引用格式：卢皓天，刘少鹏，王凯. 基于多目标粒子群算法的光伏制氢系统容量优化方法 [J]. 南方能源建设，2025，12（3）：133-143. LU Haotian, LIU Shaopeng, WANG Kai. Capacity optimization method for photovoltaic hydrogen production systems based on multi-objective particle swarm algorithm [J]. Southern energy construction, 2025, 12(3): 133-143. DOI：10.16516/j.ceec.2024-373.

基于多目标粒子群算法的光伏制氢系统容量优化方法

卢皓天[1]，刘少鹏[2,✉]，王凯[1]

（1. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司，上海 200063；
2. 广东技术师范大学 计算机科学学院，广东 广州 510665）

摘要：[**目的**]制氢系统利用太阳能将水转化为氢气，旨在减少碳排放并提升可再生能源的利用效率。然而，光伏发电出力的随机性和波动性严重影响光伏制氢系统的稳定供氢。[**方法**]文章提出了一种基于多目标粒子群算法的光伏制氢系统容量优化方法。在光伏制氢系统中引入了化学能电池组和储氢罐，构建了光伏制氢-储能-供氢模型，并设计了氢储能优先的系统运行策略。[**结果**]以系统的经济性成本、弃光率和购电率为优化目标，使用多目标粒子群算法求解了系统各组件的容量配置。在保证持续稳定供氢的情况下，优化结果显示系统的经济性成本、弃光率和购电率均得到了有效降低。[**结论**]算例分析结果表明，所提出的容量优化方法能够有效降低光伏制氢系统的经济性成本，减少弃光和购电，显著提升系统的运行稳定性。

关键词：容量优化；光伏制氢；多目标粒子群；经济性；弃光率；购电率

DOI： 10.16516/j.ceec.2024-373　　**文章编号：**2095-8676(2025)03-0133-11

CSTR： 32391.14.j.ceec.2024-373　　**中图分类号：** TK91；TK511

论文二维码

Capacity Optimization Method for Photovoltaic Hydrogen Production Systems Based on Multi-Objective Particle Swarm Algorithm

LU Haotian[1], LIU Shaopeng[2,✉], WANG Kai[1]

（1. East China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200063, China；
2. School of Computer Science, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, Guangdong, China）

Abstract: [**Objective**] The hydrogen production system utilizes solar energy to convert water into hydrogen, aiming to reduce carbon emissions and improve the efficiency of renewable energy utilization. However, the randomness and volatility of photovoltaic power output severely impact the stable hydrogen supply of the system. [**Method**] This paper proposed a capacity optimization method for photovoltaic hydrogen production systems based on a multi-objective particle swarm algorithm. In the photovoltaic hydrogen production system, chemical energy battery packs and hydrogen storage tanks were integrated to construct a photovoltaic hydrogen production-storage-supply model. A system operation strategy prioritizing hydrogen storage was designed. [**Result**] Taking the economic cost of the system, curtailment rate of solar power, and electricity purchase rate as optimization objectives, the multi-objective particle swarm algorithm was employed to solve the capacity configuration of the system components. The optimization results demonstrated that, while ensuring a continuous and stable hydrogen supply, the economic cost, curtailment rate, and electricity purchase rates of the system were effectively reduced. [**Conclusion**] The results of case analysis indicate that the proposed capacity optimization method can effectively reduce the economic costs of the system, decrease curtailment and electricity purchases, and significantly enhance the operational

收稿日期：2024-11-05　　**修回日期：**2024-12-25　　**网络首发日期：**2025-05-15
基金项目：中国电力工程顾问集团有限公司科技项目“光伏水电解制氢技术研究与应用示范”（DG3-A03-2022）

stability.

Key words: capacity optimization; photovoltaic hydrogen production; multi-objective particle swarm; economic efficiency; curtailment rate; electricity purchasing rate

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (https: //creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

0 引言

随着全球对环境可持续性的关注日益增强，中国正积极推进实现“双碳”目标，即力争在 2030 年前碳排放达峰，2060 年前实现碳中和。在此背景下，光伏技术作为国家实现这一目标的重要组成部分，其发展迅猛，中国已位居世界光伏产业的领先地位[1]。然而，光伏发电的间歇性和不稳定性对电网安全运行构成挑战。为了解决这一问题，光伏制氢技术应运而生，通过太阳能驱动电解水制氢的方式储存能量，为电网提供稳定的能量供应[2-3]。此外，随着分布式光伏在配电网中的渗透率提高，光伏制氢技术的应用有望进一步推动能源互联网的建设和电力系统的多元化发展，为实现清洁低碳的电力解决方案提供支持[4-5]。

郑博等[6] 提出了一种基于多类型电解制氢协同运行的风光互补制氢项目，该项目采用碱性电解槽和质子交换膜电解槽的动态运行响应特征，以应对波动性的风光发电出力，实现风光的灵活消纳，此外，他们还使用非劣分层遗传算法对电解制氢设备的容量进行了优化配置。Garcia 等[7] 通过 HOMER 软件对光伏/电池/氢气项目进行了分析，考虑了初始资本、净现值成本（NPC）、单位能源成本（COE）和容量短缺等因素。Marino 等[8] 则分析了在最低功率负载下，储存在氢气中的能量能够满足需求时的最佳容量配置，并使用 HOMER 软件求解了这一问题。孟军磊[9] 等使用麻雀搜索算法以单位发电成本为目标优化制氢系统各组件的配置容量。胡臻达等[10] 提出改进的猫群算法用于求解风光混合制氢系统的配置容量，该工作使用预先设定的权重系数将经济性、弃风率和缺电率 3 个优化目标转为单个优化目标。林炜和刘天羽[11] 基于 Matlab 平台，采用 Gurobi 求解器求解多个超级电容配置模型来探索 pareto 前沿。潘泽铎和钟炜[12] 使用多目标粒子群算法求解风光互补发电制氢储能系统的配置容量，以降低系统运行成本和最大化风光消纳。然而现有方法大多数没有考虑到持续稳定供氢的约束[13-19]，且大多数是使用单目标进行容量配置求解[20-23]。使用多目标求解算法的工作当中[24-28]，很少考虑到经济性成本和弃光率以及购电率之间数量级差距很大，这使得求解结果存在不合理的情况。

因此，文中考虑光伏制氢系统应有稳定供氢的能力，将供氢需求纳入约束条件。使用多目标粒子群算法进行容量配置优化，提出成本-收益比用于替换优化目标中的经济性成本，使得经济性成本目标、弃光率和购电率处于同一个数量级。综合上述改进，所提出的方法使得光伏制氢系统能够稳定持续供氢，运行安全稳定。

