

考虑目标充电站选择冲突的电动汽车充电引导策略

李恒杰^{1,2}, 夏强强¹, 史一炜², 周云², 张开宇³, 时珊珊³, 沈冰³

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

3. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要:电动汽车(EV)用户对距离成本、时间成本和费用成本存在不同的偏好,在选择目标充电站时容易发生冲突;同时,不同充电站存在拥挤或空闲现象,导致单位时间盈利与设备利用均衡度较低。为此,提出了一种考虑目标充电站选择冲突的EV充电引导策略。首先,分别建立面向EV用户和充电站的快充需求模型;然后,建立EV充电冲突处理模型以及时响应用户的充电申请,减少目标充电站的选择冲突;考虑EV与充电站各自的偏好,建立双边匹配模型以实现EV充电冲突处理模型的快速求解,并得到EV充电引导策略;最后,通过实际算例验证所提EV充电引导策略的可行性与有效性。算例分析结果表明:所提策略不仅可以有效缓解充电冲突状况并均衡充电站的设备利用率,还能够有效兼顾EV用户与充电站的利益;针对不同时段的道路交通状况,所提策略均能有效适用。

关键词:电动汽车;充电站;选择偏好;选择冲突;充电引导;双边匹配;设备利用率;道路交通

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202203001

0 引言

随着全球经济加速发展,碳排放量不断上升,我国作为经济高速发展的大国,提出了“双碳”战略目标,即2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和^[1]。发展新能源汽车是推动绿色发展、节能减排、践行低碳发展的战略选择,电动汽车EV(Electric Vehicle)将成为市场主流^[2]。快速充电作为一种省时高效的充电方式,EV用户更容易对其产生偏好,但目前快速充电站CS(Charging Station)的布局与EV的充电需求分布重合度不高,快速充电需求很难及时得到满足,充电聚合商的运营服务模式亟待创新。因此,利用EV的移动负荷特性对车群进行合理的引导显得尤为重要。充电引导可以更好地满足EV用户的充电需求,同时增加充电聚合商的收益,减少对配电网性能的影响^[3]。

目前,针对EV充电引导问题,国内外很多学者已进行了较为深入的研究:文献[4]提出了基于请求驱动的快速充电站推荐模式,以路-网优化、降低EV耗时和兼顾充电站服务均衡度为目标进行快速充电需求引导;文献[5]提出了一种通过用户响应新电价

机制以调整用户充电时间的策略,提升了用户对时间与成本的满意度以及充电设备利用率;文献[6]构建了EV与电网两阶段优化的主从博弈模型,领导者以电价激励引导EV充放电实现整体优化,跟随者以负荷波动与充放电成本最小为目标进行两阶段优化;文献[7]提出了下一个目的地指引下的EV充电引导方案;文献[8]提出一种“车-站-网”协同模式下考虑三方需求的EV快速充电引导方法;文献[9]分析了多车交互的影响过程,提出了EV动态演化并动态响应快速充电站的充电引导策略,有效地提高了车群充电寻站效率,均衡了充电站之间的快充负荷;文献[10]提出了一种分层博弈方法,上层建立了一种非合作博弈模型用于模拟EV与充电站之间的竞争以获得定价策略,下层制定了EV选站策略;文献[11]以EV充电总时间和充电成本为目标,考虑交通网和配电网的耦合关系,得到了快速充电导航方案;文献[12]以EV行驶时间成本和充电成本之和最小为目标,提出了一种基于充电价格的动态导航策略;文献[13]提出了EV与电网互动的分群优化调度策略;文献[14]以电动公交车运营成本与电网利益为目标,考虑行车计划编制问题,提出了电动公交车的有序充电方案。

已有的EV充电引导策略大多着重结合配电网、交通网与充电站以优化EV的充电行为,对EV用户与充电站的偏好考虑不充分,且未考虑EV用户对目标充电站的选择冲突问题,也没有给出EV与充电站之间的匹配解。为此,本文重点研究具有快速充电需求的EV与可行充电站的双边匹配问题,综合考虑EV的多类型偏好、充电站的设备利用率以及不同场

收稿日期:2021-08-30;修回日期:2021-12-29

在线出版日期:2022-02-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52167014);上海市青年科技英才扬帆计划项目(21YF1408600);国家电网有限公司科技项目(52094021000F)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52167014),Shanghai Sailing Program(21YF1408600) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52094021000F)

景的应用,提出了考虑目标充电站选择冲突的EV充电引导策略,并以上海市某区域充电站群为例分析了所提策略的有效性。

1 面向EV用户与充电站的快充需求分析

1.1 面向EV用户的快充需求分析

EV用户在选择充电站的过程中主要考虑距离、时间、充电总费用这3个偏好指标。其中,距离反映了EV用户对耗电量的偏好,时间反映了EV用户对道路通行能力的偏好。

EV_i对充电站 j 的距离偏好指标 d_{ij} 可表示为:

$$d_{ij} = d'_{ij} + d''_{ij} \quad (1)$$

式中: d'_{ij} 为EV_i与目标充电站 j 之间的行驶距离; d''_{ij} 为目标充电站 j 与EV_i下一个目标点之间的行驶距离。

EV_i对充电站 j 的时间偏好指标 $t_{EV,i,j}$ 可表示为:

$$t_{EV,i,j} = t'_{ij} + t''_{ij} \quad (2)$$

$$t''_{ij} = \begin{cases} t_j - t'_{ij} & t_j \geq t'_{ij} \\ 0 & t_j < t'_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中: t'_{ij} 为EV_i到目标充电站 j 的行驶时间; t''_{ij} 为EV_i前往目标充电站 j 充电需要等待的时间; t_j 为充电站 j 服务前一辆EV完成充电还需等待的时间。

