

混合电解槽阵列协同的风光耦合制氢系统 双层多目标优化

马帅¹, 李国兴¹, 吕友军²

(1. 长安大学能源与电气工程学院, 710064, 西安; 2. 西安交通大学绿色氢电全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为解决单一类型电解槽阵列难以兼顾经济性与宽功率波动下的运行灵活性这一问题, 提出一种基于混合电解槽阵列协同的风光耦合制氢系统, 利用不同电解槽的特性差异实现优势互补, 进而建立了系统的双层多目标优化策略。上层利用非支配排序遗传算法进行宏观容量配置多目标寻优; 下层建立双层混合整数线性规划模型, 其中聚合模型用于快速评估上层配置方案, 精细化模型则准确刻画每个电解槽单元的动态运行特性。结果表明: 相较于传统的顺序启停与定期轮换策略, 所提策略使单位制氢成本分别降低了 14.9% 和 22.0%, 显著提升了系统的经济效益; 此外, 系统表现出良好的长周期运行适应性, 在面临季节交替与波动氢气需求时, 单位制氢成本的最高季节性增幅控制在 11.16% 以内; 且相较于平稳需求场景, 所提策略通过灵活调控进一步使制氢成本下降了 3.93%~7.98%, 有效克服了长周期波动影响。研究成果可为实现兼顾高效与灵活的可再生能源制氢系统提供可行方案。

关键词: 可再生能源制氢; 混合电解槽阵列; 风光耦合; 容量配置; 双层多目标优化

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202607011 **文章编号:** 0253-987X(2026)07-0109-11

Bi-Level Multi-Objective Optimization of a Wind-Solar Coupled Hydrogen Production System Based on the Synergy of Hybrid Electrolyzer Arrays

MA Shuai¹, LI Guoxing¹, LÜ Youjun²

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the challenge that single-type electrolyzer arrays struggle to balance economic viability with operational flexibility under wide power fluctuations, a wind-solar coupled hydrogen production system based on the synergy of hybrid electrolyzer arrays is proposed. By leveraging the complementary characteristics of different electrolyzers to obtain complementary benefits, a bi-level multi-objective optimization strategy for the system is established. In the upper level, a non-dominated sorting genetic algorithm is employed to perform multi-objective optimization for macro-level capacity allocation. In the lower level, a bi-level mixed-integer linear programming (MILP) model is formulated, consisting of an aggregation model for the rapid evaluation of upper-level configurations and a refined model to accurately characterize the operational dynamics of each electrolyzer unit. The results show that, the proposed optimization scheme reduces the

收稿日期: 2025-12-11。 作者简介: 马帅(2001—), 男, 硕士生; 李国兴(通信作者), 男, 副教授, 硕士生导师。 基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(52336009, 52406177)。

网络出版时间: 2026-03-04

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20260303.1007.004>

unit hydrogen production cost by 14.9% relative to conventional sequential start-stop strategies and by 22.0% relative to periodic rotation strategies, significantly enhancing the economic efficiency of the system. Moreover, the system demonstrates excellent long-term operational adaptability. Under seasonal transitions and fluctuating hydrogen demands, the maximum seasonal increase in unit hydrogen production cost is controlled within 11.16%. Furthermore, compared with the steady demand scenario, the proposed strategy further reduces the hydrogen production cost by 3.93%—7.98% through flexible regulation, effectively overcoming the impacts of long-term fluctuations. These findings are intended to provide a feasible solution for achieving both high efficiency and flexibility in renewable energy-based hydrogen production.

Keywords: renewable energy-based hydrogen production; hybrid electrolyzer arrays; wind-solar coupling; capacity allocation; bi-level multi-objective optimization

符号表

A	电解槽寿命损耗	C	成本
D	停机状态变量	E	低热值
F	波动状态变量	F_1	单位制氢成本
F_2	弃风光率	F_3	系统能量损失
H	氢气量	K	爬坡速率
L	设备预期寿命	N	电解槽的数量
P	电解槽实际运行功率	ΔP	功率变化量
Q	储氢罐容量	ΔQ	储氢罐容量配置步长
R	额定状态变量	r	资本回收因子
T	调度总周期	U	启动状态变量
u	单独电解槽动作变量	y	决策变量向量
x	单独电解槽运行变量	α_i	动态分配系数
δ	惩罚系数	γ	响应系数
λ	波动工况线性组合系数	π	电价
Ω	决策变量可行域		
角标			
buy	购电	curt	弃风光
fix	固定	fluc	波动
grid	电网	in	输入
invest	投资	single	单一电解槽
k	波动状态特征点编号	agg	聚合模型
load	需求	op	运行
out	放出	overflow	溢出
prod	产出	cyc	循环次数
daily	每日等效	ramp	爬坡
rate	额定状态	ren	可再生能源
rep	更换	sd	停机
solar	光伏	stack	电堆
su	启动	up	向上爬坡
down	向下爬坡	var	可变
wind	风电	detailed	精细化模型
max	最大值	min	最小值
point	特定特征点	total	总计
life	寿命上限	h	单位运行小时
i	ALK 阵列电解槽编号	j	PEM 阵列电解槽编号
m	设备类型	t	调度时段

“双碳”目标下,风光发电的强波动性与间歇性制约了可再生能源的高效转化^[1-2]。电解制氢可有效消纳波动可再生能源,是解决上述瓶颈,获取绿氢的关键支撑^[3-4]。

碱性电解槽(ALK)和质子交换膜电解槽(PEM)是商业化制氢的主要载体^[5-6]。其中,ALK 成本低但启动响应慢,难以平抑可再生能源的功率波动^[7]。PEM 虽动态响应快、负载灵活,但高昂的投资成本制约了其规模化应用^[8]。构建 ALK 和 PEM 混合制氢系统可充分发挥二者的技术优势^[9-10]。文献[11]设计了耦合制氢系统,相较单一制氢系统有效提升了经济效益。文献[12]针对采用混合电解槽结构的海岛规模化电解制氢系统,构建了对应的优化策略,最大限度减缓了设备的寿命衰减。文献[13]提出离网混合系统,显著降低了初始投资并提高了制氢能力。然而,现有研究多采用单一聚合模型进行容量配置,忽视了阵列内部协同效应,致使结果偏离实际工况并削弱了系统的经济性。

