DOI: 10.19666/j.rlfd.202507058

考虑电解槽分钟级动态特性的碱性与质子交换膜电解槽混合制氢系统容量规划

曹传胜[1]，姜 聪[1]，李 伟[1]，唐 畅[1]，黄 蕾[2]，温 昶[2]
（1. 湖北省电力规划设计研究院有限公司，湖北 武汉 430040；
2. 华中科技大学能源与动力工程学院，湖北 武汉 430074）

［摘 要］【目的】电解槽运行过程中存在适应新能源功率波动和启停机制等问题，长时间尺度的容量配置模型难以准确描述其动态特性，会影响制氢系统的容量规划精度。【方法】以碱性（ALK）电解槽与质子交换膜（PEM）电解槽混合制氢系统为研究对象，提出了一种分钟级时间尺度的混合制氢容量规划方法。首先，设计了分钟级时间尺度电解槽启停控制模型，用于精确描述 2 类电解槽的运行状态；其次，针对 ALK 电解槽适应波动能力差以及启停时间长等问题，设计了优先保障 ALK 电解槽稳定运行的功率分配策略；最后，针对混合制氢系统的容量规划问题进行多目标优化，基于增广 ε 约束算法求解模型的 Pareto 解集。【结果】仿真结果表明：在风光装机各 20 MW、系统投资成本 2 500 万元的情况下，所提 1 min 级模型较传统 15 min 尺度的模型系统平均单日制氢量提升 14.7%，单位制氢成本降低 7.5%，弃电率下降 63.6%；此外，1 min 级调度精度下，ALK/PEM 电解槽配比随投资渐进优化，小于 2 500 万元投资 ALK 电解槽占比>90%，大于 3 000 万元时 PEM 电解槽投资占比升至 19.4%，而 15 min 级在 2 000 万元投资时 ALK/PEM 容量就达到 4:1，其过早的提升 PEM 电解槽占比，不仅不符合工程实际，也降低了各项产出参数，显示大时间尺度调度可能致容量失配。

［关 键 词］电解槽；混合制氢；多目标优化；容量配置优化；可再生能源

［引用本文格式］曹传胜，姜聪，李伟，等. 考虑电解槽分钟级动态特性的碱性与质子交换膜电解槽混合制氢系统容量规划[J]. 热力发电，2026, 55(5): 1-12. CAO Chuansheng, JIANG Cong, LI Wei, et al. Minute-level dynamic response-based capacity planning for alkaline-PEM hybrid hydrogen production systems[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(5): 1-12.

Minute-level dynamic response-based capacity planning for alkaline-PEM hybrid hydrogen production systems

CAO Chuansheng[1], JIANG Cong[1], LI Wei[1], TANG Chang[1], HUANG Lei[2], WEN Chang[2]
(1. PowerChina Hubei Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] Challenges such as adapting to renewable energy power fluctuations and coping with start-stop mechanisms exist during the operation of electrolyzers. Capacity configuration models based on long time scales struggle to accurately capture these dynamic characteristics, which reduces the accuracy of capacity planning for hydrogen production systems. [Methods] Taking a hybrid hydrogen production system composed of alkaline (ALK) electrolyzers and proton exchange membrane (PEM) electrolyzers as the research object, this paper proposes a minute-level time-scale capacity planning method for hybrid hydrogen production. First, a minute-level electrolyzer start-stop control model is designed to accurately describe the operating states of the two types of

收 稿 日 期：2025-07-21 修 回 日 期：2025-08-28 接 受 日 期：2025-09-16
基 金 项 目：国家重点研发计划项目（2024YFB4006505）；中国电力建设股份有限公司科技项目（DJ-ZDXM-2023-16）
Supported by: National Key Research and Development Program (2024YFB4006505); Technology Project of China Power Construction Co., Ltd. (DJ-ZDXM-2023-16)
第一作者简介：曹传胜（1989），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为氢能制备与利用技术，caocssj@powerchina-hb.com。
通信作者简介：温昶（1986），男，博士，教授，主要研究方向为可再生能源制氢技术，wenchang@hust.edu.cn。

electrolyzers. Second, considering ALK electrolyzers' poor adaptability to power fluctuations and long start-stop time, we develop a power allocation strategy that prioritizes the stable operation of ALK electrolyzers. Finally, we conduct multi-objective optimization for the capacity planning problem of the hybrid hydrogen production system, and the Pareto solution set of the model is obtained via the augmented ε-constraint method. [Results] Simulation results show that under the condition of 20 MW installed wind power capacity and 20 MW installed photovoltaic capacity, with a total system investment cost of 25 million yuan, the proposed 1-minute time-scale model increases the average daily hydrogen production by 14.7%, reduces the unit hydrogen production cost by 7.5%, and decreases the renewable energy curtailment rate by 63.6% compared with the traditional 15-minute time-scale model. In addition, with 1-minute scheduling accuracy, the ALK/PEM electrolyzer capacity ratio is gradually optimized as investment increases: when the total investment is below 25 million yuan, the proportion of ALK electrolyzers exceeds 90%; when the total investment exceeds 30 million yuan, the investment proportion of PEM electrolyzers rises to 19.4%. In contrast, for the 15-minute time-scale model, the ALK/PEM capacity ratio reaches 4:1 even when the investment is only 20 million yuan. This prematurely increased proportion of PEM electrolyzers not only deviates from practical engineering conditions but also degrades overall system performance, indicating that coarse time-scale scheduling may lead to capacity mismatch.

Key words: electrolyzer; hybrid hydrogen production; multi-objective optimization; capacity configuration optimization; renewable energy

在“碳达峰，碳中和”的大背景下，新能源产量处于稳步上升态势[1-2]，然而，风能和太阳能等新能源存在出力不稳定等问题，对电网的稳定性造成很大影响从而难以大规模消纳。根据历年的能源消耗情况分析，2010 年到 2020 年间风能、太阳能等新能源的消耗占我国总能源消耗不足 25%[3]。因此，还需寻求消纳风光资源的合理方式。氢能作为一种高效清洁的二次能源，可通过电解水制氢的方式将风光产生的电力转化为氢能，减少风光资源的浪费。目前，已达到商业化水平的电解水制氢技术主要是碱性（alkaline，ALK）电解水和质子交换膜（proton exchange membrane，PEM）电解水技术[4]。

碱性电解槽制氢技术已实现完全商业化，但其存在启停时间长、爬坡功率小、处理波动能力差等问题[5]，这使其很难与风光等可再生能源发电形成良好的功率适配。而 PEM 电解水技术目前虽然还处于初步商业化阶段，但其具备响应速度快、处理波动能力强的特点[6-7]，能够很好地与可再生能源发电适配。基于此，近年来 ALK 和 PEM 混合制氢系统的容量配置优化得到了学者们的广泛重视和研究。郑博等[8]提出了一种风光互补复合制氢系统的功率分配协同运行策略与容量优化方法，结果显示该系统不仅有效降低了波动性对电解槽的影响，还提升了制氢量。徐衍会等[9]提出一种电解制氢单元的功率分配策略，结合风光耦合制氢系统的能量流动模式，构建了系统容量配置优化模型。杨金彬[10]构建了基于混合电解制氢的光伏发电制氢系统的容量配置双层优化模型，上层优化模型考虑系统全生命周期成本，下层优化模型结合实验所得电解制氢的稳动态性能指标，通过差分−粒子群混合优化算法和 CPLEX 求解器进行模型的优化求解。此外，在进行容量优化的同时还涉及到混合制氢系统功率分配相关问题，因此许多学者也进行了相关研究。杨胜等[11]针对风光出力不确定性对系统优化运行的影响，以系统日运行成本最低为目标，提出了可再生能源碱性−质子交换膜联合制氢系统多时间尺度优化策略。Zhang 等人[12]提出了包括使用 XGBoost 算法分类预测模块的源荷协同优化策略，该策略可平衡电解槽阵列之间的负载，减少冷启动情况，延长稳态制氢时间。

