

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.247007

虚拟电厂与电动汽车运营商的主从-演化混合博弈调度方法

戚佳金¹, 尹淑淙², 张良², 王殿彬², 龙彦良², 张超锐²

(1. 杭州电力设备制造有限公司, 浙江 杭州 310016; 2. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对电动汽车需求响应机制下电动汽车多主体的复杂博弈问题, 提出一种考虑低碳目标的虚拟电厂与电动汽车运营商的主从-演化混合博弈的调度方法。首先, 基于 logit 协议构建电动汽车充放电调度演化博弈模型。其次, 建立虚拟电厂与电动汽车的主从-演化混合博弈模型。虚拟电厂作为领导者制定电价, 电动汽车聚合商作为跟随者根据电价确定充放电策略。最后, 联合求解纳什均衡和演化均衡, 得到各主体最优策略。通过仿真实验, 验证所提方法能够在考虑电动汽车用户利益的同时, 有效减少电网的碳排放量, 降低负荷的峰谷差, 实现多主体的合作共赢。

关键词: 电动汽车; 低碳; 主从博弈; 演化博弈

A master-slave evolutionary hybrid game-based scheduling method for virtual power plants and electric vehicle operators

QI Jiajin¹, YIN Shucong², ZHANG Liang², WANG Dianbin², LONG Yanliang², ZHANG Chaorui²

(1. Hangzhou Electric Power Equipment Manufacturing Company Limited, Hangzhou 310016, China; 2. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

Abstract: To address the complex multi-agent game problem of electric vehicles under demand response mechanisms, a scheduling method is proposed for virtual power plants and electric vehicle operators based on a master-slave evolutionary hybrid game, considering low-carbon objectives. First, an evolutionary game model for electric vehicle charging and discharging scheduling is constructed based on the logit protocol. Second, a master-slave evolutionary hybrid game model is established between the virtual power plants and electric vehicles, where the virtual power plants act as leaders to set electricity prices, and electric vehicle aggregators act as followers to determine charging and discharging strategies based on the prices. Finally, the Nash equilibrium and evolutionary equilibrium are jointly solved to obtain the optimal strategies for each agent. Simulation results verify that the proposed method can effectively reduce grid carbon emissions and mitigate load peak-valley differences while considering the interests of electric vehicle users, thereby achieving win-win outcomes among multiple parties.

This work is supported by the Major Science and Technology Special Project of Jilin Province (No. 20240204001SF).

Key words: electric vehicle; low carbon; master-slave game; evolutionary game

0 引言

在“碳达峰”、“碳中和”目标的推进下, 我国经济结构产业不断调整, 全国用电峰谷差加大, 电动汽车(electric vehicle, EV)凭借其低碳节能、响应迅速等优点迅速发展。据统计, 截至2024年6月底,

基金项目: 吉林省重大科技专项课题资助(20240204001SF)

全国新能源汽车的保有量达到2472万辆, 占汽车总量的7.18%, 预计到2030年, 我国电动汽车保有量将达到8300万辆^[1]。通过对大规模电动汽车的合理、高效调度, 可以充分利用EV同时具备的负荷和电源双重性质, 降低EV入网带来的负荷压力, 提高电力系统对新能源的消纳能力, 实现经济效益和环境效益的双赢^[2-4]。然而在电动汽车优化调度过程中, 多主体之间相互掣肘、相互作用, 如何统筹

兼顾多方利益显得尤为重要。

目前,国内外学者对电动汽车与电网问题均取得了一定的研究成果。在电动汽车调度方面,文献[5]为了应对大规模电动汽车无序充电引起的配电网运行损耗加剧问题,提出一种基于分区域动态电价的电动汽车充放电策略,以提升配电网经济性和电压质量。针对实时电价需求响应机制在电动汽车调度方面的不足,文献[6]提出了一种双层实时滚动优化策略,仿真实验表明,所提优化策略能够显著降低负荷峰谷差。文献[7]研究电动汽车放电行为,评估车网互动车网互动(vehicle-to-grid, V2G)经济、社会效益,分析不同偏好 EV 用户充放电策略,并以聚合商收益为目标搭建优化模型。文献[8]考虑 EV 接入电网时对多元化能源出力随机性和波动性的平抑作用,构建了 EV 参与虚拟电厂的整体多目标优化模型。该模型有效优化了系统运行成本及碳排放成本,充分发挥了 EV 接入电网带来的运行效益和环境效益。

关于多主体行为的研究,文献[9]针对大规模电动汽车接入造成的负荷压力问题,提出一种考虑充放电一体站与电动汽车互动的主从博弈模型,所提模型能够使用户和充放电一体站均得到最大收益。文献[10]基于 Stackleberg 理论建立了虚拟电厂电功率跟踪目标和用户利益最大目标的主从博弈模型,基于仿真实验得到的分时电价,能够以更高精度实现对虚拟电厂功率跟踪的引导控制。文献[11]为了更好地解决车网互动各主体之间的冲突,挖掘电动汽车调度潜力,将虚拟电厂聚合商作为上层, EV 用户作为下层,构建了基于虚拟电厂的主从博弈车网互动双层优化调度模型,统筹聚合商与 EV 用户的利益,并且削峰填谷效果较好。文献[12]针对大规模电动汽车参与电网需求响应的充放电协同调度问题,提出了电动汽车集群充放电演化博弈协同策略,所提模型能有效地实现削峰填谷,同时保障电动汽车用户群体的利益。为了解决电动汽车参与需求响应的调度不准确问题,构建了网-商-车协同优化调度模型,所提模型能够准确描述 3 个主体的博弈行为和顺序,并且在保证领导者效益最大化的同时,兼顾了跟随者的利益。文献[14]针对现有电动汽车参与充放电调度中存在的多主体利益考虑不全面、充电站定价机制不完善等问题,提出了一种基于多主体主从博弈的电动汽车充电站双层定价策略,能够提高充电站利润,并降低用户成本。为解决用户意愿不确定性及聚合商与用户间的利益协调问题,文献[15]提出了计及用户意愿的电动汽车

聚合商主从博弈优化模型,经算例验证,所提模型提高了聚合商和用户的经济性,并且实现了削峰填谷。目前电动汽车优化调度所采用的博弈方法大多为主从博弈和演化博弈^[16-19],其中针对多主体复杂问题,主从博弈层级决策关系明确,但是认为 EV 用户是“完全理性”的参与者,忽略了用户出行策略选择的动态过程,并且由于实际情况复杂, EV 用户无法在理想的环境下进行决策;而演化博弈认为用户是“有限理性”个体,受认知局限和学习能力的约束,依赖有限信息,参与者所选择的策略基于动态演化机制,通过复制者动态方程刻画群体策略的演化过程,虽然能够描述参与群体决策的学习过程,但是难以解决多主体交互的问题。

