DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.128 **中图分类号**：TM91 **文献标志码**：A

新能源电解水制氢技术发展研究综述

孙 浩[1](中国电源学会学生会员)，吴维宁[1,2]，陈丽杰[3]，邢作霞[1]
(1.沈阳工业大学电气工程学院，沈阳 110870；2.南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司)，南京 211100；3.中集海洋工程有限公司，深圳 518038)

摘要：首先简要介绍氢能相关产业总体发展现状和趋势，详细比较了不同类型电解水制氢技术。然后总结光伏制氢、风能制氢、风光互补制氢技术的发展现状，研判未来发展趋势。最后针对大规模新能源制氢系统，构建了“绿氢工厂”研究框架体系，针对新能源制氢涉及的关键技术提供研发思路，针对相关工程需要的产品及解决方案进行需求分析，为“风-光-氢-储”能源综合利用的未来研究方向提出建议。

关键词：氢能；风力发电；光伏发电；电解水制氢；绿氢

Review on Development of Renewable Electrolytic Water Hydrogen Production Technologies

SUN Hao[1], *Student Member, CPSS*, WU Weining[1,2], CHEN Lijie[3], XING Zuoxia[1]
(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211100, China; 3. CIMC Offshore Co., Ltd., Shenzhen 518038, China)

Abstract: The overall development statuses and trends of hydrogen-related industries are briefly introduced at first, and different types of electrolytic water hydrogen production technologies are compared in detail. Then, the development statuses of photovoltaic (PV) power hydrogen production, wind power hydrogen generation and wind-PV complementary hydrogen generation technologies are summarized, and the development trends in the future are investigated. Finally, the research framework system of “Green Hydrogen Plant” for a large-scale new energy hydrogen production system is constructed. The research and development ideas for key technologies involved in new energy hydrogen production are provided, the demand analysis for products and solutions required by relevant projects is conducted, and suggestions for the research direction of “wind-PV-hydrogen-storage” energy comprehensive utilization in the future are put forward.

Keywords: Hydrogen energy; wind power generation; photovoltaic (PV) power generation; electrolytic water hydrogen production; green hydrogen

全球电解水制氢技术已存在上百年的历史。在1 890~1 910年经历蓬勃的发展期后，化石能源制氢技术以其低廉的价格迅速挤压了电解水制氢的市场份额，电解水制氢技术曾陷入漫长的市场停滞期[1-2]。随着新一轮能源革命的到来，新能源发电的快速发展为电解水制氢产业注入了全新的活力。在发展新能源技术的同时，大力发展氢能相关产业，将氢能作为新型电力系统的长时间储能手段，可以缓解电力生产和使用的时空不平衡、提高电网的灵活性。构建脱离电网束缚的绿氢生产系统，可以加快新能源开发建设进程，将风光资源直接转换成氢能进行进一步的存储和使用，具备重要的战略与现实意义。

目前，我国在新能源电解水制氢的实际应用方面，面临以下几个方面的主要技术问题。

(1)高性价比制氢装置国产化比例较低。技术经

收稿日期：2023-06-13；**修回日期**：2023-09-18；**录用日期**：2023-11-22；**网络首发日期**：2024-01-24

济兼顾的电解槽是新能源电解水制氢产业链发展的重点。目前，可商业化的电解水制氢装备主要有质子交换膜 PEM(proton exchange membrane)电解槽、碱性水电解槽 AWE(alkaline water electrolyzer)[3]。PEM 具有响应速度快、功率调节范围宽、过载能力强等优点，能够适应供电侧功率快速、大范围变化，国外新能源电解水制氢系统中多采用 PEM。我国的 PEM 及其核心部件主要依赖进口，造价较高，暂时无法支撑我国大规模新能源电解水制氢的发展。AWE 具有技术成熟、供应链全部国产化、单机容量大、制造成本低等优点。近年，AWE 在我国应用广泛，我国已成为 AWE 装备大国。但 AWE 的功率可调范围较小，响应速度慢，与新能源出力的匹配性不及 PEM。

(2)大规模新能源制氢系统组网困难。目前，针对大规模制氢，尤其是离网制氢，面临的主要问题是如何组建有效的电力供应网络。在电力网络供应方面，现阶段大规模新能源构建的电力电网可以采用交流，也可以采用直流。但交流组网方式如果脱离大电网运行，需要配置储能或其他维持系统稳定的设备，会增加成本；直流组网方式不存在稳定性问题，但大规模直流组网随着汇集的直流电流增加，传输过程中需要提升/降低电压，Boost/Buck 电路无法满足要求，需要采用直流变压器。目前，直流变压器相关技术还未达到产业化阶段，定制化的产品价格偏高且生产周期较长。现阶段，也有人提出采用分散制氢，通过输氢管道汇集后集中送至用户侧的方案，这种方式规避了大范围汇集电流的问题，但由于汇氢管道的多点接入，又出现了气体网络如何控制的新问题。

(3)变功率情况下，制氢系统如何稳定运行。虽然制氢装置对功率波动具备一定的适应特性，但波动电源对电解槽性能和寿命的影响机理有待进一步研究。针对制氢装置的负荷特性，制氢系统在规划设计、运行控制、能量管理等各个关键环节均有更高的技术要求。在工程建设中，面临着储能系统容量优化配置、制氢设备冷启动、系统黑启动、制氢设备最低功率运行及氢气压缩机变负荷运行等一系列挑战。

(4)氢气储运领域的相关核心技术有待攻克。氢气的储存分为高压气态储氢、低温液态储氢和固体材料储氢。气态储氢是现阶段的主要方式，传统的气态储氢采用钢瓶，技术虽然成熟但质量大、效率低；新兴的碳纤维材料储罐质量轻、强度高、效率高，但相关的技术存在“卡脖子”的问题。从储氢密度、安全性等因素考虑，固态储氢是最具商业化发展前景的储存方式之一，我国在固态储氢领域有望弯道超车。不仅在氢能自行车、两轮车、燃料电池叉车、加氢站方面均有示范项目，而且已经在尝试应用固态储氢参与电力调峰。液态储氢在火箭推进、工业气体等领域有着重要的地位，相关技术的大范围应用还有待进一步研究与开发。

综上所述，从传统电解水制氢到大规模新能源制氢，应用场景从小规模、电网取电、恒功率制氢变成大规模、新能源发电、变功率制氢，如何将不规则的电能转变成安全稳定的氢能成为新的考验。

1　电解水制氢

目前，最常见的电解槽有 4 种，除了已经产业化的 AWE 和 PEM 电解槽，还有处于实验室阶段的碱性阴离子交换膜 AEM(alkaline anion exchange membrane)电解槽和固体氧化物电解槽 SOE(solid oxide electrolyzer)，主要参数信息见表 1。文献[4]详细论述了 4 种电解槽的化学反应方程式和技术原理。

