

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.04.003

# 考虑用户充电决策行为的电动汽车充电引导策略

范宏<sup>1</sup>, 李嘉晖<sup>1,2</sup>, 郭琦<sup>3</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网江苏省电力有限公司靖江市供电公司, 江苏 泰州 214500; 3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

**摘要:**快充站(fast charging station, FCS)是电动汽车(electric vehicle, EV)的重要能源供给设施。随着EV的推广应用,快充负荷也逐渐攀升,对配电网运行产生了一定影响。然而,快充负荷作为一种需求侧响应资源,可通过有序充电控制缓解EV接入给配电网运行带来的负面影响,因此文中提出考虑用户充电决策行为的EV充电引导策略。首先,考虑动态交通路况影响,利用出行链理论构建EV移动模型,进行用户出行模拟,并刻画剩余电量的时空分布。其次,考虑剩余电量、充电设施分布与充电服务价格,利用后悔理论构建用户充电决策模型,并刻画充电负荷时空分布。然后,以配电网网损最小为目标,构建充电服务价格优化模型,通过优化公共FCS的充电服务价格,引导充电负荷时空分布。最后,对不同服务价格方案进行对比,结果表明,文中方法对小容量车型的引导效果更好,且用户时间消耗等效折算系数越大,文中方法对充电负荷引导的效果越好。

**关键词:**电动汽车(EV)移动模型;充电负荷;动态交通路况;充电决策行为;充电服务价格;充电引导策略

**中图分类号:** TM72; U469.72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)04-0023-08

## 0 引言

石油资源短缺和环境污染问题日渐突出,电动汽车(electric vehicle, EV)因具有低碳环保、舒适安静等显著优势,对社会经济可持续发展具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。公共快充站(fast charging station, FCS)是EV的主要能源供给设施<sup>[5-7]</sup>,随着EV的推广应用, FCS也得到快速建设与发展。截至2022年底,我国EV保有量为1 045万辆<sup>[8]</sup>,充电基础设施累计数量为521万台<sup>[9]</sup>,随之而来的充电负荷也快速攀升,易造成配电网局部过载以及低电压等问题<sup>[10]</sup>。而充电负荷作为一种灵活的需求侧响应资源,可直接或间接对其充电过程进行有序控制,即控制、引导充电负荷的时空分布,缓解EV接入给配电网运行带来的冲击与不良影响,进一步提升配电网可容纳的充电负荷。

针对电力交通的融合交互,国内外学者在充电引导方面开展了探索与分析,其中文献[11-14]通过分析电力与交通之间的交互,构建充电引导框架,实现对用户充电行为的引导,文献[11-14]考虑的主体行为略有差异。文献[11]考虑交通和配电网的运行情况,假设用户在充电导航下选择总时间最小的FCS进行充电,进而分析充电负荷分布情况;文献[12]构建基于“车-网-路-站”的有序充电导航系统,考虑多方诉求,构建“车-网-路-站”多目标引导

优化模型,实现充电策略综合最优;文献[13]考虑电网运行和实时交通信息,提出EV快速充电导航优化策略,以用户出行时间和充电费用的综合成本最小为目标;文献[14]在路-电耦合网络下构建交通流-能量流-信息流的交互框架,提出路径规划与交通网信息更新同周期的动态导航。上述研究主要侧重多方主体交互的充电引导,分析多方信息融合下的用户充电行为,但未精细刻画交通出行过程对充电行为的影响,影响充电引导过程的精确性。

充电价格是影响用户充电行为的另一重要因素。在采用价格激励引导EV充电行为方面,国内外学者开展了充电价格制定方面的研究,间接灵活控制、引导负荷分布。文献[15-19]通过制定充电电价,引导调整用户充电计划,以价格激励实现有序充电控制,但侧重略有不同。其中文献[15]设计削峰填谷定价机制,引导充电负荷合理分布;文献[16]基于边际成本制定随机出行行为模型,以车辆充电成本优化模型和基于代理的市场均衡模型确定电价,进而抑制负荷峰值;文献[17]讨论不同主体利益最大和多方共赢下的定价模型优缺点,提出多目标充电定价优化模型;文献[18]提出以方差评估调峰水平以及考虑用户充电等待时间的博弈模型,进而优化EV充电行为;文献[19]提出将虚拟电厂作为售电运营商的主从博弈模型,通过制定合理的售电价格引导EV有序充电。上述研究主要利用价格激励间接控制、引导充电负荷在时间上的分布,未考虑交通网络、充电设施分布在空间上的

收稿日期:2023-01-31;修回日期:2023-04-24

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFA1004600)

差异。

在考虑充电负荷时空灵活性的定价方面,国内外学者也开展了相关研究。文献[20]通过制定拥塞水平、节点电压偏差和能量损失率作为节点指标,优化节点电价和道路交通拥堵价格,并从空间和时间上转移负荷;文献[21]通过考虑用户与FCS之间的博弈,优化FCS的充电价格,使得FCS之间的服务率达到平衡;文献[22]针对充电决策行为路径规划,利用图论中的扩展图模型描述,考虑电网和交通运营商等作为单独个体,以社会运行最优为目标,制定时空充电价格。上述研究针对引导充电负荷时空分布进行了初步探讨,而针对多主体行为也已有相关文献开展研究。文献[23]利用动态路网模型和主从博弈模型,以“车-路-网”3个主体的利益最大为目标,提出多目标充电负荷时空优化调度;文献[24]面向“代客加电”场景,主要考虑用户、司机以及充电网运营商的利益,提出多目标优化的充电引导策略。但上述研究对于用户决策行为的刻画较为理想,未精细化考虑不同用户对于充电决策方案的反应程度和权衡过程,影响充电时空分布的评估精度。

