

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.07.002

可再生能源制氢系统技术分析与展望

陈雨鸽, 李智诚, 张抒凌, 张伟骏, 林文彬, 李建平

(国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350007)

摘要: 在中国“双碳”目标的驱动下,可再生能源制氢系统将成为推动能源结构向低碳化、清洁化转型的关键技术路线。该文系统梳理了可再生能源制氢系统的核心架构与关键技术的发展现状,重点分析了碱性电解、质子交换膜电解等主流电解水制氢方法及其适用场景;基于系统的运行特性,探讨了制氢变换器的设计与优化方法,进一步从气体管理、水热调控、功率调节等维度,对比分析了多种运行控制策略的适应性及技术瓶颈;最后,总结了可再生能源制氢系统发展面临的挑战,以推动可再生能源制氢系统从技术验证向规模化商业应用跨越,为中国能源系统的转型提供理论支撑。

关键词: 可再生能源; 氢能; 制氢变换器; 运行控制策略

Technical Analysis and Outlook of Renewable Energy-based Hydrogen Production Systems

CHEN Yuge, LI Zhicheng, ZHANG Shuling, ZHANG Weijun, LIN Wenbin, LI Jianping

(State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Driven by “Dual Carbon” goals in China, renewable energy-based hydrogen production systems will become a key technological pathway for promoting the transformation of the energy structure towards low-carbon and clean development. In this paper, the development status of the core architecture and key technologies of renewable energy-based hydrogen production systems is systematically reviewed, with a focus on the mainstream electrolysis methods for such hydrogen production as alkaline electrolysis and proton exchange membrane electrolysis as well as their applicable scenarios. Based on the operational characteristics of the system, the design and optimization methods for hydrogen production converters are explored. Furthermore, the adaptability and technical bottlenecks of various operational control strategies are compared and analyzed from the perspectives of gas management, thermal and water regulation, and power modulation. Finally, the challenges faced by the development of renewable energy-based hydrogen production systems are summarized in order to promote the transition of such systems from technical verification to large-scale commercial application and to provide theoretical support for the transformation of China's energy system.

Key words: renewable energy; hydrogen energy; hydrogen converter; operation control strategy

0 引言

在全球能源结构向低碳化、清洁化转型的背景下,氢能因其清洁、高能量密度以及大规模跨季节存储等优势为解决目前电力系统面临的平衡支持能力不足、调控缺乏灵活性等问题提供了新思路,被视为实现“双碳”目标的核心能源载体之一^[1-2]。可再生能源制氢系统通过耦合风力发电与光伏发

电技术,将可再生能源转化为绿氢,不仅能够有效缓解风电、光伏的间歇性与波动性对电网的冲击,还可通过氢能在交通燃料、工业原料、电力调峰等领域的多元化应用推动能源系统的深度脱碳^[3]。

近年来,国家高度重视氢能发展,出台了多项政策,不断加大对氢储能装备研制和可再生能源制氢系统的扶持力度。2022年3月国家发改委和国家能源局共同印发了《氢能产业发展中长期规划

收稿日期:2025-12-12; 修回日期:2026-02-11

基金项目:国网福建省电力有限公司科技项目(521304250003)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd.(521304250003).

(2021—2035年)》明确氢能是未来国家能源体系的重要组成部分,到2035年形成氢能产业体系,构建涵盖交通、储能、工业等多元应用生态^[4]。2025年1月实施的《中华人民共和国能源法》首次将氢能纳入国家能源管理体系,氢能制—储—输—用全产业链被纳入能源法框架,推动上中下游协同创新^[5]。在地方层面,北京市2021年8月出台《北京市氢能产业发展实施方案(2021—2025年)》推动可再生能源制氢,在京南、京北布局风光制氢基地,与内蒙古合作建设“风光制氢+长输管线”项目,2025年绿氢利用比例目标超60%,预计减少碳排放200万吨^[6-7]。

可再生能源制氢系统控制策略对于能源管理、功率输出以及制氢系统定制化设计具有关键意义。先进的制氢电源和控制策略能够有效管理能量流动和转换过程,优化能源利用效率,并提升可再生能源制氢系统的效率和稳定性^[8-10]。制氢电源优化设计还可助力优化电解槽对风光发电间歇性输入的适应性,实现对系统运行的精准控制,提高响应速度和稳定性。在生产预测方面,控制策略研究有助于理解和预测氢气产量的变化,为制定有效的生产和资源分配计划提供依据^[11]。可再生能源制氢系统的控制策略具有高度复杂性和多样性,涉及众多因素和研究领域,针对不同研究领域的策略选择仍具挑战性,先进控制策略的应用可推动制氢系统规模化与智能化发展,为推动可再生能源电解技术的发展奠定坚实基础^[12-14]。

在现有可再生能源制氢系统研究中,对于其发展路径和其规模化应用还有待探索与挖掘,缺乏系统性的梳理和总结,存在多重挑战:①关键技术成熟度不足,风光发电的宽范围波动输入与电解槽高效稳定运行之间的矛盾;②大功率、模块化的制氢变换器需求日益增加,但高功率密度下的热管理与设备成本制约其规模化应用;③系统运行控制策略

需应对电解槽的电—热—气—水多维度强耦合特性和多类型设备运行特性差异。这些瓶颈问题亟待突破,以实现可再生能源制氢系统从技术验证向规模化应用的跨越。基于此,文中首先介绍了可再生能源制氢系统的基本结构和系统整体控制架构,分析了不同电解水制氢技术差异;其次,讨论了制氢变换器和运行控制策略的研究现状;最后,梳理了风光制氢系统在政策、系统经济性、市场交易模式和控制关键技术方面面临的主要挑战。

1 可再生能源制氢系统现状

1.1 系统结构

可再生能源制氢系统主要由发电单元、电解水制氢单元以及气体处理与储氢单元组成^[15]。发电单元通过风力涡轮机和光伏阵列将风能和太阳能转化为直流或交流电能,经变流器与并网/离网系统连接;电解水制氢单元是风光制氢系统的核心模块,通过电化学反应将水分解为高纯度氢气和氧气,目前主流的技术路线有4种:质子交换膜电解制氢(proton exchange membrane water electrolysis, PEMWE)、碱性电解制氢(alkaline water electrolysis, AWE)、高温固体氧化物电解制氢(solid oxide electrolysis, SOE)电解槽以及阴离子交换膜电解制氢(anion exchange membrane water electrolysis, AEMWE),4种电解水制氢技术对比见表1^[16-18]。其中AWE电解技术具有稳定性强、成本低以及单槽电解制氢量大等优势,是目前技术最成熟、应用最广泛的电解技术,PEM电解技术凭借快速动态响应和宽负荷调节范围展现出更优的可再生能源适应性,二者已实现兆瓦级别的系统集成,被广泛应用于工业绿氢生产;储氢单元采用高压气态、低温液态或固态储氢技术,实现安全高效储存,并为后续管道、罐车运输提供稳定氢源^[19-21]。

表1 不同电解水制氢技术对比

Table 1 Comparison of different hydrogen production technologies by water electrolysis

参数	碱性电解	质子交换膜电解	阴离子交换膜电解	固体氧化物电解
工作温度/℃	60~80	50~90	50~90	800~1 000
电流密度/(A·cm ⁻²)	0.2~0.5	1.0~3.0	0.8~2.5	0.3~2.0
电压/V	1.4~3.0	1.4~2.5	1.4~2.0	1.0~1.5
电解效率/%	59~70	65~82	60~75	85~100
使用寿命/(10 ³ h)	60~120	60~100	10~30	8~20
功率范围/%	10~100	0~160	0~100	0~100
压力范围/bar	1~30	1~350	—	1~25
应用阶段	大规模应用	商业化初期	实验室阶段	示范阶段