上述文献总结了目前混合制氢容量配置的多种方法及功率分配方案，文献[8-10]中模型选用的时间尺度为 1 h，文献[12]时间尺度为 15 min，然而电解槽需要更小的时间尺度才能更好地反映出其相关动态特性，从而更精确地进行容量规划和功率分配。另外，上述文献所设计模型均采用单目标优化解决问题，无法综合反映出制氢系统内多个指标之间的关系。

针对上述问题，本文构建了 ALK-PEM 混合制氢容量规划模型及相应求解算法。模型中建立了电解槽启停控制机制，并采用分钟级仿真间隔以更细致地反映运行状态；其次，考虑到频繁启停以及功率波动频繁变化对 ALK 电解槽所带来的影响，设计了优先保证 ALK 电解槽稳定运行的混合制氢功率分配策略；随后，针对容量规划问题的求解，本文设计了制氢量、单位制氢成本、初始投资成本、弃电率等多个目标函数，并采用多目标优化增广 ε 约束算法对模型进行求解，分析系统的 Pareto 解集，

寻找系统内多个指标之间的关系，从解集中获取最佳的容量规划方案；最后，以内蒙古某地区的风光数据进行算力分析，并选用 15 min 级模型与 1 min 级模型进行对比，验证模型的有效性以及合理性。

1 ALK-PEM 混合制氢系统模型

1.1 系统架构

针对 ALK、PEM 电解槽各自优势，提出了如图 1 所示的 ALK-PEM 混合制氢系统架构。该系统架构由风力、光伏发电单元、ALK、PEM 电解槽制氢单元以及配电网组成。风力发电单元存在波动性强、功率输出不稳定等问题，光伏发电单元存在昼夜功率输出差值大等问题[13-14]，故发电侧存在较大波动，而 ALK 电解槽作为目前商业化成熟的电解水制氢设备，并不能与其出力特性相适配[15]。于是通过引入 PEM 电解槽，结合功率分配策略，实现对可再生能源出力更好的消纳，提升制氢系统的稳定性和经济性。此外，考虑到采用 1 min 时间尺度对全年的数据进行模拟会产生过高的计算负担，本文将采用聚类分析获得典型日的方法以降低计算复杂度，因此，本文后续模型介绍基于单日时间尺度即 1 440 min，采用 1 min 时间步长。

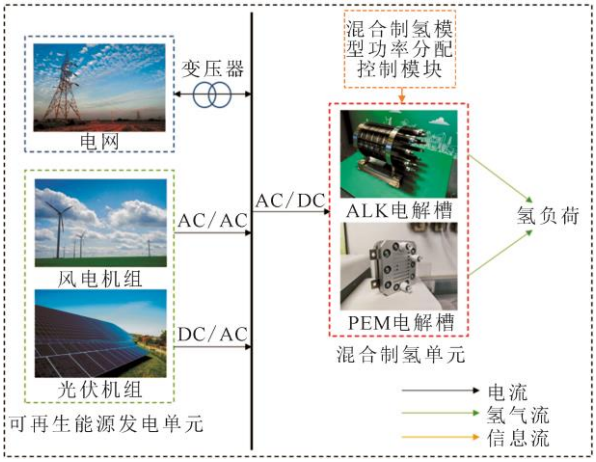


图 1 ALK-PEM 混合制氢系统架构
Fig.1 Architecture diagram of the ALK-PEM hybrid hydrogen production system

1.2 风力及光伏发电模型

风力发电通过风力带动叶片转动从而将风能转化为机械能，再利用发电机将机械能转化为电能，最终实现风能−电能的转换[16]；光伏发电主要是利用半导体的光电效应将照射的太阳能转化为光电压形式的电能，其输出能量与辐照强度相关[17]。风机、光伏具体数学模型如下：

$$P_{\mathrm{WT}}=\begin{cases}0 & ,\ v_{\mathrm{w}}\leqslant v_{\mathrm{w,in}}\\ P_{\mathrm{WT,max}}\cdot\dfrac{v_{\mathrm{w}}^3-v_{\mathrm{w,in}}^3}{v_{\mathrm{w,max}}^3-v_{\mathrm{w,in}}^3} & ,\ v_{\mathrm{w,in}}<v_{\mathrm{w}}\leqslant v_{\mathrm{w,max}}\\ P_{\mathrm{WT,max}} & ,\ v_{\mathrm{w,max}}<v_{\mathrm{w}}\leqslant v_{\mathrm{w,out}}\\ 0 & ,\ v_{\mathrm{w,out}}<v_{\mathrm{w}}\end{cases}\tag{1}$$

$$P_{\mathrm{PV}}=P_{\mathrm{PV,max}}\beta S_{\mathrm{solar}}/1\,000\tag{2}$$

式中：$v_{\mathrm{w,in}}$ 和 $v_{\mathrm{w,out}}$ 分别为风机的切入风速和切出风速；$v_{\mathrm{w,max}}$ 为额定风速；$P_{\mathrm{WT,max}}$ 为风机的额定输出功率；$P_{\mathrm{PV,max}}$ 为光伏的额定功率；β 为光伏板效率；S_{solar} 为辐照强度。

1.3 ALK 及 PEM 电解槽模型

通过上述分析，电解槽模型的时间尺度采用 1 min，以真实模拟频繁风光波动以及对电解槽启停状态的影响。ALK 电解槽的运行状况分为冷启动、热启动和工作模式，冷启动消耗功率为 ALK 电解槽额定功率的 10%，最低冷启动时间设定为 60 min；热启动消耗功率为 ALK 额定功率的 15%，最低热启动时间为 5 min；工作状态的最低功率需求为额定功率的 20%，ALK 槽的运行功率范围为额定功率 20%~100%。ALK 电解槽启停运行逻辑如图 2 所示。

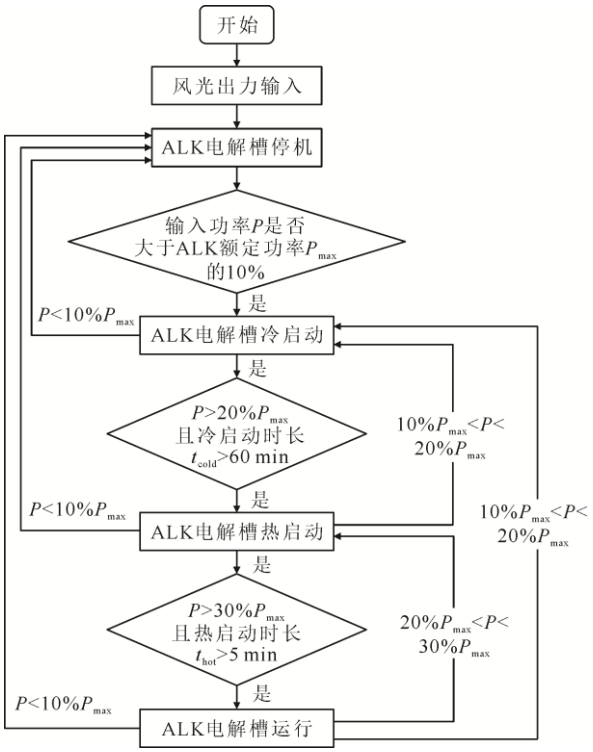


图 2 ALK 电解槽启停控制逻辑
Fig.2 Start-stop control logic of the ALK electrolyzer

相比之下，PEM 电解槽具备响应速度快、适应波动能力强等优势，故对 PEM 电解槽的建模将不

考虑热启动的影响。ALK 和 PEM 电解槽的相关参数如表 1 所示。需要说明的是，本文所采用的 PEM 电解槽模型为稳态参数化模型，即假设电解槽在稳定运行温度下工作，以及膜含水量处于稳定状态。

表 1 ALK 和 PEM 电解槽相关参数
Tab.1 Parameters related to the ALK and PEM electrolyzer

参数	ALK 电解槽	PEM 电解槽
电氢转化系数（标况下）/(m^3 (kW h)$^{-1}$)	5.0	4.5
运行功率范围/%	20~100	5~105
冷启动时长/min	60	1
热启动时长/min	5	
电解槽功率最大波动率/%	50	100

