

基于电动汽车的双层低碳定价机制研究

史亚峰¹, 党亚峥¹, 薛中会²

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 上海出版印刷高等专科学校 信息与智能工程学院, 上海 200093)

摘要: 为协调主体-从体之间的利益关系, 以能源系统运营商为主体, 负荷聚集商、电动汽车充电站为从体构建能源系统运营商-负荷聚集商(电动汽车充电站)双层优化模型。提出一种多因素定价机制, 引导下层可调度资源参与上层优化, 实现多利益主体互利共赢。基于负荷不满意系数, 构建负荷需求响应效用模型, 实现负荷综合需求响应在经济性和满意度之间的平衡。此外, 引入阶梯型碳交易机制和碳捕集设备, 同时考虑新能源向碳捕集设备供电的协调运行策略, 进一步提升能源系统低碳运行能力。最后, 采用 CPLEX 求解器对双层优化模型进行迭代求解。算例结果表明, 所提定价机制降低了上层碳排放量和下层负荷中断功率, 降低幅度分别为 18.98% 和 14.99%, 验证了所提模型及方法的有效性。

关键词: 双层优化模型; 多因素定价机制; 不满意系数; 碳捕集; 电动汽车充电站

中图分类号: TM 73 **文献标志码:** A

Bi-level low-carbon pricing mechanism based on electric vehicles

SHI Yafeng¹, DANG Yazheng¹, XUE Zhonghui²

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Information and Intelligent Engineering, Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to coordinate the interest relationship between multiple subjects, the bi-level optimization model took the energy system operator as the main body, the load aggregation operator and the electric vehicle charging station as the main body. A multi-factor pricing mechanism was proposed to guide the lower level to participate in the upper optimization, so as to achieve mutual benefit and win-win results of multiple stakeholders. Secondly, based on the load dissatisfaction coefficient, the load demand response utility model was constructed to realize the trade-off between economy and satisfaction of the comprehensive load demand response. In addition, the stepped carbon

收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72071130)

第一作者: 史亚峰(1998—), 男, 硕士研究生。研究方向: 电动汽车的能源系统优化。E-mail: shiyafeng6@163.com

通信作者: 党亚峥(1973—), 女, 副教授。研究方向: 智能优化、图像重建。E-mail: jgdyz@163.com

引文格式: 史亚峰, 党亚峥, 薛中会. 基于电动汽车的双层低碳定价机制研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(4): 471-480.

Citation: SHI Yafeng, DANG Yazheng, XUE Zhonghui. Bi-level low-carbon pricing mechanism based on electric vehicles[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(4): 471-480.

trading mechanism and carbon capture equipment were introduced, and the coordinated operation strategy of new energy power supply to carbon capture equipment was considered to further improve the low-carbon operation capacity of the energy system. Finally, CPLEX was used to iteratively solve the bi-level optimization model. The results show that the proposed pricing mechanism reduces the upper carbon emission and the lower load interruption power, by 18.98% and 14.99% respectively, which verifies the effectiveness of the proposed model and method.

Keywords: *bi-level optimization model; multi-factor pricing mechanism; dissatisfaction coefficient; carbon capture; electric vehicle charging station*

针对气候和能源短缺问题,传统电力系统正在向低碳绿色的综合能源系统转换^[1-2]。综合能源系统可以更大限度地消纳新能源发电,同时满足多种类型负荷需求^[3]。因此,建设综合能源系统已成为我国实现碳中和目标的必由之路。

国内外学者对能源系统负荷需求响应开展了大量的研究。Bukhsh等^[4]以网络损失最小为优化目标,同时考虑配电网节点负荷需求响应特性对配电网稳定经济的调节,数据分析表明,所提方法提升了配电网对新能源发电的消纳能力以及在维持配电网稳定经济运行方面的有效性。Wang等^[5]以能源系统运行收益最大化为优化目标,制定负荷需求响应方法,并采用对偶近似算法求解,数据分析表明,需求响应的加入进一步提升了多主体利益。随着电动汽车的普及,电动汽车作为需求侧参与的比重越来越大,很多学者对电动汽车在综合能源系统中的优化问题也开展了研究。蒋俊峰等^[6]提出了一种基于供求曲线的电动汽车充放电分时电价定价方法,并在制定充放电价格时考虑充电站的空闲率,以实现充电站和用户最大利益。李军祥等^[7]提出参与碳交易市场和调峰辅助服务市场的电动汽车充放电优化模型,实现电动汽车和电网的互利共赢。但上述文献仅考虑了电动汽车响应,对于如何协调综合能源系统主体与其他从体之间利益关系的研究还不够深入。为解决该问题,叶宇静等^[8]构建考虑主从博弈的综合能源系统优化模型,协调能源侧和负荷侧之间的关系。米阳等^[9]提出一种考虑风光不确定和碳交易的综合能源双层博弈优化模型,实现双层之间的协调运行。顾洁等^[10]提出一种综合能源系统主从体互动机制,实现主从体之间的均衡。上述文献考虑了其他从体与综合能源系统的博弈,但对上下层之间的定价机制关注较少,所提定价方式对运行条件等因素较为敏感。基于此,Li等^[11]

和张程等^[12]结合需求弹性理论,对综合能源系统电价定价机制进行建模,考虑电动汽车充放电计划对定价机制的影响。程宇等^[13]通过制定综合能源系统电价和热价,有效解决了热负荷接入综合能源系统的利益协调问题。但是,上述文献考虑定价的设备和影响定价的因素较少,在较为复杂的综合能源系统中,该方法不够完善。为此,本文提出一种考虑碳排放、负荷需求响应以及电动汽车充放电行为的定价模型,实现多利益主体互利共赢。

作为影响价格制定的重要因素,电动汽车、负荷需求响应在参与能源系统调度方面扮演了重要的角色。Gao等^[14]构建考虑负荷需求响应特性的能源系统优化调度模型,旨在最大限度地提升综合能源系统运行经济性和调控能力。牛文娟等^[15]构建考虑负荷需求响应特性的综合能源系统经济优化模型,以降低系统成本。Yang等^[16]构建考虑电动汽车充电行为的综合能源系统优化模型,缓解电动汽车无序充电对综合能源系统负荷峰谷的影响。Li等^[17]提出一种含电动汽车的综合能源系统双层优化模型,实现上下层互利共赢。然而,上述文献对多类型可调度资源作为下层参与综合能源系统运行的研究较少。

