第 51 卷 第 5 期：2096-2113 高电压技术 Vol.51, No.5: 2096-2113
2025 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20242050

电解水制氢技术发展现状及其在新型电力系统中的应用进展

周　峻，冀承泽，李儒欢，宋旭晖，吴　锴，成永红
（西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049）

摘　要：在新型电力系统中，高比例可再生能源接入可能因储能、消纳措施不足等原因导致大量弃电，另外波动性、间歇性的风光能源也增加了电网的不稳定因素。以电解水制氢为核心的电氢协同技术既可以助力过剩风光能源的大规模消纳，提升能源利用率；还具备参与电网调峰、调压及调频以支撑电网安全稳定运行的能力。首先对比分析了不同类型电解水制氢技术的原理特性、性能指标与产业化进程；进而结合电制氢-储氢行业现状，总结了电氢协同技术参与下构建新型电力系统面临的机遇与挑战；最后，深入剖析了电解水制氢技术在支撑高比例可再生能源电网中的应用可行性。同时，针对未来电氢协同技术提升电网支撑能力的潜力进行了展望。
关键词：电解水制氢；新型电力系统；氢储能；综合能源系统；多联产；电网稳定性

Recent Development in the Technology of Water Electrolysis and Its Applications to New Power Systems

ZHOU Jun, JI Chengze, LI Ruhuan, SONG Xuhui, WU Kai, CHENG Yonghong
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In new power systems, high penetration of renewable energy may lead to significant curtailment due to insufficient energy storage and consumption measures, and fluctuation and intermittence of wind/solar power also contribute to the grid's instability. The electricity-hydrogen collaborative technology with water electrolysis technology as its core can assist in the large-scale consumption of excess wind/solar energy, improving energy efficiency, and contribute to regulate the power grid peak, voltage, and frequency. In this review, we compare and analyze the principles and technical characteristics, performance indexes, and processes of industrialization of various types of water electrolysis technology for hydrogen production. Then, based on the current situation of electric hydrogen production and hydrogen energy storage, we summarize the opportunities and challenges of the new power system with the participation of electro-hydrogen synergy technology. Finally, we discuss the feasibility and research progress of water electrolysis technology as a method of supporting the power grid based on renewable energy, as well as the potential for further exploration of the electro-hydrogen synergy technology for improving power grid support capabilities.
Key words: water electrolysis; new power system; hydrogen storage; integrated energy system; co-generation; power grid stability

0　引言

近年来，全球能源市场经历了前所未有的挑战，全球范围内可再生能源装机容量迅猛增长。在“双碳”政策的影响下，我国形成了以化石能源与风能、光能等可再生能源协同驱动的多元化能源生产体系[1-2]，推动电力系统逐步转型为多能互补的新型电力系统。

中国作为推动全球风电、光伏发电增长的主要动力，2024 年新增风电装机容量近 80 GW，而光伏发电新增装机高达 277.2 GW。随着风、光电在电力系统总装机容量中的比例不断提升，其出力间歇性、波动性[3-4]导致的弃风、弃光现象会造成大量能源浪费。不仅如此，高比例可再生能源注入下电网功率波动明显，引发电网电压、频率波动，对电网的承载能力带来了巨大的挑战。而风电、光伏发电系统固有的低转动惯量也使其频率调节能力降低，新能

基金资助项目：国家自然科学基金面上项目(52377212)；陕西省重点研发计划(2023-YBGY-057)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52377212), Key R&D Project of Shaanxi Province (2023-YBGY-057).

源发电设备的脆弱性导致高比例新能源接入地区的电网支撑能力不足[5]。电解水制氢技术相比于锂电池等电化学储能方式更具清洁性，将其作为消纳风光能源的有效途径，可以协助保障发电侧与负荷侧的电量供需平衡，维持电网的稳定。

电解水制氢具有产物纯度高的优势，制备的高纯氢能够在电力负荷需求高时供给燃料电池发电[6]，满足电力负荷需求。电制水制氢技术通过与天然气网[7]、光热电站等耦合形成电-气-热-氢综合能源系统以实现具有更高经济效益的热电联产[8]，拓宽了电制水制氢技术在新型电力系统中的应用边界，进一步提升电网的灵活调度能力。总之，电解水制氢技术既可以缓解风、光的间歇性与不确定性，降低新能源弃电率，提升新型电力系统的灵活性；还可以参与提升电网的支撑能力与长期稳定性。然而对于电解水制氢技术是如何被应用于支撑新型电力系统，参与高比例可再生能源电网的调峰、调压、调频等方面的最新进展缺少系统的总结分析。参考《中国的能源转型》白皮书，我国将加强可再生能源制氢产品的研发应用[9]；作为大规模新能源电力消纳的有力途径，国家发改委在《产业结构调整指导目录(2024 年本)》中也提出要鼓励氢储能的应用[10]。根据国际氢能委员会预测，2050 年氢能将占全球能源消费总量的 18%~24%，目前我国建成及在建的电解水制氢产能仅占总计划产能的 18%[11]，预计未来我国电解水制氢技术的发展将呈上升态势。因此有必要对电解水制氢技术是如何促进构建新型电力系统这一命题进行系统性的综述，以支撑电网高比例可再生能源的注入和提升能源综合利用效率。

为此，本文对电解水制氢技术的发展现状进行总结归纳，讨论分析电解水制氢技术在新型电力系统中的应用及未来发展趋势。首先，聚焦当前主流电解水制氢技术的发展现状，并结合具体案例对相应技术的产业化进程进行分析；其次，讨论新型电力系统中电解水制氢技术耦合气网、热网形成电-气-热-氢综合能源系统面临的机遇与挑战；最后，归纳电解水制氢-储氢技术参与支撑高比例可再生能源电网的应用，包括参与电网调峰、调压及调频方面的研究进展及前景展望，探讨电氢耦合技术发挥抑制新能源电网电压波动、维持频率稳定，提升电能质量，降低功率波动的潜能。

1　电解水制氢技术发展现状

1.1　主流电解水制氢技术的原理与特性

目前比较常见的电解水技术有 4 种，国内电解水市场中主流技术路线为碱性电解槽(alkaline water electrolyzer，AWE)，已完成商业化进程并占据市场主导地位。质子交换膜电解槽(proton exchange membrane electrolyzer，PEM)由于成本较高仍处于产业化初期，而阴离子交换膜电解槽(anion exchange membrane electrolyzer，AEM)和固体氧化物电解槽(solid oxide electrolysis cell，SOEC)则仍处于研发阶段。与传统的氧离子传导型 SOEC(O-SOEC)不同，质子传导型 SOEC(H-SOEC)由于更低的工作温度要求而受到关注[12]。另外，新兴的 SOEC 共电解技术可以将 H_2O/CO_2 转化为碳氢化合物，对实现降碳减排有很大帮助[13]。近年来，无膜电解水制氢技术(membraneless water electrolysis，MWE)作为一种新型电解水技术而备受关注[14]，与传统的电解槽不同，MWE 不需要特殊膜电解质来实现阴阳极的气体分隔，这降低了其设计复杂性和制造成本[15]。然而 MWE 技术的产气纯度与效率仍低于几种传统的电解水技术，在商业化推广之前需要进一步研究探索。表 1 列出了目前主流电解水技术的主要性能参数。

由表 1 可知，几种电解水制氢技术均具有较高的制氢纯度，PEM、AEM 与 SOEC 的能源转换效率较高[16-19]。除 SOEC 外，其他均为低温电解技术，SOEC 由于电解质需要具备较高离子导电性，因此一般运行温度较高[20-24]。寿命方面，MWE 装置因为无电解质膜[25-27]，不依靠膜组件实现气体分离，可以在不同的 pH 值范围内运行[28]，理论上具有更长的使用寿命。图 1 详细展示了主流电解水设备的典型结构和工作原理。根据图 1 中的化学反应原理，离子的传递是实现水电解反应的关键步骤，五种水电解技术中，AWE、PEM、AEM 与 SOEC 均通过电解质实现离子传导，而 MWE 可以依靠允许通过 OH^- 厚度为 130 μm 的多孔分离器[26]实现 OH^- 的传递与两电极的半反应。对于其余几种有膜电解槽，选择透过性的膜对阴、阳极之间的联通起关键作用，这体现着不同电解水制氢技术的独特性。对于 AWE 与 AEM，电解质材料的选择需要具备较好的 OH^- 传导能力与隔绝阴、阳极气体的能力。目前 AWE 电解槽常用的隔膜材料主要分为：聚合物隔膜，如聚苯硫醚和聚砜[29]与复合隔膜，如 CeO_2/聚

表 1 主流电解水技术的性能参数

Table 1 Performance parameters of main electrolysis technologies

技术指标	AWE	PEM	AEM	O-SOEC/H-SOEC/共电解			MWE
发展阶段	成熟	小规模商业化	研发阶段		研发阶段		实验室研究
电解质传导离子	OH^-	H^+	OH^-	O^{2-}	H^+	O^{2-}	OH^-
电流密度范围/($A\cdot cm^{-2}$)	<0.4	1~2	1~2	0.3~2	0.1~3.9	<2	0~0.3
电解电压范围/V	1.8~2.4	1.8~2.2	1.8~2.2	0.7~1.5	1~1.4	0.9~1.5	1.23~2.5
制氢纯度/%	>99.5	>99.99	>99.99	99.99	>99.99	产物比例可调	>99.8
效率范围/%	42~90	78~88	70~90	100	100	50~85	48~75
工作温度范围/℃	70~90	50~80	40~80	650~1 000	300~650	700~900	<90
工作气压范围/bar	2~10	15~30	<30	<30	<30	<30	—
电堆寿命/kh	约 100	<10	<4	<40	—	>1	—
参考文献	[16-19]	[16-19]	[16-17,19]	[16,19-20]	[21-22]	[21,23-24]	[25-28]

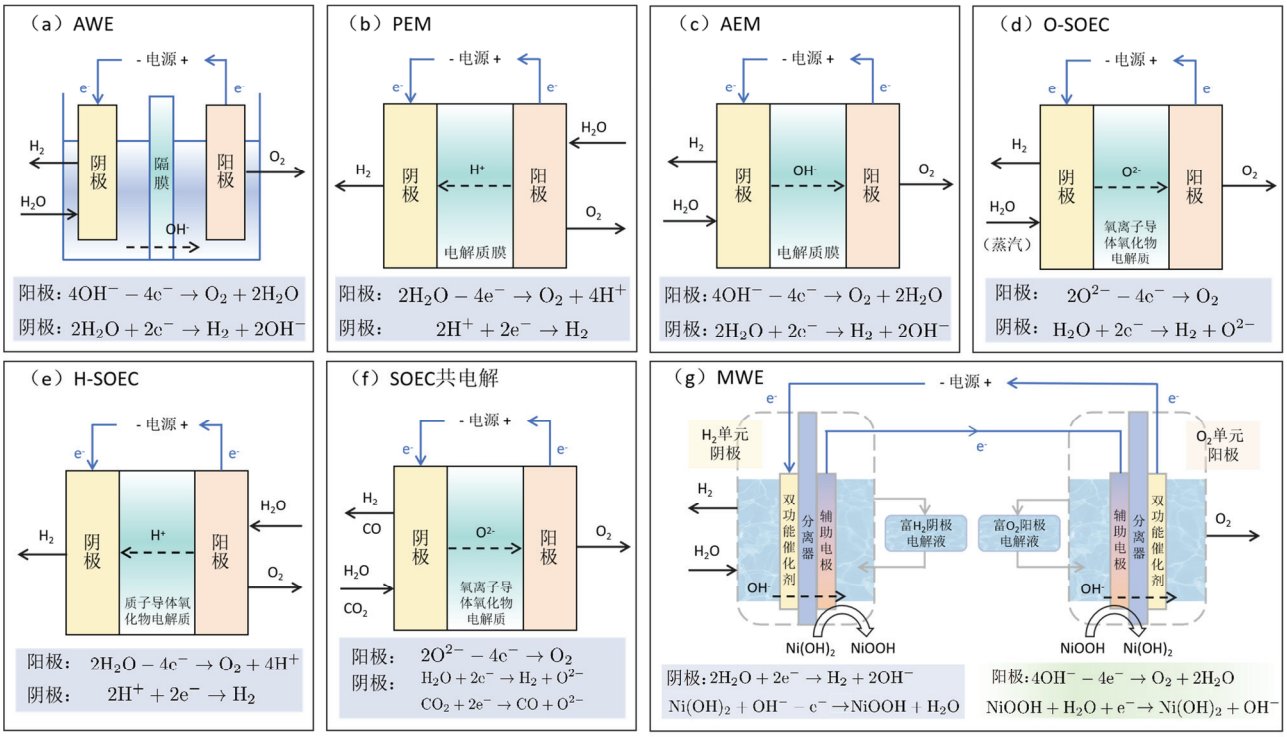


图 1 主流电解水技术的结构和工作原理

Fig.1 Configurations and working principles of several water electrolysis technologies

