

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191603

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

程杉¹, 陈梓铭¹, 徐康仪¹, 康振南^{1,2}, 魏昭彬¹

(1. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

2. 国网湖北省电力公司十堰供电公司, 湖北 十堰 442000)

摘要: 为减小大量电动汽车无序充电对电网造成的影响, 提出了一种电动汽车智能有序充放电策略。基于合作博弈的思想, 以电动汽车代理商与电动汽车用户的合作联盟收益最大为目标, 建立了电动汽车的动态分时优化充放电模型。采用粒子群算法求解出代理商与电动汽车用户间的动态分时交易电价, 并对电动汽车充放电时段进行引导规划。实际的算例结果验证了该策略的有效性和经济性。通过与固定电价策略进行对比分析, 表明所提策略不仅能有效减小峰谷差, 避免负荷“新高峰”, 且可以提高代理商和电动汽车用户的收益。进一步对比不同数量电动汽车入网对优化效果的影响, 发现随着入网电动汽车数量的增多, 优化效果更明显。

关键词: 有序充放电; 合作博弈; 动态分时交易电价; 合作联盟收益

An orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price

CHENG Shan¹, CHEN Ziming¹, XU Kangyi¹, KANG Zhennan^{1,2}, WEI Zhaobin¹

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid (China Three Gorges University),

Yichang 443002, China; 2. State Grid Hubei Shiyan Power Supply Company, Shiyan 442000, China)

Abstract: An intelligent electric vehicle orderly charging and discharging strategy is proposed to reduce the impact of a large number of electric vehicles disorderly charging on the power grid. Based on the idea of a cooperative game, a dynamic time-sharing optimization charging and discharging model is established with the goal of maximizing the benefits of the cooperative alliance between electric vehicle agents and electric vehicle users. A particle swarm optimization algorithm is used to solve the dynamic time-sharing trading price between agents and users and guide electric vehicle charging and discharging period planning. The actual calculation results prove the effectiveness and economy of the proposed strategy. Through comparative analysis with the fixed electricity price strategy, it is shown that the proposed strategy can not only effectively reduce the peak-valley difference, and avoid the load "new peak", but also improve the revenue of agents and users. Further comparing the influence of the entry on the network of different numbers of electric vehicles on the optimization effect, it is found that the optimization effect is more obvious with the increase in the number of electric vehicles connected to the grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607105).

Key words: orderly charging and discharging strategy; cooperative game; dynamic time-sharing electricity price; cooperative alliance revenue

0 引言

近年来, 电动汽车(Electric Vehicle, EV)产业的发展备受关注^[1-3]。然而大规模EV无序充电会威胁到电力系统的安全稳定运行^[4-5]。合理的电价模式是引导EV进行有序充放电的有效手段, 不仅可以

削峰填谷, 改善电网负荷曲线, 还可以降低EV充电成本和网损成本^[6-9]。

为此国内外对电价制定及其引导EV有序充放电展开了研究。为了优化EV有序充电的谷电价时段及峰谷时段的电价, 文献[10]建立了以峰谷差率最小为目标的优化数学模型, 而文献[11]还考虑了电网分时电价时段与局域配电网负荷波动。文献[12]和文献[13]则基于分时电价, 分别建立了EV的多目

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607105)

标优化调度模型和分散式优化调度模型。上述研究表明分时电价模式对引导 EV 有序充放电具有重要的作用。但是这些静态分时电价模式，即费率和时段不随系统实际动态调整，可能导致谷电价时段大量 EV 接入电网从而造成负荷“新高峰”。

为解决此问题，文献[14]提出对 EV 的有序充电功率进行限制以更好地削峰填谷；文献[15]考虑大规模 EV 的实时优化调度，提出了基于能量缓冲一致性的功率再分配一致性算法。然而功率控制模型一般只考虑系统运行的稳定性，对比之下动态分时电价模型通过制定交易电价的方式兼顾参与方的经济效益和配网的稳定性，更具有实际意义。文献[16]提出用户自主响应充电站制定的动态分时电价，显著降低了 EV 用户的充电成本，并实现了削峰填谷；文献[17]则提出 EV 充放电计划由用户自主响应分时电价并经本地 EV 调度机构调整后确定，并构造了动态分时电价更新模式。上述研究均有效地避免了负荷“新高峰”的出现，然而都只考虑单个参与方的经济效益[18-20]。