AWE、PEM、AEM 均属于低温制氢，工作温度低于 100 ℃，SOE 属于高温制氢，工作温度为 800 ℃左右。AWE 是目前技术最成熟的电解槽，包括数十至上百个电解小室，由螺杆和端板将这些电解小室压在一起，每个电解小室包括双极板、电极、隔膜、密封垫圈等几部分。目前电极主要采用镍基材料，隔膜由多孔材料制成，电解质水溶液为 20%~40%的氢氧化钠(NaOH)或氢氧化钾(KOH)。PEM 与 AWE 相比，采用了质子交换膜替代多孔隔膜传导质子，并分隔两侧气体，且 PEM 电解槽采

表 1 电解水制氢技术详细信息[1-2, 5-7]

Tab. 1 Detailed information about electrolytic water hydrogen production technology [1-2, 5-7]

技术说明	AWE	PEM	AEM	SOE
技术成熟度	商业化阶段	商业化阶段	示范应用阶段	实验室阶段
电荷载体	OH^-	H^+	OH^-	O^{2-}
电解质	10%~40% KOH/NaOH 水溶液	固体聚合物	固体聚合物	固体陶瓷
工作液体	高浓度溶液	蒸馏水	蒸馏水/低浓度溶液	水蒸气
隔膜	聚苯硫醚或复合材料	全氟磺酸树脂	聚芳醚类	—
阳极材料	Ni	Pt、Ir、Ru	Ni 基合金	LSMYSZ、$CaTiO_3$
阴极材料	Ni 合金	Pt、Pt=C	Ni、Ni-Fe、$NiFe_2O_4$	金属陶瓷复合材料
温度/℃	65~100	70~90	50~70	650~1 000
操作压力/MPa	2~10	2~10	＜35	＜30
效率/%	62~82	67~84	—	90
单体电压/V	1.8~2.4	1.8~2.4	1.85	0.95~1.30
电流密度/(A/cm^2)	0.2~0.4	0.6~2.0	0.1~0.5	0.3~1.0
启动时间	冷启动 30~120 min；热启动 min 级	冷启动＜15 min；热启动 s 级	—	＞60 min
电堆寿命/h	＜90 000	20 000~80 000	＞10 000	＜40 000
能耗/($kWh/N{\cdot}m^3$)	4.5~5.5	3.8~5.0	4.8	3.6

用零间隙结构的膜电极，电解槽结构紧凑、体积小。由于其采用膜电极和气体扩散层的结构，且目前已列装的电解槽单槽制氢规格较小，因此现阶段相比 AWE 技术具备负载范围宽、响应速度快的优点。但 PEM 电解槽工作时为酸性环境，需要用铂和铱等贵金属做催化剂，双极板、扩散层采用钛基材料，使得 PEM 电解槽的成本十分高昂，且质子交换膜主要依赖进口，使用寿命也不如 AWE。AEM 是近年来为了替代 PEM 和 AWE 而研发的新技术。AEM 采用了比 AWE 浓度低的碱性溶液和固体电解质(聚合物)膜(如 Mg-Al LDH)，阳极由镍基或钛材料制造，阴极包括 Ni、Ni-Fe 和 $NiFe_2O_4$，以解决 AWE 和 PEM 的缺点。目前，AEM 处于实验室研发阶段，阴离子交换膜的服役寿命和离子电导率尚需攻关。SOE 必须在特定的高温条件下维系工作状态，该技术的普适性有待验证。但与低温电解相比，电解过程所需的电能显著减少，系统效率高达 90%，是目前制氢效率最高的技术。虽然阴极材料是由 50/50 wt%的镧、锰酸锶和钇稳定氧化锆组成的混合物，但阳极和电解质材料分别为陶瓷和金属陶瓷复合材料，系统成本和造价可以得到有效控制。目前，SOE 处于实验室研发和示范初期，国内仅为 kW 级示范规模，离 MW 级装备开发还有一段距离。

除了核心装备电解槽之外，电解水制氢系统中还包括相应的配套设备。以 AWE 构建的制氢系统为例，主要设备包括电解槽、后处理装置、氢气纯化装置、氮气吹扫与安全装置、纯水装置、干式变压器、整流柜、控制柜、配电柜、除盐水冷却装置等。传统的电解水制氢系统一般采用中低压配电系统供电，通过不可控的晶闸管构成 AC-DC 变换器提供直流电，电压一般从数 V 到数百 V，电流从十几 A 到数千 A，工作原理如图 1 所示。新能源制氢技术是一门新兴交叉学科，风光资源、储能设备、制氢设备、储氢设备成为了氢能生产的新要素，如何构建大规模“绿氢工厂”技术体系成为氢能领

域关注的焦点。

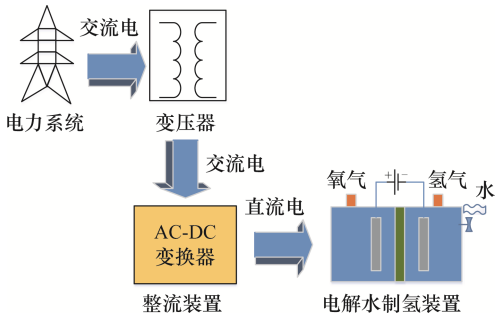


图 1　电解水制氢工作原理

Fig. 1 Working principle for electrolytic water hydrogen production

2　新能源制氢系统的技术发展

近年来，经过技术论证，新能源出力特性可以与电解水制氢装置进行耦合，协同控制、优化管理策略能够显著提高电解水制氢系统的性能。目前，世界多国正在筹建大规模新能源制氢项目，单个电解槽规模达到 1 500 N·m^3/h，电源规模达到 100 MW 甚至 GW 级，年产氢规模达到 1 000 t 至 10 000 t，相关波动性电源制氢技术正在逐步完善，逐渐形成“绿氢工厂”技术体系。

新能源制氢系统中，风电、光伏分别为交流、直流电源，电解槽是直流负荷，因此在构建系统的过程中又可以分为交流组网方式和直流组网方式；同时，根据制氢系统与电网的互动情况，又可以分为离网型制氢系统和并网型制氢系统[8]。

2.1　光伏制氢系统

光伏制氢系统技术分类说明见表 2。最初人们关注小规模离网型制氢技术，但近年来人们更为关注大规模的并网型制氢技术。

表 2　光伏制氢系统技术分类

Tab. 2 Classification of technologies of photovoltaic power hydrogen production system

