文章编号：1008－8857(2026)03－0137－11 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2026.03.002

离网型风光互补制氢系统容量优化配置

王 辉[1,2]，殷霄飞[1,2]，杨倩鹏[1,2]，韩 艳[1,2]，岳宗宇[3]，尧命发[3]
（1. 青海黄河上游水电开发有限责任公司光伏产业技术分公司，青海 西宁 810007；2. 青海省先进储能实验室有限公司，青海 西宁 810007；3. 天津大学 先进内燃动力全国重点实验室，天津 300072）

摘 要：针对离网型风光互补制氢系统，提出了一种综合考虑系统电解槽启停次数最少、系统整体收益最大的容量优化配置方法及运行控制策略。将粒子群优化算法与 CPLEX 求解器相结合，对制氢系统内的碱性电解槽、质子交换膜(PEM)电解槽及储能电池的配置容量及运行功率进行了优化。4 种场景的仿真结果表明，所提容量配置方法与运行控制策略可减少电解槽启停次数，并提升制氢系统经济效益。

关键词：离网型风光互补制氢系统；粒子群优化算法；容量配置；运行优化
中图分类号：TM61；TQ116.2 **文献标志码**：A

Optimal capacity configuration of off-grid wind-solar hybrid hydrogen production system

WANG Hui[1,2]，YIN Xiaofei[1,2]，YANG Qianpeng[1,2]，HAN Yan[1,2]，YUE Zongyu[3]，YAO Mingfa[3]
(1. Qinghai Yellow River Upstream Hydropower Development Co., Ltd. Photovoltaic Industry Technology Branch, Xining 810007, China; 2. Qinghai Advanced Energy Storage Laboratory Co., Ltd., Xining 810007, China; 3. State Key Laboratory of Combustion Science for Internal Combustion Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Considering the off-grid wind-solar hybrid hydrogen production system, a capacity optimization configuration method and control strategy were proposed to minimize the number of start-stop cycles of electrolyzers and maximize the overall system benefit. By combining particle swarm optimization with the CPLEX solver, the configuration capacity and operating power of the alkaline electrolyzer, proton exchange membrane (PEM) electrolyzer, and energy storage battery were optimized. Simulation results of four scenarios demonstrate that the proposed capacity configuration method and control strategy can reduce the start-stop frequency of electrolyzers and improve the economic benefits of the hydrogen production system.

Keywords: off-grid wind-solar hybrid hydrogen production system; particle swarm optimization algorithm; capacity configuration; operation optimization

收稿日期：2024－11－25
基金项目：国家电力投资集团 C 类科技项目(KY−C−2023−CN03)；青海省十大国家级科技创新平台“筹建多能互补绿色储能全国重点实验室”(二期)(2024−ZJ−J04)
第一作者：王 辉(1996—)，硕士，工程师。研究方向：氢能综合利用。E−mail：17888840386@163.com
通信作者：岳宗宇 (1987—)，副教授。研究方向：氢能综合利用。E−mail：2311829438@qq.com

面对“双碳”目标带来的挑战，大力开发风电、光伏等清洁能源已成为必要发展路径之一[1–2]。然而，风电、光伏的不可控性及反调峰特性使得电网系统安全及稳定面临重大挑战，其已成为制约风电、光伏进一步发展的主要技术难点之一[3]。对此，国内外研究人员围绕火电机组灵活改造、储能技术应用等展开研究，并在目前风光发电量占比为 15% 左右时较好地解决了相关难题[4–5]。但随着 2030 年清洁能源发电量占比达到 25% 左右目标的接近，以及风光装机及并网发电量的快速提升[6]，风电、光伏的发展仍面临重大考验。

近年来，氢能凭借高热值、低污染、来源及应用广泛的优点被频繁提及。电解水制氢的技术路线受到各界高度关注[7]。《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》中明确提出了可再生能源电解水制氢的发展目标及技术路线规划[8]。在此背景下，风光制氢系统的容量优化配置及能量管理研究势在必行。文献[9–10]围绕微网系统、综合能源系统建立了电氢耦合系统模型，并研究了系统内电解槽及氢储能的容量配置。文献[11]给出了风光互补电力系统中确定的电解槽容量，并以不同比例配置碱性电解槽与质子交换膜(PEM)电解槽，分析各电解槽运行情况。文献[12]针对并网型风电耦合制氢系统，以消纳弃风电量、降低弃风率为目标求解最优碱性电解槽功率。文献[13]建立了碱性电解槽多种功率运行模式，并配置了各功率状态下的最优电解槽容量。文献[14]以风光电力系统制氢单位氢产量成本最低为目标，在考虑动态电价基础上对储能电池及碱性电解槽容量进行了最优配置。文献[15]针对电–氢–电系统研究了电解制氢装置与燃料电池的容量配置及运行调度问题。

综上所述，目前该领域的学者多针对制氢系统单独配置碱性电解槽，或配置碱性电解槽与储能电池的模式，研究最优容量配置结果及运行控制策略。随着电解水制氢技术的快速发展，采用 PEM 电解槽的技术路线逐渐受到重视。但对于考虑碱性电解槽、PEM 电解槽、储能电池运行特性的复杂耦合性制氢系统，在整体收益及电解槽启停次数最少的目标下，如何优化其内部设备容量配置及运行控制策略的研究还鲜有报道。基于此，本文提出综合考虑碱性电解槽、PEM 电解槽、储能装置优缺点及启停特性，以系统启停成本最低及制氢经济效益最优为目标的离网型风光互补制氢系统容量优化配置模型。结合粒子群优化(PSO)算法及线性规划方法，对该制氢系统在仅配置碱性电解槽、配置碱性电解槽与储能电池、配置碱性电解槽与 PEM 电解槽，以及同时配置碱性电解槽、PEM 电解槽及储能电池 4 种场景下的最优容量与运行情况进行对比，对各种场景的适应性进行归纳整理，并对储能电池、氢气销售价格的敏感性进行分析，以期为离网型风光互补制氢系统工程项目的容量配置及运行控制提供参考。

1 离网型风光互补制氢系统建模

1.1 系统结构

碱性电解槽电解水制氢及 PEM 电解槽电解水制氢作为目前主要的电解水制氢技术路线，具有不同的特点，其中：碱性电解槽成本低、技术路线成熟、寿命长，但功率可调节范围较窄、跟踪风光功率波动能力较差；PEM 电解槽功率可调节范围宽、可快速跟踪风光功率波动、产氢纯度高，但目前成本较高、寿命较短，且成熟的产品产氢量规格较低[16–17]。因此，将碱性电解槽成本低及 PEM 电解槽跟踪风光功率波动能力强的特点相结合，可更好地提升离网型制氢系统制氢能力与经济效益。此外，由于风光出力的不可控性，离网型风光系统不可避免地会出现某一时段没有电源输入的情况。为避免制氢系统长时间处于停止状态，有必要配置储能电池来缩短制氢设备的启停时间并减少启停次数。

