

7-15-2024

Optimal Scheduling of Vehicle-network Interaction Based on Interval Stackelberg Game of Virtual Power Plant

Weiliang Liu

Automation Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China; Baoding Key Laboratory for Condition Detection and Optimal Regulation of Comprehensive Energy System, Baoding 071003, China, 51651798@ncepu.edu.cn

Qianwen Yan

Automation Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Qiliang Zhang

Automation Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China; Baoding Key Laboratory for Condition Detection and Optimal Regulation of Comprehensive Energy System, Baoding 071003, China, zhangqiliang@ncepu.edu.cn

Shuai Liu

Automation Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China; Baoding Key Laboratory for Condition Detection and Optimal Regulation of Comprehensive Energy System, Baoding 071003, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Optimal Scheduling of Vehicle-network Interaction Based on Interval Stackelberg Game of Virtual Power Plant

Abstract

Abstract: To better exploit the regulation potential of electric vehicles (EVs), resolve the conflicts of interest among the stakeholders in vehicle-to-grid (V2G) interactions, and overcome the uncertainty of distributed energy sources and load, this paper proposes a two-level optimization scheduling model for V2G interactions based on the interval Stackelberg game of a virtual power plant (VPP). The VPP aggregator is considered as the upper level, and the EV users as the lower level. The upper level model uses interval numbers to describe the uncertainty of sources and loads, with the aim of minimizing the operating cost of the VPP aggregator, updating the electricity price information and transmitting it to the lower level model. The lower level model aims to maximize user satisfaction and minimize costs by solving the charging and discharging behavior of EV users and returning the results to the upper level model. The improved particle swarm optimization algorithm with integrated interval possibility degree is used to obtain the optimal scheduling results of the Stackelberg game. Simulation results demonstrate that the proposed model can effectively shave peak and fill the valley, coordinate the bilateral interests of the aggregator and EV users, and has good robustness.

Keywords

electric vehicles, vehicle-network interaction, virtual power plant, optimal scheduling, Stackelberg game, interval number

Authors

Weiliang Liu, Qianwen Yan, Qiliang Zhang, Shuai Liu, Changliang Liu, Jiayao Kang, and Xin Wang

Recommended Citation

Liu Weiliang, Yan Qianwen, Zhang Qiliang, et al. Optimal Scheduling of Vehicle-network Interaction Based on Interval Stackelberg Game of Virtual Power Plant[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1559-1572.

基于虚拟电厂区间主从博弈的车网互动优化调度

刘卫亮^{1,2}, 闫倩文¹, 张启亮^{1,2*}, 刘帅^{1,2}, 刘长良^{1,2}, 康佳垚³, 王昕³

(1. 华北电力大学 自动化系, 河北 保定 071003; 2. 保定市综合能源系统状态检测与优化调控重点实验室, 河北 保定 071003;
3. 国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 为更好地挖掘电动汽车调节潜力, 解决车网互动各主体的利益冲突, 并克服分布式电源出力与负荷不确定性的影响, 提出了基于虚拟电厂区间主从博弈的车网互动双层优化调度模型, 将虚拟电厂聚合商作为上层, 电动汽车用户作为下层。上层模型采用区间数描述源、荷的不确定性, 以虚拟电厂聚合商的运营成本最低为优化目标, 负责更新电价信息并传输至下层模型; 下层模型以电动汽车用户满意度最大和成本最小为优化目标, 负责求解用户充放电行为并返回至上层模型。采用融合区间可能度的改进粒子群算法, 求解主从博弈最优调度结果。算例仿真表明: 所提模型能够在削峰填谷的同时, 统筹考虑聚合商与电动汽车用户的双边利益, 并具有较好的鲁棒性。

关键词: 电动汽车; 车网互动; 虚拟电厂; 优化调度; 主从博弈; 区间数

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)07-1559-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0503

引用格式: 刘卫亮, 闫倩文, 张启亮, 等. 基于虚拟电厂区间主从博弈的车网互动优化调度[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(7): 1559-1572.

Reference format: Liu Weiliang, Yan Qianwen, Zhang Qiliang, et al. Optimal Scheduling of Vehicle-network Interaction Based on Interval Stackelberg Game of Virtual Power Plant[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1559-1572.

Optimal Scheduling of Vehicle-network Interaction Based on Interval Stackelberg Game of Virtual Power Plant

Liu Weiliang^{1,2}, Yan Qianwen¹, Zhang Qiliang^{1,2*}, Liu Shuai^{1,2}, Liu Changliang^{1,2}, Kang Jiayao³, Wang Xin³

(1. Automation Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Baoding Key Laboratory for Condition Detection and Optimal Regulation of Comprehensive Energy System, Baoding 071003, China; 3. National Energy Group New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: To better exploit the regulation potential of electric vehicles (EVs), resolve the conflicts of interest among the stakeholders in vehicle-to-grid (V2G) interactions, and overcome the uncertainty of distributed energy sources and load, *this paper proposes a two-level optimization scheduling model for V2G interactions based on the interval Stackelberg game of a virtual power plant (VPP). The VPP aggregator is considered as the upper level, and the EV users as the lower level. The upper level model uses interval numbers to describe the uncertainty of sources and loads, with the aim of minimizing the operating cost of the VPP aggregator, updating the electricity price information and transmitting it to the lower level model. The lower level model aims to maximize user satisfaction and minimize costs by solving the charging and discharging behavior of EV users and returning the results to the upper level model. The improved particle swarm optimization algorithm with integrated interval possibility degree is*

收稿日期: 2023-04-26 修回日期: 2023-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(62203172); 国家能源集团科技项目(GJNY-21-98); 中央高校基本科研业务费(2023JC010, 2023JG005, 2020MS117)

第一作者: 刘卫亮(1983-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为综合能源仿真与优化控制。E-mail: 51651798@ncepu.edu.cn

通讯作者: 张启亮(1991-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为分布式博弈与优化。E-mail: zhangqiliang@ncepu.edu.cn

used to obtain the optimal scheduling results of the Stackelberg game. Simulation results demonstrate that the proposed model can effectively shave peak and fill the valley, coordinate the bilateral interests of the aggregator and EV users, and has good robustness.

Keywords: electric vehicles; vehicle-network interaction; virtual power plant; optimal scheduling; Stackelberg game; interval number

0 引言

全球能源与环境危机频发,绿色、低碳、可再生^[1-3]成为时代名词。随着我国“双碳”目标与“新型电力系统”战略的推进,电动汽车产销量稳步增长。电动汽车的大规模无序接入将冲击电网的负荷平衡,加剧电网负荷波动^[4];电动汽车具有可控性、移动性,且具有负荷与储能的双重属性^[5];借助虚拟电厂聚合电动汽车,可为电网提供调峰调频、新能源消纳^[6]等辅助服务。因此,通过调整电动汽车充放电行为可以起到平抑负荷波动、实现削峰填谷的作用。然而,在电动汽车优化调度过程中,存在多方参与主体,各主体相互作用、相互影响^[7],且调度策略和优化目标呈现多样性,如何统筹兼顾多方利益至关重要。

围绕电动汽车与电网互动问题,国内外已经取得了一定的研究成果。文献[8]提出一种面向双碳目标的多区域大规模电动汽车的“时空”双层优化控制策略,从空间和时间两个方面指导VPP(virtual power plant)所有电动汽车的有序充放电行为。文献[9]为整合更多电动汽车与可再生能源,提出了一种针对参与平衡服务的低碳充电站的定价和聚合能源投标的双层优化方法,进一步探索需求曲线。文献[10]采用一种新的集成随机规划—信息间隙决策的方法来优化IES容量,利用两种不同的风险偏好讨论不确定性的影响。文献[11]在光伏充电站与电动汽车用户之间,利用基于Stackelberg博弈的光伏电动汽车充电站动态定价方案,模拟电动汽车与光伏充电站的交互行为。文献[12]兼顾充放电价和电动汽车荷电状态,提出计及用户响应度的充放电调度策略。基于无序充电的负荷波动和单个电动汽车用户的满意度。文