电网连接关系	直接耦合		间接耦合	
	交流母线	直流母线	交流母线	直流母线
离网	—	源荷特性匹配；光伏出力控制；负荷切换控制	—	通过 DC-DC 控制器实现源荷特性匹配
并网	—	—	电网/光伏出力协调控制技术；AC-DC 协调控制器	直流微电网技术；AC-DC 协调控制器；DC-DC 协调控制器

2.1.1　离网型光伏制氢系统

离网型光伏制氢系统分为直接耦合和间接耦合 2 种，系统结构如图 2 所示。离网型直接耦合光伏制氢系统，由于不含 DC-DC 变换器，电解槽的 *I-V* 特性与光伏最大功率点之间存在不匹配现象[9]。但在电力电子器件转换效率低、价格高的 1 990~2 010 年，简单高效且省去 MPPT 控制器、DC-DC 控制器和蓄电池等设备的直接耦合技术成为关注的焦点。文献[10-11]研究表明，针对特定场景，在特定的光照条件下，光伏系统可以工作在最大功率点附近，但研究忽略了天气条件对光伏制氢系统的影响，若不采取控制措施，将出现直接耦合失配；文献[12]研究了 IV 近似法、PV 组件温度法和 PV 电流法 3 种控制方法，可以有效避免直接耦合失配；文献[13]研究了直接耦合型的源-荷匹配策略，对于给定的光伏组件，可以计算得出电解槽最优化串、并联数量，进而提升性能。上述方法虽然考虑了电解槽内部单元的串/并联组合形式，但调节参数单一且电解槽切换频繁，不仅影响电解槽的产氢速率，而且会对光伏系统产生一定的影响。因此，文献[14]提出“粗调”和“细调”，首先调节光伏组件串/并联连接结构和电解槽的工作数量，其次调节电解槽的工作温度，使系统保持工作在光伏输出的最大功率点附近，提高系统的效率；文献[15]基于调节能力更强的 PEM，构建光伏-电解槽双阵列直接耦合模型，采用动态调节的优化策略，提高控制灵活性的同时确保产氢速率。随着电力电子器件价格的降低、转换效率的提升，DC-DC 精

准控制对提升系统效率的作用明显，直接耦合方式已经不再是人们关注的焦点，但在大型新能源制氢工程中，单电解槽状态切换控制和多电解槽协同控制策略依然具备重要的参考价值。

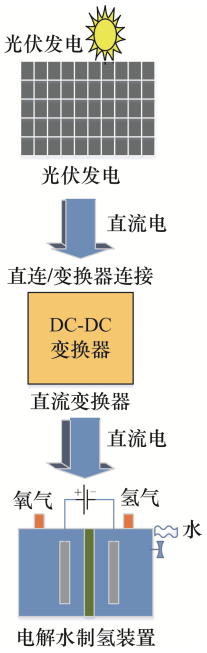


图 2 离网型光伏制氢系统结构

Fig. 2 Structure of off-grid photovoltaic power hydrogen production system

离网型间接耦合光伏制氢系统使用 DC-DC 变换器。文献[16]重点讨论了光伏 DC-DC 变换器耦合制氢系统的理论分析和设计方法，并基于 DC-DC 变换器，实现了变功率制氢工况条件下的最大功率跟踪；文献[17]提出 1 种基于耦合电感的新型交错 Buck 电路，可灵活匹配光伏阵列与电解槽的 *I-V* 曲线，提高效率；文献[18]提出 1 种基于多谐振变换器的直流耦合光伏制氢系统，降低系统损耗。以上研究证明了在技术原理上，DC-DC 变换器可以用于耦合光伏和电解槽，实现最大功率跟踪和变负荷控制。但实际研发过程中需要考虑升压转换比、电磁干扰、输出电流纹波等因素，同时还要兼顾器件选型的成本，实用级的产品研发需要后续长期的攻关[19]。除了核心部件 DC-DC 变换器的研究，针对离网光伏系统，文献[20]提出 1 种基于光伏/燃料电池/电解槽/电池混合系统的能源管理策略，在满足电负荷功率需求的同时，兼顾氢罐的储氢状态和储能系统的荷电状态，以延长其寿命。但此方法光伏利用小时数较低，技术路线成本偏高；与此对比，风光互补制氢可以显著提升利用小时数，更适合于离网制氢。

2.1.2 并网型光伏制氢系统

并网型光伏制氢系统，根据具体项目规模可以分为共交流母线和共直流母线，如图 3 所示。针对直流母线制氢，构建光/储/氢直流微电网的同时，需要通过 AC-DC 转换装置与电网互动。文献[21]提出主动型光伏并网发电系统的概念，采用氢能作为长时间储能，通过 DC 母线汇集协调控制各模块功率，平抑光伏上网功率波动；文献[22]进一步设计了光伏制氢能量存储系统，提出 1 种基于能量转换(DC-DC 和 AC-DC)的体系结构和电源管理策略 PMS(power management strategy)，使用光伏系统为直流负载提供电力，当光伏电源功率不足时，电网补偿能量，当光伏电源功率富余时，多余的能量将通过电解水制氢。未来，光伏直流母线制氢方式有望在用户侧与光伏建筑一体化 BIPV(building integrated photovoltaic)、光储直柔技术相结合，形成新的电-氢能源体系。

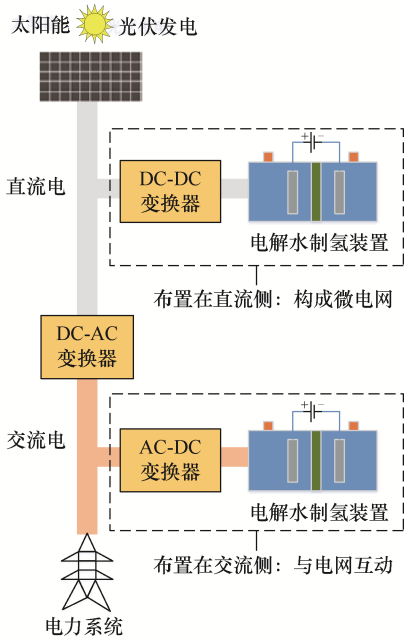


图 3 并网型光伏制氢系统结构

Fig. 3 Structure of grid-connected photovoltaic power hydrogen production system

针对交流母线制氢，近年我国在西北等光伏资源丰富的地区建设的光伏制氢项目大多采用此方式，不仅可以借助大电网的稳定性支撑光伏制氢系统运行，还可以利用低价的谷电提升设备利用率，然后提升项目总体的经济性。然而，近期，随着大规模光伏电站的不断并网运行，部分光伏发电大省的发电曲线发生了巨大变化，光伏发电高峰时刻出现了低电价甚至零电价、负电价，夜晚时段也不再属于谷电，部分并网运行的光伏制氢项目盈利状况堪忧。

