

共享模式下的充电桩引导与充电价格研究

李东东¹, 邹思源¹, 刘洋², 林顺富³, 杨帆¹, 边晓燕¹

(1. 上海电力学院 电气工程学院, 上海市 杨浦区 200082;

2. 国网宁波供电公司, 浙江省 宁波市 315000;

3. 上海高校能效电能应用工程中心, 上海市 杨浦区 200082)

Research on Charger Selection and Charging Price Under Shared Mode

LI Dongdong¹, ZOU Siyuan¹, LIU Yang², LIN Shunfu³, YANG Fan¹, BIAN Xiaoyan¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200082, China;

2. State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315000, Zhejiang Province, China; 3. Shanghai Higher Institution

Engineering Research Center of High Efficiency Electricity Application, Yangpu District, Shanghai 200082, China)

ABSTRACT: Growing number of electric vehicles produces large charging demands. A large number of private chargers have great economic potential because of their low utilization. Aiming at lack of effective management of private chargers, this paper proposed a sharing mode of private chargers based on aggregators. The model orients to the users having immediate and fast charging requirement, and the aggregators help to select the charger with appropriate price, distance, time and electricity. The aggregators build charging price by two steps. Firstly, the aggregators take revenue and customer satisfaction as the goal to determine benchmark price. Then, they will divide their jurisdictional areas into multiple sub-areas to optimize dynamic price according to traffic flow. Results verify effectiveness of the proposed model.

KEY WORDS: electric vehicle; sharing model; preferential function; charging price

摘要: 电动汽车数量日渐增长, 充电需求随之增大。但由于当前私人充电桩缺乏有效市场及管理, 大量的私人充电桩利用率极低、但存在巨大的经济潜能。据此, 提出由聚合商集群管理的私人充电桩共享模式。该模式以要求即时快速充电的用户为研究对象, 聚合商方面结合电价、路程、时间、电量提出充电桩择优方法以协助用户选择合适的充电桩。同时聚合商统筹规划私人充电桩充电价格, 采用两步式定价法, 首先, 聚合商结合收入及用户满意度, 制定基准价格; 而后, 根据用户充电频次将管辖范围分割成多个区域, 分别进行动态优化, 实现充电负荷的友好接入。结合文中所提的择优函

数和定价机制进行仿真计算, 验证了所提方案的有效性。

关键词: 电动汽车; 共享模式; 择优函数; 充电价格

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1203

0 引言

电动汽车(EV)因其环保节能受到广泛关注。在现有技术水平下, 电动汽车的续航能力仍然是一个有待解决的问题, 大量的电动汽车使用将激发巨大的充电需求^[1-3]。目前充电行为主要发生在公共充电站, 关于私人充电桩市场化的研究较少, 但由于缺乏有效的集群统筹管理, 私人充电桩大部分时间处于闲置状态^[4]。

国内外有许多关于负荷聚合商的研究与应用, 文献[5]从整合需求响应资源的角度对聚合商进行了分析和说明。本文的聚合商作为私人充电桩的统筹管理者, 在使得闲置时的私人充电桩发挥作用的同时, 也为其他参与者带来了利益。

很多文献研究的都是时间尺度上的电动汽车充放电调度^[6-7]。文献[8]提出的充电策略解决了住宅区大量的电动汽车接入电网导致变压器容量不足等问题; 文献[9]研究了电动汽车协同新能源的有序控制, 通过电网负荷曲线的变化证明了控制策略能有效避免电动汽车集中充电对电网造成的影响。价格是优化电动汽车充电时间的主要引导方法, 根据充电需求和电价激励响应价格信号, 达到有序充电的目的。文献[10]讨论了利用分时电价降低电网峰谷差和实现高峰负荷转移的方法; 文献[11]基于动态分时电价并结合了电网和用户的需求, 提出了最大化充电站收益的电价激励下的充电策略。本文所提的私人充电桩共享服务主要面向有即时充电

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407114); 上海市科学技术委员会资助(17020500800, 15YF1404600, 13DZ2251900, 10DZ2273400); 上海市“曙光计划”资助项目(15SG50)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51407114); Supported by Shanghai Science and Technology Committee (17020500800, 15YF1404600, 13DZ2251900, 10DZ2273400); Supported by “Shanghai Shuguang” Project(15SG50).

需求的用户，在时间上的调度尺度较小，但通过价格机制的建立，结合快速充电的特征，能够在空间上实现平衡。

共享模式不仅可以增加私人充电桩所有者的收入，还可以缓解充电高峰时段充电站的压力。充电桩择优是聚合商为充电车主提供的服务，以增加用户黏性，文献[12]建立了用户满意度模型，并通过价格机制实现了电动汽车的分布式控制；文献[13]研究了聚合商协助用户选择充电桩的服务，主要从等待时间制定优先级，考虑不够全面；文献[14]针对紧急充电需求，提出了包含电动汽车、充电站和配电网的信息物理系统(CPS)，建立了合适的充电桩引导方法并进行可行性分析。部分文献考虑了电网、交通网和电动汽车的信息交互来选择充电桩，文献[15]基于此分析了用户快速充电行为的典型特征，并结合历史大数据和实时数据对充电负荷进行预测；文献[16]建立了交通网-配电网-电动汽车的系统模型及评价指标，结合用户出行习惯提出了充电桩推荐和路径规划方法；文献[17]结合了智能交通系统、电力系统控制中心、电动汽车和充电站建立了充电导航系统，并分别界定了各个模块的功能与权限，满足了用户的充电需求及隐私保护。充电价格是用户选择充电桩重要的参考因素，除了成本定价法，文献[18]采用主从博弈的模型提出了代理商模式下的购电与定价策略；文献[19]建立了一个分层博弈策略，上层是以最大化聚合商收益收入为目标，考虑充电站间的非合作博弈制定充电价格，下层策略为用户选择最优充电站，同时根据荷电状态及充电价格计算最优充电量。