砜复合隔膜[30]；而 AEM 电解槽中的阴离子交换膜通常由不同的阳离子基团和聚合物主链组成[31]，其中阳离子基团大多采用季铵[32]，聚合物主链通常采用聚亚芳基醚、聚苯乙烯、聚砜、聚醚砜或聚氧化亚苯等[33-36]；PEM 常用的膜如全氟磺酸膜[37]、非氟磺酸膜[38]等；氧离子传导型及共电解 SOEC 的电解质为具有 O^{2-}选择透过性的氧离子导体氧化物，例如具有较好稳定性的氧化钇稳定氧化锆(Yttria-stabilized zirconia, YSZ)材料[39]。对于质子传导型 SOEC，则需采用质子导体氧化物电解质，例如具有良好质子导电率的钙钛矿型氧化物[22]。AWE 与 MWE 电解槽的化学反应均发生在碱性溶液中，存在碱液腐蚀的缺点[40]。PEM 电解槽采用固体质子交换膜，以纯水为反应物，避免了碱液对槽体的腐蚀，但由于其导电离子为 H^+，这导致其工作在强酸性环境(pH≈2)中，大多数非贵金属会被腐蚀[41-42]。AEM 作为第三代电解槽结合了 AWE 与 PEM 的优势，OH^-作为导电离子避免了强酸性环境，电解液采用纯水或低浓度碱液，起到缓解组件腐蚀的作用[43]。SOEC 为全固体陶瓷结构，不存在液体环境腐蚀性的问题，且不需要采用铱(Ir)、铂(Pt)等贵金属做催化剂，但如何保持高温下的运行稳定性是其发展需要面临的

问题。

考虑到风、光电力的波动性，为了更好的稳定电网功率波动，电解水制氢装置需要有快速响应电能输入的能力。SOEC 的高温工作条件使其面临着启停速度慢的挑战，而固体氧化物电池系统固有的可逆性特点使其在储能-发电的整体能源消纳-供给体系中具备一定的应用潜力，可以通过结合超级电容器的使用提升其快速响应能力；PEM 则具有快速启停与快速功率跟踪调节能力[44]，增强了其在应对可再生能源发电波动性输入方面的适应性；对于两种以 OH^-作为导电离子的电解水技术，AEM 相比于 AWE 由于结合了 PEM 的优势而具有更快的响应速度[17]，具有广阔的应用前景。

1.2　电解水制氢设备及辅助系统设计

除了 1.1 节中讨论的电解水制氢核心技术的发展，可靠的电堆集成技术及先进配套辅助系统(balance of plant，BOP)的研发配置是支撑大容量电解槽发展的重要因素。

目前已较为成熟的 AWE、PEM 电解水技术电堆的集成普遍采用双极板对单体进行电连接的方式[16,45-46]，典型结构如图 2 所示。双极板结构不仅用于各电解单元的电连接，在电堆设计中还提供气体流道，另外还发挥结构支撑的作用，保持电堆的机械结构稳定。

单电解槽扩展至电堆普遍采取双极板结构，但电堆结构的具体设计及连接体的选材因工作特性的不同有一定差异。例如 AWE、PEM 的腐蚀性工作环境意味着双极板需要具备耐腐蚀的特性，SOEC 的连接体双极板则需要耐高温。电堆构形层面，目前考虑到效率、成本等方面因素，多数情况下电解电堆都采用平板型堆叠结构。对于 SOEC 还可采用密封难度较低的管式结构[47]，目前 SOEC 的发展趋势是结合平板式与管式结构的优势，研制扁管式 SOEC [48]。连接体双极板选材方面，典型的材料如耐腐蚀性好的镍基合金、钛合金以及高温稳定性好的镀钴不锈钢等[49]。

规模化集成电堆是水电解制氢系统的核心组成部分，而 BOP 系统则负责支持电堆的正常运行，确保制氢系统的高效、安全和稳定。BOP 系统的组成因核心电解水电堆的不同而有所差异，例如 AWE、PEM 电解水制氢装置的 BOP 系统一般都包括水管理系统，热管理系统，供电系统，控制系统[50]、气体分离器与辅助给水泵等[51]。而如 AEM、SOEC 及 MWE 等仍处于研发阶段的电解水技术，相应的 BOP 设备不够成熟。但稳定的电源、精确的控制系统以及有效的气体分离与纯化功能是 BOP 系统应用于辅助各种电解水制氢系统高效工作的共同需求[52]。

表 2 详细总结了 BOP 系统中的各类子系统及具体设备，除了通用设备，AWE 要求系统具备碱液供应系统；为保护成本高昂的质子交换膜，PEM 电解水系统需要配备去离子水系统；且 AEM 电解液中杂质离子的存在会干扰 OH^-的传输，同样需要去离子水；而 SOEC 的高温工作环境下，一方面需要隔热层降低热量散失[53]，另一方面配备热回收设备可以提升综合能源利用率。SOEC 若通入液态水，水蒸发吸热可能导致 SOEC 内部温度分布不均衡，因此需要配备水蒸气发生器。根据不同电解水系统的技术差异性与共性[54-57]，图 3 详细展示了 4 种较常见的电解水技术配套 BOP 系统中核心设备的及其电力流、热流与物质流的连接关系。

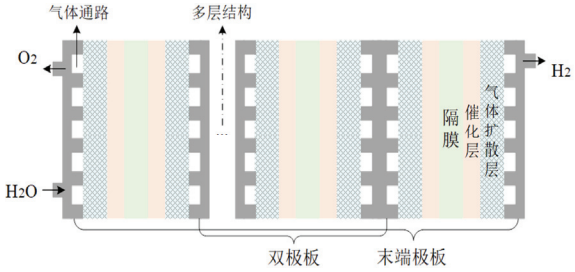


图 2　电解槽-电堆结构示意图

Fig.2　Schematic of typical electrolyzer stack structure

表 2　电制氢设备 BOP 系统的组成

Table 2　Composition of BOP system of electric hydrogen production equipment

系统	子系统	组成
各类电解水系统共需的部分	电力供应系统	电源、变压器、变流器、变流器配套的优化控制器
	水供给系统 气体处理装置	水源、补水装置、净化器 气体分离纯化设备、压缩机
	温控系统	温控模块、冷却系统
	安全保障系统	气体泄漏处理、过载保护、氮气吹扫装置、事故预警系统
	智能监测控制系统	用于温度、压力、流量监测与控制的传感器与控制器
	储气装置	储气罐、气体输送管道
特殊功能系统	碱液供应系统-AWE、AEM	氢气精炼设备-AWE
	去离子水设备-PEM	去离子水设备-AEM
	隔热设备-SOEC	水蒸气发生器-SOEC

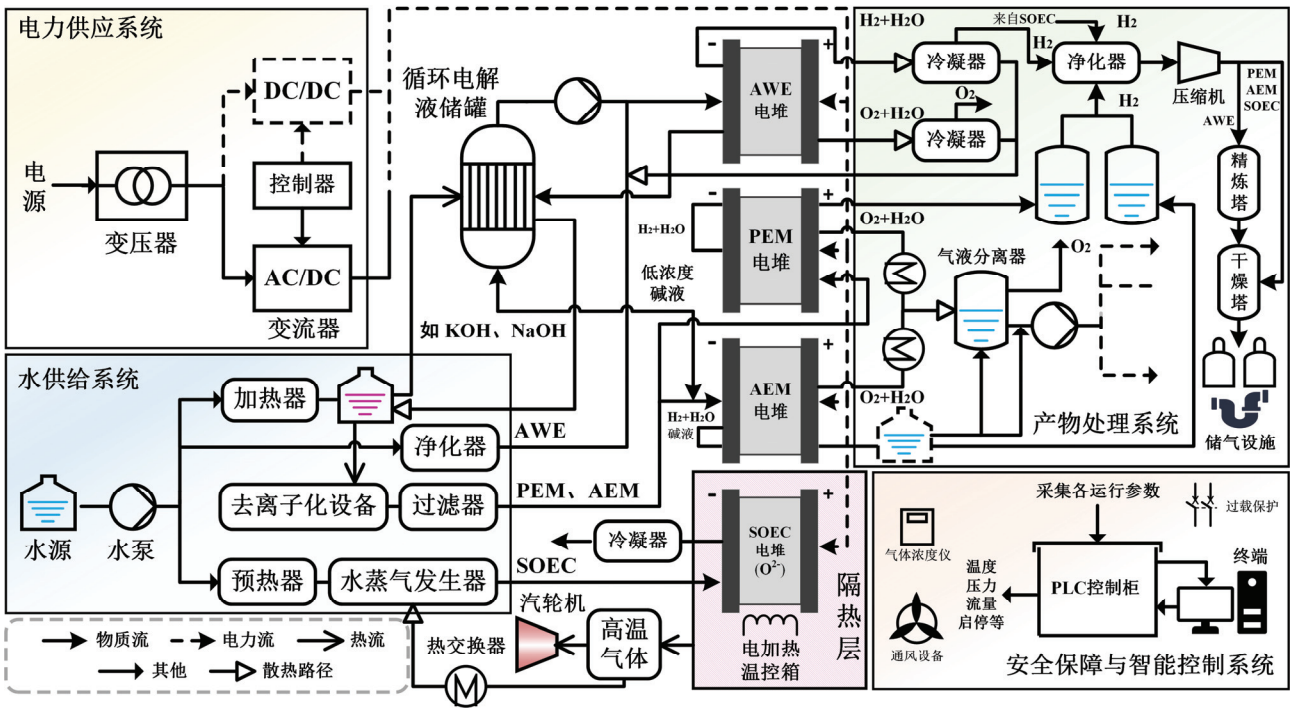


图 3 电解水制氢设备的 BOP 系统组成示意图

Fig.3 Schematic diagram of BOP system composition of water electrolysis equipment

1.3 电解水制氢设备产业化进程

几种主流电解水技术各具特色，适用于不同的应用场景。基于这几种电解水技术集成的大型电制氢系统用于产氢、储氢和新能源消纳将极大促进能源系统结构转型升级。世界各国对不同类型电解电堆及大容量电制氢系统进行了广泛的研究与尝试。如表 3 所示，对于商业化进程较为快速的 AWE 与 PEM，近年来国内外有许多公司在大容量电堆与电制氢系统的建设方面有所突破，并且功率等级在不断提升。而 AEM 与 SOEC 电堆等级相对较低，但在不断向更大规模发展，尤其是在 2024 中国国际氢能及燃料电池产业展览会上，亿纬氢能发布了全球首台 100 kW AEM 电解槽产品[64]，是国产 AEM 电解槽向更大功率方向迈进的一个重要标志。近日，江苏氢云直上科技有限公司推出了最新的无膜电解水制氢系统。该系统可实现制氢宽功率范围为 5%~110%，降低绿氢生产成本的 30%，这意味着 MWE 也具备规模化的潜能[68]。为了实现 MWE 的规模化、商业化生产，优化电极结构的设计、降低离子传输阻力，将帮助提升 MWE 的制氢效率，使其低成本制氢优势得以更好的发挥。宽功率范围集中反映了电解水设备消纳新能源电力及处理波动性功率输入的能力。阳光电源的 AWE 电解装置

表 3 近年来建成的大容量电解水制氢装置及系统

Table 3 The large-capacity water electrolysis stacks and systems built in recent years

最大功率等级/产能	装置类型	公司	国家	年份	文献
兆瓦级-电堆	AWE	阳光电源	中国	2022	[58]
220 MW-工厂	AWE	HydrogenPro	挪威	2023	[59]
20 MW-电堆	AWE	Verdagy	美国	2024	[60]
500 MW-工厂	PEM	康明斯恩泽	中国	2023	[61]
1 GW-工厂	PEM	SIEMENS	德国	2023	[62]
1 GW-工厂	PEM	兴燃科技	中国	2024	[63]
100 kW-电堆	AEM	亿纬氢能	中国	2024	[64]
1 MW-电堆	AEM	Agastya	美国	2025	[65]
2.5 kW-电堆	SOEC	翌晶氢能	中国	2023	[66]
兆瓦级-电堆	SOEC	Ceres	英国	2024	[67]

