

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230107

电动汽车集群充放电演化博弈协同策略

刘东奇, 张曦, 钱奕衡

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对多电动汽车参与电网需求响应互动场景下电动汽车充放电协同调度需求, 提出一种电动汽车聚合商动态定价并指导电动汽车规模化入网参与电力需求响应调度的两阶段博弈模型。首先, 构建电动汽车聚合商动态定价下计及电动汽车聚合商成本和电动汽车充放电价格的非合作博弈模型。其次, 提出基于 logit 协议的电动汽车充放电调度多策略集演化博弈模型。最后, 联合求解两阶段博弈的演化均衡和纳什均衡, 得到各主体的最优策略。算例仿真表明, 所提模型能有效实现电网负荷的削峰填谷, 同时兼顾电动汽车聚合商和电动汽车用户的经济利益。

关键词: 电力需求响应; 演化博弈; 充放电调度; 非合作博弈; 电动汽车

Evolutionary game coordination strategy of electric vehicle cluster charging and discharging

LIU Dongqi, ZHANG Xi, QIAN Yiheng

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: There is a need for electric vehicle charging and discharging coordination scheduling in the scenario of multiple electric vehicles participating in the grid demand response interaction. Thus a pricing and scheduling game model is proposed to guide the electric vehicle aggregators to dynamically price and participate in the grid demand response scheduling at scale. First, a non-cooperative game model is constructed under the dynamic pricing of the EV aggregator. This takes into account the cost of the EV aggregator and the charging and discharging price of the EV. Secondly, a multi-strategy set evolutionary game model for electric vehicle charging and discharging scheduling based on logit protocol is proposed. Finally, the evolutionary and Nash equilibria of the price-scheduling game are jointly established to obtain the optimal strategy of each agent. The simulation results show that the proposed model can effectively realize the peak shaving and valley filling of power grid load, and can take into account the economic interests of electric vehicle aggregators and electric vehicle users at the same time.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177068).

Key words: electricity demand response; evolutionary game; charging and discharging scheduling; non-cooperative game; electric vehicle

0 引言

交通电气化是实现碳削减的重要一环^[1]。随着电动汽车(electric vehicle, EV)的逐步普及, 其大量无序充电带来的电网峰谷差加剧、配电变压器容量不足等问题逐渐凸显。近 6 年来, EV 的增长量是公用充电桩的 8.6 倍^[2], 显著拉长了 EV 充电的平均等待时间, 使得电动汽车充电的空间随机性和时间随机性进一步加剧。因此, 亟需对规模化接入电网

的电动汽车充放电进行有序控制和管理, 以提高配电网应对大规模 EV 接入的承载能力和运行经济性。

2015 年, 中共中央国务院印发的《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》指出, 应全面推进电力交易体制改革, 鼓励电力用户和负荷聚合商参与电力需求响应。2019 年, 上海开展的“填谷”需求响应试点表明, 价格激励能有效引导 EV 参与填谷响应, 填谷响应时段的负荷是平时负荷的 7.8 倍。北京、深圳等地同期开展的车网双向充放电(Vehicle-to-grid, V2G)试点项目也对 EV 参与电网各类型辅助服务的控制技术和商业模式等进行了应用验证^[3]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177068)

为进一步探索负荷侧参与需求响应的潜力, 研究人员对 EV 参与电网需求响应展开了大量研究。文献[4]结合电池充电特性, 研究了停车场下的 EV 充电调度问题。文献[5]提出一种考虑网络结构的 EV 调度优化模型。文献[6-7]将上述文献的电网到车辆(grid to vehicle, G2V)的单向充电机制拓展为双向充放电机制, EV 既可以作为负荷参与电网“填谷”, 又可以作为储能设备向电网放电“削峰”来获得经济补偿, 在单台或者多台电动汽车统一参与电网调度方面作出了积极的探索, 而在多个电动汽车利益主体参与电网互动的调度策略方面仍有待深入研究。

为研究多个主体的行为, 本文采用博弈论^[8]分析多个决策者之间的战略互动。目前, 基于博弈论对 EV 充放电优化调度进行研究的文献主要分为两类。第一类是配电网运营商(distribution system operator, DSO)或电动汽车聚合商(electric vehicle aggregator, EVA)通过竞价或智能定价引导 EV 有序充放电的非合作博弈模型, 包括虚拟电厂作为售电运营商参与 EV 有序充电管理的主从博弈模型^[9]、综合能源微网内微网运营商基于分时电价和电热需求响应引导 EV 参与调度的主从博弈模型^[10]、非理想参与行为下多 EVA 竞价的两阶段非合作博弈模型^[11]、DSO 主导下多利益主体 EVA 参与的非合作动态博弈模型^[12]、日前投标市场下考虑 EV 调控能力不确定性的充电运营商竞争投标的双层投标-分配模型^[13]等; 第二类是 EVA、EV 用户和 DSO 等多方之间建立合作协议的合作博弈模型, 包括实时电力市场中电网、EVA 和 EV 用户基于联盟内利润分配机制的联盟博弈模型^[14]、TOU 设置下 EV 用户之间共享储能的合作博弈模型^[15]、电动汽车代理商在动态 TOU 机制下对 EV 用户充放电时段进行引导规划的合作博弈模型^[16]等。

上述第一类 EVA 和 EV 用户之间的互动多基于传统的主从博弈模型进行研究, 将 EV 用户建模为“完全理性”参与者, EVA 通过智能定价引导 EV 进行有序充放电, 但由于实际决策环境的复杂性和信息差, 参与者无法在完全理想的环境下进行决策。且现有研究大多集中在 EV 与电网之间的博弈关系上, 很少考虑 EV 之间潜在的交互关系。而将一般博弈论和动态演化过程有机结合的演化博弈^[17-18], 不要求博弈方完全理性, 也不要求博弈方获取的信息是完全信息, 演化博弈的关键点在于, 一种策略的成功不仅取决于策略本身的优劣, 还取决于它在一组可选策略集中的优势以及其他策略的出现频率, 通过分析参与人在不同策略下的收益获得演化

稳定策略。因此演化博弈能更合理描述实际场景下 EV 用户的决策行为。在电力工业领域, 演化博弈目前已经应用在多区域能源共享^[19]、电力市场竞价交易^[20-21]、可再生能源消纳^[22]等场景, 但在分布式电动汽车集群优化调度方面存在策略集容量大且连续变化、联合求解困难等难点, 所以应用较少。