此外,为提升系统运行低碳性,王利猛等^[18]提出一种考虑需求响应和阶梯碳交易机制的综合能源系统优化策略。Guo等^[19]提出一种电动汽车、负荷需求响应以及碳捕集联合运行模型,实现综合能源系统低碳运行。但是,上述文献碳捕集设备在捕集二氧化碳的同时,还会因为消耗煤或燃气产生二氧化碳。为解决该问题,张美霞等^[20]提出了一种光伏参与碳捕集运行的新模式,进一步降低了系统碳排放量。然而,现有研究对新能源-碳捕集联合运行方式与阶梯型碳交易结合的能源系统低碳模式关注较少。综上,针对现有文献

的不足, 本文提出以下创新思路:

a. 以能源系统运营商为主体, 负荷聚集商、电动汽车充电站为从体, 构建综合能源系统-负荷聚集商(电动汽车充电站)(integrated energy system optimization and load aggregator(electric vehicle charging stations), IEO-LA(EVCS))双层优化模型。采用迭代的方式对双层模型进行求解, 同时引入联合最优判别机制选取最优协调解。

b. 结合能源系统碳排放情况、需求响应计划以及电动汽车充电站运行计划等因素, 提出一种动态定价机制, 引导下层电动汽车充电站参与上层能源系统运营商优化, 实现多利益主体互利共赢。

c. 引入阶梯型碳交易机制和碳捕集设备, 同时考虑风光发电向碳捕集设备供电的协调运行策略, 进一步提升能源系统低碳运行能力和系统运行的经济性。

1 IEO-LA(EVCS)建模

1.1 IEO-LA(EVCS)能流结构

IEO-LA(EVCS)的能流结构如图1所示, 系统中能源侧包括风机、光伏、燃气轮机等设备, 用以维持供需平衡。

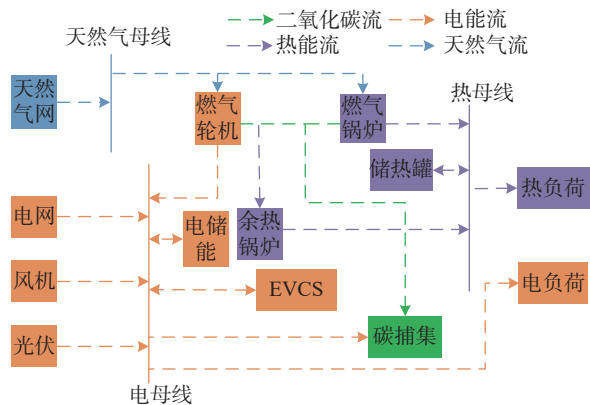


图1 IEO-LA(EVCS)能流结构图

Fig.1 IEO-LA(EVCS) energy flow structure diagram

1.2 EVCS 特性模型

电动汽车到达充电站时间的概率密度函数可以描述为^[20]

$$f_{in}(t_{in}) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{in}} \exp\left[-\frac{(t_{in} + 24 - \mu_{in})^2}{2\sigma_{in}^2}\right], & 0 < t_{in} \leq \mu_{in} - 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{in}} \exp\left[-\frac{(t_{in} - \mu_{in})^2}{2\sigma_{in}^2}\right], & \mu_{in} - 12 < t_{in} \leq 24 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_{in} 表示EV(electric vehicle)到达充电站的时间; σ_{in} 和 μ_{in} 分别为电动汽车到达充电站时间的概率密度函数的标准差和期望值。

电动汽车充电需求与行驶距离相关, 一般认为服从基于对数正态分布的概率密度函数^[11]。

$$f_M(M_d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_M M_d} \exp\left[-\frac{(\ln M_d - \mu_M)^2}{2\sigma_M^2}\right] \quad (2)$$

式中: M_d 为电动汽车日行驶里程数; σ_M 和 μ_M 分别为标准差和期望值。

1.3 定价机制模型

上层 IEO(integrated energy operator)定价机制会受到上层新能源分布、碳排放水平和下层 LA(load aggregator)电热负荷需求响应以及 EVCS 充放电计划等因素的影响^[20], 具体见式(3)和式(4)。

$$\lambda_{CO_2,t} = \begin{cases} \gamma_{CO_2} \left(\frac{E_{CO_2,t} - E_{c,t} - E_{CCS,t}}{\nu} \right), & 0 \leq E_{CO_2,t} - E_{c,t} - E_{CCS,t} \leq \nu \\ \gamma_{CO_2} \left(1 + \frac{E_{CO_2,t} - E_{c,t} - E_{CCS,t} - \nu}{\nu} \right), & \nu \leq E_{CO_2,t} - E_{c,t} - E_{CCS,t} \leq 2\nu \\ \gamma_{CO_2} \left(2 + \frac{E_{CO_2,t} - E_{c,t} - E_{CCS,t} - 2\nu}{\nu} \right), & E_{CO_2,t} - E_{c,t} - E_{CCS,t} \geq 2\nu \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\lambda_{CO_2,t}$ 为 t 时刻碳排放量折算成本系数, $t=1, 2, \dots, T$; γ_{CO_2} 为碳排放因素价格调节系数; ν 为碳排放区间长度; $E_{c,t}$ 和 $E_{CCS,t}$ 分别为碳配额和碳捕集量; $E_{CO_2,t}$ 为二氧化碳产生量。

$$\begin{cases} \lambda_{e,t} = \gamma_{e,IL} \frac{P_{e,IL,t}}{P_{e,0,t}} \\ \lambda_{h,t} = \gamma_{h,IL} \frac{P_{h,IL,t}}{P_{h,0,t}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{e,IL,t}$ 和 $P_{e,0,t}$ 分别为电负荷中断功率和初始功率; $P_{h,IL,t}$ 和 $P_{h,0,t}$ 分别为热负荷中断功率和初始功率; $\lambda_{e,t}$ 和 $\gamma_{e,IL}$ 分别为电负荷中断功率折算系数和价格调节系数; $\lambda_{h,t}$ 和 $\gamma_{h,IL}$ 分别为热负荷中断功率折算系数和价格调节系数。

