

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.247004

电能量-需求响应市场下电动汽车聚合商多元和谐投标策略

侯慧^{1,2}, 倪恬^{1,2}, 何梓姻^{1,2}, 向慕超³, 黄亮^{1,2}, 张鹏超⁴

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学深圳研究院, 广东 深圳 518000;
3. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 4. 国网湖北省电力
有限公司襄阳供电公司, 湖北 襄阳 441002)

摘要: 为探索“双碳”目标下电动汽车聚合商参与电力市场的有效机制, 提出一种电能量-需求响应市场下电动汽车聚合商多元和谐投标策略。首先, 在日前阶段根据电动汽车用户出行特性进行集群分类, 评估可调潜力以参与日前电能量市场投标, 并建立日前投标模型测算市场效益。其次, 通过实时监测数据更新可调潜力, 为避免偏差惩罚, 电动汽车聚合商从需求响应聚合商处购买正负投标资源, 即参与需求响应市场对偏差再投标。然后, 为探寻电动汽车聚合商多元和谐投标策略, 考虑基于非合作博弈与合作博弈问题的两类价格制定者模式, 并与价格接受者模式对比。最后, 通过算例分析验证所提策略在电力市场经济效益提升与电网削峰填谷的有效性。

关键词: 电动汽车; 可调潜力; 聚合商; 电力市场; 投标策略

Multi-harmonious bidding strategy for electric vehicle aggregators in the energy-demand response market

HOU Hui^{1,2}, NI Tian^{1,2}, HE Ziyin^{1,2}, XIANG Muchao³, HUANG Liang^{1,2}, ZHANG Pengchao⁴

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Shenzhen Research Institute, Wuhan University of Technology, Shenzhen 518000, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 4. Xiangyang Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Xiangyang 441002, China)

Abstract: To explore effective mechanisms for new entities, such as electric vehicle (EV) aggregators, to participate in electricity markets under the “dual-carbon” goals, this paper proposes a multi-dimensional harmonious bidding strategy for EV aggregators in the energy-demand response market. First, at the day-ahead stage, EV clusters are classified based on the users' travel characteristics, and their adjustable potential is assessed for participation in day-ahead energy market bidding. A corresponding day-ahead bidding model is established to evaluate market benefits. Second, the adjustable potential is updated in real-time through monitoring data. To avoid penalty for deviation, EV aggregators purchase both positive and negative bidding resources from demand response aggregators, i.e., re-bidding through the demand response market. Then, to explore the multi-dimensional harmonious bidding strategy of EV aggregators, two price-setting models based on non-cooperative and cooperative game theory are considered and compared with the price-taker mode. Finally, case studies verify the effectiveness of the proposed strategy in improving economic benefits in the power market while contributing to peak shaving and valley filling in the grid.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177110).

Key words: electric vehicle; adjustable potential; electric vehicle aggregator; electricity market; bidding strategy

0 引言

2024年6月, 国家能源局华中能源监管局组织

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177110); 深圳市科技计划资助(JCYJ20210324131409026); 国网湖北省电力有限公司项目资助(521538220005)

召开电力市场建设研讨会, 要求加强包括以电动汽车聚合商(electric vehicle aggregator, EVA)为代表的新型经营主体的电力安全保供、多层次市场衔接等关键问题研究, 进一步完善市场建设方案^[1]。目前电动汽车(electric vehicle, EV)参与多层级市场衔接机制尚不完善^[2-3], 使得EV用户、EVA等多方主体参与市场积极性不高^[4-6]。EVA参与电力市场需对

交易架构、市场角色等展开分析。

针对交易架构方面,电力市场主要包括日前阶段与实时阶段^[7-8]。EVA 在日前阶段投标电量并申报价格,以此作为实时阶段投标依据^[9-10]。现有研究大多针对日前阶段进行分析,文献^[11]提出了一种计及可调潜力的 EVA 多主体日前投标策略,通过评估可调潜力以有效调度 EV 充电负荷,但其仅分析了日前阶段相关问题^[12-13],实时阶段市场同样需要进行针对性投标分析。日前出清后,对缺口部分,可探索实时阶段参与需求响应(demand response, DR)市场投标偏差量可能性,需求响应市场旨在通过激励用户在高峰时段减少电力需求^[14],从而优化电力供应和需求平衡。通过最小化投标量与实际需求量间差值,满足日前-实时多时间尺度投标和谐要求。

针对 EVA 参与市场承担角色方面,通常存在价格接受者与价格制定者两类模式。作为价格接受者, EVA 需要投标非定价电量需求,即通过报量不报价等形式响应市场确定性预测^[15]。价格接受者忽略电力市场预测不确定性及 EVA 市场竞争力带来的影响^[16],仅适用于有限负荷市场。而作为价格制定者, EVA 则更具市场竞争力,可自主投标并优化投标策略。在此条件下,多个 EVA 间可选择非合作博弈与合作博弈^[17-18]。文献^[19]考虑公共充电桩与私人充电桩共享两种充电选择,忽略其内部竞争,构建了非合作博弈模型。但这种形式无法最大化共享服务效率与资源利用率,因此需要激励公共收费运营商、物业企业及私人收费桩所有者之间的合作,以实现充电资源的最优分配。文献^[20]考虑到主体在非合作博弈过程中的损失,提出基于潜在博弈的合作博弈方法,以激励 EV 为电网提供频率调节服务。但该研究设定实时阶段不再更新预测信息,具有一定局限性。立足我国电力市场实际情况,各类市场主体能通过合作共享资源实现互利共赢,故合作博弈更能有效激发主体间和谐竞争^[21],满足 EVA 参与电能量市场-需求响应市场和谐要求。

对于以上缺少 EVA 参与实时阶段针对性投标与多元和谐投标模式等问题,提出电能量-需求响应市场下 EVA 多元和谐投标策略。首先, EVA 在日前阶段根据 EV 用户出行特性进行集群分类,参照历史数据评估可调潜力,参与日前电能量市场投标,并测算 EVA 日前收益。然后根据实时监测数据更新实时可调潜力,为避免偏差惩罚、优化负荷管理及减少电网运营成本, EVA 参与需求响应市场,从需求响应聚合商(demand response aggregator, DRA)处再投标购买需求响应资源。随后,考虑基于非合作博弈与合作博弈问题的两类价格制定者模式,以探