围绕电力需求响应机制下多决策主体参与的 EV 集群充放电互动博弈问题, 本文提出一种电动汽车聚合商动态定价并指导电动汽车规模化入网参与电力需求响应调度的两阶段博弈模型。依次建立 EVA 成本模型、EV 充放电价格模型以及以 EVA 能源成本最小为目标的非合作博弈模型, 并证明了非合作博弈纳什均衡的存在性和最优性; 然后基于 logit 协议构建了 EV 充放电最优调度策略的演化博弈模型, 并利用分布式迭代算法求解; 最后联合求解两阶段博弈模型得到纳什均衡解, 即 EV 最优充放电调度策略。

1 系统博弈模型框架

本文博弈模型适用的市场模式和模型框架如图 1 所示。EVA 从主网获取电能, 是其管辖区域内所有充电站的聚合体, 负责满足管辖区域内所有 EV 的充电需求, 并负责市场的出清和运行。区域内的 EV 用户通过智能移动设备或智能车载设备进行注册和身份认证, 通过装有智能芯片的充电桩与 EVA 进行通信^[23]。EV 用户自愿与 EVA 签订协议, 接入充电桩后预设预期离开时间, 同意若在预期离开之前离开将接受罚款。EVA 将获得 EV 接入充电桩之后的调度控制权, 所有接入充电桩的 EV 接受统一调度, EV 仅在填谷需求响应时段参与放电调度。

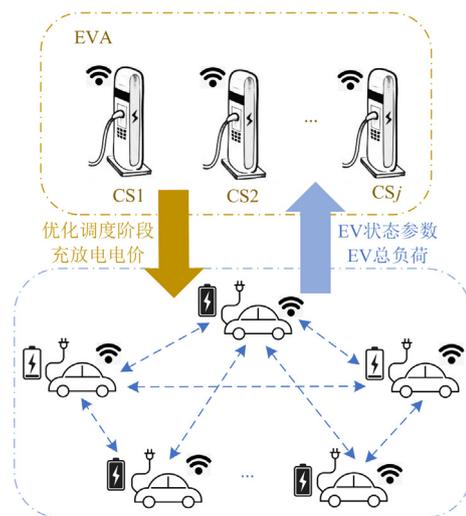


图 1 系统博弈模型

Fig. 1 System game model

EVA 提前一天预测区域内基础负荷, 发布需要电力需求响应的调峰填谷时段并拥有需求响应时段的充放电电价定价权, 非需求响应时段充电电价为电网分时电价。EV 通过智能充电桩参与调度, 每台智能充电桩具备独立采集信息和处理信息的能力, 可以根据电网分时电价、充电站容量约束、接入 EV 的电池信息以及接入时间段等信息, 以用户充电成本最低为优化目标, 通过实时迭代算法得到 EV 最优充放电调度策略。

本文所提出的两阶段博弈模型除了描述 EV 用户与 EVA 之间的动态交互, 还描述了 EV 用户内部之间的互动。EVA 整合实时充放电负荷制定充放电价格, 智能充电桩基于实时电价指导 EV 做出最大化其利益的演化博弈充放电调度响应行为, 并更新需求响应时段的用电量给 EVA, 进而形成定价-调度博弈循环, 该两阶段博弈能使 EVA 给出最大化自身利益的电能报价, 且此电价下 EV 有最优充放电策略, 即博弈的纳什均衡解, 能有效平衡电网、EVA 和 EV 用户三方的利益。

2 系统模型和问题描述

2.1 系统约束

设置 EVA 管辖区域内所有 EV 集合 $C = \{1, 2, \dots, n, \dots, N\}$, EV 在一天中充放电调度时间段的集合 $T = \{1, 2, \dots, t, \dots, H\}$, EV n 在调度时段内的充放电功率 $r_n = (e_{n,1}, e_{n,2}, \dots, e_{n,t}, \dots, e_{n,H})$, 其中, $e_{n,t}$ 表示 EV n 在时间段 t 的充放电功率, $e_{n,t} > 0$ 表示 EV 充电, $e_{n,t} < 0$ 表示 EV 放电, $e_{n,t} = 0$ 表示 EV 空闲。

EV 充放电过程中, EVA 的约束条件为

$$\sum_{n=1}^N e_{n,t} \leq W_{\max}, \forall t \in T \quad (1)$$

式中, W_{\max} 为 EVA 允许的最大总充电功率。

EV 充放电过程中, 根据 EV 初始荷电状态(state of charge, SOC)、离开时的期望 SOC、电池额定容量、最大充放电功率、充放电效率和接入充电桩的时间段, EV 的约束条件如式(2)一式(5)所示。

1) 充放电功率约束

$$e_{\min} < e_{n,t} < e_{\max} \quad (2)$$

式中, e_{\max} 和 e_{\min} 分别为 EV 最大充电功率和最小充电功率(即最大放电功率)。

2) 电池容量约束

考虑到过度充放电对电池寿命的影响, EV 电池在任意时刻的 SOC 需保持在规定的范围内。

$$S_{\text{OCmin}} < S_{\text{OC}} < S_{\text{OCmax}} \quad (3)$$

式中, S_{OCmin} 和 S_{OCmax} 分别为 EV 电池设置的最小 SOC 和最大 SOC。

3) 电量需求约束

充放电调度结束时应满足 EV 用户的充电需求, 确保 EV 离开充电桩时的 SOC 达到用户预设的期望 SOC。

$$S_{\text{OCneed}} \leq S_{\text{OCend}} \quad (4)$$

式中: S_{OCneed} 和 S_{OCend} 分别表示用户设置的期望 SOC 和 EV 离开充电桩时的实际 SOC。

4) 电池充放电等式约束

$$S_{\text{OC}t} = \begin{cases} S_{\text{OC}t-1} + \frac{\eta_{\text{ch}} e_{n,t-1} \Delta h}{V_n}, & e_{n,t-1} > 0 \\ S_{\text{OC}t-1} + \frac{e_{n,t-1} \Delta h}{\eta_{\text{dis}} V_n}, & e_{n,t-1} < 0 \\ S_{\text{OC}t}, & e_{n,t-1} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: η_{ch} 和 η_{dis} 分别为 EV 充电效率和放电效率, 令 $\eta_{\text{ch}} = \eta_{\text{dis}} = \eta$; V_n 为 EV 电池额定容量; Δh 为一个调度时段的跨度。

