

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210867

基于综合需求响应和奖惩阶梯碳交易的能源枢纽 主从博弈优化调度

王瑞¹, 程杉¹, 刘烨¹, 徐建宇², 李敏¹

(1. 智慧能源技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

2. 国网河南省电力公司驻马店供电公司, 河南 驻马店 463000)

摘要: 为了充分考虑综合能源系统的低碳性以及多能负荷响应特性的复杂性, 提出了考虑综合需求响应和奖惩阶梯型碳交易机制的能源枢纽(Energy Hub, EH)主从博弈优化调度策略。首先, 为有效评估多能负荷柔性特性和响应能力, 将建筑热传递模型与生活热水储存模型集成到楼宇 EH 模型中, 构建了考虑多种热量扰动因素的精细化综合需求响应模型。其次, 考虑到供需双方的绿色调节能力, 构建了奖惩阶梯型碳交易成本模型。并基于 Stackelberg 博弈理论, 建立了能源枢纽运营商和用户的低碳优化模型。最后, 提出了结合 CPLEX 工具箱的差分进化算法对所提模型进行求解。算例仿真验证了所提方法能够有效限制系统的碳排放量, 充分发挥了需求侧资源的响应能力和减排潜力, 实现了 EH 经济性和环保性的双赢。

关键词: 能源枢纽; 奖惩阶梯型碳交易; 综合需求响应; Stackelberg 博弈; 柔性特性

Master-slave game optimal scheduling of energy hub based on integrated demand response and a reward and punishment ladder carbon trading mechanism

WANG Rui¹, CHENG Shan¹, LIU Ye¹, XU Jianyu², LI Min¹

(1. Engineering Center for Intelligent Energy Technology (China Three Gorges University), Yichang 443002, China;

2. Zhumadian Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Zhumadian 463000, China)

Abstract: To fully consider the low-carbon nature of an integrated energy system and the complex response characteristics of multi energy load, an energy hub (EH) master-slave game optimal scheduling strategy considering the integrated demand response and reward and punishment ladder carbon trading mechanism is proposed. First, to effectively evaluate the flexible characteristics and response capacity of multi energy load, a building heat transfer model and domestic hot water storage model are integrated into the building EH model. Then a refined integrated demand response model considering various heat disturbance factors is constructed. Secondly, considering the green regulation ability of the supply and demand sides, this paper constructs a reward and punishment ladder carbon transaction cost model. A master-slave game low-carbon optimization model for energy hub operators and users is established based on Stackelberg game theory. Finally, a differential evolution algorithm combined with a CPLEX toolbox is proposed to analyse the proposed model. The simulation results show that the proposed method can effectively limit the carbon emission of the system, give full play to the response ability and emission reduction potential of demand side resources, and realize a win-win of EH economy and environmental protection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607105).

Key words: energy hub; reward and punishment ladder carbon trading; integrated demand response; Stackelberg game; flexibility characteristics

0 引言

随着国家能源市场逐步改革开放, 寻求安全高

效、低碳清洁的能源运营模式已成为当前研究的热点^[1-2]。综合能源系统(Integrated Energy System, IES)是一种高效清洁、多能耦合的能源管理系统^[3-4]。而能源枢纽(Energy Hub, EH)作为未来的高效能源形式, 抽象地划分能源供应与消费需求, 在 IES 的研究中扮演着重要角色^[5]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607105); 三峡大学硕士学位论文培优基金项目资助(2021SSPY067)

国内外学者针对 EH 的优化问题展开了大量的研究。文献[6]建立了含风力发电的 EH 运行规划模型。文献[7]引入 $N-1$ 安全准则, 建立含电力系统、天然气系统的 EH 优化配置方法。文献[8-9]采用场景分析法处理源-荷的不确定性, 构建了包含规划与运行的 EH 全局规划模型。上述文献虽从不同角度对 EH 规划与运行进行了详细研究, 但未充分考虑实际情况下需求响应资源对 EH 优化调度的影响。

综合需求响应(Integrated Demand Response, IDR)是传统电力需求响应的拓展和延伸, 在 EH 优化运行中起关键作用。文献[10]将电力需求响应建模方法拓展至气、热负荷, 建立了含电转气和多源储能设备的 EH 优化模型, 实现了对多元负荷的联合调度。文献[11]利用供需双侧热电耦合互补关系, 根据电负荷的弹性响应和供热方式的多样性, 建立了热、电负荷 IDR 模型。文献[10-11]虽然考虑了多种用能负荷的需求响应能力, 但考虑的用户响应模型相对简单, 未能充分反映用户实际的用能特性。

针对上述问题, 文献[12]基于建筑热阻模型与热水储存模型提出了一种综合电负荷转移与灵活供热的 IDR 模型, 并考虑了温度舒适度约束, 保障了用户舒适度。文献[13]则根据自回归滑动平均模型描述供热系统热惯性, 并采用平均标度预测指标表征供暖舒适度, 提升了热负荷建模的准确性。然而, 文献[12-13]未考虑影响室内温度的相关因素, 不能准确反映不同种类楼宇因围护结构、热力特性、使用时间上的不同引起的供需关系差异。为此, 文献[14]综合考虑了室外温度、建筑围护结构热传递、室内热源等因素对制冷负荷的影响, 建立了基于建筑物的虚拟储能系统模型, 但忽略了用户因参与 IDR 而导致室温波动、舒适性降低的问题。因此, 建立能考虑各种环境扰动因素且能反映实际用能需求的 IDR 模型是目前亟需解决的难题。

能源市场的改革使大量新兴主体涌入市场展开激烈竞争, 博弈论的应用能很好地处理不同主体间的利益冲突。文献[15]建立了微网运营商和用户的多能博弈互动模型, 考虑了用户的主动性。而文献[16]则构建了多主多从的 Stackelberg 博弈模型, 研究了 IES 中多个分布式能源站和多个能源用户之间的交互问题。此外, 碳交易被认为是提升系统环境效益并兼顾经济性的有效手段之一^[17]。文献[18]在电-气互联的 IES 优化调度模型中引入碳交易机制, 分析其对系统环境效益的影响。而文献[19]针对传统碳交易机制的不足, 提出了计及阶梯碳交易机制的电-气-热 IES 源侧集中调度。文献[20]则进一步对碳交易机制进行改进, 引入奖励系数, 提出了考

虑奖惩阶梯碳交易机制的 IES 规划模型。然而, 目前大多数研究只在 IES 运行成本中引入碳交易成本, 未充分发挥需求侧资源的节能减排能力。

针对上述问题, 本文提出了基于奖惩阶梯型碳交易机制和精细化 IDR 模型的 EH 主从博弈优化调度策略。首先, 根据电、热、冷三种负荷的柔性特性和响应能力, 将建筑热传递模型与生活热水储存模型集成到楼宇 EH 模型中, 对用户多能负荷需求精细化建模。其次, 基于 Stackelberg 博弈理论, 构建了能源枢纽运营商(Energy Hub Operator, EHO)和用户的主从博弈模型, 并在博弈模型中引入奖惩阶梯型碳交易机制, 限制 EHO 的碳排放量和发挥用户的绿色调节能力。最后, 采用结合 CPLEX 工具箱的差分进化算法对所提模型进行求解。仿真结果表明, 所提方法能够有效兼顾双方利益, 充分发挥用户的需求响应潜力, 实现 EH 经济、低碳运行。