寻多方市场主体和谐投标策略。最后,分析独立投标与联合投标两类价格制定者模式间的差异,并与价格接受者模式比较,验证了所提策略的有效性。

1 多元和谐投标策略框架

本文提出一种电能量-需求响应市场下 EVA 多元和谐投标策略,其中“多元和谐”指 EVA 日前-实时多时间尺度投标和谐与 EVA 参与电能量市场-需求响应市场^[22]和谐,日前-实时多时间尺度投标和谐指电动汽车负荷特性与传统负荷不同, EVA 日前投标量与实时应标量间会存在偏差,需要对其修正。EVA 日前阶段投标预出清后,对于缺口部分,可继续在实时阶段再投标。电能量市场与需求响应市场和谐是指电力市场各参与主体在市场交易与资源优化配置等方面加强协同。对于 EVA 而言,日前阶段可先参与电能量市场投标。在日前阶段出清后,存在缺口时,实时阶段可继续参与需求响应市场,充分利用各级各类可调节负荷资源快速互动能力,多元和谐如图 1 所示,其中 D 为日前市场的截止时间。

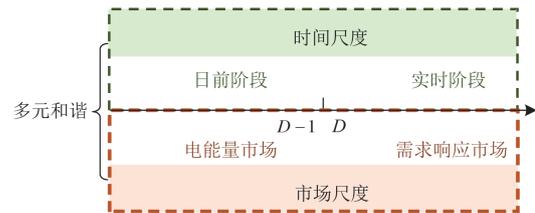


图 1 多元和谐涵义

Fig. 1 Meaning of multi-harmony

本文所提多元和谐投标策略框架如图 2 所示,日前阶段进行集群分类、可调潜力评估与投标决策制定。实时阶段更新可调潜力,购买需求响应资源以避免偏差处罚,实时决策发布至对应充电桩,调度 EV 充放电过程。

2 日前阶段

日前阶段 EVA 预测 EV 行为特性及历史数据参与电能量市场并提交日前阶段投标量^[23]。

2.1 EV 用户出行特性

EV 通常以集群形式统一管理^[24],使其作为柔性负荷参与电力市场投标。本文设定不同类别用户充电需求不同,例如长时间规律停靠用户倾向于选择慢充,则设定其与慢充运营商签订协议;停靠时间不定且充电需求较高的用户(如出租车、网约车等营运型车辆)倾向于选择快充,则设定其与快充运营商签订协议。在此情况下,基于用户聚类结果,可

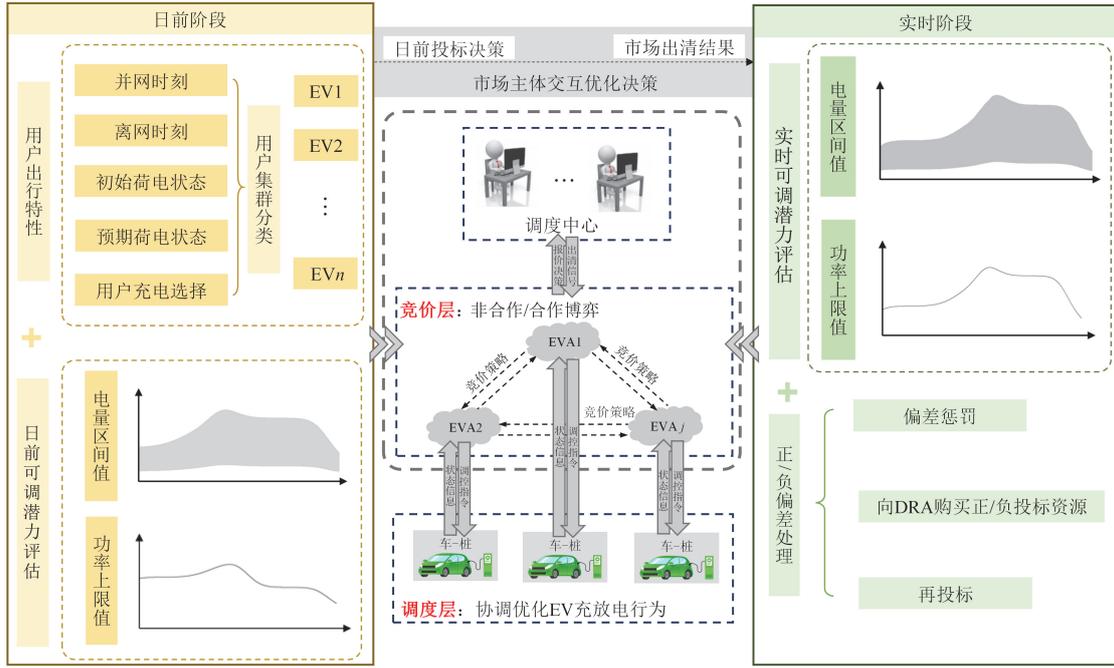


Fig. 2 Framework of multi-harmonious bidding strategy

根据用户类别占比、用户充电习惯等因素设定其随机选择结果。

引入状态变量 $X_{n,t}$ 表征 EV 状态, $X_{n,t} = 0$ 为离网状态, $X_{n,t} = 1$ 为并网状态。

$$X_{n,t} = \begin{cases} 0, & t \notin [t_n^a, t_n^d] \\ 1, & t \in [t_n^a, t_n^d] \end{cases} \quad (1)$$

$$s_{n,t} = \begin{cases} s_n^a, & t = t_n^a \\ s_{n,t-1} + \eta^{\text{ch}} p_{n,t}^{\text{ch}} \Delta t - \frac{p_{n,t}^{\text{dis}} \Delta t}{\eta^{\text{dis}}}, & t \in (t_n^a, t_n^d) \\ s_n^d, & t = t_n^d \end{cases} \quad (2)$$

式中: 下标“ n ”为 EV 用户编号; t_n^a 、 t_n^d 分别为 EV n 到达、离开时刻; s_n^a 、 s_n^d 分别为 EV n 到达、离开时刻电量; $p_{n,t}^{\text{ch}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{dis}}$ 分别为 EV n 充、放电功率; $s_{n,t}$ 为 EV n 在 t 时刻电池电量; η^{ch} 、 η^{dis} 分别为充、放电效率。

2.2 日前可调潜力

EVA 对规模化 EV 充放电行为整合控制, 鉴于 EV 用户充放电与出行特性具有不确定性, 将 EV 满足行驶用能需求负荷与需求电池容量定义为可调潜力^[25]。日前阶段, EVA 根据历史数据评估其日前可调潜力, 通过式(2)计算得到 EVA 最大充、放电功率与其电量上、下限后, 累加即可得 EV 可调潜力。

2.3 日前阶段投标

EVA j 日前投标成本 C_j^{DA} 为

$$C_j^{\text{DA}} = \sum_{t \in T} \lambda_{t,j}^{\text{DA}} E_{t,j}^{\text{DA}} \quad (3)$$