SHT1000A 具有 30%~105%的宽功率工作范围。其生产的 SEP50 PEM 电解装置功率为 250 kW，作为国内可量产的高功率 PEM 电解槽，具有 5%~150%超宽功率工作范围，对可再生能源的波动特性的适应性较强，且有较好的实时响应能力。另外，表 3 中 2.5 kW 级 SOEC 电堆具备 20%~200%的宽功率运行范围，显示出具备消纳波动性新能源电力的潜力[66]。

AWE、PEM 电堆的功率等级已普遍达到兆瓦级，百兆瓦级甚至更大规模的制氢工程通常由多台

电解槽构成。电解槽通过并联组成阵列，以实现大规模制氢。在我国，AEM 虽已经具有 kW 级电堆的示范产品落地，但尚未普及。而 SOEC 目前处于研发与示范初期阶段，示范规模也限于 kW 级，距离国际先进水平 MW 级装备的开发尚需时日。为了推进 AEM、SOEC 大容量制氢系统的建设，一方面需要提升电堆单体的功率等级；另一方面可以如图 4 所示将若干电堆排列成矩阵并以串并联方式相互连接[53]，通过合理组合上述电堆矩阵进而建成兆瓦级或更大的电制氢工厂。

除了功率等级、运行特性及效率范围等技术指标，电解水制氢的经济性也对推进其产业化进程至关重要，这关乎产业的投资回报率与可持续发展潜力。新能源电解水制氢技术的成本主要受新能源电价、制氢规模与设备利用率等因素的影响。高成本是限制电解水制氢产业发展的主要瓶颈之一，可以通过扩大规模、提升制氢效率与设备利用率来降低成本[69]。对于较为成熟的技术如 AWE，很难通过技术升级来降低成本，更应考虑扩大规模以实现低成本制氢。而对于成熟度不完善的电制氢设备，如 SOEC，技术层面的进步是降低其产业化成本的关键。随着风电、光伏大规模并网，新能源电价下降将进一步推动电解水制氢成本的降低，实现清洁性与低成本的双重优势。

在实际应用场景中，电解水制氢设备与电网耦合的方式有并网型和离网型两种(图 5)。并网型制氢是指将新能源发电机组接入电网，电制氢设备从电网取电用于制氢，主要应用于大规模风光耦合系统的新能源电力消纳和氢储能。离网型制氢是将风电、光伏机组所产生的电能，不经过电网而是直接提供给电解水制氢设备进行制氢，主要应用于分布式制氢[70]。另外，在并网型制氢中，电制氢设备与新能源电站也可以独立于主电网而形成微电网制氢模式，构成相对独立的发电、消纳、储能和供能系统。

电解水制氢技术在新型电力系统中的应用场景广泛，以电解水制氢为核心的电氢协同技术将提升高比例新能源注入下新型电力系统的灵活调控能力。不论是对于并网型制氢、离网型制氢还是微电网制氢，在发电量高于负荷需求时将电能通过电解水制氢实现氢储能，电力供给不足时配合燃料电池等发电装置供给负荷。

产物氢气除了通过储氢设备存储外，还能够参

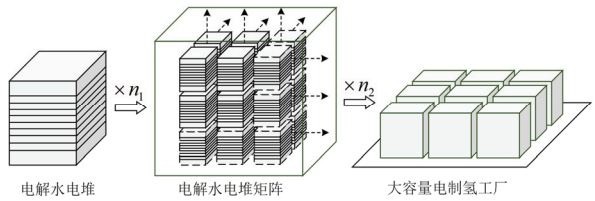


图 4　大容量电制氢装置的模块化架构

Fig.4　A framework of large-scale electrolyzer

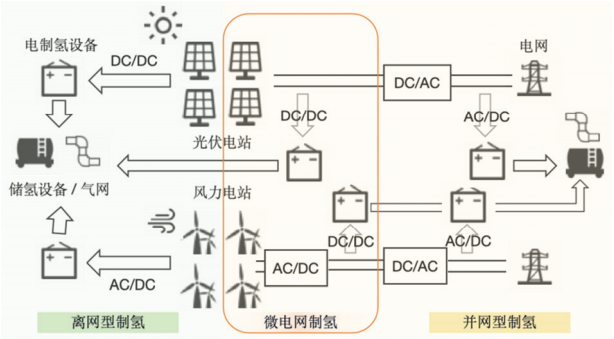


图 5　风光电站-制氢/储氢-电网耦合能源系统

Fig.5　Schematic diagram of wind/PV- electrolysis/hydrogen storage - grid system

与气网耦合，既可以直接参与燃气供热，也可用于燃气发电，供给负荷用电需求，这是电制氢辅助热电联产的有效方式。另外，除了辅助燃气供热，如图 3，优化电制氢设备运行过程中的热损失现象，合理设计热回收策略，这是从产热角度进一步提升综合能源利用率的有效途径。通过构建电-气-热-氢耦合的综合能源系统，可以将电力、氢能、热能及燃气系统有机结合，显著提升能源的综合利用效率与电网运行的灵活性。

2　电-气-热-氢耦合的综合能源系统

在新型电力系统中，氢能作为连接气、电、热等不同能源形式的桥梁，与电力系统形成互补协同关系。电制氢与气网、热网耦合可以形成电-气-热-氢综合能源系统，这将发挥氢气高能量密度的优势。另外，通过气网掺氢或氢气甲烷化等方法还可以使氢储能兼具跨季节、跨地域的特性。电-热-氢多联产还能为电力系统带来更高的经济效益。同时，综合能源系统将为新型电力系统提供更加多元化的调节手段，增强电力系统的可靠性和灵活性。

2.1　电制氢-气网耦合的机遇与挑战

输氢管道的建设成本高昂，且在中国尚处于起

步阶段[71]。为了充分发挥管道输氢的优势，激发电制氢与气网耦合的潜力，可将电解水制取的氢气按比例注入到现有天然气网络中，实现天然气网掺氢。气网掺氢能够有效提升能源系统整体经济性与可再生能源利用率。合适掺氢比例的选取将提升气网的储氢能力。有研究表明，气网中掺氢含量超过 25%，安全风险将显著增加[72-74]。基于理论研究，国内外已有了一些电解水制氢耦合气网掺氢的示范工程。2019 年辽宁省朝阳市的 AWE 制氢-气网掺氢示范项目，掺氢比例可达到 10%，相比于液氢等运输方式，该项目以更低成本实现氢能输送，并满足民用灶具的稳定燃烧需求。2023 年德国在 Erftstadt 镇开展了一项气网掺氢测试。首先，用 23%掺氢气体测试所有参与电器的适用性，确保安全后，将当地气网掺氢比例提高至 20%，并稳定运行 6 个月[75]。该试验表明，与纯天然气相比，掺氢 20%可减少 7%的碳排放。

高比例掺氢可以进一步降低碳排，但同时对系统的安全性提出了更高要求。高比例气网掺氢可能导致严重的氢脆现象。目前，不同工况下的天然气管材的氢脆机理和变化规律尚不完全清楚[76-78]，而管材抗氢脆性是制约气网掺氢发展及系统安全性的关键性因素。一方面需要通过仿真与实验全面分析不同工况下管材的氢脆机理；另一方面，需要研制具有更高耐氢脆强度的管材。氢脆机理层面的研究结合新型材料的研发是保证高比例气网掺氢下系统安全性的关键。此外，对于气网掺氢系统需要配备完善的监测设备，对氢脆的出现及氢气泄漏的情况及时预警，降低安全风险，提升掺氢后气网的适应能力。另外，新型电力系统的建设还需兼顾高效性与经济性，如何在保证系统能源利用率的基础上，降低系统的储能、发电成本是综合能源系统研究中的重要目标。绿氢的高生产成本也会增加运行支出。因此，合理的掺氢比例需在环保效益与投资成本之间权衡，并结合具体需求进行优化。

除了气网掺氢，电制氢与气网耦合的另一途径为电解水生成氢气后，先经由甲烷化装置与 CO_2 发生如式(1)—(2)的反应，生成甲烷后再注入天然气网络，实现对 CO_2 的转化与循环再利用。

$$2H_2O = 2H_2 + O_2 \tag{1}$$

$$4H_2 + CO_2 = CH_4 + 2H_2O \tag{2}$$

相比于直接掺氢，这种技术路线安全性更高，且可以实现碳捕集、降碳排。然而，文献[79]表明电制氢与甲烷化装置直接相连将严重制约前者的运行时间和范围，配置大容量高压储氢装置可以缓解此问题，但会增加成本。文献[7]也指出电转气生产成本相对于天然气市场价并不具有竞争性。面对化石燃料短缺且温室效应严重的现状，推广氢气甲烷化具有长远意义。而在实施大规模推广前，如何降低氢气甲烷化的生产成本是需要重点关注的方向。

针对上述目标，文献[80]结合韩国的能源市场现状，对包括 PEM 电解水制氢的甲烷化过程进行了模拟优化，指明生产成本需要降低 25%才可能在实际市场中引入合成天然气。文献[81]表明，电解水制氢直接注入气网成本相对较低，但无法实现碳捕集，而甲烷化生产中较高的 CO_2 购买费用会大大提升成本。可见，除了设备的购置运维成本，CO_2 采购成本是导致甲烷化成本高的重要因素。因此，为了推动氢气甲烷化的商业化进程，实现降碳排与降运行成本的共赢，需要技术层面优化升级，流程上游绿氢生产成本的降低依靠电制氢设备的优化设计；制氢电力供应源分为风能、光伏，合理配置不同技术路线的甲烷化反应器及辅助设备的规模能帮助降低整体生产成本[82]；另外，可以通过合理调控气网掺氢与氢气甲烷化的联合运行[83]实现成本、碳捕集及新能源消纳的多目标优化调度。而降低 CO_2 采购成本则需要市场调控与政策支持，推行碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage，CCUS)补贴和激励政策将帮助企业降低碳捕集成本；也可以参考欧盟[84]，推动跨国合作，实现 CO_2 跨境封存，建立全球碳交易市场，有望降低储存成本。

2.2 电-热-氢多联产综合能源系统

在新型电力系统中的电-热-氢多联产模式也是未来能源领域提质增效的重点方向。尤其是对于电解水系统的余热回收利用问题，考虑到在 AWE 和 PEM 电解水系统中约有 20%~30%的能量会以热能形式散失[85]。而 SOEC 排出的高温工作气体既可以用来预热反应气，也可以辅助驱动汽轮机发电，实现余热利用[57]。热回收及供热系统的优化设计将进一步提升能源利用率，降低供热成本，带来更大的经济效益。另外考虑到天然气网、光热电站兼具参与供热、发电的能力，可以与电解水制氢环节耦合进行电-热-氢多联产，实现智慧供热和发电。

为优化电制氢系统的热回收问题，文献[85]建立了热回收优化运行模型，利用电制氢和甲烷化反

应余热对热网回水进行加热，实现了热能的有效存储与利用，提升了能源利用效率。而对于储氢参与下综合能源系统的电-热-氢联产研究，文献[86]提出了一种新型的包括地热发电厂、电解槽等装置的地热能多联产结构。该系统可以实现热-电-氢联产，通过调节循环气流量可以降低系统单位成本，提升生产经济性，并且该系统可以实现零排放运行。文献[87]考虑到气网的产热发电能力，设计了三北区域综合能源系统，实现了热-电-气联产，降低了系统购能成本。除了与气网耦合，电解水制氢技术还可以与光热电站耦合进行热-电-气联产，文献[88]提出了一种含光热电站及氢储能的综合能源系统低碳优化运行策略，建立了多储能联供模型，促进了电-热能量的相互转移，优化了系统的运行灵活性。对于电-热-氢多联产系统，在满足负荷需求的前提下，合理配置储热和储氢的容量可以提升综合能源系统的经济效益，这也是目前电解水制氢-储氢与光热电站联动发展的重要方向。文献[89]以发电系统的年收益为目标，提出了一种计及光热电站与电制氢的电-热-氢多类型储能协调优化配置。文献[90]针对海岛微电网供电成本高的问题，提出了一种含电制氢及光热电站的微网优化运行策略，研究表明电制氢装置的加入使微网总体净收益增加明显。

电制氢设备参与的电-热-氢多联产综合能源系统虽然可以有效提升能源综合利用率，并且可以通过合理配置容量降低能源供给成本，但该领域的发展仍面临一些问题，由于电制氢基础设施尚未完善，配套的热回收设施建设水平有限，所需初始投资成本较高。另外，相比于单纯的新能源电力制氢系统，多联产系统的构建进一步增加了系统复杂性。尤其是当面对新能源电力波动较大的场景，电-热-氢多联产的协同管理目标更为多样。针对此研究目标，表 4 从优化目标、系统组成、技术指标等多个方面探讨了电-热-氢多联产系统在应对波动能源场景下的可行策略与技术水平。