风光制氢系统根据是否接入电网可分为并网、离网两种运行模式:离网型系统通过风光发电直接为本地负荷供电,富余电能用于电解槽制取氢气储存于储氢罐,作为工业原料或能源载体,通过氢气运输技术,服务于多个高碳排放领域的脱碳需求,该系统多应用于海岛、矿区等无电网覆盖场景,具有投资成本低、结构简单的特点,福建兴化湾海上风电海水制氢项目“东福一号”已验证了海水无淡化原位直接制氢的可行性^[22]。并网型系统将风光发电与电网深度耦合,优先满足电网调度的负荷需求,当发电量超出电网消纳能力时启动电解槽将过剩电能转化为氢气储存,通过氢能载体实现跨时段能量转移,利用电网基础设施提升可再生能源消纳

率,但需解决电解槽与电网协同调度的动态匹配、多能流耦合系统的稳定性控制以及氢电双向转换效率优化等技术经济性问题,目前仍处于示范验证阶段,尚未形成标准化商业运营模式^[23]。

1.2 系统控制架构

除了系统主要结构之外,风光制氢系统中含有3个子系统,包括气体管理系统、水管理系统、热管理系统。通过整合风光制氢系统的各个控制系统,可以实现对多个关键参数的同时调节,以维持系统的高效运行^[24]。包含温度控制、压力控制、液位控制和流速控制的系统整体控制架构见图1。各子系统的作用如下所述。

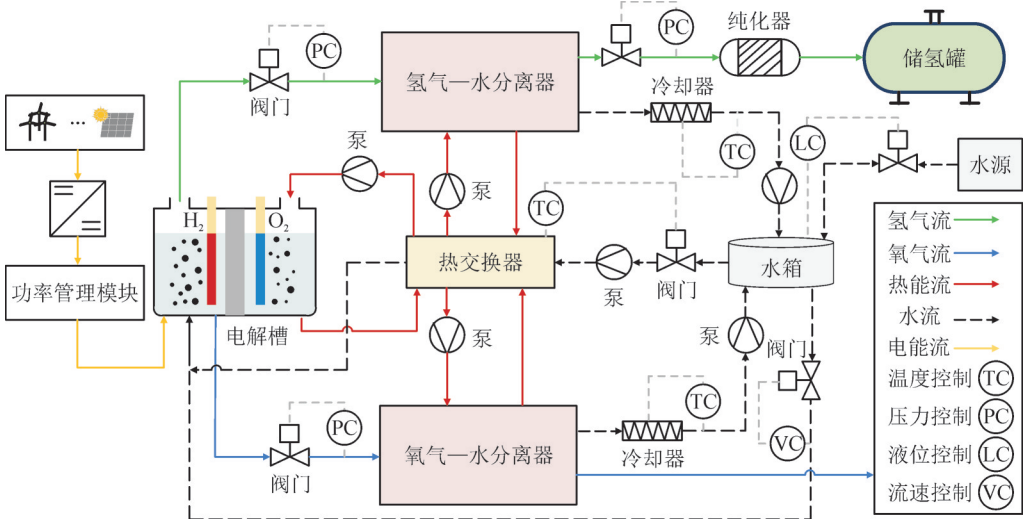


图1 可再生能源制氢系统结构图

Fig. 1 Renewable energy hydrogen generation system diagram

1.2.1 气体管理系统

在风光制氢系统中,气体管理的核心任务包括:确保电解水制氢过程中产生的高纯度氢气和氧气的有效分离、收集与安全排放,同时维持电解槽内部压力平衡并优化系统效率^[25]。确保氢氧分离至关重要,气体管理系统通过多孔扩散层和流道设计引导阴极产生的氢气和阳极产生的氧气分别沿特定路径传输,以防止潜在的混合反应或爆炸风险^[26]。在气体纯化方面,子系统通过气液分离装置去除产物气体中夹带的液态水及离子杂质。同样,系统的压力管理对维持操作稳定性和效率具有关键作用。精确的压力控制不仅有助于优化反应速率和流动效率,还能防止水在不同工况下发生状态变化,维持特定的压力阈值可确保液态水持续供应至阳极侧,从而保障电解过程的高效持续运行^[27]。这种对气体纯度和压力控制的复杂平衡,凸显了开发先进

材料和智能控制策略对系统性能和安全性优化的必要性。

1.2.2 水管理系统

维持电解槽最佳的湿度水平至关重要,这不仅能够提高电解质的导电性、增强电解质的稳定性,还能防止脱水。但湿度水平必须保持动态的平衡,避免因水分积累过多而导致水浸和极化损失等问题^[28]。此外,水管理通常与气体管理和热管理紧密耦合。例如,由于在较低的空气流速下,空气中水分的传质速率会下降,导致电解槽发生水浸现象;同样,低温会因蒸发速率下降而加剧水浸^[29]。因此,高效的水管理系统不仅需要缓解水浸问题,还需维持电解质的最佳湿度,从而提升系统电解水制氢性能。

以PEMWE为例,维持质子交换膜的最佳湿润水平对于防止因水欠饱和或水浸导致的性能下降至关重要^[30]。水欠饱和会降低质子导电性,进而影

响整体电化学性能和效率;而水浸则会阻断气体扩散路径,最终降低系统效率。同时,高效的热量消散主要依赖水流,以应对系统电解水过程中产生的大量热能^[31]。若热管理不足,温度升高会增加气体内水分的体积分数,从而影响整体系统效率,并可能对膜和其他关键组件造成损害。

1.2.3 热管理系统

电解水制氢过程本质上是放热反应,会产生大量热量,热管理系统需精确调控电解槽内部温度与热量传递过程,将运行温度维持在最佳范围内^[32]。温度调节对确保电解质的结构完整性和功能稳定性至关重要,同时影响系统整体效率和寿命。电解质需在特定温度范围内运行,以维持导电性,同时保持其机械强度和化学稳定性。过热可能导致其脱水,降低离子导电性并引发电解质失效;其次,温度调节直接影响电解水制氢系统的效率和寿命,高温会加速电解质和催化剂的降解,导致系统性能随时间下降。

2 风光制氢系统控制

当前关于风光制氢系统控制方法的研究涵盖了多个方面,包括从传统控制器、控制策略的优化到先进技术的探索,在系统气体管理、水管理、热管理、输出功率调节等多方面提供可靠技术支撑。传统控制策略经过严格的理论验证,并在实际应用中得到广泛推广,当前研究通常聚焦于进一步优化这些策略,以提升电解水制氢的性能与效率。与此同时,对开发更复杂的控制方法的研究日益增多,这些策略有望显著提升系统性能^[33]。尽管目前仍处于实际应用的初期阶段,但其未来在风光制氢技术领域展现出巨大的潜力。本节聚焦于制氢变换器和控制策略两方面,对风光制氢系统控制研究进行综述。

2.1 制氢变换器

制氢变换器是电解水制氢过程的关键环节,太阳能和风能等可再生能源分别以波动的直流电和交流电的形式发电,电解槽需要稳定的电压和特定电流特性以维持高效运行状态,凸显了直流一直流(DC-DC)在高效可靠地连接可再生能源与电解过程中的核心作用,DC-DC变换器对于将发电单元生产的直流电精细调节至电解槽所需的精确水平至关重要^[34]。然而,制氢变换器中的开关操作会引入输出电流波动,需要通过拓扑结构和控制策略等方面研究以减少纹波对制氢系统效率和电能质量的影响。

为减少能量损耗,电解槽需要在低压条件下运行。在制氢系统中,电解槽通常用串联阵列的形式配置以提升氢气产量,会导致电解槽阵列总电压升高,因此在电解槽输入端进行高效的降压DC-DC转换至关重要,需要满足以下基本要求:高能量转换效率、低电磁干扰、低电流波动、宽输入电压范围以及功率开关故障情况下具有可靠性^[35],见图2。

