

DOI: 10.19666/j.rlfed.202307116

考虑新能源汽车的住宅综合能源系统 多目标优化配置研究

张晓烽, 战钰, 刘玉婷, 赵廷波, 傅昂, 何栩
(长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南长沙 410114)

[摘要] 为满足建筑及电动汽车、氢燃料汽车多元负荷需求, 构建了太阳能、地热能及天然气互补的区域综合能源系统, 利用储氢罐及蓄热罐等储能设备对系统进行灵活性调节, 在满足用能需求的基础上实现低碳经济运行。以住宅小区为例, 考虑新能源汽车工作日与周末出行行为差异及出行频率随季节变化特点, 模拟获取住宅与新能源汽车的整体负荷。以该系统一次能源节约率、二氧化碳减排率及年总成本节约率为优化目标, 基于混合整数线性规划对系统进行容量配置优化, 并从经济、能源、环境等方面对系统性能进行多维度评价。结果表明, 优化后系统的一次能源节约率为 42.95%, 二氧化碳减排率为 55.89%, 年总成本节约率为 50.82%, 系统总投资收益为 49.18%, 本系统中电网输入电量仅占总电力负荷的 16.93%。本研究为基于住宅建筑/新能源汽车耦合负荷的新型供能系统集成提供了重要理论依据, 有助于进一步推动综合能源系统在建筑和交通领域的集成应用。

[关键词] 综合能源系统; 多目标优化; 混合整数线性规划; 电动汽车; 氢燃料汽车

[引用本文格式] 张晓烽, 战钰, 刘玉婷, 等. 考虑新能源汽车的住宅综合能源系统多目标优化配置研究[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 38-48. ZHANG Xiaofeng, ZHAN Yu, LIU Yuting, et al. Research on multi-objective optimization allocation of residential integrated energy system considering new energy vehicles[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 38-48.

Research on multi-objective optimization allocation of residential integrated energy system considering new energy vehicles

ZHANG Xiaofeng, ZHAN Yu, LIU Yuting, ZHAO Tingbo, FU Ang, HE Xu
(College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: A regional integrated energy system based on solar, geothermal and natural gas is constructed to meet the multi-load demands of buildings, electric vehicles and hydrogen fuel vehicles. Hydrogen storage tank and heat storage tank are used to adjust the system flexibility, and to achieve systematic low-carbon economic operation on the basis of meeting the energy demand. Taking the residential community as an example, the distinctions of travel behavior for new energy vehicles on weekday and weekend are investigated, the change of travel frequency with different seasons are also considered, and the yearly loads of residential and new energy vehicles are determined. Primary energy saving rate, CO₂ emission reduction ratio and total annual expenditure reduction ratio of the proposed system are set as optimization objectives, and the capacity configuration of integrated system is optimized based on the mixed integer linear programming so as to evaluate the system performances from the aspects of economy, energy and environment. The results show that, primary energy saving rate, CO₂ emission reduction ratio, total annual expenditure reduction ratio and total investment income of the optimized system are 42.95%, 55.89%, 50.82% and 49.18%. In the integrated system, the input power of public grid only accounts for 16.93% of the total power load. This study provides theoretical basis for the integration of novel energy supply system considering coupling loads of residential building and new energy vehicles, which is helpful to promote the application of integrated energy system in building and transportation areas.

收稿日期: 2023-07-16 网络首发日期: 2023-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51806021); 湖南省教育厅科学研究项目(21B0348)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51806021); Scientific Research Project of Hunan Provincial Education Department (21B0348)

第一作者简介: 张晓烽(1988), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为可再生能源耦合分布式能源系统, xiaofengzhang@csust.edu.cn.

Key words: integrated energy systems; multi-objective optimization; mixed-integer linear programming; electric vehicles; hydrogen fuel vehicles

世界经济的快速发展伴随能源结构失衡、能源短缺与环境污染等问题日益凸显。综合能源系统 (integrated energy system, IES) 通过多能耦合机制, 促进可再生能源消纳, 有效提升能源利用效率并降低碳排放^[1-3]。新能源汽车 (new energy vehicles, NEVs) 的普及有利于减少对化石燃料的依赖并加速交通领域脱碳。截至 2022 年, 我国新能源汽车保有量达 1 310 万辆, 同比增长 67.13%, 电动汽车占新能源汽车总量的 79.78%。电动汽车 (electric vehicles, EVs) 在 NEVs 中占比很大, 具有充电便捷, 充电站点靠近建筑物等特点^[4]。而氢燃料汽车 (hydrogen vehicles, HVs) 具有加氢时间短、储能装置小等特点, 同样具有相当大的潜力, 近年来发展迅速^[5]。

由于传统的建筑能源供应系统难以满足氢燃料汽车用能需求, 且大规模电动汽车接入建筑会影响电网的稳定性, 因此考虑构建包含 EVs 和 HVs 的 IES, 以同时满足建筑和新能源汽车用能需求^[6], 获得更好的能源经济效益^[7]。文献[8]将考虑剩余电量的 EVs 充电方式与碳交易机制相结合, 可以显著降低 IES 的碳排放量与运行成本。文献[9]利用 EVs 并网策略, 挖掘负荷侧可调度资源的削峰填谷能力, 并探讨电动汽车不同并网方式对光热电站容量配置的影响。文献[10]构建了满足 HVs 及建筑用能需求的混合可再生能源系统, 并分析该系统在 2 种不同运行策略下的能源、环境和经济性能。文献[11]以经济成本最小、供能不足最小和风光消纳率最大为优化目标, 提出考虑风光不确定性及 HVs 需求的电-热-氢综合能源系统多目标规划方法。文献[12]针对包含 EVs 和 HVs 的多联产系统进行评估, 以确定系统在节能、经济以及减排等方面的性能, 并将所提出的系统与传统分产系统进行对比。文献[13]提出一种包含 NEVs 负荷反馈修正的 IES 多层协调优化策略, 以消除 EVs 和 HVs 出行计划临时改变对系统经济运行带来的不利影响。上述研究均证明了 EVs 和 HVs 的引入, 有利于提升系统性能, 尤其是 HVs 的引入增加了氢能的输出, 使不同能源形式之间的转换更加灵活。

单一的可再生能源具有波动不确定、间歇性、能量密度低等缺点, 为克服上述问题, 提出耦合多种可再生能源的 IES, 利用不同可再生能源之间的互补性, 最大限度地提高系统的环境效益和可靠性。文

献[14]构建了满足建筑和 EVs 负荷的冷热电联产系统, 该系统利用风能和太阳能发电, 并使用电池进行储能, 提高系统的能源效益。文献[15]考虑区域综合能源系统源侧风光出力的不确定性, 并利用分时电价引导 EVs 有序充电, 降低系统的负荷峰谷差。文献[16]以天然气-风-光-氢 IES 为对象, 考虑 EVs 随机充电需求, 基于混合整数线性规划对系统进行容量配置优化。但在包含多种可再生能源的 IES 研究领域, 兼顾 EVs 和 HVs 用能需求, 且综合考虑经济、环境、能源效益等多目标优化研究较少。

