

高效零碳排放智能家庭氢储能系统中试应用

文/雷健华
清华大学深圳国际研究生院、深圳市德兰明海新能源股份有限公司

摘要：氢能作为未来清洁能源的重要组成部分，凭借清洁、高效和资源丰富等特点，有望成为新一轮能源技术变革方向。绿氢实现了零碳排放，对实现碳中和目标意义重大。研制一套太阳能光伏零碳排放的家庭氢储能系统技术方案，对研究电解水制氢技术问题及规模化工程应用有重要的指导意义。本文从关键材料、核心部件、软件算法和系统集成四个方面进行研究，提出了一种高效零碳排放的智能家庭氢储能系统的设计方案并实现中试应用。

关键词：氢能；电解水制氢；零碳排放

氢能作为未来清洁能源的重要形式，是我国实现碳达峰、碳中和的重要措施，各国政府近年来均出台了相关政策支持氢能的发展。在政策层面、制度层面和技术领域均推出了相关措施。近年来，氢能相关的技术取得了长足的进步，在制氢电解槽、制氢电源、储氢装置和燃料电池等技术上均取得了突破性进展。在电解槽和制氢电源的研制上国内部分实验室的技术指标（如转换效率、氢气纯度等）目前处于世界先进水平。但氢能系统的工程化应用仍存在很多问题亟待解决，如系统的成本居高不下、安全问题、整体效率低、核心部件和关键材料国产化程度低等。

可再生能源电解水制氢，即绿氢是未来实现碳中和的重要措施，其零碳排放的特点成为碳中和过程中不可忽视的重要组成部分。通过对家庭绿色氢能系统的研究及中试应用，探索在电解槽、制氢电源及氢能系统的技术创新与突破有重要的意义，可为未来绿氢在家庭系统规模化应用提供一种解决方案，助力氢能产品的技术突破和行业发展。

研究现状

1. 国外研究动态

目前国外技术研究主要集中在：将氢能存储作为混合能源系统的一部分的技术可行性，数学模型与算法，典型案例数据分析、氢能系统转化效率与成本和公用事业规模化应用前景分析等方面，针对具体应用案例的工程分析相对少。

一些新材料的应用研究非常少，更多的研究仍以方案的数学模型及可行性分析为主。

2020年6月，全球推出了首个面向家庭的绿色氢能源和供暖系统HPS Picea(R)，如图1所示。



图1 Picea(R)系统设备外观图

HPS Picea (R) 由电池、电解槽、氢燃料电池和储氢装置组成。Picea (R) 系统的存储容量比其他商用家用电池大100倍 (高达1 500 kW·h), 解决了屋顶光伏的季节性问题。该家庭能源解决方案是把太阳能转换的直流电, 一方面通过锂电池存储起来并给电解槽电解水制氢提供直流电源; 另一方面用于家庭里的直流负载直接供电。