本文提出的离网型风光互补制氢系统框架如图 1 所示。该系统由风电模块、光伏模块、碱性电解槽模块、PEM 电解槽及储能电池模块组成。

1.2 系统模型

风电机组将风能转化为电能。其主要输出功率由发电机特性与风速决定[18]，计算式为

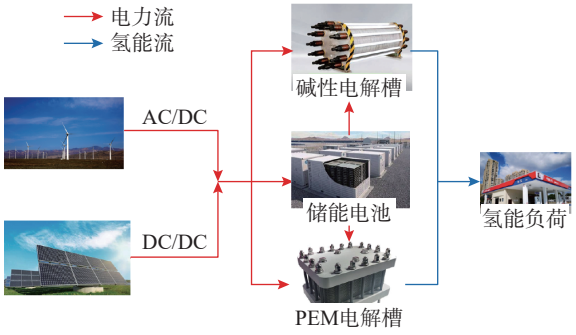


图 1　离网型风光互补制氢系统框架

Fig. 1　Framework of off-grid wind-solar hydrogen production system

$$p_{\mathrm{wp},t}=\begin{cases}0, & v_t\le v_{\mathrm{in}}\ ,v_t\ge v_{\mathrm{out}}\\ \dfrac{p_{\mathrm{R}}}{v_{\mathrm{R}}^3-v_{\mathrm{in}}^3}-\dfrac{v_{\mathrm{in}}^3}{v_{\mathrm{R}}^3-v_{\mathrm{in}}^3}p_{\mathrm{R}}, & v_{\mathrm{in}}\le v_t\le v_{\mathrm{out}}\\ p_{\mathrm{R}}, & v_{\mathrm{R}}\le v_t\le v_{\mathrm{out}}\end{cases}\tag{1}$$

式中：$p_{\mathrm{wp},t}$为 t 时刻输出功率；p_{R}为风力机额定功率；v_{R} 为额定风速；v_{in} 为切入风速；v_{out} 为切出风速；v_t 为 t 时刻实时风速。

光伏发电设备的输出功率与太阳辐射强度强相关，并且一段时间内的输出功率 $p_{\mathrm{pv},t}$服从 Beta 分布，其概率密度函数$f(p_{\mathrm{pv},t})$为[19]

$$f(p_{\mathrm{pv},t})=\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\left(\frac{p_{\mathrm{pv},t}}{p_{\mathrm{pv,max}}^{\alpha-1}\dfrac{p_{\mathrm{pv},t}}{p_{\mathrm{pv,max}}^{\beta-1}}}\right)\tag{2}$$

式中：$p_{\mathrm{pv,max}}$为光伏系统最大输出功率；α、β为 Beta 分布的形状参数。

α、β计算式为

$$\begin{cases}\alpha=\mu_{\mathrm{pv}}\left(\dfrac{\mu_{\mathrm{pv}}(1-\mu_{\mathrm{pv}})}{\xi_{\mathrm{pv}}^2}-1\right)\\ \beta=(1-\mu_{\mathrm{pv}})\left(\dfrac{\mu_{\mathrm{pv}}(1-\mu_{\mathrm{pv}})}{\xi_{\mathrm{pv}}^2}-1\right)\end{cases}\tag{3}$$

式中：μ_{pv}、ξ_{pv} 分别为太阳辐射强度在某时段的均值和标准差。

本文选用简化模型模拟碱性电解槽制氢过程。产氢量与电解槽输入功率成正比，两者关系可简化为

$$Q_{\mathrm{H_2,ALK},t}=p_{\mathrm{ALK},t}\eta_{\mathrm{ALK}}\tag{4}$$

式中：$Q_{\mathrm{H_2,ALK},t}$为碱性电解槽 t 时刻产氢量；$p_{\mathrm{ALK},t}$为碱性电解槽 t 时刻运行功率；η_{ALK}为碱性电解槽产氢效率。

PEM 电解槽的简化模型可表示为

$$Q_{\mathrm{H_2,PEM},t}=p_{\mathrm{PEM},t}\eta_{\mathrm{PEM}}\tag{5}$$

式中：$Q_{\mathrm{H_2,PEM},t}$为 PEM 电解槽 t 时刻产氢量；$p_{\mathrm{PEM},t}$为 PEM 电解槽 t 时刻运行功率；η_{PEM}为 PEM 电解槽产氢效率。

储能电池模型可表示为

$$E_{\mathrm{es},t}=\begin{cases}E_{\mathrm{es}}(t-1)(1-\gamma)+\eta_{\mathrm{ch}}\dfrac{p_{\mathrm{es,c}}\Delta t}{E_{\mathrm{es}}}, p_{\mathrm{es}}<0\\ E_{\mathrm{es}}(t-1)(1-\gamma)+\dfrac{p_{\mathrm{es,dis}}\Delta t}{E_{\mathrm{es}}\eta_{\mathrm{dis}}}, p_{\mathrm{es}}>0\end{cases}\tag{6}$$

式中：$E_{\mathrm{es},t}$为储能电池 t 时刻的电量；γ为储能电池自放电效率；η_{ch}和η_{dis}分别为储能电池充电和放电效率；E_{es}为总容量；$p_{\mathrm{es,c}}$为储能电池充电功率；$p_{\mathrm{es,dis}}$为储能电池放电功率；p_{es}为储能电池额定功率；Δt为储能运行时段。

1.3　系统优化目标

本文综合考虑风电、光伏、碱性电解槽、PEM 电解槽及储能电池的投资成本及维护成本，碱性电解槽启停成本，系统弃电率等因素，以离网型风光互补制氢系统制氢收益最大为优化目标，有

$$\max F=E_{\mathrm{H_2}}-C_{\mathrm{w}}-C_{\mathrm{s}}-C_{\mathrm{ALK}}-C_{\mathrm{PEM}}-C_{\mathrm{es}}-C_{\mathrm{Q}}-C_{\mathrm{c}}\tag{7}$$

式中：$E_{\mathrm{H_2}}$为制氢收益；C_{w}、C_{s}、C_{ALK}、C_{PEM}、C_{es}分别为风电、光伏、碱性电解槽、PEM 电解槽、储能电池的平均年投资及运维成本；C_{Q}、C_{c}分别为碱性电解槽启停成本、系统弃电成本。

$$\begin{cases}C_{\mathrm{ALK}}=\dfrac{k_{\mathrm{ALK}}p_{\mathrm{ALK}}}{y_{\mathrm{ALK}}}+k_{\mathrm{OM_ALK}}p_{\mathrm{ALK}}\\ C_{\mathrm{PEM}}=\dfrac{k_{\mathrm{PEM}}p_{\mathrm{PEM}}}{y_{\mathrm{PEM}}}+k_{\mathrm{OM_PEM}}p_{\mathrm{PEM}}\\ C_{\mathrm{es}}=\dfrac{k_{\mathrm{es}}p_{\mathrm{es}}}{y_{\mathrm{es}}}+k_{\mathrm{OM_es}}p_{\mathrm{es}}\\ C_{\mathrm{w}}=\dfrac{k_{\mathrm{wind}}p_{\mathrm{wind}}}{y_{\mathrm{wind}}}+k_{\mathrm{OM_wind}}p_{\mathrm{wind}}\\ C_{\mathrm{s}}=\dfrac{k_{\mathrm{solar}}p_{\mathrm{solar}}}{y_{\mathrm{solar}}}+k_{\mathrm{OM_solar}}p_{\mathrm{solar}}\end{cases}\tag{8}$$

