

基于需求响应与 Stackelberg 博弈的 小区综合能源系统优化调度

侯朗博, 孙昊, 陈衡*, 高悦

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Optimization Scheduling of Integrated Energy Systems in Communities Based on Demand Response and Stackelberg Game

HOU Langbo, SUN Hao, CHEN Heng*, GAO Yue

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

摘要:【目的】随着需求侧响应资源的不断增长,传统的能源调度模式难以满足新能源大量接入的系统需求。为实现小区内多种能源的合理调配,提出了一种基于用户需求响应的能源交易策略,旨在优化智能小区内能源的调度。【方法】针对含多栋楼宇的居民小区,对其中的分布式光伏、储能设备和柔性负荷进行统一调配,并根据小区运营商和用户负荷聚合商的定价交互,采用 Stackelberg 博弈建立两阶段调度优化模型。【结果】算例仿真模拟结果显示,相比传统的以热定电策略,所提模型可以降低 40.22% 的运行成本,提高 22.57% 的光伏消纳水平;相比传统的最优运行成本策略,所提模型可以降低 29.66% 的运行成本,提高 6.78% 的光伏消纳水平。【结论】所设计的策略在实现公平利益分配、缓解电力波动、灵活应对调度高峰需求、加强新能源整合及确保电网运行安全方面具有良好效果。

关键词: 可再生能源; 综合能源系统; 需求侧响应; Stackelberg 博弈; 能源交易; 调度策略; 智能小区; 功率互济

ABSTRACT: [Objectives] With the continuous growth of demand-side response resources, traditional energy scheduling models struggle to meet the system requirements of high penetration levels of renewable energy. To achieve the rational allocation of multiple energy sources within a community, this study proposes an energy trading strategy based on demand-side response from users, aiming to optimize energy

scheduling in smart community. [Methods] For a residential community with multiple buildings, this study coordinates distributed photovoltaics, energy storage systems, and flexible loads. A two-stage scheduling optimization model is established using the Stackelberg game framework based on pricing interactions between community operators and user load aggregators. [Results] Simulation results show that, compared to the traditional heat-determined power strategy, the proposed model reduces operational costs by 40.22% and increases photovoltaic utilization by 22.57%. Compared to the conventional cost-optimal operation strategy, the proposed model results in a 29.66% reduction in operational costs and a 6.78% increase in photovoltaic utilization. [Conclusions] The proposed strategy demonstrates excellent performance in achieving equitable benefit distribution, mitigating power fluctuations, flexibly meeting peak-load demands, enhancing renewable energy integration, and ensuring grid operational security.

KEY WORDS: renewable energy; integrated energy system; demand-side response; Stackelberg game; energy trading; scheduling strategy; smart community; power mutual support

0 引言

近年来,随着“双碳”政策的提出,可再生能源成为了中国未来能源发展关注的重点,如何高效利用可再生能源是实现能源转型需要解决的关键问题^[1-5]。高比例的清洁能源并网使能源供应系统与用户建立起了密切的联系,但对系统调度也有了更高的要求^[6-11]。通过研究机组出力与需求

基金项目: 国家自然科学基金项目(52276006)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52276006).

侧响应之间的负荷分配方式，进而实现系统的最优运行，对于分布式能源小区系统具有重要的现实意义^[12-15]。

为了更好地构建用户与负荷供应商之间的联系，负荷聚合商整合了用户的需求响应资源，对能源价格进行短时响应，推进了能源市场配售分离的进程^[16-17]。为应对需求侧响应的系统调度问题，王秀慧等^[18]建立了综合能源系统、用户和负荷聚合商三者的双层主从博弈优化模型，在不同场景下对系统的运行策略进行了分析，结果显示，所提模型可以显著地提高整体经济效益。朱永灿等^[19]对工业用户负荷模型进行了评估，引导用户参与需求响应，提高了工业用户调峰收益。陈彦奇等^[20]将阶梯碳交易机制纳入考虑范围，建立了低碳经济优化调度模型，该模型考虑了碳价对综合能源系统调度的影响，满足了用户的多元负荷需求。梅文卿等^[21]提出基于价格激励的需求侧响应方法，使负荷聚合商得以参与市场投标，进而实现各方利益的最大化。文献[22-24]通过对综合能源系统形成智能调控，使得各区域的智能系统相互联系，从而减轻了中央控制系统的压力，为智能电网的构建贡献力量。上述这些基于需求响应的优化调度方法主要针对单一指标进行优化，优化目标集中在运行效益方面，而忽略了系统运行的安全性、环保性等方面。

对于含储能装置的综合能源系统的电热联合优化调度，考虑到其涉及多主体多目标，因此需要对原有的优化调度算法进行改进。朱浩昊等^[25]通过Benders分解计算出最佳能流，再根据纳什议价实现激励相容。Lu等^[26]利用交替方向乘子法实现了热电联合调度。李咸善等^[27]采用遗传算法求解考虑氢耦合的电能交易双层博弈模型，解决了电-气、电-热系统经济性与鲁棒性协同优化问题。丁衡等^[28]将改进的灰狼算法应用到热电联供机组中，完成热电负荷分配。杨畅等^[29]使用双步投影算法求解多区域互联的综合能源系统3层协调调度模型，降低了相应的调度成本。王晓鹰等^[30]基于原有的启发式算法，利用非支配排序遗传II型算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)对孤岛综合能源系统进行了多目标寻优。上述这

些算法主要针对综合能源系统中分布式电源的出力情况，对能源供应的经济性指标进行了优化，但并未充分考虑系统实际运行中的源荷匹配与协同优化问题。通过促进分布式能源与储能的协同，并有效利用系统中不同资源主体的关联协同，能够兼顾运行过程中的不同指标。在分布式能源小区中，需求侧响应对于实现智能电网“源、网、荷、储”一体化调控发挥着重要作用^[31-33]，而发展楼宇的能量优化调度已成为实现需求侧响应的一个重要手段^[34-37]。

本文以智能小区的综合能源系统及其楼宇用户为研究对象，提出基于Stackelberg博弈的优化调度模型，在智能小区内设置能源定价机制，激励用户侧的需求响应，利用分布式能源与储能的协同作用，促进楼宇间的能量交互，减小运行过程中不平衡量对系统造成的影响，实现了系统的多维优化，并通过算例验证了本文所提模型的有效性。

1 智能小区系统架构与能量管理

图1为智能小区综合能源系统的架构，在该系统内，电能与热能通过独立网络传输至楼宇。电网与楼宇、楼宇与楼宇间通过公共连接点实现能量交换^[38]。虽然该系统不同设备间信息交换与传输方式存在差异，但可以在小区中进行统一的优化安排，以便于进行能量的相互转化。小区运营商在制定调度计划时，与电力市场和气象中心进行信息交换，通过调度指令影响小区下属楼宇之间的电功率流动。楼宇负荷聚合商通过聚合用

