

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305104

基于氢能的分布式家庭能源系统容量配置

栗遇春¹, 王刚¹, 李瑞², 袁铁江², 王康²

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

[摘要] 针对分布式新能源作为独立电源向家庭能源系统供电存在的不稳定性问题, 提出了一种基于氢能的分布式家庭能源系统容量配置方法。该方法基于氢能可平抑风光波动、灵活性转化负荷需求等特性, 构建了氢能耦合分布式能源的家庭终端能源系统结构, 结合地区可再生能源特性, 以净现总成本为目标建立了基于氢能的分布式家庭能源系统容量配置模型。以新疆地区的风光资源和典型家庭用能数据为例, 仿真分析了分布式能源与氢能系统配置容量大小对系统的影响, 得到了最优风光配比条件下氢能系统的最佳容量配置。由仿真结果可知: 所提模型能够在实现家庭能源系统离网可靠供电的条件下有效降低系统的总成本, 促进新能源消纳, 为基于氢能的分布式家庭能源的设计提供了建议。

[关键词] 分布式电源; 家庭能源系统; 氢能系统; 离网型

[引用本文格式] 栗遇春, 王刚, 李瑞, 等. 基于氢能的分布式家庭能源系统容量配置[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 49-58.
LI Yuchun, WANG Gang, LI Rui, et al. Capacity configuration of distributed home energy system based on hydrogen energy[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 49-58.

Capacity configuration of distributed home energy system based on hydrogen energy

LI Yuchun¹, WANG Gang¹, LI Rui², YUAN Tiejia², WANG Kang²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In response to the instability problem of distributed new energy as an independent power source supplying energy to household energy systems, a capacity configuration method for distributed home energy systems based on hydrogen energy is proposed. This method is based on the characteristics of hydrogen energy that can suppress wind and solar fluctuations and flexibly convert load demands, and constructs a hydrogen coupled distributed energy family terminal energy system structure. Combining with the characteristics of renewable resources in the region, a hydrogen based distributed household energy system capacity allocation model is established with the goal of minimizing the net total cost. Taking the wind and solar resources and typical household energy data in Xinjiang region as an example, the impact of the configuration capacity of distributed energy and hydrogen energy systems on the system is simulated and analyzed, and the optimal capacity configuration of hydrogen energy systems under the optimal wind and solar ratio conditions is obtained. From the simulation results, it can be seen that the proposed model can effectively reduce the total cost of the household energy system while achieving reliable energy supply off the grid, and promote the consumption of new energy, which provides suggestions for the design of distributed household energy based on hydrogen energy.

Key words: distributed generation; home energy system; hydrogen energy system; off-grid mode

随着“双碳”目标的提出, 电力将逐步成为终端能源消费的主体^[1], 实现“双碳”目标, 能源是主

战场^[2]。随着分布式新能源的不断发展^[3-4], 建立以分布式新能源为基础的新型家庭终端能源系统^[5]被

收稿日期: 2023-05-13

基金项目: 国网新疆电力有限公司科技项目 (5230YX22000D)

Supported by: Science and Technology Project of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. (5230YX22000D)

第一作者简介: 栗遇春 (1966), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力市场营销, 1845553520@qq.com。

通信作者简介: 李瑞 (2000), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化, 2810744410@qq.com。

提上日程。

基于分布式新能源出力具有间歇性、随机性和波动性的特点,其容量配置的合理性将直接影响家庭能源系统的供能稳定性和经济成本。目前,针对以分布式新能源出力为主的家庭系统容量配置问题已有大量研究。文献[6]提出一种通过源侧和负荷侧交互迭代协调的优化配置方法,以解决独立型微网中源荷双侧的不确定性问题。文献[7]针对不同的用户用能场景,建立多能互补系统的容量优化配置模型,采用遗传算法进行求解。文献[8]提出一种考虑电网侧交互和需求侧响应的全寿命周期优化配置方法,构建双层优化模型,探索离网型和并网型多能互补系统的最优配置。文献[9]针对青海农村地区家庭光储容量配置优化问题,提出基于用户调度与用户分类的全寿命周期光储容量配置方法,并采用改进蝴蝶优化算法进行求解。文献[10]提出一种考虑电动汽车特性的家庭新能源系统优化配置方法,建立以年均用能成本和自发自用率最大为目标的优化配置模型,采用粒子群优化算法得到分布式电源的最优配置容量。文献[11]针对农村地区的冷热电联供系统配置问题,采用混合整数线性规划方法建立分布式能源系统容量优化模型,得到最优配置以及最佳运行模式。

上述研究大多采用蓄电池作为储能设备,使用过程中会对环境产生污染,且不可避免短时储能的弊端。氢能系统具有绿色清洁、大规模、长时储能的特点^[12-13],在多个领域都得到了研究。文献[14]建立了海上风电制氢系统配置优化模型,分析了多种运行模式下的最佳容量配置。文献[15]构建了高寒环境下光伏储氢供能系统架构,提出了相应的容量配置模型和优化方法,实现了热电负荷的综合供应。文献[16]提出一种新型电氢能源系统优化模型,探究氢气和天然气相结合对系统产生的经济和环境效益。文献[17]构建一种以氢储能作为多种能量形式转化枢纽的综合能源系统架构,建立氢储能多能联储联供模型,验证了配置氢储能在降低园区供能成本和碳排放的可行性。文献[18]在钢铁园区引入氢能系统,以收益净现值最大为目标,以各组分连接和转换特性为约束,建立氢能耦合能源系统优化模型,求解不同参数下的配置方案。文献[19]对建筑物中的点对点(P2P)能源管理系统进行了建模和研究,通过不同建筑物之间的能源共享得到氢能系统的最优配置及最佳运行方式。