本文采用不同设备独立定价的方式对 IEO 能源设备进行定价, 共确立了5种价格。

a. 新能源价格

新能源价格可以表示为

$$\begin{cases} \omega_{DG_price,t} = \omega_{DG_price,0} + \gamma_{DG} \frac{P_{DG,t}}{P_{DG,max}} - \lambda_{e,t} \\ \omega_{DG_price,0} \leq \omega_{DG_price,t} \leq \omega_{DG_price,max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\omega_{DG_price,t}$ 为新能源发电向下层 LA 和 EVCS 售电的价格; γ_{DG} 为新能源价格调节系数; $P_{DG,t}$ 为新能源功率; $P_{DG,max}$ 为新能源功率上限; $\omega_{DG_price,0}$ 为新能源发电成本; $\omega_{DG_price,max}$ 为新能源发电成本上限。

b. 燃气轮机价格

燃气轮机价格可以表示为

$$\begin{cases} \omega_{GT_price,t} = \frac{q_{price,t}}{V_{gas}\eta_{GT}} + \gamma_{GT} \frac{P_{GT,t}}{P_{GT,max}} - \lambda_{e,t} + \lambda_{CO_2,t} \\ \frac{q_{price,t}}{V_{gas}\eta_{GT}} \leq \omega_{GT_price,t} \leq \omega_{GT_price,max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\omega_{GT_price,t}$ 为燃气轮机向下层 LA 和 EVCS 售电的价格; $q_{price,t}$ 和 V_{gas} 分别为天然气价格和热值; γ_{GT} 为燃气轮机价格调节系数; $P_{GT,t}$ 、 $P_{GT,max}$ 分别为燃气轮机功率和其最大值; η_{GT} 为燃气轮机效率; $\omega_{GT_price,max}$ 为燃气轮机价格上限。

c. 电网价格

电网价格可以表示为

$$\begin{cases} \omega_{grid_price,t} = \omega_{rt_price,t} + \gamma_{grid} \frac{P_{grid,t}}{P_{grid,max}} - \lambda_{e,t} \\ \omega_{rt_price,t} \leq \omega_{grid_price,t} \leq \omega_{grid_price,max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\omega_{grid_price,t}$ 为 IEO 制定的电网售电价格; $\omega_{rt_price,t}$ 和 $\omega_{grid_price,max}$ 分别为分时电价和电网价格上限; γ_{grid} 为电网价格调节系数; $P_{grid,t}$ 和 $P_{grid,max}$ 分别为购电功率和购电功率上限。

d. 燃气锅炉热价

燃气锅炉热价可以表示为

$$\begin{cases} \omega_{GB_price,t} = \frac{q_{price,t}}{V_{gas}\eta_{GB}} + \gamma_{GB} \frac{P_{GB,t}}{P_{GB,max}} - \lambda_{h,t} + \lambda_{CO_2,t} \\ \frac{q_{price,t}}{V_{gas}\eta_{GB}} \leq \omega_{GB_price,t} \leq \omega_{GB_price,max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\omega_{GB_price,t}$ 为燃气锅炉向 LA 售热的价格; γ_{GB} 为燃气锅炉价格调节系数; $\omega_{GB_price,max}$ 为燃气锅炉价格制定上限; η_{GB} 为燃气锅炉气-热转换效率; $P_{GB,t}$ 和 $P_{GB,max}$ 分别为燃气锅炉输出功率和功率上限。

e. 余热锅炉价格

余热锅炉热价可以表示为

$$\begin{cases} \omega_{WHB_price,t} = \omega_{price,WHB,t} + \gamma_{WHB} \frac{P_{WHB,t}}{P_{WHB,max}} - \lambda_{h,t} \\ \omega_{price,WHB,t} \leq \omega_{WHB_price,t} \leq \omega_{WHB_price,max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\omega_{WHB_price,t}$ 和 γ_{WHB} 分别为余热锅炉热价和热价调节系数; $\omega_{price,WHB,t}$ 和 $P_{WHB_price,max}$ 分别为余热锅炉基础价格和价格上限; $P_{WHB,t}$ 和 $P_{WHB,max}$ 分别为余热锅炉热功率和功率上限。

2 IEO-LA(EVCS)双层优化模型

2.1 上层 IEO 优化模型

上层 IEO 运行成本可以归纳为 7 部分: (a) 燃气轮机消耗天然气成本和启停成本; (b) 燃气锅炉消耗天然气成本; (c) IEO 向上级电网购电成本; (d) 燃气轮机、燃气锅炉碳排放成本; (e) 下层 LA 负荷需求响应成本; (f) EVCS 向上层 IEO 放电成本; (g) EVCS 向下层 LA 和 EVCS 售电、售热收益。一个调度周期的运行成本 C_{IEO} 可以表示为

$$\min C_{IEO} = \sum_{t=1}^T (C_{GT,t} + C_{GB,t} + C_{grid,t} + C_{CO_2,t} + C_{IDR,t} + C_{EVCS,sell,t} - C_{sell,t}) \quad (10)$$

式中: C_{IEO} 为上层 IEO 运行净成本(正值为成本、负值为收益); $C_{GT,t}$ 、 $C_{GB,t}$ 、 $C_{grid,t}$ 和 $C_{CO_2,t}$ 分别为燃气轮机运行成本、燃气锅炉运行成本、IEO 购电成本以及碳排放成本; $C_{IDR,t}$ 、 $C_{EVCS,sell,t}$ 和 $C_{sell,t}$ 分别为 LA 需求响应成本、EVCS 售电成本以及 IEO 售电收益。上述成本可具体描述为

$$\begin{cases} C_{GT,t} = \frac{\zeta_g}{Q_{LHV}\eta_{GT}} P_{GT,t} + \kappa S_t \\ C_{GB,t} = \frac{\zeta_g}{Q_{LHV}\eta_{GB}} P_{GB,t} \\ C_{grid,t} = \omega_{rt_price,t} P_{IEO,grid,t} \\ C_{CO_2,t} = \omega_{CO_2,k} (E_{GT,t} + E_{GB,t}) \\ C_{IDR,t} = (\alpha_e P_{e,IL,t}^2 + \mu_e P_{e,IL,t}) + (\alpha_h P_{h,IL,t}^2 + \mu_h P_{h,IL,t}) \\ C_{EVCS,sell,t} = \omega_{sell_price,t} P_{EVCS,DC,t} \\ C_{sell,t} = \omega_{grid_price,t} (P_{grid,LA,t} + P_{grid,EVCS,t}) + \omega_{GT_price,t} (P_{GT,LA,t} + P_{GT,EVCS,t}) + \omega_{DG_price,t} (P_{DG,LA,t} + P_{DG,EVCS,t}) + \omega_{GB_price,t} P_{GB,LA,t} + \omega_{WHB_price,t} P_{WHB,LA,t} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{GT,t}$ 和 $C_{GT,t}$ 分别为燃气轮机输出功率和燃料成本; ζ_g 和 Q_{LHV} 分别为天然气价格和天然气热值; κ 为燃气轮机开机成本系数; S_t 为 t 时段燃气轮机的启停变量, 为 0-1 变量; $P_{IEO,grid,t}$ 为 IEO 向电网购电功率; $\omega_{CO_2,k}$ 为阶梯碳交易价格; $E_{GT,t}$ 和

