

面向新能源规模化消纳的绿氢化工技术 研究现状与关键支撑技术展望

邱一苇¹, 吉旭¹, 朱文聪¹, 朱杰¹, 周步祥¹, 贺革¹, 李佳蓉², 林今^{2*}

(1. 四川大学, 四川省 成都市 610065; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Research Status of Green Hydrogen-based Chemical Engineering Technology and Prospect of Key Supporting Technologies for Large-scale Utilization of New Energies

QIU Yiwei¹, JI Xu¹, ZHU Wencong¹, ZHU Jie¹, ZHOU Buxiang¹, HE Ge¹, LI Jiarong², LIN Jin^{2*}

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Producing ammonia, methanol, and other chemical products from “green hydrogen”, essentially from renewable energy-based water electrolysis, is regarded as a key technological route toward the admittance of new energy and the decarbonization of the electrical power and chemical industry. Green hydrogen-based chemical engineering (GHCE) technology involves a deep cross between multiple disciplines. Current review papers on green hydrogen mainly focus on hydrogen production; therefore, a review on the utilization of green hydrogen coupled with the downstream chemical industry is still in need. To fill this gap, this paper first summarizes the main technical characteristics of the components in the GHCE system. Then the research status of the GHCE technology is summarized from two aspects, i.e., the GHCE system and power system integration. Shortcomings of the current researches are analyzed. Finally, research directions are prospected, including design and flexible regulation of large-scale hydrogen production, flexibility modeling of the chemical synthesis process, and analysis and control of the GHCE system to participate in power system balancing. Requirements on key supporting systems are proposed.

KEY WORDS: green hydrogen-based chemical engineering (GHCE); power-to-chemicals (P2X); new energy admittance; large-scale utilization of green hydrogen; flexibility; power system integration

摘要: 可再生能源电解水制取“绿氢”并进一步合成氨、醇

等化工产品, 是促进新能源消纳, 实现电力、化工行业深度脱碳的重要技术方向。绿氢化工技术涉及电力、化工等多学科深度交叉, 但当前绿氢相关研究综述以制氢技术自身为主, 尚缺乏绿氢规模化利用、绿氢与下游化工产业耦合接入电力系统等方面的梳理。为填补上述空缺, 支撑绿氢化工技术发展, 推动可再生能源消纳及绿氢规模化利用, 首先概述绿氢化工系统各工段原理及技术特性; 然后分别从绿氢化工系统自身及接入电力系统的视角梳理研究现状, 分析现有研究不足; 最后, 展望支撑绿氢化工发展的制氢系统规模化设计与灵活调控、柔性化工合成仿真模拟、面向电力平衡调控的多工段协调控制技术, 提出接入电力系统及运行的支撑系统开发需求。

关键词: 绿氢化工; 电转化学品; 新能源消纳; 绿氢规模化利用; 灵活性; 电力系统接入

0 引言

加快发展可再生能源、实施可再生能源替代行动, 是我国推进能源革命和构建清洁低碳、安全高效能源体系的重大举措^[1]。2021年我国可再生能源发电装机容量10.63亿kW, 发电量24 853亿kW·h, 分别占总装机容量与发电量的44.8%和29.8%, 其波动性、随机性将显著影响电力系统安全稳定, 带来消纳难题^[2]。可再生能源电解水制氢技术发展迅速, “绿氢”产能规模加速扩大, 有望为可再生能源规模消纳提供全新的技术途径。

绿氢作为二次能源, 其潜在下游包括化工、冶金、交通、天然气掺氢、氢储能等^[3]。据《中国氢能白皮书》^[3]和国际能源署(IEA)报告^[4]统计, 2020年我国氢气消费需求约3342万t, 其中66%

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB4000500); 国家自然科学基金项目(52377116, 51907099, 52207116)。

National Key R&D Program of China (2021YFB4000500); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52377116, 51907099, 52207116).

作为原料应用于化工行业。另据预测^[5]，2030 年我国化工行业绿氢消费 376 万 t，超过钢铁冶炼行业的 94 万 t 和交通行业的 301 万 t，是我国最大的绿氢需求市场。

鉴于氢在化工领域的应用规模，发展绿氢化工 (green hydrogen-based chemical engineering, GHCE) 技术，以“绿氢”替代化石燃料制氢生产氨、醇等化学品，将显著促进新能源消纳、降低化工行业碳排放。国家发展改革委、能源局联合印发的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》^[6]中提出扩大工业领域氢能替代化石能源应用规模，积极引导合成氨、合成甲醇、炼化、煤制油气等行业由高碳工艺向低碳工艺转变；科技部等九部门印发的《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030 年)》^[7]提出建设先进低碳零碳技术示范工程，在化工等重点行业建设绿电替代示范工程。此外，前沿研究也将氨、甲醇等化学品作为储氢、储能的潜在重要载体^[8-9]。

尽管绿氢化工技术已受到国内外关注，示范项目批量开工，但目前仍处于小规模示范阶段。其涉及电力、化工等多学科的深度交叉，但现有“绿氢”相关研究综述多以制氢技术自身为主^[10-14]，尚缺乏对绿氢规模化利用、绿氢与下游化工产业耦合、接入电力系统方面研究的梳理。

为填补上述空缺，本文首先概述绿氢化工系统各构成工段的基本原理与结构，分析发展现状；然后，针对并、离网条件下接入电力系统，评述技术经济分析、系统规划及参与电力平衡调控的研究现状；最后，展望支撑绿氢化工发展的关键技术，提出实现其工程应用的软、硬件支撑系统开发需求。

1 面向新能源消纳的绿氢化工技术概述

1.1 绿氢化工技术整体概述

绿氢的潜在下游包括化工合成、交通、氢燃料电池发电等。受限于燃料电池技术的成熟度，现阶段交通行业用氢需求相对有限，燃料电池车辆用氢占比不足 1%^[3]。故可认为，目前绿氢的主要消费终端为氨、甲醇合成等化工行业。

据文献^[15]测算，为满足 2050 全球升温不超过 2℃ 的目标，氨及硝酸现存产能的 29% 及全部未来新增产能均需以绿氢替代。假设 2020 年全国化工行业用氢(约 2 205 万 t)由电制氢替代，每标方氢气耗电 5kW·h，总电能需求约 1.24 亿 kW·h。以当年

全国用电量 7.51 万亿 kW·h 测算^[16]，绿氢化工在全国电网中的渗透潜力有望达到 14.1%；省级空间尺度上，以蒙西电网供电区为例，绿氢化工潜在渗透率超过 20.8%，且发电资源和化工用氢需求空间分布重合度较高，绿氢化工具备规模化消纳新能源的潜力。

根据最终产品分类，绿氢化工技术主要包括电转氨 (power-to-ammonia)、电转甲醇 (power-to-methanol)、电转甲烷 (power-to-methane)、电转液体燃料 (power-to-liquid fuels) 等。其中，氨是氢的第一大下游产品，是全球产量第二大的化学品，主要用于生产尿素、硝酸、复合肥等^[17]；甲醇是氢的第二大下游产品，是甲醛及其衍生物、甲胺类化合物的生产原料，在农药、医药、塑料等行业占据重要地位^[18]。此外，氨和甲醇均具备成为高能量密度可持续燃料的潜力^[8-9]。甲烷除作为燃料，亦是硝基甲烷、氢氰酸等化学品的生产原料。

利用电力合成化工产品的技术路线包括间接、直接合成 2 大类。间接合成路线通过电解水制取氢气，而后利用现有工艺合成化学品。直接合成路线利用高温电解等新技术，在单个反应器内通过直接电化学还原生产化学产品。后者无需独立的制氢工段，系统紧凑，能源效率高，但在催化剂活性、稳定性等方面尚不成熟，难以满足工业应用^[19]。因此，本文关注基于电解水制氢的“间接合成”技术路线。

绿氢化工系统由电解水制氢、储存缓冲、化工合成多工段串联构成，结构如图 1 所示。并/离网方式下，绿氢化工系统由风光电源及外部电网共同或单独供能，并由配套储能协助并网方式下的能量交换、离网方式下的构网/频率/电压支撑，构成“电

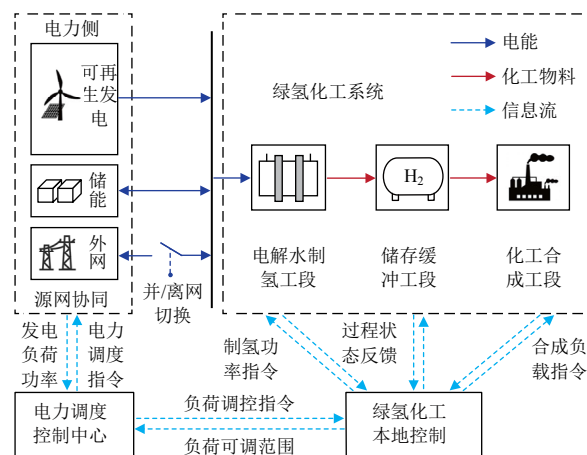


图 1 绿氢化工系统构成示意

Fig. 1 Schematic of the structure of the GHCE system

力-绿氢-化工”耦合系统。以下对各构成工段进行概述。

1.2 电解水制氢工段

电解水制氢是绿氢化工的首个工艺环节。电能可在催化剂作用下将水(H₂O)分解为氢气(H₂)和氧气(O₂),为化工合成提供原料。其技术路线包括碱性电解(alkaline electrolysis, AEL)、质子交换膜电解(proton exchange membrane electrolysis, PEMEL)、固体氧化物电解(solid oxide cell electrolysis, SOCEL)等,特性对比见表1^[11-14]。

其中,碱性电解水制氢技术成熟度高、成本低,单机规模10~15MW,寿命15~30年,国内技术自主度高、应用最为广泛^[11]。碱性电解水制氢技术包括压力型和常压型2类^[11]。因化工合成通常需要高压原料氢供应,选用压力型制氢装置可减少增压设施的投资和运行成本。质子交换膜电解技术负载调节范围宽、响应快^[12],单机规模2.5MW,但成本较高,寿命较短,在合成氨等化工设备30~50年的典型寿命周期内需多次更换,国内技术成熟度尚难以满足大规模应用^[13]。固体氧化物电解利用高温环境下电化学反应的热力学和动力学优势大幅提升能量效率,但其密封、温控系统复杂,存在热退化问题,寿命较短,尚处在初步示范阶段^[13-14]。

对比知,碱性电制氢技术具备成本、寿命、规

模等优势,是我国现阶段绿氢化工应用的首选。随着技术发展,质子交换膜电解技术凭借其调节速度快、负载范围宽等特性,亦有望应用于规模级绿氢化工项目。

1.3 化工合成工段

化工合成工段是绿氢化工系统的最终环节。其通常由反应器、压缩、换热、分离、循环等单元操作构成。合成氨、甲醇等化学品的原料除氢气外还包括氮气、二氧化碳等,通常借助空气分离、碳捕集等途径制取。典型绿氢化工产品合成工艺的技术特性由表2^[17-18,20-23]给出,并介绍如下。

1.3.1 合成氨

合成氨的技术路线包括传统热化学合成(Haber-Bosch, H-B)工艺^[17,20]和电化学合成^[24]、等离子体催化合成^[25]等新技术。受限于规模和成熟度,H-B工艺仍是目前工业应用的首选,现示范工程(见表3^[26-49])均基于该工艺,故本文关注于此。

图2给出H-B合成氨的简化流程示意图^[17,20]。其中,原料中的氮气由空气分离(air separation unit, ASU)制取,其工艺包括适用于大规模的深冷分离、适用于中小规模的变压吸附、膜分离等^[20],动力来源包括蒸汽驱动、电驱动等。原料氢、氮经纯化、混合、换热、压缩等环节后,进入合成氨反应器以约350~550℃、10~46MPa的条件合成氨^[17],主

表1 3类电解水制氢技术特性

Table 1 Technical characteristics of the three main types of the water electrolysis technologies