随着 EV 数量增加，由调度机构统一管理每辆 EV 是不现实的。根据车辆使用规律在居民小区设置代理商这一角色，代理商通过价格波动安排所管理 EV 的充放电计划，并且在电能交易过程中，代理商和用户形成了利益联盟，而基于合作博弈的效益分配原则可以在多利益主体间公平分摊收益[21-22]。因此，本文在满足用户需求的前提下，以代理商与 EV 用户间的交易电价[23]、EV 的充放电时段为变量，基于合作博弈建立了以代理商和 EV 用户双方合作收益最大为目标的 EV 充放电优化调度模型，采用改进的粒子群优化算法[24]进行求解，并利用等 MDP(Modified Disruption Propensity, MDP)分配原则将合作收益公平分摊给代理商和 EV 用户。

1 EV 代理商的运营模式

居民区的 EV 代理商作为电网和 EV 用户之间的中介，通过收集电网电价和 EV 可充放电信息，制定合理交易电价并控制 EV 的充放电行为。EV 的所有权为 EV 用户，代理商通过与用户签订双边充放电合约，有条件地获得调度控制权。图 1 反映了 EV、EV 代理商以及电网之间的信息和能量交互关系：用户向代理商提供 EV 接入电网时段和离开电网时段以及需求电量等基本信息，代理商根据用户提供的信息和配电网提供的基础电价，优化求解代理商与 EV 用户间的交易电价。

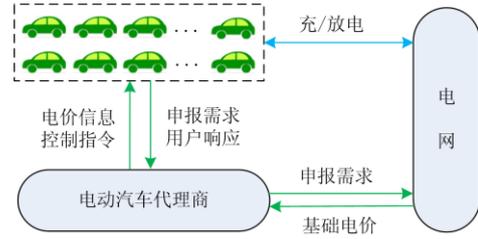


图 1 EV、代理商与电网间的信息与能量交互示意图

Fig. 1 Schematic diagram of information and energy interaction among EV and EV agents and the power grid

2 优化模型

2.1 非合作条件下的最大收益模型

为了能在合作博弈条件下对代理商和 EV 用户进行公平的利益分配，首先需要建立非合作条件下分别以代理商收益 F_1 和 EV 用户收益 F_2 最大化为目标的优化数学模型。

$$\max F_1 = \sum_{j=1}^{24} \sum_{i=1}^N [S_{FH,i,j} p(j) (P_{c,i} + P_{dc,i})] \Delta t \quad (1)$$

$$\max F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{24} [S_{FH,i,j} p_s(j) (P_{c,i} + P_{dc,i})] \Delta t \quad (2)$$

$$p(j) = p_s(j) - p_c(j) \quad (3)$$

式中： N 为参与调度的 EV 总数； Δt 为控制时间段的时长，本文取 1 h； $P_{c,i}$ 、 $P_{dc,i}$ 分别表示充电、放电功率，且 $P_{c,i} = \eta P_E$ ， $P_{dc,i} = P_E / \eta$ ， η 为充放电效率； $p_s(j)$ 和 $p_c(j)$ 分别为售电电价和基础电价， $p(j)$ 为二者的差值； $S_{FH,i,j}$ 表示非合作时第 i 辆 EV 在第 j 个时间段内的充放电状态，其表达式为

$$S_{FH,i,j} = \begin{cases} 1 & \text{充电状态} \\ -1 & \text{放电状态} \\ 0 & \text{其余状态} \end{cases} \quad (4)$$