为进一步提升系统对风光波动的动态适应性,相关研究逐步由单一聚合模型容量配置扩展至电解槽阵列的协同控制。文献[14]通过划分多种工况,探讨了多电解槽的灵活组合与实时调度。文献[15]在此基础上提出多级混合工况运行策略。此外,阵列的轮值运行与切换控制也是提升灵活性的重要途

径^[16-17]。文献[18]提出先关后开原则以实现设备的平衡利用。文献[19]针对模块化集成阵列提出轮值运行策略,显著提升了制氢效果。文献[20]采用阵列轮换与优化分配策略,较常规启停方法有效提高了制氢量。文献[21]提出双层轮值协调策略,在延长阵列寿命的同时降低了容量需求。然而,上述优化多为降低维数而简化建模,缺乏对各单元精细物理约束的刻画,致使设备面临寿命加速衰减风险。

本文考虑电解槽阵列各单元的动态运行特性及相互影响,构建了混合电解槽阵列协同的风光耦合制氢系统,进而发展了系统的双层多目标优化方法。上层采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行多目标容量寻优,下层建立双精度混合整数线性规划(MILP)求解模式。该方法有效解决了大规模规划中模型精度与计算效率难以兼顾的矛盾,保证了可再生能源波动状态下系统的稳定高效运行。

1 含混合电解槽阵列的风光互补制氢系统建模

1.1 混合电解槽阵列协同的风光耦合制氢系统

图1所示系统以风光及电网为能源输入,光伏与风电分别经逆变器(DC-AC)和变流器(AC-AC)处理后,与电网统一汇流至交流母线,最终经整流器(AC-DC)为制氢设备供直流电。

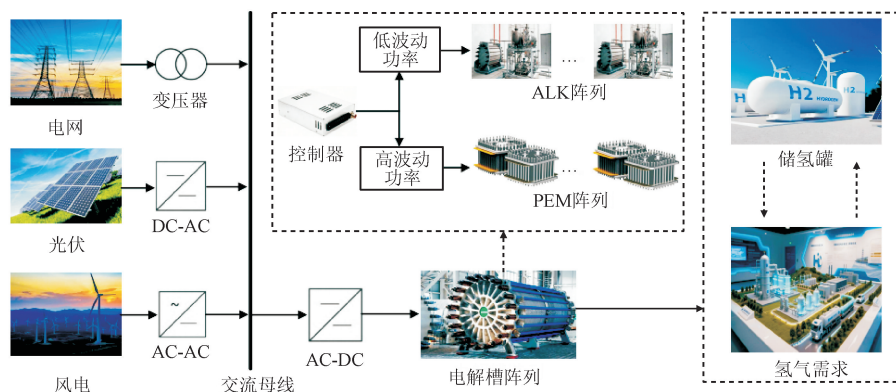


图1 混合电解槽阵列协同的风光耦合制氢系统图

Fig. 1 Diagram of wind-solar coupled hydrogen production system with synergistic hybrid electrolyzer array

在制氢环节,集成 ALK 与 PEM 阵列。低成本 ALK 承载基荷,PEM 平抑波动。当供给充足时,双阵列同时运行达到最大制氢效率,当风光波动时由 PEM 快速调节。系统产出的氢气,一部分在储氢罐进行储存,作为能源缓冲,另一部分则用于满足园区氢气需求。整个制氢系统能够在保障经济性的同时兼具极高的灵活性。

1.2 系统建模

基于文献[22],构建单个电解槽制氢效率。储氢罐作为能量缓冲环节^[23]。系统随时可以向电网购电。

1.3 基于电解槽运行特性的分段线性化模型

针对电解槽产氢效率与输入功率的复杂非线性,构建了基于运行状态划分的分段线性化模型。

1.3.1 电解槽运行状态划分与建模

本文将电解槽在一个调度内的状态划分为 3 种互斥模式: 额定运行、波动运行和关停, 表示为

$$R_{i,t} + F_{i,t} + D_{i,t} = 1, \forall i, t \quad (1)$$

1.3.2 波动运行区间的效率特性分段线性化

针对电解槽功率与产氢效率曲线的非线性问题, 本文采用 2 型特殊有序集(SOS2)线性化方法^[24]。

1.4 基于运行状态的电解槽阵列模型

1.4.1 ALK 阵列

基于运行状态划分, 构建状态与功率耦合模型。对于 ALK 阵列, 有

$$P_{ALK}^{i,t} = P_{ALK}^{rate} R_{ALK}^{i,t} + \left(\sum_k \lambda_{ALK,k}^{i,t} P_{ALK,k}^{point} \right) \quad (2)$$

$$H_{ALK}^{i,t} = H_{ALK}^{rate} R_{ALK}^{i,t} + \sum_k \lambda_{ALK,k}^{i,t} H_{ALK,k}^{point} \quad (3)$$

1.4.2 PEM 阵列

PEM 阵列的建模与 ALK 阵列保持一致, 同样采用基于运行工况划分的状态与功率耦合模型。两者的核心差异主要体现为: PEM 电解槽具备更宽的负荷运行区间与更快速的动态响应能力。

2 双层多目标优化方法

2.1 上层优化模型

上层优化聚焦宏观投资决策, 采用 NSGA-II 算法进行最优配置寻优。

2.1.1 目标函数

(1) 最小化单位制氢成本为

$$F_1 = \min((C_{invest}^{daily} + C_{op}^{total} + C_{rep,t}^{total})/H_{prod,t}^{total}) \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} C_{invest}^{daily} = (C_{invest}^{ALK} N_{ALK} + C_{invest}^{PEM} N_{PEM} + C_{invest}^{H_2} Q_{H_2}) \frac{r}{365} \\ C_{op}^{total} = \sum_{t=1}^T (C_{su,t} + C_{var,t} + C_{fix,t} + C_{sd,t} + \\ C_{buy,t} + C_{fluc,t} + C_{ramp,t}) \\ C_{rep,t}^{total} = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_{ALK}} (C_{stack}^{ALK} D_{i,t}^{ALK}) + \sum_{j=1}^{N_{PEM}} (C_{stack}^{PEM} D_{j,t}^{PEM}) \right) \end{cases}$$

(2) 最小化弃风光率为

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^T P_{curt,t} \quad (5)$$

(3) 最小化系统能量损失为

$$F_3 = \min \sum_{t=1}^T P_{ren,t} - \left(\sum_{t=1}^T H_{prod,t}^{total} \right) E_{H_2} \quad (6)$$