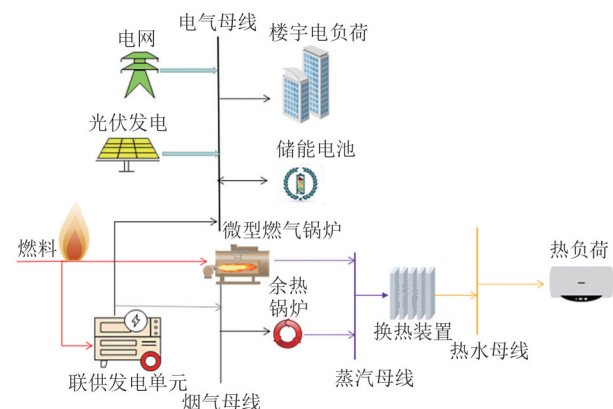


图1 智能小区综合能源系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of integrated energy system in smart community

户负荷来参与电力系统决策。储能系统是实现能量交换和功率互济的一个重要媒介，可缓解可再生能源接入带来的不确定性。同时，利用储能还可以有效平抑负荷峰谷并从电价的波动中获取收益。楼宇配备光伏装置，既可满足用户负荷需求，又可参与调峰。负荷聚合商将可控负荷作为需求侧响应的调节对象。图2展示了系统的能源交易网络。

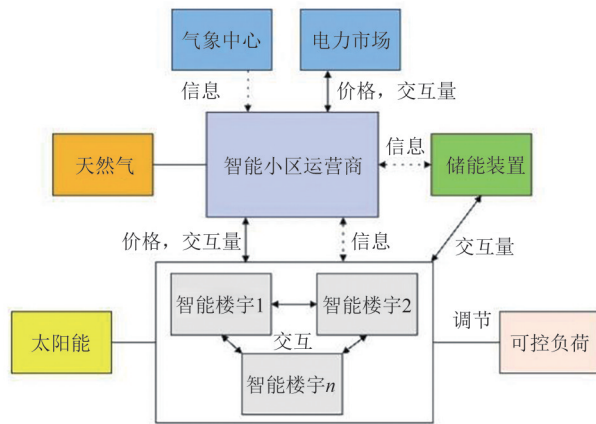


图2 系统能源交易网络图

Fig. 2 System energy trading network

2 智能小区能源交易模型

2.1 运营商模型

小区在与楼宇交互功率的同时，还可以从上级电网购电获取电能。小区运营商通过设置电价和热价，促使楼宇负荷聚合商以运行效益最优为目标进行功率交互。同时，小区运营商从配电网购售能源，以保证能量平衡。

电能交易收益 E_{SC}^e 的计算式为

$$E_{SC}^e = \sum_{t=1}^{24} (E_{SC,t}^{g,s} - E_{SC,t}^{g,b} + E_{SC,t}^{b,c}) = \sum_{t=1}^{24} [\lambda_{grid,t}^{e,s} \cdot \max(L_t^{b,c} - P_t^{MT,e}, 0) - \lambda_{grid,t}^{e,b} \cdot \min(L_t^{b,c} - P_t^{MT,e}, 0) + \lambda_{SC,t}^e \cdot \max(L_t^{b,c}, 0)] \quad (1)$$

式中： $E_{SC,t}^{g,s}$ 和 $E_{SC,t}^{g,b}$ 分别为 t 时刻内小区与上级电网的卖电收益和购电成本； $E_{SC,t}^{b,c}$ 为 t 时刻内小区向楼宇用户供电收益； $\lambda_{grid,t}^{e,s}$ 和 $\lambda_{grid,t}^{e,b}$ 分别为 t 时刻电网售电和购电的电价； $\lambda_{SC,t}^e$ 为 t 时刻小区制定的电价； $L_t^{b,c}$ 为楼宇负荷聚合商在 1 d 内 t 时刻的净电负荷； $P_t^{MT,e}$ 为微型燃气轮机在 t 时刻输出功率。

热能交易收益 E_{SC}^h 的计算式为

$$E_{SC}^h = \sum_{t=1}^{24} E_{SC,t}^{b,h} = \sum_{t=1}^{24} \varepsilon_{MT}^h L_t^{b,h} \lambda_{SC,t}^h \quad (2)$$

式中： ε_{MT}^h 为微型燃气锅炉制热功率所占制热比重； $L_t^{b,h}$ 为楼宇负荷聚合商在 t 时刻的热负荷； $\lambda_{SC,t}^h$ 为小区制定热价； $E_{SC,t}^{b,h}$ 为 t 时刻小区向楼宇用户的供热收益。

系统经济性目标函数 E_{SC} 为

$$E_{SC} = \sum_{t=1}^{24} (E_{SC,t}^{g,s} - E_{SC,t}^{g,b} + E_{SC,t}^{b,c} + E_{SC,t}^{b,h} - E_{MT,t}) \quad (3)$$

式中 $E_{MT,t}$ 为 t 时刻小区的燃气成本。

小区优化模型的约束条件主要包括配电网线路功率容量约束、节点电压约束、潮流约束等常规约束，具体如下。

1) 功率容量约束表达式如下：

$$0 \leq P_i \leq P_{PV} \quad (4)$$

$$S_i \leq S_{i,max} \quad (5)$$

式中： P_i 为节点 i 处的有功功率； P_{PV} 为光伏最大输出功率； S_i 为支路传输功率； $S_{i,max}$ 为支路传输功率的最大容量。

2) 节点电压约束表达式如下：

$$U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max} \quad (6)$$

式中： U_i 为节点 i 的电压； $U_{i,min}$ 和 $U_{i,max}$ 分别为节点 i 处电压的最小值和最大值。

3) 潮流分布约束表达式如下：

$$P_i + P_{Gi} = P_{Li} + U_{Li} \sum_{i=1}^N U_i Y \quad (7)$$

$$Q_i + Q_{Gi} = Q_{Li} + U_{Li} \sum_{i=1}^N U_i Y \quad (8)$$

式中： Q_i 为节点 i 处的无功功率； P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别为节点 i 处注入的有功、无功功率； P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为节点 i 处负荷的有功、无功功率； U_{Li} 为节点 i 处负荷的电压； Y 为支路导纳； N 为节点数。