EV 充电需求量越大，代理商从电网购电越多，尤其用电高峰期时，电价提高会增加代理商的购电成本。EV 代理商的收益主要由售电电价和基础电价的电价差以及安排 EV 充放电的策略决定；而 EV 用户的收益主要由售电电价、EV 的接入和离开电网时段以及 EV 的充放电需求决定。因此在减小峰谷差和满足用户需求的前提下，代理商以提升其收益为目的，相应地制定一天各个时段各辆 EV 的充放电计划安排。用户不参与代理商的决策过程，被动地接受代理商制定的 EV 充放电计划安排，其收益属于依从变量。

2.2 合作条件下的最大收益模型

非合作博弈时，参与者追求自身利益最大化可能会损害博弈整体利益的最优，因此参与者可寻求

合作方式与其他参与者形成利益共同体, 通过最大化联盟收益以及对联盟收益的合理分配来实现个体收益的最大化。在合作博弈模型中, 联盟收益 C 要大于每个成员单独经营时的收益之和。

以 EV 和代理商总收益最大为目标的合作博弈可以表示为

$$\max C = x(F'_1 + F'_2) \quad (5)$$

$$F'_1 = \sum_{j=1}^{24} \sum_{i=1}^N [S_{HL,i,j} p(j) (P_{c,i} + P_{dc,i})] \Delta t \quad (6)$$

$$F'_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{24} [S_{HL,i,j} p_s(j) (P_{c,i} + P_{dc,i})] \Delta t \quad (7)$$

式中: F'_1 和 F'_2 分别为合作博弈下代理商的收益和 EV 用户的收益; $S_{HL,i,j}$ 表示合作博弈下第 i 辆 EV 在第 j 个时间段内的充放电状态, 其表达式与式(4)类似。

2.2 约束条件

(1) EV 的荷电状态约束

$$SOC_{D,i} B_{EV} \leq SOC_{A,i} B_{EV} + \sum_{j=1}^J S_{i,j} P_E \eta \Delta t \leq B_{EV} \quad (8)$$

式中: $SOC_{D,i}$ 、 $SOC_{A,i}$ 分别为第 i 辆 EV 充放电完成离开时荷电状态期望值以及到达充电站的初始荷电状态; B_{EV} 为 EV 的电池容量。

(2) EV 的充放电时段约束

$$J_{A,i} = \left\lfloor \frac{T_{A,i}}{\Delta t} \right\rfloor, \quad J_{D,i} = \left\lfloor \frac{T_{D,i}}{\Delta t} \right\rfloor \quad (9)$$

式中: $T_{A,i}$ 和 $T_{D,i}$ 分别为第 i 辆 EV 到达和离开充电站的时刻; $J_{A,i}$ 和 $J_{D,i}$ 分别表示第 i 辆 EV 接入和离开电网的时段。充电站对 EV 进行充放电必须在 EV 接入电网与离开电网时段内。

(3) EV 的充放电功率约束

$$0 \leq P_{c,i} \leq P_{c,max} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{dc,i} \leq P_{dc,max} \quad (11)$$

式中, $P_{c,max}$ 、 $P_{dc,max}$ 分别表示充、放电功率的上限。

(4) EV 的充放电互斥约束

$$P_{c,i} \times P_{dc,i} = 0 \quad (12)$$

(5) 电价约束^[13]

$$0.4 \leq p_c(j) \leq p_s(i, j) \leq 2 \quad (13)$$

(6) 负荷峰谷差约束

$$L_{max} - L_{min} < \Delta L \quad (14)$$

式中: L 表示包括基础负荷和 EV 负荷在内的总负荷; ΔL 表示基础负荷的峰谷差。

2.3 合作联盟收益分配

合作博弈的关键是公平合理地分配博弈联盟收益或补偿损失, 使每位参与者均有意愿继续参与合作^[25]。Dermot Gately 提出用 DP(Disruption Propensity)

指标^[26]定量描述分配策略对每个参与者的吸引力。王莹莹等^[27]提出了改进的 DP 指标 MDP。用 $D(n)$ 表示 MDP 指标, 表达式为

$$D(n) = \frac{1}{z-1} \frac{\sum_{m \in \{Z \setminus n\}} x(m) - v(Z \setminus n)}{x(n) - v(n)} \quad (15)$$