为解决上述问题,文中建立EV出行链移动模型,分析EV出行剩余电量时空分布。进而综合考虑剩余电量、充电设施分布、充电电价等因素,提出基于后悔理论的充电决策模型,分析不同因素对充电负荷时空分布的影响。最终建立以配电网经济运行目标的充电价格优化模型,实现最优充电价格的制定。

## 1 考虑用户充电决策行为的EV充电引导策略模型

### 1.1 EV充电引导策略框架

考虑用户在不同FCS的选择、剩余电量以及充电服务价格等对充电决策行为的影响,文中所提EV充电引导策略框架如图1所示。该策略主要包括EV移动模型、用户充电决策模型和充电服务价格优化模型。其中,EV移动模型利用出行链刻画用户的出行需求,并考虑动态交通路况获取充电需求的时空分布。在此基础上,利用后悔理论,构建用户充电决策模型,在剩余电量支撑下,确定用户选择的FCS。进而建立充电服务价格优化模型,通过分析用户充电决策行为,确定充电负荷分布,以配电网网损最小为目标,优化FCS的充电服务价格,引导用户的充电行为,改变充电负荷空间分布,提升配电网运行经济性。

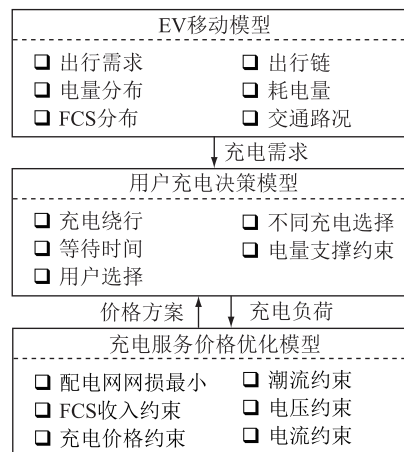


图1 EV充电引导策略框架

Fig.1 EV charging guidance strategy framework

### 1.2 EV移动仿真模型

针对EV充电负荷时空分布特点,建立EV移动模型,确定EV剩余电量的时空分布。首先,采用出行链法描述EV一天的出行需求,文中出行需求为每个活动的类型、地点和出发时间。然后,根据出行需求和历史交通状况,利用Dijkstra最短路径算法规划出行时间最少的行车路径。第 $q$ 辆EV的出行链如图2所示。

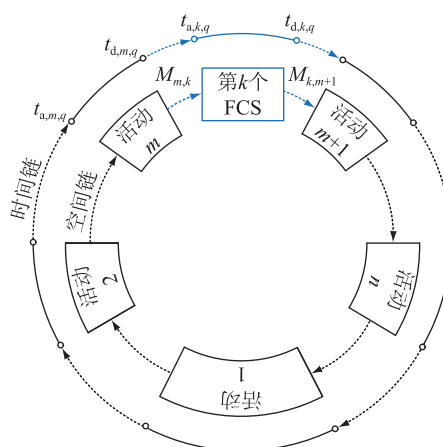


图2 第 $q$ 辆EV的出行链

Fig.2 Trip chain of the  $q$ -th EV

图2中,活动1、2、...、 $m-1$ 、 $m$ 、 $m+1$ 、...、 $n-1$ 、 $n$ 为用户每次出行的活动地点; $t_{a,m,q}$ 、 $t_{d,m,q}$ 分别为第 $q$ 辆EV到达和离开活动地点 $m$ 的时间; $t_{a,k,q}$ 、 $t_{d,k,q}$ 分别为第 $q$ 辆EV到达和离开第 $k$ 个FCS的时间; $M_{m,k}$ 为活动地点 $m$ 到第 $k$ 个FCS路径中设置的路段集合; $M_{k,m+1}$ 为第 $k$ 个FCS到活动地点 $m+1$ 路径中设置的路段集合; $M_{m,m+1}$ 为活动地点 $m$ 到活动地点 $m+1$ 路径中设置的路段集合。

利用上述模型,可考虑在活动地点慢充,在FCS快充。在离开活动地点 $m$ 时,如果第 $q$ 辆EV的荷

电状态(state of charge, SOC)不能满足未来到达活动地点  $m+1$  的路径规划需求,则第  $q$  辆 EV 将放弃原规划路径,绕行至第  $k$  个 FCS,如图 2 中蓝线所示。文中所述用户充电决策行为可选择出最优 FCS 以及到达该 FCS 的最优绕行路径。