$$E_{\mathrm{H_2}}=e_{\mathrm{H_2}}Q_{\mathrm{H_2}}\tag{9}$$

$$C_{\mathrm{Q}}=\sum_{t=1}^{8\,760}N_{\mathrm{s}}c_{\mathrm{q}}\tag{10}$$

$$C_{\mathrm{c}}=c\sum_{t=1}^{8\,760}Q_{\mathrm{c}}\tag{11}$$

式中：k_{ALK}、k_{PEM}、k_{es}、k_{wind}、k_{solar}分别为碱性电解槽、PEM 电解槽、储能电池、风电、光伏设备的单位功率投资成本；k_{OM_ALK}、k_{OM_PEM}、k_{OM_es}、k_{OM_wind}、k_{OM_solar}分别为碱性电解槽、PEM 电解槽、储能电池、风电、光伏设备的单位功率年运维成本；p_{ALK}、p_{PEM}、p_{es}、p_{wind}、p_{solar}分别为碱性电解槽、PEM 电解槽、储能电池、风电、光伏设备的额定功率；y_{ALK}、y_{PEM}、y_{es}、y_{wind}、y_{solar}分别为碱性电解槽、PEM 电解槽、储能电池、风电、光伏设备的使用年限；e_{H_2}、Q_{H_2}分别为每 kg 氢气销售价格、年产氢量；c为弃电惩罚系数；Q_c为 1 h 内弃电量；c_q为碱性电解槽启停一次的经济成本；N_s为碱性电解槽年启停次数。

1.4 约束条件

碱性电解槽运行工况可分为停止、热备用、正常使用三个状态。在停止状态下，碱性电解槽不产生氢气，在供电 60 min左右转向正常使用状态；在热备用状态下，碱性电解槽不产生氢气，但系统碱液温度保持在 60 ℃左右，可在 1 ～ 5 min 内转向正常使用状态；在正常使用状态下，碱性电解槽可在 20% ～ 100%额定功率下安全运行，并产生对应功率下的氢气。此时功率可进行调节，但碱性电解槽在运行过程中需时刻保证含氢的气液分离罐与含氧的气液分离罐液面高度基本持平，其单位时间功率变化量控制在额定功率的 5% ～ 10%[20]。因此，碱性电解槽运行约束条件可表示为

$$\begin{cases} 0.2p_{ALK} \leqslant p_{ALK,t} \leqslant p_{ALK}, \quad p_{E,t} \geqslant 0.2p_{ALK} \\ p_{ALK,t} = P_{ALK,s}, \quad 0.2p_{ALK} \geqslant p_{E,t} \geqslant p_{ALK,s} \\ 0, \qquad\qquad\qquad\qquad p_{E,t} \leqslant p_{ALK,s} \\ p_{ALK,t+1}, -p_{ALK,t} \leqslant 0.1p_{ALK} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$p_{E,t}$为离网风光系统 t 时刻的电功率；$p_{ALK,s}$为碱性电解槽的热备用功率。

相比于碱性电解槽，PEM 电解槽成本高，但功率调节速度快、范围大，可在碱性电解槽处于停止或热备用工况下消纳风光出力。其运行约束条件可表示为

$$0 \leqslant p_{PEM,t} \leqslant 1.2p_{PEM} \tag{13}$$

式中：p_{PEM}为碱性电解槽的额定功率。

风光制氢系统需时刻保持功率平衡，其约束条件可表示为

$$p_{wp,t} + p_{pv,t} = p_{ALK,t} + p_{PEM,t} \pm p_{es,t} \tag{14}$$

1.5 容量优化配置及运行控制求解算法

针对系统内碱性电解槽、PEM 电解槽及储能电池的容量优化配置模型，采用 PSO 算法，在满足各项约束条件下，求解使得整个系统制氢收益最大的结果。在求解得到碱性电解槽、PEM 电解槽及储能电池的最优容量后，采用 CPLEX 工具箱求解满足各项运行约束条件的各设备运行功率。各设备的功率分配策略为：

(1)若 $p_{wp,t} + p_{pv,t} \geqslant 0.2p_{ALK}$时，按式(12)求解碱性电解槽功率$p_{ALK,t}$。将$p_{wp,t}+p_{pv,t}-p_{ALK,t}$的剩余功率按式(6)、(8)、(13)分配给储能电池与 PEM 电解槽。具体规则为：若储能电池剩余电量大于为减少碱性电解槽启停次数预留的电量，则将剩余功率分配给 PEM 电解槽；反之则分配给储能电池。

(2)若 $p_{wp,t} + p_{pv,t} < 0.2p_{ALK}$，但 $p_{wp,t} + p_{pv,t} + E_{es,t-1} \geqslant 0.2p_{ALK}$时，按式(12)求解碱性电解槽功率$p_{ALK,t}$。若储能电池还有剩余电量，则将其分配给 PEM 电解槽；若 $p_{wp,t} + p_{pv,t} + E_{es,t-1} < 0.2p_{ALK}$，则将储能电池剩余电量分配给 PEM 电解槽，而碱性电解槽功率为 0。

图 2 为 PSO 算法求解各设备最优容量流程。

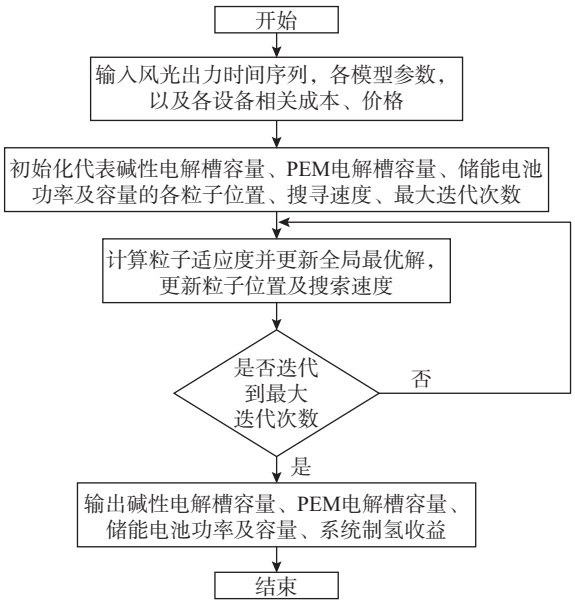


图 2 PSO 算法求解各设备最优容量流程

Fig. 2 PSO algorithm for optimal capacity configuration

利用 CPLEX 工具箱按功率分配策略求解各设备运行功率。

2　案例分析

2.1　参数设置

选取青海某地区全年 8 760 h 风光数据进行分析。仿真时间步长设置为 1 h。图 3 为风光出力情况。系统中风电、光伏、碱性电解槽、PEM 电解槽及储能电池的购置成本、维护成本等如表 1 所示[21–22]。