综上所述,本文在新型电力系统的背景下,提出了一种虚拟电厂与电动汽车联合的主从-演化混合博弈低碳调度策略,兼顾主从博弈的层级优化和演化博弈的动态演化,基于比例共享原则计算节点碳势,并为电动汽车用户提供分时电价;基于 logit 协议构建 EV 种群的演化博弈模型,利用分时电价引导电动汽车用户有序充放电,在用电高峰时段引导电动汽车用户参与放电,实现电网削峰填谷、降低碳排放,并缓解大规模电动汽车接入对电网运行的冲击。

1 混合博弈模型框架

本文主从-演化混合博弈模型如图 1 所示。

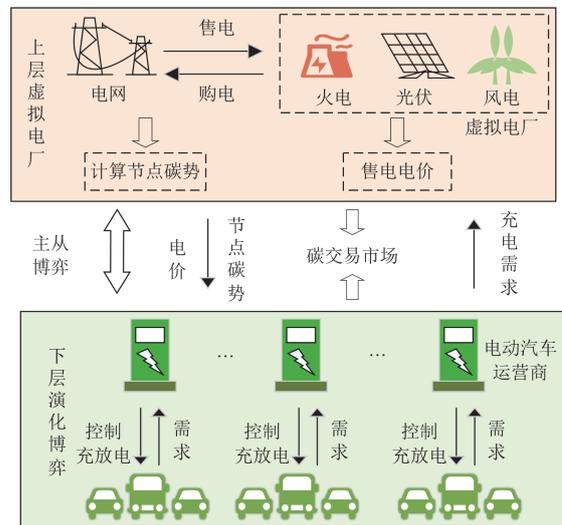


图 1 博弈模型框架

Fig. 1 Framework of game model

虚拟电厂依靠自身的分布式资源整合能力和信息调度能力,将传统火电机组与风电、光伏等新能源发电有机结合,实现电力市场与碳市场的协同参与。电动汽车聚合商通过智能技术和数据分析,将

大量电动汽车连接起来, 参与电力市场的能量交换和辅助服务。电动汽车聚合商通过整合电动汽车充电需求数据, 作为代理参与市场交易。用户出售碳配额参与碳市场交易, 通过充放电参与电市场交易。本文通过计算节点碳势为用户提供区域内碳排放情况, 利用电价和出售碳配额来引导用户的充放电行为, 激励用户参与电网调度, 并引导用户低碳排放。

本文中虚拟电厂由燃气轮机组、常规负荷和电动汽车负荷组成。考虑到电动汽车与虚拟电厂两个主体之间的利益冲突, 构建了虚拟电厂与电动汽车聚合商的主从-演化混合博弈模型。上层考虑汽轮机组发电成本、购售电成本等建立虚拟电厂运营商成本最低模型, 同时基于比例共享原则计算碳排放量, 并给出充放电电价; 下层根据上层虚拟电厂给出的充放电电价, 在 EV 种群内部进行演化博弈。

2 基于比例共享原则的碳排放流追踪理论

电力系统具有“异地排碳”的特征, 因此碳排放责任应由发电侧与用电侧共同承担。根据系统潮流计算结果, 利用比例共享原则将系统某些节点的碳排放责任合理地分摊到相关的其他节点。碳排放流追踪理论是将碳排放分析与电力系统潮流计算相结合的方法, 将碳排放看作一种虚拟的网络流, 依附于电力潮流, 用来表示电力系统中维持任意支路潮流的碳排放。电力系统碳排放流计算的本质是根据潮流分布定量确定电力系统碳排放流的流动状态^[20]。

设定网络拓扑结构为一个包含 n 个节点的系统, 其中 M 个节点接入机组, K 个节点连接负荷。利用 MatPower 计算系统潮流, 求出系统的机组注入功率矩阵、负荷分布矩阵和支路潮流矩阵等, 由于电力潮流路径决定了碳排放的传递路径, 各节点的注入功率由并网发电机按比例分配提供, 碳排放流也按照相同比例分配, 故各节点的碳排放强度可由上游发电机的碳排放进行加权平均得到, 进而计算得到系统的节点碳势。本文基于配电网拓扑结构进行分析, 图 2 为配电网碳排放流示意图。

系统节点的碳势由接入节点的发电机产生的碳排放流和其他节点流入该节点的碳排放流共同决定。集合 I 为节点 i 的集合, 第 i 个节点的节点碳势记为 e_i 。

$$e_i = \frac{\sum_{i \in I} P_{bi} \rho_i + P_{Gi} e_{Gi}}{\sum_{i \in I} P_{bi} + P_{Gi}} \quad (1)$$

式中: P_{bi} 为节点 i 注入有功功率, 由系统潮流计算得到; ρ_i 为支路碳流密度, 定义为支路碳流率与有

功功率的比值, $\rho_i = \frac{R}{P}$, R 为支路碳流率, 即单位时间内随潮流通过的碳排放量, P 为有功功率; P_{Gi} 为节点 i 发电机组注入功率; e_{Gi} 为节点 i 发电机组碳排放强度, 由于每台发电机都有独特的碳排放特性, 故本文在碳排放流计算过程中将其作为已知条件^[21-22]。

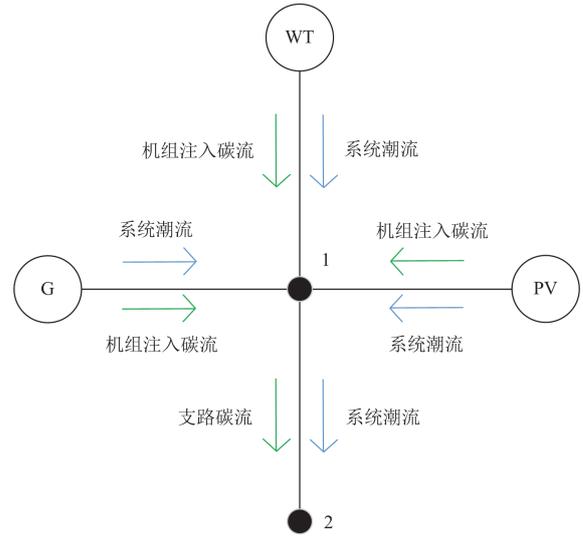


图 2 配电网碳排放流示意图

Fig. 2 Diagram of carbon emission flow in distribution network

在得到节点碳势后, 用户根据自身的充电需求以及碳减排意愿选择自己的出行策略。根据节点碳势计算电动汽车运行时的碳配额, 进而得到电动汽车参与碳市场的收益。考虑将行驶相同距离的传统燃油汽车产生的碳排放与电动汽车充电过程中产生的碳排放差值作为电动汽车的碳配额。由于基准线法在促进电动汽车节能减排方面效果更为显著, 因此采用基准线法进行研究。根据基准线法, 电动汽车获得的碳配额为

$$Q_{ev,k} = (L \times \alpha_u - e_{i,t}) \times P_t^{EV} \times \Delta t \quad (2)$$