对于每辆 EV, 其可行充放电功率组成可行充放电策略集 R_n , 如式(6)所示。

$$R_n = \{r_n \mid \text{式(1)一式(5)}\} \quad (6)$$

该策略集 R_n 表示 EV n 在系统约束下可以使用的所有测量的集合。

2.2 EVA 成本模型

由于每辆 EV 的可行充放电策略集都受到其他 EV 策略的影响, 引入以下价格模型。

$$\gamma_t = \alpha_t L_{\text{EV},t} + \beta_t \quad (7)$$

$$L_{\text{EV},t} = \sum_{n=1}^N e_{n,t}, \forall n \in C \quad (8)$$

式中: γ_t 为 t 时段充电站的充放电价格; α_t 和 β_t 分别为关于分时电价和充电站到发电厂距离的正相关系数; $L_{\text{EV},t}$ 为 t 时段所有 EV 负荷之和。价格函数是与 EV 总负荷正相关的函数。

令 $U_{\text{EVA},t}$ 为 t 时段 EVA 的成本, 其与 t 时段区域内 EV 负荷水平呈正相关, 用一个典型的成本模型^[24]来表示 EVA 的能源成本, 即向上级供电设施支付的费用 $U_{\text{EVA},t}$ 。

$$U_{\text{EVA},t}(L_{\text{EV},t}) = \gamma_t L_{\text{EV},t} = \alpha_t (L_{\text{EV},t})^2 + \beta_t L_{\text{EV},t}, \forall t \in T \quad (9)$$

整个充放电调度周期内, EVA 的能源总成本 $U_{\text{EVA,tol}}$ 为

$$U_{\text{EVA,tol}} = \sum_{t=1}^H U_{\text{EVA},t}(L_{\text{EV},t}) \quad (10)$$

2.3 EV 充放电价格模型

定义 p_n 为 EV n 充电结束时需向 EVA 支付的费用, 其取决于调度时段的充放电量和充放电价格。盈利指数 ℓ 为

$$\ell = \frac{\sum_{n=1}^N p_n}{\sum_{t=1}^H U_{\text{EVA},t}(L_{\text{EV},n})} \quad (11)$$

若 $\ell \geq 1$, 则 EVA 在调度周期内盈利或至少收支平衡, 若 $\ell < 1$, 则 EVA 在调度周期内亏本。因此, 在整个调度周期内应保证 $\ell \geq 1$ 。

假设 Δh 内的充放电价格和 EV 总负荷保持不变, 则 EV 的充电成本与充电量相关, 因此有:

$$\frac{p_n}{p_m} = \frac{\sum_{t=1}^H e_{n,t}}{\sum_{t=1}^H e_{m,t}}, \quad \forall n, m \in C \quad (12)$$

将等式(12)两边对所有 EV 进行累加可得

$$p_n = \frac{\sum_{t=1}^H e_{n,t}}{\sum_{m \in C} \sum_{t=1}^H e_{m,t}} \sum_{m \in C} e_{m,t} \quad (13)$$

联立式(11)、式(13)可得

$$p_n = \frac{\sum_{t=1}^H e_{n,t}}{\sum_{m \in C} \sum_{t=1}^H e_{m,t}} \ell \sum_{t=1}^H U_{\text{EVA},t}(L_{\text{EV},n}) = \lambda_n \sum_{t=1}^H [\alpha_t (L_{\text{EV},t})^2 + \beta_t L_{\text{EV},t}] = \lambda_n \sum_{t=1}^H \left[\alpha_t \left(\sum_{n=1}^N e_{n,t} \right)^2 + \beta_t \sum_{n=1}^N e_{n,t} \right] \quad (14)$$

其中

$$\lambda_n = \frac{\ell \sum_{t=1}^H e_{n,t}}{\sum_{m \in C} \sum_{t=1}^H e_{m,t}} \quad (15)$$

2.4 目标函数

EV 最优充放电策略是在满足 EV 的充电需求和条件约束的同时选择最大化自身利益的决策行为, 同时使得 EVA 成本最小化, 目标函数和约束如式(16)所示。

$$\begin{cases} \min & U_{\text{EVA,tot}} = \sum_{t=1}^H U_{\text{EVA},t}(L_{\text{EV},t}) \\ \text{s.t.} & \text{式(6)}, \forall n \in C \end{cases} \quad (16)$$

由约束条件式(1)一式(5)可知, 策略集是线性、有界且连续的, 因此策略集是非空紧凑凸集合^[22], 又由于式(9)给出的 EVA 成本模型是严格凸的, 因此目标函数(16)有唯一最优解。

将 EVA 管辖区域内 EV 种群参与电力需求响应调度的行为建模为非合作博弈模型。根据上节建立的 EV 充放电策略集和 EV 成本模型, 构建非合作博弈模型 $G = \{C, \{R_n\}_{n \in C}, \{p_n\}_{n \in C}\}$, 由以下部分组成:

- 1) 参与者集合 $C = \{1, 2, \dots, N\}$;
- 2) 策略集 R_n ;
- 3) 成本函数 $p_n(r_n, r_{-n})$ 。

$$p_n(r_n, r_{-n}) = \lambda_n \sum_{t=1}^H \left[\alpha_t \left(\sum_{n=1}^N e_{n,t} \right)^2 + \beta_t \sum_{n=1}^N e_{n,t} \right] \quad (17)$$

式中, r_{-n} 表示除 EV n 以外其他所有 EV 的策略集。由式(17)可知, 任何买家都不能单方面改变策略, 偏离纳什均衡解以降低充电成本。用向量 $\mathbf{b}^* = (r_n^*, r_{-n}^*) \in \mathbf{R}$ 表示非合作博弈的纳什均衡解。在非合作博弈中, 当且仅当满足式(18), 策略 (r_n^*, r_{-n}^*) 是博弈 G 的纳什均衡解。

$$p_n(r_n^*, r_{-n}^*) \leq p_n(r_n, r_{-n}^*), \quad \forall r_n \in R_n, n \in C \quad (18)$$

寻找纳什均衡点之前, 需要证明纳什均衡点的存在性和最优性。

2.5 纳什均衡的存在性和最优性

定理 1: 考虑本文非合作博弈模型 $G = \{C, \{R_n\}_{n \in C}, \{p_n\}_{n \in C}\}$, 若每个参与方的策略空间 r_n 是欧式空间的非空紧凸集, 且其成本函数关于策略空间 r_n 是连续拟凹的, 则该博弈存在纳什均衡解 $p_n(r_n^*, r_{-n}^*)$ ^[25]。