2.1.2 上层基于 NSGA-II 的系统容量配置优化

针对 NSGA-II 输出的 Pareto 解集, 采用归一化理想点最小距离法规避主观加权偏差。决策变量可行域定义为

$$\Omega = \left\{ \mathbf{y}_{invest} \in \mathbf{Z}^3 \left| \begin{array}{l} 0 \leq N_{ALK} \leq N_{ALK}^{max} \\ 0 \leq N_{PEM} \leq N_{PEM}^{max} \\ Q_{H_2} \in \{0, \Delta Q, 2\Delta Q, \dots, Q_{H_2}^{max}\} \end{array} \right. \right\} \quad (7)$$

2.2 下层优化模型

为兼顾上层大规模迭代计算的速度与精度, 本文构建了双精度 MILP 模型。

2.2.1 聚合模型

聚合模型专为 NSGA-II 适应度评估设计, 将同类电解槽阵列等效为单一虚拟单元简化计算。

(1) 聚合模型目标函数为

$$\min C_{op}^{agg} = \sum_{t=1}^T (C_{su,t}^{agg} + C_{var,t}^{agg} + C_{buy,t} + C_{ramp,t}^{agg} + C_{rep,t}^{agg}) \quad (8)$$

式中:

$$\begin{cases} C_{su,t}^{agg} = C_{su}^{ALK} U_{ALK,t}^{agg} + C_{su}^{PEM} U_{PEM,t}^{agg} \\ C_{var,t}^{agg} = \delta_{var}^{ALK} P_{ALK,t}^{agg} + \delta_{var}^{PEM} P_{PEM,t}^{agg} \\ C_{buy,t} = \pi_{grid,t} P_{buy,t} \\ C_{ramp,t}^{agg} = \delta_{ramp}^{AEL} |P_{ALK,t}^{agg} - P_{ALK,t-1}^{agg}| + \\ \delta_{ramp}^{PEM} |P_{PEM,t}^{agg} - P_{PEM,t-1}^{agg}| \\ C_{rep,t}^{agg} = \sum_{k \in \{ALK, PEM\}} C_{stack}^k \left[\frac{P_{k,t}^{agg}}{L_{life}^{h,k} P_{rate}^k} + \frac{U_{k,t}^{agg}}{L_{life}^{cyc,k}} + \frac{\gamma_{fluc}^k |\Delta P_{k,t}^{agg}|}{P_{rate}^k} \right] \end{cases}$$

(2) 聚合模型电解槽状态为

$$\begin{cases} U_{ALK,t}^{agg} P_{ALK,min}^{agg} \leq P_{ALK,t}^{agg} \leq U_{ALK,t}^{agg} P_{ALK,max}^{agg} \\ U_{ALK,t}^{agg} - U_{ALK,t-1}^{agg} = U_{ALK,t}^{agg} - D_{ALK,t}^{agg} \\ P_{ALK,t}^{agg} - P_{ALK,t-1}^{agg} \leq R_{up,ALK} U_{ALK,t-1}^{agg} + \\ P_{ALK,rate}^{agg} U_{ALK,t}^{agg} \end{cases} \quad (9)$$

PEM 聚合方式与此相同。

(3) 聚合系统功率平衡与动态分配策略为

$$P_{ren,t} + P_{buy,t} = (1 - \lambda_t) P_{ALK,t}^{agg} + \lambda_t P_{PEM,t}^{agg} + P_{overflow,t} \quad (10)$$

式中:

$$P_{overflow,t} = \lambda_t P_{ALK,t}^{agg} + (1 - \lambda_t) P_{PEM,t}^{agg} + P_{curt,t}$$

2.2.2 精细化模型

精细化模型实现对单体设备精细建模。

(1) 精细化模型目标函数为

$$\begin{aligned} \min C_{op}^{detailed} = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{ALK}} (C_{su}^{ALK} U_{ALK,t}^{i,t} + \delta_{var}^{ALK} P_{ALK,t}^{i,t}) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_{PEM}} (C_{su}^{PEM} U_{PEM,t}^{j,t} + \delta_{var}^{PEM} P_{PEM,t}^{j,t}) + \sum_{t=1}^T C_{rep,t}^{total} \end{aligned} \quad (11)$$

(2)精细化模型电解槽状态为

$$\begin{aligned} (x_{\text{rate}}^{\text{ALK}}(i, t) + x_{\text{fluc}}^{\text{ALK}}(i, t)) - (x_{\text{rate}}^{\text{ALK}}(i, t-1) + \\ x_{\text{fluc}}^{\text{ALK}}(i, t-1)) = u_{\text{su}}^{\text{ALK}}(i, t) - u_{\text{sd}}^{\text{ALK}}(i, t), \\ u_{\text{su}}^{\text{ALK}}(i, t) + u_{\text{sd}}^{\text{ALK}}(i, t) \leq 1 \end{aligned} \quad (12)$$

PEM 精细化模型状态与此相同。

(3)功率精细分配。定义归一化波动率并引入二进制变量,实现 PEM 和 ALK 处理波动负荷^[25]。

2.3 约束条件

功率平衡约束为

$$\begin{aligned} P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{solar}}(t) + P_{\text{buy}}(t) = N_{\text{ALK}} P_{\text{ALK}}(t) + \\ N_{\text{PEM}} P_{\text{PEM}}(t) + P_{\text{curt}}(t), \forall t \in T \end{aligned} \quad (13)$$

产氢与需求约束为

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i \in N_{\text{ALK}}} H_{\text{ALK}}(i, t) + \sum_{j \in N_{\text{PEM}}} H_{\text{PEM}}(j, t) \right) + \\ H_{\text{out}}(t) = D_{\text{H}_2}(t) + H_{\text{in}}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