电解水制备的氢气通过储氢罐存储起来, 经过燃料电池后转换为直流电供家庭直流负载使用。整个家庭氢能系统实现了太阳能光伏供电、氢能和锂

电池储能的绿色能源系统, 但该系统没有电能转化装置 (双向变流器), 无法给交流家电设备供电。

该方案为家庭氢能系统提供了一种直流供电的解决方案, 为后续家庭氢能系统的技术发展奠定了基础。

2. 国内研究动态

目前国内绿氢系统的应用以发电侧和电网侧为主。发电侧典型绿氢解决方案关键设备及系统如图2所示。

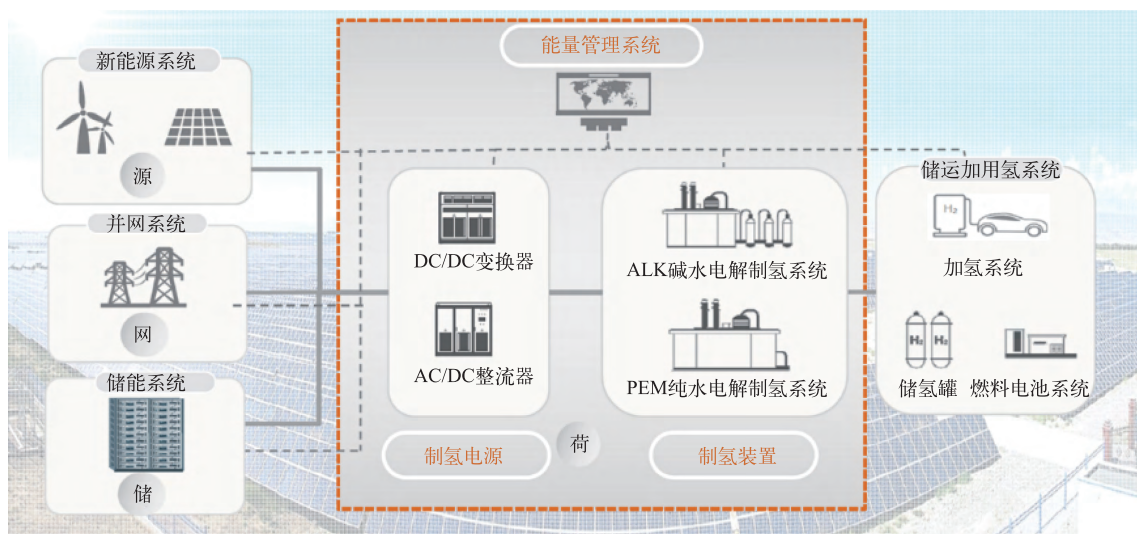


图2 典型绿氢系统解决方案

该系统包含制氢电源、制氢装置、储氢单元、储氢罐和燃料电池系统。制氢电源由太阳能、风能提供绿色清洁电力, 或采用电网的交流电、弃风弃光后存储在锂电池储能系统的直流电供电。制氢电源为该系统的核心设备之一, 将输入电源 (AC或DC) 高效转换为电解槽所需的直流电。制氢装置由碱水电解制氢系统或纯水电解制氢系统组成, 实现海水电解制氢和纯水电解制氢。

国内家庭氢能系统的研究大多集中在对技术方案的可行性和数学模型上, 具体的工程应用案例非常少。

目前国内外家庭氢能系统的研究更多是在方案可行性和数学模型上, 离工程化规模化应用还有很大的差距。家庭绿氢系统无法规模化应用的主要原因是系统成本高, 因此降低绿氢制备电价及电解槽等关键部件成本迫在眉睫, 也是研制家庭氢能系统的核心挑战之一。

系统方案设计

过去十年光伏成本下降90%, 储能成本下降超过80%, 当前光伏平准化度电成本 (LCOE) 已低于煤电, 光储集中式发电站LCOE将在2023年低于煤电。电力成本是绿氢产业发展的关键因素, 占总成本的70%以上。降低可再生能源电解水制氢成本是实现家庭氢能系统的重要途径。目前降低系统成本的措施有: ①降低设备/系统成本, 采用规模化和标准化生产降低制造成本, 持续的研发投入和技术进步降低材料成本, 以及集成优化设计降低系统成本; ②降低用电成本, 进一步降低可再生能源发电成本及通过技术创新降低电解槽及系统耗能; ③提高设备利用率, 合理设计可再生能源与制氢容量的配比, 提升设备利用率, 降低储能成本。这些措施中重要的是降低可再生能源发电成本及电解槽成本。

通过在电解槽中应用高性能新型催化剂, 减少

了电能消耗和催化剂的成本。通过太阳能发电与蓄电池储能的综合能源方式为绿氢制取提供可持续供电的高效电源。

基于以上分析,本文提出了一种基于新型催化剂的高效电解槽和基于新型材料的高效核心部件,以及基于AI人工智能深度学习算法的系统调度控制策略的集成高效智能的家庭绿色氢能系统。