$E_{GB,t}$ 分别为燃气轮机和燃气锅炉碳交易量; α_e 和 α_h 分别电、热负荷需求响应不满意度系数^[21]; μ_e 和 μ_h 分别为电、热负荷中断成本系数; $\omega_{\text{sell_price},t}$ 和 $P_{\text{EVCS,DC},t}$ 分别为EVCS向上层IEO的售电价格和放电功率; $\omega_{\text{grid_price},t}$ 、 $\omega_{\text{GT_price},t}$ 、 $\omega_{\text{DG_price},t}$ 、 $\omega_{\text{GB_price},t}$ 和 $\omega_{\text{WHB_price},t}$ 分别为IEO制定的电网电价、燃气轮机电价、新能源电价、燃气锅炉热价以及余热锅炉热价。 $P_{\text{GT,LA},t}$ 、 $P_{\text{grid,LA},t}$ 和 $P_{\text{DG,LA},t}$ 分别为下层LA消耗燃气轮机、电网以及新能源功率; $P_{\text{GB,LA},t}$ 和 $P_{\text{WHB,LA},t}$ 分别为下层LA消耗燃气锅炉和余热锅炉热功率。

上层IEO要保证下层LA和EVCS供需平衡,包括电功率平衡(LA和EVCS电功率平衡)和热功率平衡,具体如下:

$$\begin{cases} P_{\text{GT,LA},t} + P_{\text{grid,LA},t} + P_{\text{DG,LA},t} + \eta_{\text{ESS}} P_{\text{ESS,DC},t} = \\ P_{e,0,t} + P_{e,\text{TSL},t} - P_{e,\text{IL},t} + P_{\text{ESS,CH},t} \\ P_{\text{GT,EVCS},t} + P_{\text{grid,EVCS},t} + P_{\text{DG,EVCS},t} = \\ \eta_{\text{EV}} P_{\text{EV,DC},t} + P_{\text{EV},t} \\ P_{\text{GB,LA},t} + P_{\text{WHB,LA},t} + \eta_{\text{HSS}} P_{\text{HSS,DC},t} = \\ P_{h,0,t} + P_{h,\text{TSL},t} - P_{h,\text{IL},t} + P_{\text{HSS,CH},t} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{ESS,CH},t}$ 和 $P_{\text{ESS,DC},t}$ 分别为电储能充放电功率; η_{ESS} 为电储能充放电系数; $P_{\text{EV,DC},t}$ 和 $P_{\text{EV},t}$ 分别为电动汽车向上层IEO放电功率和电动汽车充电需求; η_{EV} 为电动汽车效率系数; $P_{\text{HSS,CH},t}$ 和 $P_{\text{HSS,DC},t}$ 分别为储热罐蓄放热功率; η_{HSS} 为储热罐蓄放热系数。

IEO-LA(EVCS)模型除等式约束外,还包括不等式约束,主要为各设备的运行约束(包括燃气轮机、燃气锅炉、余热锅炉、新能源发电等),具体如下:

$$\begin{cases} U_{x,t} P_{x,\min} \leq P_{x,t} \leq U_{x,t} P_{x,\max} \\ \Delta P_{x,\min} \leq P_{x,t+1} - P_{x,t} \leq \Delta P_{x,\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: x 代表设备类型; $P_{x,\max}$ 和 $P_{x,\min}$ 分别为设备 x 输出的上、下限; $P_{x,t}$ 和 $U_{x,t}$ 分别为设备 x 输出功率和状态变量; $\Delta P_{x,\max}$ 和 $\Delta P_{x,\min}$ 分别为设备 x 爬坡功率的上、下限。

2.2 下层优化模型

a. LA 优化模型

下层优化模型由LA和EVCS两部分组成,LA运行成本包括两个部分:(a)下层LA向上层IEO的购能成本(购电成本和购热成本);(b)LA负荷中断产生的补偿收益,具体如下:

$$\begin{aligned} \min C_{\text{LA}} = & \sum_{t=1}^T \left(\omega_{\text{grid_price},t} P_{\text{grid,LA},t} + \omega_{\text{GT_price},t} P_{\text{GT,LA},t} + \right. \\ & \omega_{\text{DG_price},t} P_{\text{DG,LA},t} + \omega_{\text{GB_price},t} P_{\text{GB,LA},t} + \\ & \omega_{\text{WHB_price},t} P_{\text{WHB,LA},t} - \left(\alpha_e P_{e,\text{IL},t}^2 + \mu_e P_{e,\text{IL},t} \right) - \\ & \left. \left(\alpha_h P_{h,\text{IL},t}^2 + \mu_h P_{h,\text{IL},t} \right) \right) \end{aligned} \quad (14)$$

LA运行约束主要为负荷需求响应约束(包括电负荷和热负荷需求响应约束),具体可以描述为^[22]

$$\begin{cases} P_{z,t} = P_{z,0,t} + P_{z,\text{TSL},t} - P_{z,\text{IL},t} \\ \sum_{t=1}^T P_{z,\text{TSL},t} = 0 \\ P_{z,\text{TSL},\min} < P_{z,\text{TSL},t} < P_{z,\text{TSL},\max} \\ 0 \leq P_{z,\text{IL},t} \leq \sigma_z P_{z,0,t} \end{cases} \quad (15)$$

式中: z 代表负荷类型; $P_{z,\text{TSL},t}$ 和 $P_{z,\text{IL},t}$ 分别为 z 类负荷时移功率和中断功率; $P_{z,0,t}$ 为 z 类负荷初始功率; $P_{z,\text{TSL},\max}$ 和 $P_{z,\text{TSL},\min}$ 分别为 z 类负荷时移功率的上、下限; σ_z 为 z 类负荷需求响应占比系数。

本文设置满意度约束,防止负荷过度响应,具体如下:

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{P_{z,\text{IL},\max} \times 100}{P_{z,0,t}} \right) & \leq U_{s,z,t} \leq \\ \left(1 - \frac{P_{z,\text{IL},\min} \times 100}{P_{z,0,t}} \right) & \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $U_{s,z,t}$ 为 z 类负荷满意度指标(百分数)。

b. EVCS 优化模型

下层EVCS运行成本包括:(a)EVCS向上层IEO购电成本(包括向电网、燃气轮机以及新能源的购电成本);(b)EVCS通过V2G技术向上层IEO售电的收益,具体可以描述为

$$\begin{aligned} \min C_{\text{EVCS}} = & \sum_{t=1}^T \left(\omega_{\text{grid_price},t} P_{\text{grid,EVCS},t} + \right. \\ & \omega_{\text{GT_price},t} P_{\text{GT,EVCS},t} + \omega_{\text{DG_price},t} P_{\text{DG,EVCS},t} - \\ & \left. \omega_{\text{sell_price},t} P_{\text{EVCS,DC},t} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

此外, EVCS运行约束可以描述为^[23]

$$\begin{cases} S_{\text{EV},t+1} = S_{\text{EV},t} + (\eta_{\text{EV,CH}} P_{\text{EV,CH},t} - \\ P_{\text{EV,DC},t} / \eta_{\text{EV,DC}}) \Delta t \\ 0 \leq \sum_{t=1}^N P_{\text{EV,CH},n,t} \leq P_{\text{EV,cp,CH}} N_{\text{B,pos,max}} \\ 0 \leq \sum_{t=1}^N P_{\text{EV,DC},n,t} \leq \\ \min(P_{\text{EV,cp,DC}} N_{\text{B,pos,V2G,max}}, P_{\text{IEO,EVCS,max}}) \\ 0 \leq S_{\text{EV},t} \leq S_{\text{EV,max}} \\ N_{\text{EV,CH},t} \leq N_{\text{B,pos,max}} \\ N_{\text{EV,DC},t} \leq N_{\text{B,pos,V2G,max}} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $S_{EV,t}$ 为单台 EV 充电容量； $P_{EV,CH,t}$ 和 $P_{EV,DC,t}$ 分别为单台 EV 充放电功率； $\eta_{EV,CH}$ 和 $\eta_{EV,DC}$ 分别为单台 EV 充放电效率系数； $P_{EV,CH,n,t}$ 为第 n 台 EV 充电功率； $P_{EV,cp,CH}$ 为单台充电站充电功率； $N_{B,pos,max}$ 为 EVCS 充电站最大数量； $P_{EV,cp,DC}$ 为单台充电桩放电功率； $N_{B,pos,V2G,max}$ 为 EVCS 充电站 V2G 充电桩数量； $N_{EV,CH,t}$ 和 $N_{EV,DC,t}$ 分别为充电、放电电动汽车数量。

2.3 联合最优机制

本文采用上下层迭代的方式求解 IEO-LA (EVCS)双层优化模型，充分协调上下层的利益关系，保证所求结果具有实际工程意义。计算公式为

$$\begin{cases} F_{JO} = \min \sqrt{\lambda_{up}(C_{IEO})^2 + \lambda_{low}(C_{LA} + C_{EVCS})^2} \\ \sqrt{\frac{\lambda_{up}}{\lambda_{low}}} = \frac{(C_{LA} + C_{EVCS})}{C_{IEO}} \end{cases} \quad (19)$$

式中： λ_{up} 和 λ_{low} 分别为上、下层成本权重系数，目的是防止上下层成本相差较多导致联合结果偏向于某一方； F_{JO} 为上、下层联合最优解。

基于式(19)确定好系数 λ_{up} 和 λ_{low} ，再将其代入至3个目标函数 C_{IEO} 、 C_{EVCS} 、 C_{LA} 中，最后联合迭代求解。联合求解流程如图2所示。

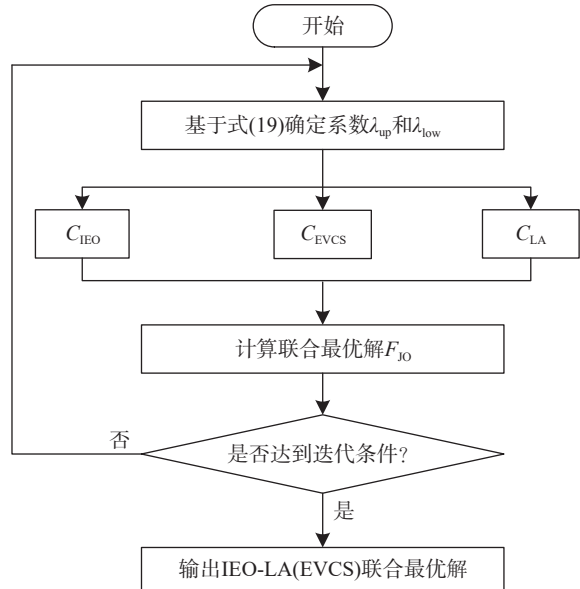


图2 IEO-LA(EVCS)联合求解流程
Fig.2 IEO-LA (EVCS) joint solution process

2.4 求解流程图

IEO-LA(EVCS)双层优化模型求解流程(图3)可以描述为：

步骤1 上层 IEO 模型初始化；构建上层 IEO

(综合能源运营商)优化模型；输入各供能设备(如发电机、储能设备等)的运行参数；采用 CPLEX 求解器求解；输出电、热能源的实时动态价格。

步骤2 下层 EVCS、LA 模型响应；构建 EVCS (电动汽车充电站)优化模型、LA(负荷聚合商)负荷特性模型；接收上层 IEO 发布的动态电价信号；采用 CPLEX 求解器求解；EVCS 侧将最优运行成本反馈至协调层；LA 侧输出负荷调整的权重系数至协调层。

步骤3 基于式(19)协调上下层结果，生成联合最优解；判断是否满足终止条件，若未满足，则将下层反馈结果返回步骤1，更新上层 IEO 模型重新求解；若满足，则进入最终输出。

3 算例分析

仿真计算均在 MATLAB R2017b 环境下进行，调用 IBM 下 CPLEX 求解器对模型进行求解。

3.1 基本数据

定价机制参数：电热负荷中断影响价格系数上限为 0.1 元，碳排放因素价格影响上限为 0.3 元，其中每个阶梯价格系数上限均为 0.1 元。碳排放价格方面：碳排放基价为 0.2 元/kg，价格增长幅度为 0.25 元/kg，碳排放系数为 0.4 kg/kW，碳配额为 0.156 kg/kW。负荷需求响应方面：下层 LA 电热负荷可时移上限均为 15%，可中断上限为 10%。EVCS 方面：EVCS 可容纳 100 辆电动汽车充电，其中电动汽车充电效率为 0.95。此外，上层 IEO 风光功率、下层 LA 电热负荷需求以及 EVCS 电动汽车初始充电曲线如图4所示。