2.2　风电制氢系统

在风电渗透率高的国家或地区，并网制氢技术得到最先的关注和研究。这种技术路线中的制氢装置可以为风电并网提供辅助服务。近年来，随着风机与制氢装置大型化、海上风电平价化的发展趋势，风机单机功率与制氢装置单体功率可以较好地匹配，人们更为关注风电离网耦合制氢。风电制氢系统技术分类说明见表 3。

表 3　风电制氢系统技术分类

Tab. 3 Classification of technologies of wind power hydrogen production system

电网连接关系	交流母线	直流母线
离网	通过 AC-DC 控制器实现源荷特性匹配	—
并网	协同控制，平滑风机出力；主动支撑电网；AC-DC-AC 协调控制器	直流微电网相关技术；AC-DC 协调控制器；DC-DC 协调控制器

2.2.1　并网型风电制氢系统

国内外学者针对大型风电场并网制氢技术展开了理论和实践研究，并网结构如图 4 所示。在制氢装置布置于交流母线侧的研究中，文献[23]基于双馈风力发电机并联安装电解槽进行制氢生产，通过协同控制，平滑风力发电机的输出功率使得风机对电网更为友好；文献[24]基于永磁同步发电机和 10 个电解槽单元组成风氢耦合系统，然后制定切换策略，平滑风电场线路功率波动，通过延时切换策略避免电解槽频繁切换，提高电解槽使用寿命和效率。在制氢装置布置于直流母线侧的研究中，文献[25]给出了电解槽功率流和氢气流的控制模型，并通过硬件在环仿真进行了实时实验测试；在此基础上，文献[26]通过调节电解槽电流，提供抗风机功率波动和电解质温度不确定性鲁棒控制，提高氢气的生产效率和质量，提升并网友好性。但基于制氢装置仅能实现单向的功率调节，因此文献[27]构建了包含风机、制氢装置、燃料电池装置、超级电容等的混合系统，提出多种运行模式及其控制策略，实现对母线功率的双向调节，可以适应风机出力的波动特性，保持直流母线电压稳定，但未考虑燃料电池、电解槽延迟响应会导致短期内源-荷不匹配的问题。文献[28]提出 1 种能量流动控制策略，在长时间尺度内，使用燃料电池和电解槽作为缓存，补偿/消纳风机与负荷调度之间的功率差；在短时间尺度内，使用超级电容作为缓冲，弥补燃料

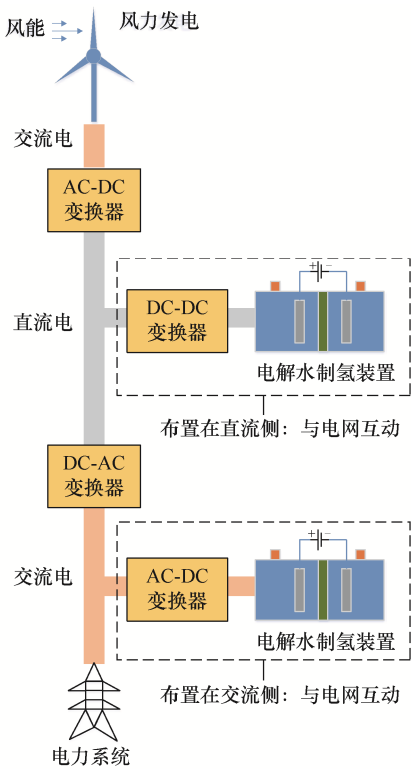


图 4　并网型风电制氢系统结构

Fig. 4 Structure of grid-connected wind power hydrogen production system

电池和电解槽响应延迟引起的功率不平衡，确保并网功率与负荷调度一致。

2.2.2 离网型风电制氢系统

离网型风电制氢系统如图 5 所示。整流控制器是整套系统中最重要的部分，可以根据收集的实时信息对发电功率、制氢功率进行决策，是保证系统安全稳定运行的基础。

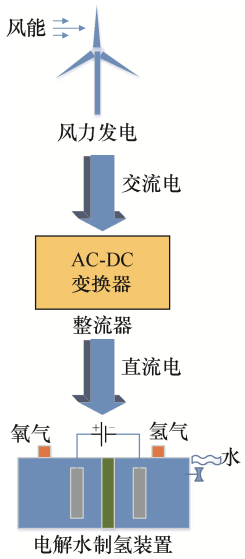


图 5 离网型风电制氢系统

Fig. 5 Off-grid wind power hydrogen production system

关于风机是否可以与制氢装置通过变换器耦合运行的问题，在理论研究方面，文献[29]设计了非并网风力发电和电解水制氢装置的集成系统，并通过仿真得出风力发电机的功率输出不稳定只影响氢、氧的输出，而不影响气体质量或设备性能。在实践方面，文献[30]通过电源模拟风力发电机为电解槽供电，验证表明电解槽可以高效可靠运行，气体纯度、动态响应特性等均满足要求；文献[31]通过实验的方式找到了离网情况下风电制氢系统稳定运行的技术边界条件；文献[32]以实际风电制氢工程为依托，验证了风电系统与电解槽可以直接耦合，功率的波动特性对电解槽的工作过程无显著影响，仅影响产氢量，在一定区间内电流波动对电流效率影响较小。在以上研究论证的基础上，文献[33]进一步针对单台永磁直驱的离网型风电制氢系统进行研究，采用叶尖速比法与爬山算法相结合的 MPPT 控制策略，制氢的同时实现了风能利用的最大化；文献[34]针对大规模风电制氢系统中电解槽阵列，提出 1 种基于轮值思想的优化控制策略，将电解槽运行状态划分为额定功率、波动功率和停机 3 种，实现了电解槽阵列单体工作时间的均衡，有效提升了电解槽阵列的寿命，降低了安全风险；文献[35]以碱性电解槽为研究对象，建立风氢系统效率模型，提出 1 种基于分段模糊控制的电解槽阵列效率提升方法。综上所述，离网型风电制氢已经完成了理论基础和实践验证，为后续大规模离网型风电制氢和风光互补制氢的快速发展奠定了基础，但针对于多台风机的大型发电厂与多电解槽之间的组网技术、能量管理策略、协调控制技术均有待进一步研究；产品级的 AC-DC 变换器也有待进一步研发。