根据出行需求、行车路径和交通状况,第  $q$  辆 EV 到达活动地点  $m$  的时间为:

$$t_{a,m,q} = t_{d,m-1,q} + \sum_{(i,j) \in M_{m-1,m}} t_{r,i,j} \quad (1)$$

式中:  $t_{d,m-1,q}$  为第  $q$  辆 EV 离开活动地点  $m-1$  的时间;  $M_{m-1,m}$  为活动地点  $m-1$  到活动地点  $m$  路径中设置的路段集合;  $t_{r,i,j}$  为节点  $i$  到节点  $j$  路段的行程时间。

$$t_{r,i,j} = d_{i,j}/v_{i,j} \quad (2)$$

式中:  $d_{i,j}$  为节点  $i$  到节点  $j$  的距离,可由 Dijkstra 算法确定;  $v_{i,j}$  为 EV 在节点  $i$  到节点  $j$  路段的平均通行速度,具体表达见式(3)。

$$\begin{cases} v_{i,j} = v_{i,j}^{\max} / \left[ 1 + \left( \frac{Q_{i,j}}{C_{i,j}} \right)^w \right] \\ w = a + b \left( \frac{Q_{i,j}}{C_{i,j}} \right)^\gamma \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $v_{i,j}^{\max}$  为节点  $i$  到节点  $j$  路段的通行速度最大值;  $Q_{i,j}$  为节点  $i$  到节点  $j$  路段的车流量;  $C_{i,j}$  为节点  $i$  到节点  $j$  路段的道路通行能力;  $a$ 、 $b$ 、 $\gamma$  为道路等级自适应系数。

确定第  $q$  辆 EV 到达活动地点  $m$  的剩余电量为:

$$E_{A,m,q} = E_{F,m-1,q} - \sum_{(i,j) \in M_{m-1,m}} E_c d_{i,j} \quad (4)$$

式中:  $E_{F,m-1,q}$  为第  $q$  辆 EV 离开活动地点  $m-1$  的剩余电量;  $E_c$  为 EV 行驶每千米的耗电量。

EV 起始充电时间是影响充电负荷时空分布的关键因素,而 EV 起始充电时间受用户出行需求的影响。据统计,用户出行分布具有早、晚高峰等多峰分布,而正态分布无法准确描述多峰现象。因此,文中假设第  $q$  辆 EV 离开活动地点 1 的时间  $t_{d,1,q}$  服从高斯混合模型分布,具体概率分布函数  $p(t_{d,1,q} | \Theta)$  为:

$$p(t_{d,1,q} | \Theta) = \sum_{\vartheta=1}^J x_{\vartheta} N_{\vartheta}(t_{d,1,q}; \mu_{\vartheta}, D_{\vartheta}) \quad (5)$$

$$N_{\vartheta}(t_{d,1,q}; \mu_{\vartheta}, D_{\vartheta}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{\vartheta}}} \times \exp\left(-\frac{(t_{d,1,q} - \mu_{\vartheta})^2}{2D_{\vartheta}}\right) \quad (6)$$

式中:  $N_{\vartheta}(t_{d,1,q}; \mu_{\vartheta}, D_{\vartheta})$  为第  $\vartheta$  个高斯分量函数,  $\mu_{\vartheta}$  为平均值,  $D_{\vartheta}$  为方差;  $J$  为高斯分量的个数;  $x_{\vartheta}$  为第  $\vartheta$  个高斯分量的权重;  $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{\vartheta}, \dots, \theta_J\}$  为

元素集合。

EV 初始 SOC 概率密度函数  $P_d(E_0; \varphi, D)$  为:

$$P_d(E_0; \varphi, D) = \frac{\tau}{d_R(1 - E_0) \sqrt{2\pi D}} \times \exp\left(-\frac{(\ln(1 - E_0) - (\varphi - \ln(d_R/\tau)))^2}{2D}\right) \quad (7)$$

式中:  $E_0$  为 EV 的初始 SOC;  $\varphi$  为日行驶里程值;  $D$  为概率密度函数方差;  $\tau$  为 EV 充电后可行驶天数;  $d_R$  为 EV 续航里程。

### 1.3 用户充电决策模型

该模型首先考虑充电绕行,并计算出行消耗总时间;然后针对站内等待时间,利用双队列集合,枚举确定用户等待时间;最后利用后悔理论,在给定价格方案下,结合充电费用和消耗时间,考虑用户充电行为的主观判断与决策,确定 EV 选择充电的 FCS,进而确定充电负荷分布。

#### 1.3.1 充电绕行

在行驶过程中若电池电量无法支撑 EV 到达目的地,用户会选择途中充电。例如,当第  $q$  辆 EV 的电量无法支撑其从第  $i-1$  个目的地到第  $i$  个目的地, EV 需要绕行到第  $k$  个 FCS 进行充电,则第  $q$  辆 EV 的此次出行将包括 2 个行程。一是从第  $i-1$  个停留地行驶到第  $k$  个 FCS,即图 3 中的行程  $F_1$ ;二是从第  $k$  个 FCS 行驶到第  $i$  个停留地,即图 3 中的行程  $F_2$ 。图 3 中,  $\Delta E_{i-1,k,q}$  为第  $q$  辆 EV 从第  $i-1$  个目的地到第  $k$  个 FCS 的耗电量;  $\Delta E_{k,i,q}$  为第  $q$  辆 EV 从第  $k$  个 FCS 到第  $i$  个目的地的耗电量。

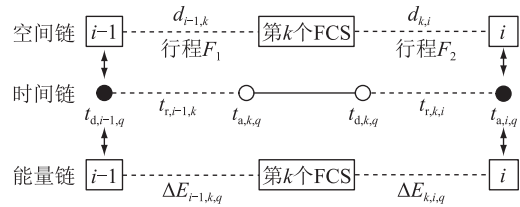


图3 EV 途中充电出行示意

Fig.3 Schematic diagram of EV on-the-way charging travel

#### 1.3.2 等待时间

假设服从先到先服务的规则,第  $q$  辆 EV 在 FCS 的活动情况如图 4 所示。

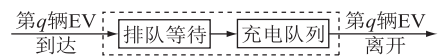


图4 EV 在 FCS 的活动情况

Fig.4 EV activities at FCS

根据 EV 到达时间、FCS 内 EV 数量和充电桩数量,可利用 2 个队列描述站内 EV 用户等待和充电情况。利用集合  $A = \{t_{a,k,q} | q \in [1, N_{FC}]\}$ 、 $B =$