式中: Z 表示所有参与者的集合; z 表示参与者数量; $Z \setminus n$ 表示除参与者 n 以外的参与者集合; $x(n)$ 表示合作模式下参与者 n 的收益; $v(n)$ 表示非合作模式下参与者 n 的收益; $v(Z \setminus n)$ 表示非合作模式下去掉参与者 n 的所有参与者总收益; $D(n)$ 表示参与者 n 拒绝合作时其他参与者的人均损失与参与者的损失之比。

由式(15)可知, $D(n)$ 可以更直观地定量描述合作对每一个参与者的吸引力。由于等 MDP 分配表示分配策略对每个参与者吸引力相等, 确保了合作的稳定。将等 MDP 分配应用于分配代理商和用户收益, 可得分配公式(16), 经简化得式(17)。

$$D(F_1) = D(F_2) \quad (16)$$

$$x(F_1) - v(F_1) = x(F_2) - v(F_2) \quad (17)$$

$$x(F_1) + x(F_2) = C \quad (18)$$

式中, $v(F_1)$ 和 $v(F_2)$ 分别通过式(1)和式(2)求得。结合式(17)和式(18)即可求得合作模式下各参与者的收益。

3 算例分析

3.1 情景及参数设置

EV 代理商分时电价及各变量参数值如表 1^[28]、表 2^[13]所示。设置 4 种场景作对比。

表 1 EV 代理商分时电价

时段	基础电价/(元/kW h)	售电电价/(元/kW h)
00:00—08:00	0.365	0.4
08:00—12:00	0.869	2.0
12:00—15:00	0.687	1.2
15:00—17:00	0.687	2.0
17:00—21:00	0.869	2.0
21:00—24:00	0.687	1.2