EV_i在充电站 j 的充电总费用 f_{ij} 可表示为:

$$f_{ij} = (f'_j + f''_j) t_{c,i} P_j + t_{w,i} f'''_j \quad (4)$$

$$t_{c,i} = \frac{(S_{SOC,i}^1 - S_{SOC,i}^0) Q_{\max}}{P_j} \quad (5)$$

式中: f'_j 、 f''_j 、 f'''_j 分别为充电站 j 的基础充电单价、基础服务费单价、基础停车费单价; $t_{c,i}$ 为EV_i的充电时长; $t_{w,i}$ 为EV_i的等待时长; P_j 为充电站 j 的快速充电功率; $S_{SOC,i}^0$ 、 $S_{SOC,i}^1$ 分别为EV_i的初始荷电状态、申请充电后达到的荷电状态; $Q_{\max}$ 为EV电池的最大容量。

1.2 面向充电站的快充需求分析

充电站在匹配充电需求的过程中主要考虑单位时间的盈利与充电站设备利用均衡度。EV充电电量、充电站等待服务时间、EV停车时间共同决定了充电站的盈利。其中,充电站 j 关于EV_i的时间偏好指标 $t_{CS,i,j}$ 可表示为:

$$t_{CS,i,j} = \begin{cases} 0 & t_j \geq t'_{ij} \\ t'_{ij} - t_j & t_j < t'_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

参考文献[7],充电站 j 的设备利用均衡度 η_j 为:

$$\eta_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} P_{EV,i}}{\left(c_j / \sum_{j=1}^M c_j \right) \sum_{i=1}^N P_{EV,i}} \times 100 \% \quad (7)$$

式中: N 为区域内的EV数量; M 为区域内的充电站数量; x_{ij} 为充电标志位,若EV_i与充电站 j 成功匹配充电则 $x_{ij}=1$,否则 $x_{ij}=0$; c_j 为充电站 j 的充电位数

量; $P_{EV,i}$ 为EV_i的充电功率。式(7)等号右侧的分子表示前往充电站 j 进行充电的EV实际充电功率总和,分母表示以充电位为基准分配的前往充电站 j 进行充电的EV充电功率总和。

当EV选择充电站 j 进行充电时,选择冲突率 μ_j 为:

$$\mu_j = \frac{\varphi_j}{c_j} \times 100 \% \quad (8)$$

$$\varphi_j = \begin{cases} \varepsilon_j - c_j & \varepsilon_j \geq c_j \\ 0 & \varepsilon_j < c_j \end{cases} \quad (9)$$

式中: ε_j 为选择充电站 j 进行充电的EV数量; φ_j 为超出充电站 j 充电位数量的EV数量。

2 考虑充电冲突的EV充电引导策略

2.1 充电冲突处理模型

设区域内具有充电需求的EV集合 E_{EV} 、充电站集合 E_{CS} 、充电站内的充电位集合 E_{cp} 分别为:

$$E_{EV} = \{ EV_1, EV_2, \dots, EV_N \} \quad (10)$$

$$E_{CS} = \{ CS_1, CS_2, \dots, CS_M \} \quad (11)$$

$$E_{cp} = \{ cp_1, cp_2, \dots, cp_Z \} \quad (12)$$

式中: Z 为充电站内的充电位数量。

云端决策层可以利用百度地图等地图服务商接口获取EV与充电站之间的实时信息,并对EV进行引导。云端决策层基于获取的信息确定EV_i的可行充电位集合 $E_{cp,i}$ ($E_{cp,i} \neq \emptyset$ 且 $E_{cp,i} \subseteq E_{cp}$)。设造成目标充电站选择冲突的EV所构成的集合为拥挤集 E_{EVC} , $E_{EVC} \subseteq E_{EV}$ 。

参考文献[15],将时间上连续的充电问题转化为离散形式进行处理。离散形式下的充电问题可以用二部图 $G=(E_{EV}, E_{cp,i})$ 进行描述。若所有有充电需求EV的申请均得到充电匹配且不存在拥挤集,则二部图 $G=(E_{EV}, E_{cp,i})$ 的需求侧存在饱和匹配。参考Hall定理,若要实现饱和匹配,那么二部图必须满足Hall条件,即 $\forall S_{EV} \subseteq E_{EV}$ (S_{EV} 为任意EV集合)使得式(13)成立。

$$|S_{EV}| \leq |E_{cp,i,S_{EV}}| \quad (13)$$

式中: $E_{cp,i,S_{EV}}$ 为 S_{EV} 的可行充电位集合; $|\cdot|$ 表示集合内元素的数量。

从连续时间来看,预约充电问题可视为无穷个二部图的匹配问题,如式(14)所示。

$$\{(E_{EV,\Delta T(t)}, E_{cp,i,\Delta T(t)}) | t: 0 \rightarrow \infty\} \quad (14)$$

式中: $(E_{EV,\Delta T(t)}, E_{cp,i,\Delta T(t)})$ 为预约充电的第一次二部图匹配, $\Delta T(t)$ 为二部图充电匹配从 t 时刻开始所持续的最佳时长。设在 $t \in (t_0, t_0 + \Delta T(t)]$ 时段内,已经接收到充电预约的EV集合与其对应的可行充电位

集合构成的二部图为:

$$G_{\Delta T(t_0)} = (E_{EV, \Delta T(t)}, E_{cp, i, \Delta T(t)}) \quad (15)$$

该二部图满足 Hall 条件以及式(16)。

$$|E_{EV, \Delta T(t)}| \leq |E_{cp, i, \Delta T(t)}| \leq Z \quad (16)$$

若在该次匹配截止之前,又接收到EV快充需求预约,则设新加入的EV集合为 $E_{EV, y}$ 及其可行充电位集合为 $E_{cp, i, y}$,与式(15)所示二部图构成新的二部图,如式(17)所示。

$$G_{\Delta T(t_0)}^* = (E_{EV, \Delta T(t)}^*, E_{cp, i, \Delta T(t)}^*) \quad (17)$$

更新后的EV集合 $E_{EV, \Delta T(t)}^*$ 和充电位集合 $E_{cp, i, \Delta T(t)}^*$ 分别为:

$$E_{EV, \Delta T(t)}^* = E_{EV, \Delta T(t)} \cup E_{EV, y} \quad (18)$$

$$E_{cp, i, \Delta T(t)}^* = E_{cp, i, \Delta T(t)} \cup E_{cp, i, y} \quad (19)$$