1 能源枢纽结构

本文所研究的 EH 结构如图 1 所示。新能源设备为风电机组(Wind Turbine, WT)、光伏机组(Photovoltaic, PV); 供能设备包括燃气轮机(Gas Turbine, GT)、燃气锅炉(Gas Boiler, GB); 能源转换设备包括余热锅炉(Waste Heat Boiler, WHB)、电制冷机(Air Conditioner, AC)、吸收式制冷机(Absorption Refrigerator, AR); 储能设备为蓄电池(Battery, BT)。

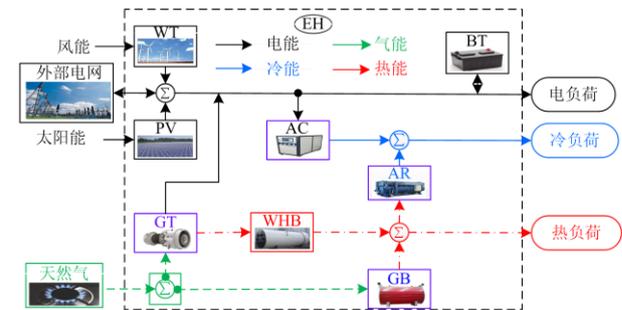


图 1 EH 结构示意图

Fig. 1 Diagram of EH structure

1.1 燃气轮机

GT 输出的电功率 P_{GT}^t 与所消耗的气功率 G_{GT}^t 关系如式(1)所示。

$$G_{GT}^t = a(P_{GT}^t)^2 + bP_{GT}^t + cI_{GT}^t \quad (1)$$

式中: I_{GT}^t 为 GT 的启停状态标记位; a 、 b 为能耗系数; c 为 GT 启停成本系数。

为了精确反映 GT 的实际运行工况, 便于快速计算, 本文对式(1)进行三段段线性化处理, 如图 2 所示。分段后的 3 段斜率分别为

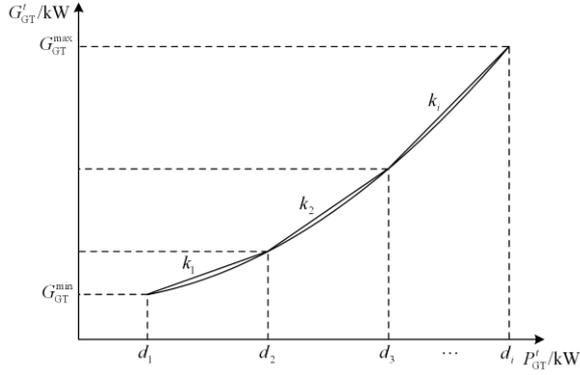


图2 分段线性化 GT 燃耗曲线

Fig. 2 Piecewise linearization of GT burnup curve

$$\begin{cases} f_1 = a(d_1 + d_2) + b \\ f_2 = a(d_2 + d_3) + b \\ f_3 = a(d_3 + d_4) + b \end{cases} \quad (2)$$

式中: d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 表示分段后的 GT 电功率曲线参数; d_1 、 d_4 为 GT 输出电功率的上、下限, 故式(1)可以改写为

$$G'_{GT} = G'_{GT}{}^{\min} I'_{GT} + \sum_{i=1}^3 \left[f_i \frac{d_{i+1} - d_i + |P'_{GT} - d_i| - |P'_{GT} - d_{i+1}|}{2} \right] \quad (3)$$

GT 运行时, 排出的高温烟气通过 WHB 产热, 其制热特性模型为

$$H'_{GT} = P'_{GT} / \lambda_{GT} \quad (4)$$

$$H'_{WHB} = \lambda_{WHB} H'_{GT} \quad (5)$$

式中: H'_{GT} 和 H'_{WHB} 分别表示 GT 和 WHB 输出的热功率; λ_{GT} 和 λ_{WHB} 分别表示燃气轮机输出的电热功率比和热回收效率。

1.2 燃气锅炉

GB 通过燃烧天然气产热, 其输出热功率 H'_{GB} 与输入的气功率 G'_{GB} 的关系为

$$H'_{GB} = \eta_{GB} G'_{GB} \quad (6)$$

式中, η_{GB} 为 GB 的产热效率。

1.3 电制冷机与吸收式制冷机

AC、AR 的输出冷功率 Q'_{AC} 、 Q'_{AR} 分别为

$$\begin{cases} Q'_{AC} = \eta_{AC} P'_{AC} \\ Q'_{AR} = \eta_{AR} H'_{AR} \end{cases} \quad (7)$$

式中: η_{AR} 、 η_{AC} 表示 AR、AC 制冷效率; P'_{AC} 和 H'_{AR} 分别表示 AC 的输入电功率和 AR 的输入热功率。

1.4 蓄电池

BT 充放电前后的储能容量需满足以下约束:

$$\begin{cases} SOC'_{BT} = SOC'_{BT}{}^{t-1} + (\eta_{BT,chr} P'_{BT,chr} - P'_{BT,dis} / \eta_{BT,dis}) \Delta t \\ SOC'_{BT}{}^{\min} \leq SOC'_{BT} \leq SOC'_{BT}{}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: SOC'_{BT} 为 BT 的容量状态; $\eta_{BT,chr}$ 、 $\eta_{BT,dis}$ 分别为 BT 的充、放电效率。此外, BT 还需满足充放电频率约束和互斥约束:

$$U'_{BT,dis} + U'_{BT,chr} \leq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{T=1}^{24} U'_{BT,dis} + U'_{BT,chr} \leq t \quad (10)$$

式中, $U'_{BT,chr}$ 和 $U'_{BT,dis}$ 分别为 BT 的充、放电标志位。

2 综合需求响应模型

通过对用户负荷需求精细化建模, 在温度舒适度和室温波动范围内调节用能策略, 能有效提高 EH 运行经济性和环保性。

2.1 用户冷负荷需求建模

建筑蓄热能力是衡量建筑制冷、制热能力的一个重要因素, 以夏季制冷为例描述用户的柔性冷负荷需求。假设楼宇制冷设备在使用时间内连续运行, 根据能量守恒定理, t 时段内室内热量变化量 ΔL_c 等于制冷量 L'_c 与建筑吸热量 L_B 之差, 由此可得楼宇热平衡方程为

$$\Delta L_c = \rho_{Air} C_{Air} V_B \frac{\partial T_{In}}{\partial t} = L'_c - L_B \quad (11)$$

式中: ρ_{Air} 为空气密度; C_{Air} 为空气比热容; $\partial T_{In} / \partial t$ 为室内温度变化率; V_B 为建筑体积。

图 3 为建筑热传递过程。影响建筑吸热的主要因素有: 建筑外墙的热量 L_{Wall} 及外窗传递的热量 L_{Win} , 建筑因吸收室内照明、人体散热等热量产生的室内热源 L_{In} 以及太阳辐射所产生的热量 L_S , 因此 L_B 可表示为^[7]

$$L_B = L_{Wall} + L_{Win} + L_{In} + L_S \quad (12)$$

其中,

$$\begin{cases} L_{Wall} = \sum_{j \in J} k_{Wall}^j f_{Wall}^j (T_{Out} - T_{In}) \\ L_{Win} = \sum_{j \in J} k_{Wall}^j f_{Win}^j (T_{Out} - T_{In}) \\ L_S = \sum_{j \in J} k_{Win}^j SCI \end{cases}$$