1 系统结构及数学模型

1.1 系统结构

本文构建的包含光伏阵列（PV）、电解槽（ELE）、化学能电池（SC）和储氢罐（H_2）的光伏制氢系统，其运行结构如图 1 所示。光伏阵列是该系统的主要供能部分，化学能电池和储氢罐为辅助供能部分，其中化学能电池和光伏阵列共同为电解槽供电制氢，储氢罐在电解槽制氢量不足时进行供氢。储能电池可吸收多余的光电，储氢罐可吸收电解槽满足供氢需求时多余的氢气。当整个系统的电能和储氢不足以满足供氢时，系统从电网购电，保证光伏制氢系统能够持续稳定供氢。

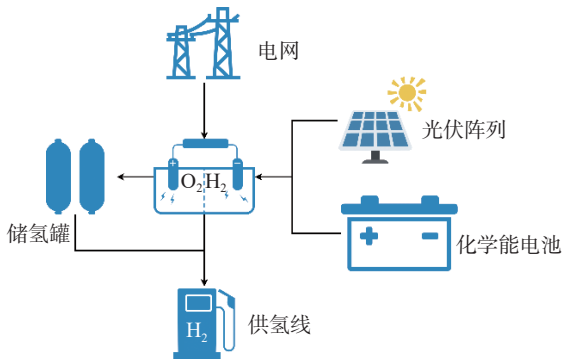

图 1 光伏制氢系统架构

Fig. 1 Photovoltaic hydrogen production system architecture

1.2　系统组件建模

1.2.1　电解槽

电解槽作为制氢的核心装置，其产氢量为：

$$P_{\mathrm{out_H_2}}(t)=\eta_1 P_{\mathrm{in_ele}}(t) \tag{1}$$

式中：

t ——系统运行的第t个小时；

$P_{\mathrm{out_H_2}}(t)$ ——t时刻电解槽的产氢功率(kW)；

η_1 ——电氢转换比率；

$P_{\mathrm{in_ele}}(t)$ ——t时刻电解槽的输入功率(kW)。

1.2.2　储氢罐

通过电解槽进行电转氢，将氢气存储在储氢罐中，还可由储氢罐进行供氢。允许充入和释放的最大氢气量都会与氢气罐的容量有直接关系，即：

$$E_{\mathrm{H_2}}(t+1)=E_{\mathrm{H_2}}(t)+\eta_2 P_{\mathrm{out_H_2}}(t)-\frac{D_{\mathrm{H_2}}(t)}{\eta_3} \tag{2}$$

式中：

$E_{\mathrm{H_2}}(t)$ ——t时刻储氢罐的储氢量($\mathrm{Nm^3}$)；

η_2 ——储氢罐的存储效率；

η_3 ——储氢罐的释放效率；

$D_{\mathrm{H_2}}(t)$ ——t时刻供氢需求的氢气输送速率($\mathrm{Nm^3/h}$)，如果要求连续稳定供氢，可设置为常量。

1.2.3　化学能电池

t时刻，当需要化学能电池给电解槽供电时，其放电输出功率为$P_{\mathrm{sc_dis}}(t)$；当需要光伏给化学能电池充电时，其充电输入功率为$P_{\mathrm{sc_ch}}(t)$。注意，在同一时刻，化学能电池只能是充电或者放电某种状态。

1.3　优化目标

在光伏制氢系统的规划建设中，投资成本、供电可靠性和连续供氢能力等目标是被较多研究的内容。本文以氢储能系统中光伏阵列、电解槽、化学能电池和储氢罐的容量为决策变量，以最小化系统的投资成本、弃光率和购电率为目标，构建光伏制氢系统的容量优化配置模型。

1.3.1　经济性成本

经济性成本和弃光率及购电率数量级差距很大，本文提出一种成本-收益比f_1用来代替经济性成本，其表达式为：

$$f_1=\frac{C}{C_{\mathrm{profit}}+C} \tag{3}$$

式中：

C_{profit} ——系统供氢收益；

C ——系统经济性成本，其表达式为：

$$C=C_{\mathrm{in}}+C_{\mathrm{o}}+C_{\mathrm{re}} \tag{4}$$

式中：

C_{in} ——投资成本，表示系统初始建设，采购、安装及调试所需的一次性花费；

C_{o} ——运营成本，表示系统初始建设，采购、安装及调试所需的一次性花费；

C_{re} ——置换费用，表示该配置下各组件到达使用年限后进行置换产生的费用。

系统投资成本为：

$$C_{\mathrm{in}}=C_{\mathrm{in,PV}}+C_{\mathrm{in,ELE}}+C_{\mathrm{in,H_2}}+C_{\mathrm{in,SC}} \tag{5}$$

$$\begin{cases} C_{\mathrm{in,PV}}=\rho_1 R_{\mathrm{PV}}\dfrac{r(1+r)^N}{(1+r)^N-1} \\ C_{\mathrm{in,ELE}}=\rho_2 R_{\mathrm{ELE}}\dfrac{r(1+r)^N}{(1+r)^N-1} \\ C_{\mathrm{in,H_2}}=\rho_3 R_{\mathrm{H_2}}\dfrac{r(1+r)^N}{(1+r)^N-1} \\ C_{\mathrm{in,SC}}=\rho_4 R_{\mathrm{SC}}\dfrac{r(1+r)^N}{(1+r)^N-1} \end{cases} \tag{6}$$

式中：

$C_{\mathrm{in,PV}}$、$C_{\mathrm{in,ELE}}$、$C_{\mathrm{in,H_2}}$和$C_{\mathrm{in,SC}}$ ——光伏阵列、电解槽、储氢罐和化学能电池的投资成本；

ρ_1、ρ_2、ρ_3和ρ_4 ——光伏阵列、电解槽、储氢罐和化学能电池的投资成本系数；

R_{PV} ——光伏阵列的配置容量(kW)；

R_{ELE} ——电解槽的配置容量(kW)；

$R_{\mathrm{H_2}}$ ——储氢罐的配置容量($\mathrm{Nm^3}$)；

R_{SC} ——化学能电池的配置容量(kWh)；

r ——年利率；

N ——系统运行年限。

系统运营成本为：

$$C_{\mathrm{o}}=\sum_{n=1}^{N}(C_{\mathrm{o,PV}}+C_{\mathrm{o,ELE}}+C_{\mathrm{o,H_2}}+C_{\mathrm{o,SC}}) \tag{7}$$

式中：

$C_{\mathrm{o,PV}}$、$C_{\mathrm{o,ELE}}$、$C_{\mathrm{o,H_2}}$、$C_{\mathrm{o,SC}}$ ——光伏阵列、电解槽、储氢罐、化学能电池每年的运营维护成本。