$\{t_{d,k,q} | q \in [1, N_{FC}]\}$  分别表示 EV 到达和离开第  $k$  个 FCS 的时间,其中  $N_{FC}$  为需要充电的 EV 数量。可确定时刻  $t$  第  $k$  个 FCS 的 EV 数量为:

$$n_{ev,k,t} = f_{size}(A,t) - f_{size}(B,t) \quad (8)$$

式中:  $f_{size}(A,t)$ 、 $f_{size}(B,t)$  分别为时刻  $t$  前累计到达和离开的 EV 数量。

以第  $q$  辆 EV 在第  $k$  个 FCS 的具体活动为例。当第  $q$  辆 EV 在时刻  $t_{a,k,q}$  到达第  $k$  个 FCS 时,第  $q$  辆 EV 前面排有  $n_{ev,k,t}$  辆 EV。如果  $n_{ev,k,t}$  小于第  $k$  个 FCS 处的充电桩数量  $C_k$ ,则第  $q$  辆 EV 在第  $k$  个 FCS 的等待时间  $t_{w,k,q}$  等于 0;否则  $t_{w,k,q}$  取式(9)中  $t_w$  的最小值。

$$\begin{cases} \min t_w \\ \text{s.t. } f_{size}(B, t_{a,k,q} + t_w) + C_k > f_{size}(A, t_{a,k,q}) \\ t_{a,k,q} + t_w \in B \end{cases} \quad (9)$$

### 1.3.3 充电决策

受限于自身心理因素和认知水平,用户并非能够选择整体或个体利益效用最大的方案。若用户所选方案效用低于其他备选方案效用,可能会产生后悔状态;反之,则产生欣喜状态。用户习惯通过反复权衡不同方案之间的效用差,倾向选择具有折衷效应的方案。考虑到上述用户行为状态,文中利用后悔理论描述用户的后悔规避状态<sup>[23]</sup>。

将全部备选 FCS 即剩余电量可到达的 FCS 作为方案集。每个备选方案中主要采用时间消耗以及充电费用刻画备选方案效用,如式(10)所示。通过比较全部备选方案的效用,用户将选择综合成本最小的 FCS 完成充电。

$$U_c = \sum_{j_c \neq k_c} \ln(1 + \exp(\xi_1(t_{c,j_c} - t_{c,k_c}))) + \ln(1 + \exp(\xi_2(C_{j_c} - C_{k_c}))) + \sigma_c \quad (10)$$

$$t_{c,k_c} = t_c + t_w + t_r \quad (11)$$

式中:  $U_c$  为考虑充电时间消耗和充电费用的综合成本;  $j_c$ 、 $k_c$  为备选 FCS 的编号;  $\xi_1$ 、 $\xi_2$  分别为决策者对时间消耗和充电费用的等效折算系数;  $t_{c,j_c}$  为 EV 选择第  $j_c$  个 FCS 的时间消耗;  $t_{c,k_c}$  为 EV 选择第  $k_c$  个 FCS 的时间消耗,其由充电时间  $t_c$ 、等待时间  $t_w$  和充电绕行时间  $t_r$  三部分构成;  $C_{j_c}$ 、 $C_{k_c}$  分别为选择第  $j_c$  个、第  $k_c$  个 FCS 的充电费用;  $\sigma_c$  为随机误差。

### 1.4 充电服务价格优化模型

配电网网损  $S_L$  最小的目标函数如式(13)所示,可利用内敛法求解该模型。

$$\min S_L = \sum_{l=1}^{N_{ll}} \sum_{t_1=1}^T s_{l,t_1} \quad (13)$$

式中:  $s_{l,t_1}$  为支路  $l$  在时段  $t_1$  的网损;  $N_{ll}$  为配电网线

路条数;  $T$  为总时段数。

(1) FCS 收入约束。假设优化充电价格之前,所有 FCS 充电价格相同且不变,设为  $p_0$ 。假设所有 FCS 隶属于同一运营商,从而 FCS 收入在优化前后保持不变,即用户充电成本保持不变,具体表示为:

$$\sum_{k=1}^{N_{fcs}} p_k \times \sum_{q \in \Omega(k,p_k)} \Delta F_{k,q} = \sum_{k=1}^{N_{fcs}} p_0 \times \sum_{q \in \Omega(k,p_0)} \Delta F_{k,q} \quad (14)$$

式中:  $N_{fcs}$  为 FCS 的数量;  $p_k$  为第  $k$  个 FCS 调整后的充电价格;  $\Omega(k,p_k)$ 、 $\Omega(k,p_0)$  分别为以充电价格  $p_k$ 、 $p_0$  选择第  $k$  个 FCS 的 EV 用户集合;  $\Delta F_{k,q}$  为第  $q$  辆 EV 在第  $k$  个 FCS 充电的充电量。

(2) 充电服务价格上下限边界约束。

$$p_{\min} \leq p_k \leq p_{\max} \quad (15)$$

式中:  $p_{\max}$ 、 $p_{\min}$  分别为充电服务价格的上、下限。

(3) 电压约束。

$$U_{\min} \leq U_n \leq U_{\max} \quad (16)$$

式中:  $U_n$  为配电网节点  $n$  的电压;  $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  分别为配电网节点的最大、最小电压。