技术路线	工作温度/℃	工作压力/(×10 ⁵ Pa)	系统效率/%	负载下限/%	单机规模	技术成熟度	kW 装机成本/元	寿命/年	其他技术特性
碱性电解 ^[11,13]	60~100	<32	60~70	10~40	10MW 级	商业运行	1500~3000	15~30	调节范围较窄;低负载区域有氢氧杂质混合风险
质子交换膜电解 ^[12-13]	60~100	<200	56~79	0~10	MW 级	商业运行	8000~18000	3~10	无氢氧杂质混合风险;调节速度快
固体氧化物电解 ^[14-13]	700~1000	<25	75~81	0~10	百 kW 级	示范应用	>16 000	1~3	高温环境工作,温控系统复杂;存在热退化问题

表2 4种典型绿氢化工产品合成的技术特性

Table 2 Technical characteristics of the synthesis of four typical GHCE products

产品合成	反应原理	合成工艺	温度/℃	压力/10 ⁵ Pa	N ₂ /CO ₂ 来源	N ₂ /CO ₂ 制取途径	产品用途
合成氨 ^[17,20]	N ₂ +3H ₂ ↔2NH ₃	Haber-Bosch 工艺	350~550	100~460	空气	空气分离	制尿素、硝酸、复合肥料等
合成甲醇 ^[21-23]	CO ₂ +H ₂ ↔CH ₃ OH+H ₂ O	Lurgi 工艺、ICI 工艺、浆态床工艺	200~300	50~100	空气 ^[18] 、烟道气 ^[21] 、沼气 ^[22] 等	二氧化碳捕集	甲醛及衍生物、甲胺类化合物、燃料等
合成甲烷 ^[22-23]	CO ₂ +4H ₂ ↔CH ₄ +2H ₂ O	甲烷化(Sabatier)工艺	200~600	20~60			燃料、硝基甲烷、氢氰酸、甲烷衍生物等
合成液体燃料 ^[22-23]	nCO ₂ +3(3n+1)H ₂ ↔C _n H _{2n+2} +2nH ₂ O	Fischer-Tropsch (费托)工艺	280~320	1~10			燃料、交通运输等

表 3 国内外部分绿氢化工示范工程

Table 3 Selected GHCE demonstration projects in and out of China

产品	时间	地点	应用状态	电源规模/MW	制氢规模/ (万 t/年)	化工产量/ (万 t/年)	其他技术指标	N ₂ /CO ₂ 等原料气来源
	2018 ^[26]	日本福岛	投产	风、光	—	0.0007	测试原型，低温/低压合成	
	2022 ^[27]	丹麦	立项	62(风 12、光 50)	—	0.5000	并网型，余电上网，CO ₂ 碳减排 8200t/年	
	2022 ^[28]	沙特阿拉伯	建设	4000(风、光)	23.700	—	380kV 并网，碳减排 500 万 t/年	
	2022 ^[29]	澳大利亚	立项	18(光)	0.064	—	离网型，电制氢 10MW，替代甲烷重整制氢，8MW/(5MW·h)锂电池储能	
氨	2022 ^[30]	中国达茂旗	开工	400(风 200、光 200)	1.780	10.0000	并网型，配置电化学储能，储氢 1 万 m ³ ，合成氨温度≤400℃，压力≤7MPa	空气
	2022 ^[31]	中国乌拉特中旗	立项	500(风 400、光 100)	3.600	—	离网型，储能 40MW/(80MW·h)	
	2022 ^[31]	中国兴安盟	立项	500(风)	2.680	—	离网型，储能 100MW/(40MW·h)，储氢 10 万 m ³	
	2022 ^[32]	中国乌审旗	立项	3200(风 1600、光 1600)	9.000	50.0000	离网型，合成氨负载范围 30%~110%	
	2022 ^[33]	中国赤峰	立项	风、光	8.350	32.0000	AEL 制氢	
	2022 ^[34]	中国酒泉	开工	215(风 85、光 130)	0.733	2.0000	年产高压气氢 7000t、液氢 330t	
	2015 ^[35]	冰岛	投产	风、光	—	0.4	年回收碳排放约 5 500t	发电厂烟气
	2020 ^[36]	中国兰州	投产	10(光)	0.02	0.1	年回收碳排放约 1 500t	—
甲醇	2020 ^[37]	比利时	立项	风	—	4.4	并网型，制氢 65 MW	工业废气
	2022 ^[38]	中国乌审旗	立项	625(风 225、光 400)	2.1	10	并网型，AEL 制氢，储能 2.5MW/(5MW·h)，储氢 22 万 m ³	—
	2022 ^[39]	丹麦	立项	300(光)	—	3.2	50 MW PEM 制氢，甲醇用于船舶燃料	—
	2011 ^[40]	丹麦	投产	风	—	0.0008	SOEC 直接合成甲烷(0.04 MW)	—
	2013 ^[41]	德国	投产	风	—	0.1	AEL 制氢(3×2MW)甲烷化，并网参与调峰	沼气
甲烷	2016 ^[42]	德国	投产	风、光	0.0004	—	SOEC 制氢(0.015MW)甲烷化，并网型	—
	2017 ^[43]	丹麦	投产	风	—	0.0062	SOEC 制氢(0.038MW)甲烷化，并网型	沼气
	2019 ^[44]	法国	开工	风、光	0.016	0.016	0.5MW AEL, 0.5MW PEM，并网型	炼钢厂废气
	2022 ^[45]	芬兰	立项	风	0.32	—	20MW 制氢，年回收 CO ₂ 约 2 万 t	发电厂废气
	2016 ^[46]	德国	投产	光伏	0.0002	—	SOEC 制氢，F-T 合成汽/柴/煤油	—
液体燃料	2019 ^[47]	德国	建设	风电、光伏	—	0.0002	测试原型，SOEC 共电解，F-T 合成汽柴油	空气
	2020 ^[48]	挪威	立项	20(水电)	—	0.8	SOEC 制氢，F-T 合成汽油、蜡等	工业废气及空气
	2026 ^[49]	挪威	立项	—	—	1.6	SOEC 共电解，F-T 合成汽、柴油	空气

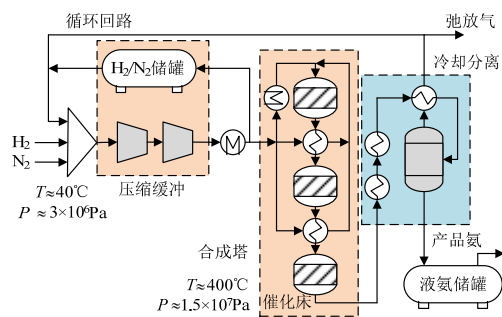
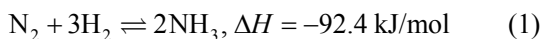


图 2 合成氨 Haber-Bosch 工艺简化流程
Fig. 2 Simplified flow of the Haber-Bosch process in the ammonia synthesis section

要反应为



合成塔排出的氢、氮、氨混合气经换热冷却，液态氨与气态氢、氮分离，获得液氨成品，氢氮混

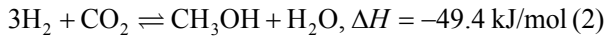
合气经循环回路返回合成塔中继续反应。

相较于基于煤、天然气等化石燃料的传统合成氨工艺，基于绿氢的合成氨工艺存在原料气处理、动力来源、惰性气控制等方面的不同^[17]。例如，传统合成氨工艺中空分、压缩通常由化石燃料提供动力，吨氨能耗占比超过 30%，在绿氢化工中则调整为电力驱动。除上述不同之外，绿氢制氨的主要工艺与传统 H-B 工艺基本一致，其亦被称为“绿色 H-B 工艺”^[15]。

1.3.2 合成甲醇

传统化工合成甲醇以煤、天然气等化石燃料所制合成气(含氢气、一氧化碳、二氧化碳)为原料，技术路线包括 Lurgi 工艺、ICI 工艺、浆态床工艺等^[18]。绿氢化工中，甲醇合成则以二氧化碳捕集作为原

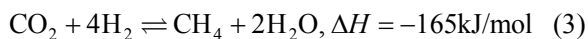
料^[21],合成温度为200~300℃,压力为5~50MPa,主要反应为



合成甲醇为可逆反应,需通过冷却、分离、循环使反应持续进行;分离所得甲醇则经纯化后送出。其生产流程与合成氨具有一定相似性。另可参阅IRENA可再生甲醇研究报告^[18]。

1.3.3 合成甲烷

绿氢合成甲烷通常采用Sabatier工艺(又称甲烷化反应),通过二氧化碳加氢,在甲烷化反应器中合成甲烷^[22-23],主要反应为



需指出,若将绿氢所制甲烷注入气网作为燃料,则能量及氢原子均有大量损耗,相较于直接掺氢意义有限,故本文不讨论该用途。

1.3.4 合成液体燃料

合成液体燃料(合成油)通过Fischer-Tropsch工艺(亦称F-T/费托工艺),以二氧化碳和氢气为原料合成液态碳氢化合物^[22]。其与合成氨亦具有相似性。将H-B工艺的合成氨塔替换为F-T合成塔即构成合成油工艺^[23]。主要反应为



绿氢化工中合成油主要流程和设备与传统化工基本一致,仅在原料气处理、生产控制等方面作一定调整^[23]。限于篇幅,不再详细介绍。

1.4 储存缓冲工段

储存缓冲是耦合电制氢工段与化工合成工段的中间环节。受合成塔热惯性等工艺过程约束,化工合成的负载调节时间在数小时以上,停产后重新开车则需数天,故需配置原料氢缓冲以平滑绿氢供应波动^[50]。该工段包含氢、氮、二氧化碳等原料气的储存容器及压缩、冷却、液化装置等,具体在2.3节介绍。

1.5 国内外示范工程

近年来,多国将氢能产业提升至国家能源战略高度,全球范围内绿氢化工示范项目数量迅速增加,总规模达数百GW。其中,国外示范工程主要集中于欧洲、日本、中东等地,最终产品为甲烷、甲醇等;国内示范工程多集中于内蒙、甘肃、宁夏等风、光资源丰富的西北地区,最终产品以氨、甲醇为主。国内外典型示范工程见于表3。限于篇幅,读者可另行参阅综述文献^[51]或IEA氢能项目数据

库^[52]等。

由表3知,现阶段氨、醇示范工程规模相对较大,电源规模达百、千兆瓦,化学品产能超过十万t,绿电制氨已进入商业开发阶段。相对而言,绿氢制甲烷、合成油仍处于小规模示范之中,原因分析如下:1)绿氢合成氨、醇与传统化工相似度高,技术成熟度满足工程需求;2)绿氢合成氨、醇的能量效率和原子经济性更高。具体而言,合成氨原料氢全部进入产品氨中,原子利用率100%;合成甲醇、甲烷和液体燃料则生成无利用价值的水,氢原子利用率分别为66.7%、50%、36%(以辛烷计),技术经济性相较合成氨更低。绿氢化工系统能源效率及技术经济性的研究综述详见3.1节。

2 绿氢化工本体及柔性调控技术研究现状

针对新能源波动性与传统化工生产“安稳长满优”目标的矛盾,绿氢化工系统本体研究在规模、效率提升的基础上,进一步重点关注负载柔性调控能力,使其成为新型电力灵活性资源,支撑新能源消纳及电力平衡调节。依照所关注的工段,研究主要包括电制氢工段柔性负载控制和集群规模化、化工合成工段柔性调控能力分析挖掘、面向化工应用的氢储运技术等3个方面。研究涉及电气、材料、化工、控制等多学科深度交叉,框架如图3所示。

2.1 电制氢系统规模化与柔性控制技术

相较于交通用氢等消纳渠道,绿氢化工规模效应更明显。此外,绿氢化工与煤化工、天然气化工存在经济竞争,需具备直接耦合波动性电源的能力以降低用电成本,并在并网时为电力系统提供调峰、调频辅助服务。为满足规模放大、效率及灵活性提升需求,学者们从建模出发,研究规模放大和集群负载控制方法,具体评述如下。

2.1.1 电解槽本体及制氢机系统建模

电制氢系统的柔性调控能力受电化学、温度动态、传质动态等多物理过程约束^[11]。因此,需为电解槽本体及包含分离、循环、热管理等辅机在内的完整系统建立动态模型,以反映其调节特性及约束^[11]。

1) 电解槽本体建模:电解槽本体模型描述电化学反应的能量平衡及热效应^[53]。在绿氢化工系统分析与控制的时间尺度上,通常将电解槽本体建模为非线性电阻,量化温度、压力、组分浓度等对极化曲线的影响^[54],通过仿真^[55]或实验^[56]分析影响