由此可见，多联产综合能源系统的优化设计目标普遍包括：功率匹配能力、能源利用率、经济效益、降低碳排放的能力等。通过合理的能量管理策略，可以促进波动场景下的电力匹配、降低新能源弃电率、提升能源系统经济及环保效益等多方共赢。

总之，电-热-氢多联产综合能源系统通过新能源发电、电解水制氢、热力系统等多方耦合，打破了传统能源系统中各环节单独配置、独立运行的壁垒，促进了新型电力系统中多要素互补协同。在未来，电-热-氢多联产综合能源系统是拓宽电氢耦合技术在电网中应用场景的重要发展方向。

表 4　波动风光出力下电-热-氢多联产系统的优化设计

Table 4　Optimized designs for co-generation systems considering fluctuation of wind and solar power

系统组成	优化目标与效果	优化设计方法	文献
制氢：AWE、PEM、SOEC 产热：余热回收、电锅炉 发电：风电、光电、燃料电池 储能：蓄电池、储氢罐、储热罐	出力匹配：风光消纳-100% 降投资成本：28.74% 提升运行收益：2.55% 降低碳排：2.22%	双层优化、粒子群优化	[91]
制氢：SOEC 产热：光热电站、热回收装置 发电：风电 储能：储氢罐、多管换热装置	降低成本：8.06% 降低碳排：显著降低 降低弃风率：10.10% 降低弃热率：11.56%	时空聚类分析、条件风险价值	[92]
制氢：PEM 产热：天然气、气轮机 发电：风电、光电 储能：储氢罐、余热锅炉	降低碳排：显著降低 提升热电联产效率：0.59% 经济效益：高于用天然气发电	敏感性分析、波动可再生能源容量因子	[93]
制氢：AWE 产热：气网、燃气锅炉、氢锅炉、电锅炉、电解槽余热回收 发电：风电、光电、燃料电池 储能：储氢罐	电解槽效率：90% 电解槽成本：降低 功率响应：更加平稳	模型预测控制	[94]
制氢：PEM 产热：气网、锅炉、燃料电池 发电：风电、光电、燃料电池 储能：储氢罐、蓄电池、储热罐	系统运行成本：显著降低 运行余热：充分利用 碳排放量：显著降低	双层优化、数学规划、低碳协同优化	[95]

3 电制氢技术参与支撑新能源电网

可再生能源作为新型电力系统中的重要电力来源，高比例风、光能源接入下电网功率波动较大，发电与负荷易出现不匹配，造成能源供给不足或风光弃电量过大。电解水制氢技术参与电网调峰是电氢耦合技术参与支撑新能源电网的重要应用场景。当总发电量高于负荷需求时，将新能源剩余电力用于电解水制氢，降低弃电量[96]。而当用户侧用电需求高于电网发电能力时，可由储氢设备供氢使用氢氧燃料电池发电[97-99]，供给高峰用电需求。另外，可再生能源间歇性导致的电网功率波动还可能导致电网电压、频率的不稳定。由于风、光机组会发出有功、无功功率，当电网中有功和负荷之间不平衡时，引起电网频率变化，当电网中无功功率不平衡时，会引起电压不稳定[100]。为抑制可再生能源发电功率波动对电网稳定性的冲击，电制氢参与新能源电网的电压、频率的调控是电氢协同技术支撑电网的另一应用，具有重要的应用潜力。

3.1 参与电网调峰

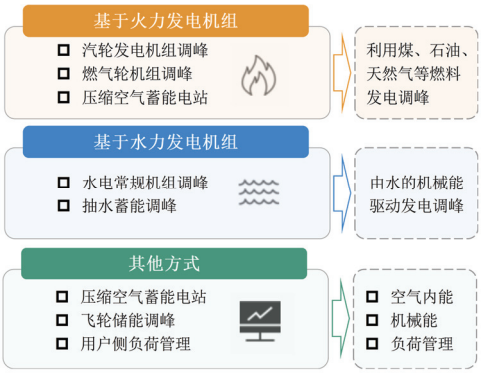
新能源大规模替代火力发电，其间歇性、波动性的特点影响了电力系统的供需调度，新能源消纳不及时也会造成能源浪费。面临日益增长的电网调峰需求，研究适配可再生能源大规模化并网的调峰策略以及新型储能装置等尤为重要。

图 6 展示了当前电网中常用的常见调峰方式，其中图 6(a)中压缩空气蓄能电站原理为负荷低谷时压缩空气储能，负荷高峰驱动燃气轮机发电，实现与火电机组耦合调峰。图 6(b)中与新能源发电配合的调峰机组既可以单独与风光机组耦合，也可以相互结合形成多源联合优化调度系统以提升调峰的灵活性[1,101-104]。

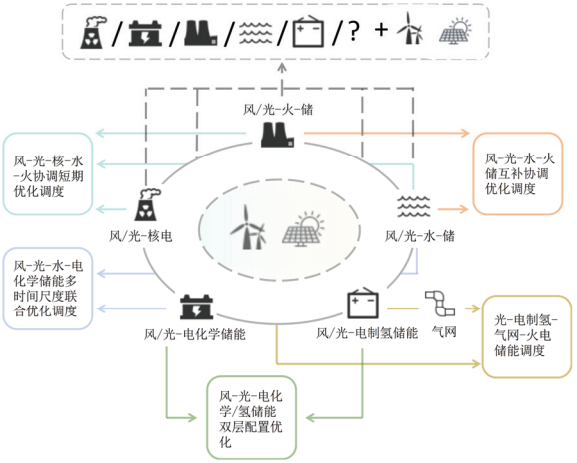
相比于传统的调峰手段，电氢协同技术在参与电网调峰的过程中可以将不均匀性、间断性的弃风、弃光转化为可规模化、长时间存储利用的氢能，更有利于可再生能源的消纳以及系统稳定性的提升。电制氢过程无污染性气体生成，相比于火电机组调峰更清洁。另外，氢气的能量密度(140.4 MJ/kg，约为39 kWh/kg)高于常见的固体燃料[105]，也高于常见的电化学储能装置如锂离子电池(265~280 Wh/kg[106])、超级电容器(如 55.4 Wh/kg[107])。

随着各种电制氢装置成熟度的提升，电制氢为核心的电氢协同技术参与电网调峰的研究受到了广泛关注。文献[108]以水火电为主的优化调度模型为基础，构建了包含电制氢在内的多目标优化调度模型。充分发掘源网荷储输等各类资源调节能力，支撑新能源消纳，保证电力灵活供应。电制氢装置参与新能源并网调峰优势明显，但容量配置也需视情况而定。例如文献[109]考虑到风电波动影响电网负荷，提出了制氢系统参与辅助火电调峰的经济模型。研究表明系统的经济效益随制氢容量的增加呈先增后降的趋势，这是由于当制氢容量较大，风电功率的波动性会导致部分电解槽不能被充分利用。电解水制氢及氢储能参与调峰的容量配置问题是评估系统调峰能力的重要因素。针对应用于新能源风光发电站的储氢容量优化配置问题，文献[110]构建了基于 AWE 制氢-储氢多目标优化配置模型，针对甘肃某风光电场，采用寻优算法确定合适的电解槽、储氢罐的数目容量配置。研究结果表明，氢储能系统的配置使系统总出力与调度指令方差下降 98.7%；并且系统年弃电量相比于配置氢储能前下降 93.6%。

可见，合理调配电制氢-储氢装置的容量可以较



(a) 计及火电、水电等常规机组的调峰方式



(b) 计及风、光、氢等新能源的调峰方式

图 6 电网中可用的调峰手段

Fig.6 Methods of peak regulation in grid

好的发挥其调峰方面的优势，提升新型电力系统的调峰能力与可再生能源消纳能力。然而电制氢设备的响应速度是限制电氢耦合系统参与高比例可再生能源电网调峰发展的另一关键因素。由于风、光具有较大的波动性，为了更好的稳定电网的功率波动，需要电解槽具有较快响应变动电能输入的能力。PEM具备的快速响应能力适合与可再生能源集成[111]，考虑到 PEM 设备的快速启停与快速功率响应特点，文献[44]设计了以PEM电解槽为核心的风光并网互补制氢系统用于评估 PEM 电制氢调峰的能力，显示出电制氢参与电网调峰的灵活性。研究[112]中为实现风光互补制氢系统容量优化建模，结合蓄电池储能，建立了如式(3)的功率优化目标函数。

$$\begin{cases}\max f\left(\bar{P}_{\text{load}},\Delta Q\right)=\alpha\dfrac{\bar{P}_{\text{load}}}{P_{\text{std}}}+\left(1-\alpha\right)\dfrac{\Delta Q}{Q_{\text{std}}}\\ 0<\alpha<1,\ 0.8P_{\text{std}}<\bar{P}_{\text{load}}<P_{\text{std}}\end{cases}\tag{3}$$

式中：$\bar{P}_{\text{load}}$ 为电解装置平均功率；ΔQ 为蓄电池减少的容量；α 为电解装置功率占综合函数的权重；P_{std}、Q_{std} 分别为电解装置功率基准值和蓄电池的容量基准值，用于考量风光能充分利用前提下电制氢及蓄电池的平均功率。蓄电池作为电化学储能方式，配合电制氢-氢储能可以建立多源混合储能系统，相比仅有电制氢参与电网调峰可以更有效的抑制系统等效负荷波动，调峰能力更强[112]。文献[113]提出了一种蓄电池耦合风光制氢的新型系统，利用蓄电池的快速响应能力缓解波动能源下 AWE 电解槽启停速度慢的缺点，电解槽启停次数大大降低，系统年收益可提升 5%。响应速度慢的问题不仅存在于商业化已初具规模的 AWE，SOEC 也面临着电力输入变化时的响应延迟问题[114]。除了蓄电池，超级电容器也是一种重要的电化学储能方式，能有效改善电制氢设备参与调峰响应速度慢的问题。超级电容器具有响应速度快和功率密度高的优点[115]，用来优化电制氢装置响应延迟的效果显著。文献[3]针对耦合发电-制氢系统中燃料电池和电解槽的响应延迟问题，采用超级电容器优化系统运行。为改善高比例风电联网的反调峰、不可控等冲击电网的不利现象，文献[116]提出了一种电-氢混合储能的风氢耦合系统控制策略，同样采用了超级电容器处理电解槽功率响应延迟问题。而文献[117]则是基于超导磁储能的毫秒级快速响应特性来平抑电解槽的功率响应延迟。总之，电解槽的响应延迟可以通过结合电池储能、超级电容器等多种方式实现，从而提高电能质量[118]，增强电制氢装置的调峰能力。

综上所述，相比于以火电厂为主的电网传统调峰方式，电解水制氢为核心的电氢协同技术在参与电网调峰过程更具清洁性、高效性和更高的能源利用率。制氢容量的合理配置是发挥电制氢技术参与电网调峰优势的关键。电制氢设备的固有响应延迟问题也受到了广泛关注，PEM 虽具有较好的响应功率变化的能力，但是其高成本是限制大规模发展的主要因素。采取电化学储能耦合电制氢调峰是一种新兴的解决方案。未来需要继续开发高效率、低成本、具备快速响应能力的电制氢设备，并合理规划电制氢-储氢及电化学储能的容量配置，有望实现更高效、经济和清洁的电网调峰技术路线。

3.2　参与支撑电网电压、频率

风、光电力具有波动性，高比例新能源机组并网会影响传统电网的电压、频率特性与稳定性，因此需要设计相应的电压、频率支撑策略。常用的新能源并网的电压、频率支撑策略[119-121]如表 5 所示。

另外，由于风电机组相比于传统无功补偿装置具有更强的功率可控性及快速响应特性，因此通过合理设计变流器可以实现对输出有功及无功的解耦，为电网提供实时支撑[120]。其次，也可以通过合理设计下垂控制[119]、虚拟同步机[122]等并网控制策略，提升电网的主动支撑能力，降低可再生能源并网对电网电压、频率稳定性的影响。

电解水制氢技术在电力系统的应用为高比例可再生能源并网的电压、频率支撑提供了新思路。由于出色的风光电力消纳能力，电制氢设备对于处理因新能源出力过剩而导致的电网电压、频率波动较为有效，通过对新能源电力的及时消纳降低功率波动对电网稳定性的影响。然而当电网负荷侧处于用电高峰时，若出现电网功率扰动的情况，例如由于风电机组连锁脱网导致新能源出力骤减，单纯靠电制氢设备与电网耦合不能有效缓解这一问题。由于新能源并网容量较大，连锁脱网会导致严重的电压、频率振荡，甚至可能会引发大规模停电。