表 2 各变量设定值

变量名	具体值
B_{EV}	33 kW h
P_E	3 kW
η	0.95
E_{d100}	15 kW h
SOC_e	95%

情景 1: 采用本文所提策略, 考虑合作博弈, 以代理商和用户收益最大为目标, 并基于改进的 PSO 求解得到优化后的分时电价, EV 数量 $N=150$ 。

情景 2: 与情景 1 不同的是, 采用的电价为表 1 所示的固定分时电价。

情景 3: 与情景 1 不同的是, 采用的电价为表 1 所示的固定分时电价, 且不考虑合作博弈, 仅以代理商收益最大为目标。

情景 4: 与情景 1 不同的是, EV 数量 $N=300$ 。

EV 无序充放电时, 不存在代理商, 配电网的售电电价固定为 0.88 元/kW h, EV 的充电电价为 1.6 元/kW h。

3.2 仿真结果

各情景下的负荷曲线和售电电价分别如图 2 和图 3 所示。

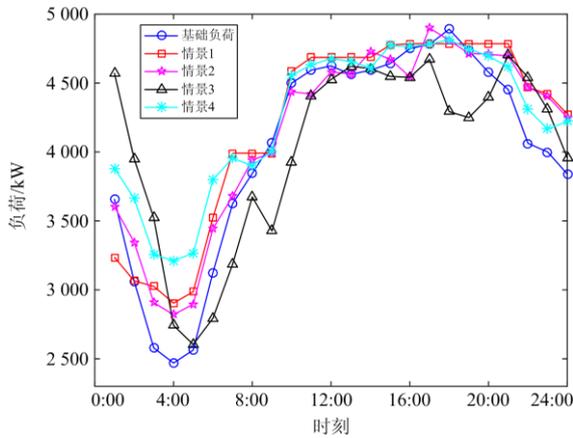


图 2 各情景下的负荷曲线

Fig. 2 Load curves for each scenario

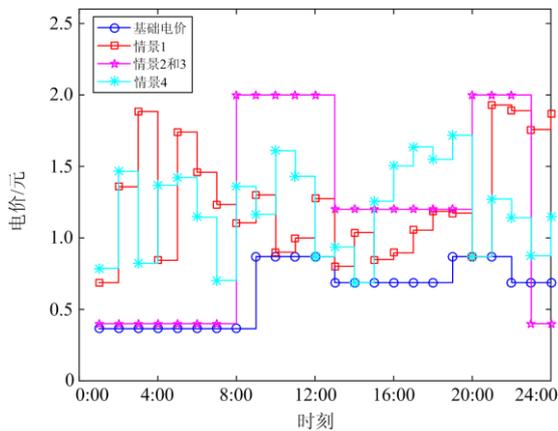


图 3 各情景下的售电电价

Fig. 3 Electricity price for each scenario

由图 2 可知, 情景 1 和情景 4 的填谷效果非常明显, 变化趋势类似。在 09:00—21:00 时段内, 基

础电价最大, 代理商的售电收益较小。参照汽车的行为趋势可知, 在 09:00—16:00 时段内 EV 接入少离开多, 在 16:00—21:00 时段内接入的 EV 荷电状态低, 放电能力弱, 不能产生较大收益, 因此在 09:00—21:00 时段内充放电负荷曲线趋于平滑。情景 2 的填谷效果也比较明显, 但在 10:00—18:00 时段内负荷波动较大, 这是由于该时段内固定分时电价变动较大、EV 的流动性较强, 特别在 16:00—18:00 时段, 接入的 EV 数量较多且代理商向用户的售电电价较低, 会出现多数用户选择这一时段对 EV 进行充电, 因此会出现一个小的负荷尖峰。情景 3 的负荷曲线在 0:00—8:00 时段产生了新的负荷尖峰, 这是由于该时段的购电价格最低且电网负荷处于谷时期, 因此为实现收益最大, 代理商安排大量的 EV 集中充电。在 08:00—12:00 时段和 17:00—21:00 时段内, 大量 EV 进行放电产生明显的削峰效果, 因为此时段购电价格和售电价格差价最大。

由图 3 可知, 相比于固定分时电价, 动态分时电价更加灵活, 且随着 EV 数量的增加分时电价的变化幅度逐渐变小, 趋于平稳。

表 3 为各种情景下的峰谷数据, 表 4 为包括运用等 MDP 原则分配收益前后的收益数据。其中, 峰谷差率为峰谷差与最高负荷的比率, 表达式为

$$\text{峰谷差率} = \frac{\text{负荷峰值} - \text{负荷谷值}}{\text{负荷峰值}} \quad (19)$$

表 3 各种情景下峰谷差值

Table 3 Peak-valley difference under various scenarios			
情景设置	负荷谷值/kW	负荷峰值/kW	峰谷差率/%
基础负荷	2 469	4 891	49.5
情景 1	2 904	4 786	39.3
情景 2	2 820	4 905	42.5
情景 3	2 600	4 712	44.8
情景 4	3 213	4 815	33.3

表 4 各种情景下代理商和用户的收益

Table 4 Revenue of agents and users in various scenarios					
情景	代理商平均收益/(元/辆)		EV 用户平均收益/(元/辆)		合作联盟平均收益/(元/辆)
	分配前	分配后	分配前	分配后	
无序充放电	—	—	—	-5.19	—
情景 1	19.57	15.04	3.83	8.36	23.40
情景 2	18.96	14.93	3.52	7.55	22.48
情景 3	—	11.62	—	0.94	—
情景 4	20.22	16.12	4.87	8.97	25.09

由表 3 可知, 4 种情景的峰谷差率均有所下降, 而本文策略效果最明显。由表 4 可知, EV 在无序

充电的情况下没有收益, 只产生用户充电费用, 而本文所提策略收益最大。且对比分配前后的收益数据可以发现, 在利用等 MDP 原则分配收益后, 代理商的收益有所下降, 而用户的收益明显上升, 这是由于代理商在制定 EV 的充放电计划时, 牺牲了用户的部分收益来使合作联盟收益达到最大, 利用等 MDP 原则可以通过均摊损失, 公平地将合作收益分摊给用户与代理商, 从而提高用户的积极性, 促进用户与代理商达成合作关系。