式中: T 为 EV 充电的单位时间跨度, 通常为 1 h;

$\lambda_{t,j}^{\text{DA}}$ 为日前投标电价; $E_{t,j}^{\text{DA}}$ 为日前投标电量。

为获得 EV 最佳充电策略, 每个时刻 t 对应的 T 内, 继续平均细分为 4 个时段, 则每个时段为 15 min。

假设总共包含 K 个时间段, 某一时段为 k , 则预期收入 R_j^{DA} 为

$$R_j^{\text{DA}} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_j} \lambda_{n,t,j}^{\text{agg}} E_{n,k} \quad (4)$$

式中: N_j 为 EVA j 的 EV 数量; $\lambda_{n,t,j}^{\text{agg}}$ 为 t 时刻 EVA j 与 EV n 签订的协议价格; $E_{n,k}$ 为 k 时段内 EV n 充电量。

EVA 日前预期净利润 O_j^{DA} 为

$$O_j^{\text{DA}} = R_j^{\text{DA}} - C_j^{\text{DA}} \quad (5)$$

约束条件为

$$S_j^{\text{DA,min}} \leq \sum_{t \in T} E_{t,j}^{\text{DA}} \leq S_j^{\text{DA,max}} \quad (6)$$

$$E_{n,k} \leq P_j^{\text{DA,max}} \Delta t \quad (7)$$

$$\sum_{k \in [t_n^a, t_n^d]} E_{n,k} \cdot \frac{\eta_n}{B_n} = S_n^{\text{SOC,d}} - S_n^{\text{SOC,a}} \quad (8)$$

式中: $S_j^{\text{DA,max}}$ 、 $S_j^{\text{DA,min}}$ 分别为 EVA j 日前等效电量的

上、下限； $P_j^{\text{DA,max}}$ 为 EVA j 日前功率上限值； Δt 为充电单位时间； η_n 、 B_n 分别为 EV n 充电效率、电池容量； $S_n^{\text{SOC,a}}$ 、 $S_n^{\text{SOC,d}}$ 分别为 EV n 到达、离开时刻荷电状态。

3 实时阶段

实时阶段旨在平衡电力供需，EVA 需要根据更新数据参与需求响应市场再投标，否则会受处罚。本文设定实时需求响应市场，其运行周期为 15 min，DRA 通过自动计量装置接收系统运营商发布的实时价格信号或负荷指令，EVA 与 DRA 聚合商进行偏差量对冲交易。

3.1 实时可调潜力

实时可调潜力由安装在充电桩与 EV 上的智能计量装置监测得到，实时记录电动汽车的当前状态。与 EVA 签订充放电协议的 EV 实时并网后选择预期充电时间与电量，EVA 收集当前时刻负荷信息后，更新实时可调潜力，以 15 min 时间窗口滚动执行调度计划。

3.2 实时阶段投标

在实时阶段，EVA 需要避免不必要惩罚成本，实在无法避免的部分，可参与需求响应市场再投标。实时阶段 EVA j 应支付预期成本 C_j^{RT} 为

$$C_j^{\text{RT}} = \sum_{t=1}^{24} (\lambda_{t,j}^{\text{RT}} \cdot \Delta E_{t,j} + C_{t,j}^{\text{DRA}}) \quad (9)$$

$$\Delta E_{t,j} = E_{t,j}^{\text{RT}} - E_{t,j}^{\text{DA}} \quad (10)$$

$$E_{t,j}^{\text{RT}} = \sum_{4k}^K \delta_k + \sum_{n \in N_j} \sum_{k=4t-3}^{4t} E_{n,k} \quad (11)$$

$$C_{t,j}^{\text{DRA}} = \Delta E_{t,j} F_t^{\text{DR}} \quad (12)$$

式中： $\lambda_{t,j}^{\text{RT}}$ 为实时投标电价； $\Delta E_{t,j}$ 为 EVA j 在 t 时刻的日前阶段投标电量 $E_{t,j}^{\text{DA}}$ 与实际阶段消耗电量 $E_{t,j}^{\text{RT}}$ 的偏差； $C_{t,j}^{\text{DRA}}$ 为 EVA j 在 t 时刻为避免偏差向 DRA 购买需求响应资源产生的成本； F_t^{DR} 为 t 时刻 DRA 中 DR 资源交易价格； δ_k 为 k 时段充电量。

EVA j 实时阶段预期收入 R_j^{RT} 为

$$R_j^{\text{RT}} = \sum_{k=1}^{96} \left(\sum_{n \in N_j^{\text{agg}}} \lambda_{n,t,j}^{\text{agg}} \cdot E_{n,k} \right) \quad (13)$$

EVA j 实时阶段预期净利润 O_j^{RT} 为

$$O_j^{\text{RT}} = R_j^{\text{RT}} - C_j^{\text{RT}} \quad (14)$$

约束条件为

$$\begin{cases} S_j^{\text{RT,min}} \leq \sum_{t \in T} E_{t,j}^{\text{RT}} \leq S_j^{\text{RT,max}} \\ E_{n,k} \leq P_j^{\text{RT,max}} \Delta t \\ \sum_{t \in [t_n^{\text{a}}, t_n^{\text{d}}]} E_{n,t} \cdot \frac{\eta_n}{B_n} = S_n^{\text{SOC,d}} - S_n^{\text{SOC,a}} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $S_j^{\text{RT,max}}$ 、 $S_j^{\text{RT,min}}$ 分别为实时等效电量的上、下限； $P_j^{\text{RT,max}}$ 为实时功率上限值。

4 投标模型

针对各 EVA 间可用非合作博弈与合作博弈求解，前者关注参与者个体利益最大化，后者研究联盟利益的二次分配^[26]。本文所探讨的两种价格制定者模式，即独立投标模式与合作投标模式分别为非合作博弈问题与合作博弈问题。

4.1 独立投标模式

基于非合作博弈的思想，本文研究各主体如何决策以最大化自身利益。基本研究思路是将 EVA 作为博弈参与者，以各自需求为决策，取其实时偏差值为效用函数，建立实时阶段独立投标模型。

参与者集合为： $A = \{\text{EVA1}, \text{EVA2}, \dots, \text{EVA}j\}$ ，决策集为投标电量 $E_{n,k}$ 与电量报价 $\lambda_{n,k}$ ： $\Omega = \{E_{n,k}, \lambda_{n,k}\}$ ，效用函数为投标成本，即

$$F = \sum_{t \in T} (\lambda_{t,j}^{\text{DA}} E_{t,j}^{\text{DA}} + \lambda_{t,j}^{\text{RT}} \cdot \Delta E_{t,j} + C_{t,j}^{\text{pen}}) \quad (16)$$