表 5　常用的电网电压、频率支撑策略

Table 5　Common used power grid voltage and frequency support strategies

类型	电压支撑	频率支撑
策略	并联电容器；并联电抗器；安装同步调相机；安装静止无功补偿器；安装静止同步补偿器；安装有载调压变压器	一次调频、二次调频(通过调整调频机组的出力)

针对上述问题，需要将电解水制氢系统扩展为多源综合能源系统，降低新能源间歇性的影响。例如，将燃料电池作为备用电源[123]，利用预先储存的氢气为燃料电池提供燃料发电，缓解新能源机组脱网导致的功率波动对电网电压、频率的影响。又如文献[3]中构建了风机、燃料电池、电解槽和超级电容器综合能源系统，用于实现新能源并网功率实时无差跟踪负荷需求，维持直流母线电压稳定。文献[124]针对风储制氢电站中风电机组、电制氢装置的弱调频能力，提出了结合超级电容器的多能协同调频策略，提高了频率稳定性，保证了负荷在有限突增下系统频率跌落最大值不超过 0.4 Hz。

虽然通过功率的消纳与供给，保持发电侧与负荷侧的功率平衡可以较为有效地实现对电网电压、频率的支撑，但这些研究对电制氢设备参与下新能源制氢系统并网变流器的拓扑结构研究较少，在弱电网下的电压、频率支撑能力有限。参考风电、光伏并网系统中较流行的构网型变流器拓扑、虚拟同步机及下垂控制等设计思路，引入到新能源制氢系统中可以进一步提升电制氢耦合系统的电压、频率支撑能力。例如，文献[125]构建了风电-碱性电解槽制氢并网系统的动态频率调节模型，设计了具有下垂控制策略的构网变流器为风电制氢系统提供可靠的频率支撑。文献[126]研究了大规模 PEM 电堆的快速频率响应能力，研究表明配备持续下垂控制的电解系统相比于传统的同步机，能够更有效地抑制电网频率波动，使系统在突发停电下的频率维持 49.4 Hz 以上、频率变化率下降 0.25 Hz/s。文献[127]提出了电流源型虚拟同步机控制策略，根据系统频率改变电制氢设备的制氢功率，实现暂态过程的惯量阻尼支撑及稳态时的一次频率调节，提升系统的频率稳定性。该控制策略表现出相比于下垂控制策略更平缓的频率变化。考虑到风电制氢系统接入弱电网下主动支撑能力较弱，文献[128]提出了基于构网型储能虚拟同步机和虚拟直流电机的双虚拟电机控制策略，搭建了风电-碱性电解槽-储能系统。该系统在变风速场景下的电压变化范围小、频率波动小于 0.1 Hz，且在无功扰动下电压十分稳定，表明构网型双虚拟电机控制策略具备增强风电制氢系统电压、频率支撑的能力，改善了制氢系统直流母线的电压波动。

新能源制氢系统中的核心组件为电解水制氢设备，电制氢设备并网所需的变流器根据应用场景不同一般包括：以交流母线作为电源，采用整流器；以直流母线作为电源，采用直流-直流变换器。文献[129-130]中较为详细的总结了应用于制氢系统变流器的拓扑结构，如三相桥式整流器、升降压转换器等。通过改进传统的电制氢设备并网变流器如三相桥的结构，可以在提升电网电能质量的同时保证较高的制氢效率。图 7 展示了一种新型混合整流器的设计思路，为主整流器附加具有吸收交流母线电流谐波，维持母线电压能力的辅助变流器，保证了高效电解制氢下的网侧电能质量[131]。

运用于新能源电制氢系统的构网型控制及虚拟同步机控制策略的研究开辟了电解水制氢技术参与支撑电网电压、频率的新方法。但研究尚处于起步阶段，是未来电氢耦合系统并网控制的重点研究方向。另外，针对不同电制氢设备的特性，相应并网变流器的结构改进升级可以进一步提升电网的电能质量，同时保障高效的制氢能力。相关领域的研究较少，将是未来电制氢设备并网领域的研究热点。

根据前文讨论的内容，表 6 进一步总结了电制氢技术参与电网调峰、支撑电网电压、频率相较于

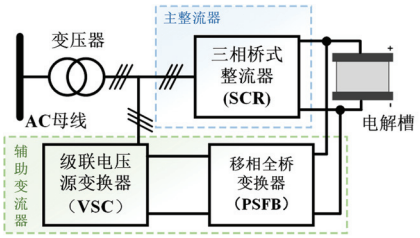


图 7 水电解槽混合整流器的改进方案

Fig.7 Improved hybrid rectifier scheme for water electrolyzer

表 6 电制氢技术参与电网支撑的现状与优势

Table 6 Current status and advantages of hydrogen production technology in grid support

电网支撑方面	传统策略的不足	电制氢参与支撑电网的优势
峰谷调节[101-104]	调峰机组：火电—排放污染较大；水电—受气候影响大，调峰受限；风光—波动性，间歇性，易造成能源浪费	提升电网清洁性：电制氢—储氢的环保性、绿氢的可持续性； 提升能源利用率：风光消纳，降低弃电，氢能受气候影响小；
电压、频率支撑[123-131]	调压：依赖大量无功功率补偿设备，且调节范围有限 调频机组：火电—不环保；水电—气候依赖；核电—安全	提升电网灵活性：综合能源系统的灵活调节能力与强适应性； 提升电网智能性：变流器及控制算法的优化设计、强鲁棒性

传统方式的优势。在参与电网调峰、调压与调频方面，电制氢技术往往不是独自发挥作用的。除了消纳新能源电力以降低电网功率波动外，电制氢可以在综合能源系统中通过功率的消纳与供给来稳定电网电压、频率。此外，为了更好发挥电制氢技术支撑电网的独特优势，需要优化新能源制氢系统中的变流器设计，使电制氢技术与其他储能和发电环节更加有效耦合。总之，通过经济性分析、寻优算法合理配置电制氢容量[109-110]、结合储能环节或技术革新升级来解决响应延迟[111-118]以及加强新能源制氢系统变流器方面的研究[125-131]，是未来电制氢技术参与支撑电网的关键研究方向。考虑到电制氢和氢储能的的清洁性、高效性，未来电氢协同技术为核心的新能源制氢-储能-发电系统将成为新型电力系统中的重要组成部分。

4　未来展望

4.1　面临的挑战

电解水制氢技术作为全球能源结构转型升级的重要组成部分，是提升新型电力系统能源消纳能力、保障电网稳定性的有效途径。然而，当前该技术在发展过程中仍面临诸多挑战。综合本文讨论的内容，电解水制氢技术的推广亟需解决以下难题，同时也是未来研究需要突破的关键。

1）各项电解水技术发展不均衡：不论是电解装置本身，还是配套的 BOP 系统设计，AWE 与 PEM 两种电解水技术相对较为成熟；而 AEM、SOEC 与 MWE 距离大规模商业化有着不同程度的差距，考虑到这 3 种技术的独特优势与适用场景，未来应加快攻克相关领域的关键技术难题，积极推进技术落地并实现初步应用。

2）规模化程度与基础设施水平较低：受制于高昂的投资成本，国内电解水系统的部署还有很大的提升空间。制氢及配套的储-运-加氢环节的建设需要提速，加快氢气生产与应用之间的衔接。

3）系统集成管理的复杂性升高：高比例可再生能源接入电网已经加剧了能源系统调度的管理难度，电制氢设备的并入将进一步增加系统的复杂性。如何处理电制氢设备与电网之间的复杂耦合关系，确保多能联产结构下系统的供需平衡，同时满足新型电力系统在智能化、清洁化和高效性等方面的需求，是当前研究的重点和难点。

4.2　电解水制氢技术的未来发展路线

全球各国对清洁能源的关注度日益提升，电解水制氢的市场需求将持续增长。就目前主流的电解水制氢技术而言，AWE 与 PEM 最为成熟，已成为近期电解水制氢装机容量提升的主力军。为了进一步推广 AWE 与 PEM 的应用，AWE 需要注重系统转化效率及制氢纯度的提升，可以设计如模糊控制等先进的系统控制策略优化气压与电解液循环速度[132]；而对于 PEM 需关注复合石墨双极板的研制[133]，可以在保证良好性能的同时降低膜电极成本，另外低贵金属载量的催化剂应得到重视[134]，或开发更低成本的 Ru 基催化剂[135]，降低 PEM 对 Ir 基催化剂的依赖。

AEM、SOEC 及 MWE 起步相对较迟，但同样具备商业化应用的潜力：AEM 结合了 AWE 低成本与 PEM 膜结构的优点，但复杂工况下离子电导率与物理化学稳定性不足的问题亟待解决[31]；SOEC 具有全固态和高效率的优势，另外具备制氢-发电双向运行功能的可逆固体氧化物电池拓宽了 SOEC 的应用范围[136]，但大规模推广前需首先解决高温电池可靠性的问题[137]；MWE 的结构更为简单，如何将流动电解、分布电解两种典型模式[138]从理论级推向应用级是 MWE 发展的主攻方向。

由于各种技术存在差异性，具体发展路线有所不同，但低成本、长寿命、高纯度、高效率、安全性及大容量是各种电制氢设备优化升级的共同目标。另外，宽功率运行范围体现着电制氢设备承载功率波动幅度的能力；动态响应速度反映了电制氢设备响应功率波动的及时性；智能化监测设备的配置可以协助实现电制氢设备的故障诊断及远程监控，这几个方面的研究将从更深层、更多维增强电制氢系统的综合性能。

4.3　激发电解水制氢技术的应用潜能

电解水制氢技术在构建新型电力系统方面具有广阔的应用前景和巨大的价值空间。电氢协同技术耦合气网、热网构成多能流的综合能源系统，可以实现各能源间的灵活调度；通过电-热-氢的多联产，各能源形式得以协同生产和供应，实现智慧供热、发电及储能，有效提升能源利用率和系统经济性，提升对新型电力系统的支撑能力。

为了优化电-气-热-氢综合能源系统的协同作用，辅助电力系统运行，气网耦合中输氢管材易氢脆的问题值得注意。此外，氢气甲烷化的技术路线

因其突出的降碳减排效果而备受关注，但高成本却限制了该技术路线的推广。依托政策支持，通过多目标优化调度，可实现气网掺氢与甲烷化并行下的容量合理配置，从而提升整体经济性。

电解水制氢技术参与支撑电网相比于传统方式更具清洁性、灵活性。电制氢可以结合氢储能、燃料电池或与风/光/火/水/电化学储能机组等耦合建立多源调峰系统，提升电力调度的灵活性。除具有良好的处理波动功率的能力外，电制氢设备为核心的制氢-发电系统也可以参与提升电网稳定性。目前电制氢设备连接新能源机组的电力电子变流器已有初步的研究，但如何通过并网变流器的合理设计提升新能源制氢系统在弱电网下的支撑能力仍需要进一步探究。构网型变流器的设计将降低电网电压、频率波动对电氢系统制氢稳定性的影响，抑制电压、频率发生更大扰动。另外构网型变流器仍存在限流能力弱、故障率相对较高的问题，这在风光发电系统中尚未完全解决，电制氢设备的并入将进一步增加系统的复杂性，是未来研究的关键和难点。

5 结论

氢能是推动新型电力系统清洁化的重要支撑环节，电解水制氢技术将成为能源结构转型的关键，在促进新能源消纳、稳定电网运行方面具备很大的潜力。本文首先系统梳理了电制氢技术的发展现状，依次从核心技术、电堆集成与系统架构 3 个层面，分析了各种电制氢技术的原理特性、性能指标。总体上，不同技术各具特色但发展并不均衡，为了推进产业化进程需要分别优化如稳定性、成本及效率等。基于电解水技术的特性与优势，本文分析了其在综合能源系统构建与电网支撑中的应用机遇与挑战。除了对电制氢技术的革新升级，还需格外关注其参与多联产、多源调峰以及辅助设施等方面的研究。最后，结合当前发展瓶颈与研究难点，展望了未来发展的趋势。本文旨在总结电解水制氢技术的研究现状、应用进展及发展面临的关键问题，为后续研究提供参考与借鉴。

参考文献 References

[1] 黄炜栋，李 杨，李璟延，等. 考虑可再生能源不确定性的风-光-储-蓄多时间尺度联合优化调度[J]. 电力自动化设备，2023，43(4)：91-98.
HUANG Weidong, LI Yang, LI Jingyan, et al. Multi-time scale joint optimal scheduling for wind-photovoltaic-electrochemical energy storage-pumped storage considering renewable energy uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 91-98.