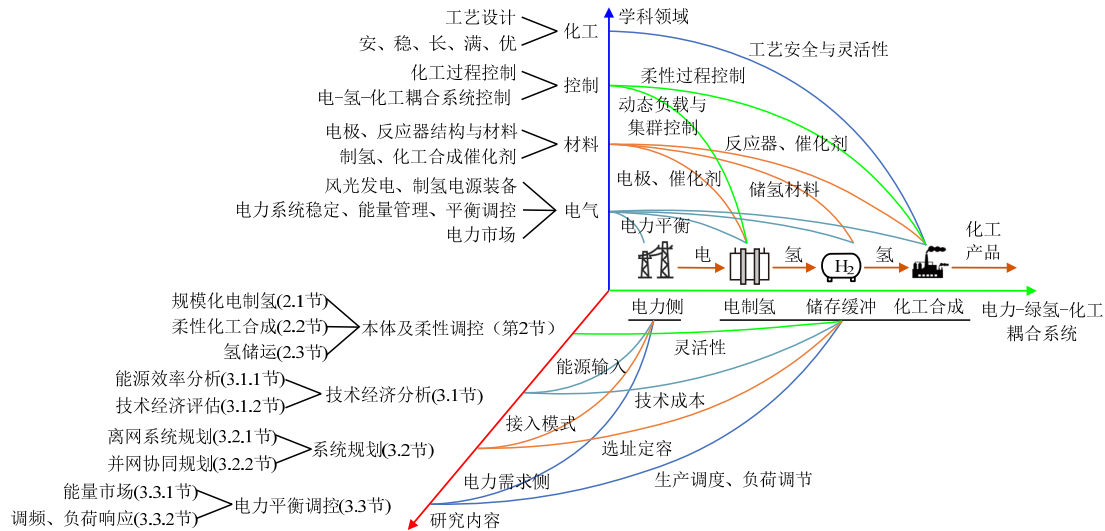


图 3 绿氢化工系统及其电网接入研究框架示意

Fig. 3 Diagram of the research framework on the GHCE system and its power system integration

机制。

从详细程度区分，电解槽本体建模包括 1 至 3 维分布参数模型及 0 维集总模型等。其中，分布参数模型描述反应速率、温度、组分的空间分布^[57]，求解通常依赖于多物理场仿真软件，主要用于槽体、流场及电极结构的设计与改进^[57-58]；0 维模型则将电解槽作为整体，基于原理^[59]或经验数据^[60]建立质能转换关系，可嵌入制氢机电源及温度、压力控制器的设计中。

2) 制氢机完整系统建模：对于完整的电制氢系统，其建模在电解槽本体模型的基础上，进一步关注冷却换热、气液分离、循环补水、纯化等辅机设备之间的传质、传热关系，以保证稳态及变负载时制氢系统整体的安全与效率。

传质模型主要关注组分分布、气体纯度、杂质积累。其中，氧中氢杂质(hydrogen-to-oxygen, HTO)积累是碱性制氢机负载下限的关键约束^[61]。文献[62-63]基于 1 至 3 阶集中参数模型，提出不同分辨率的 HTO 积累过程模型，精确量化温度、压力、负载对杂质积累的影响。

热模型主要刻画整机热平衡及温度变化过程^[53]，并反映其对能耗、电极应力、气体纯度等的影响。文献[64]提出 MW 级制氢机的动态质能平衡模型，温度动态预测准确度 98.7%。文献[65]计及热量在电解槽、分离器、换热器间的传递，建立三阶时滞微分方程热模型，支撑动态负载下的温度控制器设计。文献[66]提出基于贝叶斯推断的制氢机传热、传质参数估计方法，并为故障诊断提供理论

工具。

2.1.2 电制氢规模提升

电解水制氢系统规模提升的技术途径包括单机功率提升、多机集群规模化 2 个方面。单机功率提升方面，国内外多家制造商已可提供兆瓦级 AEL 和 PEMEL 制氢机^[67]，最大单机容量 2000m³/h(功率约 10MW)^[68]。

进一步，受单机容量限制，需由数台至数十台大型制氢机构成集群以满足化工用氢需求。德国 Energiepark Mainz 项目由 3 台 PEMEL 电解槽构成 6MW 制氢厂^[69]；加拿大魁北克 2020 年建成 20MW 级 PEMEL 多机制氢厂^[70]；内蒙达茂旗示范工程拟投入 25 台 1000m³/h 碱性制氢机，总功率 125MW，为年产 10 万 t 氨供应原料氢^[33]。在多机集群基础上，以多台电解槽配套一台气液分离与纯化装置，构成大型“多对一”制氢装置，可节约空间及设备投资^[71]。

2.1.3 电制氢系统的柔性负载控制

为拓展负载调控的深度、速度，基于 2.1.1 节所总结模型，提出计及温度^[64]、压力^[64,72]、杂质浓度^[63,72]约束的电制氢系统控制方法。其中，文献[63]基于杂质积累模型设计模型预测控制器，通过在低负载区降低压力以扩展负载下限。文献[73]将电解槽、分离器、换热器在内的有限元模型变换为代数方程，提出操作参数优化方法。文献[11]提出综合考虑温度、压力、碱液循环流量的全系统先进控制框架。

除电解槽及气液处理装置外，制氢机电气侧亦

需适应消纳风光发电,同时满足并网方式下的电能质量、能量交换等接入规范,或离网方式下提供频率、电压支撑的需求。文献[74]分析不同负载水平下制氢机整流电源的无功和谐波特性和特性。文献[75-76]基于电解槽双层效应(double layer effect)电容所储能量,分别提出快速频率响应、虚拟惯量控制方法。

除理论分析和仿真研究,学者们亦通过25kW^[71]、3 MW^[64]等不同功率等级制氢机组的动态测试,验证所提模型及控制方法。

2.1.4 大规模电制氢集群系统调度与控制

电制氢集群系统的调度控制与电力系统机组组合(unit commitment, UC)问题类似,需确定不同机组运行、停机、备用状态以适应总负载变化。现有研究大多借助基于规则的控制策略^[77]或混合整数线性规划^[78-79]确定制氢机机组组合。其多对电制氢装置作大幅简化,以常数建模电氢转换关系,未考虑制氢机传质、传热等多物理过程对柔性调控的影响^[80]。

文献[77]基于电解槽的热特性、调节特性等约束条件提出制氢集群的轮值策略,以提升设备寿命、降低投资。文献[78]将制氢机运行状态(运行、备用、停机)作为整数变量,通过混合整数规划确定机组组合。文献[80]考虑电解槽的动态过程约束(温度、氢氧杂质),拓宽负载调控范围。算例表明,直接耦合光伏发电场景下,灵活性提升可增加利润1.63%。文献[81]计及制氢机负载、温度对可控硅整流电源功率因数、谐波的影响,提出电能质量约束的集群调度方法。

2.2 化工合成柔性负载调控技术

绿氢化工系统的化工侧相较于传统化工,原理、装置等并无本质不同。其主要区别在于原料氢供应的波动性、间歇性,故要求新增深度变负载、生产-备用快速切换等能力。此外,化工侧灵活性提升、消纳波动性绿氢还可大幅降低电气侧调节负担,节约配套储能成本,提高整体经济性^[82],并为参与电力平衡调控奠定基础。

2.2.1 化工合成柔性调控潜力分析

受绿氢化工消纳新能源的需求牵引,学界逐步开展了化工合成柔性调控方面的研究。传统化工强调“安稳长满优”(安全、稳定、长周期、满负荷、效益优),故操作方式为长期(通常在数月以上)保持满负荷、操作量基本平稳的“刚性”生产模式。但在当前绿氢化工研究快速推进、示范工程批量落地

的背景下,学界普遍认为合成氨、甲醇等需具备柔性负载调控能力。其负载下限由反应器热平衡和催化剂活性范围决定,理论下限20%^[26,83];若采取辅热保温措施,则可在无原料氢供应、合成反应停止时维持反应器温度,实现热备用以适应绿氢供应的间歇性。

以合成氨为例,由于合成塔热惯性较大,对于分钟级电力波动导致的原料输入不平稳,需设置原料气和产物储罐缓冲;对于小时级以上波动,则能在保证安全的前提下调节负载,但需提升自动化控制水平予以实现。此外,受变负载操作下温度、压力波动影响,合成塔、压缩机、循环回路、储罐等设备将承受更大的疲劳载荷,需在工艺设计、设备选型时加以考虑。

2.2.2 化工合成柔性调控能力提升技术研究

化工合成柔性调控能力提升的关键难点在于变负载生产过程中维持适宜的反应器、催化剂温度。目前,学界主要从合成反应条件及催化剂、柔性过程控制2个方面开展研究,具体评述如下。

1) 合成反应条件及催化剂。催化剂直接影响反应能垒,决定反应所需温度、压力,对能耗、灵活性影响显著。一方面,研发新型催化剂降低温度和压力要求,可拓宽负载范围、降低能耗^[84]。另一方面,热惯性是大型合成装置负载调控的主要约束^[84],低温度、压力需求下装置启停更快,更好地适应绿氢流量波动^[17]。

近年来,低温低压合成工艺已得到推广。合成氨方面,文献[85]开发单层碳纳米管(SGCNT)载体负载钌(Ru)铯(Cs)的新型催化剂,可在反应停止、恢复等波动性操作条件下保持高活性,合成温度、压力降低,产物平衡浓度提升50%;文献[86]指出H-B合成氨工艺在钌和Fe_{1-x}O基铁催化剂作用下,起始活性条件降低至200℃和5×10⁶Pa。合成甲醇方面,文献[87]使用Cu-ZnO/ZrO₂催化剂,将操作条件降低至10⁶Pa低压及200℃中等温度。鉴于本文主要关注绿氢化工系统工程,催化剂方面不再赘述。

2) 柔性过程控制。为避免绿氢供应波动下变负载操作导致失温/失压、超温/超压等安全问题,需通过先进过程控制(advanced process control, APC)动态调整空分、压缩、循环、换热等操作量,在催化剂活性范围和设备安全边界内卡边操作,提升负载可调范围和能量效率。

先进过程控制方面,已提出模型预测控制^[88]、

专家控制^[89]等控制策略，但目标多为提升操作平稳性，未考虑柔性调控下的化工本质安全性和操作成本^[90]。为此，文献^[91]针对含不确定性参数的化工过程系统，提出操作优化调控策略以及动态柔性分析方法。

化工过程通常具有强非线性，同一操作条件下存在多个稳定性不定相同的稳态点，称“多稳态”^[92]。不稳定的稳态解将导致生产异常波动，影响产品质量，乃至生产失控危及安全。对于简单过程，Lyapunov 方程、Routh-Hurwitz 判据可作为稳定性约束^[93]，但对于复杂化工过程目前尚无系统方法。同时，缺乏稳定性与柔性等其他可操作性化工过程优化方法的研究，难以满足工业应用^[94]。因此，亟需针对绿氢化工过程建立多稳态柔性生产工艺，开发柔性控制技术。

2.3 面向化工应用的氢储运技术

为平抑可再生发电波动对供氢平稳性的影响，需在制氢与化工合成工段之间配置储存缓冲环节，以保障化工生产的连续性。利用卡车或管道运输氢气，可实现可再生发电、制氢及化工合成的异地布局，提高绿氢化工系统规划与运行的灵活性。相关研究评述如下。

2.3.1 面向化工应用的氢储存技术

氢气极低的体积能量密度是其经济、高效储存的最大障碍^[95]。根据形态，其储存方式包括气态储氢、液态储氢和固态储氢 3 大类。气态储氢技术成熟度高、应用广泛^[95]。其压缩存储和排出速率高，储存需消耗氢气热值 13%~18% 的能量^[96]。其中，低压气态储氢通常采用气柜，目前市面上有柱状油封型(COS 型)储气柜、润滑脂密封式储气柜等产品提供，储氢规模十万标方级，满足大规模合成氨、甲醇日内平稳生产的需求。高压气态储氢的储氢压力 40~100MPa^[27]，储存密度高，满足中小型、分布式项目对空间布局的要求。地穴储存适用于大规模长周期储存，容积十万到百万立方不等^[97]，可保证化工长周期连续平稳生产，但经济性还有待考察。