为了更加清晰直观地凸显本文所提模型的优越性, 后文对各种情景进行了两两对比, 分别从电价模式、合作博弈模式及参与调度的 EV 数量变化三个角度进行了细致的分析。

(1) 情景 1 与情景 2 对比

两种情景下各方收益及负荷峰谷差率如表 5 所示。

表 5 情景 1、2 的收益与峰谷差

Table 5 Revenue and peak valley difference of scenarios 1 and 2

情景	代理商平均 收益/(元/辆)	EV 用户平均 收益/(元/辆)	合作联盟平均 收益/(元/辆)	峰谷 差率/%
情景 1	15.04	8.36	23.40	39.3
情景 2	14.93	7.55	22.48	42.5

由图 2 可知, 情景 1 的负荷曲线比情景 2 更平滑, 避免了新的负荷尖峰。由表 5 可知, 情景 1 中代理商、EV 用户、合作联盟的平均收益均大于情景 2, 且情景 1 的负荷峰谷差率比情景 2 低 3.19%。这说明其他条件一致时, 动态分时电价比固定模式更能有效地平抑负荷波动并提高代理商和 EV 用户的收益。

(2) 情景 2 与情景 3 对比

两情景下各方收益及负荷峰谷差率如表 6 所示。

表 6 情景 2、3 收益与峰谷差

Table 6 Revenue and peak valley difference of scenarios 2 and 3

情景	代理商平均收 益/(元/辆)	EV 用户平均 收益/(元/辆)	合作联盟平均 收益/(元/辆)	峰谷 差率/%
情景 2	13.93	7.55	21.48	42.5
情景 3	11.62	0.94	—	44.8

由图 2 可知, 情景 2 比情景 3 的填谷效果更加明显。由表 6 可知, 情景 2 中代理商的平均收益和 EV 用户的平均收益都远大于情景 3, 且情景 2 的负荷峰谷差率比情景 3 低 2.3%。说明在其他条件一致的情况下, 采用合作博弈能有效地平抑负荷波动, 降低负荷峰谷差值改善负荷曲线, 并提高代理商和 EV 用户的收益, 尤其是 EV 用户的收益, 进而大幅度提高 EV 用户的积极性和参与度。

(3) 情景 1 与情景 4 对比

两情景下各方收益及负荷峰谷差率如表 7 所示。

表 7 情景 1、4 收益与峰谷差

Table 7 Revenue and peak valley difference of scenarios 1 and 4

情景	代理商平均 收益/(元/辆)	EV 用户平均 收益/(元/辆)	合作联盟平均 收益/(元/辆)	峰谷 差率/%
情景 1	15.04	8.36	23.40	39.3
情景 4	16.12	8.97	25.09	33.3

由图 2 可知, 情景 4 明显比情景 1 的填谷效果更好; 由表 7 可知, 情景 4 中代理商和 EV 用户的收益均大于情景 1, 且情景 4 的负荷峰谷差率比情景 1 低 6.0%。由此说明 EV 数量的增加能够进一步改善负荷曲线, 降低峰谷差, 提高经济性, 增加合作联盟的稳定性。

综上所述, 情景 1 与情景 2 的对比主要说明了本文所提的动态电价模式能有效地改善负荷曲线; 情景 2 与情景 3 的对比主要体现了本文所提的合作博弈模型在提高参与方收益上的优越性; 情景 1 和情景 4 的对比主要表明了随着参与电动汽车数量的增多, 本文所提策略的优化效果更明显。