[2] 田雪沁，冯亚杰，袁铁江，等. 考虑电氢负荷柔性的多堆电解槽优化运行[J]. 电网技术，2025，49(1)：84-92.
TIAN Xueqin, FENG Yajie, YUAN Tiejiang, et al. Optimal operation of multi alkaline electrolyzers considering flexible electrical and hydrogen load[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 84-92.

[3] 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.

[4] 王浩元，别朝红. 考虑不确定性物理边界的灵活爬坡备用分布鲁棒经济调度[J]. 电力自动化设备，2023，43(10)：59-68.
WANG Haoyuan, BIE Zhaohong. Distributionally robust economic dispatch of flexible ramping reserve considering physical boundaries of uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 59-68.

[5] 舒印彪，陈国平，贺静波，等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.

[6] 余志鹏，林 今，雷金勇，等. 考虑火电掺氢氨燃烧发电的受端电力系统多阶段减碳规划[J]. 电力系统自动化，2025，49(5)：57-68.
YU Zhipeng, LIN Jin, LEI Jinyong, et al. Multi-stage decarbonization planning for receiving-end power systems considering thermal power generation with hydrogen-ammonia cofiring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5): 57-68.

[7] 陈晓云，赵 明，郭新良，等. 欧洲国家电转气发展现状及其对云南省电转气产业发展的启示[J]. 电力需求侧管理，2020，22(2)：96-100.
CHEN Xiaoyun, ZHAO Ming, GUO Xinliang, et al. Development status of power-to-gas in Europe and its enlightenment to the development of power-to-gas industry in Yunnan province[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(2): 96-100.

[8] TOUGHZAOUI Y, ELKHATIB R, KAOUTARI T, et al. Advances in hospital energy systems: genetic algorithm optimization of a hybrid solar and hydrogen fuel cell combined heat and power[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 86: 1310-1325.

[9] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 《中国的能源转型》白皮书[EB/OL]. [2024-08-29]. http://www.scio.gov.cn/zfbps/zfbps_2279/202408/t20240829_860395. html.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. The white paper "China's Energy Transition"[EB/OL]. [2024-08-29]. http://www.scio.gov.cn/zfbps/zfbps_2279/202408/t20240829_860395. html.

[10] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 产业结构调整指导目录(2024 年本)[EB/OL]. [2024-12-27]. https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo. jsp?id=20305.
National Development and Reform Commission. Guidance catalogue for industrial restructuring (2024 edition)[EB/OL].[2024-12-27]. https://zfxxgk. ndrc. gov. cn/web/iteminfo. jsp?id=20305.

[11] 中商情报网. 2024 年中国电解水制氢产业链图谱研究分析[EB/OL].[2024-12-19]. https://www.askci.com/news/chanye/20241219/083355273456843540604554. shtml.
AskCI. Research and analysis of the industrial chain diagram of hydrogen production from electrolytic water in China in 2024 [EB/OL]. [2024-12-19]. https://www.askci.com/news/chanye/20241219/083355273456843540604554. shtml.

[12] LÜ Z M, CHEN G, WEI K, et al. Preparation and performance evalua-

tion of low temperature SOEC using lithium compounds as electrodes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 55: 386-393.

[13] SUMI H. Co-electrolysis SOEC and internal reforming SOFC for achieving a carbon-neutral society[J]. RSC Sustainability, 2024, 2(5): 1568-1579.

[14] SWIEGERS G F, HOANG A L, HODGES A, et al. Current status of membraneless water electrolysis cells[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2022, 32: 100881.

[15] MANZOTTI A, QUATTROCCHI E, CURCIO A, et al. Membraneless electrolyzers for the production of low-cost, high-purity green hydrogen: a techno-economic analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115156.

[16] HAM K, BAE S, LEE J. Classification and technical target of water electrolysis for hydrogen production[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 95: 554-576.

[17] LIU C, GENG Z, WANG X K, et al. Development of advanced anion exchange membrane from the view of the performance of water electrolysis cell[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 90: 348-369.

[18] NIBLETT D, DELPISHEH M, RAMAKRISHNAN S, et al. Review of next generation hydrogen production from offshore wind using water electrolysis[J]. Journal of Power Sources, 2024, 592: 233904.

[19] EL-SHAFIE M. Hydrogen production by water electrolysis technologies: a review[J]. Results in Engineering, 2023, 20: 101426.

[20] LO BASSO G, MOJTAHED A, PASTORE L M, et al. High-temperature green hydrogen production: a innovative-application of SOEC coupled with AEC through sCO_2 HP[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 52: 978-993.

[21] LI W, TIAN H C, MA L, et al. Low-temperature water electrolysis: fundamentals, progress, and new strategies[J]. Materials Advances, 2022, 3(14): 5598-5644.

[22] 陈晗钰，周晓亮，刘立敏，等. 质子导体固体电解池电解水制氢研究进展[J]. 综合智慧能源，2022，44(8)：75-85.
CHEN Hanyu, ZHOU Xiaoliang, LIU Limin, et al. Research progress of hydrogen production from water electrolysis in proton-conducting solid electrolytic cells[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(8): 75-85.

[23] BIAN L Z, DUAN C C, WANG L J, et al. An all-oxide electrolysis cells for syngas production with tunable H_2/CO yield via co-electrolysis of H_2O and CO_2[J]. Journal of Power Sources, 2021, 482: 228887.

[24] LIANG J J, ZHU J Z, HAN M F, et al. The development of solid oxide co-electrolysis of H_2O and CO_2 on large-size cells and stacks[J]. iEnergy, 2023, 2(2): 109-118.

[25] SAADA H, FABRE B, LOGET G, et al. Is direct seawater splitting realistic with conventional electrolyzer technologies?[J]. ACS Energy Letters, 2024, 9(7): 3351-3368.

[26] YAN X Y, BIEMOLT J, ZHAO K, et al. A membrane-free flow electrolyzer operating at high current density using earth-abundant catalysts for water splitting[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 4143.

[27] DAVIS J T, QI J, FAN X R, et al. Floating membraneless PV-electrolyzer based on buoyancy-driven product separation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(3): 1224-1238.

[28] MANZOTTI A, ROBSON M J, CIUCCI F. Recent developments in membraneless electrolysis[J]. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2023, 40: 100765.

[29] ZHENG X X, BÖTTGER A J, JANSEN K M B, et al. Aging of polyphenylene sulfide-glass composite and polysulfone in highly oxidative and strong alkaline environments[J]. Frontiers in Materials, 2020, 7: 610440.

[30] LEE J W, LEE C S, LEE J H, et al. Cerium oxide-polysulfone composite separator for an advanced alkaline electrolyzer[J]. Polymers, 2020, 12(12): 2821.

[31] 钱圣涛，何　勇，翁武斌，等. 阴离子交换膜电解水制氢技术的研究进展[J]. 新能源进展，2024，12(1)：1-14.
QIAN Shengtao, HE Yong, WENG Wubin, et al. Research progress of anion exchange membrane water electrolysis technology for hydrogen production[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2024, 12(1): 1-14.

[32] ZAKARIA Z, KAMARUDIN S K. A review of alkaline solid polymer membrane in the application of AEM electrolyzer: materials and characterization[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(13): 18337-18354.

[33] PARK E J, MAURYA S, HIBBS M R, et al. Alkaline stability of quaternized Diels-Alder polyphenylenes[J]. Macromolecules, 2019, 52(14): 5419-5428.

[34] BUGGY N C, DU Y F, KUO M C, et al. A polyethylene-based triblock copolymer anion exchange membrane with high conductivity and practical mechanical properties[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2020, 2(3): 1294-1303.

[35] LIU D, LIN L M, XIE Y J, et al. Anion exchange membrane based on poly(arylene ether ketone) containing long alkyl densely quaternized carbazole derivative pendant[J]. Journal of Membrane Science, 2021, 623: 119079.

[36] 付凤艳，程敬泉，张　杰，等. 基于阳离子交换基团的阴离子交换膜研究进展[J]. 应用化学，2020，37(10)：1112-1126.
FU Fengyan, CHENG Jingquan, ZHANG Jie, et al. Recent development in ionic exchange groups-based anion exchange membrane[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2020, 37(10): 1112-1126.

[37] OGUNGBEMI E, IJAODOLA O, KHATIB F N, et al. Fuel cell membranes-Pros and cons[J]. Energy, 2019, 172: 155-172.

[38] XI Q Y, ZHANG M G, WANG L L, et al. Construction of X-Co-tri@SSNF reinforced PPS composite proton exchange membranes and their performance in fuel cells[J]. Journal of Membrane Science, 2024, 708: 123078.

[39] 李德胜，郭　虎，胡莹珍，等. 固体氧化物电解池关键材料及其海水电解研究进展[J]. 硅酸盐学报，2023，51(10)：2712-2726.
LI Desheng, GUO Hu, HU Yingzhen, et al. Research progress on key components and seawater electrolysis of solid oxide electrolytic cell[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(10): 2712-2726.

[40] EMAM A S, HAMDAN M O, ABU-NABAH B A, et al. A review on recent trends, challenges, and innovations in alkaline water electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 64: 599-625.

[41] LUO X J, REN C H, SONG J, et al. Design and fabrication of bipolar plates for PEM water electrolyser[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 146: 19-41.

[42] MILLER H A, BOUZEK K, HNAT J, et al. Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating conditions[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2020, 4(5): 2114-2133.

[43] 李丹枫，褚晓萌，刘　磊. 绿氢领域电解水制氢聚合物膜材料研究进展及发展建议[J]. 科学通报，2022，67(27)：3282-3295.
LI Danfeng, CHU Xiaomeng, LIU Lei. Polymeric membrane materials for green hydrogen production by water electrolysis: progress and suggestions for future development[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(27): 3282-3295.

[44] 李思颖，易　俊，林伟芳. 质子交换膜电制氢负荷协同储能参与电力系统调峰能力评估[J]. 电网技术，2025，49(2)：552-561.
LI Siying, YI Jun, LIN Weifang. Proton exchange membrane hydrogen production load collaborates with energy storage to participate in the evaluation of peak load balancing capacity of power system[J]. Power

System Technology, 2025, 49(2): 552-561.

[45] JANßEN H, HOLTWERTH S, ZWAYGARDT W, et al. A facile and economical approach to fabricate a single-piece bipolar plate for PEM electrolyzers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 49: 816-828.

[46] MORANTI A, RIVA F, BACHMANN T M, et al. Environmental performance of a metal-supported protonic ceramic cell and an electrolyte-supported solid oxide cell for steam electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 92: 1284-1297.

[47] NORMAN E A, MAESTRE V M, ORTIZ A, et al. Steam electrolysis for green hydrogen generation. State of the art and research perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 202: 114725.

[48] CHOI Y, BYUN S, SEO D W, et al. New design and performance evaluation of 1 kW-class reversible solid oxide electrolysis-fuel cell stack using flat-tubular cells[J]. Journal of Power Sources, 2022, 542: 231744.

[49] 葛书强，杨中桂，白 洁，等. 可再生能源制氢技术及其主要设备发展现状及展望[J]. 太原理工大学学报，2024，55(5)：759-787.
GE Shuqiang, YANG Zhonggui, BAI Jie, et al. Development status and prospect of hydrogen production technology by renewable energy and its main equipment[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2024, 55(5): 759-787.

[50] ZHAO P C, WANG J G, SUN L M, et al. Optimal electrode configuration and system design of compactly-assembled industrial alkaline water electrolyzer[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 299: 117875.

[51] SALEHMIN M N I, HUSAINI T, GOH J, et al. High-pressure PEM water electrolyser: a review on challenges and mitigation strategies towards green and low-cost hydrogen production[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 268: 115985.

[52] NYHUS A H, YLIRUKA M, SHAH N, et al. Green ethylene production in the UK by 2035: a techno-economic assessment[J]. Energy & Environmental Science, 2024, 17(5): 1931-1949.

[53] XING X T, LIN J, SONG Y H, et al. Intermodule management within a large-capacity high-temperature power-to-hydrogen plant[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1432-1442.

[54] ZHANG W Z, ZHUO Y H, HAO P X, et al. Flexible endothermic or exothermic operation for temperature-oriented alkaline water electrolysis[J]. Cell Reports Physical Science, 2024, 5(4): 101900.

[55] HÖGLINGER M, KARTUSCH S, EDER J, et al. Advanced testing methods for proton exchange membrane electrolysis stacks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 77: 598-611.