2.3 风光互补制氢系统

针对以风光为主的新能源制氢系统，其本身应具备独立运行和与电网互动的能力。在理论与实践验证研究方面，文献[36]基于建模仿真，得出影响风光互补制氢系统效率的相关因素依次为光照辐射总量、风速、电解槽温度和因云层/建筑物遮挡产生的光伏系统局部阴影；文献[37]搭建风/光/氢系统实验平台，开发在线监控系统，为示范工程建设和商业化运行奠定了基础；文献[38]提出构建新能源制氢综合能源管理平台并通过协调控制平衡功率，提出了“以电定氢”、“以氢定电”2 种工作模式。在系统构成及相应的控制策略方面，文献[39]基于风电/光伏/制氢/燃料电池的直流母线结构，构建能量管理和实时控制双层模型，设定仿真模拟时长 24 h，步长 1 s，上层采用功率平衡的策略，制定系统中各单元出力计划，下层采用局部分散自适应模型预测控制 MPC(model predictive control)方法，实现各单元的精准控制。虽然上述能量管理与实时协同控制的方法通过了仿真验证，但忽略了现实中网络通信的延时问题，尤其是大规模的风光互补工程中风光出力的快速波动叠加远距离通信延时，上述协同控制策略很难保证系统的稳定运行。文献[40]基于风电/光伏/制氢/燃料电池/储能的直流母线结构，依然采用 MPC 方法，设定仿真模拟

时长 25 a，步长为 1 h，生成燃料电池和电解槽的参考功率，实现负载的跟踪，运行功率差值由蓄电池进行平衡，由于储能系统的加入，系统的稳定可靠运行得到了保障，但小时级步长无法满足实时协调控制的要求；文献[41]构建了风电/光伏/制氢/超级电容器的直流母线结构，并基于超级电容器的快速充放电特性，制定策略平抑风光出力的波动，这种方式结构简单、变换器少、系统效率高，但超级电容器是功率型储能器件，仅能平抑实时功率的不平衡，在日内、日前调度阶段不能满足要求，并且缺乏协同控制，系统的电压稳定性依赖于超级电容器，然而基于超级电容器的研发现状，在实际工程中很难找到与之匹配的器件；文献[42]构建了风电/光伏/制氢/储能的直流母线结构，采用直流母线电压信号 DBS(DC bus signaling)控制策略，并据此确定对应工作电压阈值以实现系统级协调控制，并针对各单元的变换器制定相应的协同控制策略，这种方式可以实现能量管理与协同控制技术的相互结合，在提升系统稳定性的同时提高新能源利用率。基于以上研究不难发现，未来基于功率型储能和能量型储能相互结合的直流母线结构将成为研究的重点，为了实现全生命周期运行最优，系统容量配置、日前/日内优化调度策略、实时协同控制需要统筹考虑。

在构建风光互补制氢系统方面，采取直流母线结构可以减少转换环节、避免交流系统频率失稳的问题，是未来的发展方向和现阶段学术研究的焦点。但受限于直流功率转换器件的研发和产业化进程，现阶段直流母线结构不具备大规模应用的可行性。在建的大型风光互补制氢系统大多采用交流母线形式，不计成本地配置储能并不现实，为了维持系统频率和电压的稳定性，系统无法真正脱离电网运行。

3　“绿氢工厂”技术体系

未来，随着新能源技术和氢能技术的进一步发展和融合，需要在现有制氢技术基础上，成系统、成体系地开展关键核心技术攻关研究，进而构成“绿氢工厂”技术体系。“绿氢工厂”技术体系中，仿真系统、规划辅助决策系统、能量管理系统等环节需要研发专业化的产品。本文梳理的相关产品和技术架构体系如图 6 所示。

3.1　电解水制氢装置特性研究

在电解水制氢装置方面，除了核心部件国产化、单机规模大型化，还需要深入研究光伏/风电制氢系统中，制氢装置的动态适应性和运行可靠性，效率与寿命的影响机理与提升技术；同时从整个系统自动化控制角度，深入研究电解槽控制特性模型(包括相应的辅助系统)，以及电网与电解槽之间的互适及控制逻辑关系。

3.2　绿氢供电技术

随着新能源制氢技术的发展，需要环境适应能力更强、功率输出范围更宽的新能源发电装备，新型开关磁阻发电机、双凸极结构风力发电机、N 型组件 TOPCon/HJT 及钙钛矿光伏发电技术，在经济性、适应性方面更适合与制氢系统结合，相关出力特性及与制氢装置的匹配特性需要提前研究；交、直流组网技术、储能选型与配置方式需要深入研究；尤其针对直流母线结构，功率型、能量型储能的选择与配置需要进一步论证，相应的控制策略结合协同控制方法有待深入研究；新能源与制氢系统构成的异质多能流系统，在离网、并网不上网、并网情况下，与电网之间的物理连接形式、控制逻辑关系和高效经济运行等问题需要深入研究；针对新能源电站和氢能负荷之间汇集与输送组网方案中涉及的核心转换设备，有待进一步明确需求和深入研究。

3.3　氢能负荷特性与一体化调控技术

在氢能需求方面，区域级、地区级、城市级氢能需求模型有待建立，不同应用场景(交通、市政、化工、冶金等)的典型氢能负荷曲线(全年、典型日)有待绘制；涵盖氢气缓存罐，高压氢气、液氢、天然气掺氢运输车(管道)、加氢站、氢能负荷的一体化氢能调控模型需要进一步构建；综合考量负荷需求、系统鲁棒特性的制氢系统最低功率输入限值有待论证，以便实现风光互补所发电能最大限度地转化为氢能。