2.2 分布式电源模型

智能小区中的分布式电源主要为微型燃气轮机和楼宇光伏发电，在调度过程中需要考虑分布式电源不同的出力特性。微型燃气轮机由小区运营商控制，通过消耗天然气满足一定的电负荷和热负荷需求。微型燃气轮机在 t 时刻燃气成本与输出功率的关系为

$$E_{MT,t} = C_g \frac{P_t^{MT,e}}{\eta_{MT}} \quad (9)$$

式中： C_g 为天然气单位热值价格，元/(kW·h)； η_{MT} 为微型燃气轮机发电效率。

微型燃气轮机在 t 时刻的电、热出力关系可表示为

$$P_t^{MT,h} = \frac{1 - \eta_{MT} - \eta_{MT}^{loss}}{\eta_{MT}} p_h P_t^{MT,e} \quad (10)$$

式中： $P_t^{MT,h}$ 为 t 时刻微型燃气轮机制热功率； η_{MT}^{loss} 为散热损失率； p_h 为制热系数。

微型燃气轮机的碳排放模型表达式如下：

$$\varepsilon_m = \frac{(a_m P_m^{MT,e} + b_m P_m^{MT,e} + c_m) h_m}{P_m^{MT,e}} \quad (11)$$

$$Q_{MT,m} = \eta_m k_m (1 - \delta_m) \frac{M_{CO_2}}{M_C} \varepsilon_m \quad (12)$$

式中： ε_m 为第 m 台微型燃气轮机的单位电能消耗燃料量； a_m 、 b_m 和 c_m 均为特性参数； h_m 为修正系数； $Q_{MT,m}$ 为第 m 台微型燃气轮机机组的碳排放强度； η_m 和 k_m 分别为第 m 台机组燃料的含碳率与碳氧化率； δ_m 为碳捕集率； M_{CO_2} 和 M_C 分别为二氧化碳与碳的摩尔质量； $P_m^{MT,e}$ 为微型燃气轮机发电功率。

2.3 储能装置模型

储能根据电价进行充放电交易，在系统中起到调峰的作用。在本系统中，使用储能装置使楼宇负荷聚合商能够根据能源价格的波动进行充放电。通过储能装置获得的收益 E^{ESS} 可表示为

$$E^{ESS} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n [(P_{i,t}^{charge} + P_{i,t}^{discharge}) \lambda_t^{ESS} - \lambda_c P_{i,t}^{charge} - \lambda_d P_{i,t}^{discharge}] \quad (13)$$

式中： $P_{i,t}^{charge}$ 和 $P_{i,t}^{discharge}$ 分别为楼宇 i 在 t 时刻使用储能的充、放电功率； λ_t^{ESS} 为 t 时刻充放电价格； λ_c 和 λ_d 分别为充、放电成本系数； n 为楼宇数量。

储能系统的电量状态可表示为

$$C_t^{ESS} = C_{t-1}^{ESS} + \sum_{i=1}^n (\eta_{charge}^{ESS} P_{i,t}^{charge} - \frac{P_{i,t}^{discharge}}{\eta_{discharge}^{ESS}}) \Delta t \quad (14)$$

式中： C_{t-1}^{ESS} 和 C_t^{ESS} 分别为 $t-1$ 、 t 时刻储能系统的电量状态； η_{charge}^{ESS} 和 $\eta_{discharge}^{ESS}$ 分别为储能充、放电效率。

储能系统还需满足以下约束：

$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n (\eta_{charge}^{ESS} P_{i,t}^{charge} - \frac{P_{i,t}^{discharge}}{\eta_{discharge}^{ESS}}) = 0 \quad (15)$$

$$C_{min}^{ESS} < C_t^{ESS} < C_{max}^{ESS} \quad (16)$$

$$0 < P_{i,t}^{charge} < P_{max}^{charge} \quad (17)$$

$$0 < P_{i,t}^{discharge} < P_{max}^{discharge} \quad (18)$$

式中： C_{max}^{ESS} 和 C_{min}^{ESS} 分别为储能最大电量和最小电量； P_{max}^{charge} 和 $P_{max}^{discharge}$ 分别为最大充电功率和最大放电功率。

2.4 用户负荷模型

用户主要通过从小区运营商购热和自身使用电制热设备2种途径满足热负荷需求，其中电制热设备模型为

$$L_{EH} = L^{b,heat} \eta_{EH} \quad (19)$$

式中： L_{EH} 为用户使用电制热设备满足的热负荷； $L^{b,heat}$ 为电制热设备所消耗的电功率； η_{EH} 为电制热设备制热效率。

由于小区向楼宇出售的电热能源价格是可调的，与用户间电价和热价的博弈结果会使楼宇负荷聚合商选择的供能方式发生改变，因此自身获得的收益也会随之变化。楼宇负荷聚合商的优化目标包括平抑负荷和收益最大。

楼宇用户电负荷均方差最小的目标函数^[39]如下：

$$J_i = \sum_{t=1}^{24} (L_{i,t}^{b,c} + L_{i,t}^{co,in} - L_{i,t}^{co,out} - L_i^{ave})^2 \quad (20)$$

$$L_i^{ave} = \frac{\sum_{t=1}^{24} (L_{i,t}^{b,c} + L_{i,t}^{co,in} - L_{i,t}^{co,out})}{24} \quad (21)$$

式中： J_i 为楼宇 i 使用储能后的净电负荷均方差； $L_{i,t}^{b,c}$ 为楼宇 i 在 t 时刻的净电负荷功率； $L_{i,t}^{co,in}$ 和 $L_{i,t}^{co,out}$ 为从其他楼宇转入楼宇 i 的电负荷和从楼宇 i 转入其他楼宇的电负荷； L_i^{ave} 为楼宇 i 等效负荷的平均值。

对于楼宇用户而言，楼宇 i 的用户在 t 时刻的净电负荷功率为

$$L_{i,t}^{b,c} = L_{i,t}^{b,e} - P_{i,t}^{charge} + P_{i,t}^{discharge} + L_{i,t}^{b,heat} \quad (22)$$

式中： $L_{i,t}^{b,e}$ 为楼宇 i 在 t 时刻经过调整后的电负荷； $L_{i,t}^{b,heat}$ 为楼宇 i 在 t 时刻的制热所需的电功率。

楼宇用户电负荷分为可调节的柔性电负荷和不可调节的刚性电负荷，柔性电负荷的供电时间可根据电价调整。楼宇 i 的用户在 t 时刻调整后的电负荷为

$$L_{i,t}^{b,e} = L_{i,t}^{b,f} + L_{i,t}^{b,s} + \Delta L_{i,t}^{b,s} \quad (23)$$

式中： $L_{i,t}^{b,f}$ 和 $L_{i,t}^{b,s}$ 分别为楼宇*i*在*t*时刻的刚性、柔性电负荷； $\Delta L_{i,t}^{b,s}$ 为楼宇*i*在*t*时刻的柔性电负荷调整量。