选择了合适的充电桩之后，许多文献研究了行驶至充电桩的路径规划，文献[20]考虑了电动汽车行驶过程中的快慢充电，计及电池损耗以成本最小为目标对路径进行优化，在此基础上提出了选择指标，并用 LPGA 进行路径优化求解；文献[21]设计了“有意识”的路径规划系统，为了最小化用户行驶至充电站的时间，结合了各个充电站的历史数据与其他用户实时行驶数据合理的规划行程；文献[22]利用排队理论估计充电桩的等待时间，并根据交通数据建立道路速度矩阵，建立最小化总时间和总成本的多目标规划，并采用两个目标加权相加的方法转成单目标规划求解。

在当前私人充电桩缺乏有效市场及统筹管理的背景下，本文提出了由聚合商集群统筹管理的私人充电桩共享模式。以寻求即时快速充电的用户为研究对象，分析了影响快充用户选择的心理学和行

为学因素，建立了充电桩择优评价函数，设计了考虑聚合商利益和用户满意度的分区域充电价格机制，并通过算例验证了所提方法的有效性。

1 充电桩择优函数

1.1 电动汽车状态模型

根据用户行车特性，各电动汽车的状态有所不同，当电动汽车发起充电请求时，聚合商对应的择优服务模块将接收到 EV 的以下信息：

$$\Omega = [SOC^e \quad SOC^o \quad T^E \quad L^E \quad D^E \quad Q^E \quad p^{fast} \quad R^E] \quad (1)$$

式中： SOC^o 和 SOC^e 分别为用户发起请求时的电池荷电状态及离开时预计的荷电状态，其数值均在 0 至 1 中间； T^E 为发起请求的时间，根据快充和慢充的充电机制不同，用户选择快充时通常是因为要去某个目的地电量不够或需要在短暂停留的时间获得大量电能； L^E 和 D^E 代表用户当前所在的位置和预计的目的地。EV 电池的容量用 Q^E 表示， p^{fast} 代表该电动汽车额定快充充电功率，每公里消耗的电量用 R^E 表示。一天内的 EV 集群用集合 $N\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示， n 即一天内发起请求的 EV 数量，该聚合商所管理的私人充电桩集群用集合 $M\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 表示， m 即聚合商管辖范围内的充电桩总数。

1.2 充电桩择优过程

设定策略调整周期为一天，聚合商根据充电桩桩主提供的信息初始化该私人充电桩，假设第 j 个充电桩当天总共有 s_j 个可用时间段， s_j 中 j 表示该充电桩的序号，设 T_{jq} 为第 j 个充电桩的第 q 个可用时段，其中 q 表示当天可用时间段的序号， $q=1, 2, \dots, s_j$ ，该时段起止时间分别为 T_{jq}^b 和 T_{jq}^e 。

为了更直观的表述各变量，定义含 i 下标的变量表示 i 电动汽车及车主的对应参数， $i=1, 2, \dots, n$ ；含 j 下标的变量表示 j 充电桩的对应参数， $j=1, 2, \dots, m$ ，后文不再赘述。

用户发起充电请求时，首先计算该电动汽车剩余电量可支撑的行驶距离，如图 1 所示。

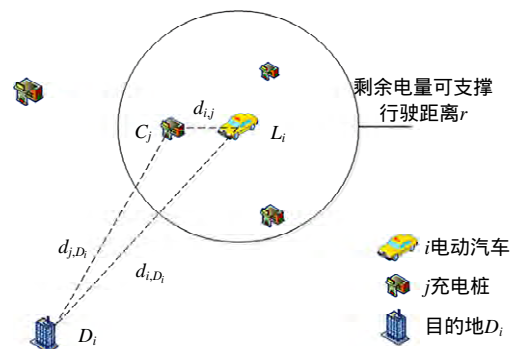


图 1 快充选择范围说明

Fig. 1 Range of fast charging

图中： d_{ij} 为车主*i*到*j*充电桩的距离； $d_{j,Di}$ 为*j*充电桩到车主*i*的目的地的距离； $d_{i,Di}$ 为电动汽车*i*的起点到终点的距离，圆形区域的半径 r_i 即为剩余电量可支撑范围，考虑到本文策略不计及具体行驶路线，因此保留部分裕度确保电动汽车能够到达对应充电桩。半径 r_i 的计算公式如下

$$r_i = (1 - \alpha) \frac{Q_i^E \cdot S_{OCi}^o}{R_i^E} \quad (2)$$

其中 α 为裕度留存系数。

确定剩余电量可支撑到达的充电桩后，根据后文所述的择优函数选定充电桩，用户确认后，该充电桩对应的时段将被保留，其他用户无法占用。

1.3 充电桩择优评价函数

传统的充电桩择优评价通常将所有影响因素进行乘除运算，其优势是数据处理过程简单明了，但它不能描述用户的不满意程度，也不能根据用户的评价约束价格。为了解决这一问题，本文采用标准化的方法，包含两个方面：趋同性和无量纲处理。趋同性处理主要解决不同性质的数据无法直接加减的问题；而无量纲处理主要解决数据的可比性，以便更好的对比^[23]。本文采用最小最大法对不同指标进行标准化处理，公式如下：

$$X^n = \frac{(x - x^{\min})}{(x^{\max} - x^{\min})} \quad (3)$$

式中： X^n 表示标准化后的数值； x^{\min} 和 x^{\max} 表示该指标的最大值和最小值。

考虑到电量、经济型、路程、时间对用户选择充电桩的影响，分别用 u^1, u^2, u^3, u^4 表示其影响指标， U^1, U^2, U^3, U^4 表示标准化后可用于比较的值，据此提出*j*充电桩择优评价函数 U_j 如下：

$$U_j = f(U_j^1, U_j^2, U_j^3, U_j^4) \quad (4)$$

获得电量对于用户来说是有积极作用的，但是由于不同充电桩可用时段不同，可能会导致用户无法获得理想电量便要强制离开，将用户能够获得的电量构造一个评价指标，具体计算方法如下：

$$u_j^1 = \frac{T_{ij}^c p^{\text{fast}}}{(S_{OCi}^e - S_{OCi}^o) Q_i^E} \quad (5)$$