3.2 联合求解分析

图5和图6分别展示了 IEO-LA(EVCS)最优电价和电系统最优运行计划。由图可以看出：新能源价格低于其他供电设备价格，同时在夜间时段(1:00—5:00)，电网电价略低于燃气轮机价格，引导下层 LA 和 EVCS 优先消耗上层新能源和低谷时段电网功率；另外，EVCS 在负荷高峰时段，向上层 IEO 放电获利。

图7和图8分别展示了 IEO-LA(EVCS)最优热价和热系统最优运行计划。由图可以看出：受成本影响，余热锅炉供热价格低于燃气锅炉供热价格；同时，IEO-LA(EVCS)优先消耗余热锅炉供

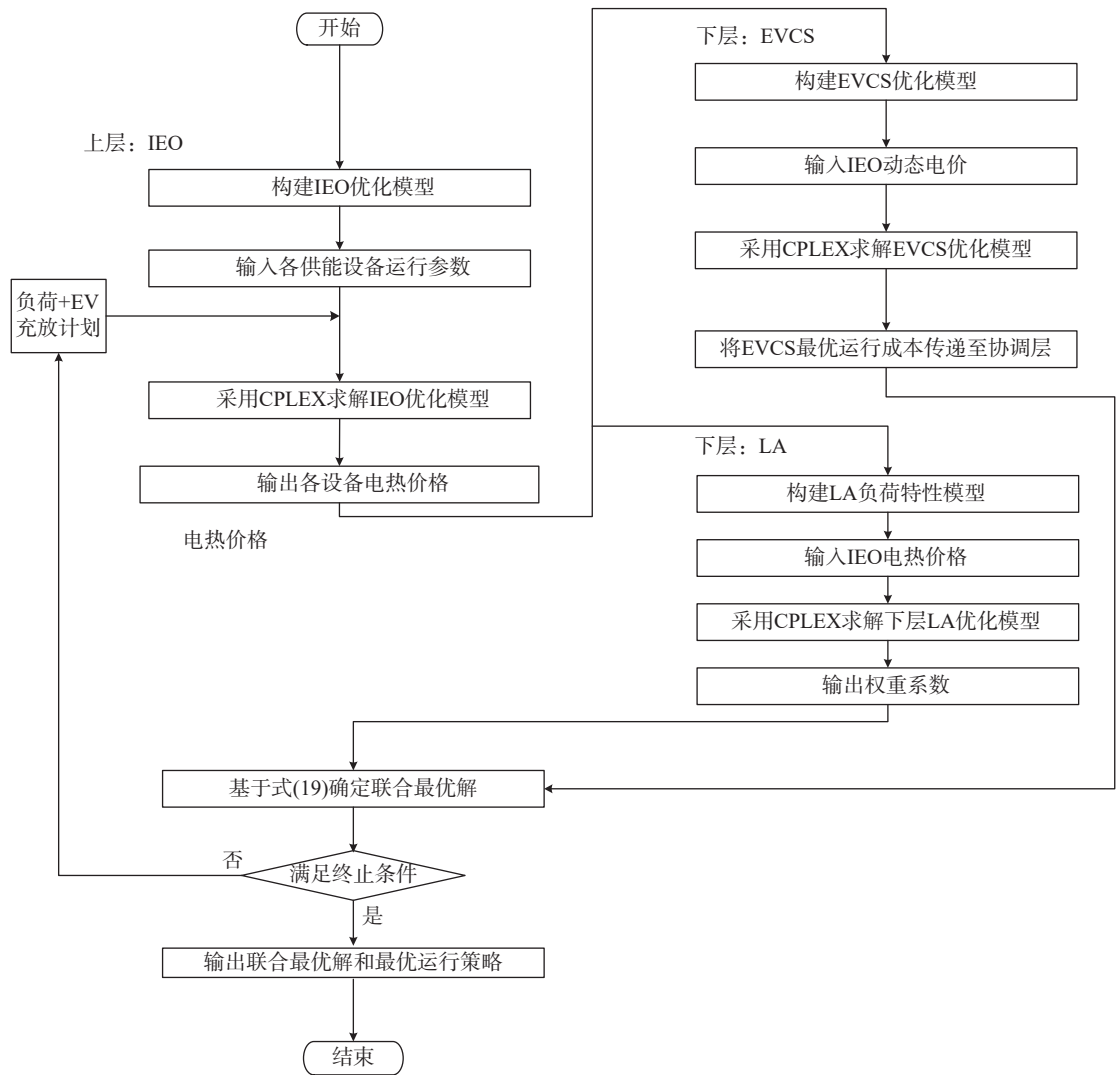


图 3 IEO-LA(EVCS)求解流程

Fig.3 IEO-LA (EVCS) solution process

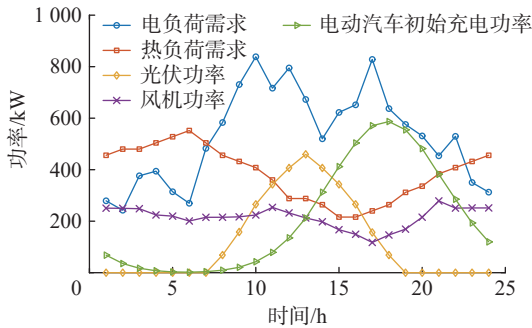


图 4 IEO-LA(EVCS)基础数据

Fig.4 IEO-LA (EVCS) basic data

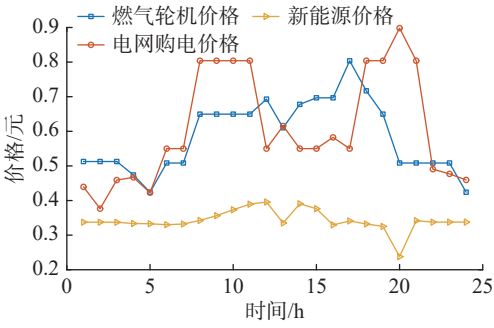


图 5 IEO-LA(EVCS)最优电价

Fig.5 IEO-LA (EVCS) optimal price

热量，当其供热量不足时，燃气锅炉弥补热功率差额，为热系统实现供需平衡。

3.3 定价机制分析

为验证所提 IEO-LA(EVCS)定价机制的有效性，设置 3 种定价机制进行对比分析，具体结果

见表 1。

场景 1 采用传统定价机制。传统定价机制是在 IEO 供电设备成本的基础上加一个固定成本系数，获取差额利润。该方法中上层 IEO 具有自主的定价权，不受下层因素的影响。