1.4 ALK-PEM 混合制氢功率分配策略

ALK-PEM 混合制氢系统能够充分结合两者的优势，实现成本与效率之间的优化平衡。通过合理的功率分配，系统可以在 ALK 电解槽较稳定运行的同时，由 PEM 电解槽处理剩余功率波动，从而减少启停次数并提升整体系统的氢气生产能力和能源利用效率[18]。因此，本文提出的功率分配原则是优先保证 ALK 电解槽稳定运行，并由 PEM 电解槽承担剩余波动功率，据此设计了以下功率分配策略，功率分配逻辑如图 3 所示。

1）当输入功率 $P \leqslant P_{\mathrm{cold}}$ 时，输入功率不能满足 ALK 电解槽的冷启动条件，故输入功率全部分配给 PEM 电解槽。

2）当输入功率 $P_{\mathrm{cold}} < P \leqslant P_{\mathrm{hot}}$ 时，若 ALK 电解槽处于冷启动或停机状态，则供给足够的电力保障 ALK 电解槽冷启动，剩余功率分配给 PEM 电解槽制氢。

3）当输入功率 $P_{\mathrm{hot}} < P \leqslant P_{\mathrm{min}}$ 时，先进行 2）中的判断，此时若 ALK 电解槽处于热启动状态，供给足够的电力保障 ALK 电解槽热启动；剩余功率分配给 PEM 电解槽制氢。

4）当输入功率 $P > P_{\mathrm{min}}$ 时，先进行 3）中的判断，若 ALK 电解槽处于工作状态，则优先分配电力给 ALK 电解槽，保障 ALK 电解槽在额定功率附近运行，避免低负荷运行给 ALK 电解槽带来损害；剩余功率分配给 PEM 电解槽制氢。

5）当 PEM 电解槽无法消纳多余电力时，则选择弃电。

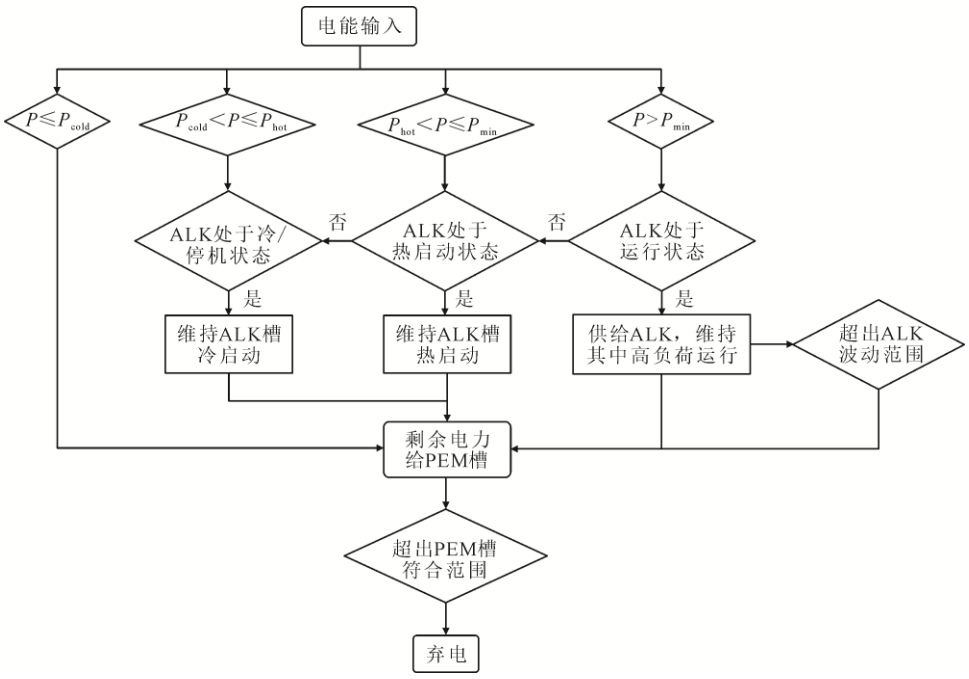


图 3 ALK-PEM 混合制氢系统的功率分配逻辑
Fig.3 Power allocation logic of the ALK-PEM hybrid hydrogen production system

2 混合制氢系统容量配置模型

2.1 混合制氢容量规划目标函数设计

本文针对混合制氢系统设计包括系统的制氢量、单位制氢成本、初始投资成本、弃电率 4 个目标函数，探索混合制氢系统绿色经济的规划−运营方案。

制氢量 $Q_{\mathrm{H_2}}$（$\mathrm{m^3}$）指单位时间内通过电解槽生

产的氢气体积。$Q_{\mathrm{H_2}}$ 是衡量制氢系统产能的重要指标。制氢量的大小取决于系统的电力输入、设备效率以及工作时间[19]。

$$Q_{\mathrm{H_2}}=\sum_{i=1}^{1\,440}(P_{\mathrm{ALK},i}/\eta_{\mathrm{ALK}}+P_{\mathrm{PEM},i}/\eta_{\mathrm{PEM}}) \tag{3}$$

式中：$P_{\mathrm{ALK},i}$ 和 $P_{\mathrm{PEM},i}$ 分别为 ALK 槽和 PEM 槽处于工作状态时单位时间的输入功率，若电解槽处于冷/热启动状态，则该值为 0；η_{ALK} 和 η_{PEM} 分别为 ALK 槽和 PEM 槽的制氢效率。

单位制氢成本指每立方米氢气的生产成本，包含设备投资、运行维护成本及电力消耗等。该指标反映了氢气生产的经济性，是成本效益分析中的关键参数[20]。

$$C_{\mathrm{con}}=\left(N_{\mathrm{PEM}}C_{\mathrm{PEM,con}}\frac{Y}{Y_{\mathrm{PEM}}}+N_{\mathrm{ALK}}C_{\mathrm{ALK,con}}\frac{Y}{Y_{\mathrm{ALK}}}\right) \tag{4}$$

$$C_{\mathrm{om}}=(N_{\mathrm{PEM}}C_{\mathrm{PEM,om}}Y+N_{\mathrm{ALK}}C_{\mathrm{ALK,om}}Y) \tag{5}$$

$$C_{\mathrm{power}}=(C_{\mathrm{wind}}P_{\mathrm{wind}}+C_{\mathrm{PV}}P_{\mathrm{PV}}+C_{\mathrm{grid}}P_{\mathrm{grid}}) \tag{6}$$

$$C_{\mathrm{H_2}}=(C_{\mathrm{con}}+C_{\mathrm{om}}+C_{\mathrm{power}})/Q_{\mathrm{H_2}}/Y \tag{7}$$

式中：C_{con}、C_{om}、C_{power}、$C_{\mathrm{H_2}}$ 分别为设备建设成本、设备维护成本、电力成本、单位制氢成本；N_{PEM}、N_{ALK} 分别为 PEM 和 ALK 电解槽的装机容量；$C_{\mathrm{PEM,con}}$、$C_{\mathrm{ALK,con}}$ 分别为 PEM 和 ALK 电解槽的单位建设成本；Y、Y_{PEM}、Y_{ALK} 分别为该混合制氢项目的生命周期、PEM 或 ALK 电解槽的使用寿命；$C_{\mathrm{PEM,om}}$、$C_{\mathrm{ALK,om}}$ 分别为 PEM 和 ALK 电解槽的单位维护成本；C_{wind}、C_{PV}、C_{grid} 分别为风力发电、光伏发电、从电网购电的单位电力成本；P_{wind}、P_{PV}、P_{gird} 分别为风力发电、光伏发电、从电网购电的电量。

初始投资成本指建造制氢系统所需的固定成本，该成本直接影响到系统的资本回收期。

$$C_{\mathrm{init}}=(N_{\mathrm{PEM}}C_{\mathrm{PEM,con}}+N_{\mathrm{ALK}}C_{\mathrm{ALK,con}}) \tag{8}$$