以往的研究侧重于利用可再生能源满足 EVs 或 HVs 单一能源需求, 未将建筑与新能源车辆负荷相结合协同考虑车辆、人员出行对建筑负荷的影响。现有的优化方法侧重于 IES 的经济性能, 较少涉及系统的能源及环境性能, 评价指标也较为单一。本文构建面向住宅与 NEVs 的太阳能、地热能与天然气互补的综合能源系统, 综合考虑工作日与周末人员出行行为差异及出行频率随季节变化特性, 获取住宅与 NEVs 负荷需求; 构建多目标函数对系统设备容量进行优化, 采用年总成本节约率、一次能源节约率和二氧化碳减排率以衡量 IES 的能源、经济和环境性能, 并分析系统的独立性及收益。

1 基于NEVs的住宅小区IES建模

图 1 为太阳能、地热能与天然气互补的综合能源系统。该系统采用内燃机 (internal combustion engine, ICE) 作为集成系统的原动机, 利用天然气发电满足建筑及 EVs 的电力需求, 同时将余热输送给热回收装置, 经过转换后的热量驱动吸收式制冷机和热交换器进行制冷和制热。地源热泵 (ground source heat pump, GSHP) 消耗部分电力产生冷量或热量, 以满足建筑供冷/热需求。电解槽通过消耗电力制备氢气, 以满足 HVs 需求。光伏板、太阳能集热器利用太阳能, 分别提供电量和热量。不足的热量、冷量及电量分别由锅炉、电制冷机和公共电网提供。

1.1 供能侧设备模型

1.1.1 内燃机

内燃机通过消耗天然气产生电力和热能, 考虑其可变效率特性, 引入相应的约束条件^[17]。内燃机数学模型为:

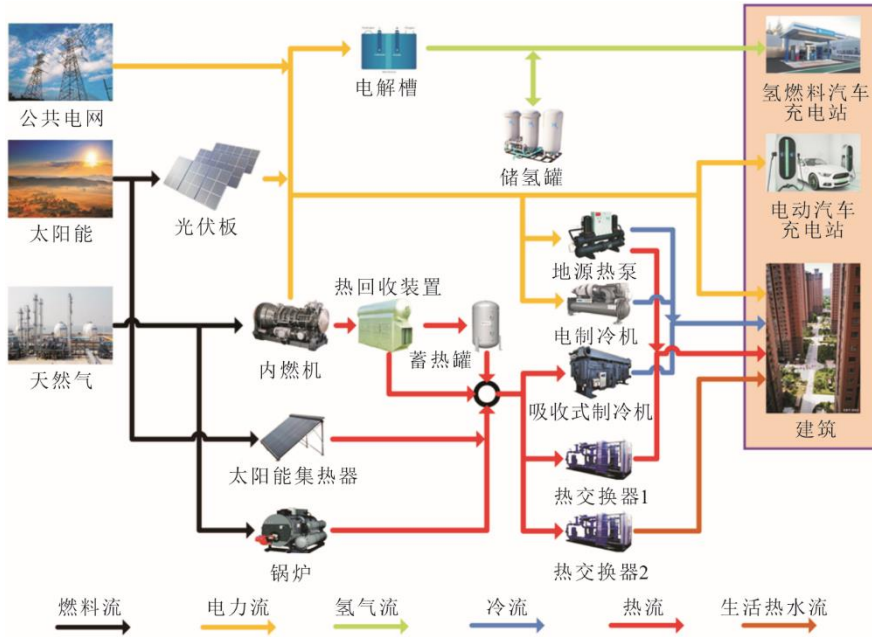


图1 考虑 HVs 和 EVs 的住宅小区综合能源系统架构

Fig.1 Architecture of the integrated energy system for community with HVs and EVs

$$F_{mn,ICE} = \frac{E_{mn,ICE}}{\eta_{ICE}} \quad (1)$$

$$\eta_{mn,ICE} = c_0 + c_1 f_{mn1,ICE} + c_2 f_{mn2,ICE} + c_3 f_{mn3,ICE} + c_4 f_{mn4,ICE} + c_5 f_{mn5,ICE} \quad (2)$$

$$Q_{mn,ICE} = F_{mn,ICE} (1 - \eta_{mn,ICE}) \quad (3)$$

$$E_{mn,ICE} \leq CAP_{ICE} \quad (4)$$

式中: $F_{mn,ICE}$ 为 ICE 的天然气消耗, kW; $E_{mn,ICE}$ 、 $Q_{mn,ICE}$ 分别为 ICE 的发电功率及产热量, kW; $\eta_{mn,ICE}$ 为 ICE 的发电效率, 由 ICE 负荷率 f_{ICE} 和相关系数 c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 决定; CAP 为设备装机容量, kW; 下标 m 、 n 分别为某天 (共 365 天)、某时刻 (共 24 h)。

1.1.2 太阳能设备

实现太阳能利用的设备包括光伏板及太阳能集热器。光伏板建模为:

$$E_{mn,pv} = \eta_{pv} A_{pv} G \quad (5)$$

式中: $E_{mn,pv}$ 为光伏板提供的电量, kW; A_{pv} 为屋顶光伏板面积, m^2 ; η_{pv} 为光伏组件发电效率; G 为每小时的太阳辐射强度, W/m^2 。

太阳能集热器的数学模型为:

$$Q_{mn,sc} = \eta_{sc} A_{sc} G \quad (6)$$

式中: $Q_{mn,sc}$ 为太阳能集热器所产生的热量, kW; η_{sc} 为太阳能集热器的制热效率; A_{sc} 为太阳能集热器的铺设面积, m^2 。

太阳能光伏板与集热器总安装面积受建筑屋顶面积的限制, 需满足:

$$A_{pv} + A_{sc} \leq A_{roof,building} \quad (7)$$

1.1.3 锅炉

通过锅炉燃烧天然气, 用于补充建筑用户所需额外热负荷, 相应的数学模型为:

$$F_{mn,b} = \frac{Q_{mn,b}}{\eta_b} \quad (8)$$

$$Q_{mn,b} \leq CAP_b \quad (9)$$

式中: $F_{mn,b}$ 、 $Q_{mn,b}$ 分别为锅炉的燃料消耗和产生的热量, kW; η_b 为锅炉的热效率。

1.2 多能互补系统设备模型

1.2.1 制冷设备

吸收式制冷机通过利用设备余热进行制冷, 当制冷量不足以满足用户需求时, 电制冷机进行补充, 数学模型为:

$$Q_{mn,ac,output} = COP_{ac} Q_{mn,ac} \quad (10)$$

$$Q_{mn,ec,output} = COP_{ec} E_{mn,ec} \quad (11)$$

$$Q_{mn,ac} \leq CAP_{ac} \quad (12)$$

$$E_{mn,ec} \leq CAP_{ec} \quad (13)$$

式中: $Q_{mn,ac,output}$ 、 $Q_{mn,ac}$ 分别为吸收式制冷机所产生的冷量及消耗的热量, kW; $Q_{mn,ec,output}$ 、 $E_{mn,ec}$ 分别为电制冷机所产生的冷量及消耗的电量, kW; COP_{ac} 、 COP_{ec} 分别为吸收式制冷机和电制冷机的 COP。

1.2.2 热交换器

热交换器利用余热为用户提供热量, 其中热交

换器 1 满足用户供热需求, 热交换器 2 满足用户生活热水需求, 相应的数学模型为:

$$Q_{mn,he1,output} + Q_{mn,he2,output} = \eta_{he} Q_{mn,he} \quad (14)$$

$$Q_{mn,he} \leq CAP_{he} \quad (15)$$

式中: $Q_{mn,he1,output}$ 、 $Q_{mn,he2,output}$ 分别为热交换器 1 及热交换器 2 所提供的热量, kW; $Q_{mn,he}$ 为热交换器消耗的热量, kW。