2.4 模型求解

图 2 为双层多目标优化求解流程。上层采用 NSGA-II 寻优设备投资组合。下层构建双精度 MILP 模型,对各项配置方案进行快速精准评估。

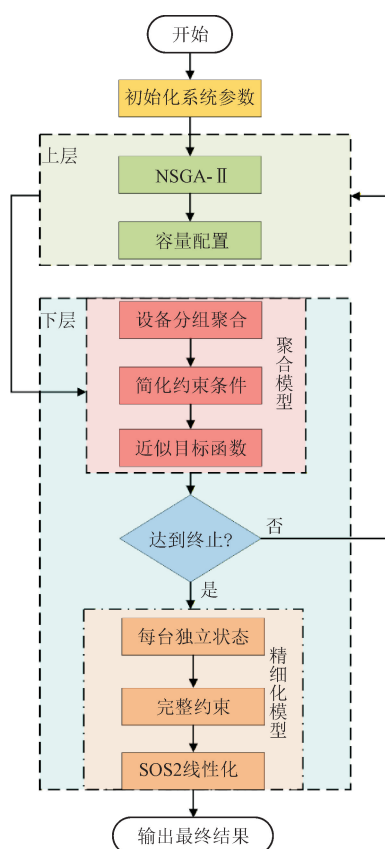


图 2 双层多目标流程图

Fig. 2 Bi-level multi-objective flowchart

3 算例分析

3.1 算例设置

为验证系统性能,选取中国西北某工业园区进行算例分析。图 3 为预测风光出力结果,采用分时电价,系统参数设定见表 1。本文将 ALK 与 PEM 电解槽阵列配置上限均设为 8 台(分别编号为 ALK1~8、PEM1~8)。在仿真求解中,模型会根据不同季节的源荷特性自适应寻优,动态决定最优开机数量及具体调用编号。

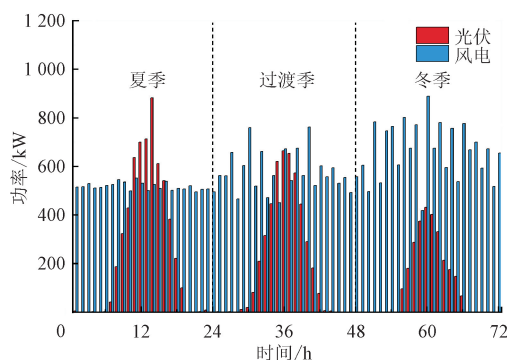


图 3 不同季节风光出力场景预测

Fig. 3 Predictions of wind and solar power output scenarios in different seasons

表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

参数	数值	参数	数值
$P_{\text{ALK}, \min}^{\text{single}} / \text{kW}$	50	$P_{\text{ALK}, \max}^{\text{single}} / \text{kW}$	200
$P_{\text{sd}}^{\text{ALK}} / \text{kW}$	10	$P_{\text{sd}}^{\text{PEM}} / \text{kW}$	5
$P_{\text{PEM}, \min}^{\text{single}} / \text{kW}$	10	$P_{\text{PEM}, \max}^{\text{single}} / \text{kW}$	100
$R_{\text{up}}^{\text{PEM}} / (\text{kW} \cdot \text{h}^{-1})$	40	$R_{\text{down}}^{\text{PEM}} / (\text{kW} \cdot \text{h}^{-1})$	40
$C_{\text{invest}}^{\text{ALK}} / (\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	8 100	$C_{\text{invest}}^{\text{H}_2} / (\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	2 880
$C_{\text{su}}^{\text{PEM}} / (\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	16 200	$C_{\text{su}, t}^{\text{ALK}} / \text{元}$	90
$C_{\text{su}, t}^{\text{PEM}} / \text{元}$	180	$C_{\text{var}, t}^{\text{ALK}} / \text{元}$	0.054
$C_{\text{var}, t}^{\text{PEM}} / \text{元}$	0.081	$C_{\text{sd}, t} / \text{元}$	0.018
$C_{\text{fluc}, t}^{\text{ALK}} / \text{元}$	27	$C_{\text{fluc}, t}^{\text{PEM}} / \text{元}$	0.9
$C_{\text{ramp}, t}^{\text{ALK}} / (\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	0.72	$C_{\text{ramp}, t}^{\text{PEM}} / (\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	0.5

3.2 制氢结果分析

3.2.1 平稳需求情况下的制氢分析

图 4 为平稳氢气需求下的季节性制氢结果。随着可再生能源波动增强,PEM 制氢量逐渐增加,但 ALK 仍占据主导地位。储氢罐主要在 15:00—24:00 填补供给缺口,其来源于日间多余氢气的存储,以此保障供应稳定性。值得注意的是,冬季 21:00—24:00

时段 PEM 出力显著高于其他季节,这是由于该时段风光波动剧烈,需 PEM 进行快速消纳。

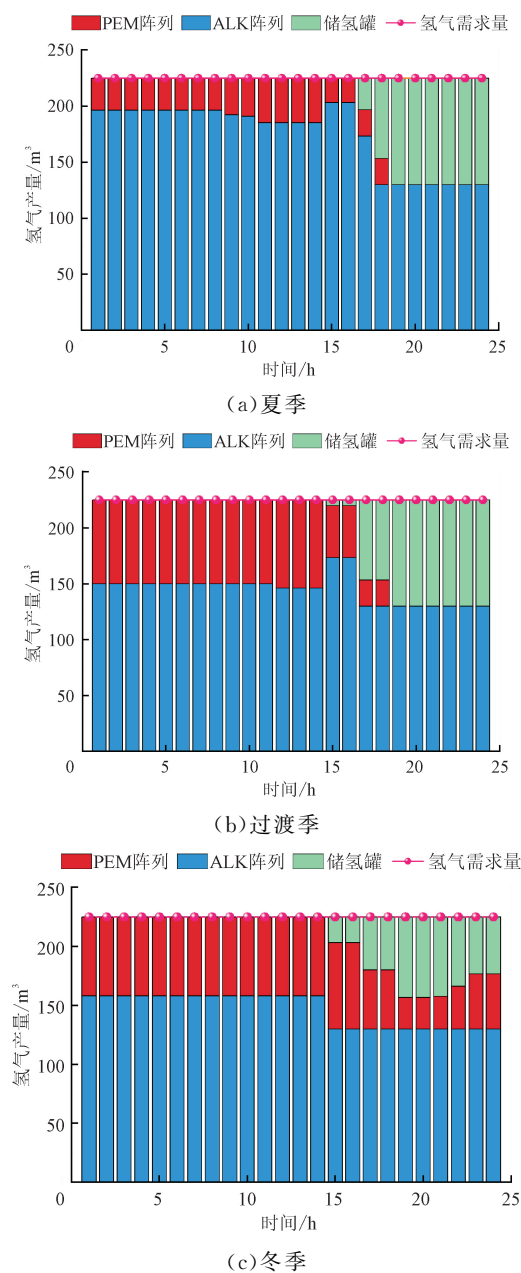


图 4 平稳氢气需求下混合电解槽阵列制氢结果

Fig. 4 Result of hydrogen production by hybrid electrolyzer array under stable hydrogen demand