综上,现有研究大多针对氢能系统在电网、工业园区及建筑集群的优化与规划,而对适用于独立微型家庭能源系统的容量规划研究较少。本文针对上述问题,构建了适用于家庭能源系统的氢能耦合分布式供能系统结构,提出了基于氢能的分布式家庭能源系统容量配置模型,以包含系统投资、运维以及置换成本的总成本最小为目标,在满足家庭负荷需求的条件下,分析了风/光配比与氢能设备的容量对系统供能可靠性和总成本的影响,并以区域分布式风光资源和典型家庭的用能情况为例进行了仿真分析,验证了所提模型的有效性。

1 基于氢能的分布式家庭能源系统模型

1.1 基于氢能的分布式家庭能源系统结构

基于氢能的分布式家庭能源系统主要由风力发电机、光伏阵列、氢能系统以及用户负荷组成。风光互补发电是主要的能量来源,风力发电机和光伏阵列通过各自的换流设备接入家庭能源系统为负荷供能。为提高系统的运行稳定性和供能可靠性配置氢能设备。在风光出力大于负荷需求时,通过电解槽将多余电能转化为氢气存储在储氢罐中以提高系统消纳风光的能力;在风光出力小于负荷需求时,通过燃料电池将储氢罐中的氢气转化为电能以保证负荷供给。系统结构如图1所示。

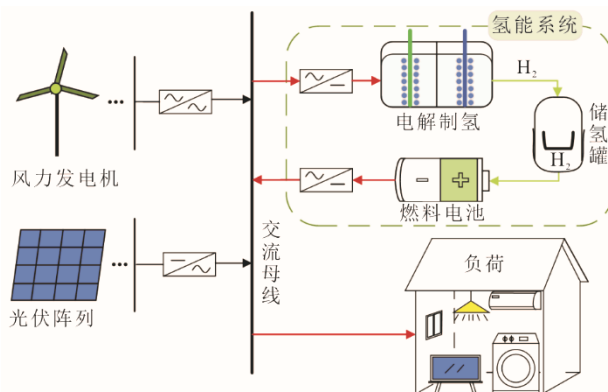


图1 系统结构

Fig.1 System structure

1.2 氢能系统模型

1.2.1 电解槽模型

目前,电解水制氢技术主要包括碱性电解水制氢、固体氧化物电解水制氢、质子交换膜电解水制氢等^[20-21]。其中,碱性电解水制氢技术发展成熟,操作简单灵活,适用于文中所构建的家庭能源系

统。碱性电解槽在运行过程中,通过消耗风光等可再生能源产生的多余电力来制取“绿氢”和反应过程所需要的热量,其模型可表示为:

$$\begin{cases} P_{in,ez}(t) = P_{out,ez}(t) + Q_{h,ez}(t) \\ P_{out,ez}(t) = \eta_{ez} P_{in,ez}(t) \\ m_{h2,ez}(t) = \frac{P_{out,ez}(t)}{H_{h2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{in,ez}(t)$ 、 $P_{out,ez}(t)$ 分别为 t 时刻电解槽输入电功率和产氢功率; $Q_{h,ez}(t)$ 为 t 时刻电解槽反应过程中所消耗的热量; η_{ez} 为电解槽产氢效率; $m_{h2,ez}(t)$ 为 t 时刻电解槽产氢量; H_{h2} 为氢气热值。

1.2.2 储氢罐模型

根据储氢压力的不同,储氢罐可分为高压储氢罐和低压储氢罐。其中,高压储氢罐的压强可达 20 MPa,需要借助压缩机进行氢气压缩,低压储氢罐压强一般为 2~5 MPa^[22-24]。在家庭能源系统中为减少系统成本,选择低压储氢罐来存储绿氢,其模型可表示为:

$$\begin{cases} p(t)V = n(t)RT \\ m_{h2}(t) = Mn(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $p(t)$ 为 t 时刻储氢罐压强; V 为储氢罐体积; $n(t)$ 为 t 时刻储氢罐中氢气摩尔质量; R 为理想气体常量; T 为气体温度; $m_{h2}(t)$ 为 t 时刻储氢罐中氢气质量; M 为氢气相对分子质量。

1.2.3 氢燃料电池模型

氢燃料电池是将氢气和氧气反应的化学能转化为电能的装置,其原理是电解水的逆反应^[25],在运行过程中,通过消耗储氢罐中的绿氢产生电能和热量,其模型可表示为:

$$\begin{cases} P_{in,fc}(t) = m_{h2,fc}(t)H_{h2} \\ P_{in,fc}(t) = P_{out,fc}(t) + Q_{h,fc}(t) \\ P_{out,fc}(t) = \eta_{fc} P_{in,fc}(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{in,fc}(t)$ 、 $P_{out,fc}(t)$ 分别为 t 时刻氢燃料电池输入功率和输出电功率; $m_{h2,fc}(t)$ 为 t 时刻氢燃料电池耗氢量; $Q_{h,fc}(t)$ 为 t 时刻氢燃料电池反应过程中所消耗的热量; η_{fc} 为氢燃料电池发电效率。

选择风力发电机和光伏阵列出力作为家庭能源系统的能量来源。其中,风机出力与风速、风轮面积、轮毂高度等多个因素均有关;光伏出力与太阳辐照强度和温度有关。二者的出力模型可参考文献[6],在此不再赘述。

2 基于氢能的分布式家庭能源系统容量配置模型

2.1 目标函数

基于氢能的分布式家庭终端能源系统以净现总成本为目标,将系统运行周期内所需支出成本和获取收益按照实际利率年平均化后折算得到的现值作为净现值。其中,支出成本包括风电发电机、光伏阵列以及氢能系统的投资成本、运维成本和置换成本,获取收益包括系统运行周期结束后各设备的残余价值,其模型为:

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(r, Y_{op})} \quad (4)$$

$$CRF(r, Y_{op}) = \frac{r(1+r)^{Y_{op}}}{(1+r)^{Y_{op}} - 1} \quad (5)$$

$$C_{ann,tot} = C_{ve} + C_{om} + C_{re} \quad (6)$$

$$C_{ve} = \sum_{i=1}^N c_{i,ve} P_{ri} CRF(r, Y_{op}) \quad (7)$$

$$C_{om} = \sum_{i=1}^N c_{i,om} P_{ri} CRF(r, Y_{op}) \quad (8)$$

$$C_{re} = \sum_{i=1}^N c_{i,re} P_{ri} f_{i,re} SFF(r, Y_{i,lt}) - C_{es} SFF(r, Y_{op}) \quad (9)$$

$$SFF(r, Y) = \frac{r}{(1+r)^Y - 1} \quad (10)$$

$$f_{i,re} = \begin{cases} CRF(r, Y_{op}) / CRF(r, Y_{i,re}) & Y_{i,re} > 0 \\ 0 & Y_{i,re} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$Y_{i,re} = Y_{i,lt} \cdot INT \left(\frac{Y_{op}}{Y_{i,lt}} \right) \quad (12)$$

$$C_{es} = \sum_{i=1}^N c_{i,re} P_{ri} \cdot \frac{Y_{i,rl}}{Y_{i,lt}} \quad (13)$$

$$Y_{i,rl} = Y_{i,lt} - (Y_{op} - Y_{i,re}) \quad (14)$$

式中: C_{NPC} 为净现总成本; $C_{ann,tot}$ 为系统在运行周期内所需的支出成本和获取的收益按照实际利率年平均化后的成本; CRF 为资金回收系数; r 为实际年利率; Y_{op} 为系统运行年限; C_{ve} 为年投资成本; C_{om} 为年运维成本; C_{re} 为年置换成本; $c_{i,ve}$ 为第 i 种设备的单位容量投资成本; P_{ri} 为第 i 种设备的额定容量; $c_{i,om}$ 为第 i 种设备的单位容量运维成本; $c_{i,re}$ 为第 i 种设备的单位容量置换成本; $f_{i,re}$ 为置换比例系数; SFF 为偿债基金系数; $Y_{i,lt}$ 为第 i 种设备的使用寿命; C_{es} 为系统运行结束后的设备残值; $Y_{i,re}$ 为第 i 种设备的更换年限; INT 为取整数符号; $Y_{i,rl}$ 为第 i 种设备在系统运行周期结束后剩余的使用寿命。

2.2 约束条件

2.2.1 功率平衡约束

$$P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{out,fc}(t) = P_{load}(t) + P_{in,ez}(t) \quad (15)$$

式中： $P_{wt}(t)$ 为 t 时刻风机出力功率； $P_{pv}(t)$ 为 t 时刻光伏出力功率。

2.2.2 氢能系统约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{in,ez}(t) \leq B_{ez}(t)P_{max,ez} \\ 0 \leq P_{out,fc}(t) \leq B_{fc}(t)P_{max,fc} \\ B_{ez}(t) + B_{fc}(t) \leq 1 \\ m_{h_2}(t+1) = m_{h_2}(t) + \eta_{in,h_2}m_{h_2,ez}(t) - \frac{m_{h_2,fc}(t)}{\eta_{out,h_2}} \\ p_{min,h_2} \leq p(t) \leq p_{max,h_2} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $B_{ez}(t)$ 、 $B_{fc}(t)$ 分别为 t 时刻电解槽、氢燃料电池的启停状态，若为1则表示开启状态，否则为停机状态； $P_{max,ez}$ 、 $P_{max,fc}$ 分别为电解槽和氢燃料电池最大工作功率； $m_{h_2}(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻储氢罐中氢气质量； η_{in,h_2} 、 η_{out,h_2} 分别为储氢罐储氢、释氢效率； p_{min,h_2} 、 p_{max,h_2} 分别为储氢罐最小、最大压强。

2.2.3 负荷缺电率约束

$$\begin{cases} r_{le} = \frac{\sum_{t=1}^{8760} [P_{le,load}(t)]}{\sum_{t=1}^{8760} [P_{load}(t)]} \\ 0 \leq r_{le} \leq r_{max,le} \end{cases} \quad (17)$$

式中： r_{le} 为负荷缺电率； $r_{max,le}$ 为最大负荷缺电率； $P_{le,load}(t)$ 为 t 时刻缺失负荷功率。

2.3 求解软件

多能源系统混合优化（hybrid optimization of multiple energy resources, HOMER）是由美国国家可再生能源实验室研发的用于分析电力系统的软件，可根据设置问题模拟出从乡村电力到军事基地等领域的各种并网型、离网型电力系统，时间步长可设置为分钟级或小时级。

HOMER 软件的功能主要分为系统仿真、系统优化和灵敏度分析等3部分。HOMER 软件的核心是一个仿真模型，通过对家庭能源系统内的各组成部分进行建模，设置各元件的参数，进而可模拟出该系统的运行状态。HOMER 软件可同时仿真运行出多种可行方案，并根据所选择的优化变量选取系统最优方案，获得系统内各设备的最优容量配置结

果。同时，使用该软件可改变某些变量的参数值，如风机个数、最大负荷缺电率等，得到不同灵敏度因素对仿真结果的影响。

3 算例分析

3.1 基础数据

以新疆地区某户家庭的用能负荷为研究对象，基于分布式能源和氢能系统满足家庭的用能需求。新疆地区光照充足，月平均光照强度在1.93~5.92 kW·h/(m²·d)。其中，4月—8月的光照强度均大于5.00 kW·h/(m²·d)，春、冬季节光照强度较小，各月光照数据如图2所示。