该系统从关键材料、核心部件、软件算法和系统集成四个方面进行优化设计,如图3所示。

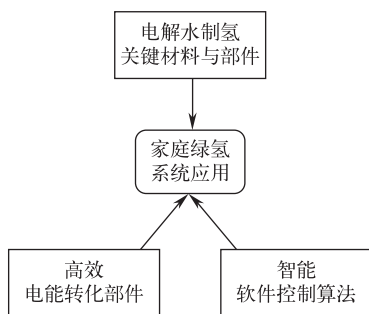


图3 家庭绿氢系统设计思路

1. 研究方法

(1) 理论仿真研究

在MATLAB/Simulink中搭建由各功能模块组成的家庭绿氢能源系统仿真平台,验证原理的可行性。对锂电池PACK、制氢电源、电解槽和燃料电池等进行模块化研究,再进行系统集成仿真。

(2) 核心部件关键技术研究

对关键材料、关键部件和软件算法逻辑进行单独技术研究与模块化研制。包含电解槽催化剂的表征、电解槽转换效率监测、制氢电源可靠性及效率研究和AI人工智能算法仿真与调试等。

(3) 系统优化集成设计与调试

如图4所示,通过优化重复冗余设计,精简硬件和结构组成,在各功能模块性能指标满足设计要求的前提下,进行系统化整机联调,实现系统的整体优化设计。

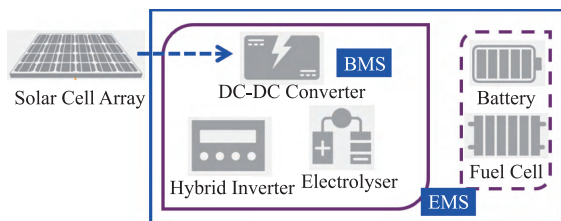


图4 系统各功能模块及集成设计示意图

2. 技术创新点

1) 提出一种基于新型催化剂性能表征的高效电解槽设计方案(关键材料)。

如图5所示,采用二维材料新型催化剂提高电解槽中催化剂效率,延长催化剂使用寿命,减少电能消耗和催化剂的频繁更换。

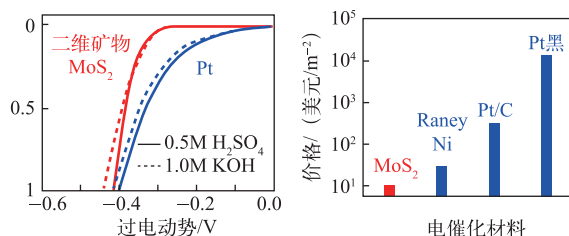


图5 二维矿物MoS₂电催化材料制氢性能

通过不同电极电压、不同材料催化剂下电解槽制氢的性能表征研制出基于新型催化剂的电极电压可自适应调节的高效电解槽。电解槽原理及主要部件名称如图6所示。

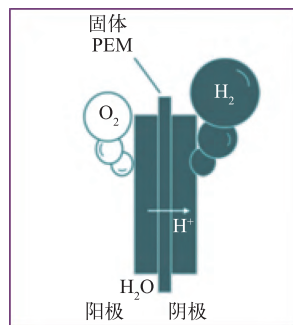
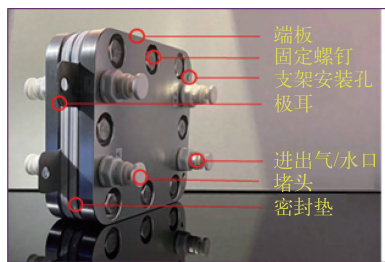


图6 电解槽原理及主要部件名称

2) 提出一种基于新型材料应用及双有源桥(Dual Active Bridge, DAB)效率优化控制策略的开关电源设计方案(核心部件)。如图7所示,基于新型材料GaN的DC-DC/DC-AC开关电源,提升开关转化效率。减小双重移相控制的双有源桥(DAB)占空比丢失,进一步提高电源转化效率。GaN+新型拓扑提高了制氢及逆变电源功率密度及效率。