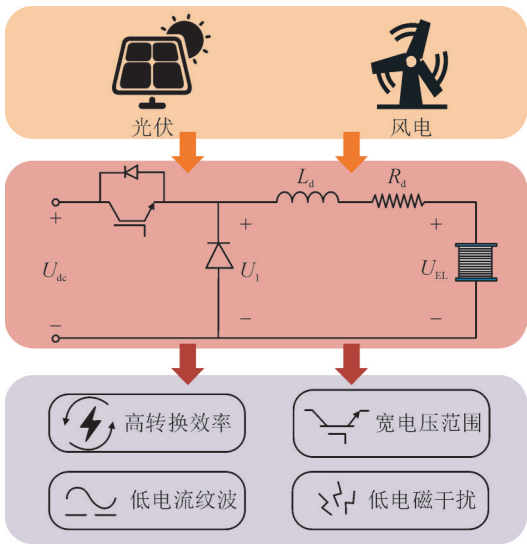


图2 制氢变换器基本要求

Fig. 2 Basic requirements for hydrogen converters

根据拓扑结构,DC-DC变换器主要可划分为隔离型和非隔离型2大类,其分类见图3。

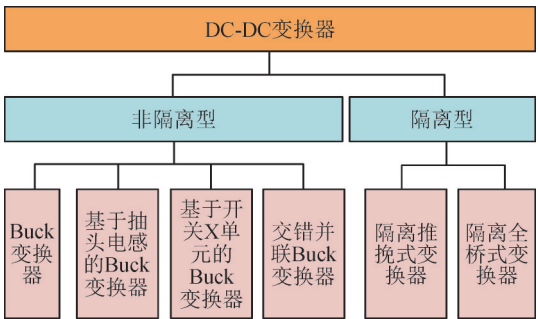


图3 用于制氢的DC-DC变换器类型

Fig. 3 Type of DC-DC converter for hydrogen generation

其中,交错式降压变换器(interleaved buck converter, IBC)因其高功率密度而成为制氢变换器的重要拓扑结构,通过多相位的交错开关控制,输入和输出电流纹波显著降低,从而减少电解槽电极的应力,延长寿命并提升制氢效率,其拓扑结构见图4。IBC由N个并联的降压单元构成,将总电流均分至各相位,有效降低单个开关器件的导通损耗与热应力,均匀的热分布进一步提升了系统可靠性,适合风光能源输入波动下长时间高功率运行。此外,多相位设计支持功率等级的模块化扩展,通过增加并联相位即可提升输出容量,适应从小型分布

式制氢到大规模集中式系统的需求,同时,单相故障时其余相位仍可降额运行,增强系统容错性。对IBC基本电路的改进可以扩展其转换比范围并提高效率,文[36]提出一种改进的双支路交错式降压变换器,在串联路径中集成两个主动开关,并引入一个耦合电容,使得在占空比低于0.5的情况下,相比传统IBC能以更高的占空比实现更低的输出电压。

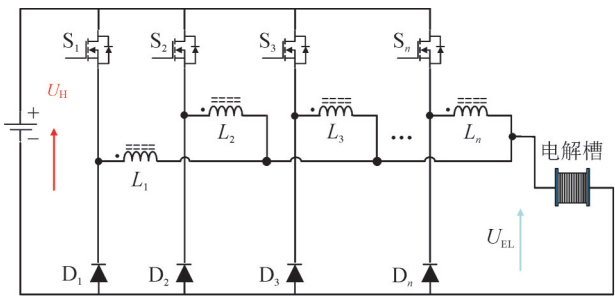


图4 交错式降压变换器
Fig. 4 Interleaved buck converter

除交错式降压变换器之外,其他变换器拓扑在电解槽应用中同样具有优势,隔离型拓扑通过高频变压器实现输入与输出的电气隔离,避免电解槽侧因漏电、短路或绝缘失效导致的直流母线故障反向冲击可再生能源发电单元,显著提升系统安全性。其直流电压增益与开关占空比无关,从而允许元件按最优占空比设计,以最小化电流或电压应力^[37]。同时,通过调整隔离变压器参数,同一变换器可支持碱性、PEM、SOEC等电解技术对电压、电流的不同要求。隔离型变换器可通过半桥(half-bridge converter, HBC)或全桥(full-bridge converter, FBC)拓扑实现,其拓扑图见图5、6。FBC采用4个开关管组成的对称桥臂,通过移相控制或谐振调制实现更高的功率密度与变压器利用率,对系统输入电压波动的适应性更强,通过调节占空比和移相角度,可覆盖更宽的风光输入范围,适用于可再生能源、碱性电解槽等高功率需求的应用场景。相比之下,HBC具有结构简单、成本低和较低的控制复杂度等优点,通过两个开关管和平平衡电容实现电气隔离,适合中低功率制氢场景。

2.2 制氢系统控制策略

制氢系统控制策略研究通常分为内部控制与功率控制,分别聚焦于装置内部过程优化及外部能源系统协同,内部控制通过实时调节电解槽温度、压力、电解质浓度、电流密度等内部关键参数以维持最佳电化学工况,功率控制则侧重协调电解槽与可再生能源、电网等外部能源供给的功率交互,二者协同保障电解系统高效、稳定运行。

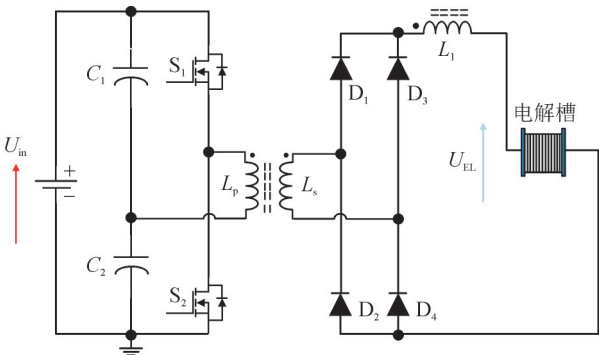


图5 半桥式隔离降压变换器
Fig. 5 Half-bridge isolated buck converter

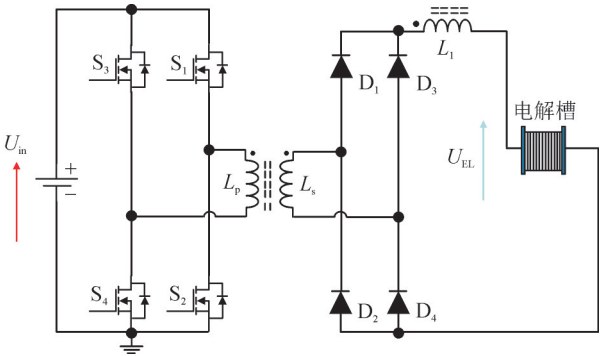


图6 全桥式隔离降压变换器
Fig. 6 Full-bridge isolated buck converter

2.2.1 比例—积分—微分控制

比例—积分—微分 (proportional - integral - derivative, PID)控制器具有结构简单、参数易于调整且对多数非线性系统具有良好控制效果等特点,在电解槽温度控制、电流密度调节、设备压力维持等关键环节得到广泛应用,其控制框图见图7,具体的表达式为

$$y_{valve} = k_p e_t + k_i \int e_t dt + k_d \frac{de_t}{dt} \tag{1}$$

式(1)中: k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例项、积分项、微分项的系数; e_t 为设定值与电解槽温度之间的误差。