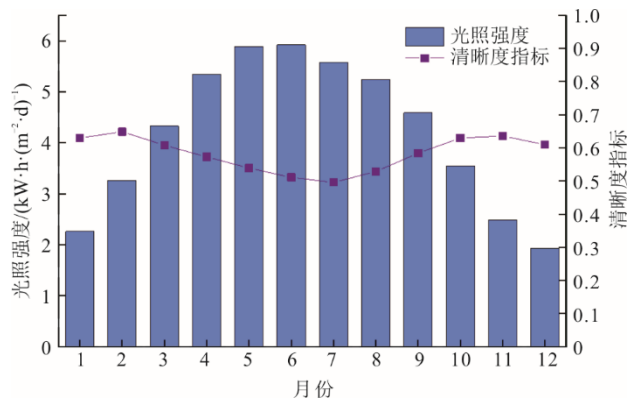


图2 光照强度数据

Fig.2 Light intensity data

该地区风能资源优渥，年平均风速为3.61 m/s，大部分月份的平均风速均在3.50 m/s以上。各月风速数据如图3所示。

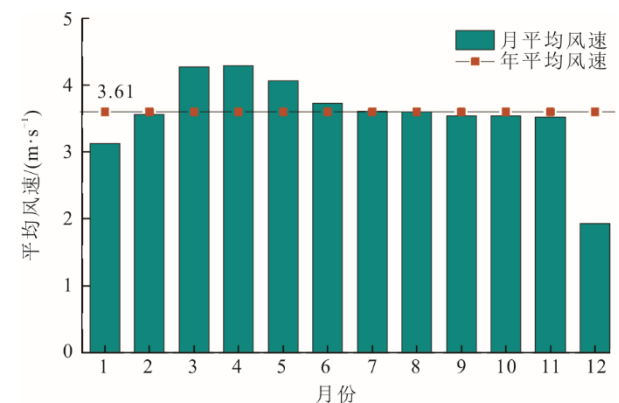


图3 风速数据

Fig.3 Wind speed data

该地区的一户典型家庭中有照明设备、电视机、空调、洗衣机、热水器、电磁炉等电气设备。根据用户用能习惯和用电费用数据，并考虑一定的负荷余量，日用电量大约为11 kW·h，各设备的能

耗情况见表 1。本文所考虑的是纯住宅区，负荷主要分布在 8:00—10:00，14:00—16:00 和 20:00—24:00，用电负荷具体分布情况如图 4 所示。

表 1 典型家庭能耗情况
Tab.1 Typical household energy consumption situation

家用电器	功率/W	每天平均使用时间/h	日用电量/(kW·h)
照明设备	180	7.0	1.260
电视	150	7.0	1.050
空调	735	5.0	3.675
洗衣机	300	1.0	0.300
热水器	1 500	1.0	1.500
电磁炉	500	1.5	0.750
小型电器	100	24.0	2.400
总功耗			10.935

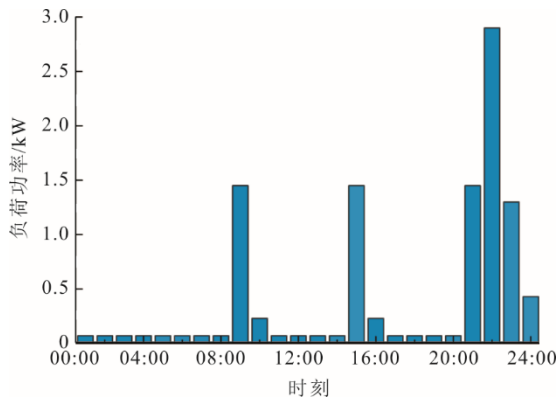


图 4 典型家庭日负荷数据
Fig.4 Typical household daily load data

根据新疆典型家庭日负荷需求，增加日扰动因子和时扰动因子，得到的全年负荷数据曲线如图 5 所示。

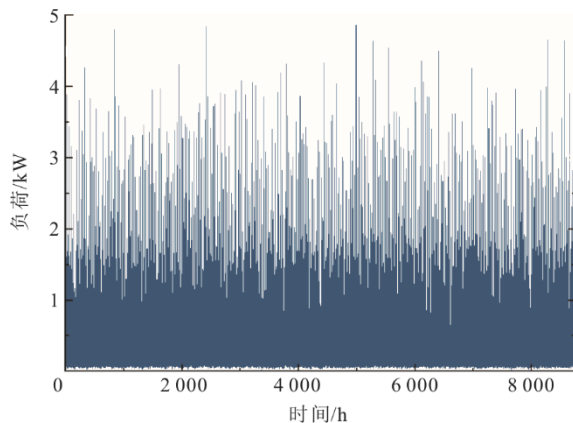


图 5 家庭全年负荷数据
Fig.5 Household load data for the whole year

系统运行年限为 25 年，年利率取 6%，系统各设备的投资成本、运维成本、置换成本、使用寿命以及其他参数见表 2—表 8^[15,26]。

表 2 风力发电机参数
Tab.2 Wind turbine parameters

项目	数值
转子直径/m	5
转子叶片数量	3
切入风速/(m·s ⁻¹)	3
切出风速/(m·s ⁻¹)	20
标称风速/(m·s ⁻¹)	9
额定功率/kW	2.5
初始投资成本/元	5 000
置换成本/元	4 000
运营和维护成本/(元·(kW·a) ⁻¹)	50
生命周期/a	15

表 3 光伏阵列参数
Tab.3 Photovoltaic array parameters

项目	数值
降额因数/%	80
标称工作单元温度/°C	47.5
温度系数/(%·°C ⁻¹)	-0.5
标准试验条件下效率/%	11.9
地面反射率/%	20
初始投资成本/(元·kW ⁻¹)	5 000
置换成本/(元·kW ⁻¹)	2 500
运营和维护成本/(元·(kW·a) ⁻¹)	3
生命周期/a	20

表 4 电解槽参数
Tab.4 Electrolyzer parameters

项目	数值
额定功率/kW	1
效率/%	90
初始投资成本/(元·kW ⁻¹)	2 000
置换成本/(元·kW ⁻¹)	2 000
运营和维护成本/(元·(kW·a) ⁻¹)	0
生命周期/a	15

表 5 储氢罐参数
Tab.5 Hydrogen storage tank parameters

项目	数值
初始投资成本/(元·kg ⁻¹)	1 500
置换成本/(元·kW ⁻¹)	1 500
运营和维护成本/(元·(kg·a) ⁻¹)	0
生命周期/a	25