式中： F 为投标成本； $C_{t,j}^{\text{pen}}$ 为 EVA j 在 t 时刻因日前阶段投标电量与实际消耗电量之间的偏差而需支付的偏差惩罚成本。

本文 Nash 均衡模型存在性与唯一性具体证明过程参考文献^[27]。

4.2 联合投标模式

在博弈过程中，参与者可通过合作方式组成联盟，合作博弈理论用来研究联盟成立和利益分配问题。各博弈参与者先依次进行独立优化，随后将优化结果分享给其他参与者，最终得到最优策略^[28]。

用 Shapley 值分配利益，EVA j 对联盟 S 的贡献 $M(S, j)$ 为

$$M(S, j) = u_S - u_{S \setminus \{j\}} \quad (17)$$

其中

$$u_S = \sum_j R_j \quad (18)$$

式中： u_S 、 $u_{S \setminus \{j\}}$ 分别为含、不含 EVA j 的联盟效用函数； R_j 为 EVA j 收入值，且日前与实时分开计算。

合作博弈模型中，Shapley 值 $\varphi(S, i)$ 为

$$\varphi(S, i) = \sum_{A \subseteq S, i \in A} \frac{(|A|-1)! (|S|-|A|)!}{|S|!} M(A, i) \quad (19)$$

式中: $M(A, i)$ 为 EVA i 对合作联盟 A 的贡献, A 为 S 的子集。

4.3 求解模型

将模型转化为多目标双层规划形式, 如式(20)所示。

$$\begin{cases} \min_{x_j} F_j(x_j, y) = \sum_{t \in T} (\lambda_{t,j}^{\text{DA}} E_{t,j}^{\text{DA}} + \lambda_{t,j}^{\text{RT}} \cdot \Delta E_{t,j} + C_{t,j}^{\text{pen}}) \\ \text{s.t. } S_j^{\text{DA}, \min} \leq \sum_{t \in T} E_{t,j}^{\text{DA}} \leq S_j^{\text{DA}, \max} \\ E_{n,k} \leq P_j^{\text{DA}, \max} \Delta t \\ \pi_j^{\text{DA}, \min} \leq \pi_{t,j}^{\text{DA}} \leq \pi_j^{\text{DA}, \max} \\ \sum_{t \in [t_n^{\text{SOC}, d}, t_n^{\text{SOC}, a}]} E_{n,k} \cdot \frac{\eta_n}{B_n} = S_n^{\text{SOC}, d} - S_n^{\text{SOC}, a} \\ y = \operatorname{argmin}_y \left(\sum_{k=1}^K \delta_k + \sum_{n \in N_j} \sum_{k=4t-3}^{4t} E_{n,k} - E_{t,j}^{\text{DA}} \right) \\ \text{s.t. } S_j^{\text{RT}, \min} \leq \sum_{t \in T} E_{t,j}^{\text{RT}} \leq S_j^{\text{RT}, \max} \\ E_{n,k} \leq P_j^{\text{RT}, \max} \Delta t \\ 0 \leq P_{t,j}^{\text{ch}} \leq P_{t,j}^{\text{ch}, \max} \\ 0 \leq P_{t,j}^{\text{dis}} \leq P_{t,j}^{\text{dis}, \max} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $F_j(\cdot)$ 为投标成本目标函数; x_j 为 EVA j 投标决策变量; y 为偏差; $\pi_{t,j}^{\text{DA}}$ 为 EVA j 在日前电价决策; $\pi_j^{\text{DA}, \max}$ 、 $\pi_j^{\text{DA}, \min}$ 分别为电价上、下限; $P_{t,j}^{\text{ch}}$ 、 $P_{t,j}^{\text{dis}}$ 分别为 EVA j 充、放电功率; $P_{t,j}^{\text{ch}, \max}$ 、 $P_{t,j}^{\text{dis}, \max}$ 分别为 EVA j 充、放电功率上限。

下层投标问题的拉格朗日函数 L 为

$$\begin{aligned} L = & \sum_{k=1}^K \delta_k + \sum_{n \in N_j} \sum_{k=4t-3}^{4t} E_{n,k} - \sum_{t \in T} \sum_j \pi_{t,j}^{\text{DA}} (P_{t,j}^{\text{ch}} - P_{t,j}^{\text{dis}}) \Delta t - \\ & \sum_{t \in T} \sum_j \mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{lb}} P_{t,j}^{\text{ch}} - \sum_{t \in T} \sum_j \mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{ub}} (P_{t,j}^{\text{ch}, \max} - P_{t,j}^{\text{ch}}) - \\ & \sum_{t \in T} \sum_j \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{lb}} P_{t,j}^{\text{dis}} - \sum_{t \in T} \sum_j \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{ub}} (P_{t,j}^{\text{dis}, \max} - P_{t,j}^{\text{dis}}) \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $\mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{lb}}$ 、 $\mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{ub}}$ 分别为式(20)中 $P_{t,j}^{\text{ch}}$ 约束条件所对应的对偶变量; $\mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{lb}}$ 、 $\mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{ub}}$ 分别为式(20)中 $P_{t,j}^{\text{dis}}$ 约束条件所对应的对偶变量。

上层各 EVA 之间日前决策时形成 Nash 博弈, 在上层决策前提下与调度中心协同优化得到下层决策构成 Stackelberg 博弈, 从而使 EVA 日前阶段投

标成本与实时偏差最小。其中, 所有目标函数与约束均为凸函数且非线性, 下层问题仅与上层决策及自身变量有关, 故对任意上层决策, 下层问题有且仅有一个 Nash 均衡。

因此, 下层问题可用一组 KKT 条件替代^[29]。对变量求偏导得到 KKT 平衡条件, 如式(22)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_{t,j}^{\text{ch}}} = -\pi_{t,j}^{\text{DA}} \Delta t - \mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{lb}} + \mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{ub}} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial P_{t,j}^{\text{dis}}} = \pi_{t,j}^{\text{DA}} \Delta t - \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{lb}} + \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{ub}} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

不等式约束对应的 KKT 方向和互补条件为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,j}^{\text{ch}} \perp \mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{lb}} \geq 0 \\ 0 \leq P_{t,j}^{\text{ch}, \max} - P_{t,j}^{\text{ch}} \perp \mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{ub}} \geq 0 \\ 0 \leq P_{t,j}^{\text{dis}} \perp \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{lb}} \geq 0 \\ 0 \leq P_{t,j}^{\text{dis}, \max} - P_{t,j}^{\text{dis}} \perp \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{ub}} \geq 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中: “ \perp ” 为互补运算, 即有且只有一项为 0。