弃电率指由于系统无法处理全部输入功率而导致的电力浪费比例，通常用百分比表示。降低弃电率能够提高系统的能源利用效率 η_{premind}。

$$\eta_{\mathrm{premind}}=\sum_{i=1}^{1\,440}\left(\frac{P_{\mathrm{ALK},i}+P_{\mathrm{PEM},i}}{P_{\mathrm{total}}}\right) \tag{9}$$

式中：P_{total} 为系统输入的总功率。

2.2 混合制氢系统模型约束设计

针对 ALK 电解槽和 PEM 电解槽分别设置容量约束以及调度约束，随后针对系统整体设置总功率平衡约束。

2.2.1 ALK 电解槽容量及调度约束

ALK 电解槽的容量不应超过风光出力的峰值，以免造成装机容量过剩，同时考虑其单位时间内的机组出力边界条件[21]，因此对 ALK 电解槽做如下约束：

$$0\leqslant N_{\mathrm{ALK}}\leqslant P_{\mathrm{max,pv,wind}} \tag{10}$$

$$0\leqslant P_{t,\mathrm{ALK}}\leqslant N_{\mathrm{ALK}} \tag{11}$$

$$P_{t,\mathrm{ALK}}(1-x_{\mathrm{ALK}})-P_{t-1,\mathrm{ALK}}(1-x_{\mathrm{ALK}})\leqslant z\cdot N_{\mathrm{ALK}} \tag{12}$$

$$V_{\mathrm{H_2,ALK}}=P_{t,\mathrm{ALK}}\eta_{\mathrm{ALK}}(1-x_{\mathrm{ALK}}) \tag{13}$$

式中：N_{ALK}、$P_{\mathrm{max,pv,wind}}$ 分别为 ALK 电解槽装机容量和风光出力峰值；$P_{t,\mathrm{ALK}}$ 为 t 时刻 ALK 电解槽的输入功率；x_{ALK} 为 0-1 变量，代表 ALK 电解槽是否处于产氢状态；z 为 ALK 电解槽的每分钟最大波动功率（表 1）；$V_{\mathrm{H_2,ALK}}$、η_{ALK} 分别为 ALK 电解槽的产氢速率和电解制氢效率。式(12)旨在代表单位时间内 ALK 电解槽所能承受的功率变化不能超过某一值，式(13)旨在代表单位时间内 ALK 电解槽的制氢速率。PEM 电解槽相关约束与 ALK 电解槽约束类似，不再详细介绍。

2.2.2 功率平衡约束

功率平衡约束要求电力的出力端与消耗端在每一时刻满足如下平衡关系：

$$\begin{aligned}0<P_{\mathrm{buy}}<P_{\mathrm{buy,max}}\\0<P_{\mathrm{sell}}<P_{\mathrm{sell,max}}\end{aligned} \tag{14}$$

$$P_{\mathrm{PV}}+P_{\mathrm{wind}}+P_{\mathrm{grid}}=P_{t,\mathrm{ALK}}+P_{t,\mathrm{PEM}}+P_{t,\mathrm{remind}} \tag{15}$$

式中：P_{buy}、P_{sell} 分别为单位时间内从电网的购售电功率；$P_{\mathrm{buy,max}}$、$P_{\mathrm{sell,max}}$ 分别为单位时间内从电网的购售电功率最大值，设置为 2 MW；P_{PV}、P_{wind}、P_{grid} 分别代表单位时间内光伏发电机组、风力发电机组以及电网出力；$P_{t,\mathrm{ALK}}$、$P_{t,\mathrm{PEM}}$、$P_{t,\mathrm{remind}}$ 分别代表单位时间内 ALK 电解槽、PEM 电解槽以及弃电所消耗的功率。式(15)确保了每一时刻内电力供给和消耗之间的平衡。

2.3 混合制氢系统模型求解算法

针对多目标求解，增广 ε 约束优化算法是一种可以有效避免主观影响，得到模型 Pareto 解集的方法[22]。针对本文的混合制氢模型，如图 4 所示该算法的基本步骤如下。

步骤 1）　该算法的第 1 步为在不考虑其他目标函数影响的情况下对第 1 目标函数制氢量进行求解，得到第 1 目标函数的最优值为 $F_1=F_1^*$（F_i 为优化目标，F_i^* 为第 i 个目标函数在单目标优化下得到

的最优值）。然后，以制氢量为约束条件，对第 2 个目标函数单位制氢成本进行求解，得到在制氢量最优情况下，第 2 目标函数单位制氢成本的最优解为 $F_2=F_2^*$。由于考虑了 4 个目标函数，需要重复这个过程，直至得到各目标函数在其他目标函数作为约束时的最优解。将本次循环得到的 4 个值保存在列表的第 1 行中。收益表第 1 行仅为以第 1 目标函数制氢量为最优循环开始时的情况，并不能得到多目标模型中各优化目标的取值范围。因此还需依次选取不同的目标函数作为第 1 目标函数进行另外 3 次循环。收益表计算流程如图 4 所示。

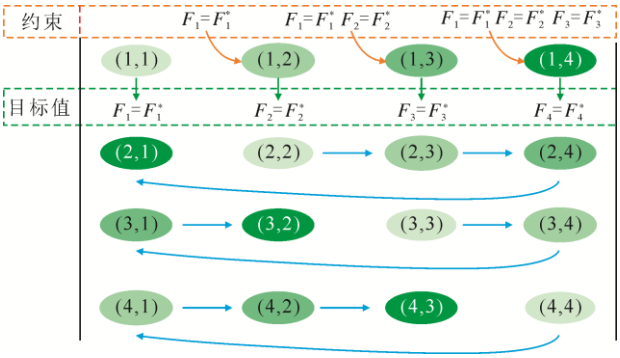


图 4 收益表计算流程

Fig.4 Flow chart of income statement calculation

步骤 2） 通过将其他准则转化为约束条件来优化单一准则，为此需确定准则的范围。可以通过步骤 1 得到收益表中第 i 列的最大值和最小值之差来确定，即等于 $F_{i,\max}$–$F_{i,\min}$。然后，决策者预先定义每个准则的网格点数 G。兼顾高精度求解和降低计算复杂度，本文选取 G 为 8。如果这些点在范围内均匀分布，则该值为：

$$e_{i,g}=\begin{cases}e_{i,g-1}+\dfrac{F_{i,\max}-F_{i,\min}}{G}, & g=2,\ldots,G\\ F_{i,\min}, & g=1\end{cases} \tag{16}$$

式中：$F_{i,\max}$ 和 $F_{i,\min}$ 分别为优化目标 F_i 在列表中的最大值和最小值；$e_{i,g}$ 为优化目标在松弛 g 次时的松弛值。

步骤 3） 选择 1 个主目标函数，并将其他目标函数转化为增广约束，其他目标函数按照步骤 2 的松弛值依次作为主目标函数的约束，求出解集。原始目标函数可改写为：

$$\begin{aligned}&\min\left\{F_1-\varepsilon\left(\sum_{i=\{2,3\}}\left(\frac{s_i}{F_{i,\max}-F_{i,\min}}\right)\right)\right\}\\ &\text{s.t.}\begin{cases}F_2+s_2=e_{2,g}\\ F_3+s_3=e_{3,g}\end{cases},\ g=1,2,\ldots,G\end{aligned} \tag{17}$$