式中: $Q_{ev,k}$ 为第 k 辆电动汽车获得的碳配额; L 为单位电量电动汽车行驶的里程; α_u 为传统燃油汽车行驶单位里程的碳排放系数; $e_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的碳势; P_t^{EV} 为 t 时段电动汽车的充电功率; Δt 为充电时长^[23]。

电动汽车用户通过在碳交易市场上出售碳配额来增加 EV 车主的收入。碳交易机制是一种通过市场化手段对碳排放权进行配额分配和交易, 从而有效控制碳排放量的机制。在碳市场交易中, 政府首先设定碳排放总量并按照基准线法向企业分配初始碳配额, 企业需在履约期内通过碳市场购买或出售

碳配额以满足碳排放少于配额的需求。电动汽车用户作为间接减排主体,通过参与碳配额交易获取收益。根据目前的交易政策,相较于发放新能源补贴,免费分配碳配额能更有效地激励电动汽车用户,从而充分释放其减排特性。电动汽车参与碳市场交易的碳收益为

$$p_c = q_{ev} \times Q_{ev,k} \quad (3)$$

式中: p_c 为电动汽车碳收益; q_{ev} 为电动汽车碳配额售价,设为 0.25 元/kg^[24-25]。

将电动汽车参与碳市场交易的收益与用户充电成本一同纳入到用户出行成本中,因此,节点碳势可与电价形成协同引导机制,共同优化电动汽车用户的充放电策略。

3 上层虚拟电厂调度模型

虚拟电厂是一种通过信息通信技术和软件系统实现分布式能源资源聚合和协调优化的电力协调管理系统。通过智能电网技术和大数据分析,将分散的能源资源(如电动汽车、分布式可再生能源、储能、氢能等)进行聚合和管理,提高电网调峰能力,平衡电网供需,优化分布式资源的运行,降低供电成本,提高电网可靠性。

3.1 目标函数

上层虚拟电厂优化调度模型以运营成本最低为目标函数 C_{up} , 表示为

$$\min C_{up} = c_{wind} + c_{pv} + c_{co_2} + c_{nt} + c_b - c_{sell} - c_{down} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} c_{wind} = q \times P_{wind} \\ c_{pv} = q \times P_{pv} \\ c_{co_2} = K_{co_2} \times (e_{nt} + e_{buy}) \\ c_{nt} = c_{gas} \times \frac{P_{nt}}{\eta} \\ c_b = 0.5 \times (P_{buy} + P_{sell}) \times P_{trans} + \\ \quad 0.5 \times (P_{buy} - P_{sell}) \times P_{trans} \end{cases} \quad (5)$$

式中: c_{wind} 为风力发电成本; q 为风电、光伏单位发电成本; P_{wind} 为风电发电量; c_{pv} 为光伏发电成本; P_{pv} 为光伏发电量; c_{co_2} 为碳污染治理成本; K_{co_2} 为二氧化碳治理费用; c_{nt} 为燃气轮机发电成本; c_{gas} 为天然气费用; P_{nt} 为燃气轮机发电量; η 为燃气轮机发电效率; e_{nt} 、 e_{buy} 分别为燃气轮机、主网碳排放强度; P_{buy} 为购电电价; P_{sell} 为售电电价; P_{trans} 为配电网与主网交互功率; c_b 为虚拟电厂向主网购电成

本; c_{sell} 为售电成本; c_{down} 为电动汽车聚合商购电成本。

3.2 约束条件

1) 燃气轮机输出功率约束

$$P_{M \min} \leq P_M \leq P_{M \max} \quad (6)$$

式中: P_M 为燃气轮机输出功率; $P_{M \max}$ 、 $P_{M \min}$ 分别为燃气轮机的最大、最小输出功率。

本文设定 1000 辆电动汽车参与充放电,基于电动汽车充电功率,设定燃气轮机输出功率为 2~6 MW。

2) 燃气轮机爬坡约束

$$f_d < P_{M,t} - P_{M,t-1} < f_u \quad (7)$$

式中: $P_{M,t}$ 为 t 时段注入节点的燃气轮机功率; f_d 为燃气轮机的下坡率; f_u 为燃气轮机的上坡率。

3) 配电网与主网联络线约束

$$P_{tr} \leq P_{lim} \quad (8)$$

式中: P_{tr} 为配电网与主网联络线功率; P_{lim} 为配电网与主网联络线功率上限。

4) 平衡节点约束

$$\theta_i^{re} = 0^\circ \quad (9)$$

式中: θ_i^{re} 为 t 时段平衡节点电压的相角。

5) 各节点功率平衡约束

$$P_{M,t} + P_{w,t} + P_{pv,t} - (P_{l,t}^{in} - P_{l,t}^{out}) = D_{e,t} \quad (10)$$

式中: $P_{w,t}$ 为 t 时段注入节点的风电功率; $P_{pv,t}$ 为 t 时段注入节点的光伏功率; $P_{l,t}^{in}$ 为 t 时段的节点流入功率; $P_{l,t}^{out}$ 为 t 时段的节点流出功率; $D_{e,t}$ 为 t 时段的节点预测功率。

4 下层 EV 充放电策略演化博弈模型

在电力需求响应机制下,电动汽车聚合商(electric vehicle aggregator, EVA)根据用户充放电行为动态调整各时段充电电价,这关系到每个 EV 用户的利益, EV 用户的经济效益会因其他 EV 用户的充放电行为而改变。因此, EVA 管理下的众多 EV 用户的充放电策略是一个多主体的博弈问题。由于本文选择多个 EV 种群作为主体,使得决策空间更加多维、复杂,传统的单一主体优化方法无法解决此类问题,而博弈论可为多主体行为决策问题提供解决方法。

经典博弈论认定参与者是完全理性的个体,用户基于完全信息,并以最小成本为目标,对充放电电价做出动态响应,用户的行为严格按照成本最小决策,这虽然极大地简化了博弈的分析过程,但现实情况的多变导致参与者的行为并不是理性行为,此方法对现实博弈问题的适用性存在显著局限;演

化博弈认为参与者的行为是非理性行为, 用户受到认知偏差或者信息不完全的影响, 对于电价的变化反应迟缓或仅有部分用户调整充放电行为, 因此可以更合理地刻画实际情况下EV用户的各种博弈行为。

考虑到电动汽车出行具有极大的不确定性, 用户不同的充电习惯, 包括入网时间、离网时间、入网荷电状态(state of charge, SOC)以及离网SOC等, 都会在电动汽车用户参与需求响应调度时对不同的充放电策略产生不同的影响。本文将出行行为一致的EV用户聚合为一个EV种群, 在同样的电价激励下, 相同的出行行为会使种群内的用户对充电策略的选择具有相同的趋势。

