

# 电动汽车用户充电折扣返利及预约优先级动态调整策略

侯慧<sup>1</sup>, 王逸凡<sup>1</sup>, 黄亮<sup>1,2</sup>, 谢长君<sup>1</sup>, 张锐明<sup>3</sup>, 陈跃<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 复变时空(武汉)数据科技有限公司, 湖北 武汉 430070;  
3. 广东广顺新能源动力科技有限公司, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 路径焦虑是电动汽车面临的主要问题, 如何引导电动汽车到达最佳充电设施是一个值得研究的问题。针对此问题, 提出了一种电动汽车充电用户折扣返利和预约优先级动态调整策略, 以提高电动汽车用户充电满意以及充电站收益。首先, 分析了电动汽车用户对充电站折扣和预约策略的响应特征, 建立了结合经济满意度和预约满意度的用户满意度决策模型。其次, 建立了以充电站效益最大化为目标的充电站效益模型。通过对所提出策略的仿真, 验证了该策略的有效性, 表明该策略能有效吸引用户充电, 提高充电站的收益, 并提高用户满意度。

**关键词:** 电动汽车; 充电站; 用户满意度; 预约优先级; 折扣

## Dynamic adjustment strategy of charging discount rebate and reservation priority for electric vehicle users

HOU Hui<sup>1</sup>, WANG Yifan<sup>1</sup>, HUANG Liang<sup>1,2</sup>, XIE Changjun<sup>1</sup>, ZHANG Ruiming<sup>3</sup>, CHEN Yue<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Transformer Space-Time Data Technology Limited Company, Wuhan 430070, China; 3. Guangdong Guangshun Renewable Energy Technology Limited Company, Foshan 528000, China)

**Abstract:** Path anxiety is a major problem for electric vehicles. How to guide an electric vehicle to the optimal charging facility is a problem worth studying. For this problem, a dynamic adjustment strategy of charging discount rebate and reservation priority for electric vehicle users is proposed. First of all, the response characteristics of EV users to the discounts and reservation strategies of charging stations are analyzed and the user satisfaction decision model including economic satisfaction and reservation satisfaction is established. Secondly, the charging station benefit model with the goal of maximizing the benefits of the charging station is established. Eventually, the effectiveness of the proposed model is verified by the simulation results. The simulation results show that the strategy can effectively attract users to charge and improve the interest of the charging station, as well as improve user satisfaction.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB1506802 and No. 2018YFB0105700) and National Natural Science Foundation of China (No. 51977164).

**Key words:** electric vehicles; charging stations; user satisfaction; reservation priority; discount

## 0 引言

随着环境污染的加剧, 有意识选择使用电动汽车的用户逐年增加<sup>[1]</sup>。数量庞大的电动汽车群使得电动汽车充电需求日益增长。

电动汽车充电方式一般可分为慢充和快充两种方式<sup>[2]</sup>。慢充电通常用于居民区、工作场所和电动汽车用户长期居住的其他地方<sup>[3]</sup>。慢充充电时间较

长。快速充电通常应用于重要道路或高速公路的一侧, 以快速补充能量<sup>[4]</sup>。

为应对电动汽车的规模化增长, 越来越多研究着眼于电动汽车的快充过程<sup>[5]</sup>。电动汽车完成快充需求的过程即是选择充电站以及寻找行驶路径的过程<sup>[6]</sup>。部分研究通过分析电动汽车快速充电的一些影响因素为快充需求电动汽车规划合理充电路径, 并选择最优的充电站, 如经济、时间、距离、能耗等因素<sup>[4-10]</sup>。文献[7]建立了以出行总距离、总时间及充电价格三者权值之和最小为目标的电动汽车充电路径规划模型。文献[8]基于路段权值思想和

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1506802, 2018YFB0105700); 国家自然科学基金面上项目资助(51977164)

Dijkstra 最短路径算法,提出一种基于最短距离和行驶时间的最优充电站推荐和路径规划方法。文献[10]以用户到最终目的地的距离、时间成本最小,充电站设备利用率分布均衡为目标,建立电动汽车充电引导模型。文献[4]基于出行能耗,为电动汽车规划最优路径。然而,上述研究仅仅只是从电动汽车角度考虑电动汽车用户出行规划,而没有考虑充电站做出的一些策略对电动汽车用户出行规划的影响。