式中: j 表示建筑朝向; k_{Wall} 、 k_{Win} 分别为建筑外墙、外窗与室外的传热系数; f_{Wall} 、 f_{Win} 分别为建筑外墙、外窗面积; T_{In} 、 T_{Out} 分别为室内外温度; I 为太阳辐射功率; S 、 C 分别为外窗遮阳系数、得热因子。本文假设建筑所有传递的热量均匀分布在东南西北四面墙上。

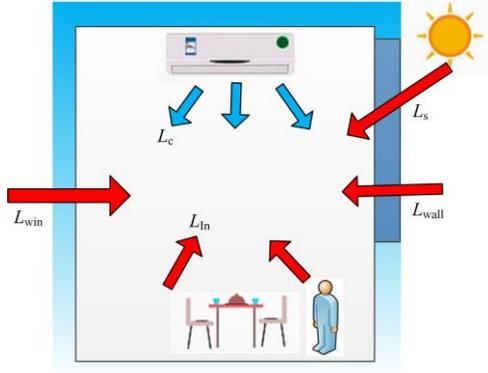


图3 建筑热传递过程示意图

Fig. 3 Schematic of heat transfer of the internal air volume

联合式(11)和式(12)，并通过差分化处理^[21-22]，可以得到离散化的楼宇热平衡方程：

$$\rho_{Air} C_{Air} V_B (T_{Out}^{t+1} - T_{Out}^t) = L_c^t - \sum_{j \in J} k_{Wall}^j f_{Wall}^j \times (T_{Out}^t - T_{In}^t) - \sum_{j \in J} k_{Win}^j f_{Win}^j (T_{Out}^t - T_{In}^t) - \sum_{j \in J} k_{Win}^j SCI_t \quad (13)$$

由式(13)可得到室内温度与制冷功率之间的关系，为保障用户舒适度，室温应满足上下限及其波动约束，如式(14)一式(16)所示。

$$T_{In}^{min} \leq T_{In}^t \leq T_{In}^{max} \quad (14)$$

$$\gamma_{In-}^t = \frac{T_{In}^{min} - T_{In}^{opt}}{|T_{In}^{opt} - T_{In}^t|}, \gamma_{In+}^t = \frac{T_{In}^{max} - T_{In}^{opt}}{|T_{In}^{opt} - T_{In}^t|} \quad (15)$$

$$(1 + \gamma_{In-}^t) T_{In}^{opt} \leq T_{In}^t \leq (1 + \gamma_{In+}^t) T_{In}^{opt} \quad (16)$$

式中：\$T_{In}^{max}\$、\$T_{In}^{min}\$ 分别为用户可接受的室内温度上、下限；\$T_{In}^{opt}\$ 为设定的最适宜室温；\$\gamma_{In+}^t\$、\$\gamma_{In-}^t\$ 分别表示室温波动相对值的上、下限。

2.2 用户热负荷需求建模

本文中热负荷是指 EH 供给生活热水所输出的负荷，与制冷负荷类似，用户可根据不同的能源价格在适宜水温范围内调节热负荷需求。通过热水储存模型描述供水温度与热负荷之间的关系^[23]，如式(17)所示。

$$T_h^{t+1} = \frac{L_h^t}{V_h C_h} + \frac{V_{C,h}^t}{V_h} T_{C,h}^t + \frac{V_h - V_{C,h}^t}{V_h} T_h^t \quad (17)$$

式中：\$C_h\$ 为水的比热容；\$T_h^t\$ 与 \$T_{C,h}^t\$ 分别表示储水温度和进入储水罐代替消耗热水的冷水温度；\$V_h\$ 与 \$V_{C,h}^t\$ 分别表示储水总量和替换消耗热水的冷水总量；\$L_h^t\$ 表示供应热水所需要的能量。

为保障用户舒适度，水温应满足上下限约束和水温波动约束，如式(18)一式(20)所示。

$$T_h^{min} \leq T_h^t \leq T_h^{max} \quad (18)$$

$$\gamma_{h-}^t = \frac{T_h^{min} - T_h^{opt}}{|T_h^{opt} - T_h^t|}, \gamma_{h+}^t = \frac{T_h^{max} - T_h^{opt}}{|T_h^{opt} - T_h^t|} \quad (19)$$

$$(1 + \gamma_{h-}^t) T_h^{opt} \leq T_h^t \leq (1 + \gamma_{h+}^t) T_h^{opt} \quad (20)$$

式中：\$T_h^{max}\$、\$T_h^{min}\$ 分别为用户可接受的生活热水温度上、下限；\$T_h^{opt}\$ 为设定的最适宜水温。

2.3 用户电负荷需求响应

用户电负荷包括固定电负荷和可转移电负荷，可转移电负荷指用户根据电价信息和用户需求进行转移，在不影响自身舒适度的情况下调整用电策略。设时段 \$t\$ 内可转移电负荷 \$L_{e,k}^t\$ 的表达式如式(21)所示。

$$L_{e,k}^t = \sum_{i=1}^M L_{e,k}^{t,i} - \sum_{i=1}^M L_{e,out}^{t,i} + \sum_{i=1}^M L_{e,in}^{t,i} \quad (21)$$

其中，

$$\sum_{i=1}^M L_{e,out}^{t,i} = \sum_{i=1}^M L_{e,in}^{t,i} \quad (22)$$

式中：\$L_{e,k}^{t,i}\$ 表示第 \$i\$ 个用户未经过电价 IDR 调节前的可转移电负荷功率；\$L_{e,out}^{t,i}\$ 和 \$L_{e,in}^{t,i}\$ 分别为第 \$i\$ 个用户经电价 IDR 调节后转入和转出的电负荷功率；\$M\$ 为参与响应的用户数量。

3 主从博弈低碳模型

3.1 主从博弈框架

本文的主从博弈框架如图4所示。参与该博弈互动的市场主体为 EHO 和用户，双方分别在各自运行约束条件下，追求自身利益最优。EHO 为领导者，考虑自身碳排放量，其目标为净利润最高。控制中心是全局信息交互与处理机构，对用户发送内部能源价格，并上报用户的用能计划。用户为跟随者，根据 EHO 下达的内部能源价格，在满足用能满意度的条件下调整自身用能策略。当各市场主体不能通过改变自身策略来提升效益时，博弈达到均衡。