同时，楼宇间可以通过公共母线交互电功率，提高运行的灵活性。楼宇间交互功率不仅需满足式(7)–(8)的潮流约束，还需满足：

$$0 \leq P_{i-n,t}^{co} \leq L_{i,t}^{co,max} \quad (24)$$

式中： $P_{i-n,t}^{co}$ 为楼宇*i*在*t*时刻与其他任意楼宇的交互功率； $L_{i,t}^{co,max}$ 为楼宇*i*在*t*时刻交互电量的最大值。

此外，楼宇用户的热负荷也是灵活可调的，因此有：

$$L_{i,t}^h = L_{i,t}^{b,h} + \Delta L_{i,t}^{b,h} = \varepsilon_{MT}^h L_{i,t}^{b,h} + L_{i,t}^{EH} + \Delta L_{i,t}^{b,h} \quad (25)$$

式中： $L_{i,t}^h$ 为楼宇*i*在*t*时刻的原有热负荷； $\Delta L_{i,t}^{b,h}$ 为楼宇*i*在*t*时刻热负荷的调整量； $L_{i,t}^{EH}$ 为楼宇*i*在*t*时刻的电制热功率。

楼宇的负荷需满足以下约束条件：

$$\frac{|\Delta L_{i,t}^{b,s}|}{L_{i,t}^{b,f} + L_{i,t}^{b,s}} < \mu \quad (26)$$

$$\sum_{t=1}^{24} |\Delta L_{i,t}^{b,s}| = k \sum_{t=1}^{24} (L_{i,t}^{b,f} + L_{i,t}^{b,s}) \quad (27)$$

$$\sum_{t=1}^{24} \Delta L_{i,t}^{b,s} = 0 \quad (28)$$

式中 μ 和 k 分别为每时段电负荷的可调整比例和电负荷调整总占比，均体现了负荷的调节能力。

楼宇负荷聚合商经济最优的目标函数 E_{user} 为

$$E_{user} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} (E_{i,t}^{ut} - E_{SC,i,t}^{b,e} - E_{SC,i,t}^{b,h} - E_{i,t}^{sl}) \quad (29)$$

式中： $E_{i,t}^{ut}$ 为楼宇*i*在*t*时刻的用电效用； $E_{i,t}^{sl}$ 为楼宇*i*在*t*时刻的满意度损失； $E_{SC,i,t}^{b,e}$ 为*t*时刻小区向楼宇*i*用户的供电收益； $E_{SC,i,t}^{b,h}$ 为*t*时刻小区向楼宇*i*用户的供热收益。

用电效用表达式为

$$E_{i,t}^{ut} = a(L_{i,t}^{b,e})^2 + b(L_{i,t}^{b,e}) + c \quad (30)$$

式中 a 、 b 、 c 均为用电效用参数。

满意度损失表达式为

$$E_{i,t}^{sl} = \gamma(\Delta L_{i,t}^{b,s})^2 \quad (31)$$

式中： γ 为满意度损失参数； $\Delta L_{i,t}^{b,s}$ 为楼宇*i*在*t*时刻的负荷调整量。

3 基于Stackelberg博弈的优化调度模型

3.1 小区与楼宇用户的博弈调度框架

为了解决小区综合能源系统中能源交易问题，采用Stackelberg博弈模型模拟含多个楼宇的小区调度。小区运营商和各楼宇组成的楼宇负荷聚合商为博弈对象，小区运营商在系统中制定了电价和热价，是博弈优化调度的领导者主体，而楼宇负荷聚合商为博弈的跟随者从体。该Stackelberg博弈的组成元素包括：小区运营商 S_{sc} 与楼宇集合 d ；小区运营商制定的电价集合 λ_{sc}^e 与热价集合 λ_{sc}^h ；小区中微型燃气轮机的出力集合 $P^{MT,e}$ ；楼宇负荷聚合商调整的电负荷聚合 $\Delta L^{b,s}$ 和热负荷聚合 $\Delta L^{b,h}$ ；楼宇负荷聚合商的收益 E_{user} ；各楼宇用户净电负荷均方差 J ；储能运行的电量状态集合 C_{SOC}^{ESS} ；储能收益 E_{sc} ；系统二氧化碳排放量 Q^{RC} 。博弈双方的目标均是使自身效益最大化，博弈模型 G 可表示为

$$G = \left\{ (S_{sc} \cup d); \lambda_{sc}^e; \lambda_{sc}^h; P^{MT,e}; \Delta L^{b,s}; \Delta L^{b,h}; C_{SOC}^{ESS}; E_{sc}; Q^{RC}; J; E_{user} \right\} \quad (32)$$

在Stackelberg博弈中，小区运营商为主体，当博弈各方无法通过单方面改变策略增加自身收益时，即达到Stackelberg均衡。当博弈元素满足特定条件并使优化目标达到最优时，小区运营商、共享储能运营商与楼宇用户负荷聚合商即达成Stackelberg均衡，满足优化要求。

3.2 两阶段优化调度模型

为了满足含共享储能的小区综合能源系统对经济、能效和环保的相关要求，需要对共享储能和楼宇进行两阶段的调度，进而获取每个时段储能的充放电信息和各楼宇功率交互信息。从体各楼宇间通过有效互联，共同使整体效益最大化。系统第1阶段先对储能系统进行充放电功率的调度，并根据各楼宇的用电计划制定自身的充放电策略；第2阶段再对多楼宇的运行进行调度，各楼宇在协同自律的运行模式下进行功率互济，各楼宇功率的不平衡量可以通过互联传输进行平抑，促进了可再生能源的消纳。

3.3 模型求解

使用双层优化算法，可以减小博弈双方之间决策变量的耦合性，更好地求解博弈变量。具体

而言，上层算法主要通过随机生成小区制定的电价和热价，将相应参数及计算结果发布给楼宇负荷聚合商；同时，利用下层算法进行优化求解，寻求最优决策，并将相应信息回传给上层算法。本文采用遗传算法嵌套 CPLEX 求解器对博弈模型进行求解，计算流程如下：

- 1) 初始化系统参数，并设置遗传算法参数；
- 2) 随机生成小区交易电价与热价；
- 3) 将相关参数信息传递给楼宇用户负荷聚合商；
- 4) 负荷聚合商接收信息，进行优化决策，通

过 CPLEX 求解器进行计算并保留优化结果；

- 5) 将各楼宇决策后的信息传递给小区运营商；

6) 如果遗传算法选择出最优的调度策略，输出此时的电价与热价，否则，返回步骤4)。

4 算例分析

对某小区进行算例分析，该小区含3个楼宇，均为用户住宅，位于同一区域，且彼此之间有输电线路相连。此外，每个楼宇都装有相同的光伏发电装置。该小区的网络结构如图3所示。