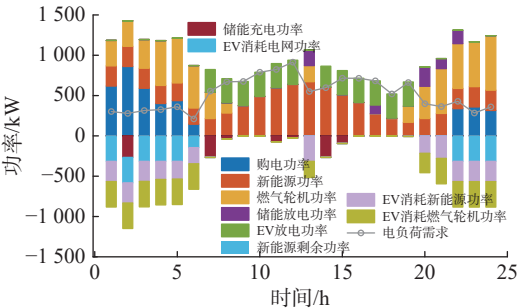


图6 IEO-LA(EVCS)电系统最优运行计划

Fig.6 IEO-LA (EVCS) optimal operation plan of electrical system

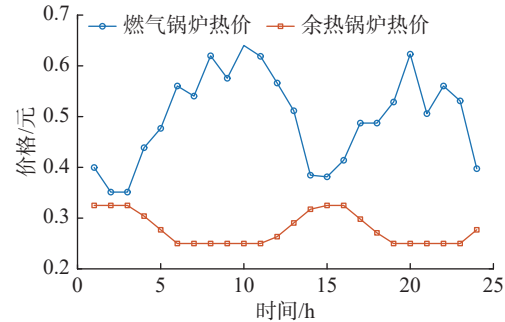


图7 IEO-LA(EVCS)最优热价

Fig.7 IEO-LA (EVCS) optimal heat price

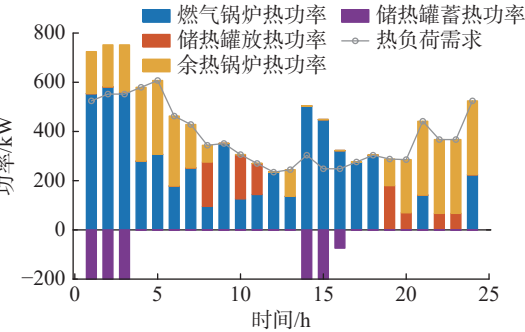


图8 IEO-LA(EVCS)热系统最优运行计划

Fig.8 IEO-LA (EVCS) optimal thermal system operation plan

表1 定价机制影响分析

Tab.1 Pricing mechanism impact analysis

运行指标	场景1	场景2	场景3
联合运行成本/元	15 809.99	10 393.15	10 386.80
EV放电功率/kW	3 050.50	3 747.59	3 728.10
碳排放量/kg	615.18	264.85	214.58
负荷中断功率/kW	2 048.14	422.83	359.42

场景2 采用本文所提动态定价机制，但不考虑下层 LA 需求响应因素对上层定价机制的影响。

场景3 本文所提定价机制。

与场景 1 相比，场景 2 降低了 IEO 碳排放量和 LA 负荷中断功率，降低幅度分别为 56.95% 和

79.36%；同时，提升了下层 EVCS 向上层 IEO 的售电功率，提升幅度为 18.60%。分析表明，场景 2 所提定价机制合理引导下层 LA 和 EVCS 优先消耗新能源，降低燃气机组的输出功率、降低能源价格，进而减少 IEO 碳排放量、LA 负荷中断功率，并且，EVCS 更多地参与上层 IEO 优化获利。

与场景 2 相比，场景 3 考虑 LA 需求响应对 IEO 价格的影响，进一步降低了 IEO 碳排放量和 LA 负荷中断功率，降低幅度分别为 18.98% 和 14.99%。分析表明，考虑 LA 需求响应因素对定价的影响可以进一步降低 IEO 定价，下层 LA 不再通过中断更多的负荷功率维持经济性，进而负荷中断功率降低。负荷中断量降低代表着下层 LA 负荷需求变大，上层 IEO 为保证运行的低碳性，通过碳捕集设备进一步降低碳排放量。

进一步分析不同定价方式对供电价格(此处以燃气轮机为例)和负荷中断功率的影响。图 9 展示了 3 种不同定价机制下 LA 负荷中断功率，可以看出，场景 1 的传统定价方式价格较高，同时 LA 负荷中断功率较大，这是由于下层负荷通过需求响应降低自身购能成本。

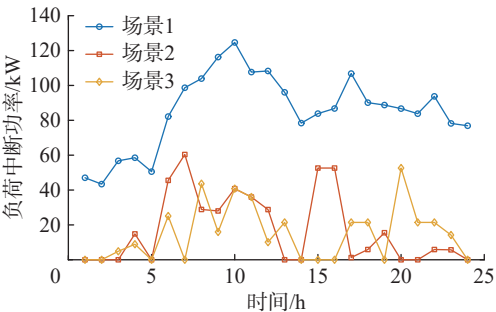


图9 不同场景 LA 负荷中断功率

Fig.9 LA load interrupt power in different scenarios

3.4 IEO-LA(EVCS)低碳分析

为进一步分析所提新能源-碳捕集设备新型运行方式的优势和有效性，将新型碳捕集设备运行方式与传统碳捕集设备进行对比，设置两种场景。场景 1：采用传统碳捕集设备运行方式，传统运行方式指的是碳捕集设备只能由燃气轮机向其供电；场景 2：采用所提新能源-碳捕集设备运行方式，新能源可以向碳捕集设备供电，此外还包括电网、燃气轮机等都可向碳捕集设备供电。

表 2 展示了不同碳捕集运行方式对 IEO-LA (EVCS)运行的影响，可以看出，场景 2 考虑新能源参与碳捕集运行降低了 IEO-LA(EVCS)碳排放量、负荷中断功率以及燃气轮机平均供电价格，

降低幅度分别为 83.52%、38.09% 和 3.94%; 同时提升了碳捕集功率以及 EVCS 放电功率, 提升幅度分别为 47.89% 和 6.85%。分析表明, 场景 2 下碳捕集设备运行成本低, 灵活性高, 进而出力增大, 同时减少了 IEO 燃气轮机的输出功率, 降低燃气轮机平均供电价格的同时, 减少了碳排放量和下层 LA 负荷中断功率。此外, 场景 2 增大了 IEO 自身功率需求, 更多的引导 EVCS 参与上层 IEO 优化运行, 进而增大了 EVCS 售电功率。