献[13]通过上层制定电动汽车充电计划、下层提高用户满意度,提出双层多目标优化调度方案。文献[14]针对不同主体的利益和各主体之间的交易互动,提出一种基于源荷两侧的园区综合能源系统主从博弈优化策略,涉及到能源系统三方主体的经济性。文献[15]为避免源、荷不确定性,引入区间主从博弈模型,分别以运营商成本最小、电动汽车用户充电费用最小为上下层优化目标,讨论最优调度方案。文献[16]考虑多主体决策问题,提出了多主体双层博弈模型,以竞价结果引导电动汽车充放电,在电动汽车聚合商之间考虑非合作博弈,电动汽车调度采用演化博弈。文献[17]建立了融合电动汽车的微网系统模型,提出具有时空特性的电动汽车优化调度策略,用模糊理论描述了电动汽车车主充电行为的不确定性。

通过分析已有文献,在车网互动中尚存在以下问题亟待解决:①电动汽车优化调度涉及电网、虚拟电厂聚合商和电动汽车用户三方利益主体,各主体的利益存在冲突;②分布式电源出力与负荷具有不确定性,对车网互动过程具有严重影响;③电动汽车用户参与车网互动的意愿需要精确评估。

针对上述问题,本文提出一种基于虚拟电厂区间主从博弈的车网互动双层优化调度模型。模型上层利用区间数描述可再生能源与负荷的随机性与波动性,并以聚合商运营成本最小为优化目标;模型下层以电动汽车用户充放电费用最小且用户满意度最大为优化目标,充分考虑用户的人为因素对互动过程的影响。利用改进粒子群算法对上、下层模型进行迭代求解,在多方主体争取自身利益最大化的矛盾冲突中,寻求博弈均衡解,

找到满足多方利益的最优调度方案。

1 虚拟电厂车网互动架构

车网互动优化问题是一种复杂系统多主体、多目标的决策优化问题, 涉及电网、虚拟电厂聚合商以及电动汽车用户三方主体的信息交互。其中, 虚拟电厂以“聚合”和“通信”为核心, 将分布式电源、可调节负荷、分布式储能单元、电动汽车等分散在电网的各个组成部分的源荷资源进行整合; 以虚拟电厂作为中间商, 通过与电网进行电量交易, 满足内部常规负荷用电需求, 并以上级电网交互功率作为约束, 寻求最低运行成本调度策略; 以价格优势引导电动汽车群体改变充放电行为, 获取电价套利。

然而, 在车网互动中, 聚合商为最大化自身的利益, 往往选择低电价购入电量, 采用较高的价格出售电力, 这将导致电动汽车用户参与车网互动的意愿下降, 从而引起聚合商出售电力的利润降低, 与上级电网的交易电量产生冗余; 反之, 电动汽车用户为最小化充放电费用, 通常选择在低电价时充电, 高电价时放电, 但聚合商与电网的交互功率受聚合商与电动汽车用户的交易电价的影响, 导致忽略了聚合商的利益。三者利益发生冲突, 但所做策略有先后顺序, 也能够共享信息, 因此考虑采用非合作的主从博弈, 兼顾三者的多边利益, 实现各参与主体的诉求, 有效提升良性互动水平。

虚拟电厂聚合商作为电动汽车所需电能的售卖者, 对电能售卖方式、价格有优先决定权, 故以聚合商作为博弈过程中的领导者; 电动汽车用户依据聚合商给定的电价信息调整自身充电行为并反馈给聚合商, 则为跟随者。具体的区间博弈模型架构如图1所示。

双层优化模型中, 上层调度模型以虚拟电厂聚合商为决策中心, 兼顾虚拟电厂和电动汽车用户之间的功率交互, 考虑虚拟电厂聚合商从上级电网的购电、售电以及光伏发电、风力发电、常

规负荷、电动汽车负荷对聚合商的作用, 制定满足自身利益的电动汽车充放电价格传输给下层用户侧; 下层调度模型收集电动汽车用户的行驶信息与充电需求, 考虑住宅区与商业区的不同功能化区域的用电差异, 将用户充放电行为反馈给聚合商侧。上下层不断循环博弈, 直至生成满足多方利益的均衡解。

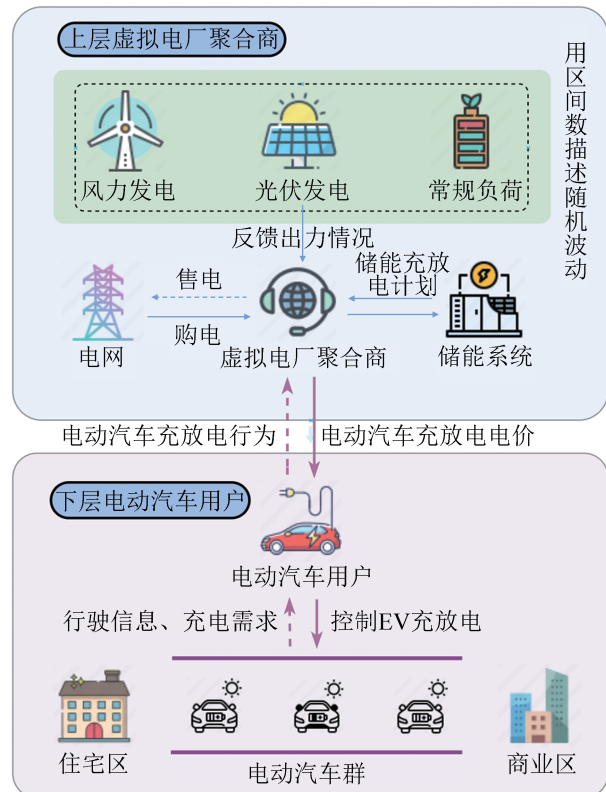


图1 区间主从博弈示意图
Fig. 1 Interval Stackelberg game

2 区间主从博弈模型

2.1 基于区间数描述的不确定性优化模型

风力发电、光伏发电、负荷都具有一定程度的不确定性, 这增加了虚拟电厂与电动汽车优化调度的难度。为保证优化调度方案的鲁棒性, 本文借助区间数来描述虚拟电厂中的不确定因素。在区间数方法中, 区间数是一堆有序实数^[18], 表示为

$$[P(t)] = [\underline{P}(t), \overline{P}(t)] \quad (1)$$

式中： $[P(t)]$ 为区间向量， $\overline{P(t)}$ 、 $\underline{P(t)}$ 分别为向量 $P(t)$ 的上、下限。该模型中的不确定功率波动区间范围，具体表现为

$$[P_{pv}(t)] = [P_{pv}(t), \overline{P_{pv}(t)}] \quad (2)$$

$$[P_{wt}(t)] = [P_{wt}(t), \overline{P_{wt}(t)}] \quad (3)$$

$$[P_{load}(t)] = [P_{load}(t), \overline{P_{load}(t)}] \quad (4)$$

$$[P_{grid}(t)] = [P_{grid}(t), \overline{P_{grid}(t)}] \quad (5)$$

式中： $P_{pv}(t)$ 、 $P_{wt}(t)$ 、 $P_{load}(t)$ 分别为光伏发电功率、风力发电功率以及常规负荷； $P_{grid}(t)$ 为与上级电网交互功率。假设波动系数为 β ，则在日前预测结果的基础上，预测功率区间为

$$P(t) = [P(t), \overline{P(t)}] = [P_0 \times (1 - \beta), P_0 \times (1 + \beta)] \quad (6)$$