1.2.3 地源热泵

地源热泵消耗电力产生冷量或热量, 相关数学模型为:

$$E_{mn,gshp} = \frac{Q_{mn,gshp,h}}{COP_{gshp,h}} \quad (16)$$

$$E_{mn,gshp} = \frac{Q_{mn,gshp,c}}{COP_{gshp,c}} \quad (17)$$

$$Q_{mn,gshp} \leq CAP_{gshp} \quad (18)$$

式中: $E_{mn,gshp}$ 为地源热泵消耗的电力, kW; $Q_{mn,gshp,h}$ 、 $Q_{mn,gshp,c}$ 分别为地源热泵所提供的热量和冷量, kW; $COP_{gshp,h}$ 、 $COP_{gshp,c}$ 分别为地源热泵在制热和制冷模式下的性能系数。

1.2.4 电解槽

利用电解槽将电力转化为氢气以满足 HVs 的氢需求, 其数学模型为:

$$E_{mn,ele} = \frac{H_{mn,ele}}{\eta_{ele}} \quad (19)$$

$$E_{mn,ele} \leq CAP_{ele} \quad (20)$$

式中: $E_{mn,ele}$ 、 $H_{mn,ele}$ 分别为电解槽消耗的电力和产生的氢气, kW; η_{ele} 为电解槽的制氢效率。

1.3 储能侧设备模型

1.3.1 储氢罐

储氢罐储/释能数学模型为:

$$H_{m,n+1,hst} = \eta_{hst} H_{mn,hst} + H_{mn,hst,input} - H_{mn,hst,output} \quad (21)$$

$$H_{mn,hst,output} \times H_{mn,hst,input} = 0 \quad (22)$$

$$H_{mn,hst} \leq CAP_{hst} \quad (23)$$

式中: $H_{m,n+1,hst}$ 、 $H_{mn,hst}$ 分别为下一时刻和当前时刻储氢罐中储存的氢气, kW; η_{hst} 为储氢效率; $H_{mn,hst,input}$ 和 $H_{mn,hst,output}$ 分别为储氢罐输入、输出的氢气体积, kW。

1.3.2 蓄热罐

蓄热罐储/释能数学模型为:

$$Q_{m,n+1,tst} = \eta_{tst} Q_{mn,tst} + Q_{mn,tst,input} - Q_{mn,tst,output} \quad (24)$$

$$Q_{mn,tst,output} \times Q_{mn,tst,input} = 0 \quad (25)$$

$$Q_{mn,tst} \leq CAP_{tst} \quad (26)$$

式中: $Q_{m,n+1,tst}$ 、 $Q_{mn,tst}$ 分别为下一时刻和当前时刻蓄热罐中储存的热量, kW; η_{tst} 为储热效率; $Q_{mn,tst,input}$ 和 $Q_{mn,tst,output}$ 分别为蓄热罐输入、输出的热量, kW。

1.4 设备功率平衡约束

通过住宅小区综合能源系统全年逐时运行情况对设备容量进行优化, 需在各时刻满足输出功率与负荷的能量平衡, 根据不同能源种类差异, 将能源需求约束分为电、热和氢平衡约束。其中, 电平衡约束为:

$$E_{mn,pv} + E_{mn,ICE} + E_{mn,grid} = E_{mn,gshp} + \quad (27)$$

$$E_{mn,ec} + E_{mn,ele} + E_{mn,buildings} + E_{mn,EVs}$$

式中: $E_{mn,grid}$ 为从电网购买的电量, kW; $E_{mn,buildings}$ 为建筑所需要的电负荷, kW; $E_{mn,EVs}$ 为 EVs 所需要的电负荷, kW。

对于由地源热泵、吸收式制冷机、电制冷机和热交换器提供的住宅小区冷热需求, 热平衡约束可表示为:

$$Q_{mn,gshp,c} + Q_{mn,ac,output} + Q_{mn,ec,output} = Q_{mn,buildings,c} \quad (28)$$

$$Q_{mn,gshp,h} + Q_{mn,he1,output} = Q_{mn,buildings,h} \quad (29)$$

$$Q_{mn,he2,output} = Q_{mn,buildings,hw} \quad (30)$$

$$Q_{mn,ICE} + Q_{mn,sc} + Q_{mn,b} + Q_{mn,tst,output} = \quad (31)$$

$$Q_{mn,he} + Q_{mn,ac} + Q_{mn,tst,input}$$

式中: $Q_{mn,buildings,c}$ 、 $Q_{mn,buildings,h}$ 分别为建筑所需要的冷负荷和热负荷, kW; $Q_{mn,buildings,hw}$ 为建筑所需要的生活热水负荷, kW。

氢平衡约束为:

$$H_{mn,ele} + H_{mn,hst,output} = H_{mn,HVs} + H_{mn,hst,input} \quad (32)$$

式中: $H_{mn,HVs}$ 为 HVs 所需要的氢负荷, kW。

2 多目标优化及评价指标

2.1 优化目标

为全面评估面向建筑及新能源汽车的综合能源系统性能, 本文利用参比系统进行对比分析。参比系统通过消耗公共电网电力, 利用地源热泵制冷或供热, 以满足建筑物冷、热负荷。通过一次能源节约率 (primary energy saving rate, PESR)、年总成本节约率 (total annual expenditure reduction ratio, TAERR) 及二氧化碳减排率 (CO₂ emission reduction ratio,

CO₂ERR) 3 个指标构建目标函数以优化系统性能。

PESR 指综合能源系统与参比系统的一次能源消耗量差值与参比系统的一次能源消耗量之比。

$$PESR = \frac{F_{ref} - F_{sys}}{F_{ref}} \times 100\% \quad (33)$$

$$\begin{cases} F_{ref} = \sum_m \sum_n (F_{mn,ref,grid}) \\ F_{sys} = \sum_m \sum_n (\frac{E_{mn,grid}}{\eta_{grid}\eta_e} + F_{mn,CE} + F_{mn,b}) \end{cases}$$

式中： η_{grid} 为公共电网的转换效率； η_e 为燃煤电厂发电效率。

采用 TAERR 对所提系统的经济效益进行优化，年度总支出包括资本 CE 和运营支出 OE 2 部分。

$$CO_2ERR = \frac{CDE_{ref} - CDE_{sys}}{CDE_{ref}} \times 100\% \quad (35)$$

$$\begin{cases} CDE_{ref} = \sum_m \sum_n (u_{CO_2,grid} E_{mn,ref,grid}) \\ CDE_{sys} = \sum_m \sum_n [u_{CO_2,grid} E_{mn,grid} + u_{CO_2,ng} (F_{mn,ICE} + F_{mn,b})] \end{cases}$$

式中： $u_{CO_2,grid}$ 、 $u_{CO_2,ng}$ 分别为电和天然气的碳排放系数，g/(kW·h)。

为综合衡量系统的能源、经济和环境性能，引入多目标优化函数进行优化，目标函数可表示为：

$$OP = \beta_1 CO_2ERR + \beta_2 TAERR + \beta_3 PESR \quad (36)$$

式中： β_1 、 β_2 、 β_3 分别为 CO₂ERR、TAERR 和 PESR 的权重系数， $0 \leq \beta_1$ 、 β_2 、 $\beta_3 \leq 1$ 且 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$ ， $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1/3$ ^[18]。