图 5 为各季节功率分配情况。ALK 始终占据耗能主导,PEM 耗能则随波动性增强而增加。夏季 14:00、秋季 12:00 及冬季 1:00 的弃风光高发期,与可再生能源出力峰值高度吻合。为兼顾需求与成本,系统在 1:00—0:00 时段购电制氢。产出氢气除满足负荷外,主要存入储氢罐以填补后续缺口。

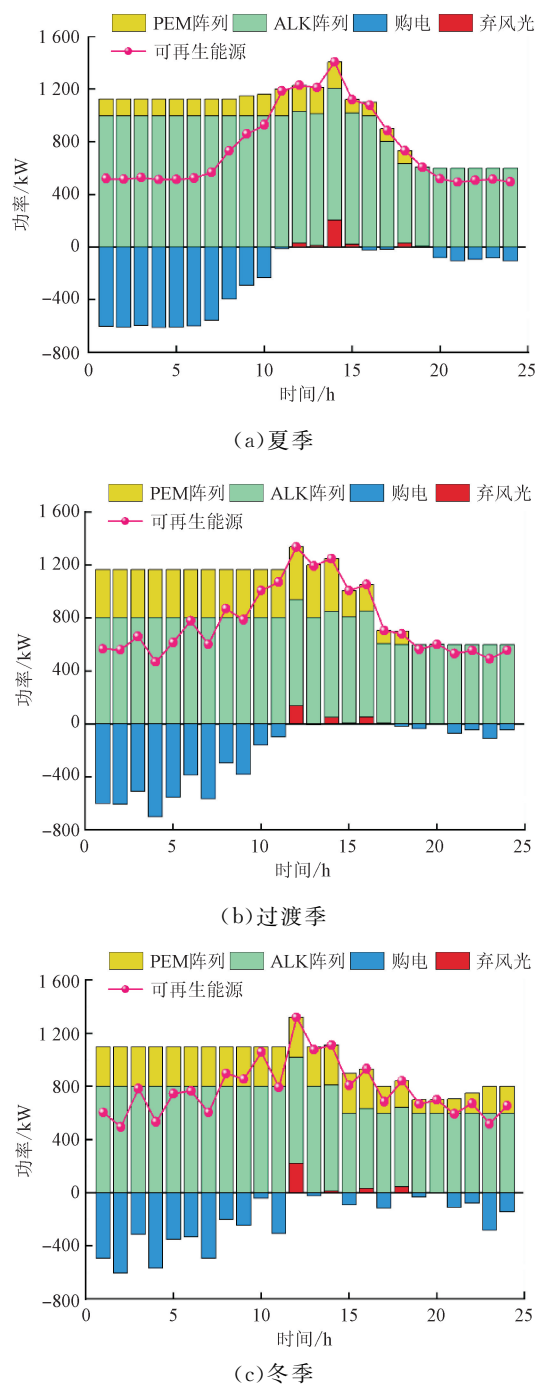


图 5 平稳氢气需求下混合电解槽阵列功率分配

Fig. 5 Power distribution of hybrid electrolyzer array under stable hydrogen demand

图 6 为各单元负载变化。随着可再生能源波动增强,电解槽数量配置呈 ALK 递减、PEM 递增趋势,且均频现满载。这是多目标权衡的结果。系统优先维持高负载率虽略损效率,但能促进消纳并规避启停成本。此外,得益于储氢罐的缓冲,PEM 在适应波动的同时维持了高负荷稳定运行,有效规避了低负荷区的效率衰减。

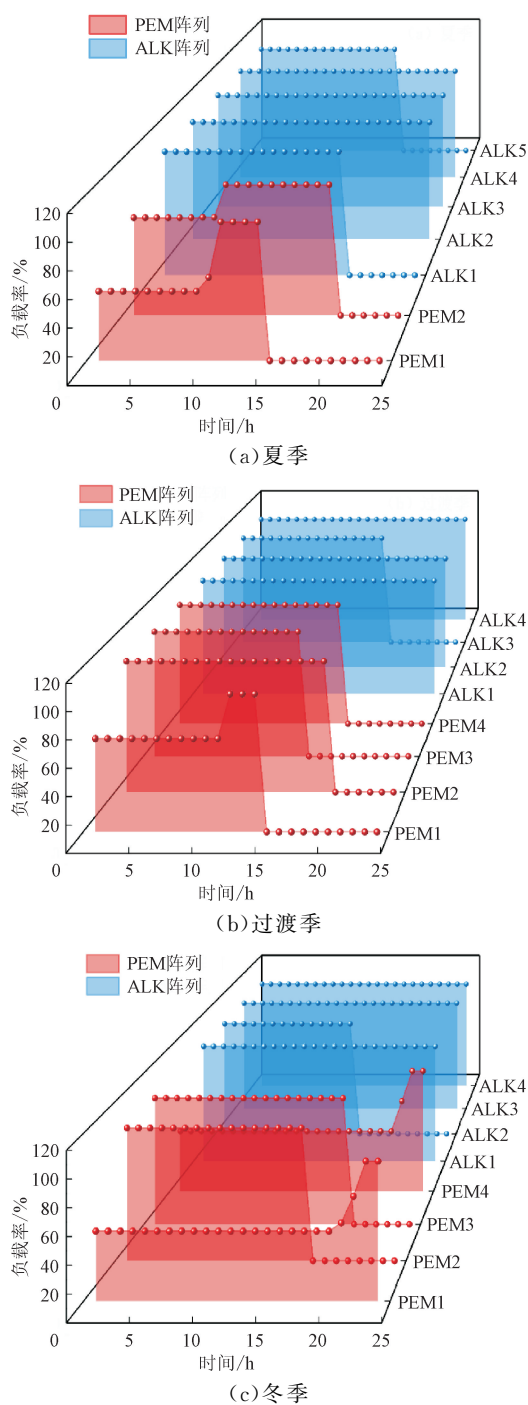


图 6 平稳氢气需求下混合电解槽阵列负载

Fig. 6 Load of hybrid electrolyzer array under stable hydrogen demand

表 2 显示,夏季制氢成本最低;冬季因波动增强需增配 PEM,成本上涨 6.46%。而夏季受午间光伏影响,弃风光率高出过渡季 26.5%。此外,能量损失率出现季节性变化,相对增幅高达 10.01%。原因是过渡季节和冬季 PEM 电解槽受可再生能源波动性影响需要频繁在波动状态运行,导致额外的能量损失。