针对虚拟电厂中的不确定性因素，建立多目标区间优化模型，提高调度过程中每个目标的控制容错能力，有效降低不确定性带来的负荷波动问题。区间多目标优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \min_{y \in \Omega} F(x) &= [f(x, y)] = \\ &[\min_{a \in y} f(x, a), \max_{a \in y} f(x, a)] \quad (7) \\ \text{s.t. } g(x, y) &\geq a = [\underline{a}, \overline{a}], \\ h(x, y) &= b = [\underline{b}, \overline{b}] \end{aligned}$$

式中： f 为目标函数； x 为决策变量； Ω 为决策变量； y 为区间数，故 f 在向量空间上也是一个区间数。

2.2 上层聚合商优化调度模型

上层调度模型以聚合商运营成本最小为目标。根据参与虚拟电厂的功率平衡、储能系统容量以及与上级电网交互的价格区间，在约束条件下得到函数目标值作为适应度值；以电动汽车充放电价格作为决策变量，引导电动汽车用户更新充放电行为。

2.2.1 目标函数

上层模型以聚合商运营成本最小为目标，其目标函数为

$$\begin{aligned} \min f_1 &= \sum_{t=1}^T \left(\frac{C_{grid,c}(t) + C_{grid,d}(t)}{2} [P_{grid}(t)] - \right. \\ &\quad \left. \frac{C_{grid,c}(t) - C_{grid,d}(t)}{2} [P_{grid}(t)] - \right. \\ &\quad \left. C(t) P_{EV,sum}(t) \right) \quad (8) \end{aligned}$$

式中： $C_{grid,c}(t)$ 、 $C_{grid,d}(t)$ 为聚合商与上级电网交互费用； $C(t)$ 为聚合商制定的电动汽车充放电价格。

2.2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$[P_{pv}(t)] + [P_{wt}(t)] + [P_{grid}(t)] = [P_{load}(t)] + P_{EV,sum}(t) + P_{si}(t) \quad (9)$$

(2) 储能系统约束

$$P_{si,min} \leq P_{si}(t) \leq P_{si,max} \quad (10)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} SOC(t) &= SOC(t-1) + \left(\frac{\alpha_c + \frac{1}{\alpha_d}}{2} P_{si}(t) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\alpha_c - \frac{1}{\alpha_d}}{2} |P_{si}(t)| \right) \Delta T \quad (12) \end{aligned}$$

式中： $P_{si,max}$ 、 $P_{si,min}$ 为储能系统充放电功率上下限； SOC_{max} 、 SOC_{min} 为储能系统荷电量上下限； α_c 、 α_d 为充放电功率转换效率。

(3) 充放电价格约束

聚合商与上级电网和电动汽车交互过程中，为保证各自的利益，需将电价控制在合理范围内，设置电价约束为

$$(1 - \theta)C_{grid,c}(t) < C_c(t) < (1 + \theta)C_{grid,c}(t) \quad (13)$$

$$C_d(t) = C_{grid,d}(t) \quad (14)$$

式中： $C_c(t)$ 、 $C_d(t)$ 为 t 时刻电动汽车充放电价格； θ 为价格波动系数。

2.3 下层电动汽车优化调度模型

下层模型通过电动汽车用户行为模型提供约束条件，以电动汽车用户满意度最大和成本最小为优化目标，求解住宅区与商业区各自的充放电功率，并反馈给上层聚合商以博弈充放电电价。

2.3.1 电动汽车行为模型

电动汽车用户的用车行为可采用电动汽车的

入网时间、离网时间和行驶里程进行描述, 具有一定的随机性。对大量用户数据归纳总结, 可得出电动汽车的出行规律。已有研究表明, 入网时间、离网时间的分布函数均满足正态分布^[19]:

$$f(t_a) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_a - \mu_a)^2}{2\sigma_a^2}\right], \mu_a - 12 \leq t_a \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_a + 24 - \mu_a)^2}{2\sigma_a^2}\right], 0 \leq t_a \leq \mu_a - 12 \end{cases} \quad (15)$$

$$f(t_l) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_l - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right], 0 \leq t_l \leq \mu_l + 12 \\ \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_l + 24 - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right], \mu_l + 12 \leq t_l \leq 24 \end{cases} \quad (16)$$

式中: t_a 、 t_l 为电动汽车的入网时间和离网时间; μ_a 、 μ_l 为期望值; σ_a 、 σ_l 为标准差。

行驶里程分布函数则满足对数正态分布:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_d \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (17)$$

式中: x 为日行驶里程; μ_d 为尺度参数; σ_d 为形状参数。

受不同功能区特性影响, 电动汽车在住宅区与商业区的用户行为存在差异, 但同一区域下, 电动汽车的出行流量呈现一定的规律性与周期性。商业区充放电行为集中在白天; 住宅区充放电行为集中在晚间时段, 由此可能产生不同的负荷调节情况。

2.3.2 目标函数

用户满意度可以衡量电动汽车用户实际和预期用电之间的差异, 反映用户电费支出变化带来的负荷变化量。由于用户具有多样性, 用电习惯和费用选择存在差异, 考虑用户的费用满意度, 会使优化调度的结果有利于保护用户的利益, 从而激励用户参与电网调节, 起到削峰填谷的作用。从用电经济性层面考虑, 用户满意度表示为

$$L_i = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T C_i(t) P_{EV,i}(t) - cost_{i,\min}}{cost_{i,\max} - cost_{i,\min}} \quad (18)$$

$$L = \sum_{i=1}^N L_i \quad (19)$$

式中: L_i 为第*i*位电动汽车用户的费用满意度, L 值越大, 表明充放电价格越符合用户的利益; $C_i(t)P_{EV,i}(t)$ 、 $cost_{i,\max}$ 、 $cost_{i,\min}$ 分别为第*i*位电动汽车用户充放电费用的分时价格以及最大、最小值。

下层以电动汽车用户充放电费用最小以及用户满意度最大为目标建立优化模型。

$$\min f_{\text{下}} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{C_c(t) + C_d(t)}{2} P_{EV,\text{sum}}(t) + \frac{C_c(t) - C_d(t)}{2} |P_{EV,\text{sum}}(t)| \right) - L \quad (20)$$

本文考虑住宅区和商业区两种不同环境下的用户充放电情况, 充电价格为在合理范围内的博弈电价。

2.3.3 约束条件

(1) 电动汽车充放电功率约束

电动汽车充电功率与放电功率应严格控制在最大功率(额定值)范围内。

$$-P_{EV,\max} \leq P_{EV,i}(t) \leq P_{EV,\max} \quad (21)$$

$$P_{EV,\text{sum}}(t) = \sum_{i=1}^N P_{EV,i}(t) \quad (22)$$

式中: $P_{EV,\max}$ 为电动汽车充放电额定功率。

(2) 不可调度时段约束

$$P_{EV,i}(t) = 0 \quad t < t_{a,i} \text{ 或 } t > t_{l,i} \quad (23)$$

式中: $t_{a,i}$ 、 $t_{l,i}$ 为第*i*辆电动汽车入网、离网时刻。

(3) 电池电量约束

电动汽车在电量过低或过高时继续行驶, 易出现深度充放电情况, 减少电池寿命, 故在充放电全过程中对蓄电池的安全约束为

$$SOC_{EV,\min} \leq SOC_{EV,i}(t) \leq SOC_{EV,\max} \quad (24)$$

式中: $SOC_{EV,i}(t)$ 为*t*时刻第*i*辆电动汽车的电池电量。

离开时电池电量约束为

$$\lambda C \leq SOC_{EV,i,\text{last}} \leq C \quad (25)$$

式中: C 为电池容量; $SOC_{EV,i,\text{last}}$ 为第*i*辆电动汽车

离开时刻的蓄电池电量； λ 为期望电量系数。

(4) 调度过程电池电量变化

$$\begin{aligned} SOC_{EV,i}(t) = & SOC_{EV,i}(t-1) + \\ & (\eta_{EV,c} + \frac{1}{\eta_{EV,d}})P_{EV,i}(t) + \\ & (\eta_{EV,c} - \frac{1}{\eta_{EV,d}})|P_{EV,i}(t)| \end{aligned} \quad (26)$$