将氢气压缩冷却至-253℃液化储存，体积密度约为高压气态储氢的 1.5~2 倍^[95]，但当前技术条件下需消耗氢气自身 25%~35% 的能量，经济性不佳。固态储氢利用物理或化学吸附将氢储存在固体材料之中，避免了气、液态储氢的高压、低温问题，但存在储氢量偏低、吸附材料制备昂贵等缺点，商业化程度不高^[95]。

综上，大容量储氢存在投资成本高、安全性限制等问题^[97]。综合经济性、技术成熟度等因素，现有工程多采用气态储氢技术^[82]。未来，若能利用化工联产(例如绿氨氧化制硝酸^[98])所回收的能量驱动氢液化，可显著提升液氢储存的经济性和规模。

需注意，绿氢化工的工程实践应考虑危化品危险源等级及相应规范限制。依照国家标准《危险化学品重大危险源辨识》^[99]，储氢量在 66000m³ 以下、66000~330000m³ 分属 4 级、3 级危险源，安全性较高，且能够满足百兆瓦制氢规模日内柔性生产的需求。规模更大的 1、2 级危险源审批和监管更为严苛，投资及运行成本显著增大，需在规划时予以考虑。

2.3.2 面向绿氢化工应用的氢运输技术

氢的运输方式包括车辆、管道等。车辆运输一般适用于小规模短距离，灵活性高；管道运输容量大、运行成本低，但投资成本高，仅在长距离、大容量时具备吸引力。目前，仍缺乏高密度储氢方式^[95]，储运成本较高。此外，氢气储运过程面临一系列安全问题，如储氢材料损坏致泄漏、压缩过程操作不当致氢氧混合等，故需采取防范措施以避免事故^[100]。

鉴于氢储运的安全及经济成本，考虑化工生产规模及氨、醇产品易于液化储运的优势，应尽量采用内部制氢、自主消纳、以化工产品形式外送，兼顾少量成品氢直接外送的储运模式。

3 电力-绿氢-化工耦合技术研究现状

与第 2 节绿氢化工本体技术对应，学者们对电力-绿氢-化工耦合技术开展了一系列研究。其框架亦由图给出，具体评述如下。

3.1 电力-绿氢-化工耦合系统技术经济分析

目前，绿氢化工产业尚处于发展初期，技术经济分析是评估其可行性的重要工具之一。大量文献从能源效率分析、技术经济性评估 2 个方面展开分析，具体评述如下。

3.1.1 能源效率分析

绿氢化工的实质是将可再生发电以氢为媒介变换至氨、醇等载体上。提高能源效率是绿氢化工可行性和竞争力的重要挑战之一。

文献^[101]比较了 3 种绿电制氨技术路线，其中直接合成、传统合成和间接合成的能源效率分别为 62%、35% 和 36%。文献^[102]分析了基于 AEL 制氢

和直接空气碳捕集的风电制甲醇系统,其能源效率约 50%。文献[103]对基于 PEM 的风电制甲烷系统进行热力学分析,考虑热回收时,系统能源效率 44%。文献[104]分析了 PEM 制氢、直接空气碳捕集及 F-T 两步合成工艺的合成油、蜡生产系统,能源效率约 47%。另有其他研究覆盖电转氨^[105-106]、电转甲醇^[107]、电转甲烷^[69,108]、电转液体燃料^[109]的能源效率分析。结果表明,基于高温电解的绿氢化工能源效率较高,是未来研究的重要方向;热回收和再循环则是提高系统能源效率的重要措施。

3.1.2 技术经济评估

技术经济评估是分析工程价值的重要手段,所得平准化成本、边际成本、投资回报时间等指标可

用于对比不同绿氢化工系统的经济竞争力。

文献[110]分析德国沿海地区基于 AEL 和 PEMEL 的电转氨系统,平准化成本分别为 917 和 1323 美元/t。文献[9]预测 2050 年绿氨成本 350~650 美元/t,低于化石能源制氨。文献[102]计及风机投资,得出风电制甲醇成本 800 欧元/t。文献[111]分析电转液体燃料(柴油、煤油等)成本在 1.85~3.96 欧元/L 之间。

亦有其他研究针对不同地区、规模、资源条件下的绿氢化工系统进行技术经济分析,对象包括电转氨^[20,112-113]、电转甲醇^[83,114-115]、电转甲烷^[116-119]、电转液体燃料^[120-121]等。其与基于传统化石燃料的生产成本^[20,122-124]对比总结于表 4。

表 4 典型绿氢化工产品成本分析

Table 4 Cost analysis of typical GHCE products

最终产品	时间	地区	产量规模	能量来源	制氢技术	成本	化石燃料合成成本
氨	2020 ^[20]	美国	2 万 t/年	风	AEL	933~1030 美元/t	
	2021 ^[110]	德国	300t/年	风	AEL/PEMEL	917/1323 美元/t	
	2030 ^[112]	澳大利亚	100 万 t/年	风光	PEMEL	790 美元/t	400~700 美元/t ^[20]
	2050 ^[113]	欧洲	—	风光水	PEMEL	431~528 欧元/t	
	2050 ^[9]	美国	360 万 t/年	光	AEL/PEMEL/SOEL	420/650/350 美元/t	
甲醇	2019 ^[114]	意大利	10 万 t/年	风光	SOEL 共电解	537 美元/t	
	2018 ^[83]	德国	4 188t/年	风	PEMEL	1 028 欧元/t	300~600 美元/t ^[122]
	2020 ^[102]	欧洲	6.5 万 t/年	风	AEL	800 欧元/t	
	2021 ^[115]	美国/德国	40 万 t/年	风光	AEL	1490/1459 美元/t	
甲烷	2019 ^[116]	德国	0.8 万 t/年	风	PEMEL	3510~3380 欧元/t	
	2020 ^[117]	德国	3 万 t/年	风	PEMEL	1587 欧元/t	
	2020 ^[118]	中国	65t/年	光	SOEL	2628 美元/t	578~886 欧元/t ^[123]
	2050 ^[119]	美国	—	风光	PEMEL	2112 欧元/t	
液体燃料	2019 ^[111]	德国	300MW	风	PEMEL	1.85/2.3 欧元/升(二甲醚/煤油)	
	2019 ^[120]	德国	5.2~8.2 万 t/年	风光	PEMEL	1810~5470 欧元/t(C5 石油树脂)	700~800 欧元/t ^[124]
	2030 ^[121]	德国	—	风	AEL/SOEL	3.5/3.24 欧元/升(柴油)	

上述研究表明,目前绿氢化工成本高于基于化石能源的化工系统。其原因包括制氢设备与用电成本高、新能源波动导致设备利用率低等。绿氢制氨、甲醇因原子经济性、技术成熟度较高,成本与传统化工更为接近,如能降低设备成本及功耗、突破规模化与柔性调控技术,并向电网提供辅助服务以获取额外收益,则可在短期内将成本降至低于传统化工的水平^[113],工业应用优先于绿氢制甲烷和液体燃料。随着技术发展及碳税增加,绿氢化工的竞争力将进一步提高^[110]。

3.2 电力-绿氢-化工耦合系统规划

电力-绿氢-化工耦合系统生产过程依赖于多工段协调,运行方式多变,需权衡各工段的选址、

选型、定容规划以兼顾经济、安全。针对绿氢化工的离网、并网耦合模式,现有研究包括面向新能源直接消纳的绿氢化工规划、绿氢化工系统接入电网协同规划 2 个方面,总结于表 5^[82,115,125-133]。

3.2.1 面向新能源直接消纳的绿氢化工规划

直接耦合新能源发电、离网或弱并网生产绿氢化工产品时,系统配置取决于能源类型、出力特性、化工产品需求等。对此,对电源及储能^[125-126]、制氢^[82,126-127]、储氢^[82,127-128]、化工合成^[82,126]等单元进行选型、选址、定容,以提升新能源消纳及整体经济性。

在规划中充分利用电制氢及化工合成的灵活性,可显著降低储能、储氢容量,降低绿氢化工产

表 5 电力-绿氢-化工耦合系统规划研究现状
Table 5 Research status of the planning of the electrical power-green hydrogen-chemical industry hybrid system

模式	时间	最终产品	规划对象	规划类型	
离网	2020 ^[128]	氨	氢缓冲罐	定容	
	2020 ^[125]	氨	光、储能		
	2021 ^[127]	氨	制氢、氨及其储罐		
	2021 ^[115]	甲醇	风光电源、储能		
	2021 ^[82]	甲醇	制氢、氢缓冲罐、 储热、合成甲醇反应器		
	2019 ^[126]	甲醇	电源、制氢/甲醇		选址定容
并网	2016 ^[129]	甲醇	风光水电源	定容	
	2018 ^[133]	甲醇	碳捕集	选址定容	
	2022 ^[130]	氨	风机、制氢、 氢供应链、输电网		
	2020 ^[131]	氢	制氢、缓冲罐、 氢供应链(运输网络)		
	2021 ^[132]	氢	制氢		选型选址定容

品的平准化成本。文献[128]基于合成氨的灵活性优化氢缓冲罐容量,降低总投资约 24%。文献[82]计及甲醇合成工艺灵活性,取最低负载 10%,对绿电转甲醇系统进行容量规划,成本可降低 20%~30%。文献[125]计及合成氨灵活性,对光伏制氢的电源及储能进行容量规划。算例表明,100%光伏发电下需配置 3.5GW 光伏和 0.24GW·h 储能以满足日产 1840t 氨的用电需求。

3.2.2 绿氢化工接入电网的协同规划

并网状态下,绿氢化工整体可视为新型电力负荷以提供灵活性资源。此外,可再生能源通过电力网络传输,可为化工产业提供化石能源之外的能量来源,缓解其固有的时空限制。为此,需考虑电网与绿氢化工耦合,予以协同规划。文献[129]通过规划可再生能源发电与氢缓冲容量实现稳态甲醇生产,并对比了不同容量配置的生产成本。文献[130-131]建立氢供应链与电网协同规划模型。基于内蒙古实际数据的算例分析表明,二者协同规划可提高风电利用率、降低总投资成本。文献[132]计及 3 类电制氢技术的成本、灵活性、效率差异,提出主动配电网中电制氢系统的模块化选型、选址、定容优化规划方法。

3.3 绿氢化工参与电力平衡调控

绿氢化工作为电力负荷,按照《电力负荷管理系统技术规范》^[134]精神,有望凭借柔性调控能力,作为需求侧响应资源参与电力平衡调控。

目前我国电力需求侧响应机制包括削峰填谷、可中断负荷、备用容量等^[135]。此外,部分试点地区还设有小时级、分钟级、秒级响应机制^[136]。作为参照,美国 PJM 电网需求响应机制形成较早,开展已有 20 余年。其负荷可选择参与能量市场(日前、实时)、容量市场或辅助服务市场(调频、同步备用等)竞价^[137]。

3.3.1 绿氢化工参与能量市场研究

绿氢化工作为电力负荷,可将自身作为独立主体^[138-140]或与当地风光发电、储能等共同构成虚拟电厂(virtual power plant, VPP)^[141]参与中长期、日前及现货市场交易,并在价格信号激励下通过生产负载、发电、储能联动参与电力需求侧响应以获取额外的经济收益^[138-141]。其主要难点包括电、氢、化工生产调节的多时间尺度耦合,以及当地风光发电、能量市场价格、化工产品市场价格之间的相关性及其不确定性。

文献[138]将电制氨与农村微电网结合,根据节点电价调整生产计划,降低制氨成本近三分之一,同时减少电压越限和线路拥塞。文献[139]将电转甲醇加入日前电力市场,通过鲁棒优化处理电价不确定性,降低运营成本 4.5%。文献[140]提出工业园区氢负荷集群能量管理系统,降低成本 51.5%~61.6%。文献[141]将风光发电与电制氨打捆作为虚拟电厂参与年度、月度、日前、现货电力与氢、氨市场竞价,通过负荷灵活性和氢氨多级缓冲,降低吨氨平准化成本 7%。

此外需指出,传统工业负荷侧调控发展已有较长历程,其主要模式为依据电价安排生产计划以降低用电成本,参与主体包括炼钢^[142]、氯碱^[143]等。绿氢化工的负荷调控参与模式上述对象与具有相似之处,可作为未来研究的借鉴。