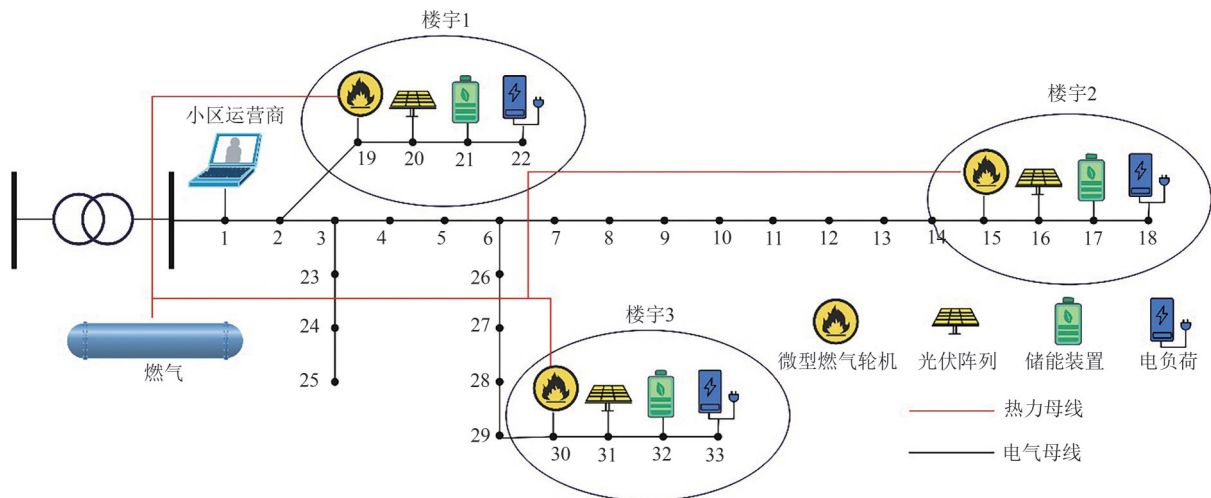


图3 含3个楼宇接入的小区网络结构图

Fig. 3 Diagram of community network structure with three connected buildings

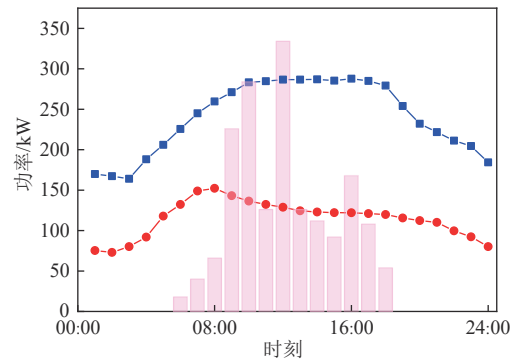
在该小区中，阶梯电价参考文献[40]设置，设备相关参数如表1所示。3个楼宇的初始电热负荷和预测的光伏发电功率如图4所示。

针对上述小区，本文分别采用了3种不同的策略对系统进行调度优化：

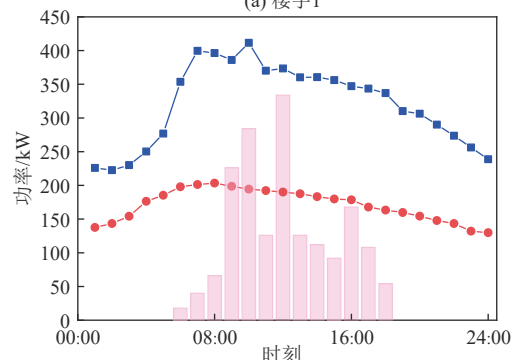
表1 系统设备相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of system equipment

参数	数值
天然气单位热值价格/[元/(kW·h)]	0.25
微型燃气轮机容量/kW	100
微型燃气轮机散热损失率	0.05
微型燃气轮机制热系数	0.92
微型燃气轮机发电效率	0.37
储能电池最大充电率	0.20
储能电池最大放电率	0.40
储能电池充放电效率	0.95
储能电池容量/(kW·h)	240



(a) 楼宇1



(b) 楼宇2

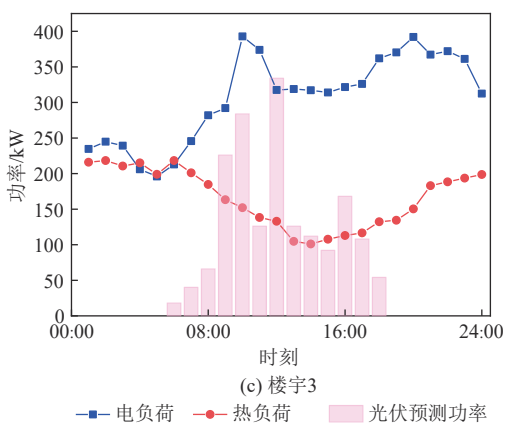


图4 楼宇初始电、热负荷以及光伏预测功率

Fig. 4 Initial electrical and thermal loads and photovoltaic forecast power of buildings

1) 策略1为传统的以热定电的运行策略。通过供热负荷的大小确定各部分出力。

2) 策略2为运营成本最优的运行策略。在满足用户用能需求的前提下，通过最小化运营成本选择经济性最优的出力方式。

3) 策略3为本文所提策略。通过小区运营商为负荷聚合商制定电价与热价，激发楼宇用户需求侧响应并平抑负荷，优化自身用能策略，且各楼宇之间进行功率互济。

策略1是传统的以热定电方案，不会调整用户负荷，储能系统在低谷期充电，高峰期放电，而且没有小区运营商制定电价与热价，各楼宇之间不进行功率互济。此时的小区仅起到楼宇与上级电网之间的连接作用，将上级电网的电功率以市场电价卖给楼宇用户。因此，在计算系统经济性时，可把小区与用户当作一个整体，只计算发电成本、向上级电网购电的成本和向上级电网卖电的收益。该策略优先使用微型燃气轮机的制热功率来满足各楼宇的热负荷需求，当微型燃气轮机产生的电力无法满足电负荷需求时，需要通过小区上网购电并传输给各楼宇。该调度策略下楼宇1的电负荷供应情况如图5所示。

策略2是在策略1的基础上延伸出的，是系统以经济最优为目标的调度策略。该策略摒弃了以热定电的运行模式，而是遵循运行的经济性。在满足用户各方面负荷的基础上，选择运行成本最低的出力方式，即比较微型燃气轮机