系统置换成本为：

$$C_{\mathrm{re}}=C_{\mathrm{re,PV}}+C_{\mathrm{re,ELE}}+C_{\mathrm{re,H_2}}+C_{\mathrm{re,SC}} \tag{8}$$

$$\begin{cases} C_{\mathrm{re,PV}} = \rho_1 R_{\mathrm{PV}} \sum_{n=1}^{\frac{N}{n_1}} \frac{1}{(1+r)^{n \cdot n_1}} \\ C_{\mathrm{re,ELE}} = \rho_2 R_{\mathrm{ELE}} \sum_{n=1}^{\frac{N}{n_2}} \frac{1}{(1+r)^{n \cdot n_2}} \\ C_{\mathrm{re,H_2}} = \rho_3 R_{\mathrm{H_2}} \sum_{n=1}^{\frac{N}{n_3}} \frac{1}{(1+r)^{n \cdot n_3}} \\ C_{\mathrm{re,SC}} = \rho_4 R_{\mathrm{SC}} \sum_{n=1}^{\frac{N}{n_4}} \frac{1}{(1+r)^{n \cdot n_4}} \end{cases} \tag{9}$$

式中：

n_1、n_2、n_3和n_4——光伏阵列、电解槽、储氢罐、化学能电池的使用年限；$C_{\mathrm{re,PV}}$、$C_{\mathrm{re,ELE}}$、$C_{\mathrm{re,H_2}}$、$C_{\mathrm{re,SC}}$分别为光伏阵列、电解槽、储氢罐和蓄电池的置换成本。

1.3.2 弃光率

光伏出力随光照的变化而变化，若光伏出力超出负荷需求，会造成弃光。在系统中，合理规划氢储能系统的容量可以降低弃光率，即：

$$f_2 = \frac{\sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{excess}}(t)}{\sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{PV}}(t)} \tag{10}$$

式中：

f_2 ——弃光率；

$P_{\mathrm{excess}}(t)$ ——t时刻的弃光量(kW)；

$P_{\mathrm{PV}}(t)$ ——t时刻光伏阵列发电量(kW)。

1.3.3 购电率

供电可靠性是表征系统运行稳定性的一项重要指标，外网购电是实现可靠性的关键，外网购电成本计算如下：

$$f_3 = \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{buy}}(t) P_{\mathrm{extra_ele}}(t) \tag{11}$$

式中：

f_3 ——购电成本；

$P_{\mathrm{extra_ele}}(t)$ ——t时刻的电网的分时电价(元/kWh)；

$P_{\mathrm{buy}}(t)$ ——t时刻的购电量(kW)。

1.3.4 综合目标函数

在本文提出的光伏制氢系统的容量优化配置模型中，以最小化系统的投资-收益比、弃光率和购电率为目标，综合目标函数为：

$$f = w_1 \left| \frac{f_1 - f_1^*}{f_1^*} \right| + w_2 \left| \frac{f_2 - f_2^*}{f_2^*} \right| + w_3 \left| \frac{f_3 - f_3^*}{f_3^*} \right| \tag{12}$$

式中：

w_2、w_2和w_3 ——投资-收益比、弃光率和购电率的权重系数；

f_1^*、f_2^*和f_3^* ——f_1、f_2和f_3的最小值。

1.4 约束条件

1.4.1 功率平衡约束

如果系统未接入负载，则$L_{\mathrm{oad}}(t)$可设置为 0。

$$P_{\mathrm{PV}}(t) + P_{\mathrm{buy}}(t) + P_{\mathrm{sc_dis}}(t) = P_{\mathrm{excess}}(t) + L_{\mathrm{oad}}(t) + P_{\mathrm{in_ele}}(t) + P_{\mathrm{sc_ch}}(t) \tag{13}$$

1.4.2 化学能电池充放电功率约束

受化学能电池的额定功率影响，化学能电池的充放电功率约束如下所示：

$$\begin{cases} 0 \le P_{\mathrm{sc_ch}}(t) \le u_{\mathrm{sc_ch}}(t) P_{\mathrm{sc}} \\ 0 \le P_{\mathrm{sc_dis}}(t) \le u_{\mathrm{sc_dis}}(t) P_{\mathrm{sc}} \\ u_{\mathrm{sc_ch}}(t), u_{\mathrm{sc_dis}}(t) \in 0, 1 \\ u_{\mathrm{sc_ch}}(t) + u_{\mathrm{sc_dis}}(t) \le 1 \end{cases} \tag{14}$$

式中：

P_{sc}——化学能电池的额定功率(kWh)。

1.4.3 化学能电池储能状态约束

受化学能电池的额定容量影响，化学能电池的荷电状态约束如下所示：

$$\mathrm{SOC_{sc}}(t+1) = \mathrm{SOC_{sc}}(t) + \frac{\eta_4 P_{\mathrm{sc_ch}}(t)}{E_{\mathrm{sc}}} - \frac{P_{\mathrm{sc_dis}}(t)}{\eta_5 E_{\mathrm{sc}}} \tag{15}$$

式中：

η_4 ——化学能电池的充电效率；

η_5 ——化学能电池的放电效率；

E_{sc} ——化学能电池的额定容量(kWh)。

1.4.4 氢储能系统容量约束

受氢储能系统的容量限制，电解槽的输入功率、储氢罐中充入和释放的氢气量和化学能电池的输出功率需要满足一定的要求，其表达式分别为：

$$\begin{gathered} 0 \le P_{\mathrm{in_ele}}(t) \le R_{\mathrm{ELE}} \\ 0 \le E_{\mathrm{H_2}}(t) \le R_{\mathrm{H_2}} \\ \mathrm{SOC_{SC_min}}(t) \le \mathrm{SOC_{SC}}(t) \le \mathrm{SOC_{SC_max}}(t) \end{gathered} \tag{16}$$

1.4.5 光伏出力约束

光伏发电注入电网的功率受实际光伏出力的限制，需要满足：

$$0 \le P_{\mathrm{PV}}(t) \le P_{\mathrm{PV_max}} \tag{17}$$

式中：

$P_{\mathrm{PV_max}}$——t时刻光伏发电的最大输出功率(kW)。

2 模型求解

2.1 氢储能优先运行策略

储能系统运行的关键是设计合适运行策略[29-32]，本文针对系统中储氢罐和化学能电池两种储能设备

设计了一种储氢罐优先的系统运行策略，具体流程如图 2 所示。该流程的关键在于当光伏出力进行电解制氢超出供氢需求时，优先考虑储氢罐储氢，当储氢罐充满时再考虑化学能电池消纳剩余绿电；光伏出力制氢不满足供氢时，优先考虑化学能电池供电制氢，再考虑储氢罐释放氢气供氢。