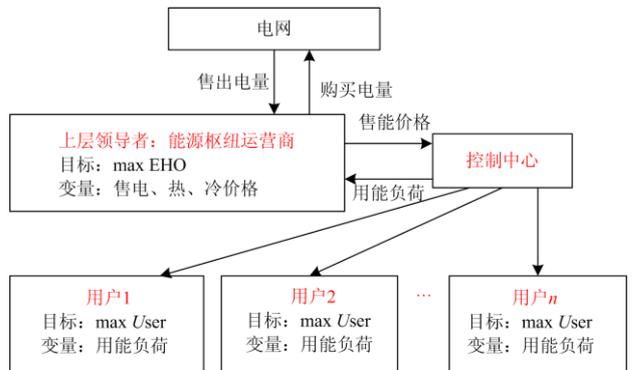


图4 主从博弈框架

Fig. 4 Master-slave game framework

3.2 奖惩阶梯型碳交易机制

3.2.1 EHO 碳排放量分配

本文采用基准线法来确定 EHO 的无偿碳排放配额, 认为 EH 中的碳排放权分配额主要包括 CCHP、GB 和常规机组。将 CCHP 发电量折算成等效的发热量并进行碳配额分配。

$$E_p = E_{\text{Grid}} + E_{\text{GB}} + E_{\text{CCHP}} \quad (23)$$

$$E_{\text{Grid}} = \sum_{t=1}^{24} \delta_e P'_{\text{buy}} \quad (24)$$

$$E_{\text{GB}} = \sum_{t=1}^{24} \delta_h H'_{\text{GB}} \quad (25)$$

$$E_{\text{CCHP}} = \sum_{t=1}^{24} \delta_h (\varphi P'_{\text{GT}} + H'_{\text{WHB}} + Q'_{\text{AR}}) \quad (26)$$

式中: E_{Grid} 、 E_{GB} 和 E_{CCHP} 分别为外部电网购电、GB 和 CCHP 的无偿碳排放配额; E_p 为总的系统碳排放分配额; P'_{buy} 为 EHO 从外部电网购买的电量; φ 表示折算系数; δ_e 、 δ_h 为单位电量、热量的碳排放分配额系数, 分别取 0.728 t/MWh 和 0.102 t/GJ^[18]。

3.2.2 奖惩阶梯型碳交易成本计算模型

本文构建的奖惩阶梯型碳交易成本模型如式(27)所示, 当碳排放量小于免费的碳配额时, 供能企业可以出售多余的碳排放配额并获取一部分奖励补贴, 反之则需要购买不足的碳排放权。碳排放量越大的区间, 对应的碳交易价格越高。

$$E_{\text{co}_2} = \begin{cases} -c(1+2\mu)(E_c - h - E_p) & E_p \leq E_c - h \\ -c(1+2\mu)h - c(1+\mu)(E_c - E_p) & E_c - h \leq E_p \leq E_c \\ c(E_p - E_c) & E_c < E_p \leq E_c + h \\ ch + c(1+\lambda)(E_p - E_c - h) & E_c + h < E_p \leq E_c + 2h \\ c(2+\lambda)h + c(1+2\lambda)(E_p - E_c - 2h) & E_c + 2h < E_p \leq E_c + 3h \\ c(3+3\lambda)h + c(1+3\lambda)(E_p - E_c - 3h) & E_c + 3h < E_p \leq E_c + 4h \\ c(4+4\lambda)h + c(1+4\lambda)(E_p - E_c - 4h) & E_c + 4h < E_p \end{cases} \quad (27)$$

式中: E_{co_2} 为 EHO 所承担的碳交易成本; E_c 为 EHO 的实际碳排放总量; c 为单位碳交易价格; λ 、 μ 分别表示奖励系数和惩罚系数; h 表示碳排放区间长度。其中常规发电机组实际碳排放量为 1.08 t/MWh; CCHP 和 GB 的实际碳排放量为 0.065 t/GJ^[18]。

3.3 能源枢纽运营商

EHO 根据用户用能策略调节 EH 内能量耦合设备出力与内部能源价格, 以最大化 EHO 净利润为目标函数, 如式(28)一式(31)所示。

$$\max E_{\text{EHO}} = E_{\text{sale}} - E_{\text{buy}} - E_{\text{co}_2} - E_{\text{K}} \quad (28)$$

$$E_{\text{sale}} = \sum_i \sum_{t=1}^{24} (L'_i \lambda'_i) \Delta t + \sum_{t=1}^{24} (P'_{\text{sGrid}} \lambda'_{\text{sGrid}}) \Delta t \quad (29)$$

$$E_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^{24} \left[P'_{\text{bGrid}} \lambda'_{\text{bGrid}} + \frac{(G'_{\text{GT}} + G'_{\text{GB}}) \lambda^{\text{gas}}}{H_{\text{NG}}} \right] \Delta t \quad (30)$$

$$E_{\text{K}} = \sum_i K_i P'_i \quad (31)$$

式中: $i \in \{e, c, h\}$, E_{sale} 为 EHO 的售能收益; E_{buy} 为 EHO 的购电、气成本; E_{co_2} 和 E_{K} 分别为 EHO 承担的碳交易成本和设备运行维护成本; λ'_i 为 EHO 向用户出售第 i 种能源的价格; L'_i 为相应的用户负荷; λ'_{bGrid} 、 λ'_{sGrid} 为 EHO 向外部电网购、售电价格; P'_{bGrid} 、 P'_{sGrid} 为相应的购、售电功率; λ^{gas} 为天然气价格, G'_{GT} 、 G'_{GB} 为 GT、GB 所消耗的天然气功率; K_i 为设备的单位运行维护费用; P'_i 表示各设备输出功率; H_{NG} 为天然气低热值。

EHO 在优化调度中不仅需考虑 EH 内多种能源供需平衡和各能源设备的上下限约束, 还需要考虑内部能源价格的约束:

$$\lambda'_{i,\min} \leq \lambda'_i \leq \lambda'_{i,\max} \quad (32)$$

式中, $\lambda'_{i,\max}$ 与 $\lambda'_{i,\min}$ 分别为 EHO 向用户出售第 i 种能源的价格上下限值。

3.4 用户

用户的目标函数为购能成本和不舒适度成本之和。假设 EH 内用户均能接受一定程度的不舒适度变化, 故其目标函数为

$$\min E_{\text{User}} = C_{\text{User}} + U_{\text{User}} \quad (33)$$

式中: C_{User} 为用户的购能成本; U_{User} 为用户不舒适成本, 其表达式分别为

$$C_{\text{User}} = \sum_i \sum_{t=1}^{24} L'_i \lambda'_i \quad (34)$$

$$\begin{cases} U_{\text{User}} = \sum_i \sum_{t=1}^{24} (\gamma_i \lambda'_i (\Delta L'_i)^2) \\ \Delta L'_i = L'_{t,0} - L'_i \end{cases} \quad (35)$$

式中: $i \in \{e, c, h\}$, γ_i 对应用户转移或削减第 i 种能量的不适系数, 反映用户对能源的需求偏好; $L'_{t,0}$ 为用户最舒适的负荷需求; L'_i 为用户执行 IDR 后的实际负荷; $\Delta L'_i$ 表示用户执行 IDR 前后的负荷变化量。

对于可转移负荷, 需要满足以下约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq |L'_{t,0} - L'_i| \leq L'_{i,\max} \\ \sum_{t=1}^{24} L'_{t,0} = \sum_{t=1}^{24} L'_i \end{cases} \quad (36)$$

$$\sum_i^T \Delta L_i' \Delta t = W_i' \quad (37)$$

式中： $L_{i,max}$ 表示负荷可转移量的上限值； W_i' 表示负荷的可转移负荷总量。

此外，冷、热负荷除了可转移负荷之外，还存在可削减负荷。用户在舒适的室温、生活热水温度范围内根据能源价格调节负荷需求量，以减少用能成本。其温度调整约束需满足式(14)一式(16)和式(18)一式(20)。