引入布尔变量并利用 Big-M 方法将互补条件转化为割平面约束^[27], 有

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,j}^{\text{ch}} \leq M b_{t,j}^{\text{ch}, \text{lb}} \\ 0 \leq \mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{lb}} \leq M(1 - b_{t,j}^{\text{ch}, \text{lb}}) \\ 0 \leq P_{t,j}^{\text{ch}, \max} - P_{t,j}^{\text{ch}} \leq M b_{t,j}^{\text{ch}, \text{ub}} \\ 0 \leq \mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{ub}} \leq M(1 - b_{t,j}^{\text{ch}, \text{ub}}) \\ 0 \leq P_{t,j}^{\text{dis}} \leq M b_{t,j}^{\text{dis}, \text{lb}} \\ 0 \leq \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{lb}} \leq M(1 - b_{t,j}^{\text{dis}, \text{lb}}) \\ 0 \leq P_{t,j}^{\text{dis}, \max} - P_{t,j}^{\text{dis}} \leq M b_{t,j}^{\text{dis}, \text{ub}} \\ 0 \leq \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{ub}} \leq M(1 - b_{t,j}^{\text{dis}, \text{ub}}) \end{cases} \quad (24)$$

$$C^{\text{KKT}} = \left\{ \begin{array}{l} P_{t,j}^{\text{ch}}, P_{t,j}^{\text{dis}}, \mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{lb}}, \mu_{t,j}^{\text{ch}, \text{ub}}, \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{lb}}, \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{ub}} \\ \mu_{t,j}^{\text{dis}, \text{ub}}, b_{t,j}^{\text{ch}, \text{lb}}, b_{t,j}^{\text{ch}, \text{ub}}, b_{t,j}^{\text{dis}, \text{lb}}, b_{t,j}^{\text{dis}, \text{ub}} \end{array} \right\} \quad (25)$$

式中: M 为足够大的常数; $b_{j,t}^{\text{ch}, \text{lb}}$ 、 $b_{j,t}^{\text{ch}, \text{ub}}$ 、 $b_{j,t}^{\text{dis}, \text{lb}}$ 、 $b_{j,t}^{\text{dis}, \text{ub}}$ 为布尔变量, 取值为 0 或 1; C^{KKT} 为投标过程 KKT 系统对应约束集合。

根据强对偶理论, 可知在最优点处, 下层问题等价于

$$\begin{aligned} \sum_{t \in T} \pi_{j,t}^{\text{DA}} (P_{j,t}^{\text{ch}} - P_{j,t}^{\text{dis}}) \Delta t = & \sum_{t \in T} \sum_{j \in S} \mu_{j,t}^{\text{ch}, \text{ub}} P_{j,t}^{\text{ch}, \max} + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{j \in S} \mu_{j,t}^{\text{dis}, \text{ub}} P_{j,t}^{\text{dis}, \max} - \sum_{t \in T} \sum_{i \in S \setminus \{j\}} \pi_{i,t}^{\text{DA}} (P_{i,t}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{dis}}) \Delta t \end{aligned} \quad (26)$$

式中: $i \in S \setminus \{j\}$ 为除 EVA j 外其他 EVA。

由 KKT 平衡条件转换为

$$\begin{aligned} \sum_{t \in T} \pi_{j,t}^{DA} (P_{j,t}^{ch} - P_{j,t}^{dis}) \Delta t &= \sum_{t \in T} (\lambda_{j,t}^{DA} - \mu_{j,t}^{ch,lb} + \mu_{j,t}^{ch,ub}) P_{j,t}^{ch} - \\ &\sum_{t \in T} (\lambda_{j,t}^{DA} + \mu_{j,t}^{dis,lb} - \mu_{j,t}^{dis,ub}) P_{j,t}^{dis} = \sum_{t \in T} \lambda_{j,t}^{DA} (P_{j,t}^{ch} - P_{j,t}^{dis}) + \\ &\sum_{t \in T} (-\mu_{j,t}^{ch,lb} P_{j,t}^{ch} + \mu_{j,t}^{ch,ub} P_{j,t}^{ch} - \mu_{j,t}^{dis,lb} P_{j,t}^{dis} + \mu_{j,t}^{dis,ub} P_{j,t}^{dis}) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{cases} \mu_{j,t}^{ch,lb} P_{j,t}^{ch} = 0 \\ \mu_{j,t}^{dis,lb} P_{j,t}^{dis} = 0 \\ \mu_{j,t}^{ch,ub} (P_{j,t}^{ch,max} - P_{j,t}^{ch}) = 0 \\ \mu_{j,t}^{dis,ub} (P_{j,t}^{dis,max} - P_{j,t}^{dis}) = 0 \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \sum_{t \in T} \pi_{j,t}^{DA} (P_{j,t}^{ch} - P_{j,t}^{dis}) \Delta t &= \sum_{t \in T} \lambda_{j,t}^{DA} (P_{j,t}^{ch} - P_{j,t}^{dis}) + \\ &\sum_{t \in T} (\mu_{j,t}^{ch,ub} P_{j,t}^{ch,max} + \mu_{j,t}^{dis,ub} P_{j,t}^{dis,max}) \end{aligned} \quad (29)$$

将问题转化为混合整数线性规划，可通过商业求解器求解，最后形式为

$$\begin{cases} \min_{x_j, y, \lambda, \mu} F_j(x_j, x'_j, y, \lambda, \mu) \\ \text{s.t. } G_j(x_j) \geq 0 \\ H_j(x_j, y) = 0 \\ \{y, \lambda, \mu\} \in C^{KKT} \end{cases} \quad (30)$$

式中： $G_j(x_j)$ 为投标不等式约束函数； $H_j(x_j, y)$ 为投标等式约束函数； x'_j 为除EVA j 以外其余EVA决策； λ 和 μ 为约束条件对偶变量。

5 算例分析

采用湖北武汉某区实际数据进行仿真，设定慢充聚合商EVA1、EVA2，快充聚合商EVA3、EVA4、EVA5，区域内充电场所均配备慢、快充电桩，不同充电桩由不同EVA调控，根据历史数据设定选择快、慢充的EV比例为20%、80%。充电设施分布情况如图3所示，负荷及发电商报价如图4所示，参数见表1。