重复步骤 2、步骤 3，对所有优化目标函数分别松弛求解，得到全面的 Pareto 解集。

3 模拟结果与讨论

3.1 混合制氢系统算例

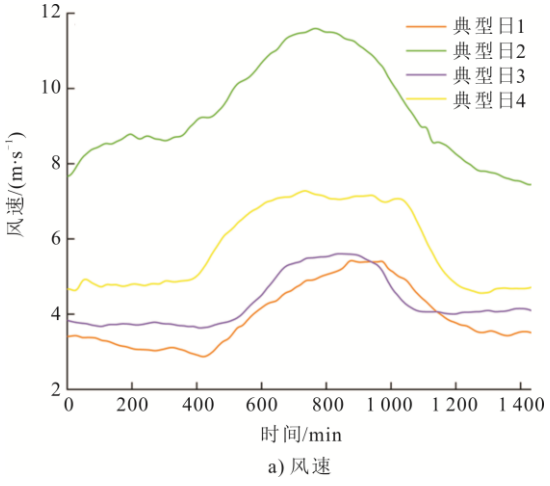
本文采用内蒙古东部某地区的风速和辐照强度数据为例，纬度为 39.58，经度为 107.57，采集时间为 2015 年 1 月 1 日至 12 月 31 日。风电机组和光伏机组的装机容量均设置为 20 MW。风机设备、光伏设备、ALK 电解槽、PEM 电解槽相关参数如表 2 所示。数据参考中国电建 2024 年度内蒙古赤峰风光制氢一体化示范项目。分时电价参考蒙东上网电价。仿真环境为 CPU model: 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12600KF，Gurobi 求解器版本为 11.0.2，目标函数收敛精度为 0.5%。

表 2 设备成本参数和使用寿命

Tab.2 Equipment cost parameters and service life

设备名称	投资成本/(元 kW^{-1})	每年运维成本/(元 kW^{-1})	使用寿命/a
ALK 电解槽	1 240	37.20	7
PEM 电解槽	5 560	166.80	10
风力发电机	2 029	60.87	30
光伏发电机	692	20.76	20

首先采用 K-means 算法[23]对全年的风速和辐照强度数据进行聚类分析，得到 4 个典型日的风速和辐照强度出力场景，具体如图 5 所示。各场景权重如表 3 所示。本文共设计 3 种实验方案：1）在离网条件下，采用传统的 15 min 级时间尺度模型，模型的功率分配策略由求解器自由分配；2）在离网条件下，将模型的时间尺度缩小至 1 min，模型的功率分配策略采用优先确保 ALK 槽稳定运行；3）在并网条件下，采用 1 min 级别时间尺度，模型的功率分配策略采用优先确保 ALK 槽稳定运行。



a) 风速

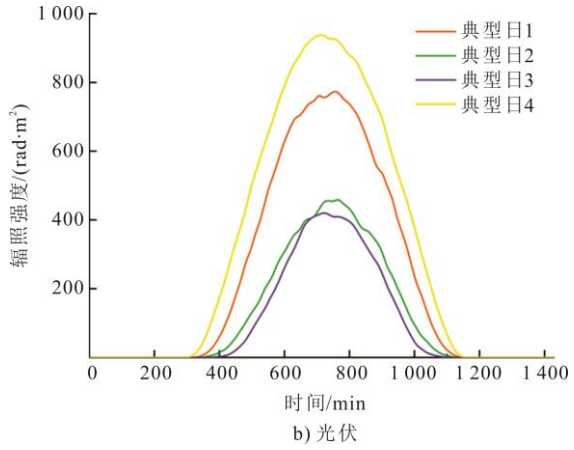


图 5 风速及光伏典型日资源

Fig.5 Wind speed and photovoltaic output in typical days

表 3 各典型日场景权重

Tab.3 Weights of typical daily scenarios

场景	典型日 1	典型日 2	典型日 3	典型日 4
权重	0.278	0.143	0.320	0.259

3.2 离网容量规划−运营方案

根据本文提到的 ALK、PEM 电解槽建模以及功率分配逻辑，采用增广ε约束优化算法得到模型的 Pareto 解集，分别得到 1 min 级和 15 min 级时间尺度 Pareto 解集如图 6 和图 7 所示，ALK-PEM 容量配置如表 4 和表 5 所示。

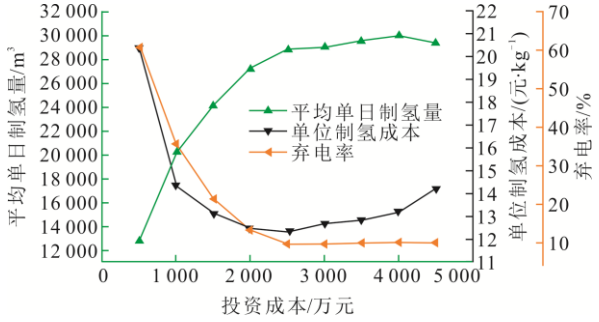


图 6 1 min 级离网容量规划 Pareto 解集

Fig.6 Pareto solution set diagram for 1-minute off-grid capacity planning

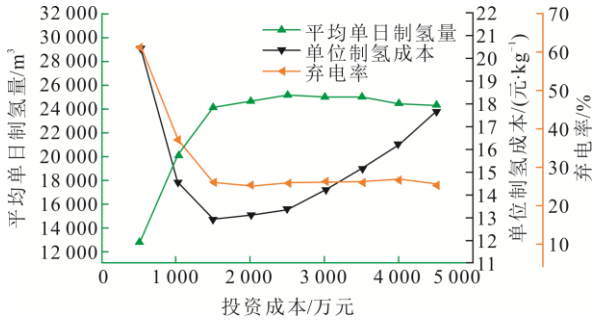


图 7 15 min 级离网容量规划 Pareto 解集

Fig.7 Pareto solution set diagram for 15-minute off-grid capacity planning

表 4 1 min 级 ALK-PEM 容量配置

Tab.4 1-minute ALK-PEM capacity configuration

投资成本/万元	ALK 电解槽容量/MW	PEM 电解槽容量/MW	平均单日制氢量/m³	单位制氢成本/(元 kg⁻¹)	弃电率/%
500	4.03	0	12 800.95	20.33	60.99
1 000	8.06	0	20 197.00	14.33	36.11
1 500	11.72	0.08	24 143.83	13.11	21.44
2 000	13.41	0.61	27 220.46	12.44	13.26
2 500	13.26	1.54	28 821.59	12.33	9.54
3 000	11.82	2.76	28 996.02	12.67	9.62
3 500	10.35	3.99	29 578.97	12.89	9.94
4 000	9.96	4.97	29 961.54	13.22	10.15
4 500	11.99	5.42	29 406.64	14.22	10.01

表 5 15 min 级 ALK-PEM 容量配置

Tab.5 15-minute ALK-PEM capacity configuration

投资成本/万元	ALK 电解槽容量/MW	PEM 电解槽容量/MW	平均单日制氢量/m³	单位制氢成本/(元 kg⁻¹)	弃电率/%
500	3.97	0.01	12 708.27	20.56	61.51
1 000	8.03	0.01	19 971.38	14.56	36.98
1 500	9.26	0.63	24 003.80	12.89	25.95
2 000	7.84	1.85	24 595.28	13.11	25.29
2 500	6.38	3.07	25 110.77	13.33	25.81
3 000	7.46	3.73	24 941.08	14.22	25.94
3 500	9.10	4.27	24 988.23	15.11	26.04
4 000	9.95	4.98	24 407.45	16.22	26.61
4 500	14.83	4.79	24 234.96	17.67	25.44

从图 6 和表 4 分析可知，当系统投资成本小于 2 500 万元时，随着投资成本的提升，ALK-PEM 混合制氢系统的单日平均制氢量呈现出稳定上升的趋势，平均每增加 100 万元的投资成本，单日平均制氢量可增加 6.25%；此外，系统的单位制氢成本和弃电率也随投资成本的增加而下降，投资成本从 500 万元增加到 2 500 万元，系统的单位制氢成本下降了 39.3%，弃电率下降了 84.36%。

当投资成本超过 2 500 万元后，系统的单日平均制氢量虽仍在上升，但增幅相较于小于 2 500 万元时大幅度减少，从 2 500 万元到 4 000 万元，平均每增加 100 万元的投资成本，单日平均制氢量仅增加 0.26%，甚至在投资成本达到 4 500 万元时，系统的单日平均制氢量还出现了下降；系统的单位制氢成本也出现了上升的趋势，从 2 500 万元到 4 500 万元，系统单位制氢成本上升了 15.31%，投资成本上升的同时还带来了生产成本的上升，使得系统的回本周期变长。随着投资成本的上升，系统弃电率变化不明显。