(4) 电流约束。

$$I_{l,\min} \leq I_l \leq I_{l,\max} \quad l \in \Omega_L \quad (17)$$

式中:  $I_l$  为支路  $l$  中的电流;  $I_{l,\max}$ 、 $I_{l,\min}$  分别为支路  $l$  的最大、最小电流;  $\Omega_L$  为支路集合。

(5) 潮流约束。

$$\begin{cases} P_{D,f} + P_f = U_f \sum_{g=1}^{N_D} U_g (G_{f,g} \cos \theta_{f,g} + B_{f,g} \sin \theta_{f,g}) \\ Q_{D,f} + Q_f = U_f \sum_{g=1}^{N_D} U_g (G_{f,g} \sin \theta_{f,g} - B_{f,g} \cos \theta_{f,g}) \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P_{D,f}$ 、 $Q_{D,f}$  分别为无充电负荷接入时,节点  $f$  的有功和无功功率;  $P_f$ 、 $Q_f$  分别为节点  $f$  的充电负荷有功和无功功率;  $N_D$  为配电网节点数;  $U_g$  为配电网节点  $g$  的电压;  $G_{f,g}$ 、 $B_{f,g}$  分别为节点  $f$  和节点  $g$  间线路的电导、电纳;  $\theta_{f,g}$  为节点  $f$  与节点  $g$  处电压的相角差。

## 2 实例分析

### 2.1 算例设置

算例设置 15 个 FCS,分别位于路网中的节点 51—55、61—70,路网结构如图 5 所示,具体参数可参考文献[23]。

算例采用 3 个 IEEE 33 节点配电网,其中位于路网节点 51—55 的充电站分别接入配电网 1 的节点 10、20、24、17、12,位于路网节点 61—65 的充电站分别接入配电网 2 的节点 10、20、24、17、12,位于

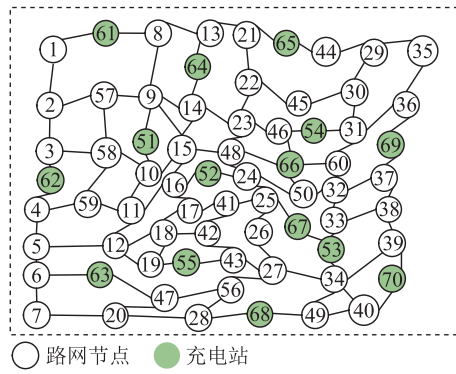


图5 路网结构

Fig.5 Road network structure

路网节点 66—70 的充电站分别接入配电网 3 的节点 10、20、24、17、12。改进后 IEEE 33 节点配电网的负荷线路等信息可参考文献[25]。

假设每个 FCS 的 EV 运营商相同,且充电桩规格相同。位于路网节点 51—55、61—70 的 FCS,站内充电桩数分别为 10、15、20、30、10、20、20、15、25、10、10、12、12、15、15,每个充电桩的充电功率最大值为 90 kW。设置 EV 为 1 200 辆,共设置 4 种车型,各车型的电池额定容量及  $E_c$  见表 1。 $p_{\max} = 2$  元/(kW·h), $p_{\min} = 1$  元/(kW·h);每个站充电服务价格初始值均设为 1.6 元/(kW·h);配电网节点电压的上、下限分别为节点额定电压的 1.1 倍和 0.9 倍; $\xi_1$ 、 $\xi_2$  分别设置为 17 和 1。

表 1 主要 EV 类型

Table 1 Main EV types

EV 类型	比例/%	电池额定容量/(kW·h)	$E_c$ /[(kW·h)·km <sup>-1</sup> ]
车型 1	25	57.0	0.14
车型 2	25	25.6	0.13
车型 3	25	45.3	0.15
车型 4	25	18.0	0.12

参考文献[25],考虑 7 种类型的停留,分别为临时返回家、工作、购物、娱乐、接送某人、就餐和返回家,具体停留时间参考文献[25]。路网中各节点的活动类型如表 2 所示。

表 2 路网节点类型

Table 2 Road network node types

活动类型	节点编号
回家	1, 61, 8, 2, 57, 9, 3, 58, 51, 10, 62, 4, 59, 11, 16, 17, 5, 6, 7, 12, 18, 19, 63, 47, 20, 28, 68, 56
购物/娱乐/就餐	13, 21, 65, 64, 22, 14, 23, 46, 15, 48, 66, 52, 41, 25, 67, 50, 42, 43, 27
工作/接送	44, 29, 35, 45, 30, 54, 31, 36, 60, 69, 32, 37, 38, 33, 53, 34, 49, 40, 70, 39

## 2.2 结果分析

在初始充电服务费下,利用内点法寻找优化解,经 8 次迭代后,网损从优化前的 710.4 kW 减少到 47.5 kW。优化后的充电服务费方案见图 6,其中将位于路网节点 51—55、61—70 的 FCS 编号为 1 号—15 号。13 号—15 号 FCS 充电服务费高于原始价格 1.6 元/(kW·h),而其余 FCS 的充电服务费略低于 1.6 元/(kW·h)。6 号 FCS 与其他相邻 FCS 相比,充电服务费略高。优化前后 FCS 充电负荷差见图 7,在充电服务费引导下,13 号—15 号 FCS 由于充电服务费较高,充电负荷略有所降低。而 6 号 FCS 的充电价格较高,原充电用户将在距离和时间等因素可接受的 FCS 中,选择折衷方案。用户改变充电选择后,充电负荷发生时空转移,6 号 FCS 的充电负荷明显降低,进而引起配电网节点 10 的电压变化见图 8。文中方法通过优化后的充电服务费引导负荷分布,进而改善电压分布,减少配电网总网损。