另一部分研究着眼于充电站或其他电力企业提供的激励政策用于引导用户充电,从而获取更高利益。文献[11]提出了一种用户自主参与的需求响应计划,电力企业为用户提供优惠券激励,鼓励用户在尖峰电价时减少用电需求。文献[12]应用激励响应手段,提出一种计及电动汽车集群充电预测信息,兼顾电网、负荷聚集商与车主三方利益的多目标分布式优化模型。除制定激励折扣机制外,充电站或电力企业还能够制定预约策略以调控电力用户用电。文献[13]结合分时电价时段划分和局部区域分布波动,提出一种基于电动汽车分时预约收费方案。文献[14]结合智能导航系统建立了电动汽车快速预约充电系统。尽管上述文献都分析了激励折扣或预约策略的有效性,但这些研究多数集中在电动汽车慢充需求调度上,没有应用于快充需求。

尽管当前对路径规划、激励折扣和预约策略有所研究,然而在权衡用户体验和充电站效益方面的引导控制手段还较为单一,因此本文结合充电站激励折扣和预约优先级策略,提出了一种电动汽车用户充电折扣返利及预约优先级动态调整策略。文中建立了包含经济满意度和预约满意度的用户满意度决策模型,并建立了充电站效益最大化模型。利用遗传算法对模型进行求解,并通过仿真验证了该模型的有效性。

### 1 折扣返利和预约优先级动态调整策略

本文所应用的场景主要包括三层结构:电网公司、充电站运营商、电动汽车用户。三个层次之间安装有一整套通信网络,以确保电网公司、充电站运营商、用户三个层次之间进行必要的信息交互。

以某城市一片区域为例,应用场景如图 1 所示。图 1 中电网公司处于顶层位置,在宏观层面进行统筹管理以及调度。该区域内具有  $n$  个充电站,这若干个充电站处于第二层次,充电站通过制定相关策略,吸引更多的电动汽车用户前往该充电站充电。电动汽车用户处于底层,根据实际情况以及相应需求,选择前往最满意的充电站充电。因此,图中每个充电站都有自己的充电用户群。

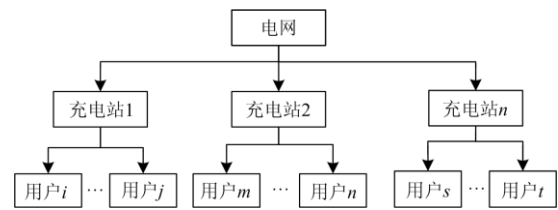


图 1 场景描述

Fig. 1 Scene description

电网公司、充电站以及用户层面具有双向信息流通的渠道,用户和充电站以及充电站和电网公司都能够进行双向信息交流。电网公司出于宏观调控区域内充电功率以及其他指标的目的,会给不同充电站不同的售电价格,用以引导区域内功率流动。充电站根据电网公司给予的售电价格,以最大化充电站效益为目标,制定该充电站能够给予用户的优惠策略,用以吸引用户。用户根据各自实际情况以及不同充电站的优惠策略,选择最满意的充电站进行充电。

电动汽车用户充电折扣返利及预约优先级动态调整策略包含两个模型,分别是用户满意度决策模型和充电站效益模型,分别对应着用户层面和充电站层面。

用户满意度决策模型是根据用户对充电站一系列优惠策略的响应特性,量化用户对于充电站层面中各充电站的满意度。对于图 1 中的用户层面,用户满意度决策模型根据各充电站制定的基准服务费、折扣比例以及预约等级规则,针对经济和预约便利程度,分别量化出用户经济满意度和用户预约满意度。针对不同类型的用户,制定不同的经济与预约权重系数综合两方面的满意度,得到用户对于充电站层面各充电站的综合满意度。

充电站效益模型则对应着图 1 中的充电站层面,充电站效益模型用于衡量充电站层面的每个充电站的收益情况。充电站效益模型会根据用户满意度决策模型形成的用户群计算每个充电站的收益情况,根据每个充电站的收益情况以收益最大化为目标,分别制定各自的优惠策略以及预约规则用以吸引用户。