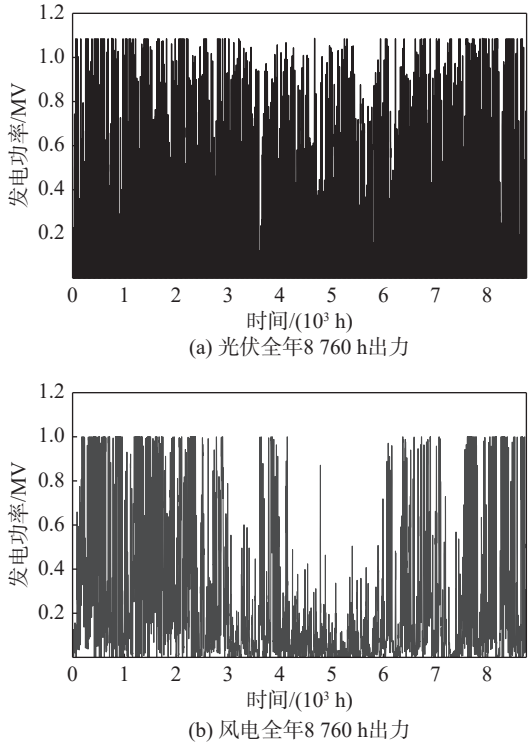


图 3　风光出力情况

Fig. 3　Wind and photovoltaic power output

设置 4 个场景研究离网型风光互补制氢系统内部容量配置及运行控制情况。场景 1：仅配置碱性电解槽；场景 2：配置碱性电解槽与储能电池；场景 3：配置碱性电解槽与 PEM 电解槽；场景 4：配置碱性电解槽、PEM 电解槽与储能电池。

2.2　容量优化配置结果分析

结合以上系统工作约束条件及设备参数，设置碱性电解槽启停成本为 300 元/次，弃电惩罚成本为 0.1 元/(kW·h)，氢气销售价格为 35 元/kg。各场景容量优化配置结果如表 2 所示。

表 1　制氢系统各设备购置成本、维护成本

Tab. 1　Capital cost and maintenance cost in the hydrogen production system

设备	购置成本	维护成本/(元·kW^{-1})
风力发电机组	2 000 元/kW	40
光伏发电机组	3 500 元/kW	35
碱性电解槽	6 000 元/kW	160
PEM电解槽	8 000 元/kW	480
储能电池	1 200 元/(kW·h)	160

场景 1 中，全年制氢收益约为 119.98 万元，全年产氢量约为 80.9 万 Nm^3。当系统发电功率低于碱性电解槽 10% 额定功率时，碱性电解槽会停止运行。该场景下，系统全年启停次数为 749 次，启停成本约为 22.5 万元。

场景 2 中，配置 112.86 kW/2.4 h 的储能电池可提高系统年收益。相比于场景 1，该场景年收益可提高 2.82%，启停次数减少 44.06%，弃电率降低 5.62%。可见，配置碱性电解槽与储能电池的制氢系统，在年收益、弃电率、启停次数等指标上，相较于仅配置碱性电解槽的制氢系统均有所优化，适用于离网制氢的大部分场景，但由于配置了储能电池，系统前期投资成本略有上升。

场景 3 中，当碱性电解槽消纳完风光电量后，剩余电量由 PEM 电解槽利用。PEM 电解槽可快速启动的特性，使得系统可尽可能多地消纳风光电量。该场景的弃电率降至 3.74%，相比于场景 1 的降低 75.28%，年收益提高 5.97%；相比于场景 2 的弃电率降低 73.81%，年收益提高 3.06%。但由于没有能量搬移设备，碱性电解槽启停次数并未减少。配置碱性电解槽与 PEM 电解槽的制氢系统，相比于仅配置碱性电解槽的制氢系统，年收益、产氢量等均有所提高，且弃电率降低。但由于目前 PEM 电解槽成本较高，该模式初期投资成本较高，适用于对用氢负荷有连续性要求的场景。

场景 4 中，系统同时配置碱性电解槽、PEM 电解槽与储能电池。相比于场景 1，该场

表 2 各场景容量优化配置结果

Tab. 2 Comparison of capacity configuration results for different scenarios

场景	容量配置/kW			年收益/万元	产氢量/Nm^3	弃电率/%	启停次数
	碱性电解槽	PEM电解槽	储能电池				
场景1	1 072.2			119.98	809 020	15.13	749
场景2	1 072.2		112.86/2.4 h	123.37	809 020	14.28	419
场景3	1 072.2	301.4		127.14	917 508	3.74	749
场景4	1 072.2	301.4	112.86/2.4 h	138.21	916 162	2.01	419

景的年收益提高 15.19%，弃电率降低 86.72%，启停次数减少 44.06%。但全年产氢量相比于场景 3 的略有降低。这是因为储能电池消耗了部分电量用于保证碱性电解槽处于热备用状态，但该状态下无氢气产生，导致 PEM 电解槽可利用电量下降，从而导致系统产氢量降低。同时配置碱性电解槽、PEM 电解槽与储能电池的制氢系统的年收益相比于其他场景的都高，且弃电率及启停次数相比于其他场景的都低，制氢量略低于配置碱性电解槽与 PEM 电解槽的制氢系统。但该模式初期投资成本最高，适用于对系统整体要求较高的场景。

2.3 各案例运行优化结果分析

选取全年 4 个典型时段（2 月 10 日—2 月 16 日（a 时段）、5 月 12 日—5 月 18 日（b 时段）、8 月 10 日—8 月 16 日（c 时段）、11 月 12 日—11 月 18 日（d 时段））分析碱性电解槽、PEM 电解槽与储能电池在 4 个场景下的运行情况。图 4 为全年 4 个典型时段风光出力。图 5 为 4 个典型时段各场景弃电量对比。

图 6 为场景 1 中碱性电解槽运行功率。场景 1 全年 4 个时段中，d 时段风光出力较高，因此碱性电解槽在该时段连续运行时间较长，启停次数较少；a、b、c 时段风光出力间歇性较为严