3.3.2 绿氢化工提供调频辅助服务研究

绿氢化工系统借助制氢机、多级压缩的快速功率调节能力,具备参与电力系统频率调节的潜力。由于化工合成的负载调节时间在小时级以上,因此需配合氢、氨储存缓冲以平抑原料气流量冲击,在安全前提下实现功率快速调节。

目前,绿氢化工参与调频相关研究仍较为有限。文献[144]提出风-氢打捆系统响应 AGC 信号的下调/上调功率分配策略,以兼顾调频容量与设备利用率。文献[145]通过调整电解槽和压缩机负载,在维持合成反应器工作压力条件下研究碳捕集制甲

酸参与调频的控制方法。但其忽略了化工过程的动态安全约束,结论缺乏说服力。

与 3.3.1 节绿氢化工参与电力能量市场类似,工业需求侧参与调频相关研究亦可提供参考,如铝冶炼^[146]、水泥生产^[147]等。绿氢化工或可从此类研究获得启发,从控制算法、能量备用等角度,研究参与调频辅助服务的模式与技术。

最后需要指出,绿氢化工系统亦具有潜力同时参与能量市场及调频、备用等不同类型的辅助服务市场,以获取更多形式补偿,充分提升经济性。但在可再生能源强波动性和化工生产平稳性的共同要求下,需明晰各工段调控特性,以克服电力-绿氢-化工耦合系统所面临的多时间尺度能量不平衡问题。

3.4 研究现状小结

综合 2、3 节知,绿氢化工具备大规模接入电力系统、作为新型灵活性资源参与新能源消纳、电力平衡调控的潜力。若能降低成本、提升灵活性,并在并网接入时提供辅助服务,则绿氢制氢/醇的技术经济性将有望超过传统化工。但也发现,现有研究在绿氢化工柔性调控、参与电力平衡调节方面关注较少,有待进一步研究。

1) 对于电制氢工段,计及新能源不确定性、电力平衡调控需求及化工生产用氢约束,传统以平稳运行为目标的电制氢系统控制方法难以适应。此外,针对多物理约束下多机启停组合、功率分配的制氢集群调控技术研究仍较为初步,需进一步研究以适应规模化柔性调控的需求。

2) 对于氨、醇合成,化工领域的经典模型及过程控制主要关注平稳操作,缺少兼容电力平衡调节的分析模型与控制方法,绿氢供应波动时的负载调控能力及代价难以准确量化。因此,需建立适应柔性生产的化工合成动态模型,为绿氢化工全流程模拟、灵活性量化与控制奠定基础。

3) 现有研究对绿氢化工系统参与电力平衡调控关注较少,主要集中于技术经济分析及规划方面。需进一步明晰其作为电力灵活性资源参与电力需求侧调控的策略与控制方法,提出绿氢化工与风光电源、储能、外部电网相互协调的安全稳定控制与能量管理技术,以满足并、离网条件下的平衡调节需求,促进新能源规模消纳。

4 支撑绿氢化工发展应用的关键技术展望

基于 3.4 节分析结论,本节对绿氢化工发展所

需的关键技术进行展望,提出支撑工程应用的系统开发需求,为该领域研究提供参考。

4.1 电制氢规模化与柔性调控技术

如 2.1 节分析,为满足化工合成用氢需求,需配置数十乃至上百台制氢机构成集群系统,规模达百 MW 至 GW 级。然而,集群系统并非单机的简单叠加,工程化存在难点。一方面,多台电解槽电气、气液处理回路的串并联,使集群系统呈现出更复杂的动态特性;另一方面,新能源的不确定性对柔性调控性能提出了更高要求。

因此,优化设计电制氢集群系统的工艺流程,提出制氢工段与化工合成工段公用工程复用设计,研究纯化、压缩、缓冲与化工用氢需求匹配技术,研制集群控制系统,是绿氢化工技术工程化应用的关键技术之一。研究自适应变负载调控技术,提升电制氢集群系统效率、负载范围和调节速度,则是未来竞争力提升的重要方向。

4.2 柔性化工合成过程仿真模拟技术

为准确量化绿氢化工系统消纳新能源、提供电力平衡调节服务时的动态性能,需为合成氨、醇等化工过程建立与电力系统分析相兼容的动态模型,量化安全裕度和调控代价。然而,现有化工过程仿真软件,例如 Aspen HYSYS、UniSim 和 PRO-II 等难以满足需求。一方面,上述软件仅涉及化工过程,无法兼容电力系统分析;另一方面,化工仿真速度较慢,难以实时、超实时仿真以满足绿氢供应不确定条件下生产计划校验、优化规划等方面的研究与应用。

因此,计及化工合成工段内部多物理过程,开发实时、超实时仿真技术,分析电力平衡调节对化工过程的多时间尺度影响,是亟待突破的关键支撑技术之一。其具体包括:多稳态柔性工艺下化工过程的精确仿真模型及高保真代理模型、电力与化工统一模拟技术等。

4.3 面向电力平衡调控的绿氢化工协调控制技术

如 2.1、2.2 和 3.3 节总结,绿氢化工作为电力负荷,可向电网提供调频、调峰辅助服务。由于电力平衡调节时间尺度为秒级到分钟、小时级,化工负载调节时间则长达数小时至数天,且受向氨、醇下游用户供应化工产品的长期产量约束,二者之间存在跨时间尺度的物质(物料组分)和能量(电能、温度、压力)平衡匹配问题。以往电氢耦合系统相关研究主要关注电-氢转换的能量平衡,但对于“源-

网-绿氢-化工”耦合系统的质能平衡匹配尚存空缺之处。

为此，厘清多工段之间的质能平衡机理，研究绿氢化工系统的负荷灵活性量化方法，刻画过程安全前提下的可调度能力，进而提出“源-网-绿氢-化工”协同控制技术，明晰并、离网条件下参与

电力平衡调节的可行性、经济性。

4.4 实现绿氢化工技术工程应用的支撑系统开发

面向工程应用，绿氢化工系统从前期规划到在线运行，均需软、硬件系统作为支撑。本节从规划设计、运行模拟与调度、质能管理 3 个方面对支撑系统做出展望，如图 4 所示，描述如下。

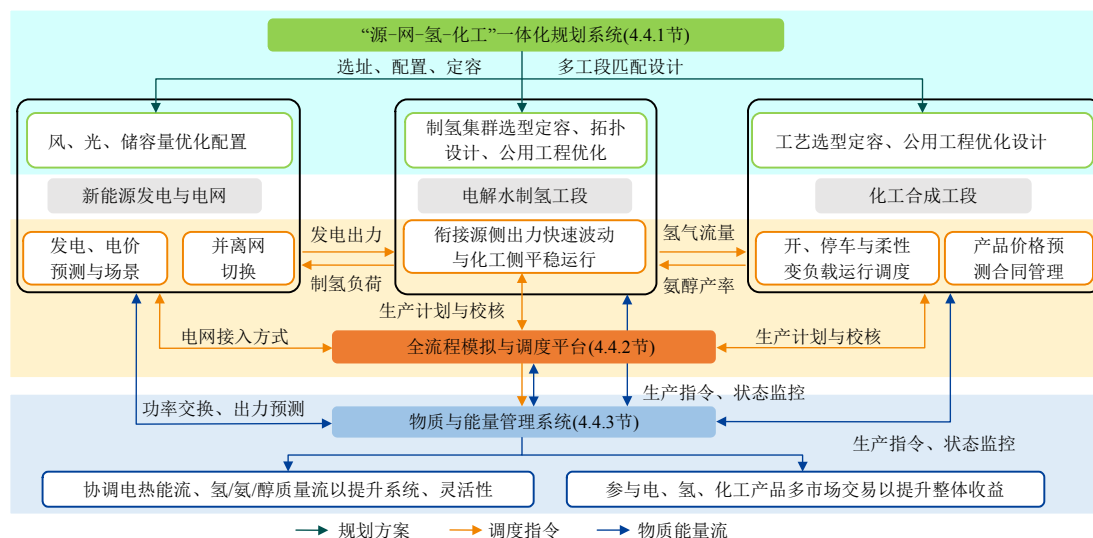


图 4 绿氢化工技术的支撑系统整体框架

Fig. 4 Framework of the supporting systems for the GHCE technology

4.4.1 “源-网-绿氢-化工”一体化规划系统

针对“源-网-绿氢-化工”一体化系统规划，需综合考虑并、离网方式，解决新能源不确定性及各工段抗扰动能力不一致条件下的选址、装备选型、容量配置等问题。同时，需计及发电资源、氢醇下游消纳、并网规范、政策法规等边界条件。为满足上述要求，一体化规划系统开发的核心需求包括：1) 计及可再生发电及氢醇产品需求相关性的场景生成技术；2) 考虑“物质-能量”耦合的一体化系统运行模拟技术；3) 兼顾运行安全与投资经济性的全工段联合规划模型与求解方法。

4.4.2 电力-绿氢-化工全流程模拟与调度平台

绿氢化工系统实时参与消纳可再生能源、提供电力辅助服务，均依赖于全流程运行模拟与调度平台的支撑。

技术层面，由于“源-网-绿氢-化工”各工段动态过程时间尺度差异大，如何保证准确性、实时性，实现多工段在统一框架下的仿真分析，是全流程模拟系统开发须解决的问题。考虑到化工合成动态过程及约束复杂，如何研发 4.2 节所提仿真技术以兼顾精度与计算效率，是全流程模拟平台开发的难点。

生产经营层面，需综合考虑新能源出力、电力市场价格、氢醇市场价格波动导致的产能、成本与收益的不确定性，满足不同周期电力、化工产品期货、现货合同要求。因此，另需不同时间尺度电价、氢醇价格预测和风光出力预测、合同管理等方面的技术作为支撑。

调度平台则需负责绿氢化工系统各工段的监测与调控，应满足以下需求：1) 支持开停车、升降负荷等常规调度操作；2) 支持新能源消纳、电网平衡调控的动态操作，实现多时间跨度的生产模拟。对于前者，厘清各工段在不同指令下的操作步骤是关键。对于后者，需解决并、离网状态下绿氢化工的灵活性量化难题。

4.4.3 绿氢化工的物质与能量管理系统

绿氢化工系统包含电、氢、热、碳、化工产品等多物质及能量流，涉及不同载体的质能循环、市场交易。打破传统电力 SCADA 系统与化工流程工业 DCS 控制系统之间的壁垒，实现“源-网-绿氢-化工”的深度耦合，开发全流程物质与能量管理系统(mass and energy management systems, MEMS)，精细化管理物流、能流，可提高整体能量效率、提升收益水平。

区别于 4.4.2 节所提调度平台, MEMS 侧重保障各工段之间的质能平衡与整体效益。其开发面临以下难点: 1) 不同媒介的能量传递的时间尺度、储运、消纳方式多样, 调控复杂; 2) 电、氢、碳、氨、醇交易市场不同, 同时参与多市场将增加管理难度; 3) 发电、制氢、化工合成工段可能隶属不同投资主体, 如何协调利益分配, 也是策略设计及系统开发的难点。

5 结语

1) 绿氢化工现阶段的用氢需求超过交通、冶金、天然气掺氢、储能等行业, 将成为我国十年内最大的绿氢消费市场;

2) 不同绿氢化工产品中, 生产氨、甲醇的效率及技术成熟度较高, 短期内成本可降至低于传统化工的水平, 有望率先实现规模化应用;