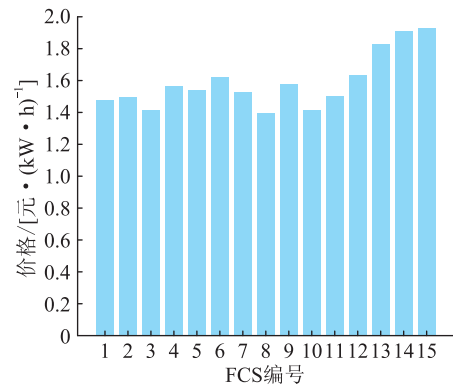


图 6 优化后的充电服务费方案

Fig.6 Optimized charging service fee pricing scheme

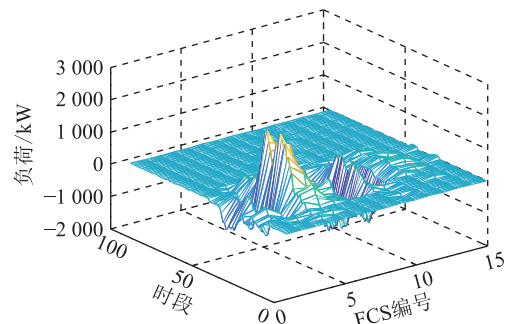


图 7 优化前后 FCS 充电负荷差

Fig.7 FCS charging load difference before and after optimization

## 2.3 对比分析

为分析 EV 总数量与各车型比例对引导结果的影响,文中设置场景 1—场景 4,不同场景的 EV 分布如表 3 所示。场景 1—场景 4 的 EV 总数量分别为 1 200、1 200、1 200、800。

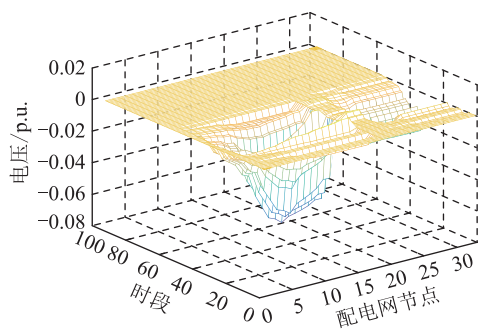


图8 优化前后配电网电压差值

Fig.8 Voltage difference of distribution network before and after optimization

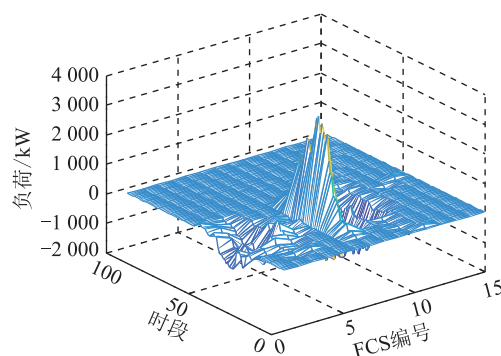
表3 不同场景EV分布

Table 3 EV distribution under different scenarios

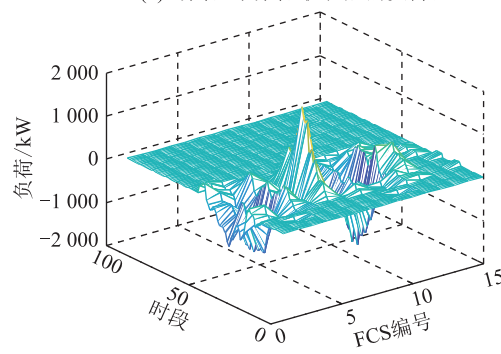
车型	EV 占比/%			
	场景1	场景2	场景3	场景4
1	25	18	32	25
2	25	23	27	25
3	25	27	23	25
4	25	32	18	25

各场景优化后与场景1优化后的负荷差如图9所示。小容量EV车型增加时,各FCS的充电负荷均有所增加,如图9(a)所示。而大容量EV车型增加时,充电负荷变化主要集中在某个FCS,如图9(b)所示。这表示小容量EV车型占比较多时,文中方法更易全局进行充电负荷调整;而大容量EV车型占比较多时,更容易调整某个FCS负荷。由图9(c)可知,场景4与场景1相比,车辆总数减少时,各FCS充电负荷整体有增有减,网损变化不大,可见EV总数对整体调整效果影响不大。

为分析充电决策模型中参数 $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 对引导结果的影响,文中设置场景5—场景7,如表4所示。再结合场景1—场景4,所有场景优化后的总网损如表5所示。对比场景1—场景3的总网损,车型容量整体越小时,利用充电服务费引导的效果越好;对比场景1与场景4的总网损,EV总数量对网损的影响较小。对比场景1与场景5—场景7的总网损,用