4 总结

本文针对 EV 有序充放电优化问题, 以代理商与用户间的动态分时交易电价及 EV 的充放电时段为决策变量, 基于合作博弈建立了以代理商和 EV 用户收益最大为目标的 EV 优化调度模型, 利用等 MDP 原则对双方收益进行公平合理的分配。仿真结果表明, 在合作博弈模型中 EV 代理商和 EV 用户实现了利益双赢, 且通过合理地制定动态分时交易电价可以引导 EV 有序充放电, 对系统负荷起到“填谷”的作用, 并很好地平抑了电网负荷波动, 在一定程度上减小了电网供电压力。由此可见, 本文所提策略能够很好地促进 EV 与电网的良性互动。

参考文献

- [1] JIAN L, XUE H, XU G, et al. Regulated charging of plug-in hybrid electric vehicles for minimizing load variance in household smart microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3218-3226.
- [2] 曾琦, 韩谷静, 张宏, 等. EV 及其充电设施的发展模式[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(10): 1-10.
ZENG Qi, HAN Gujing, ZHANG Hong, et al. Development mode of EV and its charging facilities[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(10): 1-10.
- [3] 王汉华, 陈永进. 电动汽车充电设施接入配电网的最

- 优布点规划[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 72-78.
WANG Hanhua, CHEN Yongjin. Optimal stationing planning for electric vehicle charging facilities accessing to distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 72-78.
- [4] 殷自力, 郑佩祥, 陈宇星, 等. 含电动汽车和分布式电源的配电网的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 77-83.
YIN Zili, ZHENG Peixiang, CHEN Yuxing, et al. Reliability evaluation of distribution network including electric vehicle and distributed power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 77-83.
- [5] HAFIZ F, DE QUIEROZ A R, HUSAIN I, et al. Charge scheduling of a plug-in electric vehicle considering load demand uncertainty based on multi-stage stochastic optimization[C] // North American Power Symposium, September 17-19, 2017, Morgantown, WV, USA: 1-6.
- [6] 肖浩, 裴玮, 孔力. 含大规模 EV 接入的主动配电网多目标优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 2): 179-189.
XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li. Multi objective optimal scheduling method for active distribution network with large scale EV access[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 179-189.
- [7] 马益平. 考虑 EV 调度的微电网混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 98-107.
MA Yiping. Optimal configuration of hybrid energy storage capacity of microgrid considering EV scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 98-107.
- [8] 崔金栋, 罗文达, 周念成. 基于多视角的电动汽车有序充放电定价模型与策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4438-4450, 4644.
CUI Jindong, LUO Wenda, ZHOU Niancheng. Research on pricing model and strategy of orderly charging and discharging of electric vehicle based on multi perspective[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4438-4450, 4644.
- [9] 雒浪, 吴杰康, 杨秀菊, 等. 新能源环境下配电网无功电压协调优化[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 54-60.
LUO Lang, WU Jiekang, YANG Xiuju, et al. Coordination and optimization for reactive power voltage of power distribution network under new energy environment[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 54-60.
- [10] 王博, 艾欣. 考虑 V2G 用户响应度的峰谷电价时段优化有序充电[J]. 现代电力, 2016, 33(2): 39-44.
WANG Bo, AI Xin. Optimal and orderly charging during peak and valley price periods considering the responsiveness of V2G users[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(2): 39-44.
- [11] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的 EV 有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Li, et al. Design of EV orderly charging control strategy based on TOU price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [12] 魏大钧, 张承慧, 孙波, 等. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2972-2977.
WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Multi-objective optimal charge-discharge dispatching of electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2972-2977.
- [13] 程杉, 王贤宁, 冯毅焜. 电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 39-46.
CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen. Decentralized optimization of orderly charging schedule for electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 39-46.
- [14] 严俊, 严凤. 峰谷分时电价背景下的居民 EV 有序充放电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 127-134.
YAN Jun, YAN Feng. Orderly charging and discharging strategy of residential EV under the background of peak valley TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 127-134.
- [15] 潘振宁, 张孝顺, 余涛, 等. 大规模电动汽车集群分层实时优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 96-104.
PAN Zhenning, ZHANG Xiaoshun, YU Tao, et al. Hierarchical real-time optimal scheduling of large scale electric vehicle clusters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 96-104.
- [16] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3638-3646.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Orderly charging strategy of electric vehicle charging station based on dynamic TOU price[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3638-3646.
- [17] 张西竹, 刘洵源, 杨文涛, 等. 动态分时电价机制下的电动汽车分层调度策略[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 73-80.
ZHANG Xizhu, LIU Xunyu, YANG Wentao, et al.