表 6 氢燃料电池参数
Tab.6 Hydrogen fuel cell parameters

项目	数值
额定功率/kW	1
热值/(MJ·kg ⁻¹)	120
转换效率/%	85
初始投资成本/(元·kW ⁻¹)	3 000
置换成本/(元·kW ⁻¹)	3 000
运营和维护成本/(元·(kW·a) ⁻¹)	0.1
生命周期/a	15

表 7 变流器参数
Tab.7 Converter parameters

项目	数值
额定功率/kW	1
效率/%	90
初始投资成本/(元·kW ⁻¹)	700
置换成本/(元·kW ⁻¹)	700
运营和维护成本/(元·(kW·a) ⁻¹)	10
生命周期/a	15

表 8 蓄电池参数
Tab.8 Battery parameters

项目	数值
标称电压/V	4
效率/%	80
初始投资成本/(元·kW ⁻¹)	1 100
置换成本/(元·kW ⁻¹)	1 000
运营和维护成本/(元·(kW·a) ⁻¹)	10
生命周期/a	4

3.2 算例分析

3.2.1 不同风光发电类型下的配置结果

风力发电机和光伏阵列等分布式能源出力均可以满足负荷需求，为探究不同类型的分布式能源出力对系统配置结果的影响，对设置只有风力发电机出力、只有光伏阵列出力、风力发电机和光伏阵列共同出力等场景进行仿真。不同风光发电类型下的配置结果见表 9，成本如图 6 所示。

表 9 不同风光发电类型下的配置结果
Tab.9 Configuration results under different scenarios

参数	风	光	风+光
风力发电机/kW	17.5	0	10.0
光伏阵列/kW	0	15.0	5.0
电解槽/kW	5.0	8.0	3.0
储氢罐/kg	8	5	3
氢燃料电池/kW	4.0	5.0	4.0
变流器/kW	5.0	5.0	5.0

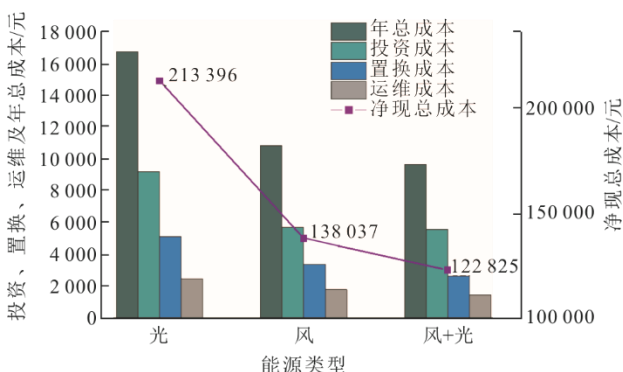


图 6 不同风光发电类型下成本
Fig.6 Cost under different scenery types

由表 9 和图 6 可以看出，风力发电机和光伏阵列共同出力下的配置结果，即由 10 kW 的风力发电机、5 kW 的光伏阵列、3 kW 的电解槽、3 kg 的储氢罐、4 kW 的氢燃料电池和 5 kW 的变流器构成的混合风光出力系统，是满足家庭负荷的经济性最优系统。与只有风机出力和只有光伏出力的系统相比，净现总成本分别降低了 11.02%、42.44%。这是因为风机主要在夜晚出力，光伏阵列主要在白天出力，二者之间形成互补，使系统配置较小的风光和氢能系统容量就可以很好的满足负荷需求。

另外，只含有风机出力系统所配置的风机为 7 个，即 17.5 kW 的风机，这比另外 2 种场景在电源部分的配置容量都大，但其净现总成本远小于只含有光伏出力系统，且与风光共同出力系统相差较小。这主要基于以下 2 个原因：其一是由于新疆地区所处的地理位置，负荷需求在白天较高，光伏出力可以直接满足家庭用能需求，而风机出力与负荷需求曲线不匹配，因此需要更多的风机装机容量以满足家庭用能需求；其二是由于投资成本在净现成本中的权重约为 50%，电源部分的投资成本在系统总投资成本中的占比超过 50%，单位容量光伏阵列的投资成本要远大于单位容量风机的投资成本，因此只含有风机出力系统的年投资成本较小，总成本与风光互补出力系统相差较小。

3.2.2 不同风光出力占比下的配置结果

从上述分析可知，风光共同出力时效果最好，由于单位容量光伏阵列的投资成本和置换成本远大于风机的成本，为节约系统总成本，现不改变光伏阵列容量大小，即光伏阵列的配置容量为 5 kW，只改变风力发电机个数，考虑不同风光出力占比下，家庭能源系统净现总成本的变化。不同风光发电占比下的发电量及成本变化如图 7 所示。由图 7 可以看出：随着风力发电机个数的增加，年均发电量从 10 247 kW·h 逐渐增加到 20 494 kW·h，发电占比也由 43% 增加到 62%；光伏阵列的配置容量一直保持不变，均为 5 kW，年均发电量为 8 925 kW·h，发电占比由 38% 逐渐减少到 27%；氢燃料电池的发电量呈减少趋势，其主要在风光发电出力小于负荷所需的电能时起作用，保证负荷用电量的供给，随着风机数量的变化，风光发电出力逐渐增大，供给负荷的电量在总负荷电量需求中的占比越来越大，氢燃料电池发电占比随之减少。