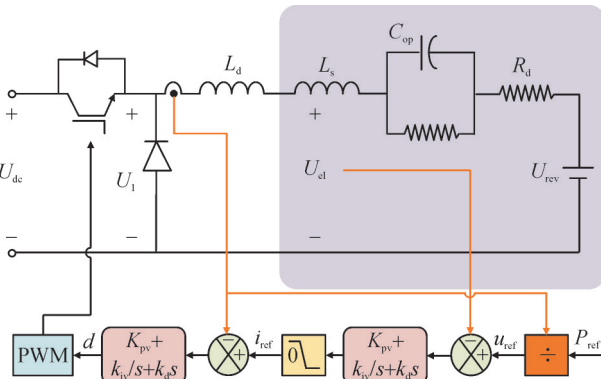


图7 用于电解槽的PID控制框图
Fig. 7 Block diagram of PID control for electrolyzer

温度控制对于确保电解槽电解质的结构完整性、功能稳定性,以及系统整体效率和使用寿命至

关重要,电解水制氢过程会产生大量热量,需要热管理系统高效地散发这些热量,以将运行温度维持在最优范围内,过高或过低的温度均可能损害聚合物电解质的结构与功能^[38]。在工业电解装置中,冷却系统通常采用PID温度控制器调节冷却水流量,以维持设定温度水平。文[39]建立含时间延迟的电堆、分离器、冷却盘管三阶热力学模型,并定义温度变化量和调节时间为性能指标,构建优化模型求解最优PID参数,平衡控制速度与安全性,并使系统效率提升1%。在电解槽运行过程中,其动态特性受电解质电导率、电极极化电压和槽电压波动等多重因素影响。文[40]提出以温度超调量和调节时间为目标的PID参数整定策略,结合根轨迹分析确定稳定参数区域,结果表明,该方法较齐格勒-尼科尔斯法调节时间缩短44%,动态响应速度提升显著,并将温度波动控制在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。文[41]设计PI控制器用于管理冷却液阀门,实现精细调节冷却液进水量,并实时监测电解槽各回路的温度波动情况,保证系统热性能与电解槽运行温度稳定。电流密度的精确调节是维持电解水制氢效率、保障电极寿命及优化能源消耗的关键,其受到电解质电导率、电极极化电压和槽电压波动等多种因素的影响。文[42-44]通过PID控制器设计进行电流密度的精准跟踪、纹波抑制、动态适应以及均衡分配,有效提升了电解槽运行的稳定性、效率及寿命,使其更加适用于风电、光伏等可再生能源输入的波动场景。在压力控制上,文[45]设计PID控制器提升可再生能源利用率,提出了基于压力与碱液流量的双变量控制方法,并通过分级启动与功率分配,实现风电波动下的高效响应。文[46]建立了适用于碱性、质子交换膜电解技术的统一控制系统,设计电压-温度PID控制器实现电解槽输入电压和运行温度稳定,使系统能量利用率提升至90%以上。

2.2.2 滑膜控制

滑模控制(sliding mode control, SMC)通过设计不连续控制律驱动系统状态轨迹强制收敛至预设的滑模面,并在滑模面上维持滑动运动以实现鲁棒控制,其运行轨迹见图8。因其强抗干扰能力和对参数不确定性的不敏感性,在制氢系统控制中得到应用。SMC的主要优势为控制器设计简单,够将系统的状态从任意初始位置引导到平衡位置并且一旦进入滑动模态就不会受到参数变化或外部扰动的影响,无需精确的系统建模。文[47]结合滑模控制与状态观测器,解决电解槽双层电容电压难以直接测量的问题,并实现三相交错电感电流的均衡分

配,延长电解槽的使用寿命。风光发电的波动性会导致制氢系统能量供应不稳定,需要通过系统内各设备协调运行实现最大化氢气生产。文[48]设计了双层控制结构并提出了一种二阶超扭曲滑模控制方法,上层监督控制负责整个系统的运行,下层滑膜控制调节电解槽的运行,将电解槽的实际输出功率强制收敛至上层设定的功率参考值,减小输入功率波动对系统制氢的影响。针对制氢系统运行时负载动态变化,存在响应延迟大、动态性能不足,氢气流量控制困难的问题,文[49]考虑了PEM电解槽的模电阻和激活损耗,通过滑膜控制调节变换器占空比改变输出电流,以达到控制电解槽氢气流量的效果。

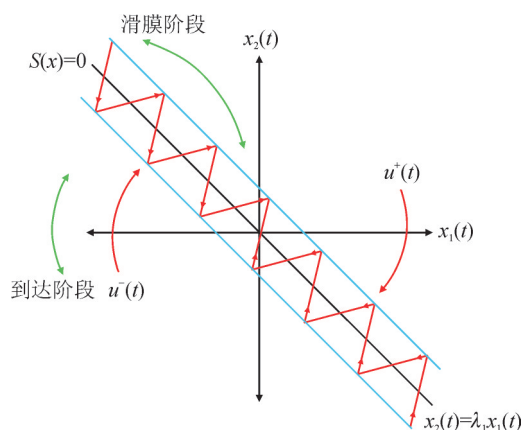


图8 滑膜控制运行轨迹

Fig. 8 Sliding control running trajectory

2.2.3 模型预测控制

模型预测控制(model predictive control, MPC)通过滚动优化与反馈校正机制实现对多约束条件下风光制氢系统动态行为的精确控制,提升系统多变量耦合、强非线性和复杂时变特性的综合调控能力,其控制框图见图9,具体的MPC表达式为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Dd(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: k 为采样时间; A 、 B 、 C 、 D 为具有适当维度的矩阵; x 、 y 、 u 、 d 为模型状态、测量输出、控制输入、扰动。

$$\begin{cases} x_{\text{elz}} = [\delta N_{\text{O}_2}^a, \delta N_{\text{H}_2\text{O}}^a, \delta N_{\text{H}_2}^c, \delta N_{\text{H}_2\text{O}}^c]^T \\ y_{\text{elz}} = [\delta P_{\text{elz}}, \delta V_{\text{elz}}, \delta N_{\text{H}_2}, \delta p_{\text{H}_2}]^T \\ u_{\text{elz}} = [\delta I_{\text{elz}}] \\ d_{\text{elz}} = [\delta T_{\text{elz}}] \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: δ 为偏差值; a 和 c 分别对应电解槽的阳极和阴极; P_{elz} 为电解槽的制氢功率。

在制氢系统中由于可再生能源存在波动特性,MPC通过构建涵盖能源供给、能量转换与存储的全系统动态模型,并基于滚动优化平衡可再生能源波

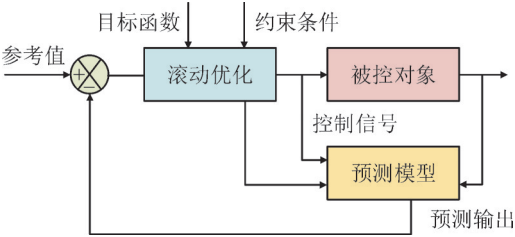


图9 模型预测控制框图

Fig. 9 Model predictive control block diagram

动性与制氢设备的动态响应特性,多时间尺度优化、动态约束处理与分布式协同策略,实现风力发电机组、光伏阵列、电解槽、储能装置及电力转换系统的协调控制。文[50]针对包含PEM电解槽与ALK电解槽的混合制氢系统,设计了适用于高比例风电孤岛微电网的MPC控制器,在满足电解槽功率约束的同时,将系统频率偏差降低25%,调节时间缩短80%,显著提升频率稳定性,实现可再生能源灵活消纳与系统经济性的平衡。文[51]提出分布式显式模型预测控制策略(distributed explicit model predictive control, DeMPC)实现包含光伏模块、燃料电池和电解槽的微电网能量优化管理,提升了母线电压的稳定性和系统抗干扰能力。在运行温度控制和维持氢气纯度上,MPC可以实现与PID控制类似的效果。文[52]通过离线线性化模型在多个稳态工作点构建参数可变模型,在线根据负荷数据进行求解,实现电解槽冷却水阀门开度调节,减小温度波动和系统制氢效率,与传统PID控制器相比,克服了依赖实时误差反馈的滞后性。MPC可基于实时电价、可再生能源出力及氢气需求预测,滚动优化电解槽的启停状态、电流密度和温度等参数,以最小化运行成本对制氢系统经济模型进行优化。文[53]结合产氢率与电解槽功率和温度的非线性关系对电解槽模型进行高精度拟合,并提出二阶段随机MPC策略,结合场景分解法和随机优化,在考虑光伏出力和氢负荷概率分布的前提下,实现系统总净成本最小化。此外,风光制氢系统的输入电流可作为决策变量实现功率输出控制,文[54]提出基于隐式MPC的控制策略,将启停次数、功率变化率和系统运行成本纳入统一优化框架,通过权重调整实现对电解槽的功率调节,能够快速有效地计算功率管理的最优设定点。

2.2.4 模糊控制

模糊控制可以构建具有自适应能力的模糊逻辑规则库,有效处理可再生能源输入的高度不确定性与电解槽的非线性动态特性,无需依赖精确数学模型即可实现对多变量耦合系统的实时优化控制,