证明: 成本函数 $p_n(r_n, r_{-n})$ 对策略集 r_n 求二阶导, 得

$$\frac{\partial^2 p_n(r_n, r_{-n})}{\partial r_n^2} = \begin{bmatrix} 2\lambda_n \alpha_1 & & & \\ & 2\lambda_n \alpha_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 2\lambda_n \alpha_H \end{bmatrix} \quad (19)$$

由于 $\lambda_n \geq 0$ 且 $\alpha_i > 0$, 则式(19)内所有元素都是非负元素, 式(19)为半正定矩阵, 因此成本函数 $p_n(r_n, r_{-n})$ 是紧且凹的。又由于策略集 R 是封闭、有界且凸的, 根据文献[25]中的引理 1 可知, 非合作博弈 G 存在纳什均衡解。

定理 2: 非合作博弈 G 的唯一纳什均衡解就是 EVA 成本最小化问题(16)的解。

证明: 由非合作博弈均衡解条件 $p_n(r_n^*, r_{-n}^*) \leq p_n(r_n, r_{-n}^*)$ 和成本函数(式(20)), 得到式(21)。

$$p_n = \lambda_n \sum_{i=1}^H \left[\alpha_i \left(\sum_{n=1}^N e_{n,t} \right)^2 + \beta_i \sum_{n=1}^N e_{n,t} \right] \quad (20)$$

$$\lambda_n \sum_{i=1}^H \left[\alpha_i \left(\sum_{n=1}^N e_{n,t}^* \right)^2 + \beta_i \sum_{n=1}^N e_{n,t}^* \right] \leq \lambda_n \sum_{i=1}^H \left[\alpha_i (e_{n,t} + \sum_{m \in C, m \neq n} e_{m,t}^*)^2 + \beta_i (e_{n,t} + \sum_{m \in C, m \neq n} e_{m,t}^*) \right] \quad (21)$$

不等式(21)两边同除 λ_n 可得

$$U_{EVA,t}^* \leq \sum_{i=1}^H \left[\alpha_i (e_{n,t} + \sum_{m \in C, m \neq n} e_{m,t}^*)^2 + \beta_i (e_{n,t} + \sum_{m \in C, m \neq n} e_{m,t}^*) \right] \quad (22)$$

由式(22)可知,任意 EV 单方面改变策略偏离纳什均衡点都将导致充电成本高于纳什均衡解对应的充电成本 $U_{EVA,t}^*$, 因此, (r_n^*, r_{-n}^*) 是非合作博弈的最优解。由上述证明可得,非合作博弈 G 的均衡解是唯一且最优的。

3 EV 充放电策略演化模型

3.1 基于 logit 协议的动态博弈方程

在 EVA 发布的需求响应时段,其管辖区域内所有 EV 的总充放电功率将会直接影响充放电电价,每个 EV 都是利益关联者,因此,考虑将多 EV 选择充放电策略的过程建模是博弈问题。在实际决策环境中,决策主体对其他参与者的信息和决策环境的认知是有限的,对此,演化博弈提供了一种全新的思考路径。演化博弈是把博弈理论分析和动态演化过程分析结合起来的一种理论,其建立在“有限理性”和“有限信息”的基础上,在动态演化过程中研究参与者如何不断调整自身策略来适应环境或对手。与传统博弈相比,演化博弈更强调策略的动态演化特性,而非策略本身的均衡性质,能在实际决策环境中更加合理描述 EV 之间的博弈行为,因此将 EV 充放电策略选择过程建模为演化博弈。

由于 EV 出行行为的不确定性,包括接入充电桩时的初始 SOC、期望 SOC 以及接入和离开充电桩的时间等,会导致 EV 集群参与电力需求响应的个体差异性,进而趋向于不同的充放电调度策略。因此可将调度区域内每台 EV 抽象为一个有相同充电需求的 EV 种群^[26],在种群内进行演化博弈得到最优充放电功率策略。

演化博弈初始阶段, EV 种群在约束条件式(2)一式(5)下随机生成 M 个策略,策略集 ϕ 是 EV 各时段的充放电功率集合,表示为

$$\begin{cases} \phi = \{s_1, s_2, \dots, s_m, \dots, s_M\} \\ s_m = \{E_{m,1}, E_{m,2}, \dots, E_{m,H}\} \end{cases} \quad (23)$$

式中: s_m 为随机生成的第 m 个策略; $E_{m,H}$ 为第 m 个策略中 H 时段的充放电功率。

在演化博弈的过程中,每台 EV 选择一个策略,所有 EV 的选择结果作为群体状态。用 $x_m(t)$ 表示在 t 时刻 EV 种群中选择策略 s_m 的个体比例, $x_m(t)$ 满足 $0 \leq x_m(t) \leq 1$ 和 $\sum_{m=1}^M x_m(t) = 1$ 。群体状态可表示为 $X = [x_1(t), \dots, x_m(t), \dots, x_M(t)]$ 。

用适应度函数 f 代替经典博弈论中的成本函数 p , 适应度函数表示当前各个策略的分布比例,选择策略 s_m 的 EV 的适应度函数 $f_m(t)$ 可表示为

$$f_m(t) = x_m(t) p_m(t) \quad (24)$$

假设所有 EV 均对自己的策略进行修正, EV 种群动态演化过程可用微分方程来描述,如式(25)所示。

$$\frac{\partial x_k^i}{\partial t} = \sum_{m=1}^M x_m^i(t) \rho_{m,k}^i [p^i(t)] - x_k^i(t) \sum_{m=1}^M \rho_{k,m}^i [p^i(t)] \quad (25)$$

式中: p^i 表示 i 类型用户的成本函数; $x_m^i(t)$ 和 $x_k^i(t)$ 分别表示 i 类型用户中选择策略 m 和策略 k 的个体比例; $\rho_{m,k}^i [p^i(t)]$ 表示 i 类型 EV 种群中从策略 m 转为选择策略 k 的条件转换概率,其由策略的修订协议决定。选择不同形式的修正协议,即产生不同的演化动态方程。

本文演化博弈模型的修正协议采用 logit 协议,条件转换概率为

$$\rho_{m,k}^i [p^i(t)] = \frac{\exp[f_k^i(t)\theta^{-1}]}{\sum_{m=1}^M \exp[f_m^i(t)\theta^{-1}]} \quad (26)$$

