

风光制氢储能系统的技术特性、市场前景及经济效益研究

金仁博

山西大学 电力与建筑学院, 山西 太原 030006

DOI: 10.61369/SSSD.2025090004

摘 要 : 全球能源转型背景下, 风能与太阳能的间歇性、不稳定性成为制约其大规模消纳的核心瓶颈, 而氢能作为清洁、高效的储能载体, 为解决这一问题提供了重要路径。本文针对风光制氢储能系统展开研究, 系统阐述了该系统的组成单元 (风力机组、光伏组件、电解槽、燃料电池、储氢设备) 及工作原理, 深入分析了当前面临的风光资源波动、储氢技术不成熟、电解槽耐久性不足、成本居高不下等关键技术瓶颈, 并提出对应的技术优化方案。同时, 结合全球及中国氢能产业政策与市场需求, 评估了系统在化工、交通运输、电力等领域的应用前景, 对比了其与传统制氢技术、其他储能技术的竞争优势, 最后通过财务模型测算其经济效益。研究表明, 风光制氢储能系统具有零碳排放、大规模储能、多场景适配的优势, 随着技术迭代与规模效应显现, 其成本将逐步降低, 有望成为支撑 “双碳” 目标实现的重要技术路径。

关 键 词 : 风光制氢; 储能系统; 电解水制氢; 储氢技术; 经济效益

Research on the Technical Characteristics, Market Prospects and Economic Benefits of Wind and Solar Hydrogen Energy Storage Systems

Jin Renbo

Power and Building Engineering College, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006

Abstract : Under the backdrop of global energy transition, the intermittency and instability of wind and solar energy have become the core bottlenecks restricting their large-scale consumption. Hydrogen energy, as a clean and efficient energy storage medium, offers an important solution to this problem. This paper conducts research on the wind-solar hydrogen production and energy storage system, systematically elaborating on its constituent units (wind turbines, photovoltaic modules, electrolyzers, fuel cells, and hydrogen storage equipment) and working principles. It also deeply analyzes the current key technical bottlenecks such as the fluctuation of wind and solar resources, the immaturity of hydrogen storage technology, the insufficient durability of electrolyzers, and the high cost. Corresponding technical optimization solutions are proposed. Meanwhile, by combining global and Chinese hydrogen energy industry policies and market demands, the application prospects of the system in the chemical industry, transportation, and power sectors are evaluated. Its competitive advantages over traditional hydrogen production technologies and other energy storage technologies are compared. Finally, the economic benefits are calculated through a financial model. The research shows that the wind-solar hydrogen production and energy storage system has the advantages of zero carbon emissions, large-scale energy storage, and multi-scenario adaptability. With the iteration of technology and the manifestation of scale effects, its cost will gradually decrease, and it is expected to become an important technical path to support the realization of the "dual carbon" goals.

Keywords : wind-solar hydrogen production; energy storage system; electrolytic water hydrogen production; hydrogen storage technology; economic benefits

全球气候变暖与环境污染问题日益严峻, 推动能源结构从化石能源主导向可再生能源转型成为各国共识。中国作为全球最大的能源消费国与碳排放国, 于 2020 年明确提出 “2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和” 目标, 为可再生能源发展划定了战略方向^[1]。风能与太阳能作为技术最成熟、装机规模最大的可再生能源, 2023 年中国风电、光伏累计装机容量已超 12 亿千瓦, 占全国发电装机总量的 40% 以上^[2]。然而, 风光资源具有显著的地域差异性与时间波动性 —— 风电出力受风速、风向影响, 光伏出力依赖光照强度与时长,

导致其发电过程呈现“间歇性、不稳定性”特征，大规模并网易引发电网频率波动、电压偏差等问题，严重制约了新能源消纳率^[3]。

氢能作为一种能量密度高（142MJ/kg，约为汽油的3倍）、零排放的二次能源，可实现电能与化学能的高效转化，成为衔接风光发电与终端用能的理想储能载体^[4]。风光制氢储能系统通过将过剩风光电转化为氢气储存，在用电高峰或风光出力不足时，再通过燃料电池将氢气转化为电能反馈至电网，形成“发电－制氢－储氢－发电”的闭环，既解决了风光消纳问题，又为能源供应提供了柔性调节能力^[5]。此外，该系统生产的高纯度氢气还可直接应用于化工、交通等领域，推动终端行业脱碳，具有显著的环境与经济价值。

一、风光制氢储能系统的组成与工作原理

风光制氢储能系统是集“能源生产－转化－储存－利用”于一体的复合系统，核心单元包括风力机组、光伏组件、电解槽、储氢设备及燃料电池，各单元协同工作实现风光能向氢能的转化与再利用。