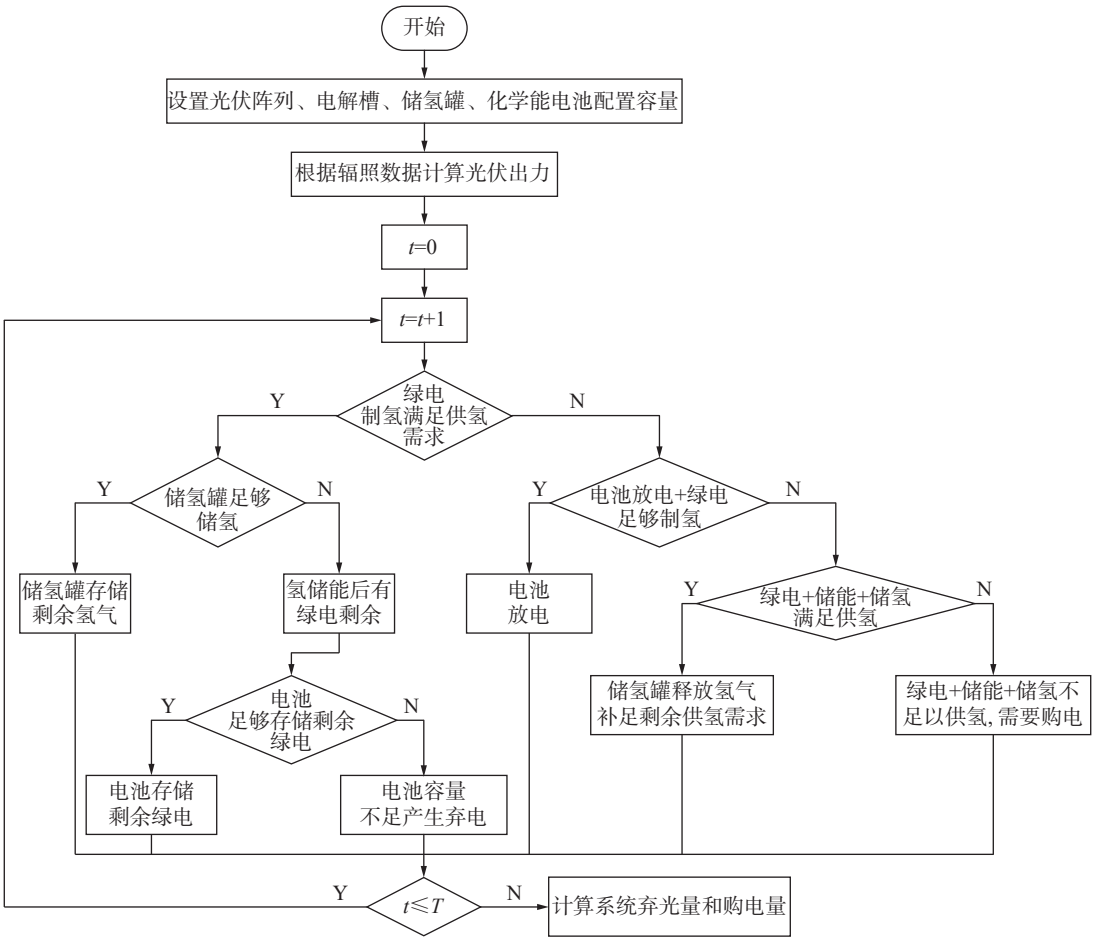

图 2　储氢罐优先策略

Fig. 2　Hydrogen storage tank priority strategy

2.2　配置优化

本文使用多目标粒子群算法进行光伏制氢系统的容量配置进行优化求解，算法求解流程如图 3 所示。该部分的关键在于设置光伏阵列、电解槽、储氢罐和化学能电池的容量配置为粒子位置，以经济性成本、弃光率和购电率为目标更新粒子的位置和速度。

3　算例分析

3.1　基础数据

选取我国某地区一年的天气数据，使用 pvlib 仿真库预测出该地区规模为 1 MW 的光伏阵列全年的光伏发电量，结果如图 4 所示。

单位调度时间为 1 h，采用该地区的分时电价，高峰时期（10:00—12:00、14:00—19:00）电价为 0.8125 元/kWh，平段时期（8:00—10:00、12:00—14:00、19:00—24:00）电价为 0.638 元/kWh，低谷时期（0:00—8:00）电价为 0.585 元/kWh，售氢价格为 1.46 元/Nm^3。分时电价如图 5 所示。

本文给出了系统中 4 种组件的单位容量成本数据，如表 1 所示，其中光伏阵列考虑到容量配置灵活，将所有光伏设备视为一个光伏阵列。此外，表 2 列举了电解槽、储氢罐和化学能电池输入和输出时的转化效率。

对于综合目标函数中，3 个优化目标的具体权重如表 3 所示，本文着重考虑系统的弃光率，因为低弃

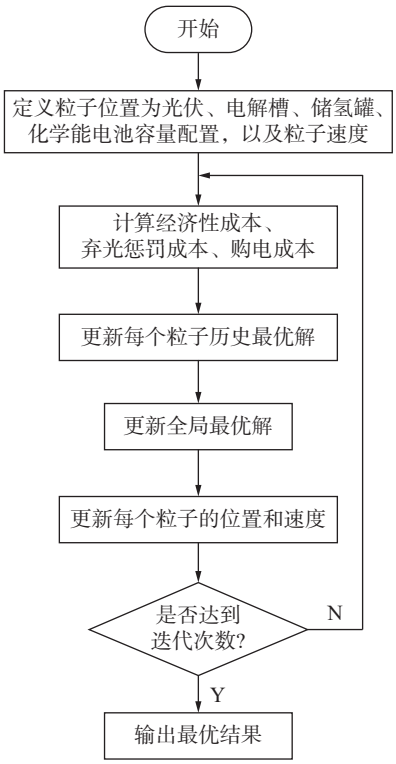

图 3 光伏制氢系统容量配置优化流程

Fig. 3 Capacity configuration optimization process for photovoltaic hydrogen production systems

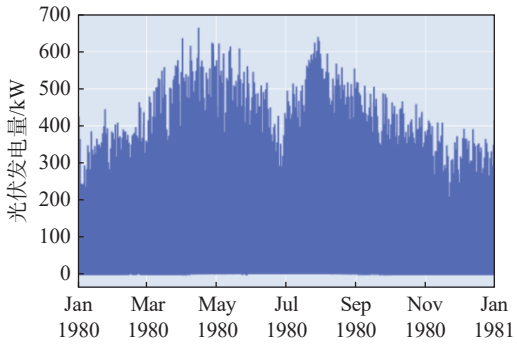

图 4 1 MW 光伏全年发电量

Fig. 4 Annual energy production of a 1 MW photovoltaic system

光率表示系统对能量的利用更加高效。

3.2 优化算法求解结果分析

设定系统供氢需求为 3 000 Nm^3/h。设置种群规模为 500，迭代次数为 1 000 次，使用多目标粒子群算法过程进行求解，综合考虑系统的经济性成本、弃光率和购电率，并对结果进行可视化，如图 6 所示。

