_Trade_Costs_2022.pdf.

作者简介:



张丝钰

张丝钰 (第一作者, 通信作者)

1993-, 女, 河北邯郸人, 工程师, 西安交通大学电气工程博士, 主要从事氢能、能源电力规划、能源转型、综合能源等领域的研究 (e-mail) siyuzhang0731@163.com。

张宁

1989-, 男, 山东滨海人, 高级工程师, 北京交通大学电气工程博士, 主要从事能源电力规划、能源转型、能源互联网、综合能源等领域的研究 (e-mail) zhangning@mail.sgeri.com.cn。

卢静

1985-, 女, 山东胶州人, 高级工程师, 西安交通大学电气工程硕士, 主要从事新能源、能源电力规划、综合能源等领域的研究 (e-mail) lujing@mail.sgeri.com.cn。

(编辑 叶筠英)