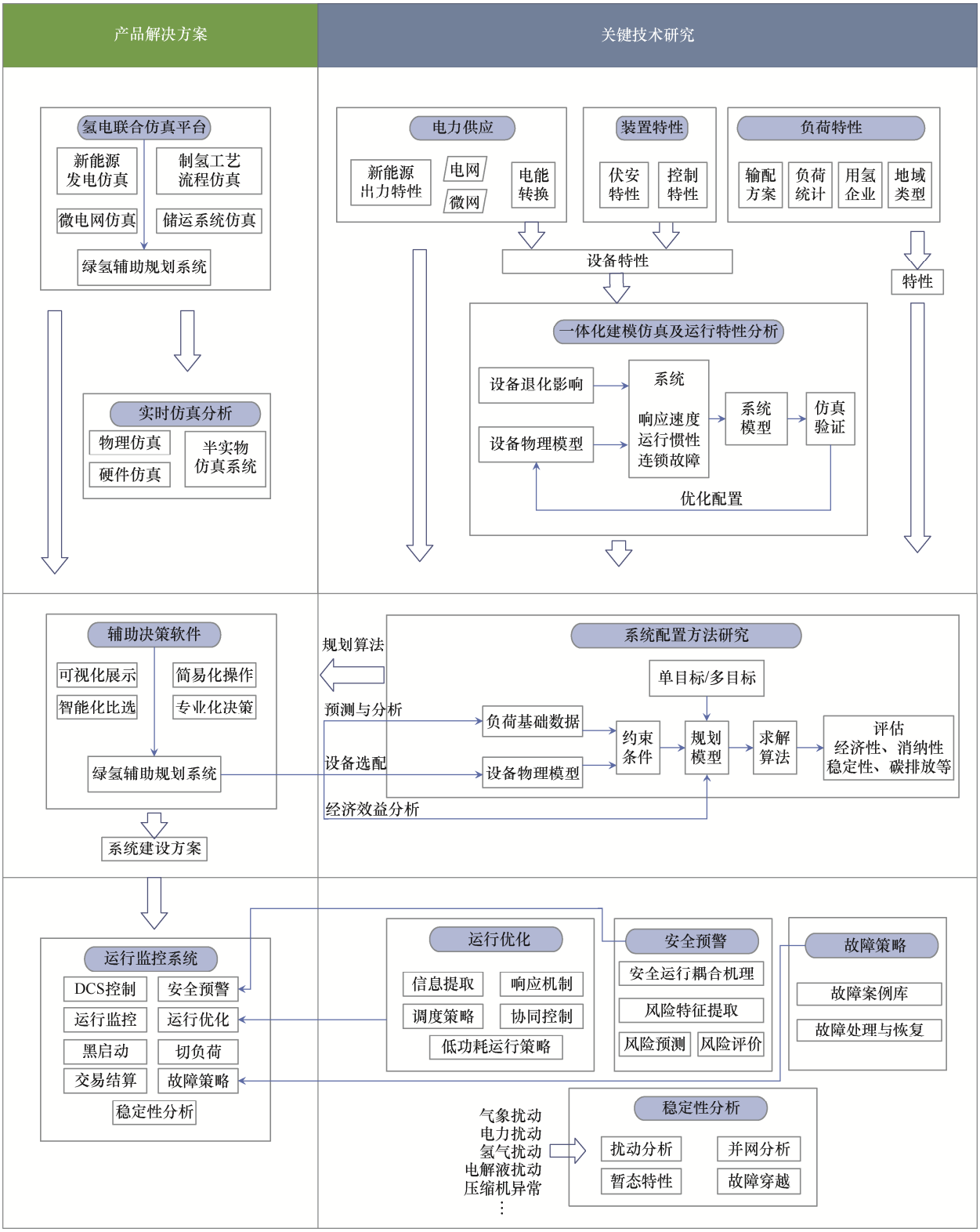


图 6 “绿氢工厂”技术架构体系

Fig. 6 Framework system of “green hydrogen plant” technology

3.4 绿氢仿真分析系统

在现有的综合能源仿真软件中，有部分软件含有氢能模块，但无法满足整个绿氢技术体系深入研究的需求。在大规模绿氢系统应用场景研究中，需

要针对能源大基地场景下绿氢生产的特点，针对绿电与绿氢在大空间范围下、大时间尺度下的耦合特性，在统一的模型框架下，建立涵盖新能源发电、储能系统、电解水制氢系统、储氢系统、运输及终端负荷的物理模型和经济模型，进而构建绿氢软件仿真系统和硬件仿真平台；通过仿真分析，确定绿氢系统的能耗情况，包括发电量、电力网络损耗、耗水量、产氢量、产氧量等相关主要数据，为后续系统规划、设备选型、工程设计、装置研发奠定理论基础。

3.5 系统配置策略及辅助规划系统

与常规制氢规划设计相比，新能源离网制氢系统规划设计过程中的首要任务是如何长期稳定运行，相应的规划策略需要进一步研究。如何在结合自然条件(风速和光照强度等)配置储能或采取其他提高系统自运行稳定性的措施，并兼顾经济性的情况下，将新能源制氢系统的离网运行能力设定在合理范围内是研究的重点。基于多层规划理论的新能源制氢系统规划体系有待构建；可以实现系统安全稳定运行、新能源全消纳、最优经济性的多目标函数有待建立，可以有效降低系统配置的复杂性，实现光伏、储能、制氢负荷等单元在时变状态下最优配置的求解方法有待研究。同时，还要具备资源分析、场址选择、设备选型、经济效益分析及投融资决策等功能。

3.6 绿氢系统调度策略

绿氢系统作为 1 个独立运行的异质能流管控系统，其系统调控模型和最优化调度方法有待研究。系统需要基于可再生资源数据、氢能负荷预测值、制氢系统的效率和状态，形成整个系统的并/离网切换策略、内部不同能流的调度策略。在具体调度策略方面，为了保证系统在安全稳定运行的前提下，实现新能源全额消纳、经济性最优等目标，需要基于不同的时间尺度，按照“场景生成—策略选择—滚动修正—协调控制”的优化运行方式，动态调整调度策略；基于风电−光伏−储能−氢能(电解槽+储氢+燃料电池)的系统结构，进一步研究耦合运行多时间尺度调控系统，系统可以针对“以电定氢”或“以氢定电”的工作模式，在日前/日内的时间尺度下，实现合理安排风机、光伏、储能和氢能设备出力，降低新能源出力不确定性对系统稳定性的影响；在实时的时间尺度下，实现利用储能配合氢能更好地平抑功率波动的效果。

3.7 绿氢系统稳定性

除了新能源制氢系统设备自身异常(电解液扰动、压缩机异常)情况引发的稳定性控制问题，在外界不同类型的扰动(气象扰动、电力扰动、氢气扰动)情况下，制氢系统的鲁棒控制有待研究。针对制氢系统的稳态、暂态控制技术，需要通过建立仿真模型，对启停机流程正确性、MPPT 控制效果、低电压穿越技术的可行性进行验证；针对系统的调频、调压能力，需要分析新能源发电出力波动特性和制氢过程中的耦合影响因素，进一步研究灵活组态的联合控制模式；同时，主动控制仿真模型有待建立，需要通过对不同惯量和阻尼下主动控制策略的动态响应特性分析，总结惯量和阻尼影响物理约束的机理，从底层电力电子设备快速响应、站内协调稳定、集中优化调度 3 个层面提升新能源离网制氢系统的运行性能。

3.8 新能源制氢系统安全分析

绿氢系统的风险评估机制有待建立。涵盖液位、压力、温度、氢中氧、氧中氢等制氢系统关键参数的监测预警技术体系有待建立；需要针对系统实时运行的安全状态、潜在安全隐患和故障发生机理及动态耦合过程，提出各种能流系统设备异常状态下的控制策略；整个制氢系统安全稳定运行的 2 道防线(自动保护系统、现场应急手动停止系统)有待研究和建立，故障发生后的局部调度和系统恢复策略有待研究，以确保故障后第一时间恢复系统运行，保障氢气持续供应。

3.9 新能源制氢 SCADA 系统

作为 1 个独立运行的异质多能流系统，“绿氢工厂”全状态监测与感知系统有待进一步研发，并在此基础上构建“绿氢工厂”的数字孪生系统，涵盖新能源发电系统、储能系统、电解水制氢系统、氢气储运系统等子系统；进一步可以集成调度控制