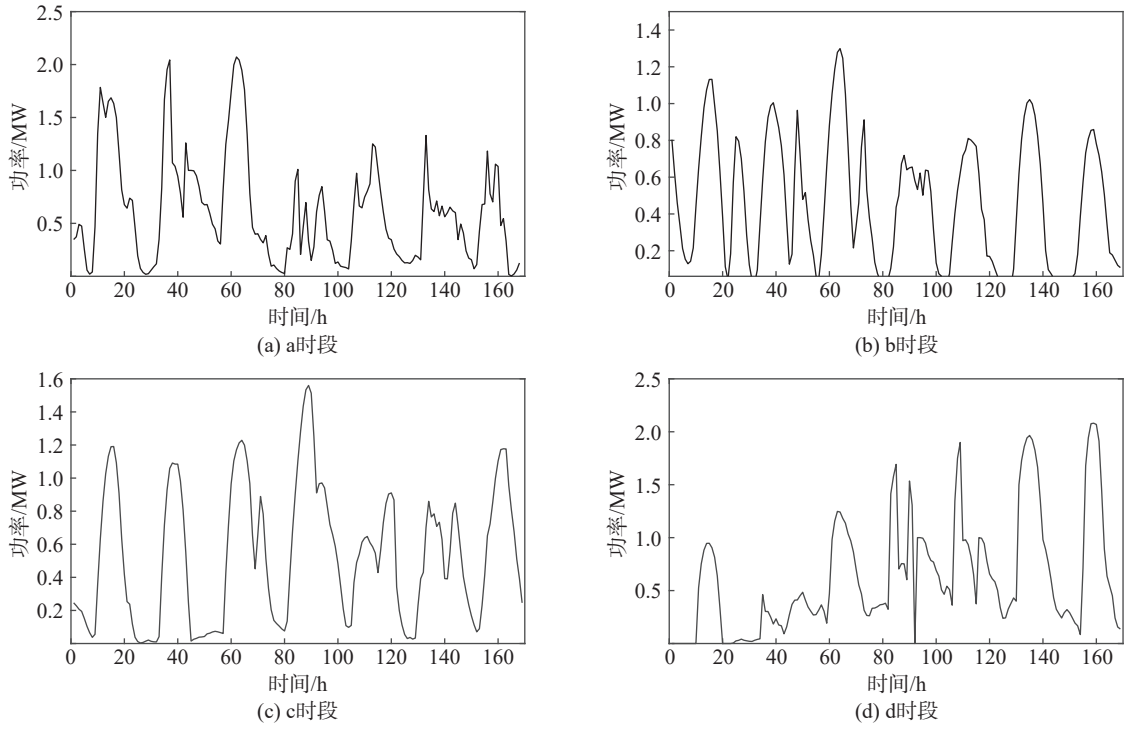


图 4 全年 4 个典型时段风光出力

Fig. 4 Wind and photovoltaic power output in four typical periods

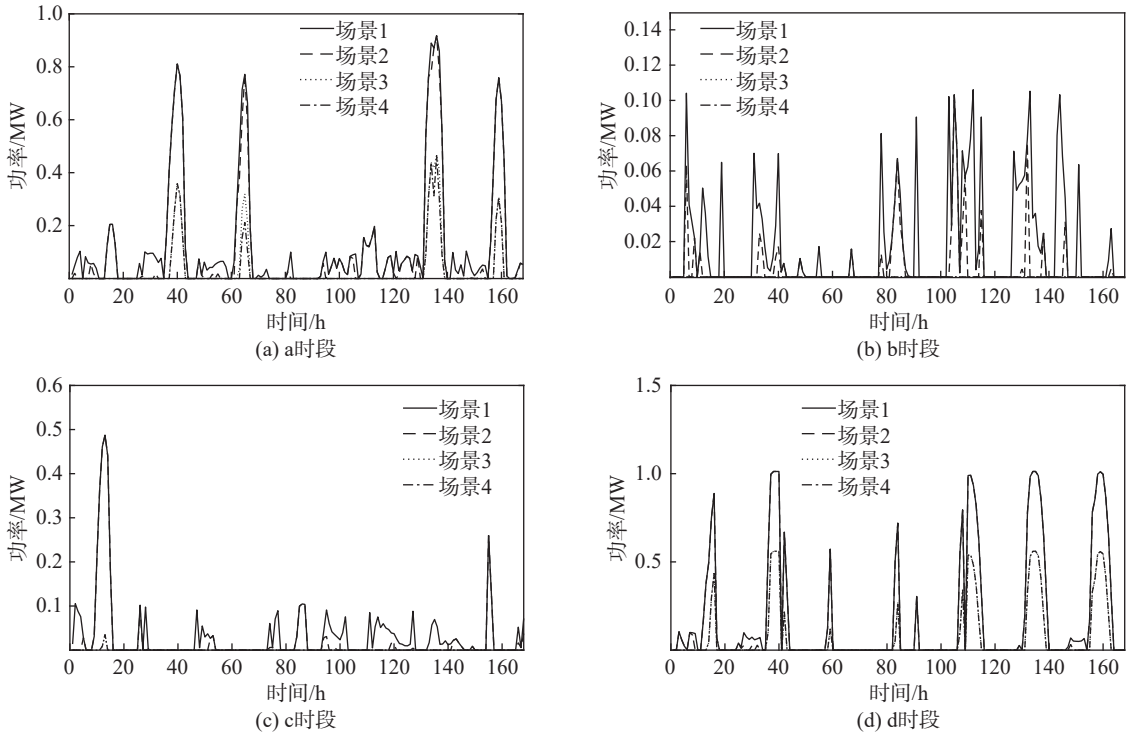


图 5　4 个典型时段各场景弃电量对比

Fig. 5　Comparison of curtailed power for four typical periods and different scenarios