其中 T_{ij}^c 表示*i*电动汽车在*j*充电桩下真实的充电时间。根据定义， u^1 的取值范围在0~1之间，因此其标准化后的计算公式如下：

$$U_j^1 = \frac{u_j^1 - u_j^{1\max}}{u_j^{1\max} - u_j^{1\min}} \quad (6)$$

T_{ij}^c 求取步骤如下：

首先结合即时交通信息计算*i*电动汽车行驶至

*j*充电桩需要的时间 T_{ij}^J 。

然后计算充至用户预期电量所需的时间 T_i^{ch} ：

$$T_i^{\text{ch}} = \frac{(S_{OCi}^e - S_{OCi}^o) Q_i^E}{p^{\text{fast}}} \quad (7)$$

由于充电桩共享时间等约束，实际可充电时间不一定等于 T_i^{ch} ，因此结合已知信息计算 T_{ij}^c ，以下在不同场景下计算 T_{ij}^c 。

1) 汽车到达充电桩时*j*充电桩已开启。

汽车到达充电桩时充电桩未被占用且该时段未来未被预定。

实际充电时间为

$$T_{ij}^c = \begin{cases} T_i^{\text{ch}}, & T_i^E + T_{ij}^J + T_i^{\text{ch}} \leq T_{jq}^e \\ T_{jq}^e - T_i^E - T_{ij}^J, & T_i^E + T_{ij}^J + T_i^{\text{ch}} > T_{jq}^e \end{cases} \quad (8)$$

其中 T_{jq}^e 为*j*充电桩该时段的终止时间，此时无等待时间。

汽车到达充电桩时充电桩未被占用且该充电桩未来未被预定。

实际充电时间为：

$$T_{ij}^c = \begin{cases} T_i^{\text{ch}}, & T_i^E + T_{ij}^J + T_i^{\text{ch}} \leq T_j^b \\ T_j^b - T_i^E - T_{ij}^J, & T_i^E + T_{ij}^J + T_i^{\text{ch}} > T_j^b \end{cases} \quad (9)$$

其中 T_j^b 为该时段被预定的开始时间，此时无等待时间。

汽车到达充电桩时充电桩被占用且该充电桩未来未被预定。

所需的等待时间为 T_j^w ，假定该充电桩占用结束时间为 T_j^e ，则等待时间计算如下：

$$T_j^w = T_j^e - (T_i^E + T_{ij}^J) \quad (10)$$

实际充电时间为：

$$T_{ij}^c = \begin{cases} T_i^{\text{ch}}, & T_j^e + T_i^{\text{ch}} \leq T_{jq}^e \\ T_{jq}^e - T_j^e, & T_j^e + T_i^{\text{ch}} > T_{jq}^e \end{cases} \quad (11)$$

汽车到达充电桩时充电桩被占用且该时段未来被另一车主预定。

实际充电时间为

$$T_{ij}^c = \begin{cases} T_i^{\text{ch}}, & T_j^e + T_i^{\text{ch}} \leq T_j^b \\ T_j^b - T_j^e, & T_j^e + T_i^{\text{ch}} > T_j^b \end{cases} \quad (12)$$

等待时间计算如下

$$T_j^w = T_j^e - (T_i^E + T_{ij}^J) \quad (13)$$

2) 汽车到达充电桩时充电桩未开启。

充电桩下一时段从开启时就被预定。

假设被预定的结束时间为 T_j^e 且充电桩下一时段结束时间为 T_{jq}^e 则所需等待时间如下：

$$T_j^w = T_j^e - (T_i^E + T_{ij}^J) \quad (14)$$

实际充电时间为：

$$T_{ij}^c = \begin{cases} T_i^{\text{ch}}, & T_j^e + T_i^{\text{ch}} \leq T_{jq}^e \\ T_{jq}^e - T_j^e, & T_j^e + T_i^{\text{ch}} > T_{jq}^e \end{cases} \quad (15)$$

充电桩下一时段开启时未被占用但未来被预定。

假设充电桩下一时段开启时间为 T_{jq}^b ，则等待时间为

$$T_j^w = T_{jq}^b - (T_i^E + T_{ij}^J) \quad (16)$$

被预定开始时间为 T_j^b ，实际充电时间为：

$$T_{ij}^c = \begin{cases} T_i^{\text{ch}}, & T_{jq}^b + T_i^{\text{ch}} \leq T_j^b \\ T_j^b - T_{jq}^b, & T_{jq}^b + T_i^{\text{ch}} > T_j^b \end{cases} \quad (17)$$

充电桩下一时段未被预定。

等待时间为：

$$T_j^w = T_{jq}^b - (T_i^E + T_{ij}^J) \quad (18)$$

实际充电时间为：

$$T_{ij}^c = \begin{cases} T_i^{\text{ch}}, & T_{jq}^b + T_i^{\text{ch}} \leq T_j^e \\ T_{jq}^e - T_{jq}^b, & T_{jq}^b + T_i^{\text{ch}} > T_j^e \end{cases} \quad (19)$$