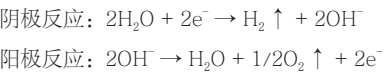
（一）核心组成单元及工作原理

1. 风光发电单元

风光发电单元是系统的能量输入源，负责将风能与太阳能转化为电能。其中，风力机组采用水平轴式设计，通过风轮捕获风能并驱动发电机旋转，将机械能转化为交流电，其发电效率受风速影响显著——当风速处于额定风速（通常为12-15m/s）时，效率可达40%以上，低于切入风速（3-4m/s）或高于切出风速（25m/s）时停机保护^[6]；光伏组件基于“光伏伏特效应”，利用P-N结半导体材料吸收光子能量，激发电子跃迁形成光生电流，其发电效率与光照强度、温度相关，商用单晶硅光伏组件效率已达23%-26%，且温度每升高1℃，效率下降约0.4%^[7]。为适配后续电解制氢单元的直流需求，风光发电输出的交流电需经整流器转换为直流电，并通过稳压装置控制电压波动在±5%以内。

2. 电解制氢单元

电解制氢单元是系统的核心转化装置，通过电解水反应将电能转化为氢能，核心设备为电解槽。目前商用电解槽主要分为碱性电解槽（AEL）、质子交换膜电解槽（PEMEL）与固体氧化物电解槽（SOEL）三类，其技术特性对比如表1所示。其中，AEL技术成熟、成本较低（约1500元/kW），但启动响应慢（数小时），不适配风光电的波动性；PEMEL启动时间短（秒级）、电流密度高，可灵活跟踪风光出力变化，但其质子交换膜依赖进口，成本较高（约5000元/kW）；SOEL工作温度高（700-1000℃），电能转化效率可达90%以上，但高温材料腐蚀问题尚未完全解决，仍处于实验室阶段^[8]。电解水制氢的核心化学反应为：



总反应： $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 \uparrow + \text{O}_2 \uparrow$ （标准状态下需消耗4.5kWh电能制1m³H₂）

电解槽类型	工作温度 /℃	电流密度 /(A/cm²)	效率 /%	成本 /(元 /kW)	适配性
碱性电解槽 (AEL)	60-80	0.2-0.4	70-80	1500-2000	稳态发电

质子交换膜电解槽 (PEMEL)	60-80	0.6-1.0	75-85	4000-6000	波动发电
固体氧化物物电解槽 (SOEL)	700-1000	0.5-1.5	85-95	10000+	高温场景

3. 储氢单元

储氢单元负责储存电解槽生产的氢气，需满足“安全、高效、低成本”要求。目前主流储氢技术分为高压气态储氢、低温液态储氢与固态储氢三类：（1）高压气态储氢通过压缩机将氢气压缩至35MPa或70MPa，储存于碳纤维缠绕气瓶中，储氢密度约30kg/m³，成本较低（约2000元/kgH₂存储能力），但需消耗约15%的氢气能量用于压缩^[9]；（2）低温液态储氢将氢气冷却至-253℃使其液化，储氢密度达70kg/m³，但液化过程能耗占氢气能量的30%，且低温储罐绝热成本高；（3）固态储氢利用金属氢化物（如LaNi₅）、碳材料（如碳纳米管）吸附氢气，储氢密度可达100kg/m³以上，且安全性高，但储氢材料成本昂贵（如LaNi₅价格超1000元/kg），尚未大规模商用^[10]。当前风光制氢项目多采用“高压气态储氢+低压缓冲罐”的组合方式，平衡储氢效率与成本。

4. 氢能利用单元

氢能利用单元实现氢能向电能或终端用能的转化，核心设备为燃料电池。燃料电池基于“逆电解反应”，通过氢气与氧气的电化学反应直接产生电能，无需燃烧过程，发电效率可达50%-60%（是传统内燃机的2倍以上）。其中，质子交换膜燃料电池（PEMFC）工作温度低（60-80℃）、启动快，适用于分布式发电与交通工具；固体氧化物燃料电池（SOFC）工作温度高（700-1000℃），可利用余热供暖，适用于集中式电站^[11]。此外，系统生产的高纯度氢气（纯度99.999%）可直接供化工行业用于合成氨、甲醇，或供燃料电池汽车加氢，实现“制氢－用氢”一体化。

（二）系统整体工作流程

风光制氢储能系统的工作流程可分为三个阶段：（1）能量收集与转化阶段：当风光资源充足时，风光机组满功率发电，部分电能直接并入电网，过剩电能经整流稳压后输入电解槽，驱动电解水反应产生氢气，氧气直接排放或回收利用（如医疗用氧）；（2）能量储存阶段：电解槽产生的氢气经干燥、纯化（去除水分、杂质）后，送入储氢设备储存，根据需求调节储氢压力或温度；（3）能量释放阶段：当风光出力不足或电网用电高峰时，储氢设备释放氢气，送入燃料电池发电，电能经逆变器转换为交流电后并入电网，或直接供给本地负荷（如工厂、居民）；若存在