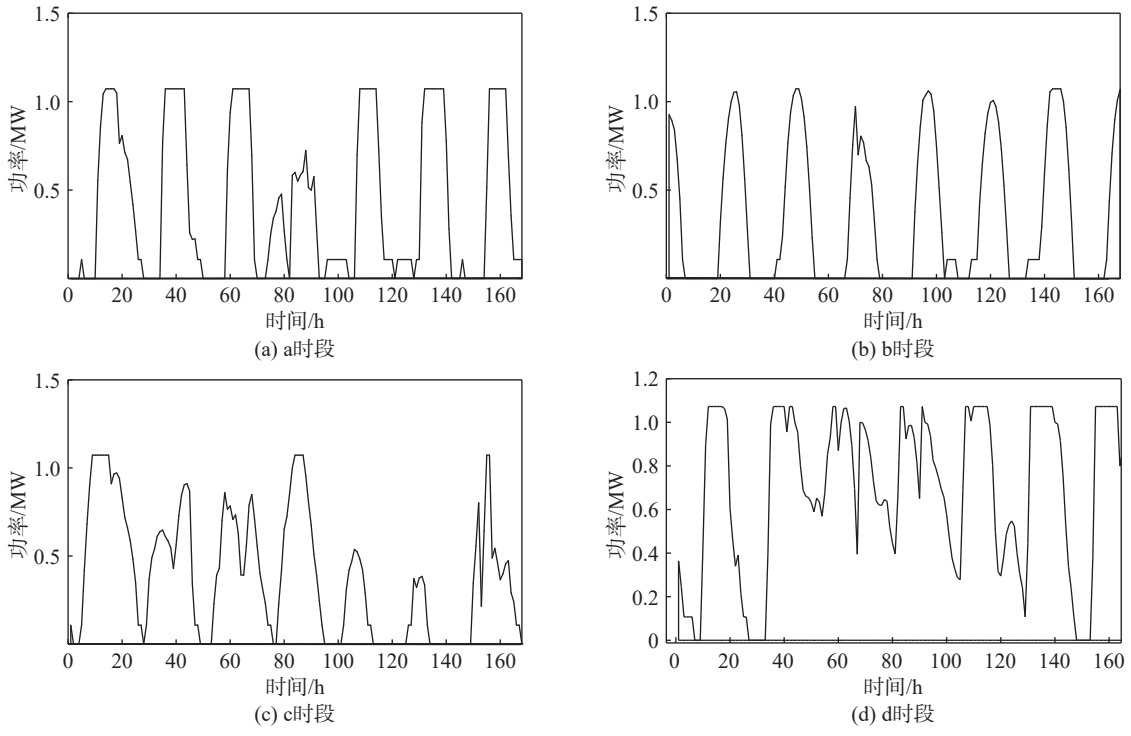


图 6　场景 1 中碱性电解槽运行功率

Fig. 6　Operating power of alkaline electrolyzer in scenario 1

重，碱性电解槽频繁启停。整体而言，对于仅配置碱性电解槽的场景，电解槽运行工况与风光出力关联较大。当风光出力低于碱性电解槽热备用功率时，电解槽进入停机状态；当风光出力在碱性电解槽正常产氢功率范围内时，电解槽根据风光电量正常制氢；当风光出力高于碱性电解槽最大工作功率时，电解槽进入最大功率产氢状态，并弃掉多余的风光电量。

图 7 为场景 2 中碱性电解槽与储能电池运行功率。场景 2 中，系统配置的储能电池可以在满足碱性电解槽在热备用及正常工作状态下，存储多余风光电量，并在碱性电解槽停机时释放。该场景所有时段碱性电解槽启停次数相比于场景 1 的均降低，且启停时间缩短。系统配置碱性电解槽与储能电池的场景中，可利用储能可实现能量搬移的特点，在风光出力低于碱性电解槽热备用功率时放电，从而保证电解槽仍处于热备用状态，减少制氢系统启停次数并降低启停成本。

图 8 为场景 3 中碱性电解槽与 PEM 电解槽运行功率。场景 3 中，PEM 电解槽的快速启停及宽功率波动范围的特性使其可消纳剩余的风光电量。a、d 时段风光出力较高，在满足碱性电解槽工作后仍有富余，因此 PEM 电解槽在这两个时段可多次进入工作状态；b、c 时段风光出力一般，但 PEM 电解槽仍可低功率消纳剩余风光电量，从而极大提高系统的产氢量，降低系统的弃电率。对于系统配置碱性电解槽与 PEM 电解槽的场景，应先保证碱性电解槽正常运行。当碱性电解槽停止运行或风光出力大于碱性电解槽最大工作功率时，可将剩余风光电量用于驱动 PEM 电解槽运转，从而提高系统产氢量，增加系统经济效益。

图 9 为场景 4 中碱性电解槽、PEM 电解槽与储能电池运行功率。场景 4 中，储能电池通过能量搬移减少碱性电解槽启停次数，PEM 电解槽通过消纳剩余电量提高系统产氢量以增加经济效益。该场景中碱性电解槽、PEM 电解槽与储能电池的运行功率近似为场景 2 和场景 3 的叠加。但当碱性电解槽长时间停机时，储能电池存储的电量不足以支撑其维持热备用状态，导致系统启停次数反而增加，因此系统倾向于利用 PEM 电解槽消纳储能电池放电量，以提高系统

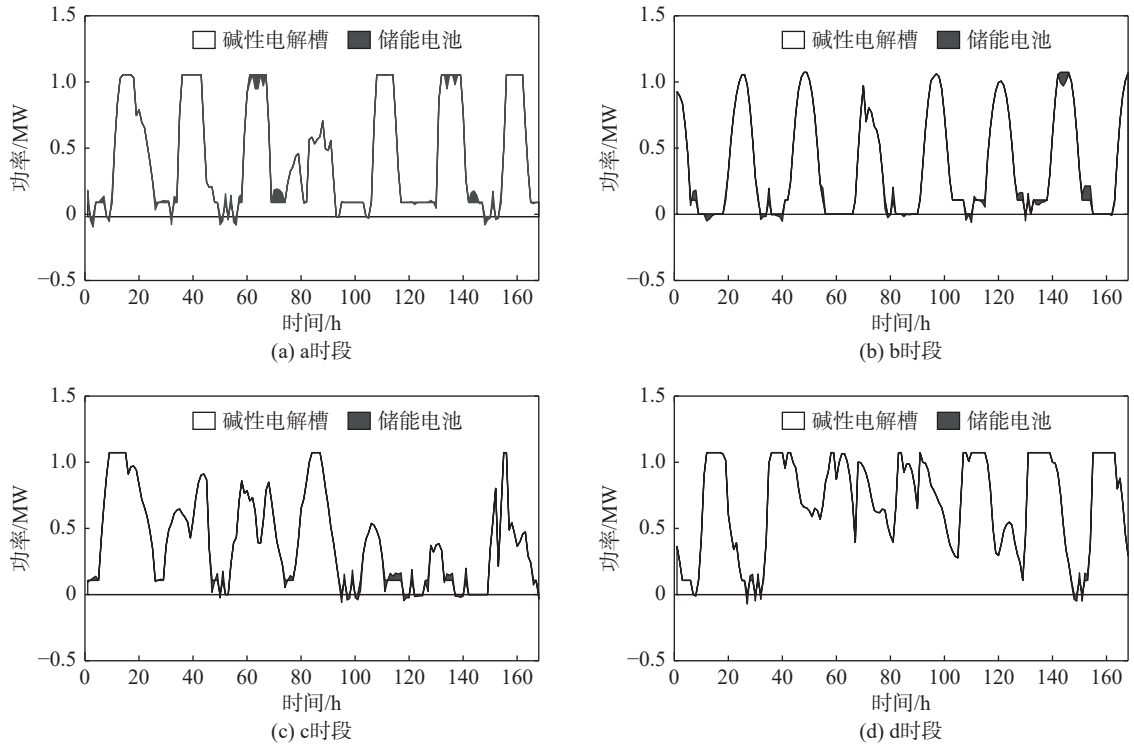


图 7 场景 2 中碱性电解槽与储能电池运行功率

Fig. 7 Operating power of alkaline electrolyzer and energy storage battery in scenario 2