经济性指标用行驶每公里所需的费用来量化，本文采用油价与充电价格对比，并且用电网电价作为充电价格的下限，电动汽车相比于燃油车的经济性对于用户来说是有积极影响的，指标以每公里相比燃油车节约的价格构建，具体如下：

$$u_j^2 = \lambda^{\text{gas}} - \beta R_i^E \lambda_j^{\text{fast}} \quad (20)$$

其中： λ^{gas} 为每公里对应的燃油消耗金额； β 为电池损耗等因素计算的转换系数； R_i^E 为 i 电动汽车行驶一公里消耗的电量； λ_j^{fast} 为充电价格(单位元/kW·h)。

定义指标最大值为燃油车每公里折算价格后的价格，即

$$u_j^{2\text{max}} = \lambda^{\text{gas}} \quad (21)$$

充电价格的最小值为电网此时的电价，用 λ^{grid} 表示，即

$$u_j^{2\text{min}} = R_i^E \lambda^{\text{grid}} \quad (22)$$

结合以上信息，价格构造的标准化后的评价指标计算公式如下

$$U_j^2 = \frac{(\lambda^{\text{gas}} - \beta R_i^E \lambda_j^{\text{fast}} - R_i^E \lambda^{\text{grid}})}{(\lambda^{\text{gas}} - R_i^E \lambda^{\text{grid}})} \quad (23)$$

在充电桩择优过程中，传统的路程选择通常是以顺路作为评判标准，这样会导致一些离所在位置非常近但与目的地方向相反的充电桩被淘汰，因此本文研究用户所能忍受的“绕路”距离，其通常约

束在由起点和目的地作为直径的圆内，绕路对于用户来说是有负面影响的，具体说明如下：

$$u_j^3 = d_{i,j} + d_{j,D_i} - d_{i,D_i} \quad (24)$$

通过调研得出用户所能忍受的绕路距离为 $u_j^{3\text{max}}$ ，最优选择是不需绕路，即

$$u_j^{3\text{min}} = 0 \quad (25)$$

综上，距离构造的标准化指标如下

$$U_j^3 = \frac{d_{i,j} + d_{j,D_i} - d_{i,D_i}}{u_j^{3\text{max}}} \quad (26)$$

由于本文所提内容与充电价格的设计相关，因此，在时间上的讨论添加了快充相比较慢充所能节约的时间，同时考虑了等待时间，消耗的时间对于用户来说是负面的影响，具体说明如下：

$$u_j^4 = u_j^w - u_i^s \quad (27)$$

其中： u_j^w 表示 j 充电桩的等待时间指标； u_i^s 表示 i 电动汽车快充相较于慢充节约的时间指标，分别对 2 个参数进行标准化，快充相对于慢充节约的时间为：

$$u_i^s = Q_i^E \left(\frac{S_{\text{oci}}^e - S_{\text{oci}}^o}{p_i^{\text{reg}}} - \frac{S_{\text{oci}}^e - S_{\text{oci}}^o}{p_i^{\text{fast}}} \right) \quad (28)$$

其中 p_i^{reg} 代表 i 电动汽车常规充电的充电功率。

求得 u_i^s 最大值在用户所需充电量为百分之百时：

$$u_i^{s\text{max}} = Q_i^E \left(\frac{1}{p_i^{\text{reg}}} - \frac{1}{p_i^{\text{fast}}} \right) \quad (29)$$

用户所需电量为 0 时，求得 u_i^s 最小值为 0。

等待时间指标如下：

$$u_j^w = T_j^w \quad (30)$$

最大等待时间为 i 电动汽车车主所能忍受的最大等待时间 T_i^{no} ，最小为 0。

综合以上讨论得出时间构造的标准化指标公式：

$$U_j^4 = \frac{T_j^w}{T_i^{\text{no}}} - \frac{u_i^s}{u_i^{s\text{max}}} \quad (31)$$

基于以上的讨论， j 充电桩择优函数为：

$$U_j = \omega_1 U_j^1 + \omega_2 U_j^2 - \omega_3 U_j^3 - \omega_4 U_j^4 \quad (32)$$

ω 为每个指标的权重系数，由用户调研和专家意见得出。

2 两步式充电电价设计

2.1 基准电价的确定

第一步依据用户满意度及聚合商利益确定基准价格，在定价机制之前，本文提出了一个聚合商收益系数 X_u ：

$$X_i^u = \begin{cases} p_i, & U_i^{\max} < 0 \\ 1, & U_i^{\max} \geq 0 \end{cases} \quad (33)$$

X_i^u 表征的是 i 车主选择充电的概率, 其中, U_i^{\max} 表示分别计算车主 i 可用充电桩的择优函数后得到的最大值, U_i^{\max} 大于等于 0 时, 说明最优的充电桩使得用户获得的积极影响大于消极影响, 即该用户能够匹配合适的充电桩; 当择优函数小于 0 时, 则说明可用充电桩可能无法使用户满意, 此时用户很大可能放弃充电。

采用 $p_i(n)$ 表示 i 车主在所有充电桩都不满意时仍然选择充电的概率, 用户 i 第一次发生 U_i^{\max} 小于 0 的情况时, 用户仍然充电则 p_i 初始值为 1, 用户选择不充电则 p_i 初始值为 0。递推公式如下^[24]:

$$p_i(k+1) = \frac{t_i(k+1)}{k+1} = \frac{t_i(k+1)}{k} \cdot \frac{k}{k+1} = \frac{[t_i(k) + \delta_i(k+1)] \cdot [(k+1) - 1]}{k} \cdot \frac{k}{k+1} = p_i(k) + \frac{1}{k+1} [\delta_i(k+1) - p_i(k)] \quad (34)$$