式中, θ 是噪声级,取 0.02。

此时 EV 种群动态演化方程为

$$\frac{\partial x_k^i}{\partial t} = \rho_{m,k}^i [p^i(t)] - x_k^i(t) = \frac{\exp[f_k^i(t)\theta^{-1}]}{\sum_{m=1}^M \exp[f_m^i(t)\theta^{-1}]} - x_k^i(t) \quad (27)$$

式(27)描述了 EV 种群中选择策略 k 的个体比例变化规律,即实际决策场景中的演化博弈过程,随着种群的动态演化,策略集中各策略的选择比例不断变化,个体的适应度函数和条件转换概率也随之更新。随着迭代次数的增加,只有一个策略的选取概率不断增大,逐渐趋近于 1 并最终达到稳定,此时 $\partial x_k^i / \partial t = 0$, 表示种群内选择策略 k 的个体比例将不再变化,即种群内所有个体将不会再改变自身策略,演化博弈达到均衡, EV 种群效益得到最大化。

3.2 演化稳定策略求解

上述演化博弈方程采用分布式迭代算法进行求解,将式(27)转化为离散化的动力学方程,如式(28)所示。

$$x_k^i(z+1) = x_k^i(z) + \tau \{ \rho_{m,k}^i [p^i(X)] - x_k^i(z) \} \quad (28)$$

式中: z 表示博弈迭代次数; τ 表示迭代步长, 算法的求解步骤如下。

步骤 1: 在 2.1 节的约束条件下随机生成 M 个 EV 种群初始策略, 并随机生成各策略的初始选取比例。

步骤 2: 根据式(17)计算 EV 种群的成本函数。

步骤 3: 根据式(24)计算 EV 在各自策略下的适应度函数。

步骤 4: 根据式(26)计算各策略的条件转换概率。

步骤 5: 根据离散化动态演化方程更新 EV 个体所选策略的比例。

步骤 6: 判断是否达到演化均衡, 如是, 则输出 EV 种群演化均衡策略, 反之, 则重复步骤 3—步骤 5。

其他出行行为一致的 EV 种群可使用相同的步骤得到演化均衡策略, 最终可得区域内所有 EV 的各调度时段充放电功率策略。

4 系统博弈模型求解

根据上述建立的 EVA 动态定价下以 EVA 能源成本为优化目标的非合作博弈模型以及 EV 充放电策略演化模型, 电力需求响应调度系统的两阶段博弈模型求解的流程图如图 2 所示。

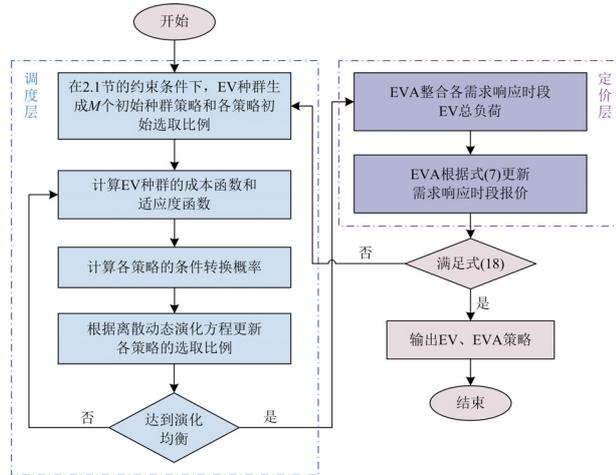


图 2 两阶段博弈模型求解流程图

Fig. 2 Flow chart of solving two-stage game model

EVA 整合实时 EV 集群各需求响应阶段的充放电电量, 根据式(7)更新响应时段充放电电价, EV 集群基于该电价通过演化博弈得到充放电策略, 由此形成定价-调度博弈循环, 直到该两阶段博弈达到纳什均衡点。该博弈模型的迭代关系如图 3 所示。

5 算例分析

5.1 参数设置

假设在 EVA 管辖区域内有 2000 台 EV 签订了需求响应合约, EV 电池的容量统一设置为 30 kWh,

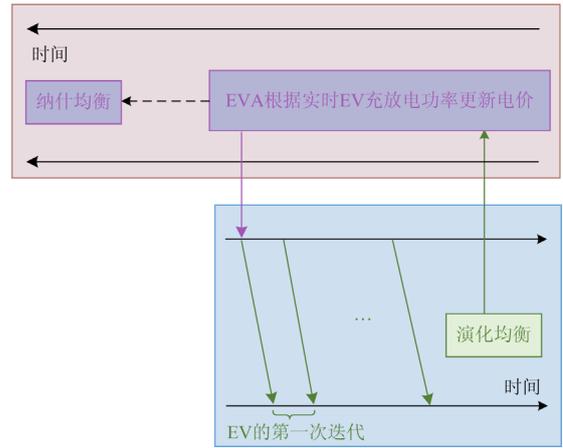


图 3 两阶段博弈模型迭代关系

Fig. 3 Iterative relationship of two-stage game model

S_{OCmax} 和 S_{OCmin} 分别设置为 98%和 10%, e_{max} 和 e_{min} 分别设置为 7kW 和-7kW。EVA 最大负载为 10 MW。相关系数 α_i 在低谷时段设置为 2.2×10^{-5} , 在高峰时段设置为 1.5×10^{-4} , β_i 设置为 0.2。充电桩提供的充放电功率有以下几档: -7、-6、-3、0、3、6、7 kW, 充电桩充放电效率设置为 95%。选取该区域内典型基础负荷曲线如图 5 所示, EV 分时电价表如表 1 所示。

表 1 分时电价表

Table 1 Time of use tariff

时段		分时电价/(元/kWh)
峰时段	08:00—11:00、15:00—21:00	1.178
谷时段	12:00—13:00、23:00—07:00	0.425
平时段	07:00—08:00、11:00—12:00 13:00—15:00、21:00—23:00	0.775

根据美国交通部统计的美国家庭出行数据分析^[28], 家用 EV 的并网时间服从 $N(17.09, 2.02)$ 的正态分布, 离网时间服从 $N(7.15, 0.92)$ 的正态分布, 初始 SOC 服从 $U(0.2, 0.5)$ 的均匀分布。每辆 EV 的 S_{OCneed} 设置为 0.85。

根据日前负荷预测结果, EVA 发布 19:00—21:00 以及 23:00—03:00 时段的需求电量, 分别为: -3、-6、6、5、6、5 MWh。每个调度时段时长 Δh 设置为 1 h, 仿真跨度总共 20 个时段, 第一个时段从 14:00 开始。由于 EVA 最大充电负荷限制和充放电激励政策, 电价区间如表 2 所示。