图 6 中红色点是优化后的三维解集曲面，绿色、蓝色和紫色点分别是该曲面在正视、俯视和侧视面的投影。由图 6 可看出，3 个目标两两之间呈现一定

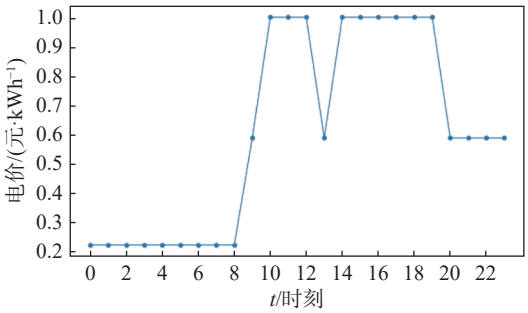

图 5 某地区分时电价

Fig. 5 Time-of-use electricity prices in a certain region

表 1 不同组件的单位容量成本数据

Tab. 1 Cost per unit capacity data for different components

组件	容量	投资成本	运行维护成本
光伏阵列	—	4 000元/kW	90元/kW
单个电解槽	200 Nm^3/h	4 465元/kW	150元/kW
单个储氢罐	10 000 Nm^3	4元/ Nm^3	0.2元/Nm^3
单个化学能电池	50 MW	2 000元/kW	40元/kW

表 2 不同组件的转换效率

Tab. 2 Conversion efficiency of different components

定义	值
电氢转化率η_1	1/3
储氢罐存储效率η_2	0.95
储氢罐释放效率η_3	0.95
化学能电池充电效率η_4	0.99
化学能电池放电效率η_5	0.99

表 3 三个优化目标的权重

Tab. 3 The weights of the three optimization objectives

优化目标	数值
经济性成本	1
弃光率	2
购电率	1

相关性。为了更好地分析结果，本文利用层次图对帕累托解集进行可视化分类，具体是计算每个点和理想点之间的距离来进行分层，再对每个目标使用 4 个阈值来进行分类评分。分类阈值如表 4 所示，其中 J_1、J_2和J_3分别表示经济性成本、弃光率和购电率。

图 7 展示了 3 个目标函数值、4 个优化变量和理想点的距离可视化结果，对于经济性成本的处理，使用线性归一化到 0 和 1 之间，便于计算三维空间

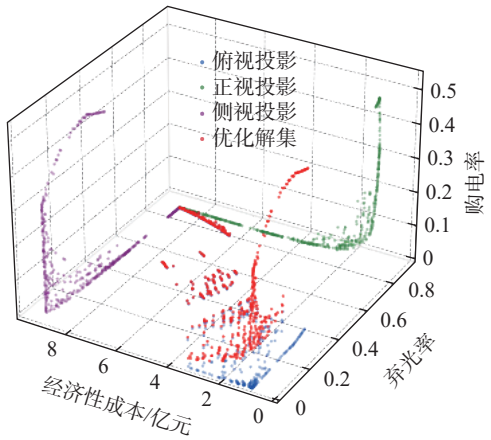

图 6　多目标粒子群算法优化结果

Fig. 6　Multi-objective particle swarm optimization results

表 4　理想目标函数取值阈值

Tab. 4　The ideal objective function value thresholds

优化目标	阈值			
J_1	1×10^8	2×10^8	3×10^8	5×10^8
J_2	0.1	0.15	0.2	0.3
J_3	0.1	0.15	0.2	0.3

中的距离。由图 7 可以得出，经济性成本和弃光率之间有着明显的关联，但与购电率没有很明显的关联。结合各组件容量分布与理想点的距离可以看出，当光伏规模较小时，增大电解槽规模和储氢罐规模可以提高能量的利用效率。

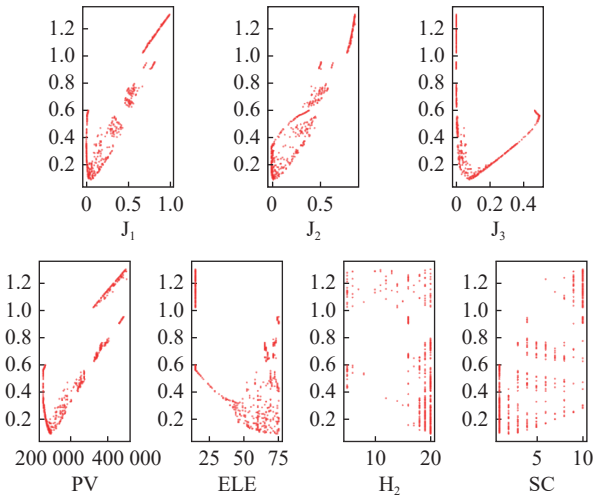

图 7　分类前层次图

Fig. 7　Hierarchical diagram before classification

本文利用表 4 中的阈值对解集进行评分，距离越近评分越低，相应地颜色越深，结果如图 8 所示。多数集中在理想点附近，经过求解得出的优化解集能够有效地降低经济性成本、弃光率和购电率。由于预先设置的储氢罐优先的运行策略，算法倾向于增加电解槽和储氢罐的容量来保障供氢和系统能量消纳，降低光伏和化学能电池的容量可优化系统经济性成本。最后得到最优配置方案如表 5 所示。