其中: $p_i(k)$ 是描述车主 i 的充电概率; k 表示发起充电请求 U_i^{\max} 小于 0 的次数; $t_i(k)$ 代表前 k 次中用户选择充电的次数; $\delta_i(k)$ 代表的是车主 i 第 k 次的选择, 当车主选择充电时, $\delta_i(k)$ 为 1, 当车主选择不充电时, $\delta_i(k)$ 为 0。

用户在第 $k+1$ 次 U_i^{\max} 小于 0 时, 聚合商认为用户选择充电的概率为 $p_i(k)$, 用户在第 $k+2$ 次 U_i^{\max} 小于 0 时, 聚合商认为用户选择充电的概率为 $p_i(k+1)$ 。该算法能够对每一个用户单独计算其概率, 不断积累数据实现每次更新, 获得更加准确的结果。简化递推公式如下:

$$p_i(k+1) = p_i(k) + \frac{1}{k+1} [\delta_i(k+1) - p_i(k)] \quad (35)$$

当所有充电桩均无法使用户满意且用户放弃充电时, 用户可通过修改设置(如预期电量)以便系统重新计算充电桩择优函数协助用户选择合适的充电桩。

聚合商根据对管辖部分历史大数据的研究, 制定基准价格。聚合商的利益最大化目标用 F_1 表示, F_1 的求取根据历史信息求得典型日的用户组成, 并最大化收入。具体目标函数如下:

$$F_1 = \max[\sum_{i=1}^n X_i^u T_{ij}^c p_i^{\text{fast}} \lambda^e] \quad (36)$$

其中: n 为典型日用户数量; λ^e 为所求的基准电价, 由于电网电价与合同价格在同一时刻是固定的, 为了简化问题, 直接以聚合商收入为参考指标。

从用户满意度来考虑, 用 F_2 表示最小化用户不

满意度, 即:

$$F_2 = \min N^{\text{un}} \quad (37)$$

其中 N^{un} 为 U_i^{\max} 小于 0 的用户个数。

在处理该多目标规划时, 采用主要目标法求解, 将 F_1 作为优化中的主要目标, 将 F_2 变成约束条件, 聚合商通过分析能够接受的最大不满意用户数 N^{max} , 即 F_2 转换为约束条件:

$$\max N^{\text{un}} \leq N^{\text{max}} \quad (38)$$

在满足该条件的情况下得到 F_1 的最优解。

2.2 区域价格优化

确立基准价格之后, 由于本文面向的充电对象是在时间上调度尺度较小的群体, 若集中充电将在短时间内产生较大功率波动, 会对局部电网造成冲击, 不加调控手段极易造成拥堵, 因而聚合商可通过电价的差异有效的对用户进行引导。选择快速充电的用户对于顺路情况相似的充电桩具体位置差异敏感度较低, 但若存在价格差异, 用户则会有意的选择充电桩, 基于快充用户的行为学研究, 价格差异作为合理的引导有段, 一方面可以有效分散电动汽车充电的地点, 从而减少对电网的影响; 另一方面当电动汽车数量增加时能够提高整体充电桩的使用率增加聚合商的收益。

首先, 聚合商采集每天的充电信息, 然后结合每个充电桩所在区域的车流数据信息, 依靠聚类算法将管辖区域尽可能的分为 Z 大类, 即 Z 个大区域集群用 A 集合表示; 最后, 聚合商根据所提的动态价格更新机制引导用户选择充电桩实现区域平衡。接下来将对分区域定价机制进行说明。

假设聚合商将管辖范围分为 Z 个区域, W_{hz} 为第 h 天 z 区域的总充电次数, 其中, $z=1, 2, \dots, Z$ 。 M_z 为 z 区域的充电桩个数。用 $\lambda_{hz}^{\text{fast}}$ 表示第 h 天 z 区域充电桩的快充价格, 每个区域价格更新公式如下:

$$\lambda_{hz}^{\text{fast}} = [1 + \rho(\frac{W_{hz}}{M_z} - \frac{\sum_{z \in A} W_{hz}}{m})] \lambda^e \quad (39)$$

式中: m 为聚合商管理的私人充电桩总数; ρ 表示价格更新因子, 选取不合适则不能得到良好的收敛效果, 若价格更新幅度过大会引起新的充电高峰同时影响用户忠诚度, 幅度过小用户不易察觉则无法实现平衡目的。可以看出使用率偏高的区域价格会逐渐上升, 使用率偏低的区域价格会逐渐下降。

价格停止更新的判据为连续多日所有充电桩前 d 天价格标准差小于极小值, 如式(40), 此时价格停止更新, 设置为各区域暂时的稳定充电价格。

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{H-d}^H (\lambda_H^{\text{fast}} - \overline{\lambda^{\text{fast}}})^2} \leq \varepsilon \tag{40}$$

其中： σ_H 为第 H 天的前 d 天的标准差； λ_H^{fast} 为第 H 天的充电价格； $\overline{\lambda^{\text{fast}}}$ 为第 H 天的前 d 天充电价格的平均值，极小值用 ε 表示。当聚合商管辖范围内发生可感知车流变化如行政规划或人流移动等因素时，重启价格更新机制直至达到稳定。

3 算例仿真

3.1 系统描述与参数设定

调查研究上海某地区车流密集程度，中心车流量最大，向四周人流量依次递减，以此为虚拟地图建立依据，为了简化背景、突出方法，本算例建立了一个如图 2 所示的 10 km*10 km 的虚拟地图。如图所示，管辖区域被分割为成 5 大块如图 2 所示分别是 Z1、Z2、Z3、Z4、Z5，Z1 到 Z5 的车流量依次减少，蓝点代表私人充电桩，假设有 200 个充电桩，它们均匀地分布在地图中。