### 2 用户满意度决策模型

用户满意度决策模型的目标函数主要由两部分组成:经济满意度和预约满意度<sup>[15]</sup>。

1) 经济满意度主要由充电站的基准服务费以及充电站对不同用户的折扣所影响。定义会员矩阵如式(1)所示。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{1,1}, a_{1,2}, \mathbf{L}, a_{1,j} \\ a_{2,1}, a_{2,2}, \mathbf{L}, a_{2,j} \\ \mathbf{M} \quad \mathbf{M} \quad \mathbf{M} \\ a_{i,1}, a_{i,2}, \mathbf{L}, a_{i,j} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $i$  表示电动汽车用户;  $j$  表示充电站;  $a_{i,j}$  表示电动汽车用户  $i$  在充电站  $j$  拥有的会员等级, 分为 1 级、2 级、3 级, 等级依次提升。

各充电站的折扣比例与折扣策略: 1 级会员享受  $x_{j,1}$  折, 2 级会员享受  $x_{j,2}$  折, 3 级会员享受  $x_{j,3}$  折。各充电站基准服务费表示为  $X_j$ 。折扣矩阵为依据会员等级矩阵生成, 折扣矩阵如式(2)所示。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{1,1}, y_{1,2}, \mathbf{L}, y_{1,j} \\ y_{2,1}, y_{2,2}, \mathbf{L}, y_{2,j} \\ \mathbf{M} \quad \mathbf{M} \quad \mathbf{M} \\ y_{i,1}, y_{i,2}, \mathbf{L}, y_{i,j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{Y}$  为用户在充电站享受的折扣矩阵;  $y_{i,j}$  为电动汽车用户  $i$  在充电站  $j$  享受的折扣。

经济满意度用于表征用户到各充电站充电成本的满意程度, 用户到某一充电站充电的成本越高, 用户的满意度越低, 反之亦然。

电动汽车用户  $i$  对充电站  $j$  的经济满意度如式(3)所示。

$$f_{\text{eco}} = \frac{\max\{X_j \cdot y_{i,j}\} - X_j \cdot y_{i,j}}{\max\{X_j \cdot y_{i,j}\} - \min\{X_j \cdot y_{i,j}\}} \quad (3)$$

式中,  $f_{\text{eco}}$  即为电动汽车用户  $i$  对充电站  $j$  的经济满意度。

2) 预约满意度同预约等级成正比关系, 预约等级越高, 充电便利程度越高, 用户的满意度也越高, 反之亦然。

预约优先级与用户的会员等级以及用户距充电站的距离有关。定义距离等级为  $(0, s_{j,1})$ 、 $(s_{j,1}, s_{j,2})$ 、 $(s_{j,2}, \infty)$  三级,  $(0, s_{j,1})$  为 3 级优先级,  $(s_{j,1}, s_{j,2})$  为 2 级优先级,  $(s_{j,2}, \infty)$  为 1 级优先级。电动汽车用户  $i$  距充电站  $j$  的距离表示为  $d_{i,j}$ , 电动汽车用户对充电站的距离等级矩阵如式(4)所示。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{1,1}, \mathbf{L}, d_{1,j} \\ \mathbf{M} \quad \mathbf{M} \\ d_{i,1}, \mathbf{L}, d_{i,j} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{D}$  为电动汽车用户对充电站距离等级矩阵。

电动汽车用户  $i$  对充电站  $j$  的预约满意度如式(5)所示。

$$f_{\text{ord}} = \frac{\max\{a_{i,j} \cdot d_{i,j}\} - a_{i,j} \cdot d_{i,j}}{\max\{a_{i,j} \cdot d_{i,j}\} - \min\{a_{i,j} \cdot d_{i,j}\}} \quad (5)$$

式中,  $f_{\text{ord}}$  即为电动汽车用户  $i$  对充电站  $j$  的预约满意度。

3) 电动汽车用户的综合满意度由经济满意度和预约满意度综合得到, 这两部分的综合采用权重系数完成。

权重系数  $w_1$ 、 $w_2$  可以由多指标正交试验综合评价模型确定。若  $w_1 < w_2$ , 则电动汽车用户选择预约偏好; 若  $w_1 > w_2$ , 则电动汽车用户选择经济偏好; 若  $w_1 = w_2$ , 则电动汽车用户选择均衡偏好。偏好的程度由  $w_1$ 、 $w_2$  的数值大小确定。

用户满意度决策模型的目标函数如式(6)所示。

$$f_{\text{con}} = w_1 \cdot f_{\text{eco}} + w_2 \cdot f_{\text{ord}} \quad (6)$$