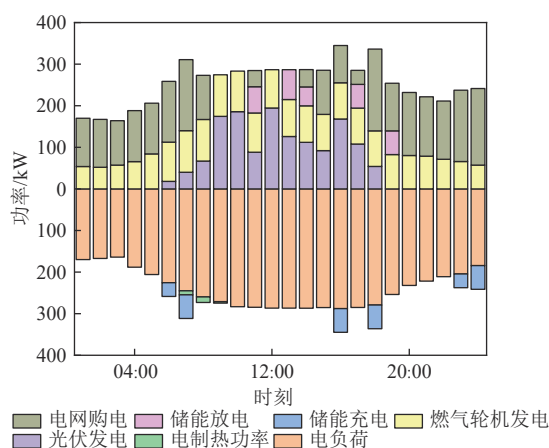


图5 策略1的功率分配情况

Fig. 5 Power distribution under strategy 1

与上网购电的经济性和微型燃气轮机与电制热的经济性，在约束条件内进行经济最优的调度。若微型燃气轮机发电功率与负荷不匹配，用户侧将无法根据价格的变化进行需求侧响应。该调度策略下楼宇1的电负荷供应情况如图6所示。

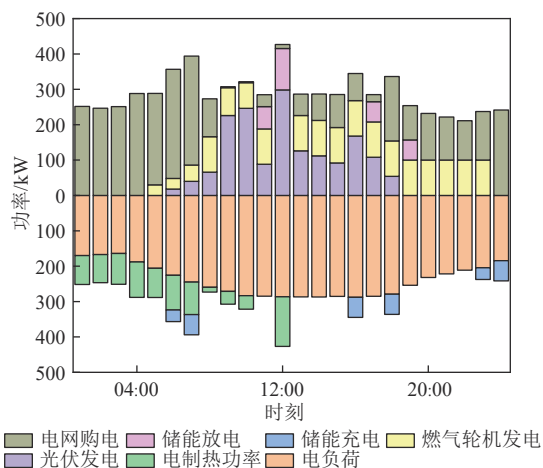


图6 策略2的功率分配情况

Fig. 6 Power distribution under strategy 2

策略3为本文研究的策略。该策略基于智能小区制定电价与热价，考虑了负荷侧的需求响应，对电热调节的灵活性有了较好的提升。同时，针对各方博弈的优化策略也可以实现智能小区运营商与用户的合作共赢。与策略1和策略2不同的是，小区运营商制定了变化的电价与热价，负荷聚合商可据此调整用户各时段的电负荷，并适当削减热负荷；此外，在楼宇间也可进行功率的传递，实现功率互济。制定的电价与热价如图7所

示。在经过两阶段优化调度后，楼宇1电负荷供应情况如图8所示。

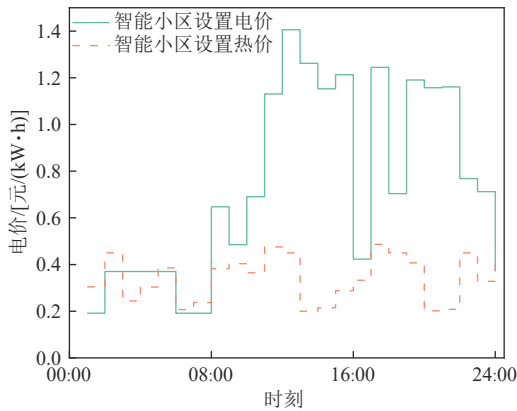


图7 小区运营商制定的电价与热价

Fig. 7 Electricity and heat prices set by community operators

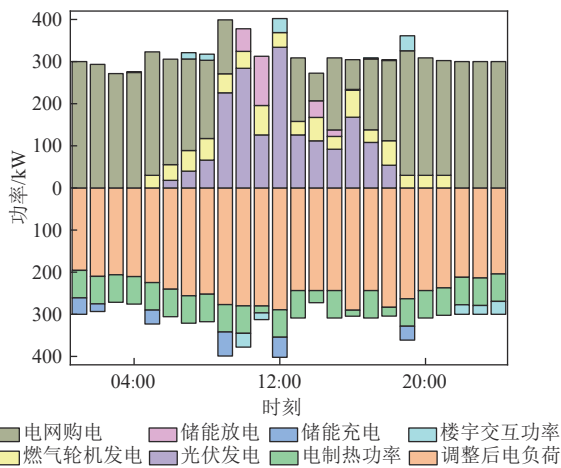


图8 策略3的功率分配情况

Fig. 8 Power distribution under strategy 3

在各调度策略下，3个楼宇的功率分配方面表现相似，但楼宇1光伏实际发电功率差异性相对较大，故选择楼宇1的功率分配情况进行对比分析。在光伏发电功率最大时，相比策略1和策略2，策略3光伏消纳水平分别提高了41.75%和11.89%，体现了本文所提策略在促进光伏消纳方面的作用。

3种调度策略都满足了楼宇用户的电热需求，但策略1和策略2缺乏需求响应对用户负荷的引导，在电价高峰时段仍保持原负荷，导致其在峰时负荷显著高于策略3。楼宇1峰时负荷差距达15.01%，楼宇2和楼宇3峰时负荷差距分别为11.22%和10.68%。这些均表现出策略3进行需求响应后在削峰填谷方面的优势作用。在运行费用方面，相比策

略1和策略2，在楼宇1中运用策略3可分别降低20.21%和19.91%；在楼宇2中可分别降低50.03%和45.18%；在楼宇3中可分别降低41.42%和28.08%。因此，通过本文所提的方法模型进行优化后，可以有效降低运行成本，提高经济性。

对含3个楼宇的小区运用3种调度策略的运行费用、碳排放量、净电负荷均方差、一次能源利用率和光伏消纳量进行计算并对比分析后，可以得出不同策略在经济性、环保性和安全性等方面的优劣。与策略1和策略2相比，在经济性方面，策略3的运行成本分别降低了40.22%和29.66%，使利益分配更加合理；在安全性方面，策略3的净电负荷均方差分别降低了80.89%和86.27%，使运行调度更加平稳；在新能源利用方面，策略3的光伏消纳水平分别提高了22.57%和6.78%，使新能源整合更加有效。图9为绘制的3种策略结果对比雷达图，可知，除碳排放量以外，策略3在其他各方面面积均最大，即表现优于其他策略，验证了本文所提模型的有效性。

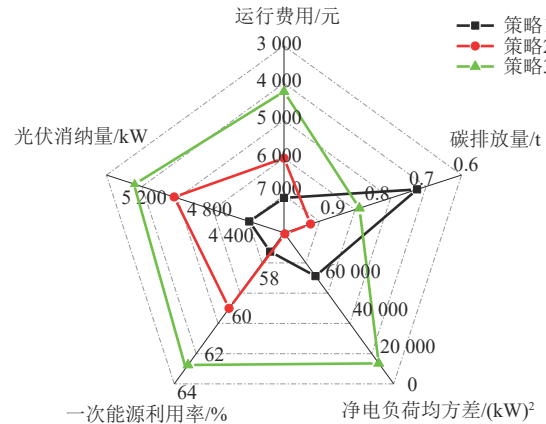


图9 3种策略结果对比

Fig. 9 Comparison of results under three strategies

5 结论

针对智能小区中综合能源系统的运行调度问题，提出了一种由小区运营商主导、负荷聚合商跟随的博弈优化模型。该模型考虑了楼宇模型间的功率流动，全面分析了用户侧的多种可能，包括价格促使的负荷转移或削减、以电制热的使用、分布式光伏在用户侧的使用等情况。通过对含3个楼宇的智能小区进行案例分析，得出以下结论：