[56] SCHROPP E, CAMPOS-CARRIEDO F, IRIBARREN D, et al. Environmental and material criticality assessment of hydrogen production via anion exchange membrane electrolysis[J]. Applied Energy, 2024, 356: 122247.

[57] TERA I, ZHANG S G, LIU G L. A conceptual hydrogen, heat and power polygeneration system based on biomass gasification, SOFC and waste heat recovery units: energy, exergy, economic and emergy (4E) assessment[J]. Energy, 2024, 295: 131015.

[58] 阳光电源. 阳光氢能“突围”碱性电解槽[EB/OL].[2024-08-09]. https://www.sungrowpower.com/press/1366. html.
Sungrowpower. Sungrowpower hydrogen energy “breakout” alkaline electrolytic cell[EB/OL].[2024-08-09]. https://www.sungrowpower.com/press/1366. html.

[59] 碳索氢能. HydrogenPro 为犹他州的储氢中心提供 220 MW 碱性电解槽[EB/OL]. [2024-10-08]. https://mh2.solarbe.com/news/20231008/1616. html.
Solarbe. HydrogenPro provides 220MW alkaline electrolyzers for a hydrogen storage center in Utah[EB/OL]. [2023-10-08]. https://mh2.solarbe. com/news/20231008/1616. html.

[60] ČUČUK A. Verdagy opens gigawatt-scale electrolyzer facility in US[EB/OL].[2024-10-28]. https: //www.offshore-energy.biz/verdagy-opens-gigawatt-scale-electrolyzer-facility-in-us/.

[61] 国际氢能网. 500 兆瓦产能！首台制氢产品上线！康明斯恩泽 PEM 制氢设备生产基地投产[EB/OL].[2024-05-04]. https://h2.in-en.com/html/h2-2424632. shtml.
H2in-en. 500 megawatts of capacity! The first hydrogen production product online! Cumminsenze PEM hydrogen production plant production base[EB/OL].[2024-05-04]. https://h2.in-en.com/html/h2-2424632. shtml.

[62] 搜狐网. 西门子能源在柏林正式启用 1GW 氢气电解槽工厂[EB/OL].[2024-11-10]. http://news.sohu.com/a/735315619_121824195.
Sohu. Siemens energy officially opened its 1GW hydrogen electrolyzer plant in Berlin[EB/OL].[2024-11-10]. http://news.sohu.com/a/735315619_121824195.

[63] 国际氢能网. 年产 1GW！兴燃科技 250 标方 PEM 电解槽下产线[EB/OL].[2024-11-08]. https：//h2. in-en. com/html/h2-2439460. shtml.
H2in-en. Annual output of 1GW! Xingran Keji 250 standard square PEM electrolytic cell lower production line[EB/OL].[2024-11-08]. https: //h2. in-en. com/html/h2-2439460. shtml.

[64] 搜狐网. 重磅新跨越，亿纬氢能发布全球首台 100 kW AEM 电解槽[EB/OL].[2024-03-28]. https://www.sohu.com/a/767462515_120717004.
Sohu. New breakthrough, Yiwei hydrogen energy released the world's first 100 kW AEM electrolytic cell[EB/OL].[2024-03-28]. https: //www. sohu. com/a/767462515_120717004.

[65] Agastya. Agastya Modular 1 MW AEM Stack for single- and multi-core applications[EB/OL].[2025-01-01]. https://agastyah2.com/1-mw-aem-electrolyser/.

[66] 国际氢能网. 年产能可达 100 MW！电堆额定功率 2.5 kW！国内首条 SOEC 电堆自动化产线下线！[EB/OL]. [2024-04-26]. https://h2.in-en. com/html/h2-2424515. shtml.
H2in-en. Annual capacity up to 100 MW! The rated power of the reactor is 2.5 kW! The first SOEC reactor automation line in China![EB/OL].[2024-04-26]. https://h2.in-en. com/html/h2-2424515. shtml.

[67] PV Magazine. Thermax enters SOEC technology license agreement with UK’s Ceres[EB/OL]. [2024-09-12]. https://www.pv-magazine-india.com/2024/09/12/thermax-enters-soec-technology-agreement-with-uks-ceres/.

[68] 世纪新能源网. 氢云直上科技推出无膜电解槽，绿氢制取成本可降低 30% 以上[EB/OL]. [2024-09-18]. https://www.ne21.com/news/show-200941. html.
Century New Energy Network. Qingyunzhishang Technology company launched a film free electrolyzer, green hydrogen production cost can be reduced by more than 30%[EB/OL].[2024-09-18]. https://www.ne21. com/news/show-200941. html.

[69] 王明华. 新能源电解水制氢技术经济性分析[J]. 现代化工，2023，43(5)：1-5.
WANG Minghua. Technical economic analysis on hydrogen production from water electrolysis by new energy[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(5): 1-5.

[70] 李 争，张 蕊，孙鹤旭，等. 可再生能源多能互补制-储-运氢关键技术综述[J]. 电工技术学报，2021，36(3)：446-462.
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): 446-462.

[71] 孔莹莹，崔继彤，韩 辉，等. 国内外氢气管道输送技术标准对比与探讨[J]. 油气储运，2023，42(8)：944-951.
KONG Yingying, CUI Jitong, HAN Hui, et al. Comparative analysis

and discussion on domestic and foreign technical standards for hydrogen pipeline transportation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 944-951.

[72] YANG P, WANG T, SHENG Y H, et al. Recent advances in hydrogen process safety: deflagration behaviors and explosion mitigation strategies[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 188: 303-316.

[73] 陈　卓，李敬法，宇　波. 室内受限空间中掺氢天然气爆炸模拟[J]. 科学技术与工程，2022，22(14)：5608-5614.
CHEN Zhuo, LI Jingfa, YU Bo. Simulation of explosion of hydrogen-enriched natural gas in indoor confined space[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14): 5608-5614.

[74] MOLNARNE M, SCHROEDER V. Hazardous properties of hydrogen and hydrogen containing fuel gases[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 130: 1-5.

[75] 国际氢能网. 德国天然气管网掺氢达 20%，100%无故障试运营了六个月[EB/OL].[2024-05-30]. https://h2. in-en. com/html/h2-2425514. shtml.
H2in-en. The German natural gas pipeline network doped hydrogen up to 20%, 100% trouble-free test operation for six months [EB/OL].[2024-05-30]. https://h2.in-en.com/html/h2-2425514. shtml.

[76] MENG B, GU C H, ZHANG L, et al. Hydrogen effects on X80 pipeline steel in high-pressure natural gas/hydrogen mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(11): 7404-7412.

[77] 刘　方，杨宏伟，邓付洁. 掺氢天然气输送用 X52 管线钢的氢脆行为研究[J]. 油气与新能源，2024，36(3)：30-35，59.
LIU Fang, YANG Hongwei, DENG Fujie. Research on hydrogen embrittlement behavior of X52 pipeline steel for hydrogen doped natural gas transportation[J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(3): 30-35, 59.

[78] JIA G W, LEI M Y, LI M Y, et al. Hydrogen embrittlement in hydrogen-blended natural gas transportation systems: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(82): 32137-32157.

[79] GÖTZ M, LEFEBVRE J, MÖRS F, et al. Renewable Power-to-Gas: a technological and economic review[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 1371-1390.

[80] PARK S, CHOI K, LEE C, et al. Techno-economic analysis of adiabatic four-stage CO_2 methanation process for optimization and evaluation of power-to-gas technology[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(41): 21303-21317.

[81] 高鹏飞，周孝信，杨小煜，等. 考虑氢气注入的电-气综合能源系统电制气设备容量规划[J]. 电网技术，2021，45(10)：3781-3790.
GAO Pengfei, ZHOU Xiaoxin, YANG Xiaoyu, et al. Optimal capacity planning of power-to-gas in the integrated electricity and natural gas systems considering hydrogen injections[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3781-3790.

[82] GORRE J, RUOSS F, KARJUNEN H, et al. Cost benefits of optimizing hydrogen storage and methanation capacities for Power-to-Gas plants in dynamic operation[J]. Applied Energy, 2020, 257: 113967.

[83] 孙惠娟，胡紫平，彭春华，等. 含氢综合能源系统多目标最优折中分布鲁棒低碳调度[J]. 电力自动化设备，2025，45(4)：16-24，42.
SUN Huijuan, HU Ziping, PENG Chunhua, et al. Multi-objective optimal compromise distributionally robust low-carbon scheduling of hydro gen integrated energy systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(4): 16-24, 42.

[84] CCSA. A Europe-wide CO_2 market can reduce storage costs by 20%[EB/OL].[2024-12-04]. https://www.ccsassociation.org/all-news/a-europe-wide-co2-market-can-reduce-storage-costs-by-20-2/.

[85] 罗　潇，任洲洋，温紫豪，等. 考虑氢能系统热回收的电氢区域综合能源系统日前优化运行[J]. 电工技术学报，2023，38(23)：6359-6372.
LUO Xiao, REN Zhouyang, WEN Zihao, et al. A day-ahead dispatching method of regional integrated electric-hydrogen energy systems considering the heat recycle of hydrogen systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6359-6372.

[86] DAI Z C, JIN C, DING L. Proposal and simulation of a geothermal-driven water electrolysis unit integrated with a CO_2 methanation process toward a novel sustainable framework[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 446: 141393.

[87] 崔　杨，闫　石，仲悟之，等. 含电转气的区域综合能源系统热电优化调度[J]. 电网技术，2020，44(11)：4254-4263.
CUI Yang, YAN Shi, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal thermoelectric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4254-4263.

[88] 郑连华，文　中，邱智武，等. 计及光热电站和氢储能的综合能源系统低碳优化运行[J]. 电测与仪表，2025，62(2)：9-15，34.
ZHENG Lianhua, WEN Zhong, QIU Zhiwu, et al. Low-carbon optimized operation of integrated energy system considering solar thermal power plants and hydrogen storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(2): 9-15, 34.

[89] 李　湃，黄越辉，张金平，等. 多能互补发电系统电/热/氢储能容量协调优化配置[J]. 中国电机工程学报，2024，44(13)：5158-5168.
LI Pai, HUANG Yuehui, ZHANG Jinping, et al. Capacity coordinated optimization of battery, thermal and hydrogen storage system for multi-energy complementary power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5158-5168.

[90] 黄冬梅，陈柯翔，孙锦中，等. 含电解制氢装置及光热电站的海岛微网优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报，2022，34(11)：24-31.
HUANG Dongmei, CHEN Kexiang, SUN Jinzhong, et al. Dispatch optimization of island microgrid with electrolytic hydrogen unit and CSP station[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(11): 24-31.

[91] 张雪松，陈　杨，倪筹帷，等. 考虑多类型电解槽差异化特征的分布式电热氢系统优化设计[J]. 浙江电力，2024，43(4)：1-11.
ZHANG Xuesong, CHEN Yang, NI Chouwei, et al. Optimal design of distributed electric-thermal-hydrogen energy systems considering differentiated features of multi-type electrolyzers[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(4): 1-11.

[92] 刘朝蓬，王海云，王维庆，等. 基于多运行场景与富氧燃烧捕集技术的低碳能源系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(23)：115-129.
LIU Zhaopeng, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Capacity optimization of low carbon energy systems based on multiple operating scenarios and oxygen-enriched combustion capture technology[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 115-129.

[93] SKORDOULIAS N, KOYTSOUMPA E I, KARELLAS S. Techno-economic evaluation of medium scale power to hydrogen to combined heat and power generation systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(63): 26871-26890.

[94] KHALIGH V, GHEZELBASH A, ZAREI M, et al. Efficient integration of alkaline water electrolyzer-a model predictive control approach for a sustainable low-carbon district heating system[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 292: 117404.

[95] 李金航，佟　曦，陈　衡，等. 含多类型储能的综合能源系统低碳经济运行双层优化方法研究[J]. 动力工程学报，2024，44(3)：498-508.
LI Jinhang, TONG Xi, CHEN Heng, et al. Research on two-layer optimization method for low-carbon and economic operation of integrated energy system with multiple types of energy storage[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 498-508.

[96] WANG J B, WEN J F, WANG J R, et al. Water electrolyzer operation scheduling for green hydrogen production: a review[J]. Renewable and

Sustainable Energy Reviews, 2024, 203: 114779.

[97] ZENG R, TANG X L, DENG Y, et al. Design and optimization of solar energy system with hydrogen energy storage and alkaline fuel cell[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 295: 117628.