若式(17)所示新的二部图依然满足 Hall 条件和式(16),则在本次引导中对新加入EV的预约予以第一轮处理;否则,在本次引导中对新加入EV的预约予以第二轮处理,直到所有EV均引导结束。

2.2 快速匹配模型及其求解

2.2.1 双边匹配模型的建立

在二部图匹配过程中,将EV对充电站的偏好序与充电站对EV的偏好序转换为三角模糊数进行处理,根据文献[16],转换公式为:

$$\tilde{A} = (d^l, d^m, d^r) = \left(\max \left\{ \frac{k-1}{L}, 0 \right\}, \frac{k}{L}, \min \left\{ \frac{k+1}{L}, 1 \right\} \right) \quad (20)$$

式中: $\tilde{A} = (d^l, d^m, d^r)$ 为三角模糊数, d^l, d^m, d^r 为实数,且满足 $d^l \leq d^m \leq d^r; k=1, 2, \dots, L; L$ 为最大偏好序。 $\tilde{A}$ 的隶属度函数 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 表示任意元素 x 属于三角模糊数 $\tilde{A}$ 的程度,如式(21)所示,其满足 $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1$ 。

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < d^l, x > d^r \\ \frac{x-d^l}{d^m-d^l} & d^l \leq x \leq d^m \\ \frac{d^r-x}{d^r-d^m} & d^m < x \leq d^r \end{cases} \quad (21)$$

假设EV关于充电站的偏好指标向量为 $Q = [Q_1, Q_2, \dots, Q_e]$,其中 $Q_h (h=1, 2, \dots, e)$ 为第 h 个EV关于充电站的偏好指标, e 为偏好指标数量;偏好指标对应的指标权重向量 $w = [w_1, w_2, \dots, w_e]$,其中 w_h 为偏好指标 Q_h 的权重,且满足 $0 \leq w_h \leq 1, \sum_{h=1}^e w_h = 1$ 。

基于上述偏好指标,设EV对充电站的偏好结果矩阵 $\bar{A}_h = [\bar{a}_{hij}]_{N \times M}$,其中 $\bar{a}_{hij}$ 为基于偏好指标 Q_h 的EV i 对充电站 j 的偏好结果。

假设充电站关于EV的偏好指标向量 $I = [I_1, I_2, \dots, I_K]$,其中 $I_q (q=1, 2, \dots, K)$ 为第 q 个充电站关于EV的偏好指标, K 为偏好指标数量;偏好指标对

应的指标权重向量 $v = [v_1, v_2, \dots, v_K]$,其中 v_q 为偏好指标 I_q 的权重,且满足 $0 \leq v_q \leq 1, \sum_{q=1}^K v_q = 1$ 。基于上述

偏好指标,设充电站对EV的偏好结果矩阵 $\bar{B}_q = [\bar{b}_{qij}]_{N \times M}$,其中 $\bar{b}_{qij}$ 为基于偏好指标 I_q 的充电站 j 对EV i 的偏好结果。

将矩阵 $\bar{A}_h$ 与 $\bar{B}_q$ 分别转化成三角模糊数形式的偏好矩阵 $\tilde{A}_h = [\tilde{a}_{hij}]_{N \times M}$ 和 $\tilde{B}_q = [\tilde{b}_{qij}]_{N \times M}$,其中 $\tilde{a}_{hij} = (a_{hij}^l, a_{hij}^m, a_{hij}^r)$ 为在第 h 个EV关于充电站的偏好指标下EV i 对充电站 j 的三角模糊数偏好值, $\tilde{b}_{qij} = (b_{qij}^l, b_{qij}^m, b_{qij}^r)$ 为在第 q 个充电站关于EV的偏好指标下充电站 j 对EV i 的三角模糊数偏好值。根据扩展原理和运算法则,可得:

$$\tilde{\alpha}_{ij} = (\alpha_{ij}^l, \alpha_{ij}^m, \alpha_{ij}^r) = \left(\sum_{h=1}^e w_h a_{hij}^l, \sum_{h=1}^e w_h a_{hij}^m, \sum_{h=1}^e w_h a_{hij}^r \right) \quad (22)$$

$$\tilde{\beta}_{ij} = (\beta_{ij}^l, \beta_{ij}^m, \beta_{ij}^r) = \left(\sum_{q=1}^K v_q b_{qij}^l, \sum_{q=1}^K v_q b_{qij}^m, \sum_{q=1}^K v_q b_{qij}^r \right) \quad (23)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, M; \tilde{\alpha}_{ij}$ 为EV i 关于充电站 j 的综合模糊评价价值; $\tilde{\beta}_{ij}$ 为充电站 j 关于EV i 的综合模糊评价价值。

为了解决EV与充电站之间的匹配问题,尽可能同时满足充电需求方和供给方的利益最大化,建立三角模糊数多目标优化匹配模型如下:

$$\max z_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \tilde{\alpha}_{ij} x_{ij} \quad (24)$$

$$\max z_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \tilde{\beta}_{ij} x_{ij} \quad (25)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 & i=1, 2, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N x_{ij} \leq c_j & j=1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (26)$$

式(24)和式(25)所示2个目标函数的含义分别为尽可能最大化EV对充电站的匹配满意度 z_1 和最大化充电站对EV的匹配满意度 z_2 。式(26)所示约束条件表示EV i 在同一时间最多只能预约到1座充电站,且充电站 j 在同一时间至多接受 c_j 个充电预约。直接对三角模糊数多目标优化匹配模型进行处理比较困难,本文将其拆分为具有清晰数形式的优化模型,如式(27)和式(28)所示。

$$z_1^l = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_{ij}^l x_{ij}, \quad z_1^m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_{ij}^m x_{ij}, \quad z_1^r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_{ij}^r x_{ij} \quad (27)$$

$$z_2^l = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \beta_{ij}^l x_{ij}, \quad z_2^m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \beta_{ij}^m x_{ij}, \quad z_2^r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \beta_{ij}^r x_{ij} \quad (28)$$