图3 充电设施分布

Fig. 3 Distribution of charging facilities

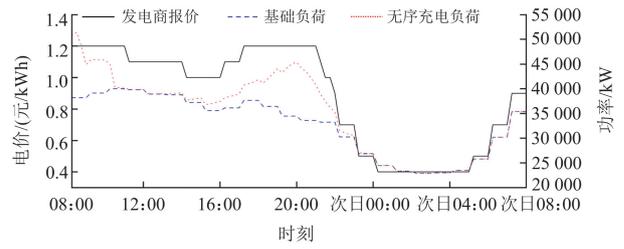


图4 负荷及发电商报价

Fig. 4 Load and generator quotation

表1 具体参数值

Table 1 Values of parameters

参数	数值
EV 电池容量 B_n /kWh	32
慢充电桩功率/kW	6.6
快充桩功率/kW	22
充电容量上限/kWh	$0.9B_n$
充电容量下限/kWh	$0.15B_n$
电价上限/(元/kWh)	1.3
电价下限/(元/kWh)	0.1
充放电效率	0.95
偏差容忍度	0.1

5.1 日前阶段

5.1.1 日前可调潜力评估

图5为EV集群出行特征分类，本文设定5类集群，各集群用户随机进行充电选择。图6为各EVA日前可调潜力评估结果。

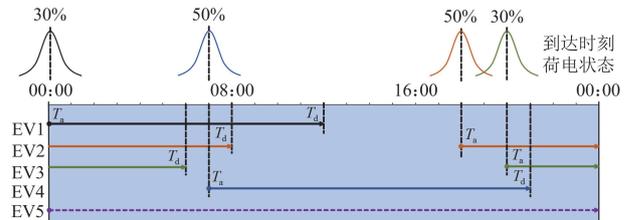


图5 EV 集群出行特征分类

Fig. 5 Travel feature classification of EV clusters

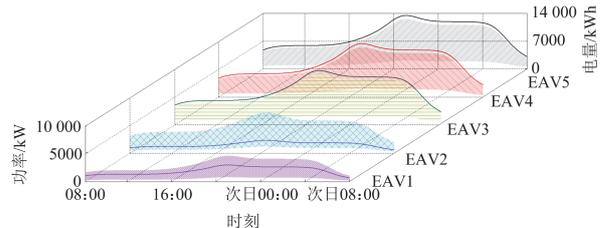


图6 EVA 日前可调潜力

Fig. 6 Day-ahead adjustable potential of EVA

5.1.2 日前参考报价

EVA 基于日前参考报价如图 7 所示。

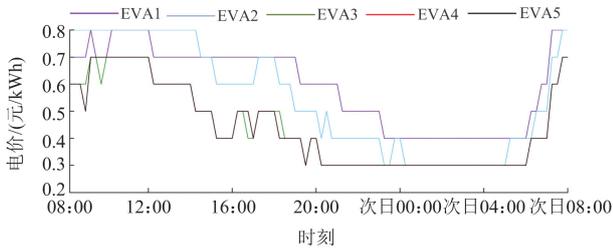


图 7 EVA 日前参考报价

Fig. 7 Day-ahead reference quotation of EVA

5.2 实时阶段

5.2.1 实时可调潜力评估

更新实时可调潜力如图 8 所示, 对比图 6 可以看出, 日前与实时可调潜力变化趋势大体一致, 但依旧存在差异。说明历史数据并不足以完全评估潜力, 仍需要对用户需求进行实时更新, 以确保电能平衡。

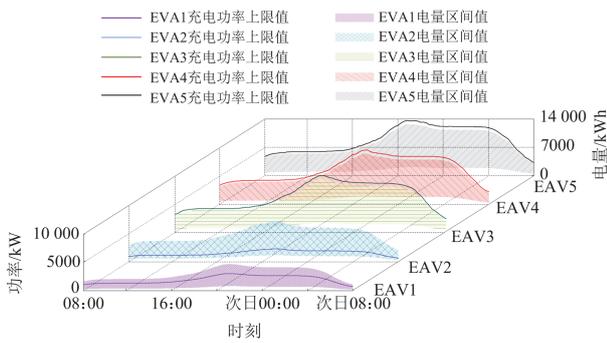


图 8 EVA 实时可调潜力

Fig. 8 Real-time adjustable potential of EVA

5.2.2 独立投标模式

EVA 可参与实时需求响应市场以保证自身电能平衡并避免惩罚成本。在独立投标模式下 EVA 电量及出清电价曲线如图 9 所示。

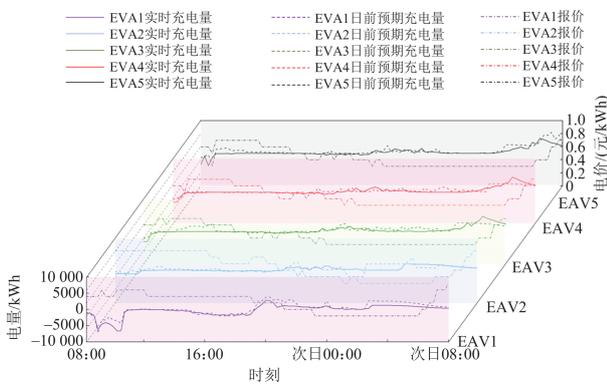


图 9 独立投标模式下电量及出清电价

Fig. 9 Load and clearing price of independent bidding mode

在实时独立投标过程中, 因价格激励作用产生峰值时段推移现象, 同时实时价格在部分时段有下降趋势, 实时充电曲线也出现新峰值。

原始负荷第一个峰值时段(08:00-09:30), EV 充电负荷被全部转移至其余平值、谷值时段, 且因充放电协议, 部分 EV 放电以调节峰谷差。在原始负荷第二个峰值时段(17:30-21:30), EV 充电负荷时段被推移, 同时在 16:00-20:00 时段向电网反向供电。从价格曲线也可看出, 在峰值时段快充运营商出清电价均高于慢充运营商, 即此时用户可能会倾向选择慢充, 从而缓解电网压力。

5.2.3 联合投标模式

图 10 为联合投标模式下电量及出清电价。负荷曲线与实时独立投标负荷曲线变化趋势相对一致, 而价格曲线相对实时独立投标而言产生博弈交互变化, 整体变化趋势较实时独立投标更和谐, 且能进一步提高 EVA 整体收益。