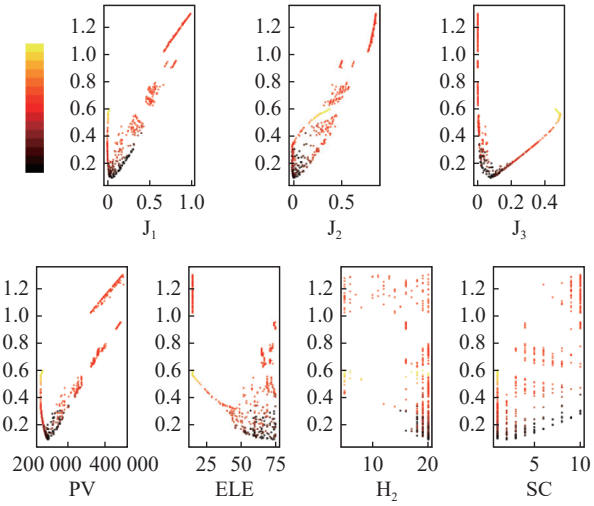

图 8　分类后层次图

Fig. 8　Hierarchical diagram after classification

表 5　容量优化方案

Tab. 5　Capacity optimization solutions

组件	额定功率/容量
光伏阵列	116.696 MW
电解槽	14 800 Nm^3/H
储氢罐	180 000 Nm^3
化学能电池	500 MW

3.3　容量优化方案分析

表 6 所示为根据表 5 的容量优化方案计算得到目标函数值，系统的经济性成本为 3.1 亿元，弃光率为 0.8%，购电率为 12.6%。

表 6　目标函数值

Tab. 6　Objective function values

参数	数值
经济性成本/亿元	3.1
弃光率/%	0.8
购电率/%	12.6

如图 9 所示，系统在光伏出力不足时从电网购电保证持续稳定供氢，仅在日照最为充足的一小段

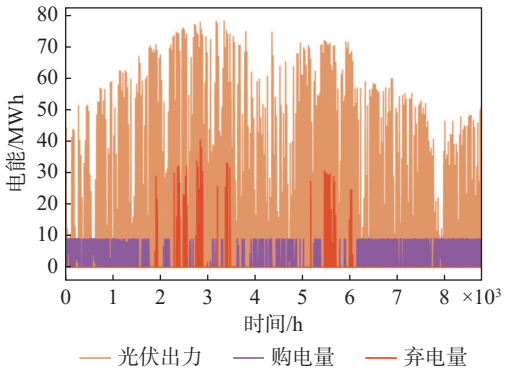

图 9 系统消纳电量变化

Fig. 9 Variation in system power absorption

时间产生了弃电，表明系统对光照资源能够充分利用，在光照不足时进行少量购电保证运行。

图 10 展示了电解槽实际功率和光伏出力及购电曲线，而图 11 展示了化学能电池的状态变化。结合图 10 和图 11 可看出，系统将大多数绿电用于制氢，少量存入化学能电池当中，呈现这种趋势是因为系统运行策略是氢储能优先。

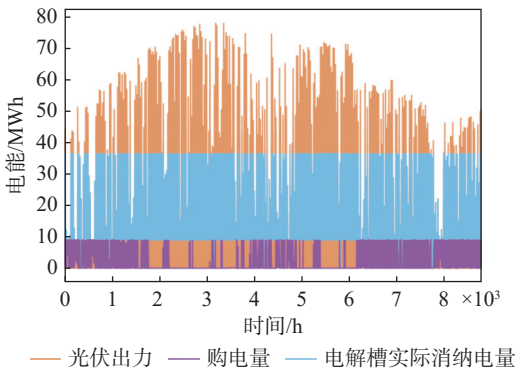

图 10 电解槽实际功率

Fig. 10 Actual power of the electrolyzer

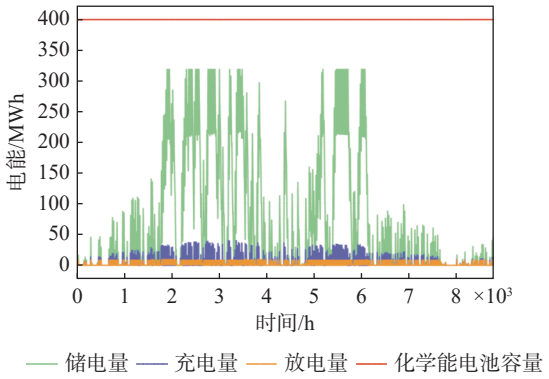

图 11 化学能电池状态

Fig. 11 Status of chemical energy battery

储氢罐的储存状态如图 12 所示，除直接供氢以外还有多余氢气，系统优先储氢。在光照不足的季节储氢罐的氢气释放量会大幅增加用于减少系统从电网购电。但考虑到经济性成本，系统仍需购电以保证持续供氢。

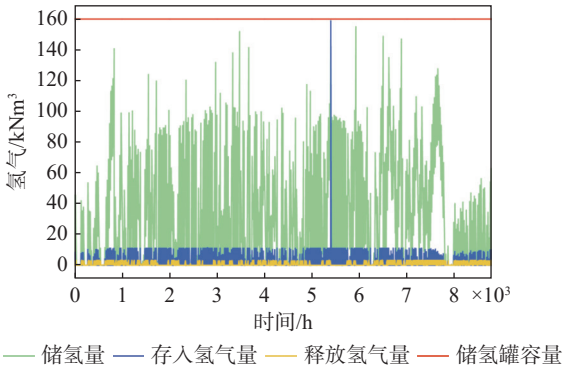

图 12 储氢罐状态

Fig. 12 Status of hydrogen storage tank

3.4 电价对系统容量配置的影响

由于本系统面向的是固定的供氢需求，因此电价是唯一对系统容量优化结果造成影响的因素，通过改变仿真算例中的平均电价，探索电价对系统容量配置优化结果的影响，此外本节还对比了光伏直连制氢系统在不同电价下的优化结果。

图 13 展示了在不同平均电价下使用多目标粒子群对本文提出的光伏制氢系统容量配置优化的结果，随着平均电价的上涨弃光率和系统的经济性成本总体呈现上升趋势，但弃光率仍然在很小的一个范围，说明提出的光伏制氢系统具有较高的运行效率，对购电的依赖性低。

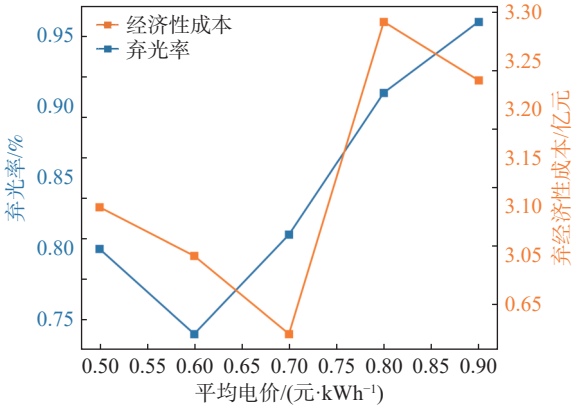

图 13 平均电价对光伏制氢系统容量优化结果的影响

Fig. 13 The impact of average electricity price on the capacity optimization results of photovoltaic hydrogen production systems

图 14 为不同平均电价下使用多目标粒子群对光伏直连制氢系统容量配置优化的结果，该系统仅包含光伏设备和制氢设备，不具有储氢和储能设备，可见在该场景下系统的经济性成本显著降低，但是弃光率很高，说明该系统的运行效率很低，造成了大量绿电资源的浪费。

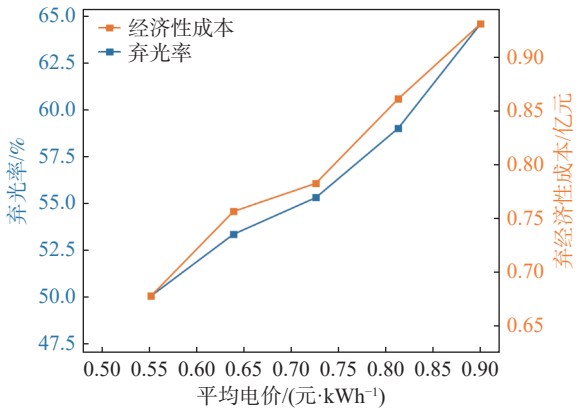

图 14　平均电价对光伏直连制氢系统容量优化结果的影响

Fig. 14　The impact of average electricity price on the capacity optimization results of photovoltaic direct-connected hydrogen production systems