1) 小区制定电价与热价的运营模式有效地实现了需求侧的响应,为热电解耦的系统优化提供了解决方法,实现了用能成本的下降,为负荷的供应提供了保障,为未来广泛应用的小区综合能源系统优化调度提供了参考。

2) 在优化调度过程中,需要同时对多个不同的指标进行优化。所提模型策略相比其他传统运行策略可以显著降低运行成本,提高新能源的消纳水平,且在不同环境下均可实现多目标的优化调度,便于运营商做出最优决策。

3) 将该模型应用于小区级综合能源系统的优化调度中,未来可进一步考虑可再生能源出力在极端场景下的不确定性,提出相应的鲁棒优化模型。

参考文献

- [1] 许洪华,邵桂萍,鄂春良,等.我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J].发电技术,2023,44(4):484-491.
XU H H, SHAO G P, E C L, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 484-491.
- [2] 崔茗莉,冯天天,刘利利.双碳目标下区块链与可再生能源的融合发展研究[J].智慧电力,2024,52(2):17-24.
CUI M L, FENG T T, LIU L L. Integration and development of blockchain and renewable energy under double carbon target[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 17-24.
- [3] 张雷,刘琦,赵晓丽,等.电力需求增长和负荷灵活性提升视角下的风光资源密集地区可再生能源消纳研究[J].全球能源互联网,2024,7(4):454-462.
ZHANG L, LIU Q, ZHAO X L, et al. Research on renewable energy penetration in wind and solar resource-intensive areas from the perspective of power demand growth and load flexibility enhancement[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(4): 454-462.
- [4] 张力波,吴一镡,王群伟.考虑碳中和目标与成本优化的可再生能源大规模发展规划[J].广东电力,2023,36(7):31-39.
ZHANG L B, WU Y K, WANG Q W. Large-scale development of renewable energy in consideration of carbon neutrality and cost optimization[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(7): 31-39.
- [5] 彭道刚,税纪钧,王丹豪,等.“双碳”背景下虚拟电厂研究综述[J].发电技术,2023,44(5):602-615.
PENG D G, SHUI J J, WANG D H, et al. Review of virtual power plant under the background of “dual carbon” [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 602-615.
- [6] 文云峰,郭创新,郭剑波,等.多区互联电力系统的分散协调风险调度方法[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3724-3733.
WEN Y F, GUO C X, GUO J B, et al. Coordinated decentralized risk-based dispatch of multi-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3724-3733.
- [7] 许中阳,宋晓通.含高比例清洁能源的微电网多目标优化调度策略[J].分布式能源,2023,8(2):19-25.
XU Z Y, SONG X T. Multi-objective optimal scheduling strategy for microgrid with high permeability clean energy[J]. Distributed Energy, 2023, 8(2): 19-25.
- [8] 王鹤,刘子悦,边竞,等.面向高比例分布式能源接入的输配网两阶段风险调度研究[J].电网与清洁能源,2024,40(1):119-129.
WANG H, LIU Z Y, BIAN J, et al. Research on two-stage risk scheduling for transmission and distribution power grids with high proportion of distributed energy access[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 119-129.
- [9] 林顺富,张琪,沈运帷,等.面向灵活爬坡服务的高比例新能源电力系统可调节资源优化调度模型[J].电力系统保护与控制,2024,52(2):90-100.
LIN S F, ZHANG Q, SHEN Y W, et al. Optimal dispatch model of adjustable resources in a power system with high proportion of renewable energy for flexible ramping product[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 90-100.
- [10] 程杉,傅桐,李泮洋,等.含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J].电力系统保护与控制,2023,51(22):1-12.
CHENG S, FU T, LI F Y, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.
- [11] 张宁,朱昊,杨凌霄,等.考虑可再生能源消纳的多能互补虚拟电厂优化调度策略[J].发电技术,2023,44(5):625-633.
ZHANG N, ZHU H, YANG L X, et al. Optimal scheduling strategy of multi-energy complementary

- virtual power plant considering renewable energy consumption[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(5): 625-633.
- [12] 魏子强, 温鹏, 梁志, 等. 计及需求响应比例的园区综合能源系统低碳经济调度方法[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(10): 38-45.
WEI Z Q, WEN P, LIANG Z, et al. Low carbon economic dispatching method of park integrated energy system considering proportion of demand response[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(10): 38-45.
- [13] 徐涛, 王樊云. 电力需求响应实施现状综述及展望[J]. *分布式能源*, 2024, 9(3): 1-11.
XU T, WANG F Y. Review and prospect of power demand response implementation[J]. *Distributed Energy*, 2024, 9(3): 1-11.
- [14] 陈湘元, 吴公平, 龙卓, 等. 考虑源荷不确定性及用户侧需求响应的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(3): 217-227.
CHEN X Y, WU G P, LONG Z, et al. Multi-time scale optimal dispatch of integrated energy systems considering source-load uncertainty and user-side demand response[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(3): 217-227.
- [15] 吴艳娟, 张亦炫, 王云亮. 计及多重需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳运行[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(2): 21-32.
WU Y J, ZHANG Y X, WANG Y L. Multi-time scale low carbon operation integrated energy system considering multiple integrated demand responses[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(2): 21-32.
- [16] 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 M Y, WANG L L, TENG F, et al. Review and prospect of transactive energy market for distributed energy resources[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(18): 33-48.
- [17] 朱丹丹, 贾勇勇, 周前. 考虑负荷聚合商资源灵活度的荷源协调优化调度方法[J]. *浙江电力*, 2024, 43(4): 12-20.
ZHU D D, JIA Y Y, ZHOU Q. A load-source coordinated scheduling method based on resource flexibility of load aggregators[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(4): 12-20.
- [18] 王秀慧, 赵浩辰, 谭忠富. 计及负荷聚合商的综合能源系统双层主从博弈运行优化[J]. *可再生能源*, 2023, 41(11): 1554-1562.
WANG X H, ZHAO H C, TAN Z F. Optimization study of integrated energy system hierarchical Stackelberg game operation with load aggregator[J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, 41(11): 1554-1562.
- [19] 朱永灿, 石琳, 褚夏永, 等. 面向负荷聚合商的工业用户调峰潜力评估方法研究[J]. *广东电力*, 2023, 36(9): 17-25.
ZHU Y C, SHI L, CHU X Y, et al. Research on peaking potential evaluation method of industrial enterprises for load aggregators[J]. *Guangdong Electric Power*, 2023, 36(9): 17-25.
- [20] 陈彦奇, 刘康祥, 赵鑫, 等. 基于阶梯型碳交易机制的综合能源系统低碳经济调度[J]. *动力工程学报*, 2023, 43(7): 901-909.
CHEN Y Q, LIU K X, ZHAO X, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system based on ladder-type carbon trading mechanism[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(7): 901-909.
- [21] 梅文卿, 刘晓峰, 王嘉诚, 等. 基于势博弈的负荷聚合商日前市场动态定价模型[J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(11): 62-69.
MEI W Q, LIU X F, WANG J C, et al. A day-ahead market pricing model for load aggregators based on potential game[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2023, 45(11): 62-69.
- [22] BARONE G, BUONOMANO A, FORZANO C, et al. The role of energy communities in electricity grid balancing: a flexible tool for smart grid power distribution optimization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 187: 113742.
- [23] CHREIM B, ESSEGHIR M, MERGHEM-BOULAHIA L. Energy management in residential communities with shared storage based on multi-agent systems: application to smart grids[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 126: 106886.
- [24] CERNA F V, POURAKBARI-KASMAEI M, BARROS R G, et al. Optimal operating scheme of neighborhood energy storage communities to improve power grid performance in smart cities[J]. *Applied Energy*, 2023, 331: 120411.
- [25] 朱浩昊, 朱继忠, 李盛林, 等. 基于Benders分解和纳什议价价的分布式热电联合优化调度[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(21): 5808-5820.
ZHU H H, ZHU J Z, LI S L, et al. Distributed combined heat and power optimal scheduling based on