- Hierarchical scheduling strategy of electric vehicles based on dynamic time-sharing pricing mechanism[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 73-80.
- [18] 杨晓东, 张有兵, 翁国庆, 等. 基于虚拟电价的电动汽车充放电优化调度及其实现机制研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 52-62.
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, WENG Guoqing, et al. Research on the optimal scheduling of electric vehicle charging and discharging based on virtual electricity price and its implementation mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 52-62.
- [19] 杨健维, 黄宇, 王湘, 等. 基于动态概率潮流的住宅区电动汽车代理商定价策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5822-5830, 6025.
YANG Jianwei, HUANG Yu, WANG Xiang, et al. Pricing strategy of electric vehicle agent in residential area based on dynamic probability trend[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5822-5830, 6025.
- [20] 孙波, 王振兴, 孙佳佳. 电动汽车峰谷分时充放电电价同步优化模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 130-136.
SUN Bo, WANG Zhenxing, SUN Jiajia. Research on synchronous optimization model of peak and valley time-shared charge and discharge prices of electric vehicles[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 130-136.
- [21] 周明, 殷毓灿, 黄越辉, 等. 考虑用户响应的动态尖峰电价及其博弈求解方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3348-3354.
ZHOU Ming, YIN Yucan, HUANG Yuehui, et al. Dynamic peak electricity price considering user response and its game solving method[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3348-3354.
- [22] 牛淑娅, 曾博, 刘文霞, 等. 基于合作博弈的电动汽车换电站优化配置[J]. 南方电网技术, 2016, 10(12): 53-60.
NIU Shuya, ZENG Bo, LIU Wenxia, et al. Optimized configuration of electric vehicle replacement station based on cooperative game[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(12): 53-60.
- [23] 魏韡, 陈玥, 刘锋, 等. 基于主从博弈的智能小区代理商定价策略及电动汽车充电管理[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 939-945.
WEI Wei, CHEN Yue, LIU Feng, et al. Pricing strategy of smart community agents and electric vehicle charging management based on master-slave game[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 939-945.
- [24] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 12-21.
CHENG Shan, WU Siyuan, SUN Weibin. Planning of electric vehicle charging stations considering voltage stability and quality of charge service[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 12-21.
- [25] 付亦殊, 陈红坤, 姜欣, 等. 促进大规模风电消纳的双层调峰补偿机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 51-57.
FU Yishu, CHEN Hongkun, JIANG Xin, et al. Study on two-layer peak modulation compensation mechanism to promote large-scale wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 51-57.
- [26] GATELY D. Sharing the gains from regional cooperation: a game theoretic application to planning investment in electric power[J]. International Economic Review, 1974, 15(1): 195-208.
- [27] 王莹莹, 梅生伟, 刘锋. 混合电力系统合作博弈规划的分配策略研究[J]. 系统科学与数学, 2012, 32(4): 418-428.
WANG Yingying, MEI Shengwei, LIU Feng. Study on distribution strategy of cooperative game planning for hybrid electric power system[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2012, 32(4): 418-428.
- [28] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 64-70.

收稿日期: 2019-12-26; 修回日期: 2020-01-19

作者简介:

程 杉(1981—), 男, 通信作者, 工学博士, 副教授、博士生导师, 研究方向为新能源微电网运行优化与控制、电动汽车充换电设施与可再生能源集成、智能计算及其在电力系统中的应用等; E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

陈梓铭(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多微电网能量管理; E-mail: 779592333@qq.com

徐康仪(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为大规模电动汽车集群优化调度。E-mail: 1345951520@qq.com

(编辑 魏小丽)