4.1 生成 EV 策略集及约束条件

将电动汽车聚合商管理范围内所有出行行为一致的EV聚合为一个EV种群, 按照一定的约束条件, 随机生成一个包含 N 个充放电策略的策略集。策略集 ϕ 是电动汽车用户在96个时段内的充放电功率的集合, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} \phi = \{R_1, R_2, \dots, R_Y, \dots, R_N\} \\ R_Y = \{p_{1,Y}, p_{2,Y}, \dots, p_{t,Y}\} \end{cases} \quad (11)$$

式中: R_Y 为生成的第 Y 个策略; $p_{t,Y}$ 为第 Y 个策略中 t 时段的充放电功率, EV 充电时 $p_{t,Y}$ 为正值, EV 放电时 $p_{t,Y}$ 为负值。

在演化博弈过程中, 每台EV在策略集中选取某一个策略, 用 $x_Y(t)$ 表示 t 时段EV种群选择策略 Y 的比例, 使 $0 \leq x_Y(t) \leq 1$, 且 $\sum_{Y=1}^N x_Y(t) = 1$ 。

本文将出行行为一致的 EV 用户聚合为一个 EV 种群, 故生成的每个 EV 种群内部的 EV 用户策略集的约束条件均相同。所以在电池额定容量、初始 SOC、离网时 SOC 期望值、额定充放电功率以及 EV 电池充放电等式约束的条件下, 生成 N 个充放电策略。

用户离网期望约束。理想情况下, EV接入电网后即刻进行充电, 在离网时, 充电量应该能够达到用户预期SOC。并且在充电时间内的充电量不能超过电池额定容量。

$$S_{\text{ex}} \leq S_{\text{out}} \leq 1 \quad (12)$$

式中: S_{ex} 为用户期望的离网SOC值; S_{out} 为EV离网时刻SOC值。

电池 SOC 约束。过度充电会导致电池过热, 影响电池性能及其使用寿命, 也可能会损害充电设备, 增加维修成本; 过度放电会破坏电池内部的化学成

分, 影响其可逆性, 降低储电能力和续航能力。因此为延长电池的使用寿命及提高性能, 应该避免过度充放电, 尽量保持电池在适当的 SOC 范围内。

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (13)$$

式中: S_t 为 t 时段电池荷电状态; S_{\max} 、 S_{\min} 为电池最大、最小荷电状态。

电池充放电等式约束为

$$S_{t+1} = \begin{cases} S_t + \frac{P_t \eta_c \Delta t}{C}, P_t > 0 \\ S_t, P_t = 0 \\ S_t + \frac{P_t \Delta t}{\eta_f C}, P_t < 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_t 为 t 时段的充放电功率; η_c 为电池充电效率; η_f 为电池放电效率; C 为电池容量。

4.2 动态博弈方程

适应度函数是演化博弈理论概念的核心, 类似于经典博弈理论中的支付函数。在演化博弈中, 直观上可以看作是某种支付函数, 但需要进行转换。支付函数的作用是表示参与者在博弈中获得的效用水平, 表明参与者采取某种策略的结果, 能够帮助理解参与者在不同策略下的得失, 预测参与者的行为。在本文中, 适应度函数是EV支付函数与EV策略选择概率的乘积。适应度函数表示为

$$f_Y(t) = x_Y(t) U_{\text{EV}}(t) \quad (15)$$

式中: f_Y 为演化博弈中的适应度函数; U_{EV} 为电动汽车用户出行成本, 作为演化博弈中的支付函数。

本文中支付函数是每辆车每天的充电成本减去碳配额收益, 如式(16)所示。

$$U_{\text{EV}} = \sum_{t=1}^T p_{t,Y}^k \times J_{\text{EV},t} \times \Delta t - p_c \quad (16)$$

式中: T 为一天 96 个时段; $J_{\text{EV},t}$ 为 t 时段 EV 充放电价格, 由上层虚拟电厂提供, 演化博弈过程中是常数。

在演化博弈中, 转换概率用于研究其对固定概率的影响, 并推导出确定固定概率的公式。在特定的博弈框架内, 研究模型参数对策略的影响。在本文的演化中, EV用户会比较当前策略与其他策略的收益, 利用条件转换概率来不断选择收益更高的策略。在演化过程中, EV选择的充电策略会不断变化, EV的经济效益也会增加。演化博弈过程中EV种群的动态演化过程可由式(17)表示。

$$\frac{\partial x_m}{\partial t} = \sum_{Y=1}^N x_Y(t) \mu_{Y,m}^k [U_{\text{EV}}^k(t)] - x_m(t) \sum_{Y=1}^N \mu_{m,Y}^k [U_{\text{EV}}^k(t)] \quad (17)$$

式中: U_{EV}^k 为第 k 辆电动汽车用户出行成本;

$\mu_{Y,m}^k[U_{EV}^k(t)]$ 为 t 时段第 k 辆电动汽车从策略 Y 转移到策略 m 的条件转移概率； $\mu_{m,Y}^k[U_{EV}^k(t)]$ 为 t 时段第 k 辆电动汽车从策略 m 转移到策略 Y 的条件转移概率； $x_m(t)$ 表示 t 时段 EV 种群选择策略 m 的比例。

由于EV用户出行行为通常根据以往的经验记忆确定，这种行为充满了随机性和不确定性，导致对EV充电成本的预测具有显著的不确定性，预测结果可能与实际结果有较大偏差。而本文所采用的演化博弈方法，基于用户非完全理性和非完全信息，能够更真实地反映EV用户的充电行为，其中以logit协议为基础的修正策略能够充分考虑用户的行为偏好和随机性，更合理地模拟EV用户的出行行为。

条件转换概率为

$$\mu_{m,Y}^k[U_{EV}^k(t)] = \frac{\exp[f_Y(t)\delta^{-1}]}{\sum_{Y=1}^N \exp[f_m(t)\delta^{-1}]} \quad (18)$$

式中： δ 为噪声等级，取值为0.02。

此时，EV种群的动态演化方程为

$$\frac{\partial x_m}{\partial t} = \mu_{m,Y}^k[U_{EV}^k(t)] - x_m(t) = \frac{\exp[f_Y(t)\delta^{-1}]}{\sum_{Y=1}^N \exp[f_m(t)\delta^{-1}]} - x_m(t) \quad (19)$$

实际情况下，EV种群选择不同的策略会影响EV个体的支付函数、适应度函数以及条件转换概率，导致其不断变化。并且随着演化博弈的进行，EV用户会逐渐趋向于某个充放电策略，选取策略的概率最终趋于稳定。此时EV种群内部的用户均会选择某一个策略不会更改，这意味着演化博弈达到了演化均衡。