- benders decomposition and Nash bargaining[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5808-5820.
- [26] LU S, GU W, ZHOU S Y, et al. High-resolution modeling and decentralized dispatch of heat and electricity integrated energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1451-1463.
- [27] 李咸善, 李晨杰, 张磊. 氢耦合区域综合能源系统集群双层博弈随机优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 238-247.
- LI X S, LI C J, ZHANG L. Dispatching strategy of hydrogen-coupled regional integrated energy system cluster based on two-level game stochastic optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 238-247.
- [28] 丁衡, 胡慧, 曹越, 等. 基于改进灰狼算法的热电联供系统负荷优化分配策略研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(11): 1515-1522.
- DING H, HU H, CAO Y, et al. Research on load optimal distribution strategy of combined heat and power system based on improved gray wolf algorithm[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(11): 1515-1522.
- [29] 杨畅, 李正烁, 薛屹洵, 等. 基于双步投影算法的多区域互联电热综合能源系统的三层分布式可信分布鲁棒优化调度[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023: 1-14. (2023-12-04). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGDC20231129001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- YANG C, LI Z S, XUE Y X, et al. Three-layer distributed credible distributed robust optimal scheduling of multi-area interconnected electrothermal integrated energy system based on two-step projection algorithm[J/OL]. China Industrial Economics, 2023: 1-14. (2023-12-04). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGDC20231129001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [30] 王晓鹰, 徐婧, 杨兆宇, 等. 考虑碳排放的孤岛综合能源系统多目标规划优化[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 129-137.
- WANG X Y, XU J, YANG Z Y, et al. Research on multi-objective planning optimization of islanded integrated energy system concerning carbon emissions[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 129-137.
- [31] 杨旭英, 周明, 李庚银. 智能电网下需求响应机理分析与建模综述[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 220-226.
- YANG X Y, ZHOU M, LI G Y. Survey on demand response mechanism and modeling in smart grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 220-226.
- [32] 傅质馨, 李紫嫣, 朱俊澎, 等. “双碳”目标下需求侧管理机制研究综述及展望[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(2): 1-12.
- FU Z X, LI Z Y, ZHU J P, et al. Overview and prospect of demand side management mechanism under “dual carbon” goal[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(2): 1-12.
- [33] 李金超, 鹿世强, 兰心怡, 等. 计及需求响应动态特性的分布式智能电网运行优化方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(8): 103-111.
- LI J C, LU S Q, LAN X Y, et al. Research on optimization of distributed smart grid operation considering dynamic characteristics of demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(8): 103-111.
- [34] 陈正建, 张清, 李世友, 等. 智能楼宇场景下能量流运行优化调度[J]. 节能技术, 2021, 39(6): 551-555.
- CHEN Z J, ZHANG Q, LI S Y, et al. Optimal scheduling of energy flow operation in intelligent building scenario[J]. Energy Conservation Technology, 2021, 39(6): 551-555.
- [35] 易文飞, 张潼, 岳东, 等. 考虑不确定性的楼宇综合能源系统日前调度[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 166-176.
- YI W F, ZHANG T, YUE D, et al. Day-ahead scheduling of building integrated energy system considering uncertainty[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 166-176.
- [36] 胥栋, 李逸超, 李赟, 等. 基于深度强化学习的多能流楼宇低碳调度方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(2): 126-136.
- XU D, LI Y C, LI Y, et al. A low-carbon scheduling method for multi-energy flow buildings based on deep reinforcement learning[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2): 126-136.
- [37] 程杉, 陈诺, 徐建宇, 等. 考虑综合需求响应的楼宇综合能源系统能量管理优化[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 40-47.
- CHENG S, CHEN N, XU J Y, et al. Optimal energy management of residential integrated energy system with consideration of integrated demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 40-47.
- [38] 吴界辰, 艾欣, 张艳, 等. 配售分离环境下高比例分布式能源园区电能日前优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1709-1719.
- WU J C, AI X, ZHANG Y, et al. Day-ahead optimal scheduling for high penetration of distributed

energy resources in community under separated distribution and retail operational environment[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1709-1719.

- [39] 李咸善, 方子健, 李飞, 等. 含多微电网租赁共享储能能的配电网博弈优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6611-6625.

LI X S, FANG Z J, LI F, et al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6611-6625.

- [40] 赵鑫, 郑文禹, 侯智华, 等. 基于粒子群优化算法的多能互补系统经济调度研究[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 14-20.

ZHAO X, ZHENG W Y, HOU Z H, et al. Research on economic dispatch of multi-energy complementary system based on Particle Swarm Optimization[J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 14-20.

收稿日期: 2024-07-12。

修回日期: 2024-10-27。

作者简介:



侯朗博

侯朗博(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电网提质增效, houlangbo1@163.com;



孙昊

孙昊(2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统, 1284683704@qq.com;



陈衡

陈衡(1989), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电网提质增效, 本文通信作者, heng@ncepu.edu.cn;



高悦

高悦(2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为输变电技术, gy15602073072@163.com。

(责任编辑 苗雪莲)