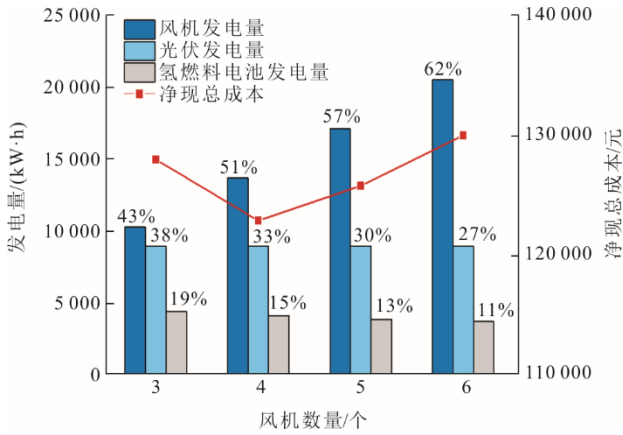


图 7 不同风光发电占比下发电量及成本变化
Fig.7 Changes in power generation and cost under different wind and solar proportions

随着风机数量的增加，电源部分的成本随之增大，氢能设备的配置容量减小，成本随之降低，但系统的净现总成本在风机数量为 4 时达到最小值。当风力发电机、光伏阵列的配置容量过大时，氢能设备的容量减小，但由于风机主要在夜晚出力，与负荷需求曲线不匹配，这导致氢能设备容量变化较小，系统的净现总成本随着风机数的增加不断增大；当风力发电机、光伏阵列的配置容量过小时，系统会选择增大电解槽、储氢罐、氢燃料电池的容量以保证负荷的可靠供给，此时氢能设备所增加的成本远大于风机数变小所减少的费用，系统的净现总成本随着风机数的减小不断增大。在满足负荷需求过程中，持续增大、减小电源部分或者氢能系统的容量均会导致系统成本的增加。

3.2.3 氢能系统配置结果分析

为平抑风光波动、实时满足负荷需求，采用氢能系统作为储能设备，其配置容量的变化将影响系统净现总成本。考虑最大负荷缺电率变化时，氢能系统的配置容量与成本的关系如图 8 所示。由图 8 可以看出，随着最大负荷缺电率的增大，电解槽、储氢罐、氢燃料电池的配置容量呈下降趋势，净现总成本也随之减小。最大负荷缺电率在 0~1.0% 间变化时，电解槽、储氢罐、氢燃料电池的配置容量迅速减小，净现总成本大幅度降低；最大负荷缺电率在 1.0%~2.0% 间变化时，氢能系统整体的配置容量均保持不变，净现总成本变化趋于平缓。这表明系统配置过程中，适当降低对实时满足负荷的要求，可以实现氢能系统配置容量的大幅减小和净现总成本的大幅降低。

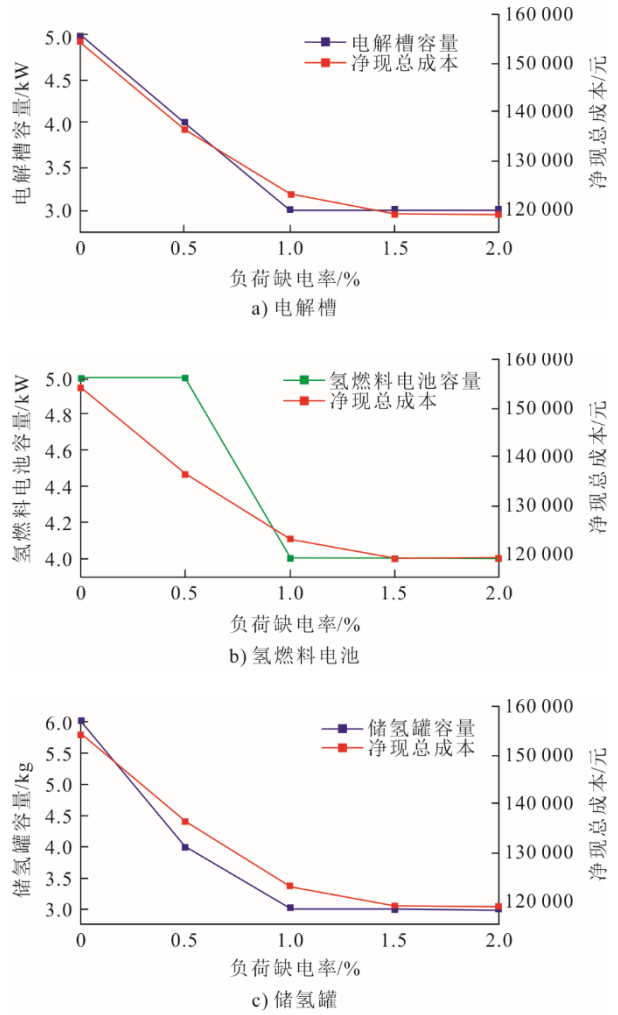
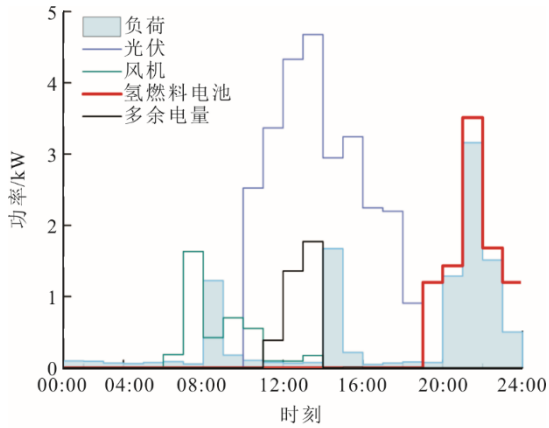
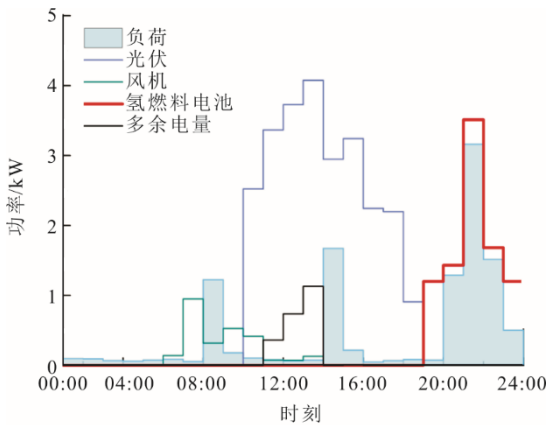