其控制框图见图10。针对光伏、风电功率的随机波动,模糊控制器通过动态调整隶属度函数及推理规则,平滑制氢功率输出,维持电解槽运行电压、电流的稳定。文[55]采用三角形和梯形隶属函数设计模糊控制器与串联谐振变换器结合,确保MOSFET在零电压开关条件下工作,降低开关损耗和电磁干扰,同时精确调节输出电流以匹配氢气生产所需的电流值,保持制氢系统产氢量稳定;文[56]在模糊控制的基础上添加低通滤波器滤除高频波动,并采用多目标鲸鱼优化算法优化隶属函数和滤波器截止频率,平衡氢气生产和电解槽功率波动,延长了系统寿命。模糊控制可以嵌入多级变换器的闭环控制层,形成分层协同控制架构,在上层进行模糊决策,生成系统内各设备的功率分配权重系数,并将权重系数转换为具体控制指令后,由底层变换器执行。文[57]通过光伏功率和储能荷电状态的实时反馈引入模糊控制器并考虑电解槽功率约束,调节电解槽和储能设备的功率参考值,实现系统内各设备的协同运行。此外,可以结合模型预测、神经网络等预测算法优化制氢系统中的不同时间尺度的能量分配策略,降低制氢能耗。

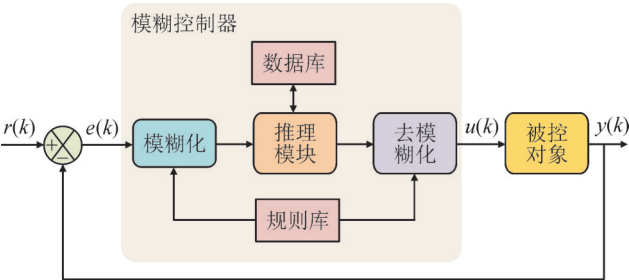


图10 模糊逻辑控制框图

Fig. 10 Fuzzy logic control block diagram

2.2.5 神经网络控制

在系统实际运行过程中,电解槽内部的电化学反应涉及电流密度、温度、压力以及电解质浓度等多种非线性参数,人工神经网络(artificial neural network, ANN)模拟人类信息处理能力,通过训练数据学习复杂非线性系统的输入—输出关系,能够快速响应可再生能源波动及负载变化,可应用于制氢系统故障分类、聚类分析、模式识别和预测建模。ANN的结构通常包括输入层、若干隐藏层、输出层,隐藏层中的神经元使网络能够识别输入参数与输出参数之间的复杂关联,其结构见图11。

在制氢系统DC-DC变换器控制中引入ANN,可以满足高功率场景下的低开关频率需求、负载波动以及直流输入电压扰动对输出电压精确快速稳定控制提出的更高要求。文[58]提出一种基于近似动

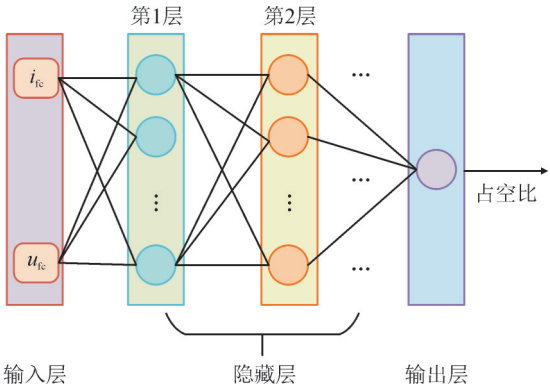


图 11 人工神经网络结构

Fig. 11 Artificial neural network structure

态规划和ANN的降压DC-DC变换器控制方法,将误差信号及其积分作为ANN输入,并通过离线训练最小化长期成本函数,提升系统处理最大占空比和电流约束的能力。风光制氢系统中的并联DC-DC变换器通过下垂控制实现负载共享,容易受到虚假数据注入攻击,文[59]提出一种基于ANN的参考跟踪策略,输入各变换器的历史电流、电压数据进行离线训练,通过神经网络估计真实直流电压,生成补偿信号抵消虚假数据,使系统恢复至参考电压,确保系统持续稳定运行。在功率变换器开路故障诊断方面,文[60]提出模型—数据混合驱动方法,结合模型驱动的快速响应能力与数据驱动的学习能力,通过离线模型分析筛选诊断变量并训练人工神经网络,实现在线快速故障诊断。

3 可再生能源制氢系统挑战

3.1 氢能政策

中国氢能政策从2002年开始逐步推进,但早期政策主要集中在技术研发层面。近年来,随着氢能产业的快速发展,政策导向及产业定位逐渐明朗,但政策变动仍较为频繁。燃料电池汽车示范城市群政策即将于2025年底期满,而氢能仍处于发展初期,政策衔接问题尚未解决。随着氢能市场规模的扩大,受制于中国氢能政策缺失以及危化品管制,加氢站等基础设施不足,且选址布局上大多在偏远郊外,难以适应当前行业的发展需求^[61]。当前氢能行业各环节都面临着“需求太少、供大于求”的困境,政策的不确定性和变动性影响了企业和投资者的决策,阻碍了氢能产业的持续稳定发展。氢能产业的政策引导不够协调,制氢产业的资源支持不足,在推动氢能产业发展方面缺乏系统性和协同性,导致资源分配不均和浪费,当前发展氢能的热点区域多处于政府引导及发展探索阶段,各地之间

产业规划同质化严重。此外,氢能产业链长、涉及层面多,各地区之间和产业链各环节间协同欠佳,难以形成合力。中国氢能发展缺少一套完整的法律体系,即缺少氢能法律、氢能行政法规、氢能地方性法规等规范性文件,仅有少数地方政府制定了氢能地方政府规章,但法律效力较低。此外,标准体系滞后则加剧技术路线不确定性,电解槽与燃料电池接口的电压、功率等级缺乏统一规范,迫使电力电子变换器设计需预留冗余功能模块,造成设备成本增加20%以上。

3.2 系统经济性

由于中国氢能起步较晚,关键技术和设备材料方面积累薄弱,导致氢储能综合成本较高,电氢耦合系统的经济性是目前亟需解决的难题。目前,国内主流的制氢技术包括工业尾气副产氢、电解水制氢、化工原料制氢以及化石燃料制氢等,见图12。图12中,绿氢(通过可再生能源电解水制得)的生产成本约为32.03元/kg,高于灰氢(通过化石燃料制得)和蓝氢(通过工业尾气副产或化石燃料制得但配备了碳捕获和储存技术),得到大规模应用的煤燃烧和天然气燃烧制氢成本仅为9.73、14.61元/kg^[62]。

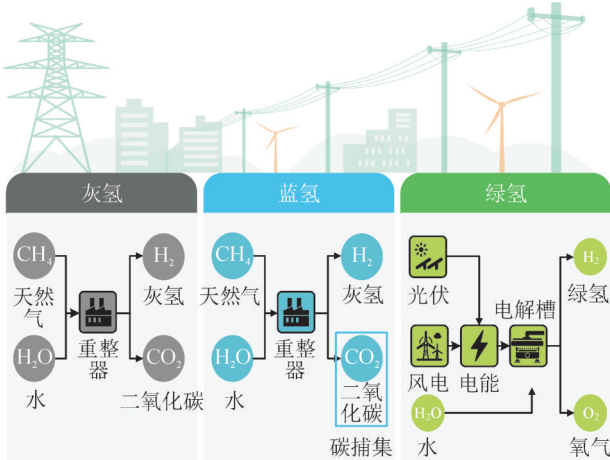


图 12 国内主流的制氢技术

Fig. 12 Domestic mainstream hydrogen production technology

同时,可再生能源制氢系统的使用寿命较短,在系统运行过程中,高温会加速设备材料降解,随着生命周期的延长,发电量和产氢量均会减少,与初始状态相比效率可能下降多达10%,导致整个生命周期内有效转化率下降,增加了系统运行维护成本和设备更换成本,固定式运行的AWE寿命可达30~50年,但通常在8~15年就需要更换或设备维修,因此延长设备使用寿命是系统经济性的重要影响因素。此外,在系统运行过程中会出现不同程度的设备老化,造成系统经济性的进一步降低。中国