3.5 求解方法

通过差分进化算法和 CPLEX 求解器对所提博弈模型进行求解，其求解流程图如图 5 所示。

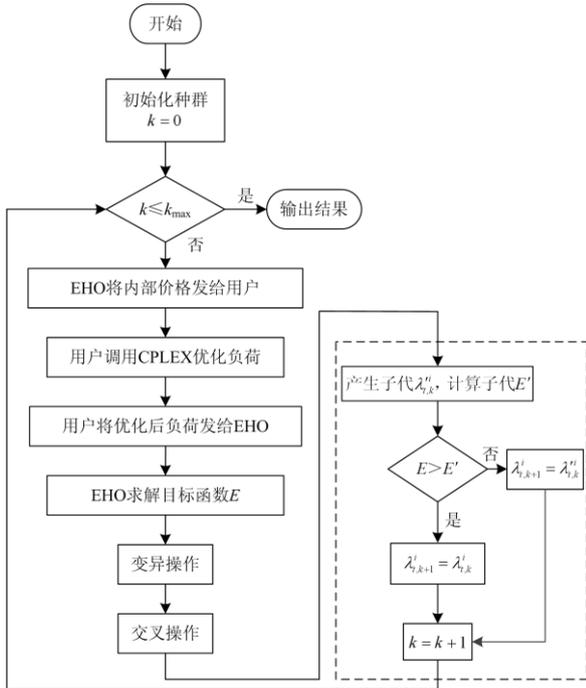


图 5 Stackelberg 博弈求解流程图

Fig. 5 Solution flow chart of Stackelberg game

4 算例分析

4.1 基础数据

以某商业楼宇 EH 为例进行算例仿真分析。用户典型日预测负荷和新能源预测出力如图 6 所示。建筑相关参数^[16]如表 1 所示；EH 内设备与相关约束参数如表 2 所示；EHO 向电网的购、售电价如表 3 所示。天然气价格为 3.24 元/m³；EHO 的售冷、售热价格为[0.15, 0.4]元；建筑物内热源、室外温度与太阳辐射曲线如图 7 所示；用户最佳室温设定为 22.5 °C，最佳水温设定为 70 °C，用户对电、热/冷能的不适系数^[24] γ_e 、 γ_{ch} 分别为 0.008、0.016；碳交易价格为 0.268 元/kg， μ 为 0.2。

本文所研究的 4 栋商业建筑制冷开放时间

为：建筑 A 为住宅楼，制冷时间为 00:00—09:00 和 18:00—23:00；建筑 B 为写字楼，制冷时间为 08:00—20:00；建筑 C 为公寓，制冷时间为全天；建筑 D 为商场，制冷时间为 10:00—22:00。

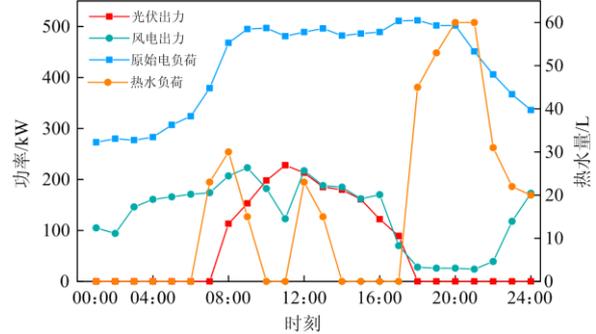


图 6 负荷和新能源预测曲线

Fig. 6 Load and new energy forecast curve

表 1 建筑参数

Table 1 Parameters of the buildings

	建筑 A	建筑 B	建筑 C	建筑 D
$k_{wall}/[kW/(m^2 \cdot k)]$	1.090	0.928	1.145	0.825
k_{wall}/m^2	1 000	2 400	1 500	2 700
$k_{win}/[kW/(m^2 \cdot k)]$	2.85	2.70	2.82	2.55
k_{win}/m^2	460	740	620	660
长/m	32	43	32	51
宽/m	22	21	20	32
高/m	10	30	20	20

表 2 能量枢纽参数

Table 2 Parameters of the EH

参数	取值	参数	取值
$a/b/c$	2.75/66.2/100	$\lambda_{GT}/\lambda_{WHB}$	0.38/0.85
$P_{GT}^{min}/P_{GT}^{max}$	60/500 kW	$P_{GT}^{down}/P_{GT}^{up}$	-60/60 kW
η_{GB}	0.9	H_{GB}^{max}	500 kW
δ_{BT}	0.02	$\eta_{BT,chr}/\eta_{BT,dis}$	0.95
$SOC_{BT}^{min}/SOC_{BT}^{max}$	60/400 kWh	η_{AC}/η_{AR}	4/1.2
$P_{AC}^{max}/P_{AR}^{max}$	500 kW	$P_{max}^{bGrid}/P_{max}^{sGrid}$	400 kW
ρ_{Air}, V_c	1.2 kg/m ³ , 100 L	C_{Air}	1kJ/(kg · °C)
$T_{in}^{min}/T_{in}^{max}$	21/24 °C	C_h	4.2 kJ/(kg · °C)
λ, μ	0.2, 0.2	T_h^{min}/T_h^{max}	60/80 °C

表 3 购售电价

Table 3 Prices for the purchase and sale of electricity

时段	购电价格/(元/kWh)	售电价格/(元/kWh)
00:00—07:00	0.4	0.3
08:00—12:00	1.25	1
13:00—18:00	0.8	0.55
19:00—22:00	1.25	1
23:00—24:00	0.8	0.55

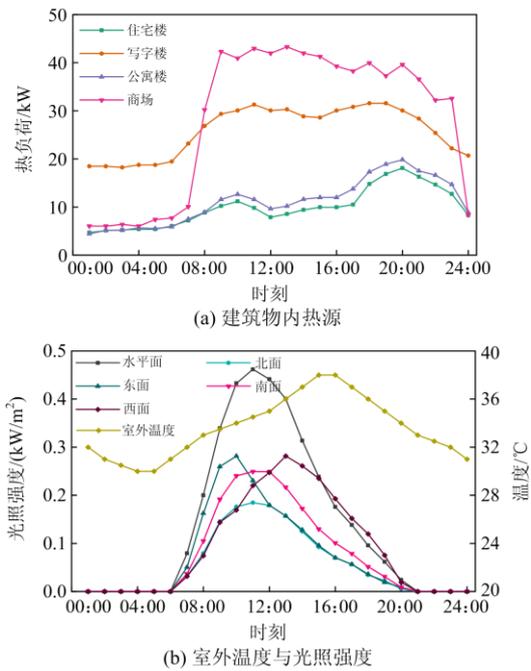


图7 建筑物热源与光照强度日前预测数据

Fig. 7 Forecast data of buildings heat source and light intensity

4.2 不同方案的对比分析

为了说明本文所提模型的经济性与环境效益, 设置了以下4种方案与本文方案进行对比分析。

方案1: 在碳交易模式下, 不考虑IDR模型和碳交易成本的供需博弈模型; 方案2: 在碳交易模式下, 考虑简单化IDR模型^[24]、不考虑碳交易成本的供需博弈模型; 方案3: 考虑简单化IDR模型和传统碳交易成本的供需博弈模型; 方案4: 考虑精细化IDR模型和传统碳交易成本。5种方案下对比结果如表4所示。