本算例假设发起充电请求的电动汽车有着相同的特性，以某型号电动汽车为例，其参数如表 1 所示。

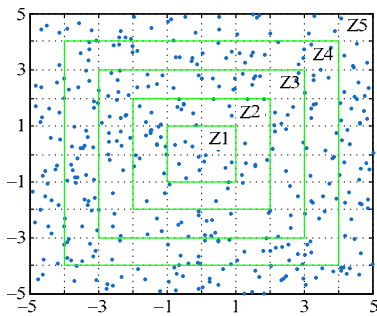


图 2 虚拟地图
Fig. 2 Virtual map

表 1 电动汽车相关参数 Tab. 1 EV technical parameters			
参数	数值	参数	数值
$Q/\text{kW}\cdot\text{h}$	82	$p^{\text{fast}}/\text{kW}$	8.2
$R/(\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kW})$	0.2	P^{reg}/kW	27.3

同样的，假设每个私人充电桩在每天的上午 9:00—下午 5:00 提供共享服务，以 1 min 为时间步长，每天的充电高峰时段为上午 9:00—10:00 和下午 3:00—4:00，高峰时段每分钟产生 5 辆电动汽车发起充电请求，平时段每分钟产生 2 辆。电动汽车生成的位置围绕中心点呈正态分布 $X \sim N(0, 2.2)$ ，假设裕度系数 α 为 0.05。

由于当前有关电动汽车尚未大规模推广，其交通数据较少，在研究电动汽车行驶特性时通常以燃油车的交通信息为基础，大部分参考 2009 全美家庭

行驶调查(NHTS)的数据^[25]，电动汽车发起充电请求时剩余荷电状态(SOC)概率密度函数如式(41)所示。

$$f(S_{\text{SOCN}}) = \frac{1}{\sqrt{2D(1-S_{\text{SOCN}})\sigma_d} \exp\{-\frac{[\ln(1-S_{\text{SOCN}}) + \ln D - \mu_d]^2}{2\sigma_d^2}\}} \tag{41}$$

式中， $\mu_d=3.019$ ， $\sigma_d=1.123$ ， D 表示已行驶距离，单位为 km， D 满足式(42)的正态分布。

$$f_D(d) = \frac{1}{d\sigma_D\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{(\ln d - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}) \tag{42}$$

其中， $\mu_D=3.7$ ， $\sigma_D=0.9$ 。

由于本文不涉及具体的路线规划，为了简化问题，假设从内到外的 5 个区域平均速度为 18 km/h，20 km/h，25 km/h，27 km/h，30 km/h。另外，当遇到 U_i^{max} 小于 0 的情况， $\delta_i(n)$ 在 0、1 中随机选择，假设所有的用户无偏好，即计算择优函数时所有的权重均相同。

3.2 充电价格模型

3.2.1 基准电价确定

虽然电网实行分时电价，但由于本文的研究对象是即时的快速充电，时间上的价格差异影响较小，因此为了简化问题，假设聚合商从电网买电的价格是 0.6 元/kW·h。结合以上内容，仿真模拟充电电价从 0.8 元/kW·h 至 2.0 元/kW·h 时聚合商的收入和 U_i^{max} 小于 0 时的车主个数。

从图 3—4 可以看出当充电价格在 1.5 元/kW·h 时聚合商获得的收入最大，但是价格超过 1.2 元/kW·h 时已经有用户开始不满。价格增长超过 1.5 元/kW·h 的初期，由于电价增加即使已经有用户因不满而放弃充电聚合商仍然处于收益增加期，但价格继续上升后，不满意比率大幅度上升聚合商收益逐渐减小。因此在第一步基准价格制定过程中聚合商需参考两个最优值。在此仿真中，聚合商以自身利益最大化为为主，设定充电价格 λ^e 为 1.5 元/kW·h。

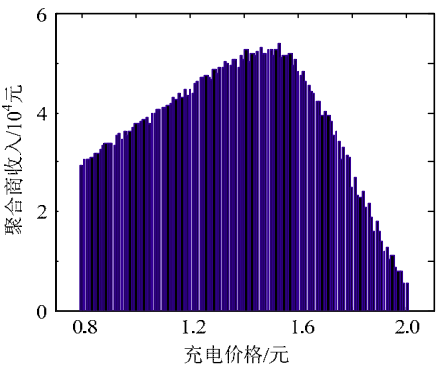


图 3 聚合商收益随价格变化趋势
Fig. 3 Income of aggregator in different price

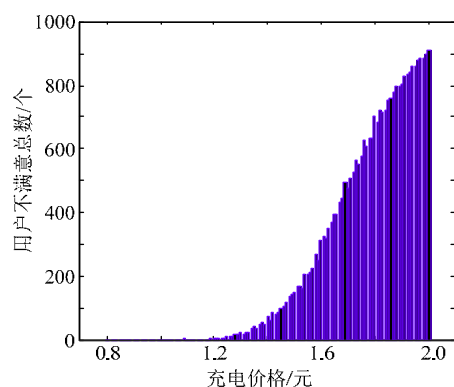


图4 用户不满意度随价格变化趋势

Fig. 4 Number of dissatisfied users in different price

3.2.2 区域价格

求出基准价格后,为了进一步的引导用户,使得充电地点尽可能的分散,需要进行分区域价格优化,结合上述内容。对价格的变化趋势及价格标准差进行了仿真,结果如图5—6所示。