[98] 赵 波，王成山，张雪松. 海岛独立型微电网储能类型选择与商业运营模式探讨[J]. 电力系统自动化，2013，37(4)：21-27.
ZHAO Bo, WANG Chengshan, ZHANG Xuesong. A survey of suitable energy storage for island stand-alone microgrid and commercial operation mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 21-27.

[99] HÖBER M, KÖNIGSHOFER B, BOŠKOSKI P, et al. Diesel operated combined heat and power SOFC system: SOFC characterization and proof of concept[J]. Journal of Power Sources, 2023, 585: 233635.

[100] 袁小明，程时杰，胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报，2016，36(19)：5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.

[101] 李 铁，李正文，杨俊友，等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J]. 电网技术，2020，44(10)：3622-3630.
LI Tie, LI Zhengwen, YANG Junyou, et al. Coordination and optimal scheduling of multi-energy complementary system considering peak regulation initiative[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3622-3630.

[102] 侯文庭，韦 化. 考虑核电可调度性的风-光-核-水-火多源协调短期优化调度[J]. 电工技术学报，2018，33(12)：2873-2882.
HOU Wenting, WEI Hua. A multi-source coordinated short-term dispatch model considering the dispatchability of nuclear power plants[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12): 2873-2882.

[103] COLOMBO P, SAEEDMANESH A, SANTARELLI M, et al. Dynamic dispatch of solid oxide electrolysis system for high renewable energy penetration in a microgrid[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 204: 112322.

[104] 闫庆友，史超凡，秦光宇，等. 基于近端策略优化算法的电化学/氢混合储能系统双层配置及运行优化[J]. 电力建设，2022，43(8)：22-32.
YAN Qingyou, SHI Chaofan, QIN Guangyu, et al. Research on two-layer configuration and operation optimization based on proximal policy optimization for electrochemical/hydrogen hybrid energy storage system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8): 22-32.

[105] 宋 洁，邓占锋，徐桂芝，等. 煤炭制氢替代技术——质子交换膜水电解制氢技术及其衰减机理[J]. 煤炭科学技术，2022，50(6)：136-144.
SONG Jie, DENG Zhanfeng, XU Guizhi, et al. Substitution technology for hydrogen production from coal-proton exchange membrane water electrolysis technology for hydrogen production and its attenuation mechanism[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 136-144.

[106] KHAN F M N U, RASUL M G, SAYEM A S M, et al. Maximizing energy density of lithium-ion batteries for electric vehicles: a critical review[J]. Energy Reports, 2023, 9 Supplement 11: 11-21.

[107] KHAN H A, TAWALBEH M, ALJAWRNEH B, et al. A comprehensive review on supercapacitors: their promise to flexibility, high temperature, materials, design, and challenges[J]. Energy, 2024, 295: 131043.

[108] 杨胜春，吕建虎，郭晓蕊，等. 适应新型电力系统发展的多元灵活资源优化调度建模和分析[J]. 电网技术，2024，48(8)：3114-3121.
YANG Shengchun, LÜ Jianhu, GUO Xiaorui, et al. Modeling and analysis of multi flexible resource optimization scheduling for adapting to the development of new power systems[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3114-3121.

[109] 曹 炜，钟 厦，王海华，等. 制氢系统参与火电辅助调峰的容量配置优化[J]. 分布式能源，2020，5(2)：15-20.
CAO Wei, ZHONG Xia, WANG Haihua, et al. Optimal capacity allocation of hydrogen production system participating peak regulation for auxiliary with thermal power plant[J]. Distributed Energy, 2020, 5(2): 15-20.

[110] 许传博，赵云灏，王晓晨，等. 碳中和愿景下考虑电氢耦合的风光场站氢储能优化配置[J]. 电力建设，2022，43(1)：10-18.
XU Chuanbo, ZHAO Yunhao, WANG Xiaochen, et al. Optimal configuration of hydrogen energy Storage for wind and solar power stations considering electricity-hydrogen coupling under carbon neutrality vision[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 10-18.

[111] SAYED-AHMED H, TOLDY Á I, SANTASALO-AARNIO A. Dynamic operation of proton exchange membrane electrolyzers-critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 113883.

[112] 帅逸轩，赵培轩，刘慧敏，等. 基于多功率耦合的风光互补制氢系统容量配置优化方法[J]. 太阳能学报，2022，43(11)：474-481.
SHUAI Yixuan, ZHAO Peixuan, LIU Huimin, et al. Optimization of battery capacity for wind-solar complementary hydrogen production system under multi-power conditions[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(11): 474-481.

[113] 张文韬，周家辉，张润之，等. 计及能耗特性的风光制氢碱性电解槽集群优化策略[J]. 化工进展，2024，43(11)：6119-6128.
ZHANG Wentao, ZHOU Jiahui, ZHANG Runzhi, et al. Optimization strategy of wind and solar hydrogen production alkaline electrolyzer cluster considering energy consumption characteristics[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(11): 6119-6128.

[114] ARSAD S R, ARSAD A Z, KER P J, et al. Recent advancement in water electrolysis for hydrogen production: a comprehensive bibliometric analysis and technology updates[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 60: 780-801.

[115] 马丙泰，刘海涛，郝思鹏，等. 基于价格需求响应的储能系统退化成本模型研究[J]. 太阳能学报，2023，44(10)：531-540.
MA Bingtai, LIU Haitao, HAO Sipeng, et al. Research on degradation cost model of energy storage system based on Price demand response[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(10): 531-540.

[116] 卢一菲，陈 冲，梁立中. 基于电—氢混合储能的风氢耦合系统建模与控制[J]. 智慧电力，2020，48(3)：7-14.
LU Yifei, CHEN Chong, LIANG Lizhong. Modeling and control of wind-hydrogen coupling system based on electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 7-14.

[117] 王季康，李 华，张海龙，等. 计及储能响应特性的风氢混合并网控制[J]. 太阳能学报，2024，45(5)：400-411.
WANG Jikang, LI Hua, ZHANG Hailong, et al. Hybrid wind-hydrogen grid-connected control considering energy storage response[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(5): 400-411.

[118] 何 青，沈 轶. 风氢耦合储能系统技术发展现状[J]. 热力发电，2021，50(8)：9-17.
HE Qing, SHEN Yi. Development status of hydrogen energy storage system coupled wind power generation[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 9-17.

[119] 郑许林，袁 源，柏晶晶，等. 分布式光伏无功电压主动支撑控制方法[J]. 可再生能源，2023，41(12)：1685-1690.
ZHENG Xulin, YUAN Yuan, BAI Jingjing, et al. Active support control method of distributed photovoltaic reactive power and voltage[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(12): 1685-1690.

[120] 王渝红，宋雨妍，廖建权，等. 风电电压主动支撑技术现状与发展趋势[J]. 电网技术，2023，47(8)：3193-3205.
WANG Yuhong, SONG Yuyan, LIAO Jianquan, et al. Review and de-

velopment trends of DFIG-based wind power voltage active support technology[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3193-3205.

[121] 逄　林，陆　欣，武占侠，等. 基于虚拟同步电机的微电网二次调频技术[J]. 电气传动，2022，52(8)：8-13.
PANG Lin, LU Xin, WU Zhanxia, et al. Secondary frequency regulation technique based on virtual synchronous generator for microgrid[J]. Electric Drive, 2022, 52(8): 8-13.

[122] 李成翔，杜艳丽，朱益华，等. 基于风电机组频率主动支撑的多时间尺度调频控制策略[J]. 南方电网技术，2024，18(3)：83-92.
LI Chengxiang, DU Yanli, ZHU Yihua, et al. Multi-time scale frequency regulation control strategy based on frequency active support of wind turbines[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 83-92.

[123] 张　诚，檀志恒，晁怀颇. “双碳”背景下数据中心氢能应用的可行性研究[J]. 太阳能学报，2022，43(6)：327-334.
ZHANG Cheng, TAN Zhiheng, CHAO Huaipo. Feasibility study of hydrogen energy application on data center under “carbon peaking and neutralization” background[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(6): 327-334.

[124] 张玉莹，李　骥，许　雷，等. 风储制氢电厂的一次调频控制策略[J]. 哈尔滨理工大学学报，2024，29(1)：78-86.
ZHANG Yuying, LI Ji, XU Lei, et al. Research on primary frequency regulation control strategy of SCESS-DFIG-P2H generating station[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2024, 29(1): 78-86.

[125] HUANG C J, ZONG Y, YOU S, et al. Analytical modeling and control of grid-scale alkaline electrolyzer plant for frequency support in wind-dominated electricity-hydrogen systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(1): 217-232.

[126] 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.

[127] 冯　沛，余会明，聂工哲，等. 基于电流型虚拟同步机控制的电解制氢负荷主动调频策略[J]. 现代电力，2024，41(6)：1017-1022.
FENG Pei, YU Huiming, NIE Gongzhe, et al. Active frequency regulation strategy for electrolytic hydrogen production load based on current-type virtual synchronous machine control[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(6): 1017-1022.

[128] 贺　彬，任永峰，孟庆天，等. 基于构网型储能双虚拟电机控制的风电制氢系统[J/OL]. 高电压技术，2024：1-13[2024-03-17]. https://doi. org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20240212.
HE Bin, REN Yongfeng, MENG Qingtian, et al. Hydrogen production system by wind power based on dual virtual motor control for grid-forming energy storage[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-13[2024-03-17]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240212.

[129] BAHRAMI M, JAMSHIDPOUR E, BAYATI N, et al. Exploring power electronics converters for water electrolysis in microgrid applications: a comprehensive overview[C]//2023 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Chiang Mai, Thailand: IEEE, 2023: 1-5.

[130] 孔令国，宫　健，杨士慧，等. DC/DC 隔离型制氢电源发展现状与趋势[J]. 发电技术，2023，44(4)：443-451.
KONG Lingguo, GONG Jian, YANG Shihui, et al. Development status and trend of DC/DC isolated hydrogen production power supply[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 443-451.

[131] MENG X, CHEN M L, HE M Z, et al. A novel high power hybrid rectifier with low cost and high grid current quality for improved efficiency of electrolytic hydrogen production[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3763-3768.

[132] CHENG H R, YANGHONG X, WEI W, et al. Safety and efficiency problems of hydrogen production from alkaline water electrolyzers driven by renewable energy sources[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 54: 700-712.

[133] 李志杰，裴　淏，甘全全，等. 膨胀石墨基复合双极板的研制进展[J]. 电源技术，2024，48(10)：1875-1883.
LI Zhijie, PEI Hao, GAN Quanquan, et al. Development progress of expanded graphite based composite bipolar plates[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(10): 1875-1883.

[134] LI D, XU D Y, PEI Y H, et al. Isolated Octahedral Pt-Induced electron transfer to ultralow-content ruthenium-doped spinel Co_3O_4 for enhanced acidic overall water splitting[J]. Journal of the American Chemical Society, 2024, 146(42): 28728-28738.

[135] ZHAO G Q, GUO W, SHAN M M, et al. Metallic Ru-Ru interaction in ruthenium oxide enabling durable proton exchange membrane water electrolysis[J]. Advanced Materials, 2024, 36(20): 2404213.

[136] 冀承泽，宗　正，戈阳阳，等. 可逆固体氧化物电池电-氢双向瞬态转换特性及电流超调机制[J/OL]. 高电压技术，2024：1-9[2025-03-17]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20240432.
JI Chengze, ZONG Zheng, GE Yangyang, et al. Transient characteristics and current overshoot mechanism of reversible solid oxide cells during bidirectional mode switching between power generation and hydrogen production[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-9 [2025-03-17]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20240432.

[137] SASSONE G, CELIKBILEK O, HUBERT M, et al. Effect of the operating temperature on the degradation of solid oxide electrolysis cells[J]. Journal of Power Sources, 2024, 605: 234541.

[138] 伍　娟，王　洋，杨俊沂，等. 无膜电解水制氢技术研究进展[J]. 中国科学：化学，2025，55(2)：433-443.
WU Juan, WANG Yang, YANG Junyi, et al. Research progress on membraneless water electrolysis for hydrogen production[J]. Scientia Sinica Chimica, 2025, 55(2): 433-443.



周　峻(通信作者)
1985—，男，博士，副教授，博导
主要从事电氢耦合系统集成与优化方面的研究工作
E-mail: zhoujun@mail.xjtu.edu.cn

ZHOU Jun
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



冀承泽
2001—，男，硕士生
研究方向为 RSOC 动态特性、电氢转换并网控制
E-mail: xjtujcz@stu.xjtu.edu.cn

JI Chengze

收稿日期　2024-12-27　修回日期　2025-03-25　　编辑　陈　蔓