终端用氢需求（如加氢站），可直接从储氢设备输出氢气，实现“以储代发”。

二、风光资源波动性与制氢稳定性的适配问题

（一）技术瓶颈

风光发电出力受天气影响显著——风电存在“夜间出力高、白天出力低”的日内波动，光伏存在“白天出力集中、夜间零出力”的间歇性，导致电解槽输入电能频繁波动。而传统电解槽（如 AEL）对电流稳定性要求高，当输入电流波动超过 $\pm 20\%$ 时，易出现电极极化、膜组件损坏等问题，导致制氢效率下降 $10\% \sim 15\%$ ，甚至停机^[12]。此外，极端天气（如台风、阴雨）可能导致风光出力骤降，无法满足电解槽最低运行负荷（通常为额定负荷的 30% ），造成制氢中断。

（二）解决方案

针对该瓶颈，可从“出力预测 + 储能耦合 + 控制策略”三方面优化：（1）风光出力预测：采用机器学习算法（如 LSTM 神经网络），结合气象数据（风速、光照、温度）与历史发电数据，实现 72 小时内风光出力的预测，准确率可达 85% 以上，为电解槽负荷调度提供依据^[13]；（2）多储能耦合：在系统中加入

锂电池储能（响应时间毫秒级），当风光出力骤升时，锂电池吸收过剩电能，避免电解槽过负荷；当风光出力骤降时，锂电池释放电能，维持电解槽最低运行负荷，形成“风光 - 锂电 - 制氢”的多能互补系统^[14]；（3）柔性控制策略：采用模型预测控制（MPC）算法，实时跟踪风光出力变化，动态调节电解槽的电流密度与电压，例如 PEMEL 可通过调节质子交换膜的湿度与催化剂活性，实现电流密度在 $0.2 \sim 1.0 \text{ A/cm}^2$ 之间的灵活切换，适配风光出力波动^[15]。

三、研究结论

本文通过对风光制氢储能系统的技术特性、市场前景及经济效益的研究，得出以下结论：（1）风光制氢储能系统通过“风光发电 - 电解制氢 - 储氢 - 发电”的闭环，有效解决了风光电的间歇性问题，实现了大规模、长时储能，且全程零碳排放，是支撑“双碳”目标的重要技术路径；（2）系统当前面临的核心技术瓶颈为风光波动适配、储氢技术成熟度、电解槽耐久性及成本控制，通过“多储能耦合 + 新型材料研发 + 智能运维”可逐步突破这些瓶颈；（3）系统在化工、交通、电力领域具有广阔市场需求，2030 年市场规模预计超 2000 亿元，且环保性与大规模储能优势显著，综合竞争力将超过传统制氢与其他储能技术；（4）以 10MW 项目为例，当前项目投资回收期约 7.2 年，IRR 约 12.5% ，随着技术进步与规模效应，经济效益将进一步提升。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 2030 年前碳达峰行动方案 [Z]. 2021.
- [2] 中国电力企业联合会. 2023 年全国电力工业统计公报 [R]. 2024.
- [3] 张明明, 李建林, 惠东. 风电光伏并网对电网稳定性的影响及对策 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (1): 1-12.
- [4] 衣宝廉. 中国氢能产业发展现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2021, 23 (1): 1-8.
- [5] 王树东, 郭烈锦, 彭苏萍. 氢能技术发展现状与未来展望 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37 (5): 665-676.
- [6] 叶杭冶. 风力发电机组原理与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [7] 赵玉文. 光伏技术发展现状与趋势 [J]. 太阳能, 2021 (1): 1-7.
- [8] 邵志刚, 衣宝廉. 电解水制氢技术进展与展望 [J]. 化工进展, 2020, 39 (1): 1-12.
- [9] 陈健, 刘建国, 周理. 高压气态储氢技术研究进展 [J]. 化工学报, 2021, 72 (3): 1501-1512.
- [10] 张佳平, 李星国. 固态储氢材料研究进展 [J]. 化学进展, 2022, 34 (2): 321-332.
- [11] 明平文, 侯明. 燃料电池技术发展现状与挑战 [J]. 中国科学: 化学, 2021, 51 (5): 701-712.
- [12] 李忠, 王华, 何润华. 风光波动下电解水制氢系统的稳定性控制 [J]. 化工学报, 2022, 73 (6): 2678-2688.
- [13] 刘敏, 张宏刚, 杨军. 基于 LSTM 的风电出力预测模型 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (10): 132-138.
- [14] 王毅, 张新敬, 李政. 多能互补储能系统优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (8): 2689-2700.
- [15] 陈晨, 赵亮, 马紫峰. 质子交换膜电解槽的动态响应特性 [J]. 电化学, 2020, 26 (3): 345-353.