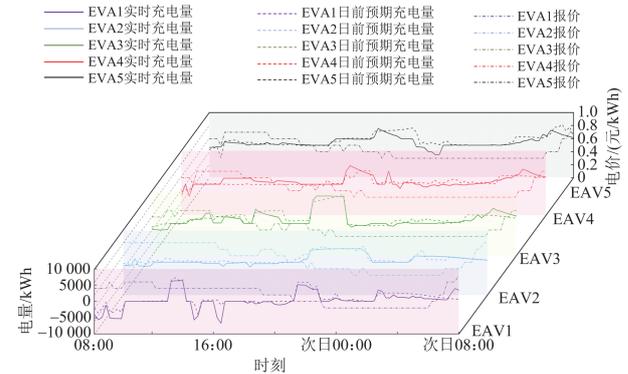


图 10 联合投标模式下电量及出清电价

Fig. 10 Load and clearing price of joint bidding mode

5.3 经济性评估

EVA 也可将信息上报至调度中心, 由调度中心统一优化计划并下放调度指令, 即价格接受者模式。在价格接受者模式下调度负荷及电价如图 11 所示。

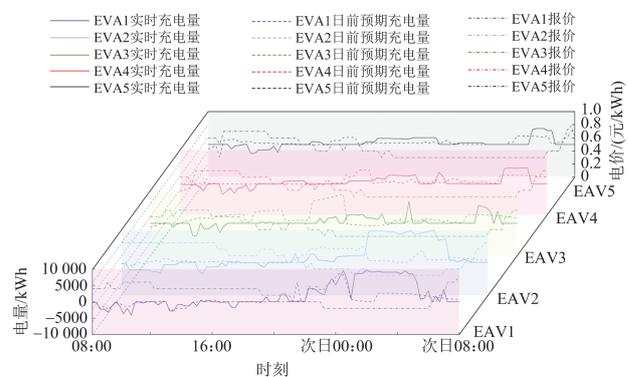


图 11 价格接受者模式下电量及出清电价

Fig. 11 Load and clearing price of price-taker mode

3 类模式下日前、实时阶段投标的成本、收入及净利润见表 2。

表 2 不同模式下经济性评估

Table 2 Economic evaluation under different modes

评估参数	独立投标模式	联合投标模式	价格接受者模式	
日前阶段成本/元	EVA1	18 469.32	27 542.67	34 178.04
	EVA2	14 033.47	26 868.77	36 325.38
	EVA3	6486.72	12 485.42	7977.08
	EVA4	7625.56	11 272.89	8506.47
	EVA5	6650.61	11 903.47	6819.76
日前阶段收入/元	EVA1	30 118.25	34 719.02	43 534.81
	EVA2	26 868.77	36 440.02	45 054.77
	EVA3	13 832.33	22 810.16	14 927.61
	EVA4	11 529.68	23 490.69	12 007.93
	EVA5	11 924.22	24 460.81	13 617.53
日前阶段净利润/元	EVA1	11 648.93	7176.35	9356.77
	EVA2	12 835.30	9571.25	8729.39
	EVA3	7345.61	10 324.74	6950.53
	EVA4	3904.12	12 217.80	3501.46
	EVA5	5273.61	12 557.34	6797.77
实时阶段成本/元	EVA1	10 695.66	1793.46	2521.72
	EVA2	11 272.89	1194.62	2032.81
	EVA3	16 431.33	457.31	493.36
	EVA4	17 046.49	556.85	646.82
	EVA5	14 988.81	470.47	571.26
实时阶段收入/元	EVA1	26 205.39	24 503.54	20 557.73
	EVA2	26 868.75	23 317.45	22 988.31
	EVA3	26 788.89	17 619.02	9566.55
	EVA4	27 061.91	17 480.37	9263.42
	EVA5	26 993.87	17 106.83	10 013.36
实时阶段净利润/元	EVA1	15 509.73	22 710.08	18 036.01
	EVA2	15 595.86	22 122.83	20 955.50
	EVA3	10 357.56	17 161.71	9073.19
	EVA4	10 015.42	16 923.52	8616.60
	EVA5	12 005.06	16 636.36	9442.1

由表 2 可知,综合 5 个 EVA 总成本-收入-净利润来看,独立投标模式、联合投标模式、价格接受者模式的日前阶段总成本分别为 53 265.68 元、90 073.22 元、93 806.73 元,因为价格接受者模式下各 EVA 仅被动参与市场,其日前成本较高,无法保证自身利益最大化。同时,独立投标模式、联合投标模式、价格接受者模式下的各 EVA 实时阶段总成本分别为 70 435.18 元、4472.71 元、6265.97 元,因独立投标模式下各市场主体独立决策,准确度较低,需要在实时阶段支付大量再投标成本,易造成市场主体间不协调等问题。联合投标模式下日前阶段总净利润和实时阶段总净利润分别比独立投标模式、

价格接受者模式高 10 839.91 元、16 511.56 元和 32 070.87 元、29 431.1 元,联合投标模式能有效提高 EVA 净利润,但其日前与实时阶段收入略低于独立投标模式,这是由于在联合投标交互过程中更多考虑到市场和谐,相对而言不如独立投标模式更易激发 EVA 竞争积极性。

5.4 投标模式有效性评估

为验证所提日前-实时两阶段投标模式对削峰填谷的有效性,将独立投标模式、联合投标模式及价格接受者模式与无序模式进行对比,分析负荷峰谷差变化,如表 3 所示。

表 3 负荷峰谷差

Table 3 Peak-valley reduction of load

场景	峰谷差/kW
无序模式	28 503.50
独立投标模式	20 087.45
联合投标模式	16 453.41
价格接受者模式	24 438.02

从表 3 可看出,相比无序模式,独立投标模式、联合投标模式与价格接受者模式的峰谷差均降低,意味着日前-实时两阶段投标模式能有效削峰填谷。其中独立投标模式与联合投标模式峰谷差较无序模式分别减少 8416.05 kW 与 12 050.09 kW,其中联合投标模式效果更优。联合投标过程中,各主体间通过联盟协作而非完全竞争,形成具有约束的协同决策机制,有助于达成“多元和谐”目标。

6 结论

本文提出一种电能量-需求响应市场下 EVA 多元和谐投标策略,具体结论如下。

1) 从多元和谐角度看,联合投标模式能通过价格信号实现不同充电站之间和谐竞争,实现市场主体共赢。在价格接受者模式下,EVA 日前阶段总成本最高,较独立投标模式、联合投标模式分别高 76.11%、4.14%;价格接受者模式下 EVA 实时阶段净利润最低,较独立投标模式、联合投标模式分别低 5.65%、37.32%。

2) 从经济性角度看,联合投标模式效果更优。联合投标模式的实时阶段投标总利润约为独立投标模式的 1.5 倍,约为价格接受者模式的 1.4 倍。尽管独立投标模式在日前阶段的投标总成本相较于联合投标模式更低,但不足以抵消其实时阶段成本损失。