式中： $\eta_{EV,c}$ 、 $\eta_{EV,d}$ 为电动汽车充放电效率，即得到1h内电动汽车充放电过程中的荷电量变化值。

3 模型求解

3.1 模型转换

基于区间可能度概念，将目标函数和约束条件进行优化处理，可以将上层不确定性模型转换为确定性的区间优化模型。

由式(1)可设 $[P_1] = [\underline{P}_1, \overline{P}_1]$ ， $[P_2] = [\underline{P}_2, \overline{P}_2]$ ，记区间宽度 $I_1 = \overline{P}_1 - \underline{P}_1$ ， $I_2 = \overline{P}_2 - \underline{P}_2$ ，则有关两区间数比较大小的区间可能度为(设 P_1 、 P_2 中至少有一个为非退化的区间数)：

$$P(P_1 \leq P_2) = \max \left\{ \frac{\min(\overline{P}_2 - \overline{P}_1, I_2)}{I_2}, 0 \right\} \quad (27)$$

给定约束水平 φ ($0 \leq \varphi \leq 1$)时， $P(P_1 \leq P_2) \geq \varphi$ 可转化为对应的确定性不等式：

$$\overline{P}_1 \leq (1 - \varphi)\overline{P}_2 + \varphi \underline{P}_2 \quad (28)$$

利用区间序关系法，采用区间中点和区间半径实现目标函数 $\min[f(x)]$ 的区间优化：

$$\min_x [f_m(x), f_w(x)]$$

其中： $f_m(x)$ 为区间中点； $f_w(x)$ 为区间半径，分别代表系统的预期效果和对不确定因素的敏感程度。

$$f_m(x) = \frac{f(x) + \overline{f(x)}}{2} \quad (29)$$

$$f_w(x) = \frac{\overline{f(x)} - f(x)}{2} \quad (30)$$

对于不等式约束 $g(x, y) \geq a$ ，则利用置信度区间实现约束方程的区间转化；通过求解满足不等式约束条件的概率值，从而获取到个体 x 满足该约束条件的可能度为

$$\delta = P(g(x, y) \geq a) \quad (31)$$

3.2 改进粒子群算法

非合作博弈是多个参与者独立优化各自目标的耦合问题，是一种比较复杂的非统一优化问题，在处理这类问题时，粒子群算法相比其他算法效率更高，收敛速度更快。

粒子群算法的基本原理是通过粒子的速度和位置不断进行更新迭代，使其无限接近目标函数。粒子在 D 维空间中第 k 次迭代的位置和速度矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i,k} = & [x_{i1,k}, x_{i2,k}, \dots, x_{iD,k}]^T \\ \mathbf{v}_{i,k} = & [v_{i1,k}, v_{i2,k}, \dots, v_{iD,k}]^T \end{aligned} \quad (32)$$

粒子在每次迭代过程中，通过追踪自身的局部最优解 $p_{best,i,k}$ 和全局最优解 $g_{best,i,k}$ 来更新速度和位置：

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{i,k+1} = & \omega \mathbf{v}_{i,k} + c_1 r_1 (p_{best,i,k} - \mathbf{x}_{i,k}) + \\ & c_2 r_2 (g_{best,i,k} - \mathbf{x}_{i,k}) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\mathbf{x}_{i,k+1} = \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{v}_{i,k+1}$$

式中： k 为迭代次数； $\mathbf{v}_{i,k}$ 为粒子 i 在第 k 次迭代时的速度； c_1 、 c_2 为学习因子； ω 为惯性权重； r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 的随机数。

本文采用融合区间可能度的改进粒子群算法，求解区间主从博弈优化调度模型。针对调度环境中的不确定性问题，引入区间可能度的优化方法，对适应度函数值与约束条件进行处理，将粒子群算法中粒子的适应度值的计算和比较改进为适应度区间的计算和比较。因此，含区间优化模型的改进粒子群算法可以求解不确定性规划问题，并且，利用粒子群算法增强了粒子间的信息交流，克服了区间优化收敛缓慢与粒子群算法易早熟的问题，实现不确定性模型的优化求解。

将改进粒子群算法用于求解双层优化模型，每个电价粒子作为一个智能体，通过参与下层电动汽车模型，引导电动汽车充放电功率种群向用户成本最小的目标靠近，凭借返回的充放电功率在上层聚合商模型中寻找运营成本最小的粒子适应度函数值。然后，根据所设置的参数，按照式

(33)更新电价粒子的速度与位置, 利用博弈过程构建出合理的组合策略。其中, 参与博弈的电价粒子的速度更新规则是在明确全局最优位置的情况下做出的改变, 可以灵活地替换博弈目标。另外, 博弈的电价粒子进行搜索时, 需要与博弈指标所形成的解集进行信息交流, 虽增加了粒子搜索路径的复杂性, 但同时博弈双方利益的矛盾性也使得粒子在搜索时跳出局部最优。具体的改进粒子群算法流程如图 2 所示。

所建模型采用动态分时电价, 将每天分为 24

个小时, 即以 1 h 为时间尺度, 代表聚合商的定价时隙和电动汽车用户的充放电时隙。上层聚合商通过制定电价策略引导下层电动汽车调整充放电行为, 并保证自身运营成本最小; 下层电动汽车用户在上层模型电价策略的基础上进行充放电行为优化, 并向上层返回最优充放电行为, 同时保证自身充放电成本最小; 上层聚合商接收用户充放电行为, 再次依据下层行为更新电价策略, 调整与储能系统、上层电网的交互功率, 如此反复, 直至找到上下层的博弈均衡解。