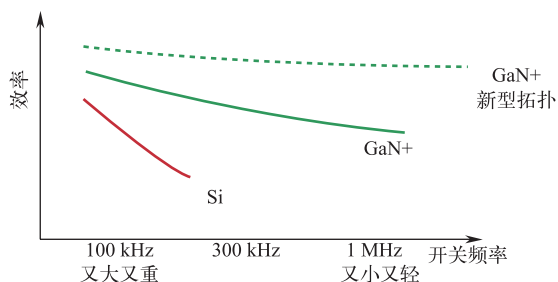


图7 GaN+新型拓扑在开关电源上的效率提升

3) 提出一种基于AI人工智能深度学习的家庭绿氢系统调度控制算法(软件算法)。家庭氢储能系统集合了多种综合能量的控制与转换,运行工况多样化,是一个复杂的多目标函数控制系统,系统

拓扑如图8所示。通过对各形式能量的分析与数据积累,采用循环神经网络(RNN)算法实现系统的高效稳定、能量供给自适应运行,如图9所示。

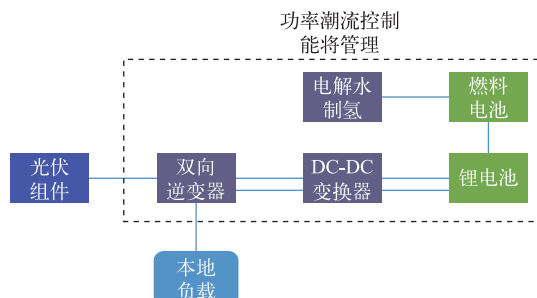


图8 光、储、氢综合能源系统拓扑

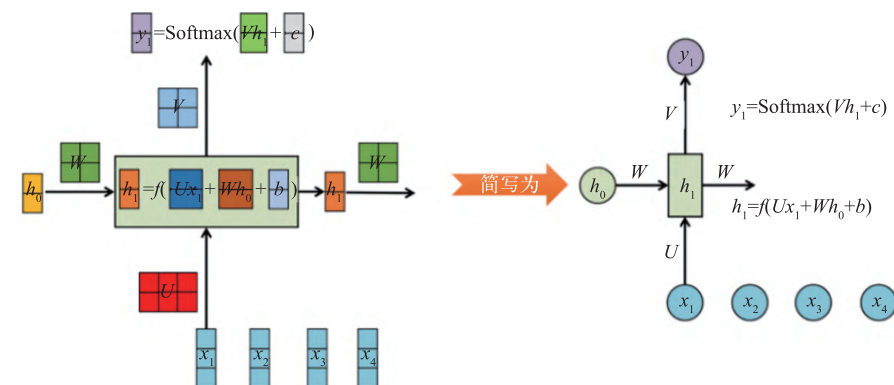


图9 RNN结构示意图

(4) 提出一种基于优化重复冗余设计的高效光、储、氢一体化氢能系统设计方案(系统集成)。单个部件/设备效率达到瓶颈难以突破,通过系统高度集成化,减少系统中不必要的线路损耗和元器件损耗,提升系统整机经济性。通过优化集成设计了一套太阳能电解水高效制氢、可扩容式储氢罐储氢、燃料电池与变流器发电及生活消费用氢的家庭氢能示范应用系统,如图10所示。

3. 技术可行性分析

系统制氢电源及双向变流器、BMS/EMS控制算法、电解水制氢和集成一体化设计等各功能模块技术均已具有相关研究成果,技术创新并非从零开始。

作者所在单位具备先进的Simulink仿真、AI人工智能算法、风光柴储微电网、新型电力电子功率器件材料应用等软硬件技术平台,为方案的研究提供了相应的技术平台及所需的资源支持。作者负责的研发团队有数十年光伏及储能逆变电源开发及系统集成设计相关技术积累与沉淀,确保了系统在具体设计调试阶段具备良好的技术支持。

4. 技术先进性

该系统设计方案体现了新型二维材料催化剂在电解槽中的应用,新型材料GaN的DAB新型拓扑电路在制氢电源和逆变电源中的应用,AI人工智能及大数据处理算法在电力电子控制策略中的应用等先进技术。