图 8 氢能系统配置容量与净现总成本关系
Fig.8 The relationship between the configured capacity of the hydrogen energy system and the net present total cost

同时，通过对比氢能系统配置容量与净现总成本变化可知：电解槽、储氢罐的容量变化曲线与净现总成本变化曲线的拟合度较高，氢燃料电池的容量变化曲线与净现总成本变化曲线的拟合度较低。当系统对实时满足用户用能的要求较高时，氢燃料电池需要配置较大的容量以保证多时段负荷电能的及时供给。但由于此时风力发电机和光伏阵列的配置容量比较大，电源部分出力与负荷需求之间的总量差值较小，储氢罐需要存储的氢气总量变小，电解槽和储氢罐的容量也会有所减小。最大负荷缺电率在 0.5%~1.0% 变化时，氢能系统配置容量和成本随着对实时满足负荷电能的降低而减小。当负荷电能缺口进一步增大时，氢能系统与净现总成本变化均不明显。根据风机、光伏阵列与氢燃料电池的出力情况进行分析，得到不同负荷缺电率下的系统出力情况如图 9 所示。



a) 最大负荷缺电率为1.0%



b) 最大负荷缺电率为2.0%

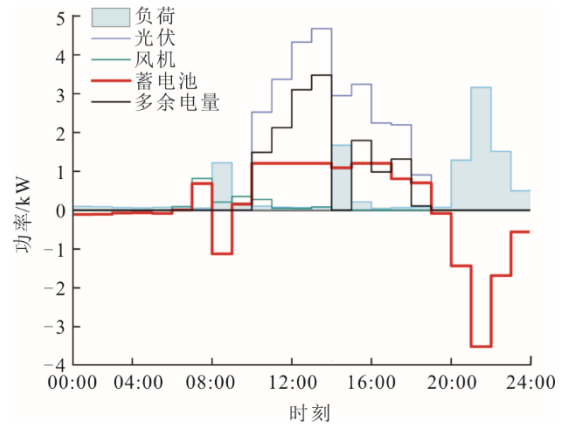
图9 不同负荷缺电率下系统出力情况

Fig.9 System output under different load power shortage rates

由图9可以看出：对于08:00—10:00的负荷需求主要由风机出力满足；14:00—16:00的用户用能需求由光伏阵列出力满足；氢燃料电池出力满足20:00—24:00的负荷需求。随着最大负荷缺电率的增大，负荷所需电能总量减少，风机和光伏阵列的总发电量也随之减少。由于风机在夜晚出力较多，所发电量很少能直接供给负荷使用，系统会优先选择减少风机容量来减少总发电量，使得风机出力变小，光伏阵列出力变化不大。对于夜晚时段的负荷峰值，保持氢能系统容量不变，使得氢燃料电池有足够的发电量以满足峰值电能需求，所以系统的净现总成本略有减小。

3.2.4 储能系统对比分析

采用蓄电池作为储能设备，其他条件均保持一致，得到系统出力如图10所示。由图10可知，采用蓄电池作为储能设备时，出力情况与上述氢储能系统出力情况基本一致，即风光出力主要满足白天的负荷需求，储能设备出力满足夜晚的负荷需求。

图10 采用蓄电池作为储能设备时系统出力情况
Fig.10 System output when using batteries as energy storage equipment

对比图9和图10可知，以氢储能系统作为储能时，电解槽可将电能转化为氢能以实现多余风光电能消纳，系统整体所产生的无法消纳电量即多余电量，约占总发电量的10%。以蓄电池作为储能时，风机和光伏阵列所发电量在满足负荷需求之外，多余电能给蓄电池充电；蓄电池在风光出力不能满足负荷所需电能时放电，以保证实时负荷需求供给。在11:00—17:00，基于蓄电池最大充电功率的限制，光伏阵列所发电量大部分被浪费掉；在18:00—19:00，蓄电池的荷电状态已大于0.8，此时蓄电池充电放缓，部分电能被浪费。整个系统1天内产生的无法消纳电能为14.405 kW·h，占总发电量的50.78%。二者相比，系采用氢储能系统作为储能设备大幅改善了弃光问题。

4 结 论

本文构建了基于氢能的分布式能源家庭终端能源系统结构，建立了基于氢能的分布式家庭能源系统容量配置模型，通过分布式风光发电-制-储氢能系统实现了对独立家庭能源系统的供能，探究了风光能源和氢能系统的容量变化对系统产生的影响。

1) 本文所提配置方法在兼顾系统经济性和供能可靠性的同时实现风光最优配置。该系统电解槽、储氢罐、氢燃料电池的配置容量分别为3 kW、3 kg、4 kW，与单独的风机发电系统、光伏发电系统相比，其净现总成本分别降低了11.02%和42.44%。

2) 在离网型家庭能源系统中，氢储能设备容量和净现总成本均随着最大负荷缺电率的增加呈先大幅降低后逐渐平缓的趋势。即适当降低对实时负荷需求的满足，可在保证可靠性的时候大幅降低系统成本。

3) 以氢能系统作为储能设备, 保证了分布式家庭能源系统的源荷匹配, 可提高该系统整体的能源利用率。与蓄电池作为储能设备相比, 系统无法消纳电能降低了 40.78 百分点, 弃光问题得到大幅改善。