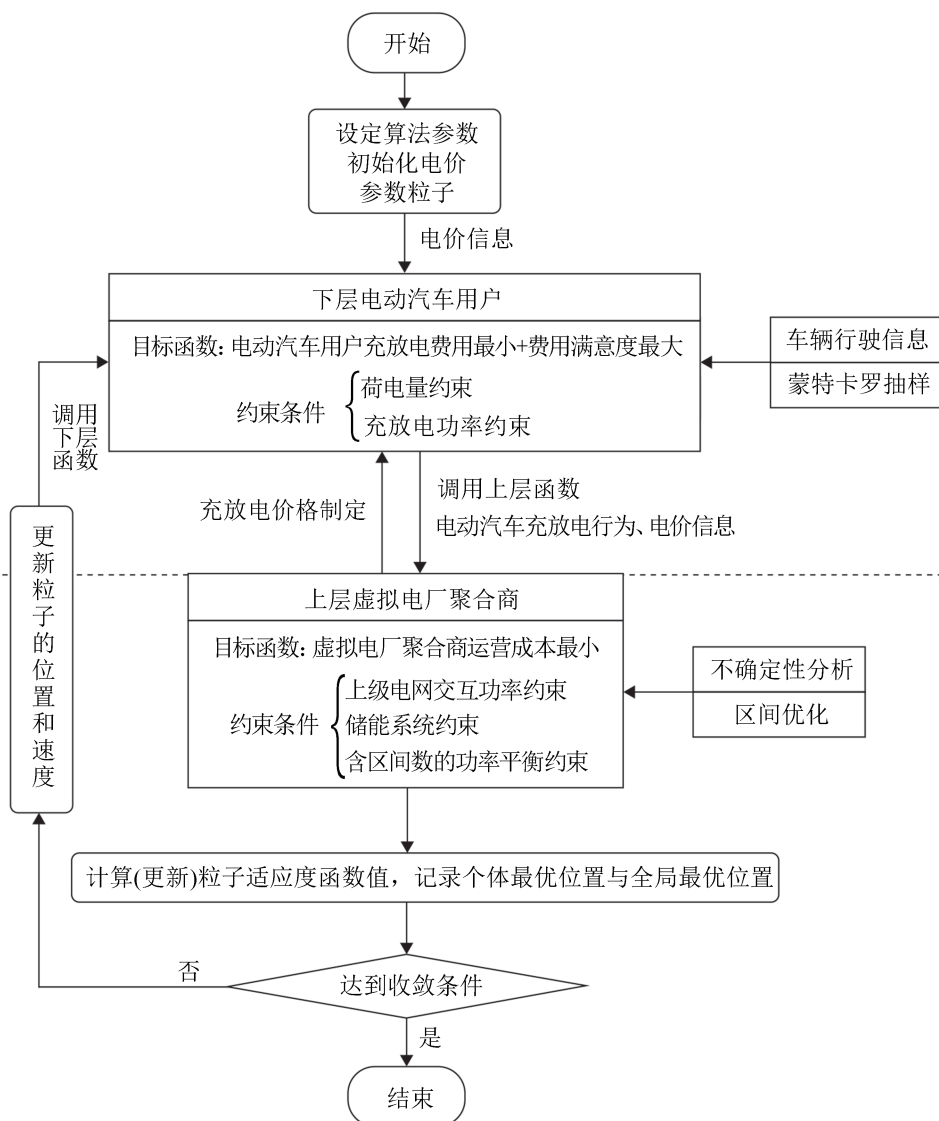


图 2 改进粒子群算法流程图
Fig. 2 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

4 算例分析

4.1 参数设置

本文针对含光伏发电、风力发电、常规负荷、储能系统和电动汽车的虚拟电厂开展算例分析。其中，虚拟电厂包含住宅区、商业区各200辆电动汽车。算例中设定了相关设备的额定容量与额定功率，充放电功率转换效率为0.9，区间优化采用的波动系数在无特别说明时均采用0.1。蒙特卡罗方法在模拟随机性问题方面具有良好的性能，利用该方法对两区域电动汽车的出行情况进行模拟。在此算例中，参考深圳市电动汽车用户出行行为^[20]，设置行驶里程函数参数为 $\mu_d=3.2$ 、 $\sigma_d=0.88$ ，入网、离网时间函数参数：住宅区， $\mu_a=17.83$ 、 $\mu_1=8.25$ ， $\sigma_a=3.41$ 、 $\sigma_1=3.24$ ；商业区， $\mu_a=8.9$ 、 $\mu_1=17.47$ ， $\sigma_a=3.24$ 、 $\sigma_1=3.41$ ；蒙特卡罗抽样结果如图3~6所示，可知，商业区和住宅区的出行时间大致相反。

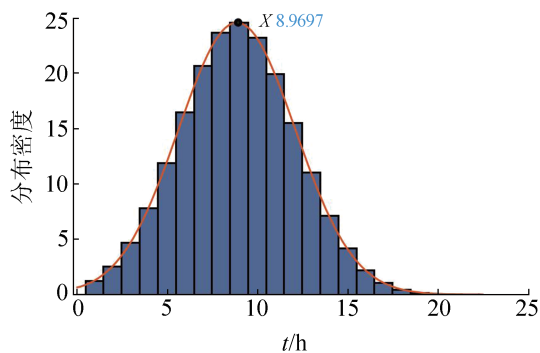


图3 商业区到达时间分布

Fig. 3 Distribution map of arrival time in business district

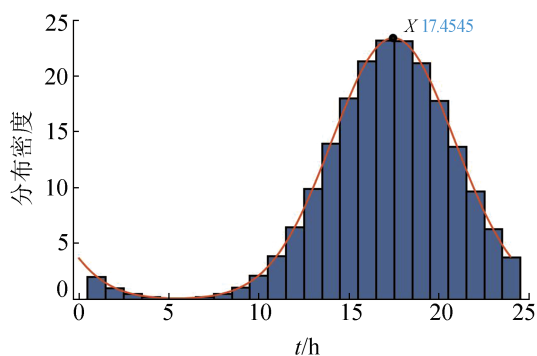


图4 商业区离开时间分布

Fig. 4 Distribution map of departure time of business district

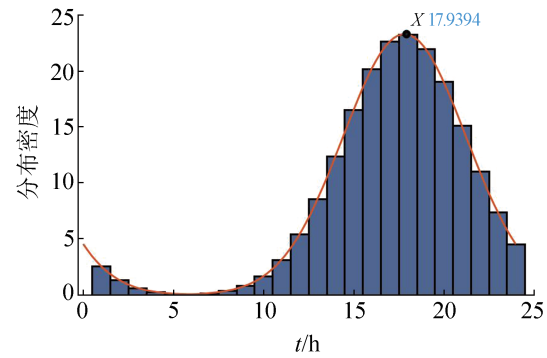


图5 住宅区到达时间分布

Fig. 5 Distribution map of arrival time in residential district

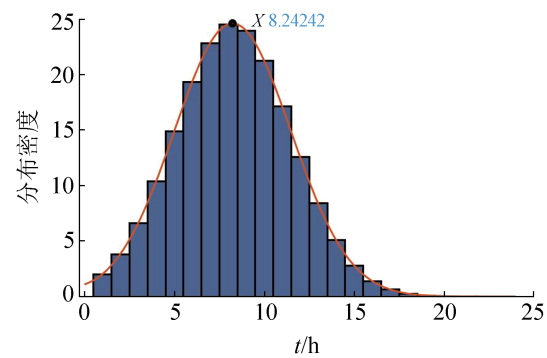


图6 住宅区出行时间分布

Fig. 6 Distribution map of departure time of residential district

所建立的非合作博弈模型采用 Matlab 中的 YALMIP 工具箱的 Cplex 求解器进行求解，并利用改进粒子群算法实现动态博弈电价；设置粒子种群个数为住宅区、商业区各200辆电动汽车，将每天分为24个时隙，即24维空间，迭代终止次数为40，所使用的具体参数如表1~2所示。

表1 粒子群相关参数

Table 1 Particle swarm related parameter

参数	取值	参数	取值
学习因子	2	迭代次数	40
惯性权重	0.8	种群个数	不同区域各200
维度D	24	速度范围	[-0.2,0.2]

4.2 模型可行性分析

经上、下层目标函数相互博弈，目标函数值呈现下降趋势并逐渐趋于稳定，如图7所示。聚合商运营成本逐渐下降，电动汽车用户成本逐渐下降，用户满意度同样逐渐增加。由此可见，多

次博弈下, 算法得到一个收敛的稳定解, 表明区间主从博弈模型实现了多方利益共赢, 证明了所建立的两阶段博弈模型的有效性。

表2 设备相关参数

设备	参数	功率/kW	波动系数
光伏发电	1 800 kW	—	$\beta=0.1$
风力发电	2 500 kW	—	$\beta=0.1$
储能系统	750 kW·h	[-80,80]	—
电动汽车	50 kW·h	[-5,5]	$\theta=0.2$
转换效率 α 、 η	0.9	—	—
期望电量系数 λ	0.9	—	—

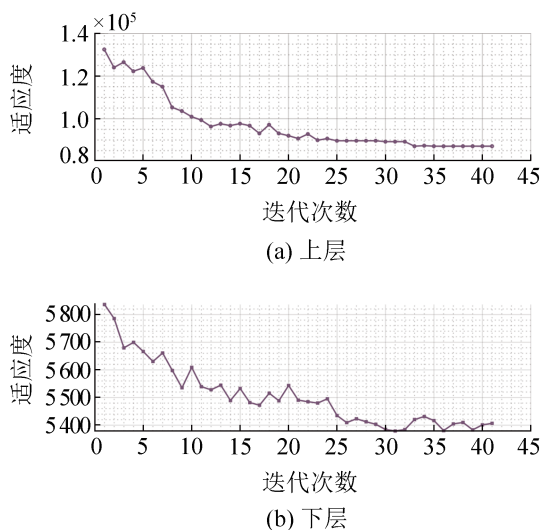


图7 上下层模型迭代收敛结果

Fig. 7 Iterative convergence results of upper and lower models

4.3 模型削峰填谷效果分析

为了验证有序充电的调度模式对引导电动汽车充放电行为的有效性, 分别针对住宅区、商业区开展无序充电、有序充电、有序充放电3种策略的对比分析。不同策略设定情况: ①无序充电, 即电动汽车不参与电网充放电调度, 从接入时刻开始一直以最大额定功率充电, 直至满足期望荷电状态停止充电; ②有序充电, 即电动汽车参与电网充电调度, 电动汽车在电价引导下参与调峰调度, 在任何时刻的放电响应为0, 在相关约束下进行有序充电; ③有序充放电, 即电动汽车