综上所述，投资成本为 2 500 万元是该 Parero 解集的 1 个拐点，选择此点（对应 ALK 容量为 13.26 MW，PEM 容量为 1.54 MW）作为随后的容量配置可以实现各项指标的综合最优。

此外，对比 1 min 级和 15 min 级模型 Pareto 解集图以及容量配置，当投资成本小于 1 000 万元时，2 种模型均给出几乎纯 ALK 电解槽的配置，2 种模型的结果无明显差异。当投资成本超过 1 000 万元时，所提出的模型及功率分配方案的平均单日制氢量、单位制氢成本、弃电率均比传统 15 min 级时间尺度模型有明显优势。在投资成本 2 500 万元时，1 min 级模型的单日制氢量达 28 821.59 m^3，较 15 min 级模型提升 14.7%。在单位制氢成本方面，需要说明的是新疆、内蒙、青海等风光资源丰富的区域，绿氢成本已经降到 14~16 元/kg[24]，本模型进行成本测算时，尚未考虑人工、设备故障等带来的成本，故所得实际成本较真实数据偏低。1 min 级模型在 2 500 万元投资时达成全域最低制氢成本（12.33 元/kg），相较于 15 min 单位制氢成本降低 7.5%。1 min 级模型弃电率随投资增加急剧下降，2 500 万元投资时为 9.54%；而 15 min 级在同等投资下弃电率仍高达 25.29%，且始终维持在 25%以上。这表明 1 min 级能更好地响应风电波动，弃电率降低 63.6%。1 min 级模型中 ALK/PEM 电解槽容量配比呈现渐进优化：低投资区间（小于 2 500 万元）以 ALK 电解槽主导，占比大于 90%，仅在高投资区间时（大于 3 000 万元）提升 PEM 电解槽占比至 19.4%（3 000 万元时），符合工程实际。而 15 min 级模型中，ALK/PEM 电解槽容量配比在投资成本为 2 000 万元时就达到 4:1，其过早的提升 PEM 电解槽占比，不仅不符合工程实际，也降低了各项产出参数，反映其粗时间尺度导致的容量失配。

3.3 分钟级模型优势机理分析

传统 15 min 时间尺度模型因时间聚合效应忽略风光出力与电解槽响应的瞬态特性，而 1 min 级模型通过精确追踪动态过程，显著优化了系统性能。

1）减少启停过程误判进而减少了无效能耗与设备损耗。ALK 电解槽冷启动需持续 60 min，热启动需 5 min。对于 2 种不同级别的时间尺度，1 min 和 15 min 数据集对比如图 8 所示。15 min 数据集为 1 min 数据集每隔 15 min 选取 1 次数据。在此条件下，对于 1 min 级别的模型系统需要连续判断 60 次是否满足冷启动条件，故降低了因误判冷启动带来的能量损失；而 15 min 模型将启动过程简化为 1～2 个时段，系统由 60 个点的判断，减少为 4 个点的判断，进而导致电解槽错误冷启动，一方面造成功率的浪费，另一方面造成电解槽频繁启停，降低电解槽寿命。最终结果显示，投资成本为 2 500 万元时，15 min 模型因时段内功率波动误触发冷启动 2.2 次/日，而 1 min 模型仅有 1.1 次/日。因此，1 min 级时间尺度可以精确模拟启停时间与功率需求，避免无效预热以及频繁启停。

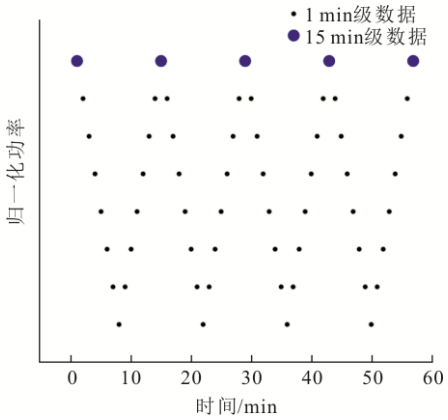


图 8 1 min 和 15 min 数据集对比

Fig.8 Comparison between the 1-minute and 15-minute datasets

2）发挥 PEM 电解槽动态潜力。风光出力存在频繁的随机波动且包含关键功率极值点。15 min 模

型因时间尺度过大往往掩盖掉瞬时波动细节，导致 PEM 电解槽在 15 min 时段内功率恒定，使其无法响应波动。在 15 min 模型中，系统对每个时段仅使用功率中间值进行调度判断，忽略了时段内部可能存在的高功率峰值。例如：某一 15 min 时段内，风电实际出力在前 3 min 为 10 MW，其后持续为 0，其功率中间值为 0，低于 ALK 或 PEM 电解槽的启停阈值。此时，15 min 模型将误判为“无可用电力”，从而导致该时段全部弃电。而分钟级模型可识别出 10 MW 的短时高值，并调度 PEM 电解槽在波峰期间短时运行吸收该部分电能，从而有效避免弃电。

3.4 多场景下系统运行状态

基于上述分析，选择系统投资成本 2 500 万元时，ALK 和 PEM 电解槽容量配置分别为 13.26 MW 和 1.54 MW，进行 4 个典型日场景下系统的运行状态分析，旨在清晰展示不同风光场景对 ALK-PEM 混合制氢系统运行的影响。图 9 为 4 种典型日场景风机和光伏出力。图 10 为该容量配置下，4 种场景下 ALK-PEM 混合制氢系统运行状态。

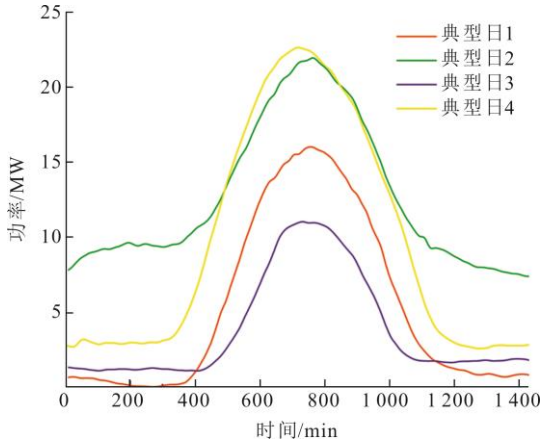
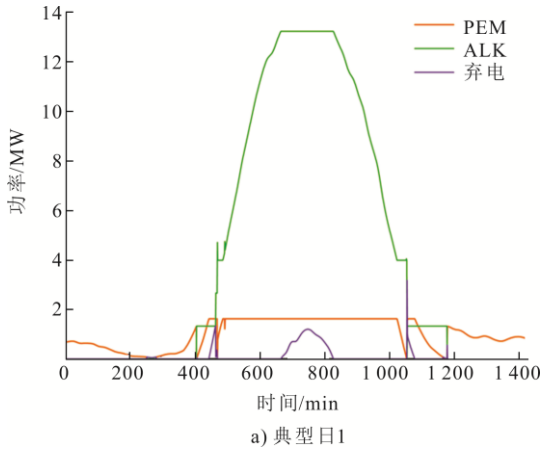
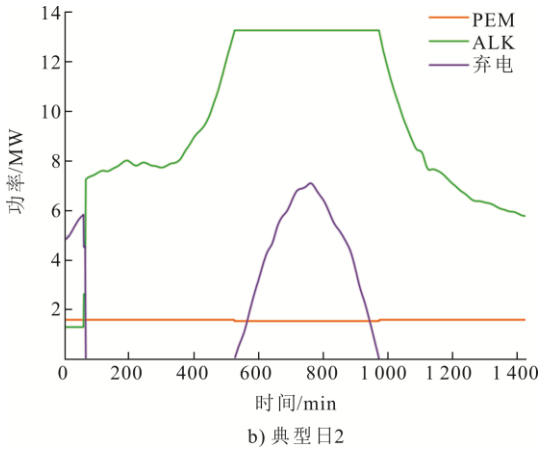
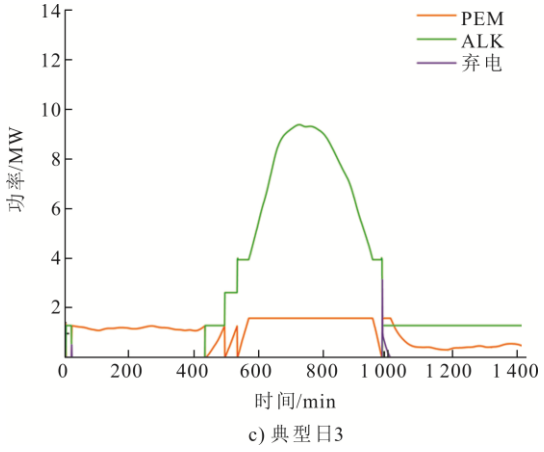