4　结论

在针对用于光伏制氢系统基础上，设计了储氢罐优先的系统运行策略，搭建了以系统经济性成本、弃光率和购电率为优化目标的容量优化问题模型，并利用了多目标粒子群算法求解了该多目标优化问题。在多目标粒子群算法求解过程当中使用提出的投资收益比代替经济性成本作为目标函数值计算，使得 3 个优化目标函数处在相同数量级。并对多目标粒子群算法得到的优化结果进行了分析和决策，并对容量优化方案进行了对比分析，验证了容量优化方法可以有效提高光伏制氢系统建设过程中的经济性，保证供氢可靠性以及提高可再生能源利用率。使用一整年的数据进行算例分析，验证了增大储氢罐和电解槽成本占比可以提高系统的能源利用率，满足光伏制氢的能源利用需求，验证了容量优化配置方案的有效性，以及由于光照资源的季节性，系统发电量在夏季达到最大，并产生少量弃光。此外本文还对比了具有储氢和储能设备的光伏制氢系统以及没有储氢和储能设备的光伏直连制氢系统在不同电价影响下的优化结果，结果表明本文提出的光伏制氢系统具有较高的运行效率，但经济性成本相对较高，光伏直连制氢系统经济性成本相对较低，但弃光率很高，该系统的运行效率较差。

容量优化和能量存储优先策略是光伏制氢系统的两大主要研究方向，本文针对光伏制氢系统的容量优化进行了分析，后续将进一步对该系统的能量存储优先策略进行研究，以进一步实现提高系统各组件的利用率，降低系统的购电率等。

参考文献：

[1]　张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望［J］. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
ZHANG Z G, KANG C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future［J］. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.

[2]　朱振涛，吴丘驰，张焱，等. 考虑容量优化的光伏制氢盐穴储氢系统经济性分析［J］. 电力建设, 2023, 45(4): 26-36. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2024.04.003.
ZHU Z T, WU Q C, ZHANG Y, et al. Economic analysis of photovoltaic hydrogen-generation system using salt cavern for hydrogen storage considering capacity optimization［J］. Electric power construction, 2023, 45(4): 26-36. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2024.04.003.

[3]　许龙虎，刘少鹏，卢皓天. 基于改进多目标灰狼优化算法的光伏制氢储能系统配置优化［J］. 内蒙古电力技术, 2025, 43(1): 39-48. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0007.
XU L H, LIU S P, LU H T. Optimization method for photovoltaic hydrogen energy storage system configuration based on multi-objective improved grey wolf optimization algorithm［J］. Inner Mongolia electric power, 2025, 43(1): 39-48. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0007.

[4]　宋天琦，马韵婷，张智慧. 光伏耦合电解水制氢系统作为虚拟电厂资源的运行模式与经济性分析［J］. 发电技术, 2023, 44(4): 465-472. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22181.
SONG T Q, MA Y T, ZHANG Z H. Operation mode and economy of photovoltaic coupled water electrolysis hydrogen production system as a kind of virtual power plant resource［J］. Power generation technology, 2023, 44(4): 465-472. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22181.

[5]　GÖTZ M, LEFEBVRE J, MÖRS F, et al. Renewable power-to-gas: a technological and economic review［J］. Renewable energy, 2016, 85: 1371-1390. DOI: 10.1016/j.renene.2015.07.066.

[6]　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. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220655.
ZHENG B, BAI Z, YUAN Y, 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. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220655.

［7］ LATA-GARCÍA J, JURADO F, FERNÁNDEZ-RAMÍREZ L M, et al. Optimal hydrokinetic turbine location and techno-economic analysis of a hybrid system based on photovoltaic/hydrokinetic/hydrogen/battery［J］. Energy, 2018, 159: 611-620. DOI: 10.1016/j.energy.2018.06.183.

［8］ MARINO C, NUCARA A, PANZERA M F, et al. Energetic and economic analysis of a stand alone photovoltaic system with hydrogen storage［J］. Renewable energy, 2019, 142: 316-329. DOI: 10.1016/j.renene.2019.04.079.

［9］ 孟军磊, 林玉杰, 孙德明, 等. 基于改进 SSA 的风光氢储综合供电系统配置优化［J］. 上海电力大学学报, 2023, 39(6): 557-562. DOI: 10.3969/j.issn.2096-8299.2023.06.007.
MENG J L, LIN Y J, SUN D M, et al. Optimization for wind-solar-hydrogen power supply system based on improved sparrow search algorithm［J］. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2023, 39(6): 557-562. DOI: 10.3969/j.issn.2096-8299.2023.06.007.

［10］ 胡臻达, 姜文瑾, 张林垚, 等. 基于改进猫群算法的氢储能容量优化配置［J］. 中国电力, 2023, 56(10): 33-42. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202209013.
HU Z D, JIANG W J, ZHANG L Y, et al. Optimal allocation of hydrogen storage capacity based on improved cat swarm optimization［J］. Electric power, 2023, 56(10): 33-42. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202209013.

［11］ 林炜, 刘天羽. 基于场景生成的超级电容-氢混合储能容量优化配置［J/OL］. 电测与仪表, 2024: 1-10 (2024-06-12)［2024-09-28］. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240611.1609.006.html.
LIN W, LIU T Y. Optimal allocation of super capacitor-hydrogen hybrid energy storage capacity based on scenario generation［J/OL］. Electrical measurement & instrumentation, 2024: 1-10 (2024-06-12)［2024-09-28］. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240611.1609.006.html.

［12］ 潘泽铎, 钟炜. 风光互补发电制氢储能系统多目标优化研究［J］. 天津理工大学学报, 2024, 40(1): 37-43. DOI: 10.3969/j.issn.1673-095X.2024.01.006.
PAN Z D, ZHONG W. Multi-objective optimization study of hydrogen storage system for wind-solar hybrid power generation［J］. Journal of Tianjin university of technology, 2024, 40(1): 37-43. DOI: 10.3969/j.issn.1673-095X.2024.01.006.

［13］ 周行, 李少华, 王慧, 等. 光伏耦合电解水制氢系统的建模与仿真［J］. 南方能源建设, 2023, 10(3): 104-111. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011.
ZHOU H, LI S H, WANG H, et al. Modelling and simulation of photovoltaic coupling water electrolysis hydrogen production system［J］. Southern energy construction, 2023, 10(3): 104-111. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011.

［14］ GORDON J M, FASQUELLE T, NADAL E, et al. Providing large-scale electricity demand with photovoltaics and molten-salt storage［J］. Renewable and sustainable energy reviews, 2021, 135: 110261. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110261.