2.2 求解方法

根据上文所列约束条件及目标函数，求解各设备的最佳装机容量。系统设备的装机容量 CAP 为未知变量，主要由各设备出力的最大值决定，同时设备出力也受装机容量的约束，二者相互耦合。此外，由于部分约束的非线性增加了求解难度，因此采用分段线性化将非线性约束转换为线性约束^[19-20]。图 2 为综合能源系统优化配置流程，通过确定当地的可用资源及系统内相应设备，建立优化配置模型，以 CO₂ERR、TAERR 和 PESR 为优化目标，利用混合整数线性规划对系统进行容量配置优化，使用 YALMIP 和 CPLEX 求解器进行求解。

由于太阳辐射强度和负荷需求预测的误差对系统性能造成一定影响，考虑使用鲁棒方法研究不确定性对系统性能的影响特性（式(37)）。采用对偶变换和线性化转换，将鲁棒模型转化为混合整数线

$$TAERR = \frac{TAE_{ref} - TAE_{sys}}{TAE_{ref}} \times 100\%$$

$$\begin{cases} TAE_{sys} = CE_{sys} + OE_{sys} = CRF \times \sum_{k=1}^n CAP_k \times C_k + \\ \sum_m \sum_n (E_{mn,grid} \times C_{grid} + (F_{mn,ICE} + F_{mn,b}) \times C_{ng}) \\ CRF = \frac{i(1+i)^y}{(1+i)^y - 1} \end{cases} \quad (34)$$

式中：CRF 为年投资回收系数； C_k 为单位设备价格，美元/kW； i 为利率； y 为设备服务年限； C_{grid} 为电价，美元/kW； C_{ng} 为天然气价格，美元/kW。

CO₂ERR 用以优化所提系统的环境效益，本系统的 CO₂ 排放主要来自公共电网的电力和天然气。

性规划模型，并利用列约束生成算法（C&CG）进行求解^[21]。

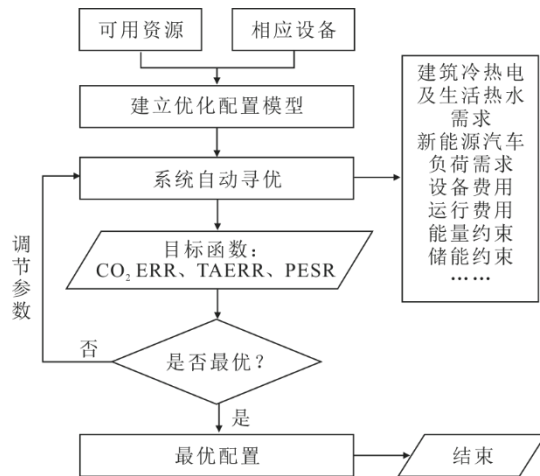


图 2 综合能源系统优化配置流程
Fig.2 Flowsheet of optimization configuration for integrated energy system

$$\begin{cases} IT = Z_G + Z_E + Z_{h,Q} + Z_{c,Q} + Z_H \\ G_{un} = G - Z_G \Delta G_{un} \\ E_{mn,load,un} = E_{mn,buildings} + E_{mn,EVs} + Z_E \Delta E_{mn,load,un} \\ Q_{mn,buildings,h,un} = Q_{mn,buildings,h} + Z_{h,Q} \Delta Q_{mn,buildings,h,un} \\ Q_{mn,buildings,c,un} = Q_{mn,buildings,c} + Z_{c,Q} \Delta Q_{mn,buildings,c,un} \\ H_{mn,HVs,un} = H_{mn,HVs} + Z_H \Delta H_{mn,HVs,un} \end{cases} \quad (37)$$

式中： IT 为不确定预算值； Δ 为误差限值； Z_G 、 Z_E 、

$Z_{h,Q}$ 、 $Z_{c,Q}$ 、 Z_H 分别为太阳辐射强度、电、热、冷及氢负荷的不确定性参数，且取值均为 0 或 1。当 $I=0$ 时，表示基本场景；当 $I=1$ 时， Z_G 为 1；当 $I=2$ 时， Z_G 、 Z_E 均为 1；当 $I=3$ 时， Z_G 、 Z_E 、 $Z_{h,Q}$ 均为 1；当 $I=4$ 时， Z_G 、 Z_E 、 $Z_{h,Q}$ 、 $Z_{c,Q}$ 均为 1；当 $I=5$ 时， Z_G 、 Z_E 、 $Z_{h,Q}$ 、 $Z_{c,Q}$ 、 Z_H 均为 1。

2.3 评价指标

本文所构建的 IES 与电网相连，当内燃机和光伏发电量难以满足用户电力需求时，由公共电网补足，因此该系统与公共电网之间电力交互将对电网造成一定波动性和不稳定性。为评价供能系统与电网之间的相互作用，以电网相互作用水平（grid interaction level, GIL）作为评价指标^[22]：

$$GIL = \frac{\sum_m \sum_n E_{mn,grid}}{\sum_m \sum_n (E_{mn,buildings} + E_{mn,EVs})} \quad (38)$$

此外，为了更好地评价综合能源系统的经济性，采用总投资收益（return of investment, ROI）来量化对外产生的整体效益^[23]。

$$ROI = \frac{B_s + B_c}{CE_{sys}} \times 100\%$$

$$\begin{cases} B_s = \sum_m \sum_n [(E_{mn,ref,grid} - E_{mn,grid}) \times C_{grid} - \\ (F_{mn,ICE} + F_{mn,b}) \times C_{ng}] \\ B_c = \sum_m \sum_n [u_{CO_2,grid} \times (E_{mn,ref,grid} - E_{mn,grid}) \times C_{CO_2}] \end{cases} \quad (39)$$

式中： C_{CO_2} 为 CO_2 的交易价格，美元/t； B_c 、 B_s 分别为减少 CO_2 排放和一次能源消耗所带来的收益，美元。

3 案例分析

为验证所提出的系统模型，本文以长沙某住宅小区为例进行研究，该小区包含 5 栋 10 层楼住宅，共 200 户家庭，总建筑面积为 28 993.5 m^2 ，可利用的屋顶面积约 1 752 m^2 。该小区内设有电动汽车和氢燃料汽车供能装置，以满足用户充能需求。

3.1 小区建筑负荷模拟

结合气象参数、建筑热工特性、车辆出行状态等参数，利用 DeST 软件对小区内建筑进行负荷模拟。小区建筑全年冷、热、电和生活热水负荷分布情况如图 3 所示，长沙市全年太阳辐射分布情况如图 4 所示。

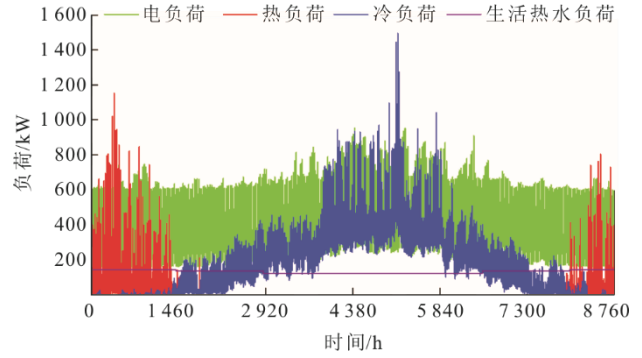


图 3 建筑逐时电、热、冷和生活热水负荷
Fig.3 Hourly electricity, heating, cooling and domestic hot water loads of building