【参考文献】

- [1] 肖先勇, 郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统: 贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.
- [2] 别朝红, 任彦哲, 李更丰, 等. “双碳”目标下城市能源系统的形态结构和发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 3-15.
BIE Zhaohong, REN Yanzhe, LI Gengfeng, et al. Morphological structure and development path of urban energy system for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 3-15.
- [3] 李承周, 王宁玲, 窦潇潇, 等. 多能源互补分布式能源系统集成研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7127-7150.
LI Chengzhou, WANG Ningling, DOU Xiaoxiao, et al. Review and prospect on the system integration of distributed energy system with the complementation of multiple energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7127-7150.
- [4] 晏鸣宇, 王玲玲, 滕飞, 等. 面向分布式能源的可交易能源市场研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 33-48.
YAN Mingyu, WANG Lingling, TENG Fei, et al. Review and prospect on transactive energy market for accommodating distributed energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 33-48.
- [5] 姚钢, 李琳, 周荔丹, 等. 城市居民区的综合能源利用综述[J]. 现代电力, 2020, 37(2): 152-162.
YAO Gang, LI Lin, ZHOU Lidan, et al. A review on integrated household energy utilization in urban residential areas[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(2): 152-162.
- [6] 邵志芳, 赵强, 张玉琼. 独立型微电网源荷协调配置优化[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3935-3946.
SHAO Zhifang, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong. Source side and load side coordinated configuration optimization for stand-alone micro-grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3935-3946.
- [7] EMRANI A, BERRADA A, BAKHOUYA M. Optimal sizing and deployment of gravity energy storage system in hybrid PV-wind power plant[J]. Renewable Energy, 2022, 183: 12-27.
- [8] 寇凌峰, 季宇, 吴鸣, 等. 多能互补系统全生命周期优化配置方法[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 75-82.
KOU Lingfeng, JI Yu, WU Ming, et al. Optimal configuration of multi-energy complementary system considering full life cycle[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 75-82.
- [9] 赵安军, 李旺, 于军琪, 等. 基于户间调度的青海农村家庭光储容量配置优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(7): 45-56.
ZHAO Anjun, LI Wang, YU Junqi, et al. Configuration optimization of photovoltaic and energy storage capacity for rural households in Qinghai Province based on inter-user dispatching[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(7): 45-56.
- [10] 赵安军, 王鹏柱, 荆竞, 等. 考虑电动汽车影响的农村家庭新能源容量优化配置方法[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 31-39.
ZHAO Anjun, WANG Pengzhu, JING Jing, et al. Optimal configuration method of new energy capacity for rural households considering impact of electric vehicles[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 31-39.
- [11] 祝颖, 邵波, 刘艳峰, 等. 分布式能源系统最优配置模式研究——以关中地区新农村为例[J]. 太阳能学报, 2019, 40(9): 2547-2553.
ZHU Ying, SHAO Bo, LIU Yanfeng, et al. Study on optimal allocation of distributed energy systems: a case study of new countryside in Guanzhong region[J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2019, 40(9): 2547-2553.
- [12] 赵雪莹, 李根蒂, 孙晓彤, 等. “双碳”目标下电解制氢关键技术及其应用进展[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 436-446.
ZHAO Xueying, LI Gendi, SUN Xiaotong, et al. Key technology and application progress of hydrogen production by electrolysis under peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality targets[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 436-446.
- [13] 张红, 袁铁江, 谭捷, 等. 面向统一能源系统的氢能规划框架[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 83-94.
ZHANG Hong, YUAN Tiejiang, TAN Jie, et al. Hydrogen energy system planning framework for unified energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 83-94.
- [14] 李梓丘, 乔颖, 鲁宗相. 海上风电-氢能系统运行模式分析及配置优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 104-112.
LI Ziqiu, QIAO Ying, LU Zongxiang. Operation mode analysis and configuration optimization of offshore wind-hydrogen system[J]. Automation of Electric Power System, 2022, 46(8): 104-112.
- [15] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 考虑热电综合利用的光伏储氢独立供能系统容量优化配置[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 66-73.
XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal capacity configuration of solar-hydrogen independent power-supply system considering electricity-heat comprehensive utilization[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 66-73.
- [16] ZHANG Z, ZHOU J, ZONG Z, et al. Development and modelling of a novel electricity-hydrogen energy system based on reversible solid oxide cells and power to gas technology[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(52): 28305-28315.
- [17] 熊宇峰, 陈来军, 郑天文, 等. 考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 31-38.
XIONG Yufeng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage in low-carbon park integrated energy system considering electricity-heat-gas coupling characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 31-38.
- [18] 张鹏成, 徐箭, 柯德平, 等. 氢能驱动下钢铁园区能源

- 系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 1-10.
- ZHANG Pengcheng, XU Jian, KE Deping, et al. Optimal configuration of energy system in iron and steel park driven by hydrogen energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 1-10.
- [19] MEHRIERDI H. Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units[J]. Renewable Energy, 2020, 156: 183-192.
- [20] 邹浩斌. 固体聚合物电解质水电解池及其膜电极的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 1.
- ZOU Haobin. A study on solid polymer electrolyte water electrolyzer and membrane electrode assembly[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 1.
- [21] SHAMS A, KHAN F, ZHANG Y, et al. Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(63): 32284-32317.
- [22] BENSMANN B, HANKE-RAUSCHENBACH R, MÜLLER-SING G, et al. Optimal configuration and pressure levels of electrolyzer plants in context of power-to-gas applications[J]. Applied Energy, 2016, 167: 107-124.
- [23] DODDS P E, STAFFELL I, HAWKES A D, et al. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(5): 2065-2083.
- [24] 刘海镇, 徐丽, 王新华, 等. 电网氢能场景下的固态储氢系统及储氢材料的技术指标研究[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3376-3384.
- LIU Haizhen, XU Li, WANG Xinhua, et al. Technical indicators for solid-state hydrogen storage systems and hydrogen storage materials for grid-scale hydrogen energy storage application[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3376-3384.
- [25] 徐靖, 赵霞, 罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 165-172.
- XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong. Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 165-172.
- [26] 赵淑丹. 热电氢联供型微电网系统的容量配置及优化调度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021: 1.
- ZHAO Shudan. Capacity allocation and optimal scheduling of combined heat, power and hydrogen microgrid[D]. Chengdu : Southwest Jiaotong University, 2021: 1.

(责任编辑 杨嘉蕾)