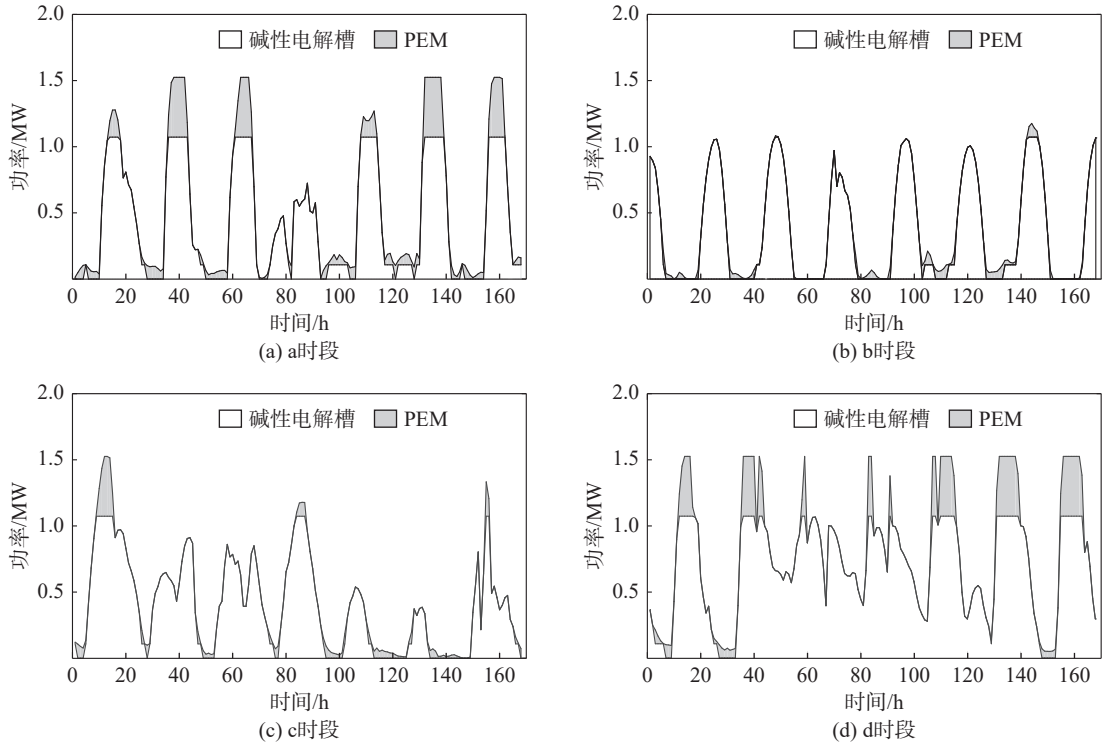


图 8　场景 3 中碱性电解槽与 PEM 电解槽运行功率

Fig. 8　Operating power of alkaline electrolyzer and PEM electrolyzer in scenario 3

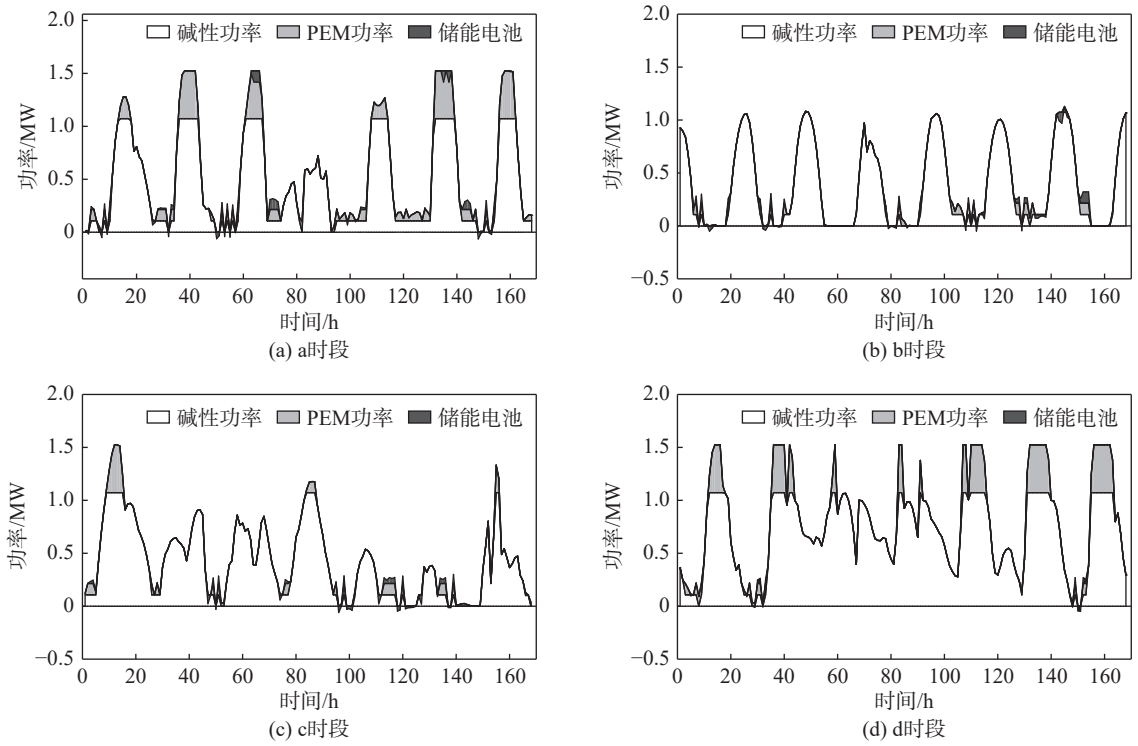


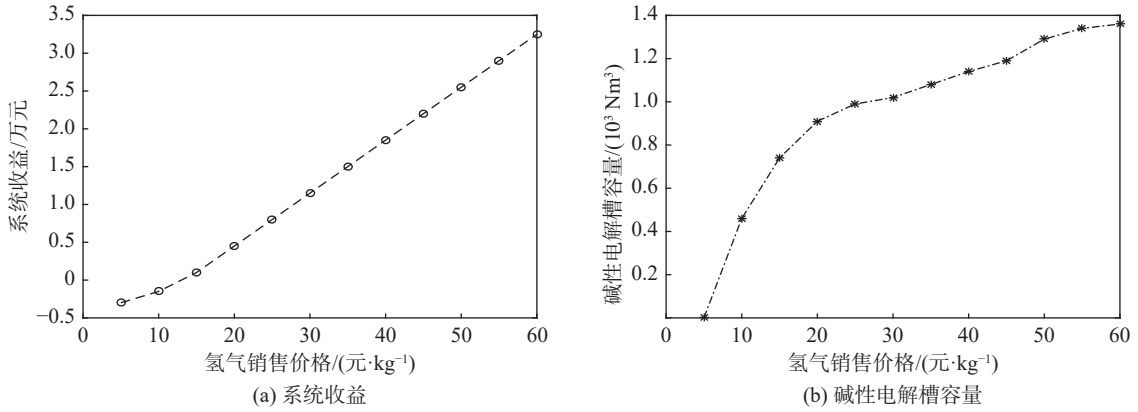
图 9　场景 4 中碱性电解槽、PEM 电解槽与储能电池运行功率

Fig. 9　Operating power of alkaline electrolyzer, PEM electrolyzer, and energy storage battery in scenario 4

产氢量与经济效益。

2.4 敏感性分析

储能成本、氢气销售价格等因素均会对制氢系统的经济性造成一定的影响。图 10 为氢气销售价格敏感性分析。可见，系统收益及碱性电解槽配置容量与氢气销售价格基本为正相关：氢气销售价格越高，则系统收益和碱性电解槽最优配置容量都越高。目前我国各地氢气销售价格基本为 30 ～ 40 元/kg[23]，因此本文选取氢气销售价格为 35 元/kg，具有一定代表性。