通过取极大、极小值的形式,将三角模糊数多目标优化匹配模型转化为线性多目标优化匹配模型,具体如下:

$$\max z'_1 = z_1^m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_{ij}^m x_{ij} \quad (29)$$

$$\min z''_1 = z_1^m - z_1^l = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\alpha_{ij}^m - \alpha_{ij}^l) x_{ij} \quad (30)$$

$$\max z'''_1 = z_1^r - z_1^m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\alpha_{ij}^r - \alpha_{ij}^m) x_{ij} \quad (31)$$

$$\max z'_2 = z_2^m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \beta_{ij}^m x_{ij} \quad (32)$$

$$\min z''_2 = z_2^m - z_2^l = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\beta_{ij}^m - \beta_{ij}^l) x_{ij} \quad (33)$$

$$\max z'''_2 = z_2^r - z_2^m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\beta_{ij}^r - \beta_{ij}^m) x_{ij} \quad (34)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 & i=1, 2, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N x_{ij} \leq c_j & j=1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (35)$$

进一步地,通过隶属度函数对线性多目标优化匹配模型进行归一化处理,将其转换为单目标优化匹配模型。首先,计算式(29)~(34)所示目标函数的正、负理想解,分别如式(36)~(41)所示。

$$z'_{1,+} = \max \{ z_1^m \}, z'_{1,-} = \min \{ z_1^m \} \quad (36)$$

$$z''_{1,+} = \min \{ z_1^m - z_1^l \}, z''_{1,-} = \max \{ z_1^m - z_1^l \} \quad (37)$$

$$z'''_{1,+} = \max \{ z_1^r - z_1^m \}, z'''_{1,-} = \min \{ z_1^r - z_1^m \} \quad (38)$$

$$z'_{2,+} = \max \{ z_2^m \}, z'_{2,-} = \min \{ z_2^m \} \quad (39)$$

$$z''_{2,+} = \min \{ z_2^m - z_2^l \}, z''_{2,-} = \max \{ z_2^m - z_2^l \} \quad (40)$$

$$z'''_{2,+} = \max \{ z_2^r - z_2^m \}, z'''_{2,-} = \min \{ z_2^r - z_2^m \} \quad (41)$$

式中:下标“+”“-”分别表示正、负理想解。

然后,根据所得正、负理想解与式(21)计算相应的隶属度函数 $\mu_{z'_1}, \mu_{z''_1}, \mu_{z'''_1}, \mu_{z'_2}, \mu_{z''_2}, \mu_{z'''_2}$ 。

最后,通过隶属度函数将多目标优化匹配模型转换为如下所示单目标优化匹配模型:

$$\max \lambda \quad (42)$$

$$\lambda \leq \min \{ \mu_{z'_1}, \mu_{z''_1}, \mu_{z'''_1}, \mu_{z'_2}, \mu_{z''_2}, \mu_{z'''_2} \} \quad (43)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 & i=1, 2, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N x_{ij} \leq c_j & j=1, 2, \dots, M \\ 0 \leq \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (44)$$

式中: λ 为隶属度函数。

2.2.2 模型求解

EV 预约快速充电的过程是一个复杂、多维、多变量的优化求解过程。考虑目标充电站选择冲突的 EV 充电引导流程图如图 1 所示。

3 算例分析与验证

3.1 算例设置

本文以上海市某区域充电平台运营的 8 座充电

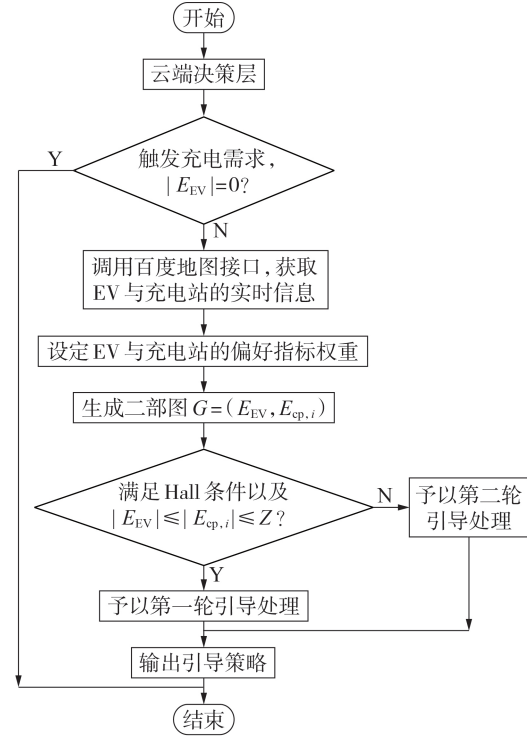


图 1 EV 充电引导流程图

Fig.1 Flowchart of EV charging guidance

站为算例进行分析,8座充电站的分布情况见附录 A 图 A1,每座充电站内有 3~15 个充电位,共有 60 个充电位。充电站的相关参数信息见附录 A 表 A1。本文取 $\Delta T=0.5$ s,测试时段内有充电需求的 EV 数量为 100 辆, EV 的相关参数见附录 A 表 A2。根据文献 [17],调用百度地图接口,在考虑路况、车流量等交通因素条件下,获取 EV 与充电站之间的实时距离和行驶时间。

根据面向 EV 用户与充电站的快充需求分析: EV 用户考虑距离、时间、充电总费用这 3 个偏好指标,在不影响目标函数的前提下,假设这 3 个指标对应的权重分别为 0.2、0.5、0.3;充电站考虑 EV 充电电量、充电站等待服务时间这 2 个偏好指标,假设其对应的权重分别为 0.7、0.3。

3.2 算例结果分析

3.2.1 与最短距离引导策略对比的结果分析

以最短距离为目标函数(策略 1)对测试时段内的 100 辆 EV 进行引导。由于需引导的 EV 数量大于该区域内的充电位数量,先对前 60 辆 EV 进行第一轮引导,然后对后 40 辆 EV 进行第二轮引导,引导结果分别见附录 A 表 A3 和表 A4。