参与电网充放电调度, 在相关约束下可进行充电、放电操作。

图8~9分别为住宅区、商业区不同充放电策略下虚拟电厂负荷曲线。可以看出, 无序充电策略下, 电动汽车集中在同一时段到达目的地接入电网, 即插即充式充电模式导致在电网的负荷高峰时段出现“峰上加峰”现象, 在一定程度上加剧负荷峰谷差, 对电网的安全稳定运行造成较大威胁; 在有序充电策略下, 更多的电动汽车用户选择在负荷低谷时段充电, 有效避免了负荷高峰对电网的冲击, 平抑负荷波动; 有序充放电策略下, 电动汽车用户不仅在负荷低谷时段进行充电, 填补负荷低谷, 而且在负荷高峰时段向电网反向馈电, 降低负荷高峰的同时减小自身成本。

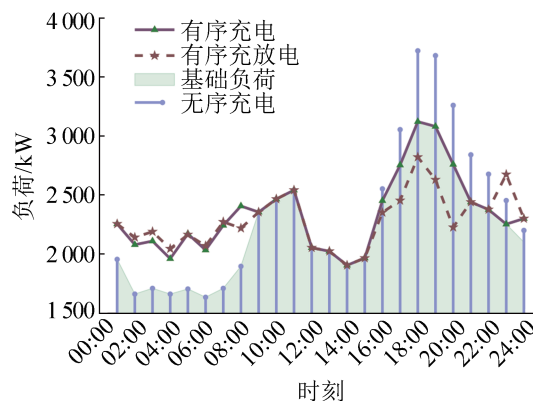


图8 不同充放电策略下的负荷曲线(住宅区)
Fig. 8 Load curves under different charging and discharging methods (residential area)

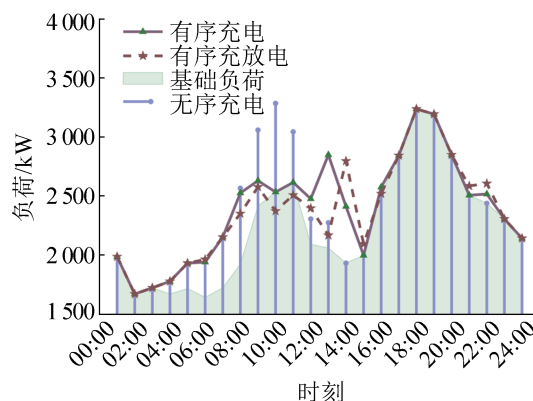


图9 不同充放电策略下的负荷曲线(商业区)
Fig. 9 Load curve under different charging and discharging methods (business district)

关于不同有序充电策略下的电动汽车负荷变化曲线如图10所示。可以看出，有序充电的充电负荷集中在24:00—次日07:00，凌晨时刻电网负荷较低，充电电价低廉，故有序充电策略下，大多数电动汽车会选择在电价更加优惠时段进行充电操作。在考虑用户满意度的有序充电策略下，电动汽车用户对费用最满意的时刻集中在电价较低的凌晨时段，此时达到最小的充电成本和最大的用户满意度。同时，电网负荷处于低谷，激增的充电负荷对电网影响较小，故在00:00—04:00时出现电动汽车集中充电现象，04:00—05:00时充电计划有所减少，得益于费用满意度的降低。

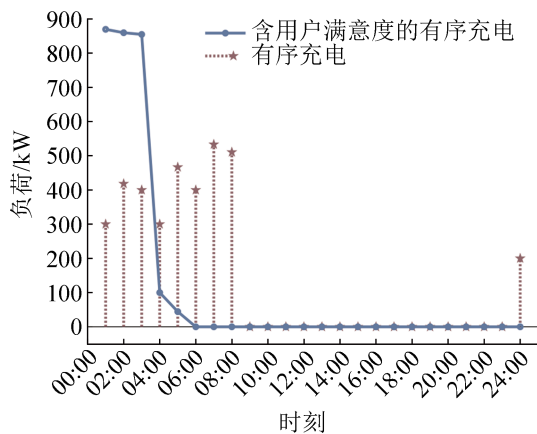


图10 不同有序充电策略下的负荷变化
Fig. 10 Load change under different orderly charging strategies

住宅区、商业区充放电功率如图11~12所示。分析可知，两区域电动汽车充放电功率、电网负荷曲线变化与电动汽车充放电价格一致。对两区域而言，在00:00—08:00，电网电价较低，基础负荷小，鼓励电动汽车在谷底时进行充电；在16:00—20:00，电网电价较高，且参与负荷较多，为降低负荷峰谷差，鼓励电动汽车在此时进行放电，减小用户充电成本，增加用户参与电网调峰的积极性，以降低负荷高峰，填充负荷低谷。

住宅区电动汽车可减少电网负荷的峰谷差，使发电、用电趋向平衡，有效实现削峰填谷。商业区电动汽车充放电情况受区域功能性与离网时

间的影响，参与电网调峰效果劣于住宅区。忽略地域因素影响，电动汽车参与有序充放电策略，均可以借助用户“低充高放”的套利心理，利用电价引导电动汽车充电时间转移，确保能够在电网负荷低峰时段充电来“填谷”，在负荷高峰时段放电以“削峰”，从而实现电动汽车负荷的大范围平移，达到电网削峰填谷、减少峰谷差的效果。

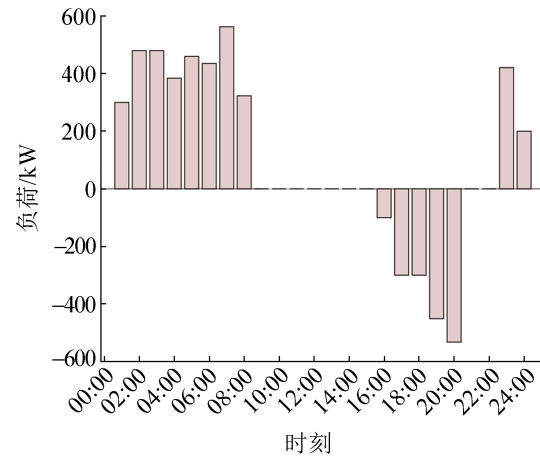


图11 住宅区充放电功率分布
Fig. 11 Distribution map of charging and discharging power in residential area

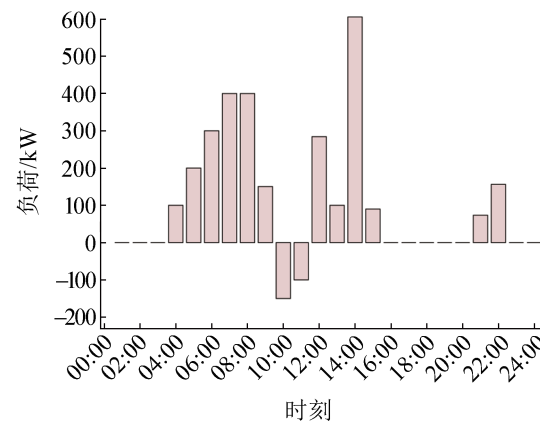


图12 商业区充放电功率分布
Fig. 12 Distribution map of charging and discharging power in business district