表4 不同方案下的对比结果

Table 4 Comparison results under different schemes

方案	EHO 净利润/元	用户用能成本/元	外购电力/kW	系统碳排放量/kg
1	4 833.8	11 265.6	2 593.4	5 486.7
2	4 696.5	10 837.3	2 435.6	5 225.5
3	4 857.9	10 685.7	2 284.6	4 912.6
4	4 845.4	10 515.6	2 235.3	4 824.5
本文	4 942.5	10 422.9	2 125.3	4 712.6

对比方案1与方案2, 方案2中用户用能成本和系统碳排放量分别下降了3.81%和4.76%, 这是因为考虑IDR策略后用户能够根据价格信号合理调整负荷需求, 有效平缓了用户负荷峰谷差, 降低了用能成本及因外购电力而产生的碳排放量。但由于用户转移和削减了部分负荷, 使EHO的净利润下降了2.84%。

对比方案2和方案3, 方案3中用户用能成本和系统碳排放量分别下降1.40%和5.98%, EHO净利润上升3.43%。由此可知在优化模型中考虑碳交易机制之后, EHO能够合理调整设备出力, 减少因外购电力产生的碳排放量, 并且由于系统的碳排放总量低于免费分配的碳配额, 故可以在碳交易市场中获得碳收益。此外, 用户也能因EHO的调整从中获利。

对比方案3和方案4, 方案4中用户用能成本和系统碳排放量分别下降了1.59%和1.79%。这是因为采用精细化IDR模型时, 考虑了温度舒适度和室温波动等因素, 能反映实际情况下用户的用能情况, 使用户更积极地参与到IDR的响应当中, 保证了用户的用能舒适度。

对比方案4和本文策略, 本文策略中用户用能成本和系统碳排放量分别下降了0.88%和2.32%, EHO净利润上升了2.01%。这是因为引入了阶梯型碳交易成本和奖励系数后, EHO不仅能出售多余的碳配额获得碳收益, 还能得到一定的奖励收益, 故进一步激励EHO增加各设备出力, 减少外购电量, 从而有效降低系统碳排放总量。

综上所述, 在供需博弈模型中考虑奖惩阶梯型碳交易机制和精细化IDR模型能兼顾EH经济性和环保性, 对实现EH节能减排和提升综合效益具有重要意义。

4.3 调度结果分析

4.3.1 考虑精细化IDR模型的调度分析

首先分析柔性冷负荷对EH的影响。假设不引入柔性冷负荷时, 建筑在其各自的开放时间内温度保持恒定22.5°C, 在非开放时间内无要求, 此时的冷负荷将其作为原始制冷负荷; 引入柔性冷负荷时, 建筑物内温度可在其开放时间内波动, 此时的冷负荷将其作为实际制冷负荷。由图8所示的建筑制冷结果可以看出, 制冷负荷将在其建筑开放的第一个时间段内迅速增长, 以满足其屋内室温需求, 在随后的时段其制冷负荷基本随外界温度与太阳辐射的变化而变化, 以维持室内温度。

此外, 引入柔性冷负荷后, 其建筑制冷量与电价相关。对于住宅楼, 00:00—07:00冷价较低时实际制冷负荷也较大, 即将峰值冷负荷转移至谷值冷负荷, 这样不仅可以保障用户舒适度, 也能提前蓄热以降低峰值冷价时的负荷需求; 由于写字楼与商场开放时间均处于能源价格、室外温度较高的08:00—20:00, 因此通过适当调高室内温度, 可降低冷负荷需求和用能成本; 全天开放的公寓也可通过削减或转移部分冷负荷以提升系统经济性。

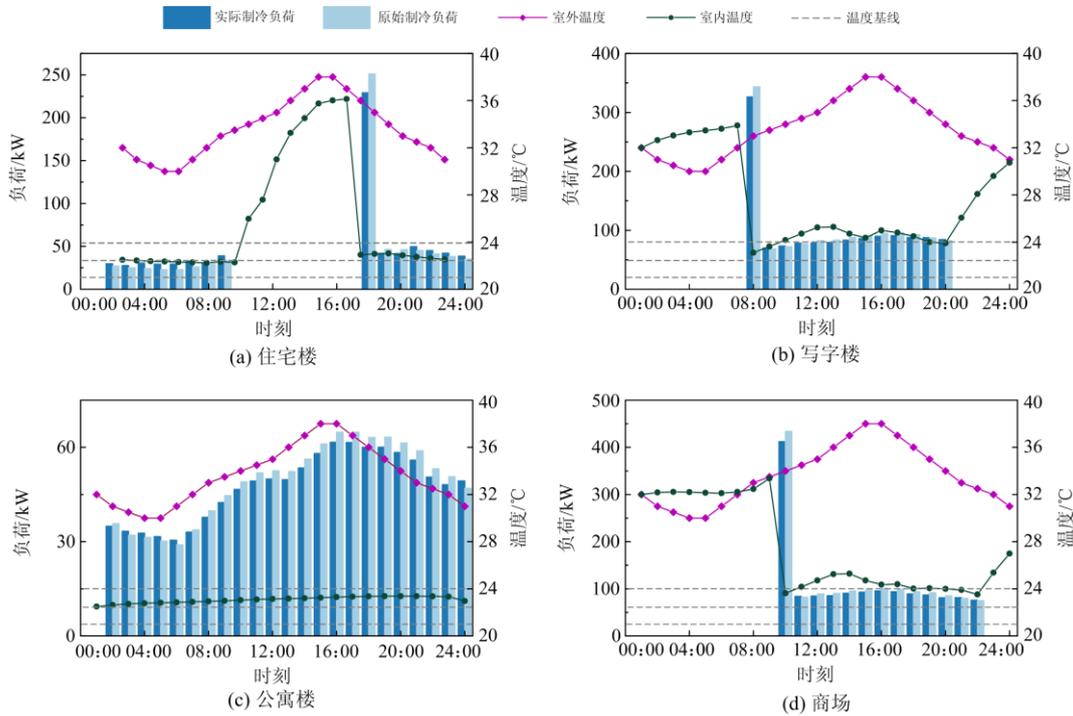


图 8 建筑制冷方案

Fig. 8 Building refrigeration scheme

图 9 为日前生活热水调度结果，与建筑制冷结果相似，系统可通过降低水温、转移和削减部分热负荷的方式降低用能成本，如在 06:00—10:00 和 17:00—20:00 时段，用户为了降低费用，热负荷有所转移和削减，而在 15:00—16:00 时段，对储水罐内热水进行额外加热，以满足未来热价较高的时间段内的热水需求。

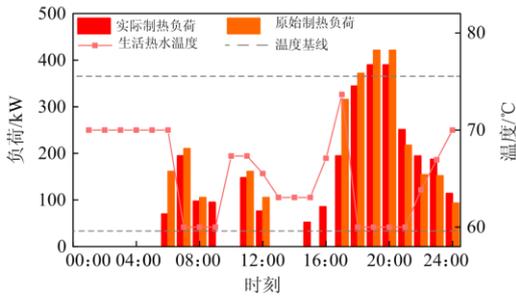
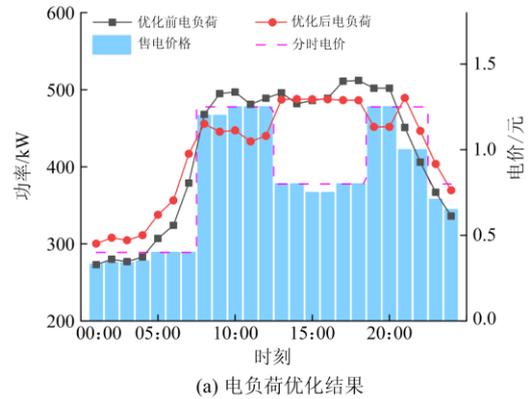