大规模氢储运技术还处于起步阶段,氢气主要以长管拖车等公路运输方式为主,运输成本高且效率低,多种零部件和材料尚未实现完全自主可控,致使氢气制备和储运成本较高,跨区域运输氢气的成本和储存氢气的成本也是限制氢气在电力系统中大规模应用的因素。

3.3 市场交易机制

中国电力市场和氢能交易市场近年来在政策驱动与技术革新中呈现出快速发展态势,但同时也面临结构性矛盾与系统性挑战。在电力领域,随着可再生能源装机容量跃居全球首位,中国正加速构建以新能源为主体的新型电力系统。特高压输电技术的大规模应用实现了跨区域电力调配,市场化交易机制逐步打破传统计划模式,2024年全国市场化交易电量占比已超过60%。然而,省间壁垒、价格形成机制僵化等问题依然突出,煤电转型与新能源消纳的矛盾日益尖锐。可再生能源的间歇性与电网调峰能力不足导致部分地区出现“弃风弃光”现象,现货市场与辅助服务市场建设滞后,难以适应高比例新能源并网需求^[63]。同时,电力市场与碳市场的协同机制尚未健全,电价传导机制受阻,使得火电企业面临保供与减碳的双重压力。

氢能交易市场处于从示范探索向商业化过渡的关键阶段,中国依托风光资源富集区域建设了张家口、内蒙古等多个绿氢示范基地,电解槽产能已占全球40%以上。燃料电池汽车示范城市群政策带动氢能产业链初步成型,加氢站数量突破350座,兆瓦级PEM电解制氢技术实现国产化突破。但绿氢成本居高不下仍是核心瓶颈,当前平均制氢成本是灰氢的2~3倍,储运环节损耗率超过20%,液氢储运和管道输氢等关键技术尚未形成规模化应用。在市场机制层面,跨区域交易规则、质量检测标准、定价体系等基础制度存在空白。更为严峻的是,氢能产业链上下游协同不足,可再生能源制氢项目与化工、交通等应用场景存在空间错配,导致“有氢无市”与“有市无氢”现象并存。

两大市场的深层挑战均指向体制机制创新与系统整合能力。电力市场需要突破省级电力交易中心各自为政的格局,建立全国统一的电力市场体系,解决新能源跨省消纳的行政壁垒;氢能市场则亟需构建从生产认证到消费补贴的全链条政策体系,通过碳市场衔接实现环境价值变现。在技术创新层面,电力系统需加快虚拟电厂、分布式储能等灵活性资源开发,氢能领域则要突破质子交换膜、碳纤维储氢瓶等“卡脖子”技术。目前,两个市场正

在形成交叉融合趋势,氢能作为大规模储能介质可提升电力系统调节能力,而绿电制氢则为可再生能源消纳开辟新路径,这种协同效应的释放程度将直接影响中国能源转型的整体进程。当前亟需通过顶层设计打破行业壁垒,建立电—氢协同的市场机制和标准体系,在新型能源系统框架下实现资源优化配置。

3.4 系统控制策略

氢能独特的电—热—气特性为系统控制策略研究带来额外复杂度,导致可再生能源制氢系统动态特性的精细化控制不足。当前研究集中于单一制氢单元的优化,但随着制氢规模的扩大,单一模块的制氢电源在低压、大电流场景下面临适配难题,具有宽运行范围、启动速度快以及高运行效率等特点的模块化并联制氢电源系统逐渐成为主流方案。然而,模块化并联制氢电源的功率分配需解决不同制氢设备单体的容量匹配、各设备单体的性能差异以及储氢罐压力管理等多目标协同难题。

在控制方法方面,已有的PID控制、模糊控制和滑膜控制等传统控制策略因其结构简单、易于实现而在制氢系统中得到广泛应用,但其固有局限在于控制精度相对较低,且存在控制变量误差和响应延迟等问题。模型预测控制和神经网络控制可以显著提升系统的控制精度和跟踪速度,但其计算过程耗时较长,且控制精度高度依赖所用模型的准确性。此外,月前一日前一实时控制模型的耦合机制尚未明晰,现有跨尺度协同优化研究多采用“自上而下”的单向信息传递模式:月前规划层基于长期预测数据确定设备容量与燃料采购策略,并将结果作为边界条件输入日前调度层;日前层进一步细化运行计划,生成日内控制层的参考轨迹。这种线性化处理虽简化了问题复杂度,却忽视了反向信息反馈与动态修正机制的重要性。同时,多尺度目标函数的不同导致各阶段优化产生冲突,例如月前规划以全生命周期成本最小化为核心目标,侧重配置成本与运维支出的权衡,日前调度追求短期运行成本最优,可能通过透支设备寿命换取即时经济性。未来的研究方向在于结合人工智能对这些控制策略进行优化和改进,并将不同控制策略相结合充分发挥各自优势,推动可再生能源制氢控制系统向更高水平的集成化和模块化发展,适应不同规模和应用场景。

4 展望

1)政策与标准层面。应进一步完善氢能全产业

链法律法规和技术标准体系,明确氢能的能源属性与管理范畴,推动制氢、储运、并网及终端利用等环节标准统一,提升系统集成兼容性和工程推广效率。同时,应加强区域协同与产业统筹,避免同质化布局,促进可再生能源制氢与下游应用场景的有效衔接。

2)系统经济性方面。未来应围绕电解槽、电力电子变换器及储运装备等关键环节持续推进降本增效,重点突破高性能催化剂、隔膜材料和长寿命电解槽结构设计,提升核心装备自主化水平。与此同时,应加强波动工况下设备衰减机理与寿命评估研究,构建面向全生命周期的经济性优化方法,以降低运行维护和设备更换成本。

3)市场机制方面。应加快构建电—氢协同发展的交易体系,推动绿电交易、碳市场和绿氢认证机制有效衔接,逐步完善绿氢定价、质量认证及跨区域交易规则。结合新能源消纳和终端用氢需求,探索“风光储氢一体化”、“源网荷氢协同”等多元商业模式,提升可再生能源制氢项目的市场竞争力和可持续运营能力。

4)控制技术方面。针对可再生能源制氢系统电—热—气—水多物理场强耦合、多时间尺度协同及模块化并联系统协调控制等问题,未来应加强机理模型与数据驱动模型融合,发展融合模型预测控制、人工智能和故障诊断的智能控制方法,提高系统在波动工况下的动态响应能力、运行稳定性和安全性。同时,应推动制氢电源向模块化、标准化和高可靠性方向发展,为大规模工程应用提供技术支撑。

5 结语

可再生能源制氢系统作为清洁能源转型的核心技术,通过电—氢耦合机制实现了可再生能源的高效消纳与氢能的规模化存储,为构建新型能源体系提供了关键支撑。文中系统梳理了当前主流的电解水制氢技术路线以及可再生能源制氢系统的系统结构和控制架构研究进展,探讨了气体管理、水热协同优化、电力电子变换器、运行控制策略设计对系统效率与稳定性的影响,基于多样化应用场景、能源转型等因素评估了可再生能源制氢系统在政策、系统经济性、市场交易模式和控制关键技术方面面临的主要挑战,以期可为可再生能源制氢系统的规模化发展提供有益参考。

参考文献:

[1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展

望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2818.

Zhang Zhigang, Kang Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new - type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.

[2] Li Jianlin, Shi Zelin, Liang Zhonghao. A review on electricity-hydrogen coupling system: methodologies, applications, and prospects[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2026, 14(2): 399-415.

[3] 姜一鸣,安之,刘斯伟,等. 面向高比例新能源接入的电氢耦合系统设想及分析[J]. 电力自动化设备,2024,44(4):1-8.

Xian Yiming, An Zhi, Liu Siwei, et al. Assumption and analysis of electricity - hydrogen coupling system for high proportion of new energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 1-8.