基于本文所提考虑目标充电站选择冲突的充电引导策略(策略 2)对 100 辆 EV 进行引导,根据充电冲突处理模型可知,需引导的 EV 数量大于该区域内的充电位数量且不满足 Hall 条件,所以先对满足约

束条件的前60辆EV进行第一轮引导,更新数据后再对后40辆EV进行第二轮引导,引导结果分别见附录A表A5和表A6。

分析策略1和策略2的引导结果,100辆EV充电所用的时间与费用如表1所示。由表可知,虽然策略1引导后的行驶时间少于策略2引导后的行驶时间,但策略2引导后的等待时间、总时间、充电费用、停车费用、总花费都优于策略1,可见本文所提充电引导策略能够有效减少EV在充电过程中的总时间与总费用。经2种策略引导后EV对目标充电站的选择冲突率如表2所示。

表1 EV的充电时间与费用

Table 1 Charging time and cost of EVs						
策略	行驶时间/h	等待时间/h	总时间/h	充电费用/元	停车费用/元	总费用/元
1	3.01	339.75	342.76	8393.60	2038.50	10432.10
2	7.82	10.12	17.94	7533.10	60.72	7593.82

表2 EV对目标充电站的选择冲突率

Table 2 Selection conflict rate of EVs to target charging stations

充电站	选择冲突率		充电站	选择冲突率	
	策略1	策略2		策略1	策略2
1	0	0	5	2.33	0
2	4.00	0	6	0	0
3	0.83	0	7	0.25	0
4	0	0	8	0	0

由附录A表A3可知,经策略1的第一轮引导后充电站2、3、5、7分别出现了EV拥挤集 $E_{EV,2}^1=\{EV_{22}, EV_{25}, EV_{28}, EV_{29}, EV_{35}, EV_{36}, EV_{42}, EV_{43}, EV_{46}, EV_{48}, EV_{57}\}$ 、 $E_{EV,3}^1=\{EV_{27}, EV_{50}, EV_{52}, EV_{53}\}$ 、 $E_{EV,5}^1=\{EV_{18}, EV_{31}, EV_{34}, EV_{38}, EV_{51}, EV_{58}\}$ 以及 $E_{EV,7}^1=\{EV_{55}, EV_{56}, EV_{59}\}$ 。以拥挤集 $E_{EV,2}^1$ 为例说明,充电站2内有4个充电位,前往充电站2充电的EV有15辆,先到达的4辆EV可优先充电,后到达的11辆EV因充电位被占用而不能及时充电,形成了EV拥挤集 $E_{EV,2}^1$,出现了选择冲突,后到达的EV用户可以选择在该充电站等待充电或者选择预约其他充电站进行充电,即需要进行2次充电决策,这在很大程度上提高了用户的时间与距离成本。由附录A表A4可知,经策略1的第二轮引导后充电站2、3、5分别出现了EV拥挤集 $E_{EV,2}^2=\{EV_{86}, EV_{89}, EV_{90}, EV_{93}, EV_{99}\}$ 、 $E_{EV,3}^2=\{EV_{94}\}$ 、 $E_{EV,5}^2=\{EV_{71}, EV_{72}, EV_{73}, EV_{75}, EV_{77}, EV_{95}, EV_{97}\}$ 。可见,策略1造成了EV用户目标充电站的选择冲突。由表2可知,策略2引导后8座充电站的选择冲突率均为0,没有出现EV用户目标充电站选择冲突现象与EV拥挤集,避免了2次充电决策,这在一定程度上节约了用户的时间与距离成本。

2种策略下充电站设备利用均衡度如表3所示。

由表可知,经策略1引导后充电站设备利用均衡度标准差为1.41,经策略2引导后充电站设备利用均衡度标准差为0.18,明显可见本文所提策略的充电站设备利用均衡度优于策略1。

表3 2种策略下的充电站设备利用均衡度

Table 3 Equipment utilization equilibrium degree of charging stations under two strategies

充电站	设备利用均衡度		充电站	设备利用均衡度	
	策略1	策略2		策略1	策略2
1	0.65	1.20	5	4.00	1.20
2	3.60	0.90	6	0.60	0.84
3	2.20	1.20	7	1.30	1.20
4	0.50	1.20	8	0	0.75

经策略1和策略2引导后充电站单位时间盈利结果如表4所示。由表可知,经策略2引导后充电站的单位时间盈利大于策略1,这表明本文所提策略能够有效提高充电站的单位时间盈利。

表4 2种策略下充电站的单位时间盈利

Table 4 Charging stations' profit per unit time under two strategies

策略	总收入/元	总服务时长/h	单位时间盈利/(元·h ⁻¹)
1	10432.10	456.36	22.86
2	7593.82	52.49	144.67

3.2.2 不同场景的引导结果分析

为了验证本文所提引导策略适用于一天内不同时刻的交通状况,设定以下3种典型场景:①场景1,06:00左右的道路基本不存在拥挤情况,通行能力强;②场景2,09:45左右道路拥挤情况较轻,通行能力较弱;③场景3,11:45左右道路的拥挤情况最严重,通行能力最弱。

上述3种典型场景考虑了不同时刻道路的通行能力差异性。通过调用百度地图接口,获取3种典型场景下不同时刻EV与充电站之间的实时距离与行驶时间。在不同的场景下对100辆EV进行充电引导,结果如表5所示。

表5 3种典型场景的充电引导结果

Table 5 Charging guidance results of three typical scenarios

场景	行驶时间/min	等待时间/min	总时间/min	充电费用/元	停车费用/元	总费用/元
1	468.95	670.40	1139.35	7533.10	67.40	7600.50
2	427.95	727.03	1154.98	7596.80	72.70	7669.50
3	427.27	747.67	1174.94	7618.40	74.77	7693.17