表 2 平稳氢气需求下不同季节电解槽阵列制氢结果

Table 2 Results of hydrogen production by electrolyzer arrays in different seasons under stable hydrogen demand

季节	制氢成本/ (元 · m ⁻³)	弃风光率/%	能量损失率/%
夏季	2.63	1.72	15.08
过渡季	2.77	1.36	15.88
冬季	2.80	1.65	16.59

3.2.2 波动需求情况下的制氢分析

图 7 为波动氢气需求下混合电解槽阵列制氢结果。

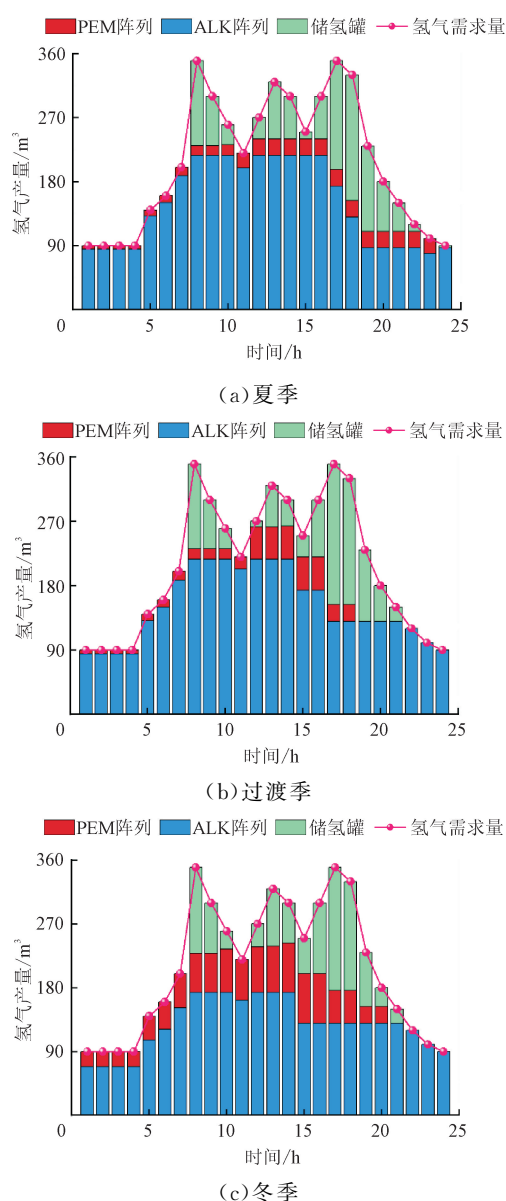


图 7 波动氢气需求下混合电解槽阵列制氢结果

Fig. 7 Graph of hydrogen production results from a hybrid electrolyzer array under fluctuating hydrogen demand

随着季节变化,PEM阵列制氢量增加,ALK制氢量减少。各个季节ALK阵列仍然是氢气生产主力。冬季8:00—18:00时由于可再生能源出力急剧波动,导致新增的PEM2与PEM3单元被迅速激活。在所有季节中,储氢罐的放氢行为高度集中在8:00—21:00。与平稳氢气需求对比,储氢罐作用从可再生能源出力不足,必须释放氢气以维持园区夜间高氢气需求,转变为在波动氢气需求峰值时段释放氢气。同时,波动需求下PEM的制氢量显著少于平稳需求场景,主要原因是波动需求的氢气曲线存在明显的低谷期,并且氢气的需求量低于平稳氢气需求。

图8为波动需求下的功率分配。弃风光主要集

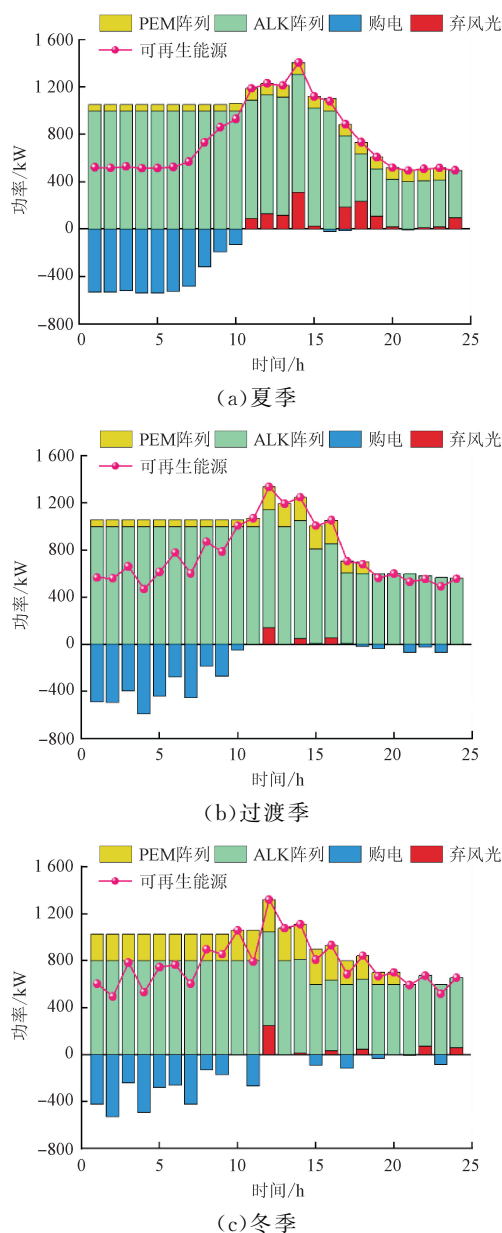


图8 波动氢气需求下混合电解槽阵列功率分配

Fig. 8 Power distribution of hybrid electrolyzer array under fluctuating hydrogen demand

中于11:00—14:00的能源充足时期。值得注意的是,夏季17:00—19:00的弃光源于储氢罐大规模放氢。为降低成本,系统在1:00—7:00购电制氢并优先存储。相比平稳场景,波动场景因总需求降低,致使外购电量与PEM能耗减少,但弃风光率有所上升。