图 9 4 种典型日场景风光出力合成

Fig.9 A composite diagram of wind and solar power output in four typical daytime scenes







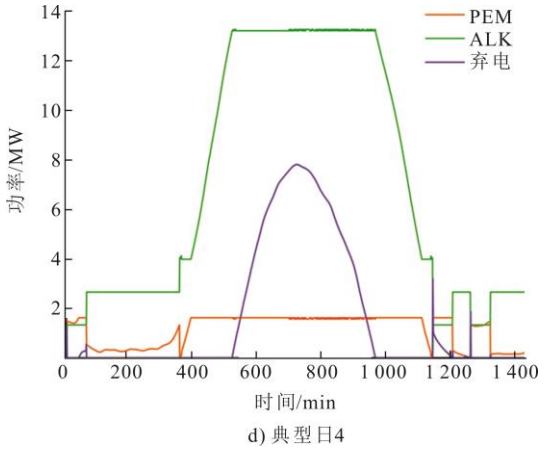


图 10 4 种典型日场景下 ALK-PEM 混合制氢系统运行状态

Fig.10 Operation status of ALK-PEM hybrid hydrogen production systems under four typical daily scenarios

典型日 1 属于风机出力贫瘠、光伏出力适度的情况（图 5，权重 0.278），在此情况下，由于光伏在夜间无法提供电力，且风机出力贫瘠，在夜间 00:00—07:00 时，没有足够的电力维持 ALK 电解槽冷启动，此时电力供 PEM 电解槽制氢（图 10a)；在 07:00—19:00 时，光伏出力和风机出力开始维持 ALK 电解槽进行冷启动、热启动、运行等一系列工况，ALK 电解槽作为主力进行制氢，而 PEM 电解

槽吸收风光出力波动，防止 ALK 电解槽因波动而导致停机，维持 ALK 电解槽稳定运行；19:00—24:00，光伏机组无法提供电力，由 PEM 电解槽吸收风机所剩功率。

典型日 2 属于风机出力富足、光伏出力贫瘠的情况。在此情况下，由于风机出力富足，00:00—24:00 均有足够的电力维持 ALK 电解槽稳定运行，PEM 电解槽也始终以满负荷运行，还有较多弃电产生。

典型日 3 属于风机、光伏出力均贫瘠的情况。在此情况下，其运行情况与典型日 1 类似。但值得注意的是，由于风机、光伏出力均贫瘠，出现多次 PEM 电解槽急剧变化的情况（图 10c)中 400~600 min）。产生此情况的原因是 PEM 电解槽在吸收波动维持 ALK 电解槽稳定运行的同时，若 ALK 电解槽此时供电不足，PEM 电解槽还需快速降低自己的功耗，分配给 ALK 电解槽，以保证 ALK 电解槽维持稳态。

典型日 4 属于风机出力适中、光伏出力富足的情况。在此情况下，由于夜间 00:00—07:00 时，风机出力所提供的能量不能保证 ALK 电解槽稳定运行，在此期间，ALK 电解槽进行了长时间的热启动保持状态，剩余电力由 PEM 电解槽消耗制氢；在 07:00—19:00 时，由于光伏的参与，ALK 电解槽稳定运行制氢；但在 19:00—24:00 时，由于风机出力所提供的能量不能保证 ALK 电解槽稳定运行，出现了 2 次 ALK 电解槽维持在热启动的状态（图 10d)中 1 200~ 1 350 min），等待有足够的电力供应时，才进行制氢。

3.5 并网场景容量规划研究

考虑并网模型时，分时电价方案是并网策略的核心，通过在电价低谷时段高效制氢，而在电价高峰时减少电力消耗或将电力用于其他用途，可以最大化经济效益[25]。式(7)使用的分时电价参考内蒙古蒙东电价（表 6）。新能源并网售电电价根据内蒙古政策按照蒙东地区燃煤基准价收购为 0.282 9 元/(kW h)。图 11 为并网系统 Pareto 求解结果，表 7 为并网 ALK-PEM 容量配置。

表 6 分时电价 单位：元/(kW h)

Tab.6 Time-of-use electricity price

时段	00:00—04:00	04:00—06:00	06:00—08:00	08:00—11:00	11:00—16:00	16:00—18:00	18:00—22:00	22:00—24:00
电价	0.42	0.76	1.06	0.76	0.42	0.76	1.06	0.76

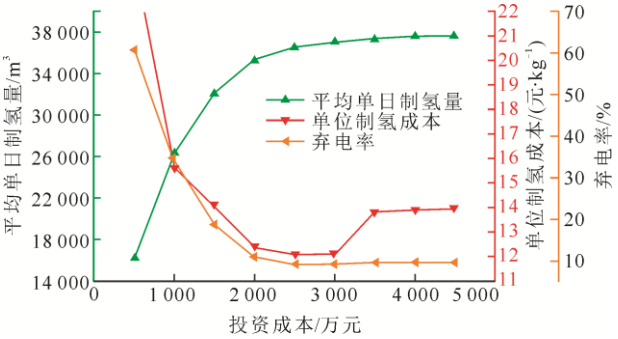


图 11 并网系统 Pareto 求解结果

Fig.11 Pareto solution results of grid-connected systems

表 7 并网 ALK-PEM 容量配置

Tab.7 Grid-connected ALK-PEM capacity configuration

投资成本/万元	ALK 电解槽容量/MW	PEM 电解槽容量/MW	平均单日制氢量/m^3	单位制氢成本/(元 kg^{-1})	弃电率/%
500	0	4.03	16 159.37	24.22	60.60
1 000	0	8.06	26 397.04	15.56	34.61
1 500	0	12.10	32 120.22	14.11	18.52
2 000	0.34	14.60	35 327.52	12.33	10.81
2 500	1.56	13.18	36 501.69	12.11	8.96
3 000	2.77	11.77	36 989.59	12.11	9.06
3 500	3.99	10.35	37 386.30	13.78	9.44
4 000	4.98	9.95	37 605.29	13.89	9.54
4 500	5.60	11.19	37 616.94	13.89	9.43

对比图 6 和图 11，分析离网和并网 ALK-PEM 的容量配置可以发现，离网容量配置的拐点出现在了投资成本 2 500 万元，而并网系统的拐点出现在了投资成本 2 000 万元（表 7）。这是由于并网系统相较于离网系统，电网可以通过对 ALK 电解槽的放电，实现对 ALK 电解槽功率波动的补偿，而 PEM 电解槽作为制氢设备，只能通过调整自己的吸收功率降低功率波动对 ALK 电解槽的影响。因此，电网的接入一方面使得混合制氢系统稳定性增强，电解槽的制氢量也随之提升，另一方面电网替代了一部分

PEM 电解槽的作用，使得系统对 PEM 电解槽的依赖度降低，降低了系统的成本，导致拐点提前出现。

4 结　论

本研究针对 ALK-PEM 混合制氢系统容量规划中长时间尺度模型难以精确刻画电解槽动态特性的问题，提出并验证了一种基于分钟级时间尺度的容量规划方法。通过构建精细化的电解槽动态模型、设计保障稳定性的功率分配策略以及实施多目标优化求解，最终得到多场景下系统的 Pareto 解集以及运营情况。