图 9 生活热水优化方案

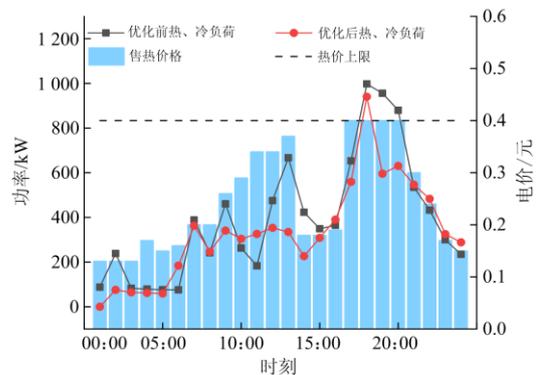
Fig. 9 Domestic hot water optimization scheme

4.3.2 Stackelberg 均衡分析

图 10 为博弈均衡优化后 EHO 制定的内部能源价格与用户用能策略结果图。由图 10(a)可知，EHO 制定的售能价格在外部电网分时电价之内，且其电价波动趋势与分时电价一致，目的是为用户提供相比电网更优惠的售能价格，促进用户进行负荷转移与削减。如在 08:00—12:00 和 16:00—22:00 时段



(a) 电负荷优化结果



(b) 热负荷优化结果

图 10 售能价格和实际用能负荷

Fig. 10 Energy sale price and user' load

电价较高时, 用户将这些时段的电负荷转移到电价较低的时段(00:00—7:00 及 23:00—24:00), 降低自身的购能成本。同样, 热负荷和冷负荷的优化结果如图 10(b)所示, 为了简化模型, 本文售热价格和售冷价格采用相同变量进行优化, 因此相应的价格变化趋势与冷、热负荷总量的变化趋势相似, 与图 10(a)分析类似, 此处不再赘述。

4.3.3 功率平衡结果分析

本文 Stackelberg 博弈优化后设备调度结果如图 11 所示。考虑环保性, EHO 优先消纳可再生能源 PV 和 WT。首先, 在 00:00—06:00 时段, 电价处于谷段, 此时 GT 停止启动, EHO 主要通过 WT 发电以及外购电力满足用户电负荷, 热负荷通过 GB 产热满足, 冷负荷通过 AC 制冷满足。在 07:00—12:00 时段, PV 开始出力, 此时电负荷主要通过 GT、PV

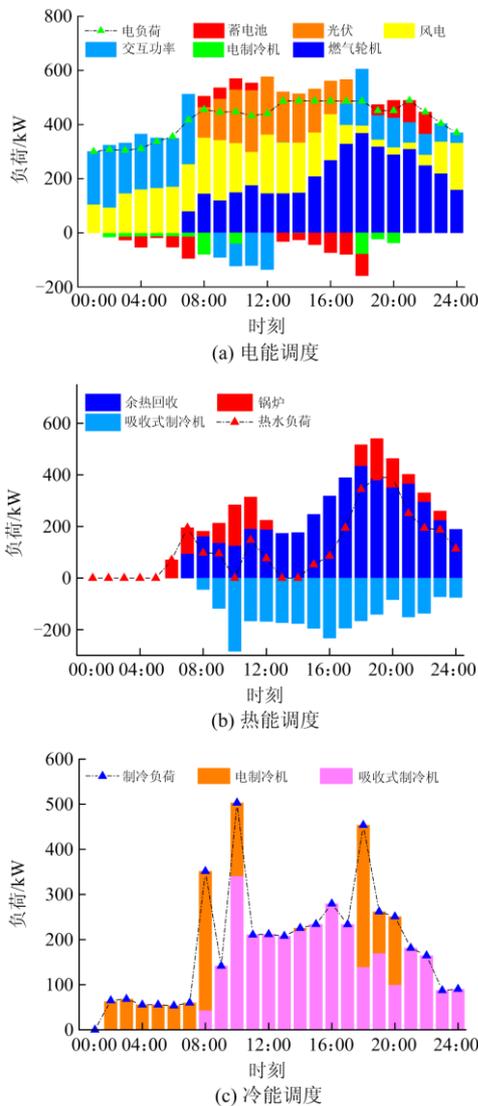


图 11 各设备优化结果

Fig. 11 Optimization results of each equipment

和 WT 提供, EHO 为了获利, GT 出力较多, 富裕的电量可以提供给 AC 或出售给外部电网, 热负荷通过 WHB 和 GB 满足, 富裕的热量通过 AR 制冷并联合 AC 满足冷负荷需求。在 13:00—18:00 电价平时段, 由于此时热、冷负荷较高, 故为了利用发电余热来满足热负荷, GT 出力较高, 富裕的电负荷通过 BT 储存, 以应对下一段电负荷高峰期。在 19:00—22:00 电价峰值时段, 此时工作情况与 08:00—12:00 时段相似, 但由于缺少 PV 发电, 不足的电量需要通过外购电力和 BT 补充。在 23:00—24:00 电价平时段, 此时各类负荷逐渐下降, GT 发电量也逐步下降, WHB 基本满足热负荷需求, 然后将富裕热量提供给 AR 制冷。

4.4 碳交易价格和奖励系数对 EH 低碳优化的影响

图 12 为场景 4 和本场景下碳交易价格变化对系统碳排放量的影响。由图可见, 随着单位碳交易价格的增加, 碳交易成本在总成本的比重上升, 则会使系统加强对碳排放量的约束, 使碳排放量逐渐减少。此外, 本文策略下的碳排放量低于场景 4, 原因是奖惩阶梯碳交易机制比传统碳交易机制更具有减排优势, 能更好地限制系统碳排放量。

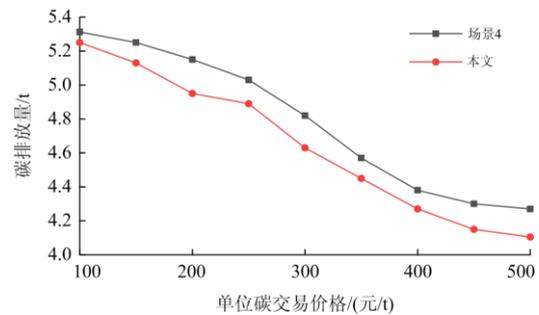


图 12 碳交易价格对碳排放量的影响

Fig. 12 Impact of carbon trading costs on carbon emissions

图 13 为不同奖励系数下碳交易成本随单位碳交易价格的变化情况。由图可知: 当系统碳交易成本大于 0 时, 即 EHO 需要承担碳交易费用时, 奖励系数对碳交易成本没有影响; 相反, 当 EHO 开始获得碳交易收益时, 奖励系数越大, 碳交易收益越多, 即系统碳排放量下降的越显著, 其原因是 EHO 获得的碳交易收益增加, 使碳排放量较低的 CCHP 机组和 GB 出力增加, 进一步减少了外购电量。此外, 当单位碳交易价格增加到 450 元/t 左右时, 碳交易成本下降趋势变缓慢, 说明 CCHP 机组基本已经达到恒定值, 若继续增加单位碳交易价格, 系统碳排放量将不再明显下降。