3) 从有效性角度看,联合投标模式在削峰填谷方面表现最优,其负荷峰谷削减量达到 42.28%,显著高于独立投标模式的 29.53%和价格接受者模式的 14.26%。

本文提出多元和谐概念, 但仅分析了电能量市场与需求响应市场, 具有一定局限性。下一步研究可扩展至现货市场与各类辅助服务市场, 深入探讨负荷资源的快速调节能力, 并协调不同层级市场之间衔接, 进一步完善电力市场建设。

参考文献

- [1] 国家能源局. 华中能源监管局组织召开华中(东四省)电力市场建设研讨会[EB/OL]. [2024-06-21]. https://hzj.nea.gov.cn/dtyw/jgdt/202406/t20240621_264973.html
- [2] 林卉, 周一辰, 李永刚, 等. 基于电动汽车两阶段充电站分配的聚合商定价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 44-56.
LIN Hui, ZHOU Yichen, LI Yonggang, et al. Aggregator pricing methodology based on two-stage charging station allocation for electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 44-56.
- [3] 李旭东, 杨焯, 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.
- [4] 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.
- [5] 冯野牧, 吕干云, 史明明, 等. 考虑 EV 充放电意愿的园区综合能源系统双层优化调度[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 142-153.
FENG Yemu, LÜ Ganyun, SHI Mingming, et al. Two-layer optimal scheduling of park integrated energy system considering the charging and discharging willingness of electric vehicles[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 142-153.
- [6] 房超运, 杨昆, 柴瑞环. 分时电价下含电动汽车的微电网群双层多目标优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 124-133.
FANG Chaoyun, YANG Kun, CHAI Ruihuan. Two-layer multi-objective optimal dispatching of microgrid group with electric vehicles under time-of-use electricity prices[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 124-133.
- [7] WANG Jian, XIE Ning, HUANG Chunyi, et al. Two-stage stochastic-robust model for the self-scheduling problem of an aggregator participating in energy and reserve markets[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 752-771.
- [8] 许星原, 陈皓勇, 黄宇翔, 等. 虚拟电厂市场化交易中的挑战、策略与关键技术[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 745-757.
XU Xingyuan, CHEN Haoyong, HUANG Yuxiang, et al. Challenges, strategies and key technologies for virtual power plants in market trading[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 745-757.
- [9] WU Hongyu, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. A game theoretic approach to risk-based optimal bidding strategies for electric vehicle aggregators in electricity markets with variable wind energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 7(1): 374-385.
- [10] ALAHÄIVÄLÄ A, CORBISHLEY J, EKSTRÖM J, et al. A control framework for the utilization of heating load flexibility in a day-ahead market[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 145: 44-54.
- [11] 侯慧, 何梓姻, 罗超, 等. 计及需求响应潜力的电动汽车聚合商多主体日前投标策略[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(2): 220-227.
HOU Hui, HE Ziyin, LUO Chao, et al. Multi-agent day-ahead bidding strategy of electric vehicle aggregators upon demand response potential[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(2): 220-227.
- [12] 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 EV 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.
- [13] 韩冬, 黄微, 严正. 基于深度强化学习的电力市场虚拟投标策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1443-1455.
HAN Dong, HUANG Wei, YAN Zheng. Deep reinforcement learning for virtual bidding in electricity markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1443-1455.
- [14] YUAN Zhipeng, LI Peng, LI Zhenlong, et al. Data-driven risk-adjusted robust energy management for microgrids integrating demand response aggregator and renewable energies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(1): 365-377.
- [15] VAGROPOULOS S I, BAKIRTZIS A G. Optimal bidding

- strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4031-4041.
- [16] TENG Fei, DING Zhaohao, HU Zechun, et al. Technical review on advanced approaches for electric vehicle charging demand management, part I: applications in electric power market and renewable energy integration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5684-5694.
- [17] HOSSEIN ABBASI M, TAKI M, RAJABI A, et al. Risk-constrained offering strategies for a large-scale price-maker electric vehicle demand aggregator[J]. IET Smart Grid, 2020, 3(6): 860-869.
- [18] 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.
- [19] ZHAO Zhenli, ZHANG Lihui, YANG Meng, et al. Pricing for private charging pile sharing considering EV consumers based on non-cooperative game model[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254.
- [20] CHEN Xiangyu, LEUNG K C. Non-cooperative and cooperative optimization of scheduling with vehicle-to-grid regulation services[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(1): 114-130.
- [21] 中国政府网. 国家发展改革委等部门关于印发《电力需求侧管理办法(2023年版)》的通知[EB/OL]. [2023-09-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6907311.htm
- [22] SONG Meng, AMELIN M, WANG Xue, et al. Planning and operation models for EV sharing community in spot and balancing market[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6248-6258.
- [23] LÜ Ruike, GUO Hongye, ZHENG Kedi, et al. Co-optimizing bidding and power allocation of an EV aggregator providing real-time frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4594-4606.
- [24] 李咸善, 仇成龙, 张远航, 等. 考虑电碳需求响应的电动汽车集群市场化运营策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 163-174.
- LI Xianshan, QIU Chenglong, ZHANG Yuanhang, et al. Market-oriented operation strategy for EV clusters considering electricity-carbon demand response[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 163-174.
- [25] 袁洪涛, 徐潇源, 严正, 等. 电动汽车集中充换电设施规划和优化运行研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 157-174.
- YUAN Hongtao, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Review of centralized EV charging and battery swapping facility planning and optimal scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 157-174.
- [26] SHUI Jijun, PENG Daogang, ZHENG Hui, et al. Optimal scheduling of multiple entities in virtual power plant based on the master-slave game[J]. Applied Energy, 2024, 376.
- [27] LI Zhengmao, WU Lei, XU Yan, et al. Distributed tri-layer risk-averse stochastic game approach for energy trading among multi-energy microgrids[J]. Applied Energy, 2023, 331.
- [28] ZHANG Jin, CHE Liang, SHAHIDEHPOUR M. Distributed training and distributed execution based Stackelberg multi-agent reinforcement learning for EV charging scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4976-4979.
- [29] ZHOU Bo, CHEN Guo, SONG Qiankun, et al. Robust chance-constrained programming approach for the planning of fast-charging stations in electrified transportation networks[J]. Applied Energy, 2020, 262.

收稿日期: 2024-09-30; 修回日期: 2025-05-24

作者简介:

侯慧(1981—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统风险评估、能源互联网、电动汽车与电网互动等; E-mail: husthou@126.com

倪恬(1997—), 男, 博士研究生, 研究方向为电动汽车与电网互动等。E-mail: 247660@whut.edu.

(编辑 张颖)