1）多目标优化方法能够有效揭示指标间权衡关系。本文所提出的方法成功展示了投资成本、制氢量、单位制氢成本、弃电率等指标在 Pareto 解集中的复杂权衡关系，离网系统在投资 2 500 万元，ALK 和 PEM 电解槽容量配置分别为 13.26、1.54 MW 配置下，可实现日制氢量 28 821.59 m^3，单位成本 12.33 元/kg，弃电率 9.54%的较优平衡点。

2）分钟级模型显著提升了系统性能。与传统 15 min 级模型相比，在风光各装机 20 MW、2 500 万元制氢系统投资条件下，分钟级模型平均单日制氢量提升 14.7%，单位制氢成本降低 7.5%，弃电率降低 63.6%。这主要归因于分钟级模型避免了粗时间尺度对启停和 PEM 槽调节能力的误判，优化了功率分配和容量配置。

3）PEM 电解槽能有效提升系统稳定性与经济性。分析不同典型日运行状态表明，本文所设计的功率分配策略下，PEM 电解槽能有效吸收风光波动，尤其在低出力或波动剧烈时段，显著减少 ALK 电解槽的启停次数，保障其稳定运行在高效区间，最终提升系统整体制氢量和经济性。

4）考虑并网购/售电后，系统的 Pareto 解集拐点提前至 2 000 万元（离网为 2 500 万元）。拐点提前的主要原因是电网的灵活功率支撑部分替代了 PEM 电解槽的调峰作用，降低了系统对 PEM 电解槽容量的依赖。

［参 考 文 献］

［1］ 王泓乾, 陈少杰, 刘威, 等. 电解海水制氢电极研究进展[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 41-53.
WANG Hongqian, CHEN Shaojie, LIU Wei, et al. Research progress of electrodes for hydrogen production by seawater electrolysis[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(3): 41-53.

［2］ 杨晓, 姚明宇, 韩伟, 等. 大规模可再生能源电解制氢技术现状及发展研究[J]. 热力发电, 2025, 54(5): 33-43.
YANG Xiao, YAO Mingyu, HAN Wei, et al. Research on the current situation and development of large-scale renewable energy electrolytic hydrogen production technology [J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(5): 33-43.

［3］ 许志鸿. 可再生能源制氢系统运行优化调度策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024: 5.
XU Zhihong. Research on optimal scheduling strategy for renewable energy hydrogen production system operation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024: 5.

［4］ 陈新, 任李萍, 陈春迎, 等. 光伏驱动电解水制氢技术的研究进展与挑战[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(12): 38-55.
CHEN Xin, REN Liping, CHEN Chunying, et al. Research progress and challenges of photovoltaic-driven electrolytic water hydrogen production technology[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(12): 38-55.

［5］ 李琦, 韩运滨, 白章, 等. 离网型风光发电联合制氢系统的协调运行策略与容量配置优化[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8136-8146.
LI Qi, HAN Yunbin, BAI Zhang, et al. Coordinated operation strategy and capacity configuration optimization of off-grid wind-solar combined hydrogen production system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8136-8146.

［6］ YU B, FAN G, SUN K, et al. Adaptive energy optimization strategy of island renewable power-to-hydrogen system with hybrid electrolyzers structure[J]. Energy, 2024, 301: 131508.

［7］ 陈志董, 张菁, 詹宏伟, 等. 质子交换膜电解槽与燃煤电站耦合的技术经济性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 10-20.
CHEN Zhidong, ZHANG Jing, ZHAN Hongwei, et al. Technical and economic analysis of coupling proton exchange membrane electrolyzers with coal-fired power stations[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 10-20.

［8］ 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): 8486-8496.
ZHENG Bo, BAI Zhang, YUAN Yu, et al. Multi-type electrolysis synergistic wind-solar hybrid hydrogen production system and capacity optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8486-8496.

［9］ 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 coupled hydrogen production system based on alkaline proton exchange membrane hybrid electrolyzer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(4): 1-9.

［10］ 杨金彬. 碱性-质子交换膜混合制氢系统的稳动态特性与容量优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024: 61-66.
YANG Jinbin. Research on stable dynamic characteristics and capacity optimization of alkaline - proton exchange membrane hybrid hydrogen production system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024: 61-66.

［11］ 杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 68-80.
YANG Sheng, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Multi-time scale optimization operation strategy for renewable

energy ALK-PEM combined hydrogen production system[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 68-80.
[12] ZHANG Q, XIE D, ZENG Y, et al. Optimizing wind-solar hydrogen production through collaborative strategy with ALK/PEM multi-electrolyzer arrays[J]. Renewable Energy, 2024, 232: 121116.
[13] XU C, KE Y, LI Y, et al. Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 215: 112892.
[14] 邓振宇, 周家辉, 徐钢, 等. 并/离网风光互补制氢合成氨系统容量-调度优化分析[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 136-146.
DENG Zhenyu, ZHOU Jiahui, XU Gang, et al. Capacity-scheduling optimization analysis of on-grid/off-grid wind-solar hybrid hydrogen production and ammonia synthesis system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 136-146.
[15] 张航, 范馥麟, 宋凯, 等. 计及混合电解槽安全约束的微电网日前调度[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 62-71.
ZHANG Hang, FAN Fulin, SONG Kai, et al. Day-ahead scheduling of microgrid considering safety constraints of mixed electrolyzers[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(3): 62-71.
[16] FANG R, LIANG Y. 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.
[17] 翟宇凯, 王炯超, 吴寒逸, 等. 全光谱太阳能与氢能利用协同的分布式综合能源集成与优化[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(12): 171-179.
ZHAI Yukai, WANG Jiongchao, WU Hanyi, et al. Integration and optimization of distributed integrated energy based on synergistic utilization of full-spectrum solar energy and hydrogen energy[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(12): 171-179.
[18] HONG F T, LIN H, VAZQUEZ-SANCHEZ H, et al. Minimizing renewable hydrogen costs at producer's terminal gate with alkaline electrolyser, proton exchange membrane, and their co-installment: a regional case study in China[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 86: 1051-1062.
[19] 孙旭东, 成雪蕾, 王树萌, 等. 我国新能源风光发电制氢成本动态测算[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(6): 1-10.
SUN Xudong, CHENG Xuelei, WANG Shumeng, et al. Dynamic calculation of hydrogen production cost from new energy wind and solar power generation in China[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 1-10.
[20] MIAO Q, CAI X, WANG Q, et al. Capacity configuration and operational optimization of hybrid concentrating solar power and photovoltaic system by evaluation of solar energy[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 265: 125627.
[21] XV H, WEI X, LI H, et al. Capacity allocation optimization strategy of offgrid DC hydrogen generation system considering the characteristics of hydrogen generation unit[C]//Proceedings of the 2024 6th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT). IEEE. 2024.
[22] 李远征, 任潇, 葛磊蛟, 等. 基于可逆固体氧化物电池的电氢耦合微电网全生命周期规划-运营研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5169-5185.
LI Yuanzheng, REN Xiao, GE Leijiao, et al. Research on full life cycle planning and operation of electro-hydrogen coupled microgrid based on reversible solid oxide batteries[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5169-5185.
[23] XIE J Y, ZHANG Y, XIANG M R, et al. Optimal configuration method of hydrogen energy system for coordinated operation of multi-type electrolyzers for new energy consumption[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 113: 564-574.
[24] 香橙会研究院. 绿氢产业发展白皮书[EB/OL].（2025-05-23）[2025-7-21]. https://aigc.idigital.com.cn/ djyanbao/.
Orange Hydrogen Research Institute. White paper on green hydrogen industry development[EB/OL]. (2025-05-23) [2025-07-21]. https://aigc.idigital.com.cn/djyanbao/.
[25] MATUTE G, YUSTA J M, BEYZA J, et al. Multi-state techno-economic model for optimal dispatch of grid connected hydrogen electrolysis systems operating under dynamic conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(2): 1449-1460.

（责任编辑　杨嘉蕾）