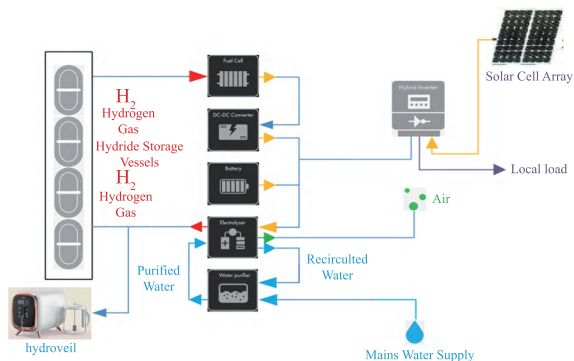


图10 高效集成家庭绿色氢能系统

5. 系统技术指标

研制出一套5 kW·10 kW·h（氢能形式）家庭离网氢能储能系统。系统包含课题研究的4个内容：①基于新型催化剂的性能评估及电解槽研制；②基于新型材料GaN的制氢电源模块的转化效率不低于97.5%；③基于双重移相控制的双有源桥（DAB）的逆变开关电源模块；④太阳能电解水制氢、储氢、用氢的示范项。

面临的问题和难点分析

1. 成本居高不下

当前通过电解水制氢技术的氢气全口径成本约50元/kg（电价按0.3元/kW·h），其中制氢环节成本占比约44%，储运环节约24%，加注环节约32%，未来8~10年内经济性不及灰氢及传统化石燃料。

2. 系统安全隐患

氢能目前还没有摘除“危化品”的帽子。在制取、存储和运输方面有很多的限制。氢能本身的安全有不确定性，在大规模应用的各个方面需要进行更深入的研究，制定系列强制性标准。

3. 核心技术自主创新能力弱

氢燃料电池和关键零部件核心技术被少数发达国家垄断。氢气的供应链体系还不健全，传统技术在氢气制备、储运和整个供应链体系依然占比较大，氢能的应用主要集中在交通领域，缺乏产业化基础。行业法规标准、体制机制难以满足产业快速发展的需求，监督体系和测试标准体系不健全；基础设施建设审批程序和运营监管标准不完善。

思考与建议

1. 聚焦关键核心技术创新，推进国产化进程

我国部分氢能技术已达世界先进水平，但从产业链角度看短板依然明显，鼓励大型骨干企业、科研院所、“高精专”中小企业扎实开展核心材料、装备及关键零部件的研发和协同创新，加快形成具有完全自主知识产权的批量制备生产技术，打造自

主化生态链。

2. 整合对接全球资源，借鉴优势经验

企业应以开放合作的姿态对接全球优势创新资源，积极探索与国际知名氢能产业链相关企业、研发机构等开展跨国合作，通过借鉴国外优势经验，加强氢能产业人才的引入和培养，确保强有力地支持研发，提高核心竞争力。

结束语

家庭绿色氢能系统涵盖了绿氢系统技术研究的所有关键技术点，在关键材料、核心部件、软件算法和系统集成四个方面提出新的研究思路，推动了绿氢系统的工程应用进程。家庭绿氢系统的中试应用推动了用户侧氢能的规模化应用发展。EA

参考文献

- [1] 刘芸. 绿色能源氢能及其电解水制氢技术进展[J]. 电源技术, 2012(10): 1579-1581.
- [2] 赵为, 孙龙林. 用氢能创造零碳未来[J]. 2021年中国能源企业新能源产业发展论坛, 2021(8): 10.
- [3] 中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书[M]. 北京: 人民日报出版社, 2019.
- [4] LEWINSKI K A. NSTF Advances for PEM electrolysis – The effect of alloying on activity of NSTF electrolyzer catalysts and performance of NSTF based PEM electrolyzers[J]. ECS Transactions, 2015, 69(17): 893-917.
- [5] 梁美, 郑琼林, 可翀, 等. SiC MOSFET、Si CoolMOS和IGBT的特性对比及其在 DAB 变换器中的应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 41-49.
- [6] 叶琳, 杨滢, 洪道鉴, 等. 深度学习在电力系统中的应用研究综述[J]. 浙江电力, 2019, 38(5): 83-89.