[4] 史明明,缪惠宇,郭佳豪,等. 面向配电网可靠性提升的综合能源系统优化配置方法[J]. 电测与仪表,2025,62(5):22-30.

Shi Mingming, Miao Huiyu, Guo Jiahao, et al. Optimization configuration method of integrated energy system for reliability improvement of distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(5): 22-30.

[5] 鲍刚,张永海,彭雄,等. 考虑信息间隙决策理论和富氧燃烧碳捕集技术的虚拟电厂优化调度[J]. 电测与仪表,2026,63(2):11-23.

Bao Gang, Zhang Yonghai, Peng Xiong, et al. Optimal dispatching of virtual power plant considering information gap decision theory and oxyfuel combustion carbon capture technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2026, 63(2): 11-23.

[6] 王锋,宋惠宇,张欣欣. 基于双碳目标的家庭错峰用电调度策略研究[J]. 电测与仪表,2024,61(12):212-218.

Wang Feng, Song Huiyu, Zhang Xinxin. Research on household off-peak electricity consumption scheduling strategy based on carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12): 212-218.

[7] 洪芦诚,王梓菽,林今,等. 电—碳—绿证市场背景下电氢协同典型形态及参与模式研究综述[J]. 电工技术学报,2025,40(23):7498-7514.

Hong Lucheng, Wang Ziqiu, Lin Jin, et al. A review of typical forms and participation models of electricity-hydrogen synergy in the context of electricity - carbon - green certificate markets[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(23): 7498-7514.

[8] 刘玮,万燕鸣,熊亚林,等. 碳中和目标下电解水制氢关键技术及价格平准化分析[J]. 电工技术学报,2022,37(11):2888-2896.

Liu Wei, Wan Yanming, Xiong Yalin, et al. Key technology of water electrolysis and leveled cost of hydrogen analysis under carbon neutral vision[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2888-2896.

[9] 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.

Xu Chuanbo, Liu Jianguo. 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.

[10] 曹宏宇, 梁言贺, 刘惠颖, 等. 考虑电源与负荷间存在非正定相关性的概率潮流计算方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 109-115.
Cao Hongyu, Liang Yanhe, Liu Huiying, et al. Research on probabilistic power flow calculation method considering non-positive definite correlation between power source and load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 109-115.

[11] 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 Bo, 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.

[12] 胡可崑, 李 浩, 王 创, 等. 电解水制氢的多物理场建模与监控技术综述[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 3-13.
Hu Kewai, Li Hao, Wang Chuang, et al. Review on multiphysics modeling and regulation of power-to-hydrogen electrolyzer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 3-13.

[13] 孙 浩, 吴维宁, 陈丽杰, 等. 新能源电解水制氢技术发展研究综述[J/OL]. 电源学报: 1-18 [2025-12-12]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20240123.1730.002>.
Sun Hao, Wu Weining, Chen Lijie, et al. Review on the development of new energy electrolytic water hydrogen production technology[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-18 [2025-12-12]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20240123.1730.002>.

[14] 李 争, 张 蕊, 孙鹤旭, 等. 可再生能源多能互补制一储一运氢关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 445-462.
Li Zheng, Zhang Rui, Sun Hexu, et al. Review on key technologies of hydrogen generation, storage and transportation based on multi-energy complementary renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 445-462.

[15] 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.
Yu Hongmei, Shao Zhigang, Hou Ming, et al. Hydrogen production by water electrolysis: progress and suggestions[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 146-152.

[16] 刘海涛, 朱康凯, 王宇昊, 等. 考虑“源—荷”双侧调频的电力系统双层优化调度模型[J]. 电测与仪表, 2025, 62(11): 154-166.
Liu Haitao, Zhu Kangkai, Wang Yuhao, et al. Bi-level unit commitment optimized dispatching model of power system with “source-load” bilateral frequency regulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11): 154-166.

[17] 王一飞, 杨 飞, 徐 川. 电网规模化储能应用研究综述[J]. 湖北电力, 2020, 44(3): 23-30.
Wang Yifei, Yang Fei, Xu Chuan. Research overview of large-scale energy storage application of power grid[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(3): 23-30.

[18] 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.

[19] 孙庆凯, 王小君, 王 怡, 等. 基于多智能体 Nash-Q 强化学习的综合能源市场交易优化决策[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 124-133.
Sun Qingkai, Wang Xiaojun, Wang Yi, et al. Optimal trading decision-making for integrated energy market based on multi-agent Nash-Q reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 124-133.

[20] 安赢东, 刘一欣, 赵 波, 等. 风险感知的氢电耦合微网优化调度方法[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 93-102.
An Yingdong, Liu Yixin, Zhao Bo, et al. Risk-aware optimization dispatching method for the hydrogen electricity coupling microgrid[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 93-102.

[21] 夏杨红, 韦 巍, 程浩然, 等. 大规模可再生能源直接电解碱液制氢关键科学问题[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 224-231.
Xia Yanghong, Wei Wei, Cheng Haoran, et al. Key scientific problems for large-scale hydrogen production from alkaline water electrolyzers directly driven by renewable energy[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(7): 224-231.

[22] 王舜彦, 任永峰, 张小龙, 等. 基于混合电解槽自适应控制的光伏制绿氢系统研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 20-28.
Wang Shunyan, Ren Yongfeng, Zhang Xiaolong, et al. Study on photovoltaic green hydrogen production system based on adaptive control of hybrid electrolyzer[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(7): 20-28.

[23] 刘 元, 肖碧涛, 卢 昂, 等. 面向波动可再生能源的质子交换膜电制氢系统最优压强运行[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 210-217.
Liu Yuan, Xiao Bitao, Lu Ang, et al. Optimal pressure operation of proton exchange membrane water electrolysis system for fluctuating renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 210-217.

[24] 孔令国, 孙佳琦, 王士博, 等. 波动工况下 PEM 电解槽负荷—维机理建模及动态响应[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(13): 5074-5085.
Kong Lingguo, Sun Jiaqi, Wang Shibo, et al. One-dimensional mechanism modeling and dynamic response of PEM electrolysis load under fluctuating conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(13): 5074-5085.

[25] 韩鹏飞, 徐潇源, 王 晗, 等. 基于功率—温度自适应控制的多堆质子交换膜电解制氢系统效率优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 2236-2248.
Han Pengfei, Xu Xiaoyuan, Wang Han, et al. Operational efficiency enhancement of multi-stack proton exchange membrane electrolyzer systems with power-temperature adaptive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2236-2248.

[26] 程浩然, 夏杨红, 何杭航, 等. 适用于可再生能源制氢的大容量碱液电解槽建模研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 291-299.
Cheng Haoran, Xia Yanghong, He Hanghang, et al. Modeling of large-capacity alkaline electrolyzers for hydrogen production from renewable energy[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(2): 291-299.

[27] 徐衍会, 陈浩维, 胡俊杰. 光伏电解水制氢典型工况及质子交换膜电堆性能衰减研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 6228-