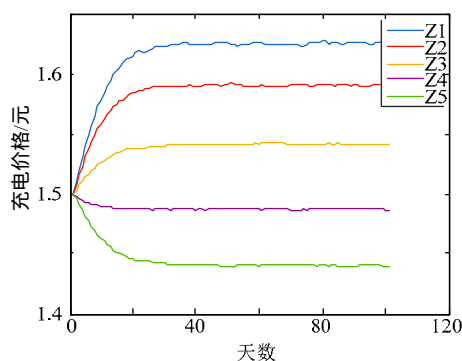


图5 不同区域价格变化趋势

Fig. 5 Price tendency of each area

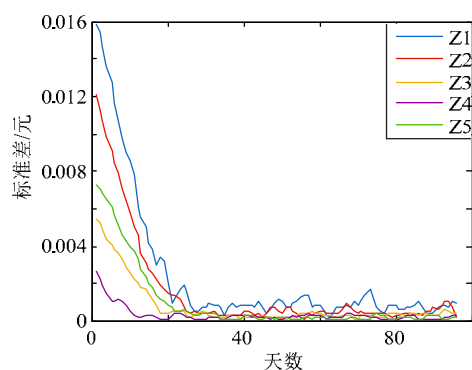


图6 不同区域价格标准差走势

Fig. 6 Price standard deviation tendency of each area

由图6看出所有的区域标准差在25天后持续趋于一个极小值,中心区域由于需求量大,在价格调整策略中价格提升以引导用户去其他区域充电,而最偏远的区域则通过降价吸引更多的用户。

为了观察动态价格下聚合商与用户的变化,算例仿真了价格调整过程中聚合商总收入及总 U_i^{\max} 值随着价格改变的趋势。结果如图7—8所示。

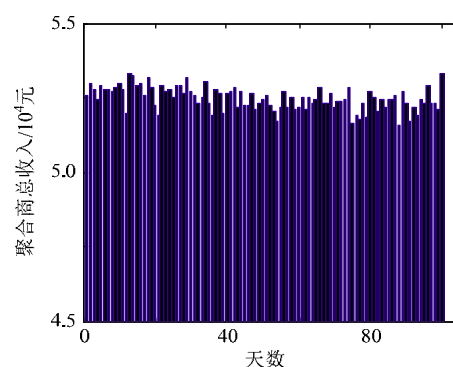


图7 总收入趋势

Fig. 7 The whole income of aggregator

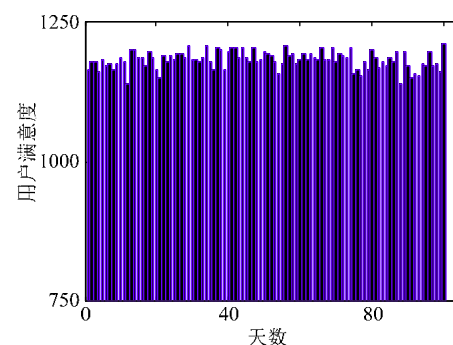


图8 总用户满意度趋势图

Fig. 8 Whole satisfaction of customers

从图7和图8可以看出,在第2步区域价格分别优化时,聚合商获得的总收益与用户满意度较为稳定,验证了动态价格机制不会影响用户与聚合商的双边利益。

3.3 平衡效果

以上仿真验证了所提价格机制在聚合商利益与用户满意度方面的可行性之后,本算例进一步对所提价格机制对平衡区域的能力进行验证。根据上述内容,在充电桩择优时,每个指标都有对应的阈值,若所有充电桩均在阈值之外,则该用户无法进行充电行为。图9仿真了无法充电的用户个数在价格调整过程中的变化。从图中可以看出,调整初期每天有15个以上的用户无法进行充电行为,而随着价格机制的引导,逐渐减少到5个用户以内。

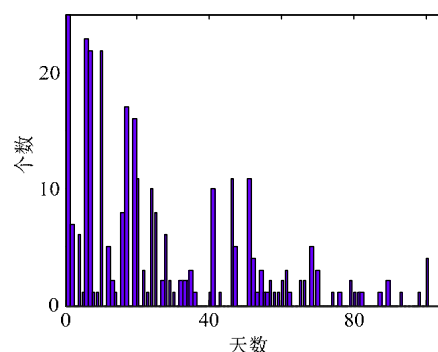


图9 不能充电用户个数趋势图

Fig. 9 The number of "cannot" customers

衡量各区域是否平衡的指标是各区域使用频次的变化,图 10 是各区域平均单个充电桩一天被使用的次数变化趋势。

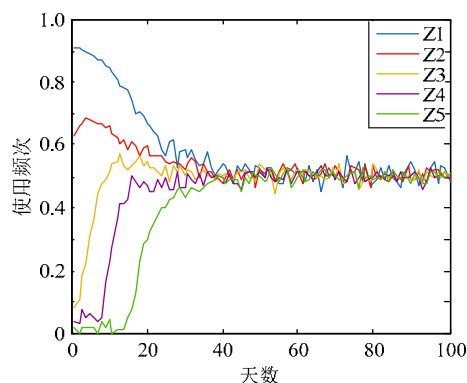


图 10 各区域使用频率走势

Fig. 10 Number of used times of each area

从图 10 中可以看出,调整初期,由于偏远地区发起充电需求车辆少且缺乏竞争优势,平均使用次数不足 1,电动汽车大多集中于中心区域进行充电行为,而随着价格发挥作用,各区域平均使用次数逐渐靠近,最终实现了地理位置上的充电分散,避免了充电资源集中在少数充电桩上,同时,充电地点分散后,当发起充电请求的人变多时仍能及时的解决大部分人的充电需求,聚合商也能因此收获更丰厚的利润。

4 结语

本文以寻求即时快速充电的用户为对象,提出了私人充电桩以聚合商为中介的共享模式,研究了充电桩择优函数和考虑聚合商利益及用户满意度的充电价格机制。

具体工作如下:1)设计了考虑电量、经济性、路程、时间的充电桩择优函数;2)以聚合商利益最大化以及用户不满意程度最小化为目标求取了基准充电价格,接着考虑分散用户充电地点避免中心区域充电拥挤设计了分区域动态充电价格机制;3)算例仿真结果显示本文设计的充电价格机制能够在不影响聚合商利益及用户满意度的情况下有效分散用户充电地点,有利于充电负荷的友好接入电网,同时减少由于无合适充电桩而无法进行充电的用户数量。

参考文献

[1] 杨晓东,张有兵,赵波,等.供需两侧协同优化的电动汽车充放电自动需求响应方法[J].中国电机工程学报,2017,37(1):120-130. Yang Xiaodong, Zhang Youbing, Zhao Bo, et al. Automated demand response method for electric vehicles charging and discharging to achieve supply-demand coordinated optimization[J]. Proceedings of

the CSEE, 2017, 37(1): 120-130(in Chinese).