3) 现相关研究主要集中于宏观层面, 在支撑绿氢化工落地实施的规模化集成、并网接入、柔性调控等关键技术方面, 研究仍较为有限。

为支撑绿氢化工技术发展及工程应用, 需对如下关键技术展开进一步研究, 包括制氢系统集成化设计与控制、适应柔性负荷调控的化工合成过程仿真、面向电力平衡调控的多工段协调控制技术, 最终研发软硬件支撑系统, 支撑绿氢化工工程规模化落地实施, 实现消纳新能源及“绿氢”的目标。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局, 财政部, 等. 关于印发“十四五”可再生能源发展规划的通知[EB/OL]. (2021-10-21)[2022-07-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html?code=&state=123. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, National Energy Administration, Ministry of Finance of the People's Republic of China. Notice on issuing the "14th Five Year Plan" for the development of renewable energy [EB/OL]. (2021-10-21)[2022-07-05]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html?code=&state=123(in Chinese).
- [2] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8. WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8(in Chinese).
- [3] 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]. 北京: 人民日报出版社, 2021. China Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry Innovation Strategic Alliance. White paper of hydrogen energy and fuel cell industry in China 2020[R]. Beijing: People's Daily Publishing House, 2021(in Chinese).
- [4] IEA. Global hydrogen review 2021[EB/OL]. (2021-10-01)[2022-07-18]. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>.
- [5] 李婷, 王喆, 张梦露, 等. 开启绿色氢能新时代之匙: 中国 2030 年“可再生氢 100”发展路线图[R]. 北京: 落基山研究所, 中国氢能联盟研究院, 2022. LI Ting, WANG Zhe, ZHANG Menglu, et al. Key to opening a new era of green hydrogen energy: China's 2030 "renewable hydrogen 100" development roadmap [R]. Beijing: Rocky Mountain Institute, China Hydrogen Alliance Research Institute, 2022(in Chinese).
- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021-2035 年)》[EB/OL]. (2022-03-23)[2022-07-19]. http://www.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525755.htm. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, National Energy Administration. Medium and long term plan for hydrogen energy industry development(2021-2035)[EB/OL]. (2022-03-23)[2022-07-19]. http://www.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525755.htm(in Chinese).
- [7] 中华人民共和国科学技术部, 国家发展改革委, 工业和信息化部, 等. 科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030 年)[EB/OL]. (2022-06-24)[2022-07-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm. Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Implementation plan for carbon peaking and carbon neutrality supported by science and technology (2022-2030)[EB/OL]. (2022-06-24)[2022-07-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm(in Chinese).
- [8] 李璐伶, 樊栓狮, 陈秋雄, 等. 储氢技术研究现状及展望[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(4): 586-594.

- LI Luling, FAN Shuanshi, CHEN Qiuxiong, et al. Hydrogen storage technology: Current status and prospects[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(4): 586-594(in Chinese).
- [9] MACFARLANE D R, CHEREPANOV P V, CHOI J, et al. A roadmap to the ammonia economy[J]. *Joule*, 2020, 4(6): 1186-1205.
- [10] 曹蕃, 郭婷婷, 陈坤洋, 等. 风电耦合制氢技术进展与发展前景[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6): 2187-2200.
- CAO Fan, GUO Tingting, CHEN Kunyang, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hydrogen systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6): 2187-2200(in Chinese).
- [11] 李洋洋, 邓欣涛, 古俊杰, 等. 碱性水电解制氢系统建模综述及展望[J]. *汽车工程*, 2022, 44(4): 567-582.
- LI Yangyang, DENG Xintao, GU Junjie, et al. Comprehensive review and prospect of the modeling of alkaline water electrolysis system for hydrogen production [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(4): 567-582(in Chinese).
- [12] RAKOUSKY C, REIMER U, WIPPERMANN K, et al. Polymer electrolyte membrane water electrolysis: Restraining degradation in the presence of fluctuating power[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 342: 38-47.
- [13] 许世森, 张瑞云, 程健, 等. 电解制氢与高温燃料电池在电力行业的应用与发展[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2531-2536.
- XU Shisen, ZHANG Ruiyun, CHENG Jian, et al. Application and development of electrolytic hydrogen production and high temperature fuel cell in electric power industry[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2531-2536(in Chinese).
- [14] HAUCH A, KÜNGAS R, BLENNOW P, et al. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis [J]. *Science*, 2020, 370(6513): eaba6118.
- [15] LIM J, FERNÁNDEZ C A, LEE S W, et al. Ammonia and nitric acid demands for fertilizer use in 2050[J]. *ACS Energy Letters*, 2021, 6(10): 3676-3685.
- [16] 国家能源局. 2020 年全社会用电量同比增长 3.1% [EB/OL]. (2021-01-20)[2022-08-01]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139682386.htm.
- National Energy Administration. The electricity consumption of the whole society increased by 3.1% year-on-year in 2020[EB/OL]. (2021-01-20)[2022-08-01]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139682386.htm(in Chinese).
- [17] 刘化章. 合成氨工业: 过去、现在和未来——合成氨工业创立 100 周年回顾、启迪和挑战[J]. *化工进展*, 2013, 32(9): 1995-2005.
- LIU Huazhang. Ammonia synthesis industry: Past, present and future——retrospect, enlightenment and challenge from 100 years of ammonia synthesis industry [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(9): 1995-2005(in Chinese).
- [18] IRENA. Innovation outlook: Renewable methanol [R]. Abu Dhabi, UAE: International Renewable Energy Agency, 2021.
- [19] MONTOYA J H, TSAI C, VOJVODIC A, et al. The challenge of electrochemical ammonia synthesis: A new perspective on the role of nitrogen scaling relations [J]. *ChemSusChem*, 2015, 8(13): 2180-2186.
- [20] LIN Bosong, WIESNER T, MALMALI M. Performance of a small-scale haber process: A techno-economic analysis[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(41): 15517-15531.
- [21] KOURKOUMPAS D S, PAPADIMOU E, ATSONIOS K, et al. Implementation of the power to methanol concept by using CO₂ from lignite power plants: Techno-economic investigation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(38): 16674-16687.
- [22] HERMESMANN M, GRÜBEL K, SCHEROTZKI L, et al. Promising pathways: The geographic and energetic potential of power-to-x technologies based on regeneratively obtained hydrogen[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 138: 110644.
- [23] 刘化章. 催化在能源转化中的作用[J]. *工业催化*, 2011, 19(6): 1-12.
- LIU Huazhang. Catalysis function in energy source conversion[J]. *Industrial Catalysis*, 2011, 19(6): 1-12(in Chinese).
- [24] GUNDUZ S, DEKA D J, OZKAN U S. A review of the current trends in high-temperature electrocatalytic ammonia production using solid electrolytes[J]. *Journal of Catalysis*, 2020, 387: 207-216.
- [25] PENG Peng, CHEN P, SCHIAPPACASSE C, et al. A review on the non-thermal plasma-assisted ammonia synthesis technologies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 177: 597-609.
- [26] JGC HOLDINGS CORPORATION. Clean ammonia synthesis-clean energy carrier[EB/OL]. (2019-06-10)[2022-8-10]. <https://www.jgc.com/en/business/tech-innovation/environment/co2-free.html>.
- [27] State of Green. Danish partnership sets out to build

- world's first commercial scale green ammonia plant [EB/OL]. (2020-12-15)[2022-08-11]. <https://stateofgreen.com/en/news/danish-partnership-sets-out-to-build-worlds-first-commercial-scale-green-ammonia-plant/>.
- [28] Global Energy Infrastructure. Helios project in saudia arabia to start construction[EB/OL]. (2022-03-25)[2022-08-06]. <https://globalenergyinfrastructure.com/news/2022/03-march/helios-project-in-saudia-arabia-to-start-construction/>.
- [29] DAVID CARROL. Yara confirms construction of Pilbara green hydrogen plant to begin in weeks[EB/OL]. (2022-09-16)[2022-10-9]. <https://www.pv-magazine-australia.com/2022/09/16/yara-confirms-construction-of-pilbara-green-hydrogen-plant-to-begin-in-weeks/>.
- [30] 中国能源新闻网. 达茂旗风光制氢与绿色灵活化工一体化项目开工[EB/OL]. (2022-07-06)[2023-03-25]. https://www.cpnn.com.cn/news/kj/202207/t20220706_1530664_wap.html.
China Energy News Website. Damao banner wind and solar hydrogen production and green flexible chemical integration project started[EB/OL]. (2022-07-06)[2023-03-25]. https://www.cpnn.com.cn/news/kj/202207/t20220706_1530664_wap.html(in Chinese).
- [31] 内蒙古自治区能源局. 内蒙古自治区能源局关于印发实施 2022 年度风光制氢一体化示范项目的通知[EB/OL]. (2022-09-29)[2022-10-14]. <http://www.chinapower.com.cn/tynfd/hyyw/20220930/169251.html>.
Energy Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region. Notice of Inner Mongolia Autonomous Region Energy Bureau on issuing and implementing the 2022 integrated demonstration project of wind and solar hydrogen production[EB/OL]. (2022-09-29)[2022-10-14]. <http://www.chinapower.com.cn/tynfd/hyyw/20220930/169251.html>(in Chinese).
- [32] 中国能源产业发展网站. 投资 245 亿元! 中煤鄂尔多斯 50 万吨/年离网型风光制氢合成绿氨技术示范项目招标 [EB/OL]. (2022-12-21)[2023-02-16]. <http://www.ccedia.com/news/10565.html>.
China Energy Industry Development Website. Invest 24.5 billion yuan! ChinaCoal Ordos 500,000 tons/year off-grid wind and solar hydrogen synthesis green ammonia technology demonstration project bidding[EB/OL]. (2022-12-21)[2023-02-16]. <http://www.ccedia.com/news/10565.html>(in Chinese).
- [33] 赤峰市生态环境局. 2022 年 12 月 19 日赤峰市生态环境局关于建设项目环境影响报告书拟批复公示[EB/OL]. (2022-12-19)[2023-02-18]. http://sthjj.chifeng.gov.cn/zxsp/spjggs/hpsp/202212/t20221219_1933237.html.
Chifeng Municipal Bureau of Ecology and Environment. On December 19, 2022, the Chifeng Municipal Ecology and Environment Bureau announced the approval of the environmental impact report of the construction project[EB/OL]. (2022-12-19)[2023-02-18]. http://sthjj.chifeng.gov.cn/zxsp/spjggs/hpsp/202212/t20221219_1933237.html(in Chinese).
- [34] 赵雪明, 汤峥凤, 李丹, 等. 总投资超 200 亿! 中国能建在辽宁朝阳、甘肃酒泉 5 个重点项目集中开工 [EB/OL]. (2022-12-21)[2023-02-20]. https://www.ceec.net.cn/art/2022/12/21/art_11016_2525495.html.
ZHAO Xueming, TANG Zhengfeng, LI Dan, et al. The total investment exceeds 20 billion! China Energy Engineering Group has started construction in five key projects: Chaoyang, Liaoning, and Jiuquan, Gansu [EB/OL]. (2022-12-21)[2023-02-20]. https://www.ceec.net.cn/art/2022/12/21/art_11016_2525495.html(in Chinese).
- [35] Green Car Congress. Mitsui chemicals begins operations of pilot plant for methanol synthesis from CO₂ [EB/OL]. (2009-05-31)[2023-02-20]. <https://www.greencarcongress.com/2009/05/mitsui-co2-methanol-20090531.html>.
- [36] 兰州将建采用电解水制氢及 CO₂ 加氢制甲醇项目[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2018, 43(6): 89.
Lanzhou will build a project to produce hydrogen by water electrolysis and methanol from CO₂[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2018, 43(6): 89(in Chinese).
- [37] North-CCU-Hub. North-C-Methanol[EB/OL]. (2020-10-21)[2022-11-26]. <https://northccuhub.eu/north-c-methanol/>.
- [38] 国电投电子商务平台. 中煤鄂尔多斯能源化工有限公司 10 万吨/年液态阳光——二氧化碳加绿氢制甲醇技术示范项目[EB/OL]. (2022-11-30)[2023-02-18]. <http://www.gdtzb.com/g-nzj-19943.html>.
SPIC E-COMMERCE PLATFORM. ChinaCoal Ordos Energy Chemical Co., Ltd. 100,000 tons/year liquid sunlight - carbon dioxide plus green hydrogen to methanol technology demonstration project[EB/OL]. (2022-11-30)[2023-02-18]. <http://www.gdtzb.com/g-nzj-19943.html>(in Chinese).
- [39] AJSA Habibic. World's 1st large-scale e-methanol project to fuel Maersk's boxships[EB/OL]. (2022-03-02)[2022-11-24]. <https://www.offshore-energy.biz/worlds-1st-large-scale-e-methanol-project-to-fuel-maersks-boxships/>.
- [40] ISKOV H, RASMUSSEN N B. Global screening of