系统，实现并/离网状态下系统的最优化调度，制定光伏、风力发电出力计划，蓄电池充放电计划，电解槽运行控制计划；后续可以进一步研发绿氢、碳排放等交易及结算平台。

4 结论与展望

(1)制氢装置方面，AWE 技术工艺壁垒较低、材料成本低，是当前的主流产品，但 PEM 在与新能源匹配性能上更胜一筹；PEM 的不足在于质子交换膜等核心部件国产化水平低，催化剂贵金属材料昂贵，因此国内没有大规模应用；AEM 技术介于 AWE 和 PEM 之间，取双方之所长，有望成为主流装置。随着 SOE 技术的成熟，光热领域快速发展提供的中高温热源与其进一步融合，提升制氢的效率。

(2)针对新能源制氢系统，光伏制氢系统利用小时数较低(1 000 h 左右)，整个系统的设备利用率较低，度氢成本较高；风电制氢系统利用小时数大约是光伏制氢系统的 3 倍，但风机出力波动性较强，降低度氢成本的同时需要增加系统稳定性方面的投入；因此，在具备自然资源条件的情况下，构建风光互补制氢系统可以提高系统利用率、降低度氢成本。具体技术应用场景方面，并网型光伏间接耦合制氢是主流制氢方式，但随着大规模新能源并网和电力现货市场推进对电价造成的波动和冲击，对其盈利方式也产生了巨大的冲击；离网型光伏间接耦合制氢有望与光伏一体化建筑和微型能源网络技术相结合，在用户侧构建灵活多变的能源供应体系；并网型风电制氢将发挥长时间储能的作用，保障大规模新能源基地友好并网；离网型风电制氢技术可以应用于陆地和海上风电，构建脱离电网的能源生产和配送体系。

(3)针对风-光-氢-储综合制氢系统，小规模制氢系统暂时不具备经济性；在自然条件较好的地区，大规模风光制氢项目与化石能源制氢相比已经具备了经济性优势，但由于储能装置价格昂贵，为了维持系统稳定性需要大电网的支撑，相关制氢产业发展受到电网对新能源消纳能力的制约。未来，大规模离网型的风-光-氢-储制氢系统将成为绿氢生产的主要形式，成为安全高效能源体系构建的有效举措，成为实现“碳达峰、碳中和”目标的重要手段。因此，现阶段“绿氢工厂”技术体系的深入研究显得尤为重要。

(4)在热化学、电化学和生物制氢 3 种制氢方法中，传统的化石能源制氢技术属于热化学反应方式，正在逐步被新能源(光伏、风电、风光互补)制氢技术等电化学反应方式替代；但其他多能互补制氢技术和新兴可再生能源制氢技术同样值得高度关注，如结合海上风电、潮汐能、波浪能的综合能源制氢技术，以及利用微生物反应、藻类光合作用等技术的生物质制氢方式。

参考文献：

[1] Muradov N. Production of hydrogen from hydrocarbons [J]. Focus on Catalysts, 2011, 2011(5): 7.

[2] Chi Jun, Yu Hongmei. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2018, 39(3): 390-394.

[3] 张庚, 刘国金. 质子交换膜燃料电池输出电压稳定控制技术[J]. 电源学报, 2022, 20(1): 134-140.
Zhang Geng, Liu Guojin. Output voltage stability control technology for proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(1): 134-140. (in Chinese)

[4] Nasser M, Megahed T F, Ookawara S, et al. A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(58): 86994-87018.

[5] Motealleh B, Liu Zengcai, Masel R I, et al. Next-generation anion exchange membrane water electrolyzers operating for commercially relevant lifetimes [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(5): 3379-3386.

[6] 高清振, 潘道远, 黄胜洲, 等. 氢燃料电池扩散层温度场演变研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 130-140.
Gao Qingzhen, Pan Daoyuan, Huang Shengzhou, et al.

Study on temperature field evolution in hydrogen fuel cell diffusion layer [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 130-140. (in Chinese)

[7] 高国栋, 由宏新. 液体燃料(乙醇)在高温 SOFC 阳极反应的进展[J]. 电源技术学报, 2007, 5(3): 253-258.
Gao Guodong, You Hongxin. Reactions of ethanol on anode of high temperature solid oxide fuel cell [J]. Journal of Power Supply, 2007, 5(3): 253-258. (in Chinese)

[8] 钱尼信. 光伏制氢系统大功率降压型 DC/DC 变换器研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
Qian Nixin. Research on high power Buck DC/DC converter for photovoltaic-hydrogen production system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021. (in Chinese)

[9] 戴凡博. PEM 电解水制氢催化剂及直接耦合光伏发电系统建模研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Dai Fanbo. Study of catalyst in PEM water electrolysis and directly coupling photovoltaic system simulation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)

[10] Arriaga L G, Martínez W, Cano U, et al. Direct coupling of a solar-hydrogen system in Mexico [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2247-2252.

[11] Paul B, Andrews J. Optimal coupling of PV arrays to PEM electrolysers in solar-hydrogen systems for remote area power supply [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(2): 490-498.

[12] 刘业凤, 周明杰. 太阳能电解水制氢直接耦合连接技术[J]. 电源技术, 2013, 37(7): 1171-1173, 1187.
Liu Yefeng, Zhou Mingjie. Direct coupling of an electrolyser to a solar PV system for hydrogen generation [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(7): 1171-1173, 1187. (in Chinese)

[13] Maeda T, Ito H, Hasegawa Y, et al. Study on control method of the stand-alone direct-coupling photovoltaic-water electrolyzer [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(6): 4819-4828.

[14] 郭常青, 伊立其, 闫常峰, 等. 太阳能光伏-PEM 水电解制氢直接耦合系统优化[J]. 新能源进展, 2019, 7(3): 287-294.
Guo Changqing, Yi Liqi, Yan Changfeng, et al. Optimization of photovoltaic-PEM electrolyzer direct coupling systems [J]. Advances in New and Renewable Enengy, 2019, 7(3): 287-294. (in Chinese)

[15] 李军舟, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 具有动态调节特性的光伏制氢双阵列直接耦合系统优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1712-1720.
Li Junzhou, Zhao Jinbin, Zeng Zhiwei, et al. Optimization strategy of photovoltaic hydrogen production dual array direct coupling system with dynamic regulation characteristics [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1712-1720. (in Chinese)

[16] 谷雨. DCDC 变换器直流耦合光伏制氢方法探讨[J]. 科学技术创新, 2021(15): 165-167.
Gu Yu. Discussion on DC-coupled photovoltaic hydrogen production method of DCDC converter [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(15): 165-167. (in Chinese)