表 2 需求响应时段电价区间

Table 2 Electricity price of demand response period

时段	电价区间/(元/kWh)	
削峰	19:00—21:00	1.32~1.70
填谷	23:00—03:00	0.35~0.44

5.2 演化均衡策略分析

利用 3.1 节中建立的演化博弈模型, 将 2000 台 EV 抽象为 2000 个出行行为一致的 EV 种群, 分别在种群内部进行演化博弈。在 2.1 节的约束条件下, 每个 EV 种群分别随机生成 1000 组各时段充放电功率策略集和各策略集的初始选取比例, 设置演化方程的迭代步长 $\tau = 0.01$, 求解 2000 台 EV 的充放电稳定策略。演化稳定时间随初始随机生成的策略集数量变化的情况如表 3 所示。

表 3 EV 演化稳定时间

策略集数量/个	100	500	1000
演化稳定时间/s	9.89	188.03	1775.25

由表 3 可知, 演化稳定时间与策略集数量呈正相关, 但并不会随着策略集数量的增加而急剧上升。随机选取其中的 3 台(EV1、EV2 和 EV3)展示其演化稳定策略, 如表 4 所示, 其中: t_{in} 、 t_{out} 代表充电开始、结束时刻; S_{OCin} 代表 SOC 初始值。

表 4 EV 演化稳定策略

	t_{in}	t_{out}	S_{OCin}	充电费用/元
EV1	15:28	07:12	0.31	2.193
EV2	19:32	09:42	0.47	-2.385
EV3	22:07	11:24	0.23	9.913

由图 4 可知, EV 会尽可能地选择在电价较低的负荷低谷时段进行充电, 在补偿价格较高的负荷高峰时段放电。例如, 在被划分为削峰调度响应时段的第 6 个调度时段是负荷和电价的高峰时段, 已接入充电桩的 EV1 和 EV2 均参与了放电调度; 在被划分为填谷响应时段的第 11 个调度时段是负荷和电价的低谷时段, 接入充电桩的 EV1、EV2 和 EV3 均参与了充电调度。由于 EV1 和 EV2 在削峰

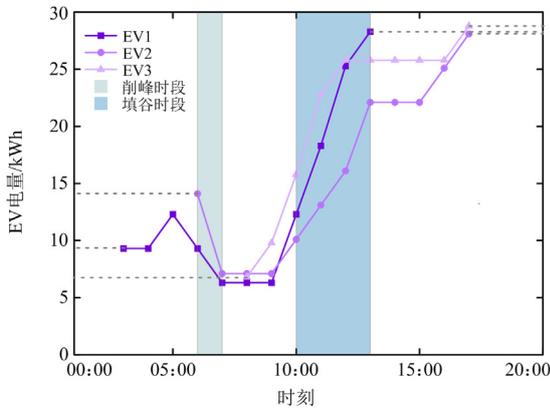


图 4 EV1、EV2、EV3 演化稳定策略

Fig. 4 Evolutionary stability strategy of EV1, EV2, and EV3

调度时段前接入了充电桩并参与了调峰调度, 因此充电结束的充电费用较低, EV2 甚至获得了正收益。

5.3 系统博弈模型削峰填谷效果分析

为体现本文所提方法的有效性, 将演化博弈充放电调度模型与无序充电模型、分时电价引导下的 EV 有序充电调度模型^[28]、基于粒子群算法的 EV 充放电调度模型^[16]的仿真结果进行对比。其中, 无序充电调度模型采用固定电价, 分时电价引导下的 EV 有序充电调度模型采用电网分时电价, 另外设置以下两种电价场景: 在场景 1 中, 采用以 EVA 为主导, EV 跟随的主从博弈模型制定充放电电价; 在场景 2 中, EVA 根据 EV 种群演化博弈结果的实时 EV 负荷制定充放电电价, 即本文提出的电价模型。

各场景下采用不同方法对 EV 进行优化调度之后的负荷曲线如图 5 所示。采用负荷峰谷差和负荷方差作为衡量削峰填谷效果的指标, 计算结果如图 6、表 5 所示。

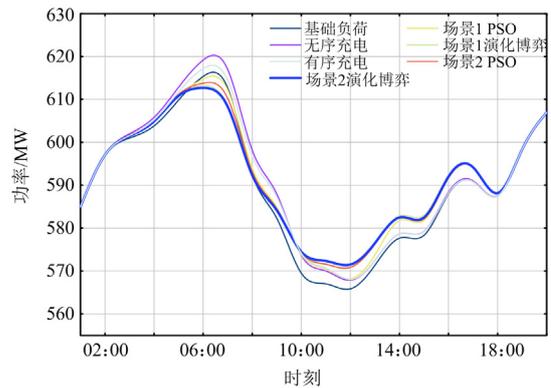


图 5 各调度场景和方法下的负荷曲线

Fig. 5 Load curve under each dispatching scenario and method

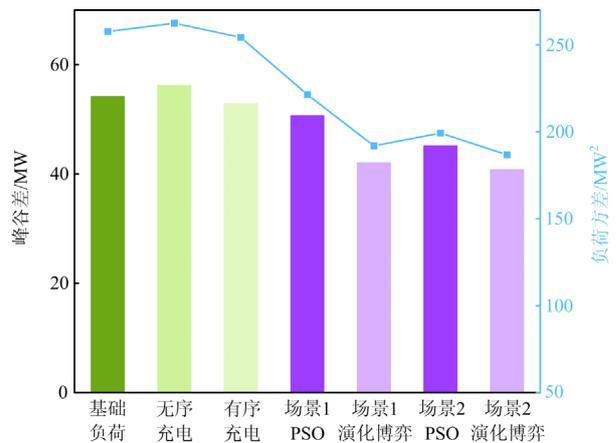


图 6 各调度场景和方法下的负荷指标

Fig. 6 Load indicators under various dispatching scenarios and methods

表 5 各调度场景和方法下负荷指标计算结果
Table 5 Load index calculation results under various dispatching scenarios and methods

		负荷峰谷差/MW	负荷方差/MW ²
基础负荷		54.2	257.690
无序充电		56.2	262.466
有序充电		52.9	254.322
场景 1	PSO	50.7	221.406
	演化博弈	42.1	191.882
场景 2	PSO	45.2	199.279
	演化博弈	40.8	186.797