- projects and technologies for Power-to-Gas and Bio-SNG. A reference report[R]. Hørsholm: Danish gas Technology Centre, 2013.
- [41] MCPHY. Audi E-Gas[EB/OL]. (2015-11-09)[2022-11-26]. <https://mcpHY.com/en/achievements/power-to-gas-en/audi/>.
- [42] CORDIS. Integrated high-temperature electrolysis and methanation for effective power to gas conversion [EB/OL]. (2017-12-31)[2023-01-30]. <https://cordis.europa.eu/project/id/621210/reporting>.
- [43] EUDP. EI upgraded biogas II[EB/OL]. (2021-10)[2023-02-26]. <https://eudp.dk/en/node/14808>.
- [44] Jupiter1000. First industrial demonstrator of power to gas in France[EB/OL]. (2013-03)[2022-10-08]. <https://www.jupiter1000.eu/english>.
- [45] POHJOLAN VOIMA. Sizeable investment in the production of green hydrogen and renewable Finnish gas planned for the Kaanaa district of Pori[EB/OL]. (2022-04-05)[2023-1-30]. <https://www.pohjolanvoima.fi/en/sizeable-investment-in-the-production-of-green-hydrogen-and-renewable-finnish-gas-planned-for-the-kaanaa-district-of-pori/>.
- [46] VARTIAINEN V. Screening of power to gas projects [D]. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2016.
- [47] KIT. Kohlendioxidneutrale kraftstoffe aus luft und strom[EB/OL]. (2019-10-07)[2023-01-30]. https://www.kit.edu/kit/pi_2019_107_kohlendioxidneutrale-kraftstoffe-aus-luft-und-strom.php.
- [48] THE PÖRNER GROUP. E-crude: climate-neutral crude oil substitute from CO₂, water and eco-power[EB/OL]. (2018-06-07)[2023-01-30]. <https://www.poerner.at/en/media/pressemitteilung/news/e-crude-klimaneutraler-erdoelersatz-aus-co2-wasser-und-oekostrom/>.
- [49] Norsk e-fuel. We rise to preserve our climate and make aviation sustainable[EB/OL]. (2019-02)[2023-01-30]. <https://www.norsk-e-fuel.com/about-us>.
- [50] ARMIJO J, PHILIBERT C. Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: case study of Chile and Argentina[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(3): 1541-1558.
- [51] PALYS M J, DAOUIDIS P. Power-to-X: a review and perspective[J]. Computers & Chemical Engineering, 2022, 165: 107948.
- [52] IEA. Hydrogen projects database[EB/OL]. (2022-10)[2023-01-28]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>.
- [53] HU Song, GUO Bin, DING Shunliang, et al. A comprehensive review of alkaline water electrolysis mathematical modeling[J]. Applied Energy, 2022, 327: 120099.
- [54] HU Kewei, FANG Jiakun, AI Xiaomeng, et al. Comparative study of alkaline water electrolysis, proton exchange membrane water electrolysis and solid oxide electrolysis through multiphysics modeling [J]. Applied Energy, 2022, 312: 118788.
- [55] HENAO C, AGBOSSOU K, HAMMOUDI M, et al. Simulation tool based on a physics model and an electrical analogy for an alkaline electrolyser[J]. Journal of Power Sources, 2014, 250: 58-67.
- [56] SANDEEP K C, KAMATH S, MISTRY K, et al. Experimental studies and modeling of advanced alkaline water electrolyser with porous nickel electrodes for hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(17): 12094-12103.
- [57] CHI Yingtian, HU Qiang, LIN Jin, et al. Numerical simulation acceleration of flat-chip solid oxide cell stacks by data-driven surrogate cell submodels[J]. Journal of Power Sources, 2023, 553: 232255.
- [58] 郭育菁. 一种碱水制氢电解槽结构设计及性能优化[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- GUO Yujing. Structural design and performance optimization of an alkaline water hydrogen electrolyzer [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020(in Chinese).
- [59] URSÚA A, SANCHIS P. Static-dynamic modelling of the electrical behaviour of a commercial advanced alkaline water electrolyser[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(24): 18598-18614.
- [60] AMORES E, RODRÍGUEZ J, CARRERAS C. Influence of operation parameters in the modeling of alkaline water electrolyzers for hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(25): 13063-13078.
- [61] YANG Fuyuan, WANG Tianze, DENG Xintao, et al. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(61): 31467-31488.
- [62] SÁNCHEZ M, AMORES E, RODRÍGUEZ L, et al. Semi-empirical model and experimental validation for the performance evaluation of a 15kW alkaline water electrolyzer[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(45): 20332-20345.
- [63] QI Ruomei, GAO Xiaoping, LIN Jin, et al. Pressure

- control strategy to extend the loading range of an alkaline electrolysis system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(73): 35997-36011.
- [64] SAKAS G, IBÁÑEZ-RIOJA A, RUUSKANEN V, et al. Dynamic energy and mass balance model for an industrial alkaline water electrolyzer plant process [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(7): 4328-4345.
- [65] QI Ruomei, LI Jiarong, LIN Jin, et al. Thermal modeling and controller design of an alkaline electrolysis system under dynamic operating conditions[J]. *Applied Energy*, 2023, 332: 120551.
- [66] QIU Xiaoyan, ZHANG Hang, QIU Yiwei, et al. Online dynamic parameter estimation of an alkaline electrolysis system based on Bayesian inference[C]//*Proceedings of the 5th International Electrical and Energy Conference*. Nanjing, China: IEEE, 2022.
- [67] BUTTLER A, SPLIETHOFF H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review [J]. *Renew Sustain Energy Reviews*, 2018, 82: 2440-2454.
- [68] 中船718所. 2000Nm³/h! 派瑞氢能碱性电解槽新品下线[EB/OL]. (2022-12-16)[2023-01-19]. <https://news.bjx.com.cn/html/20221216/1276975.shtml>.
The 718th Research Institute of China State Shipbuilding Industry Corporation Limited. 2000Nm³/h! PERIC Hydrogen Technology Co., Ltd. alkaline electrolyzer new product launched[EB/OL]. (2022-12-16)[2023-01-19]. [https://news.bjx.com.cn/html/20221216/1276975.shtml\(in Chinese\)](https://news.bjx.com.cn/html/20221216/1276975.shtml(in%20Chinese)).
- [69] KOPP M, COLEMAN D, STILLER C, et al. Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(19): 13311-13320.
- [70] ACCELERERA. Accelerera hydrogen technology powers the largest proton exchange membrane(PEM) electrolyzer in operation in the world[EB/OL]. (2021-06-26)[2022-01-19]. <https://www.cummins.com/news/releases/2021/01/26/cummins-hydrogen-technology-powers-largest-proton-exchange-membrane-pem>.
- [71] 杨成玉, 马军, 李广玉, 等. 大型碱性电解水制氢装备多对一的应用与实践[J]. *太阳能*, 2022(5): 103-114.
YANG Chengyu, MA Jun, LI Guangyu, et al. Application and practice of many-to-one large-scale alkaline water electrolysis hydrogen production equipment[J]. *Solar Energy*, 2022(5): 103-114(in Chinese).
- [72] DAVID M, ALVAREZ H, OCAMPO-MARTINEZ C, et al. Dynamic modelling of alkaline self-pressurized electrolyzers: A phenomenological-based semiphsical approach[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(43): 22394-22407.
- [73] DA CRUZ M H A A, ETANCELIN M, MARIAS F, et al. Dynamic modelling of an alkaline water electrolysis system and optimization of its operating parameters for hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(35): 12982-12999.
- [74] RUUSKANEN V, KOPONEN J, KOSONEN A, et al. Power quality and reactive power of water electrolyzers supplied with thyristor converters[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 459: 228075.
- [75] DOZEIN M G, JALALI A, MANCARELLA P. Fast frequency response from utility-scale hydrogen electrolyzers[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(3): 1707-1717.
- [76] DOZEIN M G, DE CORATO A M, MANCARELLA P. Virtual inertia response and frequency control ancillary services from hydrogen electrolyzers[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(3): 2447-2459.
- [77] 沈小军, 聂聪颖, 吕洪. 计及电热特性的离网型风电制氢碱性电解槽阵列优化控制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(3): 463-472.
SHEN Xiaojun, NIE Congying, LÜ Hong. Coordination control strategy of wind power-hydrogen alkaline electrolyzer bank considering electrothermal characteristics[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(3): 463-472(in Chinese).
- [78] VARELA C, MOSTAFA M, ZONDERVAN E. Modeling alkaline water electrolysis for power-to-x applications: A scheduling approach[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(14): 9303-9313.
- [79] 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 Tiejia, WAN Zhi, WANG Jinjun, 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(in Chinese).
- [80] QIU Yiwei, ZHOU Buxiang, ZANG Tianlei, et al. Extended load flexibility of industrial P2H plants: A process constraint-aware scheduling approach[C]//*Proceedings of the 5th International Electrical and Energy Conference*. Nanjing, China, IEEE, 2022: 1-6.
- [81] LI Jiarong. A multi-stack power-to-hydrogen load control

- framework for the power factor-constrained integration in volatile peak shaving conditions[J]. arXiv preprint arXiv: 2301.09578, 2023.
- [82] CHEN Chao, YANG Aidong. Power-to-methanol: The role of process flexibility in the integration of variable renewable energy into chemical production[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 228: 113673.
- [83] HANK C, GELPKKE S, SCHNABLA A, et al. Economics & carbon dioxide avoidance cost of methanol production based on renewable hydrogen and recycled carbon dioxide - power-to-methanol[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2018, 2(6): 1244-1261.
- [84] ROUWENHORST K H R, VAN DER HAM A G J, MUL G, et al. Islanded ammonia power systems: technology review & conceptual process design[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 114: 109339.
- [85] NISHI M, CHEN S Y, TATENO H, et al. A super-growth carbon nanotubes-supported, Cs-promoted Ru catalyst for 0.1-8 MPaG ammonia synthesis[J]. *Journal of Catalysis*, 2022, 413: 623-635.
- [86] 刘化章, 胡樟能, 李小年, 等. A301 催化剂等压合成氨的可行性[J]. *化工学报*, 2001, 52(12): 1063-1067. LIU Huazhang, HU Zhangeng, LI Xiaonian, et al. Feasibility of low pressure ammonia synthesis using A301 catalyst[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2001, 52(12): 1063-1067(in Chinese).
- [87] ARENA F, ITALIANO G, BARBERA K, et al. Solid-state interactions, adsorption sites and functionality of Cu-ZnO/ZrO₂ catalysts in the CO₂ hydrogenation to CH₃OH[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2008, 350(1): 16-23.
- [88] 张彬, 杨为民, 杨卫胜. 合成气制乙二醇生产过程的先进控制及应用[J]. *化工进展*, 2020, 39(S1): 43-49. ZHANG Bin, YANG Weimin, YANG Weisheng. Advanced control and optimization for coal-based syngas to ethylene glycol[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(S1): 43-49(in Chinese).
- [89] 江凤月, 任锦飞, 朱书奔, 等. 先进控制技术在煤制氢装置中的应用[J]. *自动化仪表*, 2018, 39(12): 84-89. JIANG Fengyue, REN Jinfei, ZHU Shuben, et al. Application of advanced process control technology in coal to H₂ plant[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2018, 39(12): 84-89(in Chinese).
- [90] HE Ge, DANG Yagu, ZHOU Li, et al. Architecture model proposal of innovative intelligent manufacturing in the chemical industry based on multi-scale integration and key technologies[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, 141: 106967.
- [91] 黄卫清. 含不确定参数的化工过程系统的操作调控与动态柔性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2011. HUANG Weiqing. Operation improvement and dynamic flexibility analysis of chemical process systems under uncertainty[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011(in Chinese).
- [92] 王杭州, 陈丙珍, 何小荣, 等. 化学反应系统的多稳态分析[J]. *化工学报*, 2009, 60(1): 127-133. WANG Hangzhou, CHEN Bingzhen, HE Xiaorong, et al. Analysis of steady state multiplicity of chemical reaction systems[J]. *CIESC Journal*, 2009, 60(1): 127-133(in Chinese).
- [93] SWANEY R E, GROSSMANN I E. An index for operational flexibility in chemical process design. Part I: formulation and theory[J]. *AIChE Journal*, 1985, 31(4): 621-630.
- [94] 蒋浩, 陈丙珍. 化工过程稳定性分析研究进展[J]. *化工学报*, 2018, 69(1): 76-87. JIANG Hao, CHEN Bingzhen. Research progress of chemical process stability analysis[J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(1): 76-87(in Chinese).
- [95] USMAN M R. Hydrogen storage methods: Review and current status[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112743.
- [96] MØLLER K T, JENSEN T R, AKIBA E, et al. Hydrogen-a sustainable energy carrier[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2017, 27(1): 34-40.
- [97] BÜNGER U, MICHALSKI J, CROTOGINO F, et al. Large-scale underground storage of hydrogen for the grid integration of renewable energy and other applications [M]//BALL M, BASILE A, VEZIROĞLU T N. Compendium of hydrogen energy: Volume 4: Hhydrogen use, safety and the hydrogen economy. Amsterdam: Elsevier, 2016: 133-163.
- [98] 朱家骅, 卢蔚, 彭玉凤, 等. 过程工业尾气封闭循环原理与应用(II): 绿电制硝酸[J]. *化工学报*, 2021, 72(10): 5265-5272. ZHU Jiahua, LU Wei, PENG Yufeng, et al. Principles and application of enclosed exhausts cycling for process industry(II): Production of nitric acid from green power[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(10): 5265-5272(in Chinese).
- [99] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 危险化学品重大危险源辨识: GB 18218—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