4.4 模型经济性分析

在满足博弈目标情况下，可得到电动汽车有序充电的博弈电价。由图13可知，聚合商购电价普遍低于电动汽车充电价格，由此产生价格差，

获得服务差价。同时,为减小电动汽车用户成本,博弈电价均在所设电价的上下限范围内。结合基础负荷情况可知,在00:00—08:00,电网负荷压力小,设置较低的充电电价,引导用户在此期间充电,降低负荷曲线峰谷差;在5时可再生能源发电出力远大于负荷,此时并网售电价格较低,引导电动汽车充电,以消纳过剩的可再生能源。

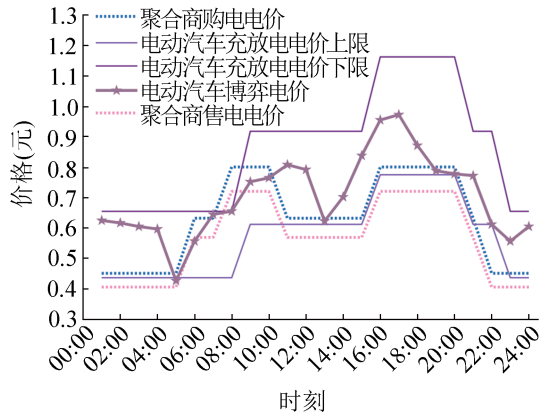


图13 电价分布图

Fig. 13 Electricity price distribution map

不同策略下的实验指标如表3所示,相比于无序充电,有序充电和有序充放电策略下,负荷峰谷差下降明显,分别减少了44.42%和56.1%,用户平均成本下降了54.9%和75.05%,满足用户成本最小的期望;在有序充放电策略下,电动汽车接入电网的削峰填谷作用显著,同时放电收益也带来了自身成本的减少。纵向来看,商业区用户成本在不同策略下均普遍高于住宅区用户,符合商业用电的盈利性质,为聚合商带来更大的利益收入;同时,住宅区负荷削峰填谷作用优于商业区。

表3 不同策略下不同地区的试验指标

Table 3 Test indicators in different regions under different strategies

策略	负荷峰谷差/kW		用户平均成本(元)	
	住宅区	商业区	住宅区	商业区
无序充电	2 086.8	1 504.6	13.47	15.22
有序充电	1 159.8	1 459.8	6.01	10.27
有序充放电	915.9	1 359.8	3.36	8.61

4.5 优化模型优势分析

为验证双层优化模型在面对大量分布式能源与负荷的不确定性和用户参与响应对车网互动的影响,在此考虑4种不同情况下的模型,设定场景如下:①场景I,无序充电;②场景II,不考虑区间优化与满意度的有序充放电;③场景III,不考虑用户满意度的有序充放电;④场景IV,本文所建模型方法。不同场景下的试验指标如表4所示。

表4 不同场景下的试验指标

Table 4 Test indexes in different scenarios

场景	负荷峰谷差/kW	用户平均成本(元)	聚合商成本(元)
I	2 086.8	13.47	191 898
II	1 239.8	3.52	111 920
III	799.3	3.36	106 041
IV	915.9	3.23	104 204

从表4可知,电动汽车无序充电时的峰谷差、用户与聚合商成本均达到最大,这是因为电动汽车采用即插即充策略,不考虑价格和负荷波动。场景II由于忽视分布式能源的不确定性带来的影响,使三项指标相比场景I有所下降,但优化效果一般。场景IV与场景III相比,负荷峰谷差从799.3 kW变为915.9 kW,但远小于场景I的值,另外,用户成本和聚合商运营成本均得到有效控制;在考虑用户对价格的满意度后,促使用户加大放电功率以换取补偿费用,但对电网的利益造成部分损失。由此可知,所提的双层优化模型,兼顾了电网的负荷平抑、保证用户与聚合商的成本得到有效控制。

考虑两阶段电动汽车优化调度模型,第一阶段以用户充放电成本最小为目标确定电动汽车有序充放电功率,第二阶段以第一阶段充放电功率作为约束,建立以聚合商运营成本最小为目标的优化模型,分时电价取双层模型博弈电价区间的中点值,从而保持变量区间一致,所涉及的削峰

填谷能力与各项成本对比如表5所示。

从表5可以看出，采用两阶段优化模型时，用户平均成本高于双层模型，聚合商成本相对较低，负荷峰谷差较大。与双层模型相比，两阶段优化模型采用固定分时电价，没有考虑用户的价格满意度，忽略了用户的实际需求。双层优化模型采用博弈电价，兼顾了电力交易中参与各主体的多边利益，在降低负荷峰谷差的同时，满足用户成本与聚合商成本最小的优化目标。因此，双层优化模型的削峰填谷能力与处理参与主体利益冲突方面效果较优。

表5 不同优化模型下的试验指标

模型	负荷峰谷差/kW	用户平均成本(元)	聚合商成本(元)
双层优化	915.9	3.23	104 204
两阶段优化	1 507.3	4.14	64 783

4.6 区间优化适用性分析

从图14可知，采用区间优化方法，在不同波动程度的不确定因素干扰下，模型的目标函数值最终均能达到收敛状态，即在充分尊重用户满意度的前提下，区间优化方法是行之有效的。

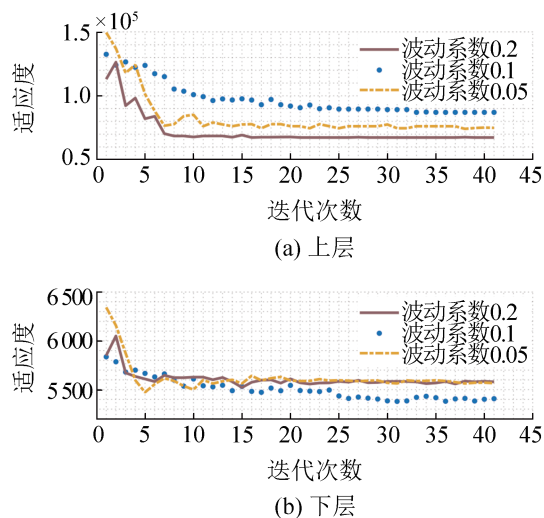


图14 不同波动系数模型迭代收敛结果

Fig. 14 Iterative convergence results of models under different fluctuation coefficients

为了验证可再生能源的波动幅度对电动汽车参与电网调度的影响，考虑3种不同的波动系数，效果如图15所示。

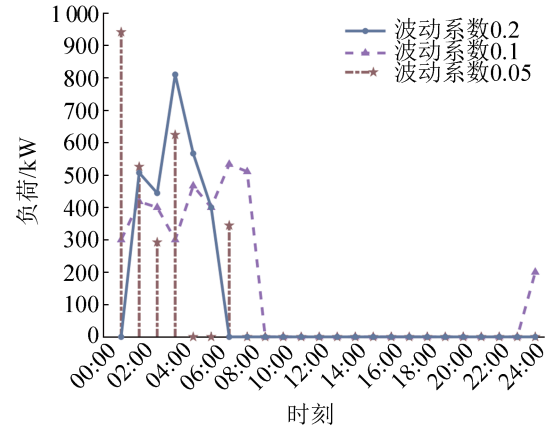


图15 不同波动系数的影响

Fig. 15 Influence of different fluctuation coefficients

由图15可以看出，在波动系数增大时，波动区间增加，可再生能源的不确定性加剧，但电动汽车依旧集中在负荷低谷时期进行充电。此外，随着可再生能源的波动范围增加，区间优化获得的电动汽车充电负荷调度结果的最小值有所提升，保守性降低，证实了本文所提方法在处理不确定性问题时的优越性。因此，采用区间优化，可以平衡光伏、风电等可再生能源大量接入电网所带来的负荷波动；通过设置不同的波动系数，改变可能度水平，在不同程度上克服源、荷的不确定性产生的影响，可以使得决策方案增加抗风险的能力，具备较好的工程价值。