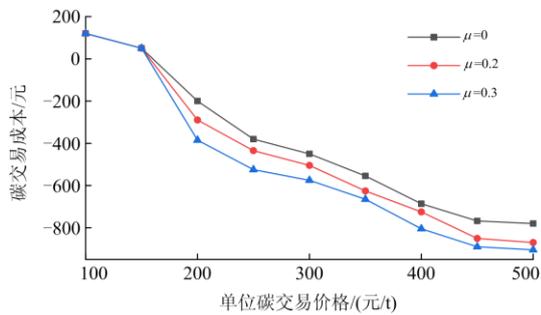


图 13 不同奖励系数对碳交易成本的影响

Fig. 13 Effects of different reward coefficients on carbon trading costs

5 结论

本文基于 Stackelberg 博弈理论, 提出了考虑精细化 IDR 模型和奖惩阶梯型碳交易机制的 EH 主从博弈优化策略。通过算例验证, 得到如下结论:

1) 精细化的楼宇 IDR 模型综合考虑了蓄热能力、室外/室内温度和太阳辐射等多种热量扰动因素, 并考虑了用户因参与 IDR 导致的室温波动, 可以更准确地描述用户在实际生活中的用能特性和可调度特性, 充分发挥需求侧资源的响应灵活性。

2) 在供需博弈模型中引入了奖惩阶梯型碳交易机制, 分析了单位碳交易价格和不同奖励系数对 EH 优化调度的影响。仿真结果表明, 所提模型不仅能够有效减少系统的碳排放量, 还能兼顾双方主体利益, 实现了 EH 经济性和环保性的双赢。

在后续的研究中, 需进一步考虑博弈模型中源荷不确定性以及 IDR 资源在不同时间尺度上的调度特性对 EH 经济运行的影响。

参考文献

[1] 何伟, 陈波, 曾伟, 等. 面向绿色生态乡镇的综合能源系统关键问题及展望[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 77-86, 93.
HE Wei, CHEN Bo, ZENG Wei, et al. Key problems and prospects of integrated energy system for green ecological townships[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 77-86, 93.

[2] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 1-11.
CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 1-11.

[3] LI J, XUE Y, TIAN L, et al. Research on optimal configuration strategy of energy storage capacity in

grid-connected microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 389-396.

- [4] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52-61.
ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.
- [5] MANSOURI S A, AHMARINEJAD A, JAVADI M S, et al. Two-stage stochastic framework for energy hubs planning considering demand response programs[J]. Energy, 2020, 206.
- [6] DOLATABADI A, MOHAMMADI-I B, ABAPOUR M, et al. Optimal stochastic design of wind integrated energy hub[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2379-2388.
- [7] 林紫菡, 刘祚宇, 文福拴, 等. 计及 N-1 安全准则的能量枢纽优化配置[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 137-143.
LIN Zihan, LIU Zuoyu, WEN Fushuan, et al. Optimal placement of energy hubs considering N-1 security criterion[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 137-143.
- [8] 白凯峰, 顾洁, 彭虹桥, 等. 融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 133-141.
BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, et al. Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 134-141.
- [9] 王贵龙, 赵庆生, 梁定康, 等. 计及机会约束规划的园区能量枢纽经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 21-29.
WANG Guilong, ZHAO Qingsheng, LIANG Dingkan, et al. Economic dispatch of an energy hub in a business park considering chance constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 21-29.
- [10] 蒋文超, 严正, 曹佳, 等. 计及柔性负荷的能源枢纽多目标综合优化调度[J]. 电测与仪表, 2018, 55(13): 31-39.
JIANG Wenchao, YAN Zheng, CAO Jia, et al. Multi-objective comprehensive optimal dispatch of energy hub considering flexible load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(13): 31-39.
- [11] 程杉, 魏昭彬, 黄天力, 等. 基于多能互补的热电联供型微网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020,

- 48(11): 166-174.
- CHENG Shan, WEI Zhaobin, HUANG Tianli, et al. Multi-energy complementation based optimal operation of a microgrid with combined heat and power[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 166-174.
- [12] GU W, LU S, WU Z, et al. Residential CCHP microgrid with load aggregator: operation mode, pricing strategy, and optimal dispatch[J]. Applied Energy, 2017, 205: 173-186.
- [13] 邹云阳, 杨莉, 冯丽, 等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 13-19.
- ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, et al. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 13-19.
- [14] JIN X, MU Y, JIA H, et al. Dynamic economic dispatch of a hybrid energy microgrid considering building based virtual energy storage system[J]. Applied Energy, 2016, 194: 386-398.
- [15] LIU N, HE L, YU X, et al. Multiparty energy management for grid-connected microgrids with heat-and electricity-coupled demand response[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(5): 1887-1897.
- [16] WEI F, JING Z X, PETER Z, et al. A Stackelberg game approach for multiple energies trading in integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2017, 200: 315-329.
- [17] 张立辉, 戴谷禹, 聂青云, 等. 碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 154-163.
- ZHANG Lihui, DAI Guyu, NIE Qingyun, et al. Economic dispatch model of virtual power plant considering electricity consumption under a carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 154-163.
- [18] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
- WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16.
- [19] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 等. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 10-17.
- CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 10-17.
- [20] 张晓辉, 刘小琰, 钟嘉庆. 考虑奖惩阶梯型碳交易和电-热转移负荷不确定性的综合能源系统规划[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6132-6142.
- ZHANG Xiaohui, LIU Xiaoyan, ZHONG Jiaqing. Integrated energy system planning considering a reward and punishment ladder-type carbon trading and electric-thermal transfer load uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6132-6142.
- [21] CRISTOFARI C, NORVAISIENE R, CANALETTI J L, et al. Innovative alternative solar thermal solutions for housing in conservation-area sites listed as national heritage assets[J]. Energy and Buildings, 2015, 89: 123-131.
- [22] 楚晓琳, 杨东. 不确定因素下建筑集群冷热电联供系统多目标优化[J]. 控制与决策, 2020, 35(1): 195-204.
- CHU Xiaolin, YANG Dong. Multi-objective programming for building clusters combined cooling, heating and power system under uncertainty[J]. Control and Decision, 2020, 35(1): 195-204.
- [23] 栗然, 孙帆, 刘会兰, 等. 考虑能量特性差异的用户级综合能源系统混合时间尺度经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3615-3624.
- LI Ran, SUN Fan, LIU Huilan, et al. Economic dispatch with hybrid time-scale of user-level integrated energy system considering differences in energy characteristics[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3615-3624.
- [24] 顾洁, 白凯峰, 时亚军. 基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3119-3134.
- GU Jie, BAI Kaifeng, SHI Yajun. Optimized operation of regional integrated energy system based on multi-agent master-slave game optimization interaction mechanism[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3119-3134.

收稿日期: 2021-07-09; 修回日期: 2021-10-08

作者简介:

王 瑞(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统能量优化管理; E-mail: 1094888438@qq.com

程 杉(1981—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行优化与控制、智能电网能量管理与优化、智能计算及其应用等方向的研究; E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

刘 焯(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网需求响应策略。E-mail: liuye18734849203@163.com

(编辑 葛艳娜)