由表5可知,相较于场景1的引导结果,场景2下的总时间、总费用只分别增加了1.37%、0.91%,场景3下的总时间、总费只分别增加了3.12%、1.22%,

可见本文所提充电引导策略适用于不同时段的道路交通状况。

4 结论

本文针对EV用户存在充电站选择冲突及充电设备利用均衡度低等主要问题,提出了考虑目标充电站选择冲突的EV充电引导策略,并基于实际算例验证了所提策略的可行性与有效性,所得结论如下。

1)基于本文所提充电引导策略对EV充电行为进行引导后,可以有效解决EV用户对目标充电站的选择冲突问题,避免发生冲突后的2次充电决策。同时,所提充电引导策略能够根据充电站的地理位置及充电位数量较均衡地将EV引导至不同的充电站,有效均衡了不同充电站的设备利用率。

2)本文所提充电引导策略考虑了充电站与EV用户的偏好,兼顾了充电站与用户的利益,能够有效减少EV充电过程中的总时间和总费用,提高充电站的单位时间盈利。

3)所提充电引导策略通过实时调用地图服务商接口有效考虑了EV充电引导过程中的道路交通状况,测试区域在3种不同道路交通状况典型场景下的引导结果验证了所提策略可以适用于不同时段的道路交通状况。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 崔峰,曾鹏,仲悟之,等.考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J].电力自动化设备,2021,41(3):10-17.
CUI Yang,ZENG Peng,ZHONG Wuzhi,et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(3):10-17.
- [2] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)的通知[EB/OL]. (2020-11-02)[2021-04-26]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm.
- [3] 陈中,刘艺,周涛,等.考虑移动特性的电动汽车最优分时充电定价策略[J].电力自动化设备,2020,40(4):96-102.
CHEN Zhong,LIU Yi,ZHOU Tao,et al. Optimal time-of-use charging pricing strategy of EVs considering mobile characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):96-102.
- [4] 袁红霞,张俊,许沛东,等.基于图强化学习的电力交通耦合网络快速充电需求引导研究[J].电网技术,2021,45(3):979-986.
YUAN Hongxia,ZHANG Jun,XU Peidong,et al. Fast charging demand guidance in coupled power-transportation networks based on graph reinforcement learning[J]. Power System Technology,2021,45(3):979-986.
- [5] 陈立兴,黄学良.高速公路充电站电动汽车有序充电策略[J].电力自动化设备,2019,39(1):112-117.

- CHEN Lixing,HUANG Xueliang. Ordered charging strategy of electric vehicles at charging station on highway[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):112-117.
- [6] 张潇,栗然,马涛,等.基于主从博弈和贪心策略的含电动汽车主动配电网优化调度[J].电力自动化设备,2020,40(4):103-110.
ZHANG Xiao,LI Ran,MA Tao,et al. Stackelberg game and greedy strategy based optimal dispatch of active distribution network with electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):103-110.
- [7] 黄晶,杨健维,王湘,等.下一目的地导向下的电动汽车充电引导策略[J].电网技术,2017,41(7):2173-2181.
HUANG Jing,YANG Jianwei,WANG Xiang,et al. Destination oriented electric vehicle charging guiding strategy[J]. Power System Technology,2017,41(7):2173-2181.
- [8] 邵尹池,穆云飞,林佳颖,等.“车-站-网”多元需求下的电动汽车快速充电引导策略[J].电力系统自动化,2019,43(18):60-66,101.
SHAO Yinchu,MU Yunfei,LIN Jiaying,et al. Fast charging guidance strategy for multiple demands of electric vehicle, fast charging station and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(18):60-66,101.
- [9] 刘洪,阎峻,葛少云,等.考虑多车交互影响的电动汽车与快充站动态响应[J].中国电机工程学报,2020,40(20):6455-6468.
LIU Hong,YAN Jun,GE Shaoyun,et al. Dynamic response of electric vehicle and fast charging stations considering multi-vehicle interaction[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(20):6455-6468.
- [10] TAN Jun,WANG Lingfeng. Real-time charging navigation of electric vehicles to fast charging stations:a hierarchical game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(2):846-856.
- [11] SUN Siyang,YANG Qiang,YAN Wenjun. Optimal temporal-spatial electric vehicle charging demand scheduling considering transportation-power grid couplings[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland, OR,USA:IEEE,2018:1-5.
- [12] MO Wangyi,YANG Chao,CHEN Xin,et al. Optimal charging navigation strategy design for rapid charging electric vehicles[J]. Energies,2019,12(6):962-979.
- [13] 王毅,陈进,麻秀,等.采用分群优化的电动汽车与电网互动调度策略[J].电力自动化设备,2020,40(5):77-85.
WANG Yi,CHEN Jin,MA Xiu,et al. Interactive scheduling strategy between electric vehicles and power grid based on group optimization[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(5):77-85.
- [14] 蔡子龙,束洪春,杨博,等.计及行车计划编制的电动公交车有序充电策略[J].电力自动化设备,2021,41(6):45-56.
CAI Zilong,SHU Hongchun,YANG Bo,et al. Coordinated charging strategy of electric bus considering driving plan[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(6):45-56.
- [15] 张勇.电动汽车充电服务供给与匹配研究[D].重庆:重庆大学,2015.
ZHANG Yong. Research on supply and matching of electric vehicle charging service[D]. Chongqing:Chongqing University,2015.
- [16] 陈希.双边匹配决策方法研究[D].沈阳:东北大学,2010.
CHEN Xi. Research on two-sided matching decision making

methods[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.

[17] 百度地图开放平台[EB/OL]. [2021-08-01]. <https://lbsyun.baidu.com/>.