4.3 演化稳定策略求解

针对上述动态演化方程，本文采用分布式迭代算法进行求解，将式(17)转变为离散化的动力学方程，如式(20)所示。

$$x_m(u+1) = x_m(u) + \beta\{\mu_{m,Y}^k[U_{EV}^k(X)] - x_m(u)\} \quad (20)$$

式中： u 为演化博弈迭代次数； β 为演化博弈迭代步长； X 表示整个EV群体选择充放电策略的状态， $X = [x_1(t), \dots, x_Y(t), \dots, x_N(t)]$ 。

动态演化博弈求解步骤如下。

步骤 1：在 4.1 节的约束条件下，生成 N 个充放电策略，并随机生成初始策略的选取占比。

步骤 2：根据式(16)生成 EV 在各策略下的支付函数；

步骤 3：根据式(15)生成 EV 在各策略下的适应度函数；

步骤 4：按照式(18)计算各充放电策略的条件转换概率；

步骤 5：依据式(20)更新 EV 不同策略的选择比例；

步骤 6：判断是否达到演化均衡，若达到，输出演化稳定策略，否则，重复步骤 3—步骤 5。

对于其他EV种群，可以根据其出行行为，按照上述求解步骤计算适应度函数和条件转换概率，最终达到演化博弈均衡状态，得到最优充放电策略。

5 系统模型求解

5.1 改进粒子群算法

粒子群优化(partied swarm optimization, PSO)算法易于实现、收敛速度快，且具有良好的性能，但是其很容易过早地收敛到一个非最优解，因此本文提出改进的粒子群算法。

在粒子群算法中，惯性权重对算法的搜索能力具有重要影响。具体而言，较大的惯性权重值能够增强算法的全局寻优能力，但可能会削弱其局部寻优能力；相反，较小的惯性权重值更利于局部搜索。本文提出的改进粒子群算法通过迭代寻优机制，在综合考虑粒子个体认知(个体最优解)与群体协作(全局最优解)的基础上，采用自适应权重调节策略平衡个体经验与群体经验的权重分配，并引入增强型信息共享机制提升粒子间合作效率，从而有效避免传统算法因经验权重失衡导致的寻优发散问题，能够稳定求解本文提出的混合博弈优化问题。惯性权重优化的策略为

$$w = \begin{cases} w_{\min} + \left[\frac{(w_{\max} - w_{\min}) \times (f - f_{\min})}{f_{\text{av}} - f_{\min}} \right], & f \leq f_{\text{av}} \\ w_{\max}, & f > f_{\text{av}} \end{cases} \quad (21)$$

式中： w 为种群惯性权重； w_{\max} 、 w_{\min} 分别为种群惯性权重最大、最小值； f 为种群的适应值； f_{av} 、 f_{\min} 分别为所有粒子的平均适应度和最小适应度。

5.2 模型求解流程

本文采用分布式迭代算法求解上述虚拟电厂运营商优化调度模型和电动汽车动态演化博弈模型组成的主从-演化混合博弈模型。其求解流程图如图 3 所示。

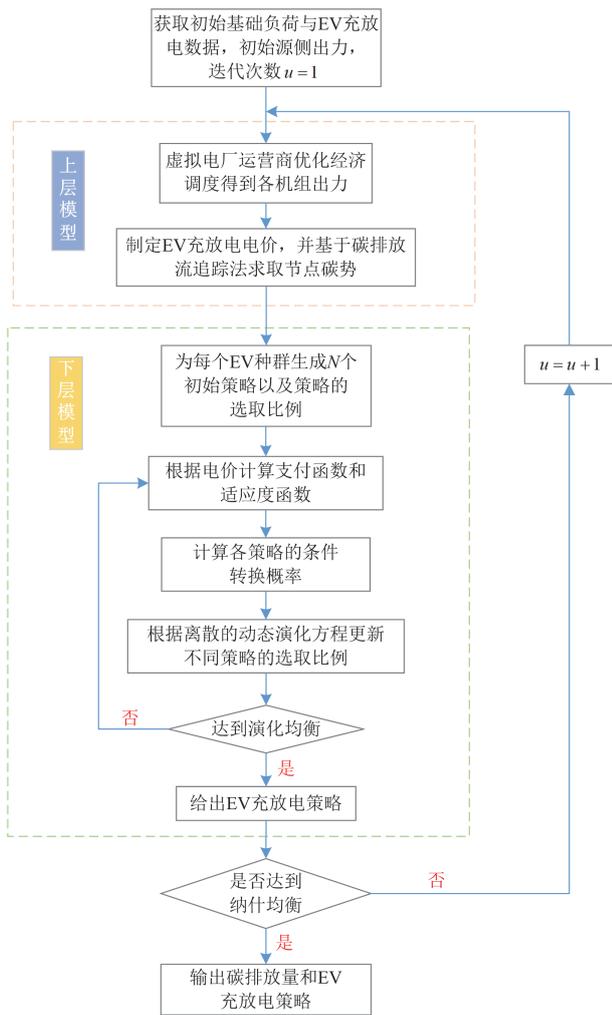


图3 混合博弈模型求解流程图

Fig. 3 Flow chart of solving hybrid game models

6 算例分析

6.1 参数设置

本文采用IEEE33节点系统验证本文所提方法的适用性及可拓展性。在系统中节点1与上级电网相连, 节点5与小型燃气轮机连接, 节点12与光伏发电机组连接, 节点23连接风力发电机组, 节点14设置充电站。另外为保证本文数据的适用性, 基础负荷数据来自文献[25]。

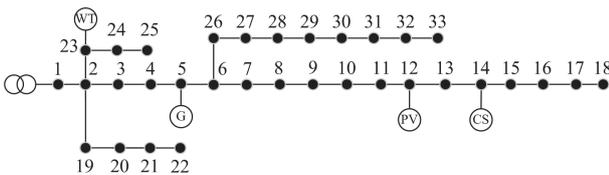


图4 IEEE33节点系统拓扑图

Fig. 4 Topology diagram of IEEE33-bus system

由于 1 kWh 的电能相当于 0.1 m³ 的天然气, 故燃气轮机组天然气费用设为 0.255 元/m³[26], 发电效率均为 0.196。燃气轮机组的参数如表 1 所示。设定上级电网分时电价如表 2 所示。

表 1 燃气轮机组参数

机组	最大输出功率	最小输出功率	最大上升(下降功率)
1	6	2	1

表 2 上级电网电价

时段类型	时段	售电/(元/kWh)	购电/(元/kWh)
峰时段	10:00—14:00,	1.1295	0.9164
	17:00—21:00		
平时段	08:00—10:00,	0.7263	0.5124
	14:00—17:00		
谷时段	00:00—08:00,	0.3129	0.2017
	21:00—24:00		