首先, 根据图 5 和表 5 对比不同电价场景下的 EV 削峰填谷效果。在场景 1 中, EVA 与 EV 之间的主从博弈模型能够优化 EV 充放电策略, 使 EV 充电价格低于电网分时电价, 从而优化 EV 充放电行为, 引导更多 EV 参与充放电调度, 电网负荷峰谷差和负荷方差较采用电网分时电价的有序充电调度模型更低; 在场景 2 中, EV 之间采用演化博弈的方法选择成本更低的充放电策略, 并由此使得 EVA 提供更优惠的充放电电价, 从而鼓励 EV 在优化调度时段提供更多的充放电电量, 因此场景 2 中的负荷峰谷差和负荷方差较场景 1 中的更低。

其次, 根据图 5 和表 5 对比不同 EV 调度方法下的 EV 削峰填谷效果。在固定充电价格下 EV 进行无序充电时, 充电的高峰期和低谷期与基础负荷曲线基本重叠, 未达到削峰效果且造成负荷高峰期的加剧, 负荷峰谷差和标准差较基础负荷进一步增大; 在电网分时电价下引导 EV 负荷进行有序充电, 峰谷差和负荷方差较无序充电均有所降低, 但 EV 不参与放电调度, 对电网的调峰效果不显著; PSO 算法下的 EV 充放电模型以 EV 充放电成本最低为优化目标, 制定分时电价引导无紧急充电任务的 EV 将充电时间从负荷高峰期转移至负荷低谷期, 并在峰时段整合部分 EV 参与放电调度, 负荷峰谷差和负荷方差进一步降低; 演化博弈充放电调度模型充分考虑 EV 用户的有限理性, 在演化博弈的过程中不断调整自身策略, 在演化均衡时获得最优充放电策略, 负荷峰谷差和负荷方差较 PSO 算法更小, 并且场景 2 中的 EVA 动态定价和 EV 充放电调度在迭代过程中相互作用, 使得 EVA 给出更优的电价以整合更多 EV 参与需求响应。

由上述分析可知, 场景 2 下的演化博弈充放电调度模型(即本文提出的两阶段博弈模型)具有最好的削峰填谷效果。

5.4 系统博弈模型的经济性分析

根据第 2 节建立的非合作博弈模型和第 3 节建

立的 EV 充放电策略演化博弈模型可知, 联合求解两阶段博弈模型得到的纳什均衡解会平衡 EV 充电成本和 EVA 能源成本, 得到最优 EV 充放电调度策略。

由图 7 和表 6 可知, 场景 2 中的 EV 总成本最低, EVA 净收入最高, 这是由于 EV 通过演化博弈得到最优充放电策略, 使 EVA 给出的充电价格更低, 并且在参与削峰调度时获得放电补贴, 使得充电成本进一步降低。同时, EV 优化充放电调度策略使得 EVA 的能源成本降低, EVA 可从购售电差价中获得更大利润。

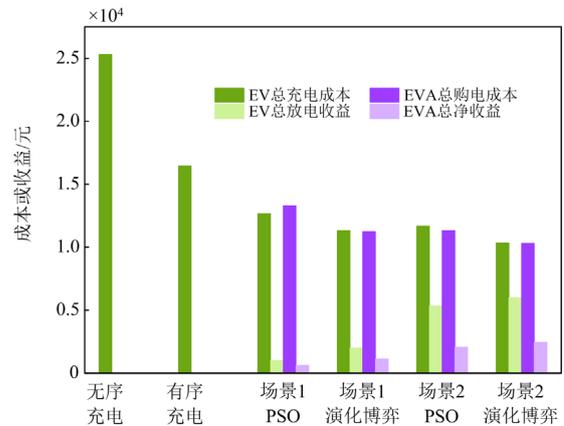


图 7 各场景和调度方法下的经济性对比

Fig. 7 Economic comparison under various scenarios and scheduling methods

表 6 各场景和调度方法下的经济性
Table 6 Economy under various scenarios and scheduling methods

		EV 总成本/元	EVA 净收益/元
无序充电		25 320	—
有序充电		16 458	—
场景 1	PSO	11 670	616
	演化博弈	9330	1129
场景 2	PSO	6340	2061
	演化博弈	4330	2444

与无序充电相比, 采用电网分时电价的有序充电调度方法能使 EV 充电成本降低 45%, 这是由于分时电价能引导 EV 负荷向电价较低的谷时段转移, 从而降低 EV 充电成本; 采用 PSO 算法和演化博弈方法的 EV 充放电调度能使 EV 充电成本降低 50%以上, 因为 EV 会根据各时段的电价调整各自的充放电策略以使自身的充电成本最低, 并且参与放电调度获得的放电补贴进一步降低了充电成本。相较于 PSO 算法, 演化博弈中 EV 根据支付函数不

断修正充放电策略, 经过多次博弈获得最优策略, 使 EV 充电成本降低 20%以上, EVA 净收益增加 15%以上。由此可见, 场景 2 下的演化博弈调度模型(即本文提出的两阶段博弈模型)可以有效平衡电网、EVA 和 EV 用户三方的利益。

6 结论

针对多电动汽车参与电网需求响应互动场景下的电动汽车充放电协同调度需求, 本文提出一种 EVA 动态定价并指导 EV 规模化入网参与电力需求响应调度的两阶段博弈模型, 通过算例验证得到以下结论:

1) 演化博弈能有效弥补经典博弈论中将参与者假设为“完全理性”和“完全信息”的缺陷, 在“有限理性”和“有限信息”的场景中建立 EV 充放电调度模型能更加准确描述 EV 用户在实际决策场景中的博弈行为, 使削峰填谷效果进一步提升。

2) 所提出的基于实时 EV 负荷的需求响应时段电价模型能有效平衡 EVA 和 EV 用户双方的经济利益。

3) 所提两阶段博弈模型综合考虑电网、EVA 和 EV 用户之间的动态交互, 通过 EV 充放电策略演化博弈和以 EVA 能源成本最小化为目标的非合作博弈分别实现演化均衡和纳什均衡来协调三方利益, 实现了各方的良性互动和协调发展。