- 6243.
- Xu Yanhui, Chen Haowei, Hu Junjie. Study on typical working conditions of hydrogen production by photovoltaic electrolysis of water and performance degradation of proton exchange membrane electrolytic stacks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 6228-6243.
- [28] 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): 1712-1721.
- 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): 1712-1721.
- [29] 袁铁江, 张江飞, 滕越. 基于虚拟同步机的新能源制氢系统协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 163-174.
- Yuan Tiejiang, Zhang Jiangfei, Teng Yue. Coordinated control strategy of the renewable energy hydrogen production system based on VSG[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 163-174.
- [30] 宋洁, 郜捷, 梁丹曦, 等. 质子交换膜电解制氢系统建模研究综述[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 58-78.
- Song Jie, Gao Jie, Liang Danxi, et al. A review on modeling of Hydrogen production system with proton exchange membrane electrolysis[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 58-78.
- [31] 李建林, 石泽林, 梁忠豪, 等. 含电氢耦合储能系统的直流微电网功率协同控制方法[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-24[2025-12-12]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.293>.
- Li Jianlin, Shi Zelin, Liang Zhonghao, et al. A cooperative control method for DC microgrid power containing electrohydrogen coupled energy storage system[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: 1-24[2025-12-12]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.293>.
- [32] 孔令国, 于家敏, 蔡国伟, 等. 基于模型预测控制的离网电氢耦合系统功率调控[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3139-3148.
- Kong Lingguo, Yu Jiamin, Cai Guowei, et al. Power regulation of off-grid electro-hydrogen coupled system based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3139-3148.
- [33] 江岳文, 杨国铭, 陈宇辛, 等. 考虑电解槽动态制氢效率的氢网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 3014-3026.
- Jiang Yuewen, Yang Guoming, Chen Yuxin, et al. Optimal operation for the hydrogen network under consideration of the dynamic hydrogen production efficiency of electrolyzers[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3014-3026.
- [34] 赵曰浩, 李知艺, 鞠平, 等. 低碳化转型下综合能源电力系统弹性: 综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 13-23.
- Zhao Yuehao, Li Zhiyi, Ju Ping, et al. Resilience of power system with integrated energy in context of low-carbon energy transition: review and prospects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 13-23.
- [35] 陈胜, 张景淳, 卫志农, 等. 面向能源转型的电—气—氢综合能源系统规划与运行[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 16-30.
- Chen Sheng, Zhang Jingchun, Wei Zhinong, et al. Energy transition oriented planning and operation of electricity - gas - hydrogen integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 16-30.
- [36] Lee I O, Cho S Y, Moon G W. Interleaved buck converter having low switching losses and improved step-down conversion ratio[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8): 3664-3675.
- [37] 李梓丘, 乔颖, 鲁宗相. 海上风电—氢能系统运行模式分析及配置优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 104-112.
- Li Ziqiu, Qiao Ying, Lu Zongxiang. Operation mode analysis and configuration optimization of offshore wind - hydrogen system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 104-112.
- [38] 贺明智, 谭杨, 孟鑫, 等. 兼具高可靠性高效率的大功率电解制氢电源研究[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 162-171.
- He Mingzhi, Tan Yang, Meng Xin, et al. Research on high-power electrolytic hydrogen production power supply with high reliability and high efficiency[J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 162-171.
- [39] Qi Ruomei, Li Jiarong, Lin Jin, et al. Design of the PID temperature controller for an alkaline electrolysis system with time delays[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(50): 19008-19021.
- [40] Chen Yu, Wu Xiaogang, Zhou Kai, et al. Local temperature difference control of high temperature solid oxide electrolytic cell based on temperature observer[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024(93): 715-725.
- [41] 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.
- [42] Quan X, Hu Q, Dou X, et al. Control of grid-forming application for fuel cell/electrolyser system[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(17): 3368-3374.
- [43] Lu Xinyu, Du Banghua, Zhou Shenpei, et al. Optimization of power allocation for wind-hydrogen system multi-stack PEM water electrolyzer considering degradation conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(15): 5850-5872.
- [44] Mendis N, Muttaqi K M, Perera S, et al. An effective power management strategy for a wind - diesel - hydrogen - based remote area power supply system to meet fluctuating demands under generation uncertainty[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1228-1238.
- [45] Li Yangyang, Zhang Tao, Deng Xintao, et al. Active pressure and flow rate control of alkaline water electrolyzer based on wind power prediction and 100% energy utilization in off-grid wind-hydrogen coupling system[J]. Applied Energy, 2022(328): 120172.
- [46] Antoniou A, Celis C, Mas R, et al. Effective thermal-electric control system for Hydrogen production based on renewable solar energy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024(53): 173-183.
- [47] Koundi M, Fadil H E, Rachid A, et al. Output feedback sliding mode control of PEM EL-IBC system for hydrogen production[J]. IFAC-Papers Online, 2019, 52(29): 85-90.
- [48] Valenciana F, Evangelista C A. Control design for an autonomous wind based hydrogen production system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(11): 5799-5807.

[49] Guilbert D, Yodwong B, Kaewmanee W, et al. Hydrogen flow rate control of a proton exchange membrane electrolyzer[C]//2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C), 2019: 1-6.

[50] Li Z, Tu Z, Yi Z, et al. Coordinated control of proton exchange membrane electrolyzers and alkaline electrolyzers for a wind-to-hydrogen islanded microgrid[J]. *Energies*, 2024, 17(10): 2317.

[51] Kbidi F, Damour C, Grondin D, et al. Power management of a hybrid micro-grid with photovoltaic production and hydrogen storage[J]. *Energies*, 2021, 14(6): 1628.

[52] 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.

[53] 王翰林, 赵建立, 张沛超, 等. 光储氢集成系统的随机模型预测控制方法[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(2): 86-93.
Wang Hanlin, Zhao Jianli, Zhang Peichao, et al. Stochastic model predictive control of PV-storage-hydrogen integrated system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(2): 86-93.

[54] Valverde L, Bordons C, Rosa F. Integration of fuel cell technologies in renewable-energy-based microgrids optimizing operational costs and durability[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(1): 167-177.

[55] Nacar S, Öncü S. Hydrogen production system with fuzzy logic-controlled converter[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2019, 27(3): 1885-1895.

[56] Lin Guangwei, Yang Jin, Sun Haoran, et al. Optimization of energy management strategy with fuzzy logic control and low-pass filtering for hydrogen production system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025(116): 473-485.

[57] Fang Xiaolun, Zhong Xinyu, Dong Wei, et al. Fuzzy logic-based coordinated operation strategy for an off-grid photovoltaic hydrogen production system with battery/supercapacitor hybrid energy storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024(84): 593-605.

[58] Dong Weizhen, Li Shuhui, Fu Xingang, et al. Control of a buck DC/DC converter using approximate dynamic programming and artificial neural networks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers*, 2021, 68(4): 1760-1768.

[59] Habibi M R, Baghaee H R, Dragičević T, et al. False data injection cyber-attacks mitigation in parallel DC/DC converters based on artificial neural networks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II-Express Briefs*, 2021, 68(2): 717-721.

[60] Li Zhan, Gao Yuan, Zhang Xin, et al. A model-data-hybrid-driven diagnosis method for open-switch faults in power converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(5): 4965-4970.

[61] 吴 斌, 何冰琛, 张勋奎, 等. 荷随源动的电网友好型风光氢储大基地容量优化配置研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(16): 6259-6269.
Wu Jian, He Bingchen, Zhang Xunkui, et al. Research on capacity optimization allocation of a grid-friendly large energy base containing wind power, photovoltaic and hydrogen energy storage whose load changes with the power supply[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(16): 6259-6269.

[62] 鲁明芳, 李咸善, 李 飞, 等. 季节性氢储能—混氢燃气轮机系统两阶段随机规划[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(18): 6978-6991.
Lu Mingfang, Li Xianshan, Li Fei, et al. Two-stage stochastic programming of seasonal hydrogen energy storage and mixed hydrogen-fueled gas turbine system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(18): 6978-6991.

[63] 王文焯, 姜 飞, 张新鹤, 等. 含规模氢能综合利用的高比例风光多能源系统低碳灵活调度[J]. *电网技术*, 2024, 48(1): 197-206.
Wang Wenye, Jiang Fei, Zhang Xinhe, et al. Low-carbon and flexible dispatch of high-proportion wind-photovoltaic multi-energy system with comprehensive utilization of large-scale hydrogen energy[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(1): 197-206.

陈雨鸽(1998—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为储能和电力系统优化运行(E-mail: 807897763@qq.com)。

李智诚(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为储能和运行控制(通信作者)(E-mail: li_zhicheng12@fj.sgcc.com.cn)。

张抒凌(1997—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为储能(E-mail: zhang_shuling@fj.sgcc.com.cn)。

张伟骏(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力市场(E-mail: zhang_weijun@fj.sgcc.com.cn)。

林文彬(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为通信和储能(E-mail: lin_wenbin1@fj.sgcc.com.cn)。

李建平(1998—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为储能(E-mail: li_jianping2@fj.sgcc.com.cn)。