[2] Kemp R, Peter H. Electric vehicles charged with potential[M]. London: Royal Academy of Engineering, 2010.

[3] 李志伟,赵书强,刘应梅.电动汽车分布式储能控制策略及应用[J].电网技术,2016,40(2):442-450. Li Zhiwei, Zhao Shuqiang, Liu Yingmei. Control strategy and application of distributed electric vehicle energy storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 442-450(in Chinese).

[4] Kuran M, Carneiro A, Iannone L, et al. A smart parking lot management system for scheduling the recharging of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2942-2953.

[5] 高赐威,李倩玉,李慧星,等.基于负荷聚合商业务的需求响应资源整合方法与运营机制[J].电力系统自动化,2013,37(17):78-86. Gao Ciwei, Li Qianyu, Li Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86(in Chinese).

[6] 王姝凝,杨少兵.居民小区电动汽车充电负荷有序控制策略[J].电力系统自动化,2016,40(4):71-77. Wang Shuning, Yang Shaobing. A coordinated charging control strategy for electric vehicles charging load in residential area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 71-77(in Chinese).

[7] 潘樟惠,高赐威,刘顺桂.基于需求侧放电竞价的电动汽车充放电调度研究[J].电网技术,2016,40(4):1140-1146. Pan Zhanghui, Gao Ciwei, Liu Shungui. Research on charging and discharging dispatch of electric vehicles based on demand side discharge bidding[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1140-1146(in Chinese).

[8] 王湘,杨健维,何正友.一种 V2G 模式下计及开断概率和负荷转移概率的配电网可靠性评估算法[J].电网技术,2014,38(8):2213-2219. Wang Xiang, Yang Jianwei, He Zhengyou. A reliability evaluation algorithm for distribution network under V2G mode considering probabilities of breaking and load transfer[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2213-2219(in Chinese).

[9] 葛少云,郭建伟,刘洪,等.计及需求侧响应及区域风光出力的电动汽车有序充电对电网负荷曲线的影响[J].电网技术,2014,38(7):1806-1811. Ge Shaoyun, Guo Jianyi, Liu Hong, et al. Impacts of electric vehicle's ordered charging on power grid load curve considering demand side response and output of regional wind farm and photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1806-1811(in Chinese).

[10] 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. Coordinated charging strategy for PEV charging stations based on dynamic time-of-use tariffs[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3638-3646(in Chinese).

[11] 佟晶晶,温俊强,王丹,等.基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J].电力系统保护与控制,2016,44(1):17-23. Tong Jingjing, Wen Junqiang, Wang Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23(in Chinese).

[12] 朴龙健,艾芊,余志文,等.计及客户满意度的电动汽车多代理

- 充电定价策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 68-75.
- Piao Longjian, Ai Qian, Yu Zhiwen, et al. Multi-agent-based pricing strategy for electric vehicle charging considering satisfaction degree [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 68-75(in Chinese).
- [13] Hausler F, Crisostomi E, Schlote A, et al. Stochastic park-and-charge balancing for fully electric and plug-in hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(02): 895-901.
- [14] Wang C, Wu D, Zeng H, et al. CPS based electric vehicle charging directing system design in Smart Grid[C]//Innovative Smart Grid Technologies Conference. Washington, DC: IEEE, 2016: 1-5.
- [15] Yang T, Xu X, Guo Q, et al. EV charging behaviour analysis and modelling based on mobile crowdsensing data[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(7): 1683-1691.
- [16] 严奕遥, 罗禹贡, 朱陶, 等. 融合电网和交通网信息的电动车辆最优充电路径推荐策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 310-318.
- Yan Yiyao, Luo Yugong, Zhu Tao, et al. Optimal charging route recommendation method based on transportation and distribution information[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 310-318(in Chinese).
- [17] Guo Q, Xin S, Sun H, 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.
- [18] 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. Stackelberg game based retailer pricing scheme and EV charging management in smart residential area[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 939-945(in Chinese).
- [19] Tan J, Wang L. Real-time charging navigation of electric vehicles to fast charging stations: a hierarchical game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, (99): 1-1.
- [20] Yang H, Yang S, Xu Y, et al. Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by learnable partheno-genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 657-666.
- [21] Weerd M M de, Stein S, Gerding E H, et al. Intention-aware routing of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(5): 1472-1482.
- [22] Yang H, Deng Y, Qiu J, et al. Electric vehicle route selection and charging navigation strategy based on crowd sensing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2214-2226.
- [23] Jan Tinbergen. Econometrics[M]. London and New York: Routledge, 2004.
- [24] Meng F L, Zeng X J. A profit maximization approach to demand response management with customers behavior learning in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1516-1529.
- [25] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
- Tian Liting, Shi Shuanglong, Jia Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130(in Chinese).



李东东

收稿日期: 2017-05-20。

作者简介:

李东东(1976), 男, 博士, 教授, 研究方向为风力发电与电力系统稳定控制、智能用电, E-mail: powerlidd@163.com;

邹思源(1994), 女, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为电动汽车与能源互联网, E-mail: zhoumiyuan@hotmail.com。

(责任编辑 王晔)