[17] 周黎英, 王玉荣, 王庆燕. 基于耦合电感的交错高降压比 DC/DC 制氢变换器[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6): 70-77.
Zhou Liying, Wang Yurong, Wang Qingyan. Interleaved high step-down DC/DC converter for hydrogen production based on coupling inductor [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 70-77. (in Chinese)

[18] 游梦然, 杨沛豪, 樊常亮. 多谐振变换器直流耦合光伏制氢研究[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 174-180.
You Mengran, Yang Peihao, Fan Changliang. Research on DC coupled photovoltaic hydrogen production with multi-resonant converter [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 174-180. (in Chinese)

[19] 郭小强, 魏玉鹏, 万燕鸣, 等. 新能源制氢电力电子变换器综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 185-199.
Guo Xiaoqiang, Wei Yupeng, Wan Yanming, et al. Review on power electronic converters for producing hydrogen from renewable energy sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 185-199. (in Chinese)

[20] Cano A, Jurado F, Sánchez H, et al. Sizing and energy management of a stand-alone PV/hydrogen/battery-based hybrid system [C]// International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Sorrento, Italy, 2012: 969-973.

[21] 蔡国伟, 孔令国, 彭龙, 等. 基于氢储能的主动型光伏发电系统建模与控制[J]. 太阳能学报, 2016, 37(10): 2451-2459.
Cai Guowei, Kong Lingguo, Peng Long, et al. Modeling and control of active PV generation system based on hydrogrn storage [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(10): 2451-2459. (in Chinese)

[22] Dahbi S, Aziz A, Messaoudi A, et al. Management of excess energy in a photovoltaic/grid system by production of clean hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(10): 5283-5299.

[23] Takahashi R, Kinoshita H, Murata T, et al. A cooperative control method for output power smoothing and hydrogen production by using variable speed wind generator [C]// 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan, Poland, 2008: 2337-2342.

[24] Muyeen S M, Takahashi R, Tamura J. Electrolyzer switching strategy for hydrogen generation from variable speed wind generator [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(5): 1171-1179.

[25] Zhou Tao, Francois B. Modeling and control design of hydrogen production process for an active hydrogen/wind hybrid power system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(1): 21-30.

[26] García Clúa J G, De Battista H, Mantz R J. Control of a grid-assisted wind-powered hydrogen production system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(11): 5786-5792.

[27] 蔡国伟, 陈冲, 孔令国, 等. 风电/制氢/燃料电池/超级电容器混合系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 84-94.
Cai Guowei, Chen Chong, Kong Lingguo, et al. Control of hybrid system of wind/hydrogen/fuel cell/supercarpacitor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 84-94. (in Chinese)

[28] 邓浩, 陈洁, 焦东东, 等. 风氢耦合并网系统能量管理控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 99-106.
Deng Hao, Chen Jie, Jiao Dongdong, et al. Control strategy for energy management of hybrid grid-connected system of wind and hydrogen [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 99-106. (in Chinese)

[29] Yan Zhuoyong, Gu Weidong. Research on integrated system of non-grid-connected wind power and water-electrolytic hydrogen production [C]// 2010 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference. Nanjing, China, 2010: 1-4.

[30] Gandía L M, Oroz R, Ursúa A, et al. Renewable hydrogen production: performance of an alkaline water electrolyzer working under emulated wind conditions [J]. Energy & Fuels, 2007, 21(3): 1699-1706.

[31] 宁楠. 水电解制氢装置宽功率波动适应性研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(6): 133-136.
Ning Nan. Research on hydrogen generation system by water electrolysis under wide power fluctuation [J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(6): 133-136. (in Chinese)

[32] 颜卓勇, 孔祥威. 非并网风电电解水制氢系统及应用研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(3): 30-34.
Yan Zhuoyong, Kong Xiangwei. Research on non-grid-connected wind power water-electrolytic hydrogen production system and its applications [J]. Engineering Sciences, 2015, 17(3): 30-34. (in Chinese)

[33] 陈建业. 非并网风电制氢系统建模与控制研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2022.
Chen Jianye. Research on modeling and control of non-grid-connected wind power hydrogen production system [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[34] 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)

[35] Hong Zhenpeng, Wei Zixuan, Han Xiaojuan. Optimization scheduling control strategy of wind-hydrogen system considering hydrogen production efficiency [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 47: 103609.

[36] 李文磊. 风光互补发电储能制氢系统研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
Li Wenlei. Research on hydrogen production system of

wind-solar complementary power generation [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019. (in Chinese)

[37] 孔令国, 蔡国伟, 李龙飞, 等. 风光氢综合能源系统在线能量调控策略与实验平台搭建[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3371-3384.
Kong Lingguo, Cai Guowei, Li Longfei, et al. Online energy control strategy and experimental platform of integrated energy system of wind, photovoltaic and hydrogen [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3371-3384. (in Chinese)

[38] 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.
Liao Yuanxu, Dong Yingrui, Sun Xiang, et al. Research on comprehensive energy management platform for hydrogen production from renewable energy [J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(4): 47-52. (in Chinese)

[39] Trifkovic M, Sheikhzadeh M, Nigim K, et al. Modeling and control of a renewable hybrid energy system with hydrogen storage [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(1): 169-179.

[40] Torreglosa J P, García P, Fernández L M, et al. Energy dispatching based on predictive controller of an off-grid wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system [J]. Renewable Energy, 2015, 74: 326-336.

[41] 蔡国伟, 陈冲, 孔令国, 等. 风电/光伏/制氢/超级电容器并网系统建模与控制[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2982-2990.
Cai Guowei, Chen Chong, Kong Lingguo, et al. Modeling and control of grid-connected system of wind/PV/electrolyzer and SC [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2982-2990. (in Chinese)

[42] 杨文强, 邢小文, 覃姝仪, 等. 大规模风/光互补制储氢系统协调控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(12): 24-27, 55.
Yang Wenqiang, Xing Xiaowen, Qin Shuyi, et al. Study of coordination control strategy of large-scale wind/PV hybrid hydrogen energy system [J]. Power Electronics, 2020, 54(12): 24-27, 55. (in Chinese)



孙浩

作者简介：

孙浩(1982—)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，博士研究生，高级工程师。研究方向：综合智慧能源，新能源技术及装备。E-mail：2007sunhao@163.com。

吴维宁(1964—)，男，硕士，正高级工程师。研究方向：电力系统及其自动化，电工理论与新技术。E-mail：wuweining2022@163.com。

陈丽杰(1983—)，女，博士，高级工程师。研究方向：氢能装备材料性能优化和应用技术。E-mail：lijie.chen@cimc.com。

邢作霞(1976—)，女，博士，教授。研究方向：新能源控制与并网技术，多能源互补与储能消纳技术，海上风电机组柔性控制技术。E-mail：xingzuox@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)