设置电动汽车电池容量为 75 kWh, 最大充电功率为 7.7 kW, 最大放电功率为 7.7 kW, 充电效率为 0.95, 放电效率为 0.9。电动汽车初始分时电价如表 3 所示。

表 3 EV 初始分时电价

时段类型	时段	电价/(元/kWh)
峰时段	09:00—14:00, 17:00—21:00	0.95
平时段	14:00—17:00, 21:00—24:00	0.6
谷时段	00:00—09:00	0.45

6.2 结果分析

截取任意 6 个 EV 种群的充放电负荷, 如图 5 所示。由图 5 可以看出, 不同种群的电动汽车用户

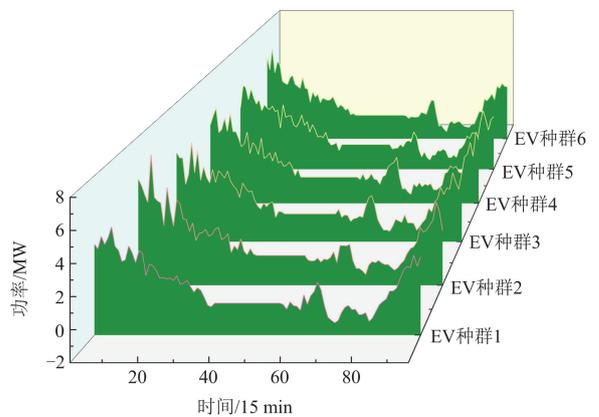


图5 截取任意 6 个 EV 种群充放电负荷

Fig. 5 Capturing the charging and discharging loads of any 6 EV populations

选择的充放电策略不同,对于变化的电价,具有不同电价敏感度的用户群体,其充放电时段选择并不完全遵循电价波动规律,具有超前或滞后性。虽然不同种群对电价的敏感程度不同,但是各种群均选择经济效益更高的充电策略,即负荷高峰时进行放电或者不充电,负荷低谷时进行充电。

图6展示了采用 PSO 算法、灰狼算法和本文所提改进 PSO 算法得到的负荷曲线,可以看出本文所提改进 PSO 算法相较于其他两种方法负荷峰谷差更低,具有更好的寻优效果。

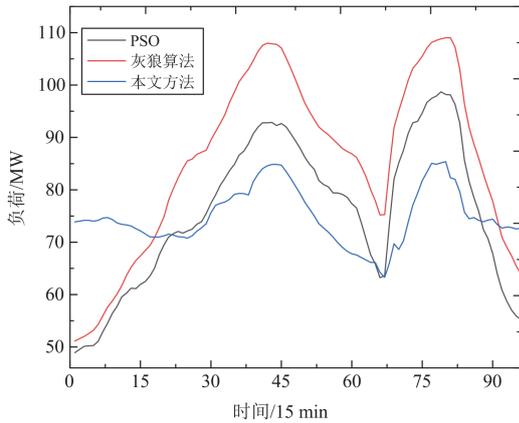


图6 不同算法负荷曲线

Fig. 6 Load curves of different algorithms

图7、图8分别为充电完成后 EV 的 SOC 和小型燃气轮机的日出力。可以看出,通过改进粒子群算法进行优化求解,除个别车辆外,大部分车辆 SOC 值均超过 90%,另外小型燃气轮机日出力均满足模型约束,验证了本文所提方法的有效性。

为了验证本文所提方法的有效性,将无序充电模型、基于 PSO 算法的主从博弈调度模型与本文主

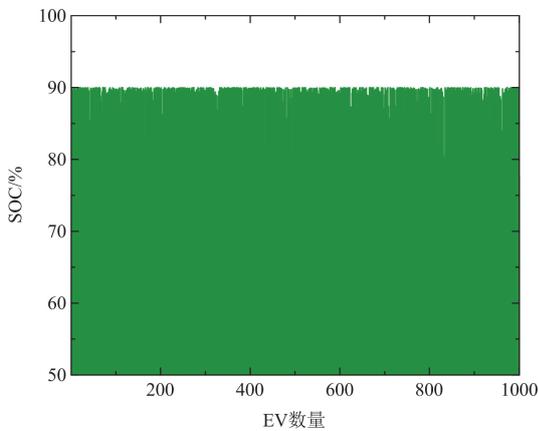


图7 充电完成后 SOC

Fig. 7 SOC after completing charging

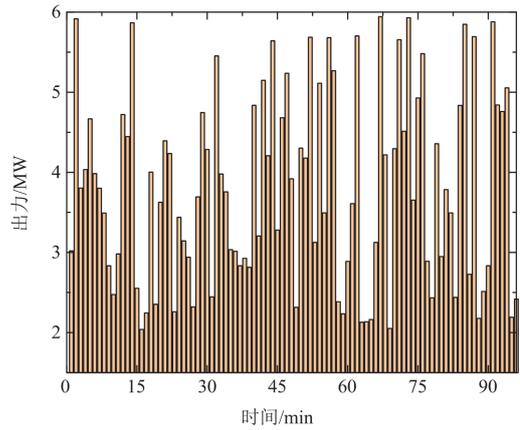


图8 小型燃气轮机日出力

Fig. 8 Daily output of small gas turbine

从一演化混合博弈模型的仿真结果进行对比,并设定2个充放电场景,场景1为电动汽车用户在电价引导下进行充放电行为;场景2为电动汽车用户根据上层给出的电价及节点碳势进行充电,上层根据用户的负荷规划电价,二者不断博弈,即本文所提模型。

各种场景、调度方法的负荷曲线如图9所示。以负荷峰谷差、负荷方差为负荷指标衡量调度方法的削峰填谷效果,结果如表4所示。

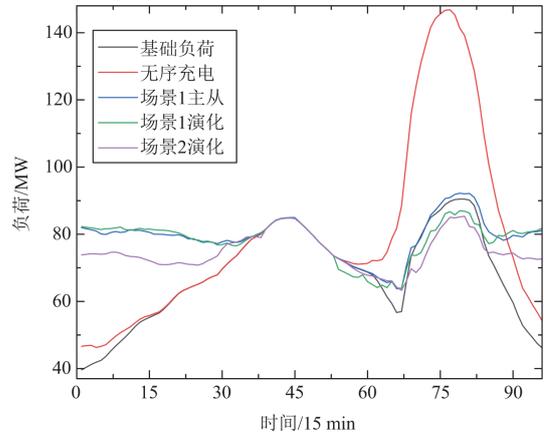


图9 各场景和调度方法下的负荷曲线

Fig. 9 Load curves under various scenarios and scheduling methods

表4 各场景和调度方法下的负荷峰谷差及负荷方差
Table 4 Load peak valley difference and load variance under various scenarios and scheduling methods