- State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Identification of major hazard installations for hazardous chemicals: GB 18218—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018(in Chinese).
- [100] LI Hao, CAO Xuewen, LIU Yang, et al. Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 6258-6269.
- [101] CINTI G, FRATTINI D, JANNELLI E, et al. Coupling solid oxide electrolyser(SOE) and ammonia production plant[J]. *Applied Energy*, 2017, 192: 466-476.
- [102] BOS M J, KERSTEN S R A, BRILMAN D W F. Wind power to methanol: Renewable methanol production using electricity, electrolysis of water and CO₂ air capture[J]. *Applied Energy*, 2020, 264: 114672.
- [103] SAFARI F, DINCER I. Assessment and optimization of an integrated wind power system for hydrogen and methane production[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 177: 693-703.
- [104] VÁZQUEZ F V, KOPONEN J, RUUSKANEN V, et al. Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: Soletair proof-of-concept and improved process concept[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2018, 28: 235-246.
- [105] SMITH C, HILL A K, TORRENTE-MURCIANO L. Current and future role of Haber - Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape[J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(2): 331-344.
- [106] SIDDIQUI O, ISHAQ H, CHEHADE G, et al. Experimental investigation of an integrated solar powered clean hydrogen to ammonia synthesis system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 176: 115443.
- [107] SMITH W A, BURDYN T, VERMAAS D A, et al. Pathways to industrial-scale fuel out of thin air from CO₂ electrolysis[J]. *Joule*, 2019, 3(8): 1822-1834.
- [108] BASSANO C, DEIANA P, LIETTI L, et al. P2G movable modular plant operation on synthetic methane production from CO₂ and hydrogen from renewables sources[J]. *Fuel*, 2019, 253: 1071-1079.
- [109] KÖNIG A, MARQUARDT W, MITSOS A, et al. Integrated design of renewable fuels and their production processes: Recent advances and challenges [J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2020, 27: 45-50.
- [110] NOSHERWANI S A, NETO R C. Techno-economic assessment of commercial ammonia synthesis methods in coastal areas of Germany[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 34: 102201.
- [111] SCHEMME S, BREUER J L, KÖLLER M, et al. H₂-based synthetic fuels : A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(8): 5395-5414.
- [112] SHEPHERD J, KHAN M H A, AMAL R, et al. Open-source project feasibility tools for supporting development of the green ammonia value chain [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 274: 116413.
- [113] IKÄHEIMO J, KIVILUOMA J, WEISS R, et al. Power-to-ammonia in future North European 100% renewable power and heat system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(36): 17295-17308.
- [114] ZHANG Hanfei, DESIDERI U. Techno-economic optimization of power-to-methanol with co-electrolysis of CO₂ and H₂O in solid-oxide electrolyzers[J]. *Energy*, 2020, 199: 117498.
- [115] CHEN Chao, YANG Aidong, BAÑARES-ALCÁNTARA R. Renewable methanol production: understanding the interplay between storage sizing, renewable mix and dispatchable energy price[J]. *Advances in Applied Energy*, 2021, 2: 100021.
- [116] PETERS R, BALTRUWEIT M, GRUBE T, et al. A techno economic analysis of the power to gas route [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2019, 34: 616-634.
- [117] CHAUVY R, DUBOIS L, LYBAERT P, et al. Production of synthetic natural gas from industrial carbon dioxide[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114249.
- [118] QI Meng, PARK J, LANDON R S, et al. Continuous and flexible Renewable-Power-to-Methane via liquid CO₂ energy storage: Revisiting the techno-economic potential[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111732.
- [119] BÖHM H, ZAUNER A, ROSENFELD D C, et al. Projecting cost development for future large-scale power-to-gas implementations by scaling effects [J]. *Applied Energy*, 2020, 264: 114780.
- [120] ADELUNG S, DIETRICH R U. Impact of the reverse water-gas shift operating conditions on the Power-to-Liquid fuel production cost[J]. *Fuel*, 2022, 317: 123440.
- [121] HOMBACH L E, DORÉ L, HEIDGEN K, et al. Economic and environmental assessment of current (2015) and future(2030) use of E-fuels in light-duty

- vehicles in Germany[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207: 153-162.
- [122] METHANEX . Methanex posts regional contract methanol prices for Europe, North America, Asia and China[EB/OL]. (2022-08-01)[2023-01-10]. <https://www.methanex.com/our-business/pricing>.
- [123] EUROSTAT. Gas prices for household consumers - bi-annual data(from 2007 onwards)[EB/OL]. (2022-12-10)[2023-01-30]. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/view/NRG_PC_202.
- [124] 陈子瞻, 王高尚. 煤制油成本案例分析及产业前景[J]. *地球学报*, 2017, 38(1): 109-114.
CHEN Zizhan, WANG Gaoshang. An analysis of cost case and industry prospect of coal to liquids[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(1): 109-114(in Chinese).
- [125] OSMAN O, SGOURIDIS S, SLEPTCHENKO A. Scaling the production of renewable ammonia: A techno-economic optimization applied in regions with high insolation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 271: 121627.
- [126] TSO W W, DEMIRHAN C D, LEE S, et al. Energy carrier supply chain optimization: A texas case study[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2019, 47: 1-6.
- [127] WANG Hanchu, DAOUTIDIS P, ZHANG Qi. Harnessing the wind power of the ocean with green offshore ammonia[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(43): 14605-14617.
- [128] LI Jiarong, LIN Jin, SONG Yonghua. Capacity optimization of hydrogen buffer tanks in renewable power to ammonia(P2A) system[C]//Proceedings of 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Montreal: IEEE, 2020: 1-5.
- [129] RIVAROLO M, BELLOTTI D, MAGISTRI L, et al. Feasibility study of methanol production from different renewable sources and thermo-economic analysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(4): 2105-2116.
- [130] LI Jiarong, LIN Jin, HEUSER P M, et al. Co-planning of regional wind resources-based ammonia industry and the electric network: A case study of Inner Mongolia [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(1): 65-80.
- [131] LI Jiarong, LIN Jin, ZHANG Hongcai, et al. Optimal investment of electrolyzers and seasonal storages in hydrogen supply chains incorporated with renewable electric networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1773-1784.
- [132] 李佳蓉, 林今, 邢学韬, 等. 主动配电网中基于统一运行模型的电制氢(P2H)模块组合选型与优化规划[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4021-4032.
LI Jiarong, LIN Jin, XING Xuetao, et al. Technology portfolio selection and optimal planning of power-to-hydrogen(P2H) modules in active distribution network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4021-4032 (in Chinese).
- [133] BIQUE A O, NGUYEN T B H, LEONZIO G, et al. Integration of carbon dioxide and hydrogen supply chains[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2018, 43: 1413-1418.
- [134] 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. 电力负荷管理系统技术规范: GB/T 15148—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification of power load management system: GB/T 15148—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008(in Chinese).
- [135] 安徽省发展和改革委员会. 关于印发安徽省电力需求侧管理实施细则(修订版)的通知[EB/OL]. (2021-07-06)[2022-08-20]. <http://www.ah.sgcc.com.cn/html/files/2022-09/16/20220916175616073875886.pdf>. Anhui Provincial Development and Reform Commission. Notice on the issuance of the implementation rules for electricity demand side management in Anhui Province(revised version) [EB/OL]. (2021-07-06)[2022-08-20]. <http://www.ah.sgcc.com.cn/html/files/2022-09/16/20220916175616073875886.pdf>(in Chinese).
- [136] 浙江省发展和改革委员会, 浙江省能源局. 浙江省发展改革委、浙江省能源局关于开展 2021 年度电力需求响应工作的通知[EB/OL]. (2021-06-08)[2022-08-19]. https://fzggw.zj.gov.cn/art/2021/6/8/art_1229629046_4906648.html. Zhejiang Provincial Development and Reform Commission, Zhejiang Provincial Energy Bureau. Notice of Zhejiang Provincial Development and Reform Commission and Zhejiang Provincial Energy Bureau on carrying out the 2021 annual electricity demand response work[EB/OL]. (2021-06-08)[2022-08-19]. https://fzggw.zj.gov.cn/art/2021/6/8/art_1229629046_4906648.html(in Chinese).
- [137] WALAWALKAR R, FERNANDS S, THAKUR N, et al.

- Evolution and current status of demand response(DR) in electricity markets: Insights from PJM and NYISO[J]. Energy, 2010, 35(4): 1553-1560.
- [138] EDMONDS L, PFROMM P, AMANOR-BOADU V, et al. Green ammonia production-enabled demand flexibility in agricultural community microgrids with distributed renewables[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2022, 31: 100736.
- [139] ZHENG Yi, YOU Shi, LI Ximei, et al. Data-driven robust optimization for optimal scheduling of power to methanol[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 256: 115338.
- [140] KLYAPOVSKIY S, ZHENG Yi, YOU Shi, et al. Optimal operation of the hydrogen-based energy management system with P2X demand response and ammonia plant [J]. Applied Energy, 2021, 304: 117559.
- [141] WU Sirui, LIN Jin, LI Jiarong, et al. Multi-timescale trading strategy for renewable power to ammonia virtual power plant in the electricity, hydrogen, and ammonia markets[J]. arXiv preprint arXiv: 2302.09316, 2023.
- [142] MANANA M, ZOBAA A F, VACCARO A, et al. Increase of capacity in electric arc-furnace steel mill factories by means of a demand-side management strategy and ampacity techniques[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124: 106337.
- [143] BRÉE L C, PERREY K, BULAN A, et al. Demand side management and operational mode switching in chlorine production[J]. AIChE Journal, 2019, 65(7): e16352.
- [144] CHENG Xiang, LIN Jin, LIU Feng, et al. A coordinated frequency regulation and bidding method for wind-electrolysis joint systems participating within ancillary services markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, doi: 10.1109/TSTE.2022.3233062.
- [145] SAMANI A E, DE KOONING J D M, BLANCO C A U, et al. Flexible operation strategy for formic acid synthesis providing frequency containment reserve in smart grids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 139: 107969.
- [146] JIANG Hao, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Demand side frequency control scheme in an isolated wind power system for industrial aluminum smelting production [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 844-853.
- [147] ZHANG Xiao, HUG G, KOLTER J Z, et al. Demand response of ancillary service from industrial loads coordinated with energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 951-961.



邱一苇

在线出版日期: 2023-06-13。

收稿日期: 2023-02-17。

作者简介:

邱一苇(1991), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制, 氢能技术, 电氢耦合系统, ywqiu@scu.edu.cn;

吉旭(1965), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为绿色能源与化工耦合的关键技术, 绿氢、绿氨的安全技术与新工艺, jixu@scu.edu.cn;

朱文聪(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电氢耦合系统, zwencong@stu.scu.edu.cn;

*通信作者: 林今(1985), 男, 博士, 长聘副教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统的运行控制、氢能的接入与控制、能源物联网等相关技术, linjin@tsinghua.edu.cn。

(编辑 朱腾翌)