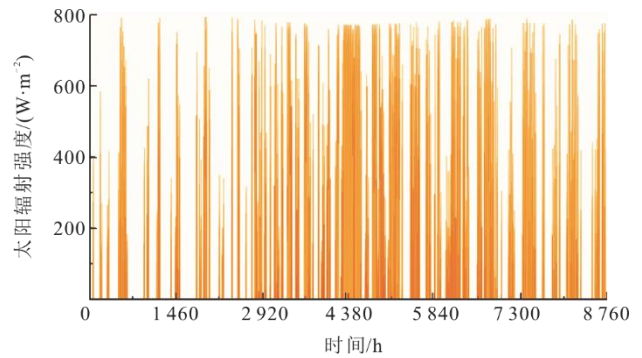


图 4 长沙市全年太阳辐射分布情况
Fig.4 Hourly distribution of solar radiation in Changsha

3.2 NEVs 负荷模拟

根据小区住户数确定新能源汽车保有量，通过蒙特卡洛法模拟 EVs 和 HVs 的出行开始时间、结束时间以及日行驶里程。汽车的充能时间由居民到达和离开时间决定，对应于正态分布，平均到达时间是 17:00，标准差为 4 h；平均出发时间为 08:00，标准差为 4 h^[24]。日行驶里程符合概率密度分布，数学模型为：

$$g(d,u,\sigma) = \frac{1}{d\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{(\ln d - u)^2}{2\sigma^2}} \quad (40)$$

式中： d 为每日行驶距离，km； u 为平均行驶距离，km； σ 为概率函数的标准差。

相关车辆参数见表 1^[25]。考虑汽车工作日和周末的出行差异，选取不同的概率密度分布参数，分别构建工作日和周末的负荷需求，具体如图 5 所示。此外，考虑 EVs 和 HVs 的能源消耗随季节变化，全年 EVs 和 HVs 逐时负荷如图 6 所示。

表 1 NEVs 关键参数设置
Tab.1 Key parameters of NEVs

车辆类型	最大行驶里程/km	储能容量
EVs	450	60.2 kW
HVs	502	5 kg

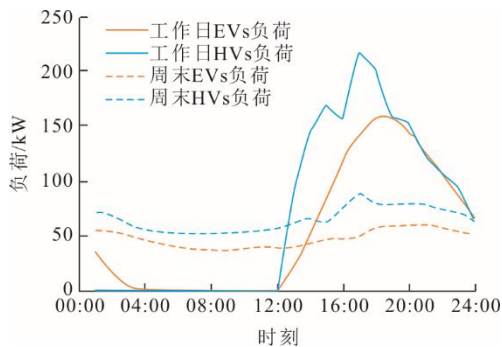


图 5 EVs 和 HVs 工作日与周末负荷需求
Fig.5 EVs and HVs demands in typical day on weekday and weekend

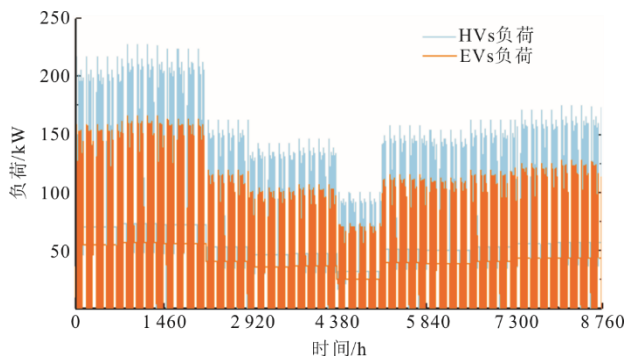


图 6 EVs 和 HVs 全年逐时负荷
Fig.6 Hourly EVs and HVs demands during the whole year

3.3 优化结果分析

系统设备运行及经济参数见表 2^[26-27]。利用混合整数线性规划，对所提系统进行优化，优化结果显示 OP 为 0.498 8。最优设备容量见表 3。受屋顶面积限制，光伏板和太阳能集热器的总面积不得大于 1 752 m²。优化后系统全年综合性能如图 7 所示。

表 2 系统设备运行及经济参数
Tab.2 Operating and economic parameters of system equipment

设备	运行参数	经济参数
ICE	$c_0=-0.000\ 002$, $c_1=2.872\ 5$, $c_2=-6.988\ 9$, $c_3=11.176\ 0$, $c_4=-9.046\ 8$, $c_5=2.872\ 5$	985.00 美元/kW
光伏板	$\eta_{pv}=0.142$	2 039.00 美元/kW
太阳能集热器	$\eta_{sc}=0.165$	200.00 美元/m ²
电解槽	$\eta_{ele}=0.740$	900.00 美元/kW
地源热泵	$COP_{gshp,c}=4.5$, $COP_{gshp,h}=3.5$	313.70 美元/kW
吸收式制冷机	$COP_{ac}=0.7$	197.00 美元/kW
热交换器	$\eta_{he}=0.80$	33.00 美元/kW
储氢罐	$\eta_{hst}=0.95$	4.06 美元/kW
储热罐	$\eta_{st}=0.80$	38.00 美元/kW
电制冷机	$COP_{ec}=3.0$	151.50 美元/kW
锅炉	$\eta_b=0.80$	62.00 美元/kW

表 3 系统最优设备容量
Tab.3 Optimized capacity of equipment in system

项目	数值	项目	数值
内燃机容量/kW	971	锅炉容量/kW	478
光伏板容量/m ²	432	太阳能集热器容量/m ²	1 320
电解槽容量/kW	161	储氢罐容量/kW	2 103
地源热泵容量/kW	703	蓄热罐容量/kW	951
吸收式制冷机容量/kW	796	电制冷机容量/kW	236
热交换器 1 容量/kW	564	热交换器 2 容量/kW	895

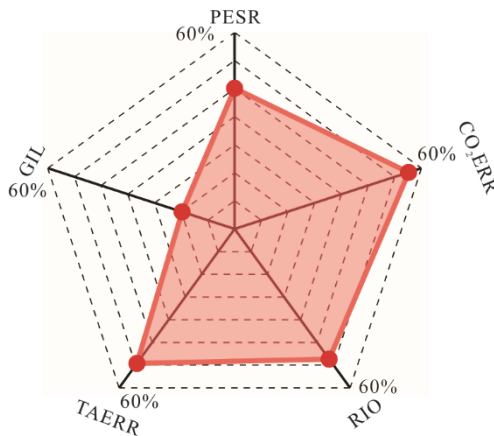
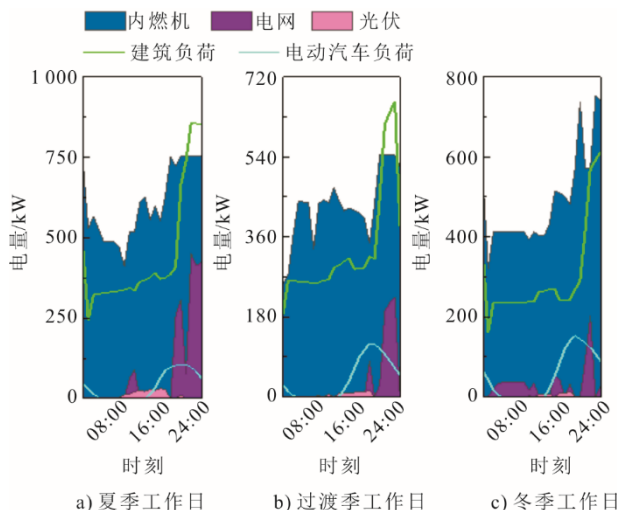