	负荷峰谷差/MW	负荷方差/MW ²
无序充电	100.55	752.92
场景1演化博弈	23.12	34.75
场景1主从博弈	28.41	37.56
场景2演化博弈	22.07	28.39

根据图 9 和表 4 可以看出,在无序充电情况下,用户按照固定电价进行充电,电动汽车用户在到达目的地后立即接入电网,这种即插即用的模式会导致电网负荷在高峰时段进一步叠加,加剧电网的负荷峰谷差。在场景 1 主从博弈充放电调度模型中,用户根据分时电价进行充放电,算法考虑个体和全局最优,虽然负荷峰谷差与方差较无序充电更低,但是忽略了用户群体的动态演化;而本文提出的主从-演化混合博弈模型充分考虑用户的非理性行为,兼顾层级优化和用户的动态演化,能够根据充电负荷不断调整充放电电价,用户能够在更优惠的电价下进行充电,并且在演化过程中不断迭代,寻找演化均衡,得到最优充放电策略,使得负荷峰谷差和方差比主从博弈方法更小。

通过图 10 和表 4 对比不同场景下用户的调度方法。场景 1 下,上层虚拟电厂仅通过电价对电动汽车充放电行为进行引导,一定程度上减小了负荷峰谷差和负荷方差;而场景 2(即本文提出方法)利用节点碳势和电价共同作用,通过主从-演化博弈不断优化电价以及充电策略,为电动汽车提供更加优惠的充放电电价,鼓励用户参与调度,因此场景 2 负荷峰谷差和方差比场景 1 更低。基于上述分析可知,本文提出的主从-演化混合博弈具有良好的削峰填谷效果。

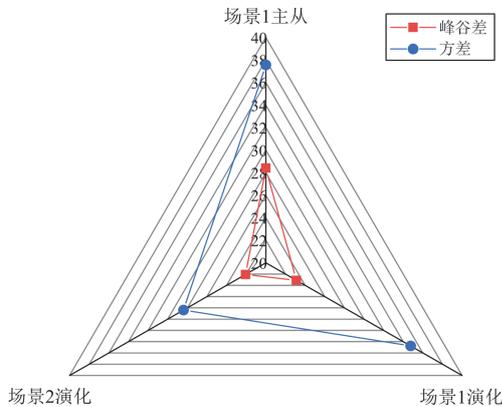


图 10 各场景和调度方法的负荷指标

Fig. 10 Load indicators for various scenarios and scheduling methods

由表 5 和图 11 可知,相较于无序充电,采用 PSO 算法的充放电调度策略通过分时电价不断调整自身充放电策略,引导用户在低电价时进行充电,充电成本降低幅度达 34%以上。而本文方法通过演化博弈充分考虑用户非理性行为,并根据适应度函数不断修正充放电策略,不断博弈得到最优策略,降低用户充电成本 35.5%以上;相较于场景 1,场

景 2 考虑了节点碳势对电动汽车充放电行为的引导作用,使电动汽车碳排放量相较于场景 1 降低了 9.9%,大大降低了电动汽车充放电行为产生的碳排放。另外,由于主从-演化混合博弈同时具备层级优化和动态演化特性,用户能够选择更优的出行策略,上层虚拟电厂的成本也较主从博弈方法有所降低。由此可见,本文构建的主从-演化混合博弈模型实现了虚拟电厂、电动汽车聚合商与用户三方利益的有效均衡,同时显著降低了系统碳排放水平。

表 5 各调度方法下 EV 充电成本及碳排放量

Table 5 EV charging costs and carbon emissions under various scheduling methods

	EV 总成本/元	碳排放量/kg	虚拟电厂成本/元
无序充电	77 912.065	71 817.1	2 170 403.25
场景 1 演化博弈	50 215.57	12 861.89	171 429.27
场景 1 主从博弈	51 337.13	14 329.39	186 753.15
场景 2 演化博弈	48 419.05	5 756.81	167 332.02

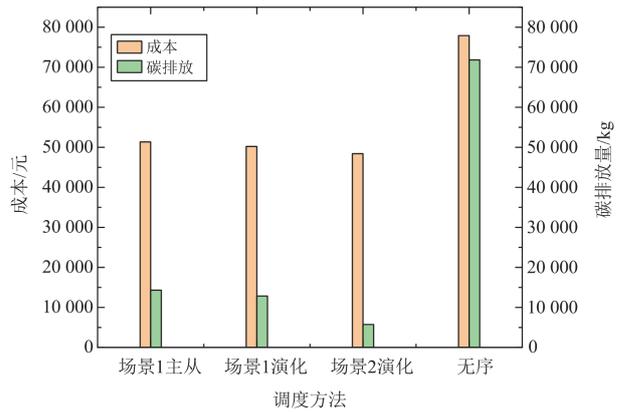


图 11 各场景和调度方法的成本及碳排放

Fig. 11 Costs and carbon emissions of various scenarios and scheduling methods

7 结论

在大规模电动汽车接入电网,造成电网波动,影响电网稳定性的背景下,本文提出了考虑低碳目标的虚拟电厂运营商与电动汽车运营商的主从-演化混合博弈的电动汽车调度方法,通过算例验证得到以下结论。

1) 本文使用演化博弈的方法,在“有限理性”和“有限信息”的条件下,对电动汽车用户的出行行为进行建模,模型效果更接近实际情况,可更加合理地模拟 EV 博弈行为,使博弈结果更加准确合理。

2) 本文提出的混合博弈模型全面考虑了虚拟电厂运营商、电动汽车聚合商和电动汽车用户之间的动态交互关系。该模型通过双层优化框架实现系

统均衡：上层虚拟电厂运营商基于经济最优原则进行调度决策，下层电动汽车用户通过演化博弈动态调整充放电策略，最终达成演化稳定均衡，以上层为领导者、下层为跟随者进行主从博弈，达到纳什均衡。采用节点碳势和分时电价进行引导，激励电动汽车改变出行行为，降低电网波动。

参考文献

[1] 侯慧, 何梓烟, 侯婷婷, 等. 大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 177-187.
 HOU Hui, HE Xinyan, HOU Tingting, et al. A review of demand response strategies and potential evaluation for large-scale vehicle to grid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 177-187.

[2] 邓衍辉, 李剑, 卢国强, 等. 考虑分区域动态电价机制引导的电动汽车充电优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 33-44.
 DENG Yanhui, LI Jian, LU Guoqiang, et al. Charging optimization strategy of electric vehicles guided by the dynamic tariff mechanism of a subregion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 33-44.

[3] 朱思嘉, 余思雨, 王戈, 等. 基于条件风险价值的电动汽车充电站规划[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 13-18, 82.
 ZHU Sijia, YU Siyu, WANG Ge, et al. Research on charging station planning of EV based on CVaR[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 13-18, 82.