［15］ 周天沛, 孙伟. 风光互补发电系统混合储能单元的容量优化设计［J］. 太阳能学报, 2015, 36(3): 756-762. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2015.03.038.
ZHOU T P, SUN W. Capacity optimization of hybrid energy storage units in wind/solar generation system［J］. Acta energiae solaris sinica, 2015, 36(3): 756-762. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2015.03.038.

［16］ 李永毅, 王子晗, 张磊, 等. 风-光-氢-燃气轮机一体化氢电耦合系统容量配置优化［J］. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 489-502. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.232133.
LI Y Y, WANG Z H, ZHANG L, et al. Capacity allocation optimization of integrated hydrogen-electric coupling system of wind-solar-hydrogen-gas trubine［J］. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 489-502. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.232133.

［17］ 张开鹏, 杨雪梅, 张宏甜, 等. 考虑“光伏-储能”耦合参与调峰的配电网氢储能优化配置［J］. 电网与清洁能源, 2023, 39(10): 95-103, 112. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2023.10.012.
ZHANG K P, YANG X M, ZHANG H T, et al. A study on the optimal configuration of hydrogen energy storage in the distribution network considering "photovoltaic-energy storage" coupling participating and peak shaving［J］. Power system and clean energy, 2023, 39(10): 95-103, 112. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2023.10.012.

［18］ 孟中强, 李飞, 张豪, 等. 基于随机潮流与双层经济性指标的微电网储能优化配置［J］. 电气应用, 2023, 42(8): 92-99.
MENG Z Q, LI F, ZHANG H, et al. Optimal allocation of energy storage in microgrid based on stochastic power flow［J］. Electrotechnical application, 2023, 42(8): 92-99.

［19］ 苏晴. 光伏新能源微电网储能电池容量优化配置方法［J］. 中国高新科技, 2023(2): 17-19. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2023.02.03.
SU Q. Optimal configuration method of energy storage battery capacity of photovoltaic new energy microgrid［J］. China high and new technology, 2023(2): 17-19. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2023.02.03.

［20］ 孙璐瑶, 陈来军, 熊宇峰, 等. 考虑光热集热单元的氢储能热电联供综合能源系统容量优化配置［J］. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 70-76. DOI: 10.16081/j.epae.202309016.
SUN L Y, CHEN L J, XIONG Y F, et al. Capacity optimization configuration of hydrogen energy storage cogeneration integrated energy system considering photothermal collector module［J］. Electric power automation equipment, 2023, 43(12): 70-76. DOI: 10.16081/j.epae.202309016.

［21］ 印佳敏, 郑赟, 杨劲. 储能火电联合调频的容量优化配置研究［J］. 南方能源建设, 2020, 7(4): 11-17. DOI: 10.16516/j.gedi.

issn2095-8676.2020.04.002.
YIN J M, ZHENG Y, YANG J. Research on capacity optimization of generator-storage combined frequency regulation system［J］. Southern energy construction, 2020, 7(4): 11-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.002.

［22］ 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. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230500.
YANG S, FAN Y F, HOU J J, et al. Capacity optimization model for an ALK-PEM electrolytic hydrogen production system considering the stabilization of wind and PV fluctuations［J］. Power system protection and control, 2024, 52(1): 85-96. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230500.

［23］ 孙翔, 刘成良, 牛霞, 等. 风光耦合制氢系统典型设计方案研究［J］. 南方能源建设, 2023, 10(3): 112-119. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.012.
SUN X, LIU C L, NIU X, et al. Research on typical design of wind-solar coupled hydrogen production system［J］. Southern energy construction, 2023, 10(3): 112-119. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.012.

［24］ 陈丽娜, 樊艳芳, 李广, 等. 基于斯塔克尔伯格博弈的光伏制氢系统能量优化管理策略［J］. 现代电力, 2023, 41(3): 507-516. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0331.
CHEN L N, FAN Y F, LI G, et al. Energy optimization management strategy of photovoltaic hydrogen production system based on Stackelberg Game［J］. Modern electric power, 2023, 41(3): 507-516. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0331.

［25］ 齐海涛, 刘咄, 赵东澳, 等. 边防哨所风光耦合制氢系统的配置优化［J］. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(10): 3032-3041. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0770.
QI H T, LIU D, ZHAO D A, et al. Configuration optimization of wind/photovoltaic hydrogen production system at frontier sentries［J］. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(10): 3032-3041. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0770.

［26］ 孔令国. 风光氢综合能源系统优化配置与协调控制策略研究［D］. 北京: 华北电力大学 (北京), 2017: 1-12.
KONG L G. Research on optimal sizing and coordinated control strategy of integrated energy system of wind photovoltaic and hydrogen［D］. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017: 1-12.

［27］ BLASCO X, HERRERO J M, SANCHIS J, et al. A new graphical visualization of *n*-dimensional Pareto front for decision-making in multiobjective optimization［J］. Information sciences, 2008, 178(20): 3908-3924. DOI: 10.1016/j.ins.2008.06.010.

［28］ 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法［J］. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 88-98. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.25.017.
XU L, RUAN X B, ZHANG B H, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system［J］. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88-98. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.25.017.

［29］ 刘德顺, 毛睿, 陈来军, 等. 考虑能量转换效率的新能源场站一体化氢储能系统能量管理策略［J］. 内蒙古电力技术, 2025, 43(1): 11-17. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0003.
LIU D S, MAO R, CHEN L J, et al. Energy management strategy for integrated hydrogen storage system in new energy stations considering energy conversion efficiency［J］. Inner Mongolia electric power, 2025, 43(1): 11-17. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0003.

［30］ GONZÁLEZ A, RIBA J R, RIUS A, et al. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system［J］. Applied energy, 2015, 154: 752-762. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.105.

［31］ 董伟强. 风光氢蓄混合发电系统的配置及其电池管理研究［D］. 杭州: 浙江大学, 2017: 10-19.
DONG W Q. Optimal sizing and battery management of a hybrid power system based on battery/hydrogen［D］. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 10-19.

［32］ KHIAREDDINE A, SALAH C B, REKIOUA D, et al. Sizing methodology for hybrid photovoltaic/wind/hydrogen/battery integrated to energy management strategy for pumping system［J］. Energy, 2018, 153: 743-762. DOI: 10.1016/j.energy.2018.04.073.

作者简介：

卢皓天

卢皓天（第一作者）
1998-, 男, 硕士, 主要从事电力工程建设
(e-mail)bonnyju123@126.com。

刘少鹏

刘少鹏（通信作者）
1984-, 男, 副教授, 博士, 主要从事人工智能和智慧能源研究工作(e-mail)149265005@qq.com。

王凯

王凯
1995-, 男, 硕士, 主要从事新能源技术研究工作(e-mail)wangkai3331@ecepdi.com。

（编辑　徐嘉铖）