图9为波动氢气需求下混合电解槽阵列在不同季节的负载变化。ALK的数量随季节推移呈减少趋势,而PEM的数量则增加。

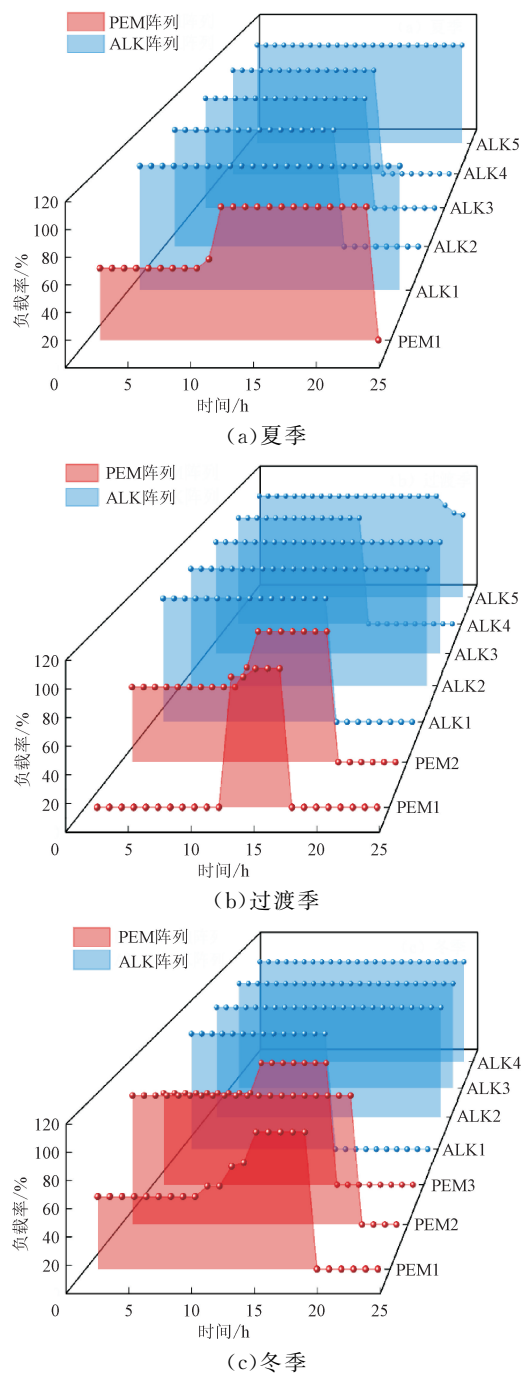


图9 波动氢气需求下混合电解槽阵列负载

Fig. 9 Load of hybrid electrolyzer array under fluctuating hydrogen demand

同时,PEM 在一天内频繁地在额定、波动及关停状态间切换,其波动状态超过 50%。与平稳氢气需求对比,PEM 数量减少,主要原因是波动氢气需求量少,导致 PEM 不需要额外承担制氢任务。此外,在波动需求场景下,氢气需求与可再生能源出力曲线呈现白天需求高于夜间的协同特征。这种氢气需求与可再生能源之间的协同特性,使得供给侧与需求侧的波动在一定程度上相互抵消,有效降低了总的波动率。

表 3 为波动需求下的季节性指标。单位制氢成本由夏至冬递增,冬季因波动增强需增配 3 台 PEM,致使成本较夏季增加 11.16%。夏季因资源丰富,弃风光率最高;过渡季最低,冬季较夏季弃风光率降低 52.12%。各季能量损失率处于 21.50%~22.75%。对比平稳需求场景,波动需求策略虽通过削减 PEM 使成本降低 3.93%~7.98%,但也导致能量损失率增加 5.62%~6.96%,且夏季弃风光率由 1.72% 升至 5.18%。

表 3 波动氢气需求下不同季节电解槽阵列制氢结果

Table 3 Results of hydrogen production by electrolyzer arrays in different seasons under fluctuating hydrogen demand

季节	制氢成本/ (元·m ⁻³)	弃风光率/%	能量损失率/%
夏季	2.42	5.18	22.04
过渡季	2.57	1.39	21.50
冬季	2.69	2.48	22.75

3.3 与传统优化方法的对比

为了量化评估本文提出的双层多目标优化的先进性,选取冬季波动工况对比 3 种方案。三者上层均为 NSGA-II,差异在于下层。方案 1 采用本文方法,方案 2 为固定顺序启停,方案 3 则通过定期轮换以平衡利用率。

不同电解槽运行方式下的关键性能指标如表 4 所示。可以看出,本文提出的方案 1 在所有评估维度上表现优异。在核心经济性指标上,方案 1 的单位制氢成本相较于方案 3 和方案 2,分别降低了 14.9% 和 22.0%。在可再生能源消纳方面,方案 1 同样表现最佳,与方案 3 和方案 2 相比,弃风光率分别大幅减少了 53.8% 和 71.6%。在系统整体能效方面,方案 1 的能量损失率是三者中最低的。与方案 3 和方案 2 相比,能量损失分别减少了 8.0% 和 19.5%。

表 4 不同电解槽运行方式结果对比

Table 4 Comparison of results under different electrolyzer operation modes

方案	制氢成本/ (元·m ⁻³)	弃风光率/%	能量损失率/%
1	2.69	2.48	22.75
2	3.45	8.74	28.25
3	3.16	5.37	24.74

4 结 论

(1)本文提出的混合阵列方案有效突破了单一技术局限,多季运行结果表明系统具有极佳的适应性,在平稳与波动需求下,系统在夏季最高弃风光率分别被有效控制在 1.72% 与 5.18% 的较低水平;同时在波动需求场景下,单位制氢成本进一步降低 3.93%~7.98%,展现出显著的经济优势。

(2)所构建的 NSGA-II 与双 MILP 协同架构有效解决了大规模优化的精度与效率矛盾,相比传统策略在成本、消纳及能效方面均实现全面提升。

未来工作将进一步拓展电解槽在“电-热-氢”综合能源系统中的多能耦合机制研究。

参考文献:

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.
Li Hui, Liu Dong, Yao Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258.
- [2] 梁忠豪,王丽芳,李建林. 基于纳什均衡的光-储耦合制氢系统优化控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2025, 49(3): 125-134.
Liang Zhonghao, Wang Lifang, Li Jianlin. Nash equilibrium based optimal control method for hydrogen production system with photovoltaic-storage coupling [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(3): 125-134.
- [3] 胡可崴,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.