[4] 张智禹, 王致杰, 杨皖昊, 等. 基于充电需求预测的电动汽车充电站选址规划研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 39-49.
 ZHANG Zhiyu, WANG Zhijie, YANG Wanhao, et al. Research on location planning of electric vehicle charging station based on prediction of charging demand[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 39-49.

[5] 王敏, 吕林, 向月. 计及 V2G 价格激励的电动汽车削峰协同调度策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 27-33, 85.
 WANG Min, LÜ Lin, XIANG Yue. Coordinated scheduling strategy of electric vehicles for peak shaving considering V2G price incentive[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 27-33, 85.

[6] 王鹤, 汪瑶, 边竞, 等. 基于改进滚动时域法的大规模电动汽车接入电网双层实时调度策略[J/OL]. 电网技术: 1-12[2025-04-22]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1646>
 WANG He, WANG Yao, BIAN Jing, et al. A bi-level real-time dispatch strategy for large-scale electric vehicles into smart grid based on an improved rolling horizon method[J]. Power System Technology: 1-12[2025-04-22].

<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1646>

[7] 洪睿洁, 顾丹珍, 莫阮清, 等. 基于用户偏好的电动汽车储能 V2G 策略优化[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(08): 2659-2667.
 HONG Ruijie, GU Danzhen, MO Ruanqing, et al. Research on optimization of EV energy storage V2G strategy based on user preference[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(8): 2659-2667.

[8] 于卓, 门进宝, 王军, 等. 低碳目标下计及电动汽车 V2G 的虚拟电厂优化调度方法[J]. 电信科学, 2024, 40(7): 175-184.
 YU Zhuo, MEN Jinbao, WANG Jun, et al. Optimal dispatch method of virtual power plant considering electric vehicle V2G under the low carbon target[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(7): 175-184.

[9] 朱永胜, 常稳, 武东亚, 等. 考虑充放储一体站与电动汽车互动的主从博弈优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 157-167.
 ZHU Yongsheng, CHANG Wen, WU Dongya, et al. A Stackelberg game optimization scheduling strategy considering the interaction between a charging-discharging-storage integrated station and an electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 157-167.

[10] 戚军, 王浚潇, 胡伟俊, 等. 计及电能质量的虚拟电厂分时电价主从博弈优化方法[J/OL]. 电力系统自动化: 1-21[2025-03-09]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250123.2135.006>
 QI Jun, WANG Junxiao, HU Weijun, et al. Time-of-use price bidding and optimization method based on master-slave game for virtual power plants considering power quality[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-21[2025-03-09]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250123.2135.006>

[11] 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.
 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.

[12] 刘东奇, 张曦, 钱奕衡. 电动汽车集群充放电演化博弈协同策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 84-93.
 LIU Dongqi, ZHANG Xi, QIAN Yiheng. Evolutionary game coordination strategy of electric vehicle cluster charging and discharging[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 84-93.

[13] 张程, 严子晟, 江炜龙. 考虑 EV 用户演化的多主体低碳合作优化运行策略[J]. 电网技术, 2025, 49(6): 2544-2553.

- ZHANG Cheng, YAN Zisheng, JIANG Weilong. Optimized operation strategy for multi-agent low-carbon cooperation considering EV user evolution[J]. Power System Technology, 2025, 49(6): 2544-2553.
- [14] 喻磊, 王锐, 程杉, 等. 基于多主体主从博弈的电动汽车充电站双层定价策略[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(3): 243-254.
- YU Lei, WANG Rui, CHENG Shan, et al. Two-level pricing strategy for electric vehicle charging stations based on multi-agent Stackelberg game[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 243-254.
- [15] 房宇轩, 胡俊杰, 马文帅. 计及用户意愿的电动汽车聚合商主从博弈优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5091-5103.
- FANG Yuxuan, HU Junjie, MA Wenshuai. Optimal dispatch strategy for electric vehicle aggregators based on Stackelberg game theory considering user intention[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5091-5103.
- [16] 程乐峰, 杨汝, 刘贵云, 等. 多群体非对称演化博弈动力学及其在智能电网电力需求侧响应中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 20-36.
- CHENG Lefeng, YANG Ru, LIU Guiyun, et al. Multi-population asymmetric evolutionary game dynamics and its applications in power demand-side response in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 20-36.
- [17] 林国营, 卢世祥, 郭昆健, 等. 基于主从博弈的电网公司需求响应补贴定价机制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 59-67.
- LIN Guoying, LU Shixiang, GUO Kunjian, et al. Stackelberg game based incentive pricing mechanism of demand response for power grid corporations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 59-67.
- [18] ZHANG L, LIU Y, HAO L, et al. Multi-objective optimal scheduling strategy of microgrid based on V2G technology[C] // 2022 12th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), December 23-25, 2022, Guangzhou, China: 597-601.
- [19] VARGHESE T, SANTHI B, ARUN P B. Integration of distributed generation system and electric vehicle charger in V2G mode for grid voltage sag mitigation[C] // 2022 International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems & Renewable Energy (ICFCR), July 21-22, 2022, Malappuram, India: 1-7.
- [20] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43, 85.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85.
- [21] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44-49.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49.
- [22] WU Xingping, YANG Wei, ZHANG Ning, et al. A distributed computing algorithm for electricity carbon emission flow and carbon emission intensity[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(2): 138-146.
- [23] 陈中, 陆舆, 邢强, 等. 考虑电动汽车碳配额的电力系统调度分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 44-51.
- CHEN Zhong, LU Yu, XING Qiang, et al. Dispatch analysis of power system considering carbon quota for electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 44-51.
- [24] ZHANG Liang, YIN Qingbo, ZHU Wenwei, et al. Research on the orderly charging and discharging mechanism of electric vehicles considering travel characteristics and carbon quota[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 3012-3027.
- [25] 张良, 孙成龙, 蔡国伟, 等. 基于 PSO 算法的电动汽车有序充放电两阶段优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1837-1852.
- ZHANG Liang, SUN Chenglong, CAI Guowei, et al. Two-stage optimization strategy for coordinated charging and discharging of EVs based on PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1837-1852.
- [26] 魏震波, 马新如, 郭毅, 等. 碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统优化运行[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 1-9.
- WEI Zhenbo, MA Xinru, GUO Yi, et al. Optimized operation of integrated energy system considering demand response under carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 1-9.

收稿日期: 2024-09-28; 修回日期: 2025-04-22

作者简介:

戚佳金(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能用电及电动汽车充换电技术; E-mail: 1594886192@qq.com

尹淑淙(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为车网低碳充放电调控; E-mail: 1764125647@qq.com

张良(1985—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为车-网耦合互动、储能系统优化调度。E-mail: xiaozhanghit@163.com

(编辑 许威)