表 2 碳捕集运行方式影响分析

Tab.2 Impact analysis of carbon capture operation mode

运行指标	场景1	场景2
碳排放量/kg	1 302.32	214.58
碳捕集功率/kW	424.29	814.31
EV放电功率/kW	3 472.69	3 728.10
负荷中断功率/kW	580.57	359.42
燃气轮机平均价格/元	0.609 6	0.585 6

图 10 展示了碳捕集运行方式对燃气轮机供电价格的影响, 可以看出, 场景 2 新能源参与碳捕集运行整体降低了燃气轮机供电价格。其中, 场景 2 燃气轮机供电价格的降低主要集中在夜间时段 (20:00—24:00)。上层 IEO 通过降低价格引导下层 LA (EVCS) 向上层购电, 并且碳捕集设备运行的灵活性和低成本还能保证 IEO 运行的低碳性的经济性。

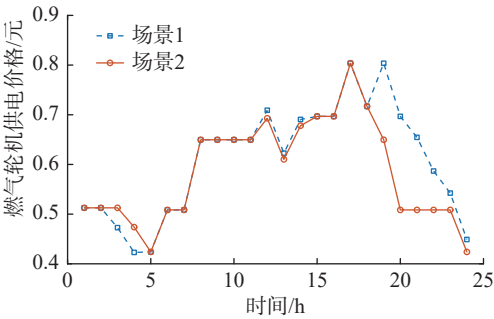


图 10 碳捕集运行方式对燃气轮机供电价格的影响
Fig.10 Influence of carbon capture operation mode on gas turbine price

4 结 论

为协调综合能源运行商与负荷聚集商和电动汽车充电站之间的利益关系, 本文构建 IEO-LA (EVCS) 双层优化模型, 并提出一种考虑多重因素

的定价机制协调上下层之间的利益关系。另外, 为保证 IEO-LA (EVCS) 运行低碳性, 提出一种新能源参与碳捕集运行的新模式。通过 CPLEX 迭代求解 IEO-LA (EVCS) 双层优化模型, 结论如下:

a. 定价机制方面, 与其他定价机制相比, 所提定价机制可以更好地协调 IEO-LA (EVCS) 上下层利益关系, 降低上层 IEO 碳排放量和下层 LA 负荷中断功率, 同时提升下层 EVCS 参与上层 IEO 运行的积极性。

b. 低碳方面, 新能源参与碳捕集运行方式, 在保证上层 IEO 低碳运行的同时, 降低了下层 LA 负荷中断功率, 更多地引导 EVCS 参与上层 IEO 优化运行, 对 IEO-LA (EVCS) 低碳经济运行起到了积极作用。

此外, 本文所提双层模型适用于一主多从的应用场景, 尚未对多主体、多从体之间的利益协调问题进行分析。后续研究中, 会重点关注此类问题并开展更深入的探讨。

参考文献:

[1] GE L J, LIU H X, YAN J, et al. Optimal integrated energy system planning with DG uncertainty affine model and carbon emissions charges[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(2): 905–918.

[2] GUO Z H, ZHANG R, WANG L, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand response[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 191: 116860.

[3] 高玉, 王琦, 陈严, 等. 考虑需求响应和能量梯级利用的含氢综合能源系统优化调度 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(4): 51–59.

[4] BUKHSH W A, ZHANG C, PINSON P. An integrated multiperiod OPF model with demand response and renewable generation uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(3): 1495–1503.

[5] WANG S, BI S, ZHANGY J A. Demand response management for profit maximizing energy loads in real-time electricity market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6387–6396.

[6] 蒋俊峰, 谭伦农, 纪棋彬. 基于智能电网的电动汽车充放电分时电价及引导策略 [J]. *能源研究与信息*, 2021, 37(2): 85–92.

[7] 李军祥, 何雯婷, 王金玲. 碳交易规制下的共享电动汽车充放电优化 [J]. *应用科学学报*, 2023, 41(5): 896–910.

[8] 叶宇静, 邢海军, 米阳, 等. 考虑低碳需求响应及主从博弈的综合能源系统低碳优化调度 [J]. *电力系统自动化*,

2024, 48(9): 34–43.

[9] 米阳, 赵海辉, 付起欣, 等. 考虑风光不确定与碳交易的区域综合能源系统双层博弈优化运行 [J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2174–2184.

[10] 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): 3119–3129.

[11] LI Y, HAN M, YANG Z, et al. Coordinating flexible demand response and renewable uncertainties for scheduling of community integrated energy systems with an electric vehicle charging station: a bi-level approach[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(4): 2321–2331.

[12] 张程, 匡宇, 邹复民, 等. 考虑风光不确定性与电动汽车的综合能源系统低碳经济调度 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 236–244.

[13] 程宇, 郭权利. 计及动态能源价格和共享储能电站的多主体综合能源系统双层优化调度策略 [J]. 现代电力, 2024, 41(1): 10–20.

[14] GAO Y, AI Q. Demand-side response strategy of multi-microgrids based on an improved co-evolution algorithm[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021, 7(5): 903–910.

[15] 牛文娟, 李扬, 王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3630–3637.

[16] YANG H M, PAN H, LUO F J, et al. Operational planning of electric vehicles for balancing wind power and load fluctuations in a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(2): 592–604.

[17] LI Y, YANG Z, LI G Q, et al. Optimal scheduling of isolated microgrid with an electric vehicle battery swapping station in multi-stakeholder scenarios: a bi-level programming approach via real-time pricing[J]. *Applied Energy*, 2018, 232: 54–68.

[18] 王利猛, 刘雪梦, 李扬, 等. 阶梯式碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统低碳优化调度 [J]. 电力建设, 2024, 45(2): 102–114.

[19] GUO X S, LOU S H, WU Y W, et al. Low-carbon operation of combined heat and power integrated plants based on solar-assisted carbon capture[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2022, 10(5): 1138–1151.

[20] 张美霞, 徐立成, 杨秀, 等. 基于电动汽车充电需求时空分布特性的充电站规划研究 [J]. 电网技术, 2023, 47(1): 256–265.

[21] 邹宇航, 曾艾东, 郝思鹏, 等. 阶梯式碳交易机制下综合能源系统多时间尺度优化调度 [J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2185–2195.

[22] LUO Z, HONG S H, DING Y M. A data mining-driven incentive-based demand response scheme for a virtual power plant[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 549–559.

[23] 陈先龙, 王秀丽, 陈洁, 等. 考虑分布式可再生能源交易的风电商与电动汽车充电站协同优化调度 [J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4598–4606.

(编辑: 丁红艺)