- [4] 王士博, 孔令国, 蔡国伟, 等. 电力系统氢储能关键应用技术现状、挑战及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6660-6681.
- Wang Shibo, Kong Lingguo, Cai Guowei, et al. Current status, challenges and prospects of key application technologies for hydrogen storage in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6660-6681.
- [5] Hassan Q, Sameen A Z, Salman H M, et al. Large-scale green hydrogen production via alkaline water electrolysis using solar and wind energy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(88): 34299-34315.
- [6] Sebbahi S, Assila A, Bleghiti A A, et al. A comprehensive review of recent advances in alkaline water electrolysis for hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 82: 583-599.
- [7] Kojima H, Nagasawa K S, Todoroki N, et al. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(12): 4572-4593.
- [8] 林嘉虎. 离网型风光制氢系统混合电解槽优化运行及容量配置策略研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2025.
- [9] 华佳楠, 于天佑, 周荔丹, 等. 基于混合电解槽运行特性的风光制氢系统功率分配策略 [J/OL]. 上海交通大学学报. (2025-11-14) [2025-12-11]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.183>.
- Hua Jianan, Yu Tianyou, Zhou Lidan, et al. Power allocation strategy for wind-solar hydrogen production system based on operating characteristics of hybrid electrolyzers [J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University. (2025-11-14) [2025-12-11]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.183>.
- [10] 谢金勇, 张逸, 张亚超, 等. 考虑混合电解槽协同运行的园区级氢能系统优化配置方法 [J]. 电网技术, 2025, 49(8): 3256-3265.
- Xie Jinyong, Zhang Yi, Zhang Yachao, et al. Optimized configuration method of park-level hydrogen energy system for coordinated operation of hybrid electrolyzers [J]. Power System Technology, 2025, 49(8): 3256-3265.
- [11] 徐衍会, 李冠霖. 基于碱性-质子交换膜混合电解槽的离网型风光耦合制氢系统容量配置优化 [J]. 电力自动化设备, 2025, 45(4): 1-9.
- Xu Yanhui, Li Guanlin. Capacity configuration optimization of off-grid wind-solar coupling hydrogen production system based on alkaline-proton exchange membrane hybrid electrolyzers [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(4): 1-9.
- [12] Yu Binbin, Fan Guangyao, Sun Kai, et al. Adaptive energy optimization strategy of island renewable power-to-hydrogen system with hybrid electrolyzers structure [J]. Energy, 2024, 301: 131508.
- [13] Zhou Zheng, Zhang Sen, Zhong Yin, et al. A predictive control method for multi-electrolyzer off-grid hybrid hydrogen production systems with photovoltaic power prediction [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 84: 383-393.
- [14] 陈朝旭, 张亚超, 朱蜀, 等. 考虑多电解槽多工况组合运行的电-氢-热综合能源系统优化调度 [J]. 电网技术, 2025, 49(2): 542-551.
- Chen Zhaoxu, Zhang Yachao, Zhu Shu, et al. Optimal scheduling of electricity-hydrogen-heat integrated energy system considering combined operation of multi-electrolyzers under multiple conditions [J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 542-551.
- [15] 宋维山, 谢丽蓉, 张龙军, 等. 计及电解槽多模式运行制氢策略的微电网双层容量规划 [J]. 智慧电力, 2025, 53(10): 44-53.
- Song Weishan, Xie Lirong, Zhang Longjun, et al. Bi-level capacity planning of microgrid considering multi-mode electrolyzer operation strategy for hydrogen production [J]. Smart Power, 2025, 53(10): 44-53.
- [16] 沈小军, 聂聪颖, 吕洪. 计及电热特性的离网型风电制氢碱性电解槽阵列优化控制策略 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 463-472.
- Shen Xiaojun, Nie Congying, Lü Hong. Coordination control strategy of wind power-hydrogen alkaline electrolyzer bank considering electrothermal characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 463-472.
- [17] Wang Shibo, Kong Lingguo, Liu Chao, et al. Collaborative operation of renewable energy hydrogen production systems considering balanced utilization and extended lifespan of multi-electrolyzers [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(4): 3064-3081.
- [18] Fang Ruiming, Liang Yin. Control strategy of electrolyzer in a wind-hydrogen system considering the constraints of switching times [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(46): 25104-25111.
- [19] 李建林, 孙浩元, 梁忠豪. 考虑混合电解槽阵列协同工作的风光制氢系统容量优化配置 [J]. 电力自动化设备, 2025, 45(9): 11-19.
- Li Jianlin, Sun Haoyuan, Liang Zhonghao. Capacity optimization configuration of wind-solar hydrogen pro-

- duction system considering collaborative operation of hybrid electrolyzer arrays [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(9): 11-19.
- [20] 李建林, 赵文鼎, 梁忠豪, 等. 基于混合电解槽制氢系统的功率分配技术 [J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(13): 9-18.
- Li Jianlin, Zhao Wending, Liang Zhonghao, et al. Power distribution technology based on hybrid-electrolyzer hydrogen production system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(13): 9-18.
- [21] 杨紫娟, 田雪沁, 吴伟丽, 等. 考虑电解槽组合运行的风电-氢能-HCNG 耦合网络容量优化配置 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(12): 76-85.
- Yang Zijuan, Tian Xueqin, Wu Weili, et al. Optimal capacity configuration of wind-hydrogen-HCNG coupled network considering combined electrolyzer operation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(12): 76-85.
- [22] 郑博, 白章, 袁宇, 等. 多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(23): 8486-8495.
- Zheng Bo, Bai Zhang, Yuan Yu, et al. Hydrogen production system and capacity optimization based on synergistic operation with multi-type electrolyzers under wind-solar power [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(23): 8486-8495.
- [23] 李志伟, 赵雨泽, 吴培. 碳交易机制下绿氢蓝氢协调优化对综合能源系统的影响评估 [J]. *太阳能学报*, 2024, 45(10): 37-47.
- Li Zhiwei, Zhao Yuze, Wu Pei. Impact assessment of coordinated optimization of green hydrogen and blue hydrogen on integrated energy system under carbon trading mechanism [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2024, 45(10): 37-47.
- [24] Kountouris I, Langer L, Bramstoft R, et al. Power-to-X in energy hubs: a Danish case study of renewable fuel production [J]. *Energy Policy*, 2023, 175: 113439.
- [25] 张玉敏, 张念上, 吉兴全, 等. 计及秒级响应特性的混合电解制氢系统功率分配策略 [J/OL]. *电力系统自动化*. (2025-07-24) [2025-12-11]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250724.1306.002>.
- Zhang Yumin, Zhang Nianshang, Ji Xingquan, et al. Power distribution strategy for hybrid electrolytic hydrogen production systems considering second-level response characteristics [J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*. (2025-07-24) [2025-12-11]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250724.1306.002>.
- (编辑 亢列梅)