5 结论

针对可再生能源与大规模电动汽车接入电网带来的电网负荷变化，本文提出了一种基于虚拟电厂区间的主从博弈优化模型。首先，采用的双层优化调度模型，充分考虑用户参与满意度，将人为因素嵌入电力市场交易中，符合“人因工程”的发展趋势。其次，在合理电价范围内不断博弈

电动汽车充放电价格, 直至达到博弈均衡解, 得到的最优充放电调度策略充分满足各主体的利益最大化, 降低了电力交易参与者的矛盾冲突对负荷波动的影响。最后, 面对分布式电源出力与负荷大量接入电网带来的巨大波动, 采用区间优化理论, 降低源荷的不确定性对车网互动过程的严重影响。

算例结果表明: ①考虑用户满意度的有序充放电策略下用户平均用电成本较无序充电、有序充电策略下的用电成本有所降低, 经济性更优, 更大程度上调动了电动汽车用户参与电网调节的积极性; ②本文所提双层区间博弈模型在削峰填谷、经济性方面较其他优化模型有较大优势, 既兼顾了电网、聚合商与电动汽车用户的多边利益, 又充分考虑了电动汽车用户对价格的敏感性, 调动电动汽车积极参与削峰填谷; ③在区间优化方式下, 不确定因素的波动范围对系统稳定性的影响较小, 具有较好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 单葆国, 刘青, 张莉莉, 等. 新形势下"十四五"后三年中国电力需求形势研判[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 1-11.
Shan Baoguo, Liu Qing, Zhang Lili, et al. Analysis of China's Power Demand Situation in the Last Three Years of the "14th Five-year Plan" Under the New Situation[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 1-11.
- [2] 毛玲, 张钟浩, 赵晋斌, 等. 车-桩-网交融技术研究现状及展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6357-6371.
Mao Ling, Zhang Zhonghao, Zhao Jinbin, et al. Research Status and Prospects of Fusion Technology of Vehicle-charging Pile-power Grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6357-6371.
- [3] 邢亚虹, 孟长虹, 黄倩, 等. 考虑风光出力不确定性的电动汽车充电站多目标双层规划[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(1): 20-30.
Xing Yahong, Meng Changhong, Huang Qian, et al. A Bilevel Multi-objective Planning of Electric Vehicle Charging Station Considering Uncertainty of Wind Power and Photovoltaic[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2024, 55(1): 20-30.
- [4] 刘敦楠, 王玲湘, 汪伟业, 等. 基于深度强化学习的大规模电动汽车充换电负荷优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 36-46.

- Liu Dunnan, Wang Lingxiang, Wang Weiye, et al. Optimal Scheduling of Electric Vehicle Load for Large-scale Battery Charging and Swapping Based on Deep Reinforcement Learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 36-46.
- [5] 李旭东, 杨焱, 李帆琪, 等. 计及电价不确定性和容量衰减的电动汽车充放电商业模式[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 38-48.
Li Xudong, Yang Ye, Li Fanqi, et al. Business Models of Electric Vehicle Aggregators Considering Electricity Price Uncertainty and Capacity Decay[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 38-48.
 - [6] 张玮琪, 王沿胜, 杨钊, 等. 考虑新能源、电动汽车充电站与储能协调优化的分布鲁棒规划方法研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(8): 114-125.
Zhang Weiqi, Wang Yansheng, Yang Zhao, et al. Research on Distributionally Robust Planning Method for Coordination and Optimization of New Energy, Electric Vehicle Charging Station and Energy Storage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(8): 114-125.
 - [7] 王佳惠, 牛玉广, 陈玥, 等. 电-碳联合市场下虚拟电厂主从博弈优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 235-242.
Wang Jiahui, Niu Yuguang, Chen Yue, et al. Master-slave Game Optimal Dispatching of Virtual Power Plant Under Electricity-carbon Joint Market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 235-242.
 - [8] Li Jianfang, Peng Daogang, Zhao Huirong, et al. A 'Spatial-temporal' Bi-layer Optimal Control Strategy of Large-scale Electric Vehicles (EVs) in a Multi-area Virtual Power Plant (VPP) Oriented to Dual Carbon Target[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(7): 1445-1461.
 - [9] Mónica Hernández Cedillo, Sun Hongjian, Jiang Jing, et al. Dynamic Pricing and Control for EV Charging Stations with Solar Generation[J]. Applied Energy, 2022, 326: 119920.
 - [10] Sun Qie, Fu Yu, Lin Haiyang, et al. A Novel Integrated Stochastic Programming-information Gap Decision Theory (IGDT) Approach for Optimization of Integrated Energy Systems (IESs) with Multiple Uncertainties[J]. Applied Energy, 2022, 314: 119002.
 - [11] Dai Yeming, Qi Yao, Li Lu, et al. A Dynamic Pricing Scheme for Electric Vehicle in Photovoltaic Charging Station Based on Stackelberg Game Considering User Satisfaction[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 154: 107117.
 - [12] 李军, 梁嘉诚, 刘克天, 等. 计及用户响应度的电动汽车充放电优化调度策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8):

- 123-132.
- Li Jun, Liang Jiacheng, Liu Ketian, et al. Optimal Scheduling Strategy for Electric Vehicles Charging and Discharging Considering User Responsiveness[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 123-132.
- [13] 刘明杭, 田书, 梁英达. 考虑电动汽车用户满意度的微电网双层多目标优化调度[J]. 分布式能源, 2022, 7(2): 18-25.
- Liu Minghang, Tian Shu, Liang Yingda. Double-level Multi-objective Optimal Scheduling of Microgrid Considering Customer Satisfaction of Electric Vehicles [J]. Distributed Energy, 2022, 7(2): 18-25.
- [14] 赵鹏翔, 李振, 王楠, 等. 基于源荷双侧主从博弈的园区综合能源系统运行优化策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 109-116, 122.
- Zhao Pengxiang, Li Zhen, Wang Nan, et al. Operation Optimization Strategy for District Integrated Energy System Based on Stackelberg Game Between Supply and Demand Sides[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(9): 109-116, 122.
- [15] 华远鹏, 王圆圆, 白宏坤, 等. 含电动汽车虚拟电厂的区间主从博弈优化调度[J]. 热力发电, 2022, 51(7): 163-170.
- Hua Yuanpeng, Wang Yuanyuan, Bai Hongkun, et al. Interval Master-slave Game Optimal Scheduling of Virtual Power Plant with Electric Vehicle[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(7): 163-170.
- [16] 蔡国伟, 姜雨晴, 黄南天, 等. 电力需求响应机制下基于多主体双层博弈的规模化电动汽车充放电优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 85-98, 中插8.
- Cai Guowei, Jiang Yuqing, Huang Nantian, et al. Large-scale Electric Vehicles Charging and Discharging Optimization Scheduling Based on Multi-agent Two-level Game Under Electricity Demand Response Mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 85-98, S8.
- [17] Wu Shengcheng, Pang Aiping. Optimal Scheduling Strategy for Orderly Charging and Discharging of Electric Vehicles Based on Spatio-temporal Characteristics[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 392: 136318.
- [18] 胡荷娟, 孙晓燕, 曾博, 等. 考虑源-荷不确定性的矿山综合能源系统多时间尺度区间优化调度[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 827-835.
- Hu Hejuan, Sun Xiaoyan, Zeng Bo, et al. Multi-time-scale Interval Optimal Dispatch of Coal Mine Integrated Energy System Considering Source-load Uncertainty[J]. Control and Decision, 2024, 39(3): 827-835.
- [19] 王浩林, 张勇军, 毛海鹏. 基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 207-213.
- Wang Haolin, Zhang Yongjun, Mao Haipeng. Charging Load Forecasting Method Based on Instantaneous Charging Probability for Electric Vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 207-213.
- [20] 蹇林旒. 倾听电动汽车背后的民众心声[J]. 电气时代, 2018(9): 96.
- Jian Linni. Listening to the Voices of Customers[J]. Electric Age, 2018(9): 96.