作者简介:

李恒杰(1981—),男,副教授,博士,主要研究方向为电力/综合能源系统应急及用电能效管理(E-mail: lihj915@lut.edu.cn);



李恒杰

夏强强(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车快充站充电导航及优化运行策略等(E-mail: xialut@126.com);

周云(1990—),男,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为电力/综合能源系统应急及用电能效管理等(E-mail: yun.zhou@sjtu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Electric vehicle charging guidance strategy considering selection conflict of target charging stations

LI Hengjie^{1,2}, XIA Qiangqiang¹, SHI Yiwei², ZHOU Yun², ZHANG Kaiyu³, SHI Shanshan³, SHEN Bing³

(1. School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: EV (Electric Vehicle) users have different preferences on distance cost, time cost and expense cost, and are prone to conflict when choosing target charging stations. At the same time, different charging stations are crowded or idle, which leads to low profit per unit time and utilization equilibrium degree. Therefore, an EV charging guidance strategy considering the selection conflict of target charging stations is proposed. Firstly, the fast charging demand models for EV users and charging stations are established respectively. Then, the EV charging conflict processing model is established to timely respond to users' charging applications and reduce the selection conflict of target charging stations. Considering the preferences of EV users and charging stations, the bilateral matching model is established to realize the quick solution of EV charging conflict processing model, and the EV charging guidance strategy is obtained. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed EV charging guidance strategy are verified by an actual example. Example analysis results show that the proposed strategy can not only effectively alleviate charging conflict and balance the equipment utilization rate of charging stations, but also effectively take into account the interests of EV users and charging stations. Aiming at the road traffic conditions in different time periods, the proposed strategy can be effectively applied.

Key words: electric vehicles; charging stations; selection preference; selection conflict; charging guidance; two-sided matching; equipment utilization rate; road traffic

附录 A

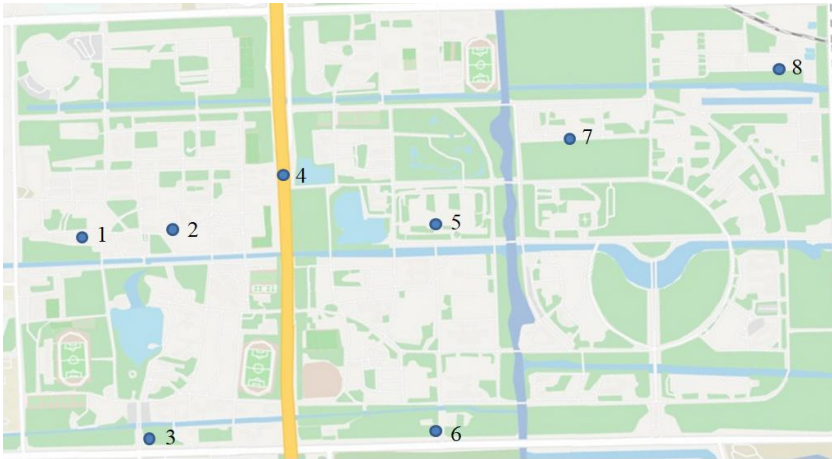


图 A1 区域内的充电站分布
Fig.A1 Distribution of charging stations in an area

表 A1 充电站的相关参数
Table A1 Related parameters of charging stations

充电站	经度/(°)	纬度/(°)	充电位个数	基础充电单价及	基础停车费	充电功率/kW
				服务费单价/[元·(kW·h) ⁻¹]	单价/(元·h ⁻¹)	
1	121.433289	31.029238	11	1.2	6	120
2	121.435761	31.030488	4	1.9	6	120
3	121.437324	31.024187	3	1.4	6	120
4	121.438716	31.032043	6	1.8	6	120
5	121.442952	31.032809	3	2	6	120
6	121.445364	31.027119	15	1.3	6	120
7	121.446612	31.036348	6	1.6	6	120
8	121.451409	31.039899	12	1.5	6	120