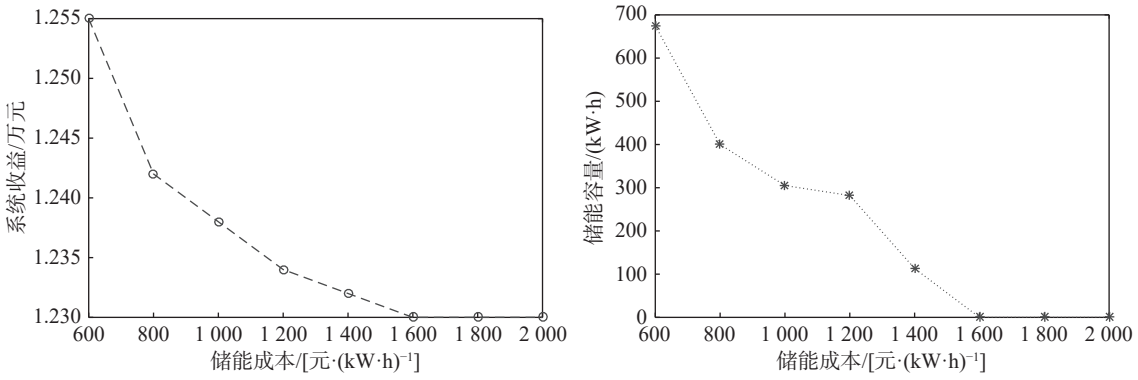


(a) 系统收益 (b) 碱性电解槽容量

图 10 氢气价格敏感性分析

Fig. 10 Sensitivity analysis of hydrogen price

图 11 为配置储能电池功率为 112.86 kW 时，储能成本对储能最优配置容量及系统经济性的影响。储能成本越高，储能最优配置容量越小。当储能成本超过 1 600 元/(kW·h)时，在其他参数保持不变的情况下，系统配置储能电池减少启停次数的收益会低于储能电池购置成本；系统收益也会因储能电池成本的升高而降低，当不配置储能电池时，系统收益趋于稳定。



(a) 系统设备 (b) 储能容量

图 11 储能价格敏感性分析

Fig. 11 Sensitivity analysis of energy storage price

3 结论

离网型风光制氢系统统筹考虑碱性电解槽及 PEM 电解槽的优缺点，并利用储能电池显著减少碱性电解槽的启停次数，降低启停成本。基于 PSO 算法及 CPLEX 工具箱求解了碱性电解槽、PEM 电解槽及储能电池的最优容量及各设备的运行功率，并结合具体案例进行了分析。主要结论为：

(1)离网型风光制氢系统同时配置碱性电解槽、PEM 电解槽与储能电池可以更好地提升系

统经济性，降低系统弃电率；而同等条件下，同时配置碱性电解槽与 PEM 电解槽则可实现系统制氢量最大。

（2）电解槽设备的成本会影响设备容量及运行功率优化结果。由于目前氢能发展火热，后期碱性电解槽与 PEM 电解槽成本有望大幅降低。

参考文献：

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 构建绿色低碳循环发展经济体系是实现碳达峰碳中和的关键举措[EB/OL].(2013-03-24)[2021-02-25].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202102/t20210223_1267739.html.

[2] 殷甜甜. 可再生能源发电制绿氢和氢能储运技术现状与发展分析 [J]. 能源研究与信息, 2024, 40(2)：89－93.

[3] 呼鹏飞, 万萌萌, 余海天, 等. 基于改进粒子群算法的风氢储系统容量优化配置 [J]. 科学技术创新, 2022(34)：48－53.

[4] 赵振宇, 郝宇霞. 基于火电灵活性改造的可再生能源消纳系统成本优化 [J]. 现代电力, 2024, 41(2)：326－334.

[5] 薛福, 马晓明, 游焰军. 储能技术类型及其应用发展综述 [J]. 综合智慧能源, 2023, 45(9)：48－58.

[6] 习近平. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话 [J]. 一带一路报道(中英文), 2021(1)：20－21.

[7] 崔丽瑶, 刘怀东, 刘豪, 等. 基于氢能经济的电网大规模风电消纳模式 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(2)：108－115.

[8] 李冰峰, 李婉, 张晓勤, 等. “双碳”背景下制氢技术前景展望 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(2)：134－136.

[9] 吴景霞, 索金琳. 基于改进 DEC 算法的风光氢系统容量配置 [J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11)：98－106.

[10] 朱雅魁, 耿泉峰. 耦合氢储能的综合能源园区系统容量配置与运行优化 [J]. 现代电力, 2023, 40(6)：931－938.

[11] 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.

[12] 梅建春, 钱君霞, 赵盛杰, 等. 考虑电解水制氢消纳弃风电量的制氢容量规划 [J]. 湖北电力, 2022, 46(2)：9－14.

[13] 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.

[14] 邵志芳, 吴继兰. 基于动态电价风光电制氢容量配置优化 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(8)：227－235.

[15] 贾成真, 王灵梅, 孟恩隆, 等. 风光氢耦合发电系统的容量优化配置及日前优化调度 [J]. 中国电力, 2020, 53(10)：80－87.

[16] 李洋洋, 邓欣涛, 古俊杰, 等. 碱性水电解制氢系统建模综述及展望 [J]. 汽车工程, 2022, 44(4)：567－582.

[17] 杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 考虑平抑风光波动的 ALK-PEM 电解制氢系统容量优化模型 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1)：85－96.

[18] Gupta N. A review on the inclusion of wind generation in power system studies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59：530－543.

[19] Belfkira R, Nichita C, Reghem P, et al. Modeling and optimal sizing of hybrid renewable energy system[C]// 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan, Poland: IEEE, 2008: 1834－1839.

[20] 张腾飞. 碱性水电解制氢系统的建模分析与设计优化 [D]. 北京: 北京化工大学, 2023.

[21] 张轩, 王凯, 樊昕晔, 等. 电解水制氢成本分析 [J]. 现代化工, 2021, 41(12)：7－11.

[22] 苏亚东, 孔凡太, 姚秀丹, 等. 面向波动性电源的 PEM 电解水制氢关键材料研究进展 [J]. 能源研究与信息, 2025, 41(4)：209－215.

[23] 周舟. 中国氢价指数体系首批“长三角氢价格指数”发布 [J]. 天然气与石油, 2022, 40(5)：43.

信息

国内首例固体颗粒储热技术服务稠油热采

7 月 28 日，新疆油田新型固体颗粒储热技术现场试验在重油九 8 区完成，实现了国内固体颗粒储热技术服务稠油热采生产场景的首次应用。

本次试验创新选用油田压裂用石英砂作为固体颗粒储热基材，自主搭建 100 kW 橇装式电磁加热储热产汽装置。该技术通过电磁加热固体颗粒完成电能向热能的转化，借助颗粒连续流动输送热量，在换热器内与湿蒸汽充分换热，稳定产出过热蒸汽。本次新型固体颗粒储热技术现场试验，累计产出高温过热蒸汽 3 000 m^3，整套工艺适配油田现场生产工况，试验成效良好，系统运行安全稳定、可控可靠。

（王　波）