图 7 优化后系统综合性能参数
Fig.7 Optimized comprehensive performances of system

与参比系统相比，优化后系统的一次能源节约率为 42.95%，CO₂ 减排率为 55.89%，年总成本节约率为 50.82%，系统总投资收益为 49.18%，该系统的各项性能均有所提升，具有更好的经济效益和环境效益。此外，该系统中电网输入仅占总电力负荷的 16.93%，表明该系统对电网依赖程度较小，具有较好的独立性。

3.4 不同季节典型日工况分析

图 8 为系统典型日的电力分布。



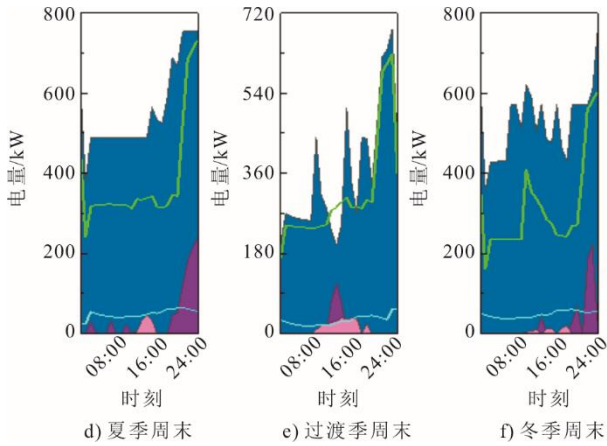


图 8 综合能源系统典型日电力分布
Fig.8 Electricity distribution of integrated energy system on typical day

由图 8 可见，ICE 作为电力的主要来源，除部分电力供给电解槽制氢及驱动地源热泵和电制冷机以满足用户供热或制冷需求外，其余电力均用以满足建筑及电动汽车负荷。因此，ICE 发电量的变化趋势与总电力需求的变化趋势基本一致。在用电高峰时段，特别是夏季工作日的晚上，由于电力需求过大需要从电网购买较多电量，而过渡季的电力需求较少，从电网购买的电量相对较少。除公共电网外，还有一部分电力来自光伏发电，受建筑屋顶面积限制光伏发电量所占比重较小，此外冬季光伏发电量小于夏季。

系统典型日冷/热量分布情况如图 9 所示。由图 9 可知，ICE 产生的大量余热被回收，供给吸收式制冷机和热交换器 1 以满足部分冷、热负荷，多余的热量储存在蓄热罐中，当 ICE 余热不足时蓄热罐放热。地源热泵和热交换器 2 主要满足制冷和生活热水需求。在夏季制冷需求高峰时段，由于地源热泵难以满足全部的制冷需求，部分冷量由电制冷机及吸收式制冷机提供；而冬季供暖高峰时段，通常采用锅炉补充热量；过渡季的冷热量需求很少，地源热泵基本满足。相比于工作日，周末 ICE 产出的波动较大，且建筑负荷波动较小，蓄热罐的使用频率增加。受太阳辐射变化的影响，夏季太阳能集热器产生的热量明显大于冬季。

图 10 为系统典型日氢分布情况。受居民出行行为影响，工作日氢气需求量明显大于周末，相应地储氢罐的释氢时段也较长。由于工作日的氢负荷高峰出现在下午和晚上，与用电高峰重合，为避开用电高峰，作为主要供氢设备承担全部产氢任务的电解槽在用电低谷时制备氢气，储存在储氢罐中，

在氢负荷高峰期释氢。周末的氢负荷波动较为平缓，而电解槽受其他用电设备影响，产氢波动较大，储氢罐的储/释氢行为更加频繁。

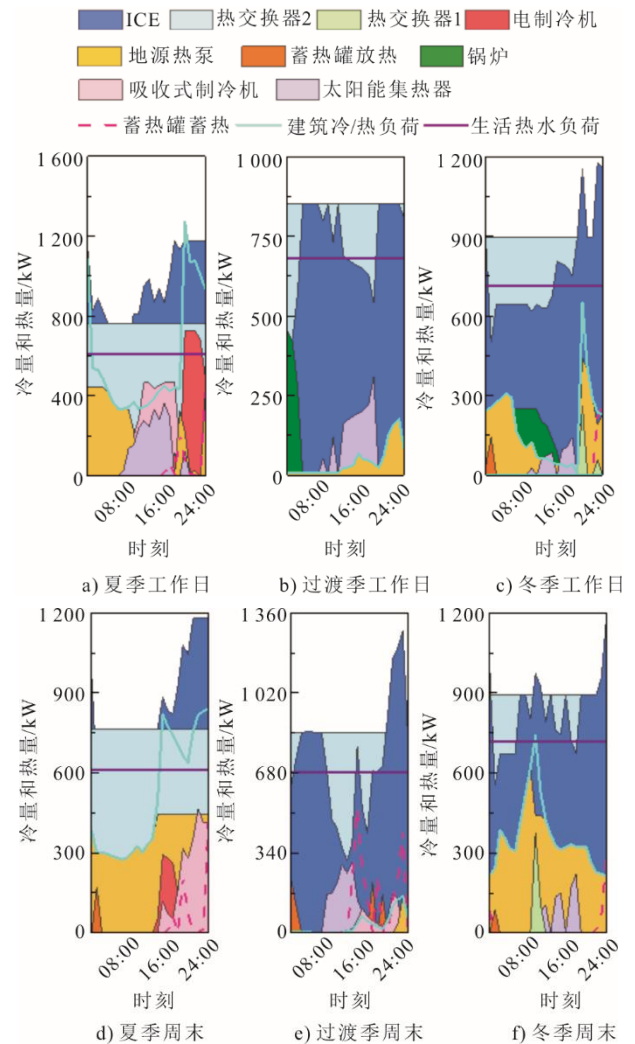
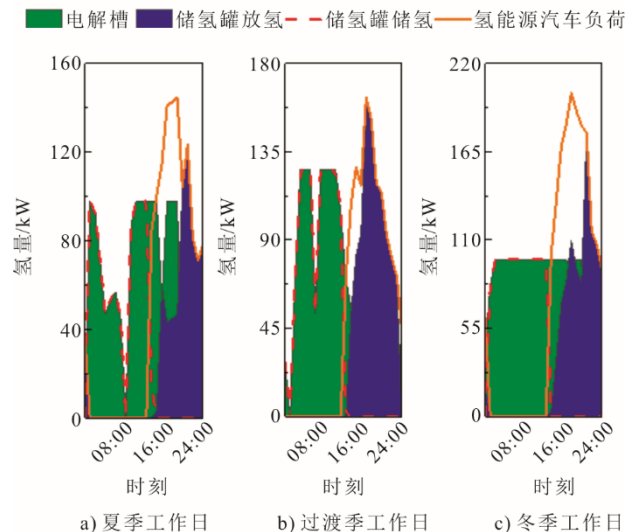


图 9 综合能源系统典型日热力分布
Fig.9 Heating distribution of integrated energy system on typical day