表 A2 EV 的相关参数
Table A2 Related parameters of EVs

EV 编号	经度/ (°)	纬度 (°)	初始 荷电 状态/ %	申请 荷电 状态/ %	充电 时长/ min	电池 容量/ (kW·h)	充电 电量/ (kW·h)	EV 编号	经度/ (°)	纬度 (°)	初始 荷电 状态/ %	申请 荷电 状态/ %	充电 时长/ min	电池 容量/ (kW·h)	充电 电量/ (kW·h)
1	121.438221	31.028643	36	88	26	100	52	51	121.436628	31.036850	41	85	22	100	44
2	121.439038	31.028999	29	84	27.5	100	55	52	121.445109	31.030532	37	88	25.5	100	51
3	121.430764	31.031599	29	89	30	100	60	53	121.444257	31.034138	41	87	23	100	46
4	121.442620	31.035497	43	82	19.5	100	39	54	121.432038	31.036182	48	86	19	100	38
5	121.435542	31.041090	33	82	24.5	100	49	55	121.433743	31.039160	19	90	35.5	100	71
6	121.436275	31.026397	33	83	25	100	50	56	121.431780	31.034912	42	90	24	100	48
7	121.436840	31.032773	46	84	19	100	38	57	121.435192	31.027141	48	84	18	100	36
8	121.441399	31.037012	48	85	18.5	100	37	58	121.435036	31.037834	33	85	26	100	52
9	121.435489	31.038030	33	90	28.5	100	57	59	121.431786	31.039419	44	90	23	100	46
10	121.443822	31.033213	40	82	21	100	42	60	121.436062	31.023844	42	84	21	100	42
11	121.435965	31.024093	33	89	28	100	56	61	121.433478	31.032950	37	84	23.5	100	47
12	121.437634	31.030356	16	82	33	100	66	62	121.438200	31.033199	18	87	34.5	100	69
13	121.444710	31.033461	42	87	22.5	100	45	63	121.432612	31.036836	30	81	25.5	100	51
14	121.435278	31.029580	23	87	32	100	64	64	121.438805	31.029928	24	89	32.5	100	65
15	121.430031	31.039239	46	86	20	100	40	65	121.444834	31.030716	36	85	24.5	100	49
16	121.445487	31.027458	40	84	22	100	44	66	121.432958	31.029886	22	85	31.5	100	63
17	121.439954	31.037454	17	86	34.5	100	69	67	121.435843	31.026374	24	85	30.5	100	61
18	121.434681	31.034851	25	88	31.5	100	63	68	121.441850	31.028454	50	83	16.5	100	33
19	121.441580	31.030712	33	80	23.5	100	47	69	121.434040	31.035197	40	84	22	100	44
20	121.439873	31.031936	33	88	27.5	100	55	70	121.439545	31.030995	33	90	28.5	100	57
21	121.444876	31.031075	49	82	16.5	100	33	71	121.432769	31.030255	28	86	29	100	58
22	121.437794	31.028144	42	89	23.5	100	47	72	121.437242	31.034463	37	85	24	100	48
23	121.442797	31.025778	26	89	31.5	100	63	73	121.435058	31.032573	35	83	24	100	48
24	121.440875	31.037677	44	82	19	100	38	74	121.437988	31.031545	44	81	18.5	100	37
25	121.440256	31.031528	47	88	20.5	100	41	75	121.435009	31.034064	36	81	22.5	100	45
26	121.438979	31.024993	34	82	24	100	48	76	121.436081	31.039585	40	82	21	100	42
27	121.444226	31.033792	48	89	20.5	100	41	77	121.438389	31.033273	43	80	18.5	100	37
28	121.437837	31.030324	15	90	37.5	100	75	78	121.435654	31.025656	31	80	24.5	100	49
29	121.441335	31.028026	48	88	20	100	40	79	121.445115	31.026545	28	80	26	100	52
30	121.436052	31.026344	31	86	27.5	100	55	80	121.437612	31.031211	26	80	27	100	54
31	121.432621	31.033338	16	81	32.5	100	65	81	121.434877	31.023514	50	82	16	100	32
32	121.431985	31.040987	45	89	22	100	44	82	121.439805	31.026814	34	83	24.5	100	49
33	121.439461	31.039856	32	83	25.5	100	51	83	121.440131	31.036758	41	89	24	100	48
34	121.434863	31.040024	25	83	29	100	58	84	121.432847	31.040997	30	83	26.5	100	53
35	121.440417	31.028959	50	88	19	100	38	85	121.442367	31.030198	48	82	17	100	34
36	121.438906	31.030804	27	82	27.5	100	55	86	121.441691	31.027049	17	83	33	100	66
37	121.443547	31.035030	15	80	32.5	100	65	87	121.434603	31.025422	38	86	24	100	48
38	121.436075	31.034800	49	88	19.5	100	39	88	121.431224	31.036562	22	86	32	100	64
39	121.434360	31.023806	39	88	24.5	100	49	89	121.440479	31.030959	41	90	24.5	100	49
40	121.430486	31.032138	33	88	27.5	100	55	90	121.437499	31.027921	50	88	19	100	38
41	121.432785	31.039739	19	87	34	100	68	91	121.443073	31.030640	19	82	31.5	100	63
42	121.438204	31.027005	38	83	22.5	100	45	92	121.438776	31.036065	37	84	23.5	100	47
43	121.441756	31.030678	22	84	31	100	62	93	121.439552	31.027574	26	85	29.5	100	59
44	121.431544	31.037404	49	86	18.5	100	37	94	121.445016	31.028148	26	81	27.5	100	55
45	121.440629	31.036625	50	90	20	100	40	95	121.431398	31.031167	43	83	20	100	40
46	121.441646	31.031364	33	80	23.5	100	47	96	121.431005	31.040288	18	89	35.5	100	71
47	121.438709	31.039664	45	84	19.5	100	39	97	121.436692	31.036053	18	83	32.5	100	65
48	121.442285	31.026848	19	90	35.5	100	71	98	121.441379	31.035714	15	87	36	100	72
49	121.440297	31.040062	32	82	25	100	50	99	121.441151	31.030558	38	82	22	100	44
50	121.442218	31.025654	29	90	30.5	100	61	100	121.436986	31.038160	34	90	28	100	56

表 A3 策略 1 的第一轮引导结果
Table A3 First round guidance results of Strategy 1

充电站	充电位个数	EV 数量/辆	EV 编号
1	11	7	6, 11, 13, 26, 30, 39, 60
2	4	15	1, 2, 12, 19, 22, 25, 28, 29, 35, 36, 42, 43, 46, 48, 57
3	3	7	16, 21, 23, 27, 50, 52, 53
4	6	2	14, 40
5	3	9	3, 7, 9, 18, 31, 34, 38, 51, 58
6	15	11	4, 8, 10, 17, 20, 24, 33, 37, 45, 47, 49
7	6	9	5, 15, 32, 41, 44, 54, 55, 56, 59
8	12	0	—

表 A4 策略 1 的第二轮引导结果
Table A4 Second round guidance results of Strategy 1

充电站	充电位个数	EV 数量/辆	EV 编号
1	11	5	67, 78, 81, 82, 87
2	4	9	64, 68, 70, 85, 86, 89, 90, 93, 99
3	3	4	65, 79, 91, 94
4	6	3	66, 74, 80
5	3	11	61, 62, 69, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 95, 97
6	15	4	83, 92, 98, 100
7	6	4	63, 84, 88, 96
8	12	0	—

表 A5 策略 2 的第一轮引导结果
Table A5 First round guidance results of Strategy 2

充电站	充电位个数	EV 数量/辆	EV 编号
1	11	11	18, 19, 29, 31, 34, 37, 40, 44, 48, 49, 59
2	4	4	6, 21, 28, 39
3	3	3	7, 9, 24
4	6	6	3, 5, 32, 41, 57, 60
5	3	3	1, 8, 33
6	15	15	4, 10, 11, 12, 14, 23, 25, 27, 42, 43, 46, 47, 51, 53, 58
7	6	6	2, 13, 16, 17, 20, 22
8	12	12	15, 26, 30, 35, 36, 38, 45, 50, 52, 54, 55, 56

表 A6 策略 2 的第二轮引导结果
Table A6 Second round guidance results of Strategy 2

充电站	充电位个数	EV 数量/辆	EV 编号
1	11	11	61, 66, 67, 68, 73, 74, 86, 88, 90, 94, 99
2	4	2	80, 98
3	3	3	89, 96, 97
4	6	6	71, 75, 82, 84, 85, 95
5	3	3	79, 81, 83
6	15	6	62, 63, 64, 65, 72, 91
7	6	6	69, 70, 77, 78, 87, 100
8	12	3	76, 92, 93