(b) 场景3与场景1优化后的负荷差



(c) 场景4与场景1优化后的负荷差

图9 优化后各场景FCS负荷差

Fig.9 FCS load difference of each scene after optimization

户时间消耗等效折算系数越低,引导时充电服务费对用户充电选择的影响越大,越需要降低充电服务费以引导充电负荷。

表4 等效折算系数设置

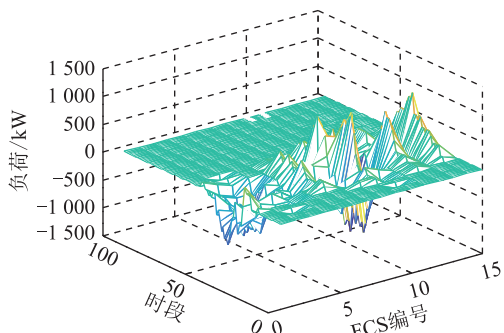
Table 4 Equivalent conversion coefficient setting

场景	$\xi_1$	$\xi_2$
5	16	1
6	15	1
7	14	1

表5 各场景优化后的总网损

Table 5 Total network loss after optimization in each scenario

场景	总网损/kW	场景	总网损/kW
1	47.5	5	50.6
2	52.5	6	53.3
3	46.1	7	56.4
4	47.2		



(a) 场景2与场景1优化后的负荷差

### 3 结语

文中针对城市公共FCS,综合考虑剩余电量、充电设施分布、充电电价等因素,提出基于后悔理论的充电决策模型,以配电网网损最小为目标,优化各FCS的充电服务价格,从而实现用户充电行为引导。通过算例对比分析可知:文中所提方法可有效

改变充电负荷空间分布,且对小容量车型的引导效果更好;FCS可参与电力市场获取额外收益,用较低的充电服务费引导负荷分布。

文中目前主要从用户角度刻画其决策行为,暂未考虑影响EV电量消耗的因素以及其他主体利益,这些将是下一步工作的研究重点。

#### 参考文献:

- [1] 王明深. 面向多应用场景的电动汽车集群控制与日前竞价策略研究[D]. 天津:天津大学,2020.  
WANG Mingshen. Control and day-ahead bidding strategies of electric vehicle aggregator for multiple application scenarios [D]. Tianjin:Tianjin University,2020.
- [2] 贺瑜环,杨秀媛,陈麒宇,等. 电动汽车智能充放电控制与应用综述[J]. 发电技术,2021,42(2):180-192.  
HE Yuhuan,YANG Xiuyuan,CHEN Qiyu,et al. Review of intelligent charging and discharging control and application of electric vehicles [J]. Power Generation Technology, 2021, 42 (2):180-192.
- [3] 李龙,贺瀚青,张钰声,等. 配电网接纳电动汽车充电负荷能力的评估方法[J]. 电网与清洁能源,2022,38(11):107-116.  
LI Long,HE Hanqing,ZHANG Yusheng,et al. Evaluation of electric vehicle charging load capacity of distribution networks [J]. Power System and Clean Energy,2022,38(11):107-116.
- [4] 程杉,赵子凯,陈诺,等. 计及耦合因素的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术,2022,41(3):194-201,208.  
CHENG Shan,ZHAO Zikai,CHEN Nuo,et al. Prediction of temporal and spatial distribution of electric vehicle charging load considering coupling factors [J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(3):194-201,208.
- [5] 李东东,段维伊,林顺富,等. 实时电价条件下基于用户引导的电动汽车-充电桩匹配策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(8):74-82.  
LI Dongdong,DUAN Weiyi,LIN Shunfu,et al. User guidance based matching strategy for electric vehicle-charging pile in condition of real-time electricity price [J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(8):74-82.
- [6] LIU X,FENG T. Energy-storage configuration for EV fast charging stations considering characteristics of charging load and wind-power fluctuation [J]. Global Energy Interconnection, 2021,4(1):48-57.
- [7] 曹一帆,郝思鹏. 基于充电差异性的电动汽车充电设施优化配置[J]. 供用电,2022,39(5):96-103.  
CAO Yifan,HAO Sipeng. Optimal configuration of electric vehicle charging facilities based on charging difference [J]. Distribution & Utilization,2022,39(5):96-103.
- [8] 我国新能源汽车保有量达1 310万辆 呈高速增长态势[EB/OL]. (2023-01-11) [2023-03-29]. [https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content\\_5736281.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736281.htm).  
China's new energy vehicle ownership reached 13.1 million, showing a high-speed growth trend [EB/OL]. (2023-01-11) [2023-03-29]. [https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content\\_5736281.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736281.htm).
- [9] 2022年全国电动汽车充换电基础设施运行情况[EB/OL]. (2023-01-12) [2023-03-29]. [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzUyMzAzMjcwNQ=&mid=2247509293&idx=1&sn=4a1abe8c8ba8461ecf97629230f0847e&chksm=f9c024c3ceb7add5774df1e3bee30b95f417ae7b2b1896c69ef31ed10d86b9e42-9235477bbe4&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUyMzAzMjcwNQ=&mid=2247509293&idx=1&sn=4a1abe8c8ba8461ecf97629230f0847e&chksm=f9c024c3ceb7add5774df1e3bee30b95f417ae7b2b1896c69ef31ed10d86b9e42-9235477bbe4&scene=27).  
Operation of national electric vehicle charging and replacing infrastructure in 2022 [EB/OL]. (2023-01-12) [2023-03-29]. [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzUyMzAzMjcwNQ=&mid=2247509293&idx=1&sn=4a1abe8c8ba8461ecf97629230f0847e&chksm=f9c024c3ceb7add5774df1e3bee30b95f417ae7b2b1896c69ef31ed10d86b9e429235477bbe4&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUyMzAzMjcwNQ=&mid=2247509293&idx=1&sn=4a1abe8c8ba8461ecf97629230f0847e&chksm=f9c024c3ceb7add5774df1e3bee30b95f417ae7b2b1896c69ef31ed10d86b9e429235477bbe4&scene=27).
- [10] WU F Z,YANG J,ZHAN X P,et al. The online charging and discharging scheduling potential of electric vehicles considering the uncertain responses of users [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2021,36(3):1794-1806.
- [11] GUO Q L,XIN S J,SUN H B,et al. Rapid-charging navigation of electric vehicles based on real-time power systems and traffic data [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (4):1969-1979.
- [12] 侯慧,樊浩,苏舒,等. 多方互利共赢的电动汽车智能充电服务策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(19):66-73.  
HOU Hui,FAN Hao,SU Shu,et al. Multilateral win-win strategy for smart charging service of electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(19):66-73.
- [13] MO W Y,YANG C,CHEN X,et al. Optimal charging navigation strategy design for rapid charging electric vehicles [J]. Energies,2019,12(6):962.
- [14] 傅伟馨,朱韦翰,朱俊澎,等. 动态路-电耦合网络下电动出租车快速充电引导及其定价策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(4):9-17.  
FU Zhixin,ZHU Weihuan,ZHU Junpeng,et al. Fast charging guidance and pricing strategy for electric taxis based on dynamic traffic-grid coupling network [J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(4):9-17.
- [15] HU Z C,ZHAN K Q,ZHANG H C,et al. Pricing mechanisms design for guiding electric vehicle charging to fill load valley [J]. Applied Energy,2016,178:155-163.
- [16] DALLINGER D,WIETSCHER M. Grid integration of intermittent renewable energy sources using price-responsive plug-in electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2012,16(5):3370-3382.
- [17] 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 electric vehicle charging and discharging based on multi view [J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(15):4438-4450,4644.
- [18] 马英姿,马兆兴. 基于博弈算法的电动汽车有序充电优化