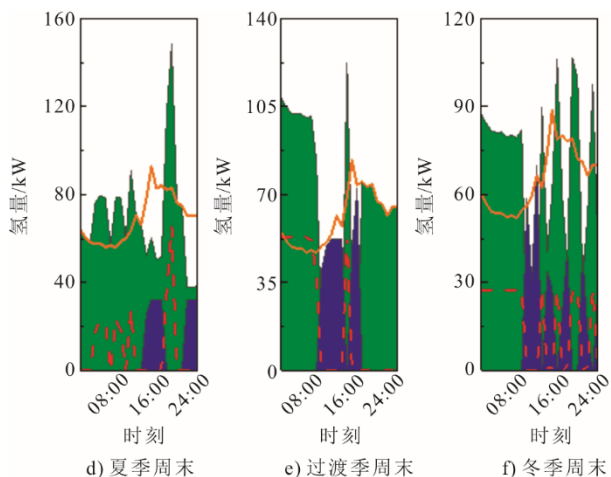


图 10 综合能源系统典型日氢分布

Fig.10 Hydrogen distribution of integrated energy system on typical day

3.5 储能设备容量对系统性能的影响

蓄热罐及储氢罐容量对系统性能的影响分别如图 11 和图 12 所示。

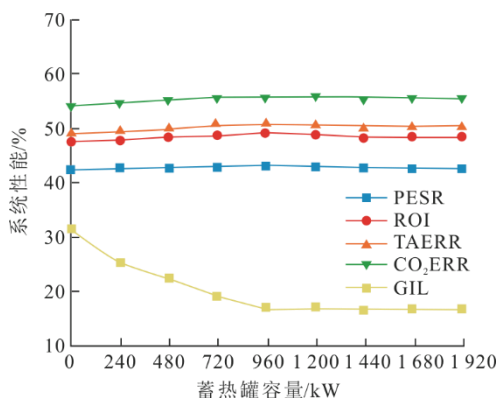


图 11 蓄热罐容量对系统性能影响

Fig.11 Impact of thermal storage tank capacity on system performances

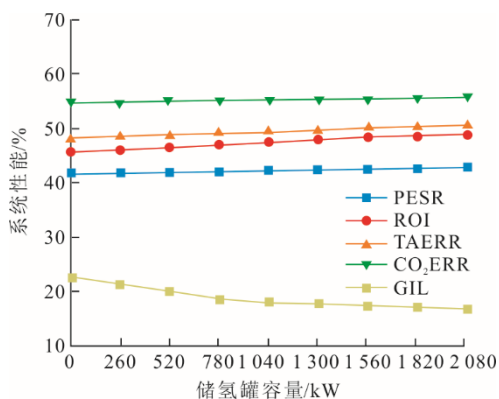


图 12 储氢罐容量对系统性能影响

Fig.12 Impact of hydrogen storage tank capacity on system performances

由图 11 可知，当蓄热罐容量从 0 增加到 951 kW

时，GIL 显著降低，而其他指标略有增加。这是由于蓄热罐容量较低时，难以完全储存多余的热量，从而产生不必要的浪费，随着蓄热罐的容量增加，充分利用余热，减少电制冷机的使用，系统各项性能均有所提升。当蓄热罐容量大于最佳装机容量时，没有多余的热量需要被储存，此时蓄热罐容量增加不再提升系统性能，反而会降低系统的经济效益。

从图 12 可见，当储氢罐容量从 0 增加到 2 103kW 时，TAERR 和 ROI 增长较为明显。这是由于氢需求依靠电解槽制氢来满足，在氢需求不变的情况下，储氢罐的引入可以削峰填谷，降低电解槽的装机容量，提升系统的经济效益。另外，随着储氢罐容量的增加，电解槽可利用建筑电负荷较少时的 ICE 发电量，以减少从电网购买电量，提升系统独立性。

3.6 屋顶光伏面积对系统性能的影响

屋顶光伏面积变化对系统性能影响如图 13 所示。由图 13 可见，随着屋顶光伏面积的增加，GIL 大幅降低，PESR 及 CO₂ERR 分别从 40.07%、50.13% 上升到 42.95%、55.89%，而 TAERR 和 ROI 均呈先上升后下降的趋势。当光伏板及太阳能集热器的设备容量增加时，系统可以利用更多的太阳能，有利于降低系统对电网的依赖，提升系统独立性，且减少一次能源消耗和 CO₂ 排放。但光伏板和太阳能集热器成本较高，大量安装会降低系统经济性，减少系统收益。

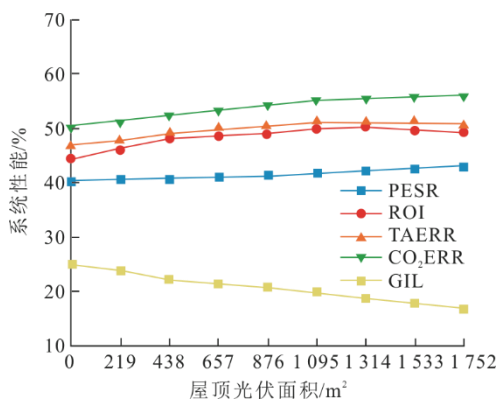


图 13 屋顶光伏面积对系统性能影响

Fig.13 Impact of rooftop PV area on system performances

3.7 不确定性对系统性能的影响

不同不确定预算值下系统性能变化如图 14 所示。由图 14 可见，随着不确定性预算值的增加，系统性能均有不同程度的降低。当不确定性预算值从 0 增加到 5 时，PESR、ROI、TAERR、CO₂ERR 分别降低了 3.48、3.32、2.85、3.58 百分点。当不确定

性预算值从 1 增加到 2 时, 系统性能下降明显, 即电负荷不确定性对系统性能具有较大影响; 而当不确定性预算值从 4 增加到 5 时, 系统性能基本保持不变, 即氢负荷的不确定性对系统的影响程度较小。此外, 随着不确定因素的增加, 尽管系统性能整体下降, 但系统独立性呈现一定波动, 其中电负荷和冷负荷对 GIL 的影响较大。

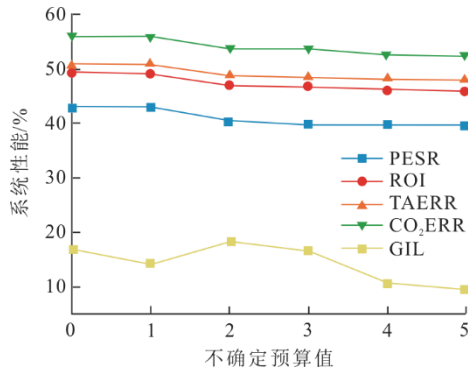


图 14 不同不确定预算值下系统性能

Fig.14 Variations of system performances under different uncertain budget values

4 结 论

1) 提出一种新能源汽车接入的住宅小区综合能源系统优化方案, 综合考虑了系统的能源、经济和环境性能, 构建多目标函数, 利用混合整数线性规划求解最优配置容量。优化后系统一次能源节约率为 42.95%, CO₂ 减排率为 55.89%, 年总成本节约率为 50.82%。

2) 构建太阳能、地热能与天然气互补的综合能源系统, 在兼顾运行可靠性的前提下, 降低系统对电网的依赖程度。本系统由电网输入的电量仅占总电力负荷的 16.93%, 具有较好的独立性。

3) 对比典型日的电、热、氢逐时分布情况可知, 由于车辆的出行行为差异导致工作日和周末的 NEVs 负荷差异明显。建筑负荷随季节波动较大, 利用储能设备可削峰填谷, 提升系统效益和运行灵活性。

4) 在合适范围内增加储能设备和太阳能设备的装机容量, 有利于提升系统性能。电负荷不确定性对系统性能具有较大影响。

[参 考 文 献]

[1] 赵乃新, 顾文波, 美合日阿依·穆太力普. 考虑低碳经济运行的四联供综合能源系统优化调度[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 54-62.
ZHAO Naixin, GU Wenbo, Meihieriyi MUTAILIPU.