在之后的工作中, 将考虑区域内多个 EVA 参与电力市场竞价的场景, 并计及 EV 用户签订协议后违约的情况。

参考文献

- [1] YANG Jiajia, WIEDMANN T, LUO F. A fully decentralized hierarchical transactive energy framework for charging EVs with local DERs in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(3): 3041-3055.
- [2] SHURRAB M, SINGH S, OTROK H. An efficient vehicle-to-vehicle (V2V) energy sharing framework[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(7): 5315-5328.
- [3] 赵轩, 张元星, 李斌, 等. 国内外车网互动试点成效分析与发展建议[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 280-292. ZHANG Xuan, ZHANG Yuanxuan, LI Bin, et al. Effect analysis and development suggestion of domestic and foreign vehicle grid integration pilots[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 280-292.
- [4] WEI Zhe, LI Yue, ZHANG Yongmin, et al. Intelligent parking garage EV charging scheduling considering battery charging characteristic[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2806-2816.
- [5] SONG Yue, ZHENG Yu, HILL D. Optimal scheduling for EV charging stations in distribution networks: a convexified model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1574-1575.
- [6] CHAMOLA V, SANCHETI A, CHAKRAVARTY S, et al. An IoT and edge computing based framework for charge scheduling and EV selection in V2G systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10569-10580.
- [7] 胡福年, 徐伟成, 陈军. 计及电动汽车充电负荷的风电-光伏-光热联合系统协调调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 10-20. HU Funian, XU Weicheng, CHEN Jun. Coordinated scheduling of wind power photovoltaic solar thermal combined system considering electric vehicle charging load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 10-20.
- [8] 龚诚嘉锐, 林顺富, 边晓燕, 等. 基于多主体主从博弈的负荷聚合商经济优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 30-40. GONG Chengjiarui, LIN Shunfu, BIAN Xiaoyan, et al. Economic optimization model of a load aggregator based on the multi-agent Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 30-40.
- [9] 李强, 朱丹丹, 黄地, 等. 虚拟电厂运营商与电动汽车用户的主从博弈定价策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 183-191. LI Qiang, ZHU Dandan, HUANG Di, et al. Stackelberg game pricing strategy between virtual power plant operators and electric vehicle users[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 183-191.
- [10] 帅轩越, 王秀丽, 吴雄. 用户侧有限理性下基于主从博弈与电热需求响应的综合能源微网优化运行[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 25-31. SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, WU Xiong. Optimal operation of integrated energy microgrid based on leader-follower game and electricity and heat demand response under user-side limited rationality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 25-31.
- [11] MEDIWATHTHE C, SMITH D B. Game-theoretic electric vehicle charging management resilient to non-ideal user behavior[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(11): 3486-3495.
- [12] CHEN L, YU T, CHEN Y, et al. Real-time optimal scheduling of large-scale electric vehicles: a dynamic non-cooperative game approach[J]. IEEE Access, 2020, 8: 133633-133644.
- [13] 文艺林, 胡泽春, 宁剑, 等. 基于分布鲁棒机会约束的

- 充电运营商参与调峰市场投标策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 23-32.
- WEN Yilin, HU Zechun, NING Jian, et al. Bidding strategy of charging operator participating in peak regulation market based on distributionally robust chance constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 23-32.
- [14] 程杉, 陈梓铭, 徐康仪, 等. 基于合作博弈与动态分时电价的电动汽车有序充放电方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 15-21.
- CHENG Shan, CHEN Ziming, XU Kangyi, et al. An orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 15-21.
- [15] CHAKRABORTY P, BAEYENS E, POOLLA K, et al. Sharing storage in a smart grid: a coalitional game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4379-4390.
- [16] KAPOOR A, PATEL V S. Centralized and decentralized pricing strategies for optimal scheduling of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 2234-2244.
- [17] LI Jiawei, KENDALL G, JOHN R. Computing Nash equilibria and evolutionarily stable states of evolutionary games[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2016, 20(3): 460-469.
- [18] LEE J, KIM M. An evolutionary game theory-based optimal scheduling strategy for multiagent distribution network operation considering voltage management[J]. IEEE Access, 2022, 10: 50227-5024.
- [19] 何鑫雨, 董萍, 刘明波, 等. 基于双层演化博弈模型的多区域点对点能源共享机制[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 163-174.
- HE Xinyu, DONG Ping, LIU Mingbo, et al. Multi-region P2P energy sharing mechanism based on two-stage evolutionary game model[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 163-174.
- [20] 叶畅, 苗世洪, 刘昊, 等. 联盟链框架下主动配电网电力交易主体合作演化策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1739-1753.
- YE Chang, MIAO Shihong, LIU Hao, et al. Cooperative evolutionary game strategy for electricity trading stakeholders in active distribution network under consortium blockchain framework[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1739-1753.
- [21] 杨辉, 莫峻. 发电侧企业群体间竞价行为的随机演化博弈[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3389-3397.
- YANG Hui, MO Jun. Stochastic evolutionary game of bidding behavior for generation side enterprise groups[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3389-3397.
- [22] 李龙, 聂龔, 陟晶, 等. 政府双重监管体制下可再生能源消纳的演化博弈研究[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2021, 37(1): 1-10.
- LI Long, NIE Yan, ZHI Jing, et al. Game analysis on the consumption of renewable energy under the government supervision[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2021, 37(1): 1-10.
- [23] 吴钟鸣, 卢军锋, 孙丽, 等. 可移动式电动汽车充电桩的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 148-154.
- WU Zhongming, LU Junfeng, SUN Li, et al. Design of a mobile electric vehicle charging pile[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 148-154.
- [24] WAN Y, QIN J, LI F, et al. Game theoretic-based distributed charging strategy for PEVs in a smart charging station[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 538-547.
- [25] CHAI B, CHEN J, YANG Z, et al. Demand response management with multiple utility companies: a two-level game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 722-731.
- [26] 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): 85-99.
- 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): 85-99.
- [27] ALSABBAGH A, MA C. Distributed charging management of electric vehicles considering different customer behaviors[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5119-5127.
- [28] 周志强, 张金江, 薛费青, 等. 基于线性规划的电动汽车有序充电调度方法[J]. 电子测试, 2021(21): 97-100, 87.
- ZHOU Zhiqiang, ZHANG Jinjiang, XUE Feiqing, et al. Electric vehicle orderly charging scheduling method based on linear programming[J]. Electronic Test, 2021(21): 97-100, 87.

收稿日期: 2023-02-05; 修回日期: 2023-03-08

作者简介:

刘东奇(1986—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能电网优化运行与控制; E-mail: liudq@hnu.edu.cn

张曦(1999—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车优化调度; E-mail: 1062233194@qq.com

钱奕衡(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能计算。

(编辑 姜新丽)