- 及效益分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 10-16.
- MA Yingzi, MA Zhaoxing. Orderly charging optimization and benefit analysis of electric vehicles based on game algorithm [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 10-16.
- [19] 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.
- [20] TANG D F, WANG P. Nodal impact assessment and alleviation of moving electric vehicle loads: from traffic flow to power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4231-4242.
- [21] BAYRAM I S, MICHAELIDIS G, DEVETSIKIOTIS M. Unsplittable load balancing in a network of charging stations under QoS guarantees[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1292-1302.
- [22] ALIZADEH M, WAI H T, CHOWDHURY M, et al. Optimal pricing to manage electric vehicles in coupled power and transportation networks [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2017, 4(4): 863-875.
- [23] 郑远硕, 李峰, 董九玲, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充电时空灵活性优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 88-97.
- ZHENG Yuanshuo, LI Feng, DONG Jiuling, et al. Optimal dispatch strategy of spatio-temporal flexibility for electric vehicle charging and discharging in vehicle-road-grid mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 88-97.
- [24] 金志刚, 胡怡, 李根, 等. 面向“代客加电”服务的电动汽车充电引导策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 76-84.
- JIN Zhigang, HU Yi, LI Gen, et al. Charging guiding strategy for electric vehicles oriented to a valet charging service [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 76-84.
- [25] 董晓红. 考虑交通行为的电动汽车快充站协同规划与时空引导策略[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- DONG Xiaohong. Collaborative planning of electric vehicle fast charging stations and spatial-temporal guidance strategy considering the traffic behavior [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.

作者简介:



范宏

范宏(1978),女,博士,副教授,研究方向为综合能源系统、实时仿真(E-mail: fan\_hong0@163.com);

李嘉晖(1995),男,硕士在读,研究方向为电动汽车充电引导技术;

郭琦(1979),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统稳定分析与控制工作。

## Electric vehicle charging guidance strategy considering user charging decision-making behavior

FAN Hong<sup>1</sup>, LI Jiahui<sup>1,2</sup>, GUO Qi<sup>3</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Jingjiang Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Taizhou 214500, China;

3. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Fast charging station (FCS) is an important energy supply facility for electric vehicle (EV). With the popularization and application of EV, the fast charging load is gradually rising, which has a certain impact on the operation of distribution network. However, as a demand-side response resource, fast charging load can mitigate the negative impact of EV access on distribution network operation through orderly charging control. Therefore, an EV charging guidance strategy considering user charging decision-making behavior is proposed. Firstly, considering the impact of dynamic traffic conditions, an EV mobility model is constructed by using trip chain theory to simulate user trips and characterize the spatio-temporal distribution of remaining electricity. Secondly, considering the remaining electricity, charging facilities distribution and charging service price, the user charging decision model is constructed by using regret theory, and the spatio-temporal distribution of charging load is characterized. Then, the charging service price optimization model is constructed to minimize the distribution network loss. By optimizing the charging service price of the public FCS, the space-time distribution of charging load is guided. Finally, by comparing different service price schemes, the results show that the proposed method has better guidance effect on small capacity vehicles. The larger the equivalent conversion coefficient of user time consumption, the better the effect of the proposed method on charging load guidance.

**Keywords:** electric vehicle (EV) mobility model; charging load; dynamic traffic condition; charging decision-making behavior; charging service price; charging guidance strategy

(编辑 吴楠)