Optimal dispatching of electricity-gas-heat-cooling integrated energy system considering low-carbon economy[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 54-62.

[2] 吴福保, 史如新, 桑丙玉, 等. 考虑能量成本和污染排放的综合能源系统优化配置[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 10-17.
WU Fubao, SHI Ruxin, SANG Bingyu, et al. Optimization of integrated energy system considering energy cost and pollution emission[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 10-17.

[3] 降国俊, 崔双喜, 樊小朝, 等. 考虑电转氢气过程及综合需求响应的电-氢-气综合能源系统协调优化运行[J]. 可再生能源, 2021, 39(1): 88-94.
JIANG Guojun, CUI Shuangxi, FAN Xiaochao, et al. Electric-hydrogen-gas integrated energy system considering E2H conversion process and comprehensive demand response coordination and optimization of operation [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(1): 88-94.

[4] 李清涛, 卢钺, 刘洋, 等. 计及电动汽车的有源配电网新能源消纳两阶段调度策略[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 54-62.
LI Qingtao, LU Yue, LIU Yang, et al. Two-stage dispatch strategy for new energy consumption in active distribution network considering electric vehicles[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 54-62.

[5] 徐连兵. 我国氢能源利用前景与发展战略研究[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(9): 1-10.
XU Lianbing. Research on the prospect and development strategy of hydrogen energy in China[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(9): 1-10.

[6] LI S, HE H, ZHAO P. Energy management for hybrid energy storage system in electric vehicle: a cyber-physical system perspective[J]. Energy, 2021, 230: 120890.

[7] ZHOU Y, CAO S, HENSEN J L M, et al. Heuristic battery-protective strategy for energy management of an interactive renewables-buildings-vehicles energy sharing network with high energy flexibility[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 214: 112891.

[8] 姚志力, 江斌开, 龚春阳, 等. 计及电动汽车充电负荷特性的区域多能源站规划设计[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3304-3318.
YAO Zhili, JIANG Binkai, GONG Chunyang, et al. Planning and design of regional multi-energy stations considering electric vehicle charging load characteristics [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3304-3318.

[9] 孟明, 腊志源, 王喜平, 等. 基于光热电站与电动汽车的综合能源系统风电消纳策略[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 42-53.
MENG Ming, LA Zhiyuan, WANG Xiping, et al. Wind power consumption strategy of integrated energy system based on concentrating solar power and electric vehicle[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 42-53.

[10] ZHANG X F, YAN R S, ZENG R, et al. Integrated performance optimization of a biomass-based hybrid hydrogen/thermal energy storage system for building and hydrogen vehicles[J]. Renewable Energy, 2022, 187: 801-818.

[11] BUONOMANO A, CALISE F, CAPPIELLO F L, et al. Dynamic analysis of the integration of electric vehicles in efficient buildings fed by renewables[J]. Applied Energy, 2019, 245: 31-50.

[12] RAMADHANI F, HUSSAIN M A, MOKHLIS H, et al.

- Evaluation of solid oxide fuel cell based polygeneration system in residential areas integrating with electric charging and hydrogen fueling stations for vehicles[J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 1373-1388.
- [13] BASTIDA-MOLINA P, HURTADO-PÉREZ E, MOROS GÓMEZ M C, et al. Multicriteria power generation planning and experimental verification of hybrid renewable energy systems for fast electric vehicle charging stations[J]. *Renewable Energy*, 2021, 179: 737-755.
- [14] SAFFAR A, GHASEMI A. Energy management of a renewable-based isolated micro-grid by optimal utilization of dump loads and plug-in electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 39: 102643.
- [15] 李玲, 曹锦业, NIKITA T, 等. 计及电动汽车接入的区域综合能源系统双层日前协调优化调度[J]. *电力建设*, 2023, 44(5): 23-33.
LI Ling, CAO Jingye, NIKITA T, et al. Bi-level coordinated day-ahead optimal dispatch of regional integrated energy system considering the integrations of electric vehicles[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(5): 23-33.
- [16] 周建力, 乌云娜, 董昊鑫, 等. 计及电动汽车随机充电的风-光-氢综合能源系统优化规划[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(24): 30-40.
ZHOU Jianli, WU Yunna, DONG Haoxin, et al. Optimal planning of wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system considering random charging of electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power System*, 2021, 45(24): 30-40.
- [17] WANG J, SUI J, JIN H. An improved operation strategy of combined cooling heating and power system following electrical load[J]. *Energy*, 2015, 85: 654-66.
- [18] 杜传铭, 陈孟石, 杜尚斌, 等. 光-气互补冷热电联供系统容量配置与运行研究[J]. *动力工程学报*, 2022, 42(1): 83-93.
DU Chuanming, CHEN Mengshi, DU Shangbin, et al. Study on capacity configuration and operation of hybrid CCHP system[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(1): 83-93.
- [19] 肖秋瑶, 杨骥, 宋政湘. 考虑碳交易和电动汽车充电负荷的工业园区综合能源系统调度策略[J]. *高电压技术*, 2023, 49(4): 1392-1401.
XIAO Qiuyao, YANG Kun, SONG Zhengxiang. Scheduling strategy of industrial parks integrated energy system considering carbon trading and electric vehicle charging load[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(4): 1392-1401.
- [20] 杜永峰. 计及风光不确定性的电气热综合能源系统日前区间优化[J]. *热力发电*, 2022, 51(2): 85-91.
DU Yongfeng. Day-ahead interval optimization of electricity-gas-heat integrated energy system considering uncertainty of wind and PV[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(2): 85-91.
- [21] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(14): 4013-4022.
LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(14): 4013-4022.
- [22] YAN R, WANG J, WANG J, et al. A two-stage stochastic-robust optimization for a hybrid renewable energy CCHP system considering multiple scenario-interval uncertainties[J]. *Energy*, 2022, 247: 123498.
- [23] FAN M, LU S. Benefit analysis and preliminary decision-making of electrical and thermal energy storage in the regional integrated energy system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105816.
- [24] AYYADI S, BILIL H, MAAROUFI M. Optimal charging of Electric Vehicles in residential area[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2019, 19: 100240.
- [25] LIU J, CAO S, CHEN X, et al. Energy planning of renewable applications in high-rise residential buildings integrating battery and hydrogen vehicle storage[J]. *Applied Energy*, 2021, 281: 116038.
- [26] ZHOU Y, WANG J J, LIU Y, et al. Incorporating deep learning of load predictions to enhance the optimal active energy management of combined cooling, heating and power system[J]. *Energy*, 2021, 233: 121134.
- [27] ZENG R, ZHANG XF, DENG Y, et al. An off-design model to optimize CCHP-GSHP system considering carbon tax[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 189: 105-117.

(责任编辑 杨嘉蕾)