式中,  $f_{\text{con}}$  为电动汽车用户  $i$  对充电站  $j$  的综合满意度。

约束条件包括:

在满足蓄电池最低安全电量的情况下, 保证用户能够到达充电站。

$$SOC_i - d_{i,j} \cdot w_{100} / (100 \cdot C) > SOC_{\min} \quad (7)$$

式中:  $SOC_i$  为电动汽车用户  $i$  的电池荷电状态;  $w_{100}$  为电动汽车百公里耗电量;  $C$  为电动汽车容量;  $SOC_{\min}$  为电动汽车最小荷电状态。

### 3 充电站效益模型

充电站效益是充电站为电动汽车用户提供充电服务的收益减去充电站向电网公司购电成本后的利润<sup>[16]</sup>。

因此, 充电站效益模型目标函数如式(8)所示。

$$F = \max \left\{ \sum_{i \in S_j} (y_{i,j} \cdot X_j - Z_j) \cdot (SOC_{\max} - SOC_i - \frac{d_{i,j} \cdot w_{100}}{100 \cdot C}) \cdot C \right\} \quad (8)$$

式中:  $F$  为充电站效益;  $S_j$  为充电站  $j$  的电动汽车用户集合;  $Z_j$  为电网售给充电站  $j$  的电价;  $SOC_{\max}$  为电动汽车最大荷电状态。

约束条件如下:

1) 充电站会员折扣等级约束。会员等级越高, 折扣越大, 且会员折扣在一定范围之内。

$$x_{\min} \leq x_{j,3} < x_{j,2} < x_{j,1} \leq x_{\max} \quad (9)$$

式中:  $x_{\min}$  为充电站会员折扣的最小值;  $x_{\max}$  为充电站会员折扣的最大值。

2) 充电站距离等级约束。充电站距离等级规定为距离充电站越近, 用户享受的距离等级越大, 从

而对用户的吸引越大。

$$s_{\min} \leq s_{j,1} < s_{j,2} \leq s_{\max} \quad (10)$$

式中： $s_{\min}$  为充电站距离等级设定的最小值； $s_{\max}$  为充电站距离等级设定的最大值。

3) 设备数量约束。由于充电站变压器容量有限，可供同时充电的电动汽车数量有限，因此充电站中的充电设备也有限。

$$z_{\min} \leq z_j \leq z_{\max} \quad (11)$$

式中： $z_{\min}$  为充电站充电设备数量最小值； $z_{\max}$  为充电站充电设备数量最大值； $z_j$  为充电站充电设备数量。

## 4 算例仿真

### 4.1 仿真设置

为验证所提出的模型及算法，本文假定在一座城市的某一片区域内有 5 座充电站，有 100 辆电动汽车需要充电。采用遗传算法对仿真进行求解。其中，设定 2 座充电站为采用本模型所制定策略的充电站，另外 3 座充电站设置为普通充电站。

1) 用户的会员等级。出于吸引用户的原因，采用策略的 2 座充电站给予用户的会员等级都是从 1 级会员开始，即会员等级最低级为 1 级，如果用户想要获得更高的优惠，可以继续提高会员等级，即从充电站购买更高的会员等级，但最高会员等级为 3 级。由此可见，用户的会员等级矩阵中元素在 1、2、3 中选择。另外 3 座充电站为普通充电站，但考虑到两者需要互相比较，因此另 3 座充电站给用户都设置为 1 级会员。

2) 用户距各充电站的距离矩阵。用户距离充电站的距离可由一般地图软件得到，且本文重点不在求解用户距充电站的距离上，因此本文对于用户距充电站的距离矩阵由系统随机生成。

3) 电动汽车参数设置。电动汽车最重要的参数就是电池荷电状态，本文设置电池荷电状态下降至 30% 时，汽车自动提示车主应该充电，下降至 20% 时，汽车发出警告应该充电，降低到 10% 时警告将损坏电池并立即停车。

4) 电动汽车其他参数设置<sup>[17-18]</sup>如表 1 所示。电动汽车用户满意度权重分布如表 2 所示。

根据电动汽车用户对经济和预约的偏好将电动汽车用户主要分为 3 种类型<sup>[19]</sup>，分别为经济偏好型、无偏好型以及预约偏好型。

### 4.2 结果分析

为了对本文充电站的策略进行分析，本文设置了 2 种类型的充电站，分别是采用本文策略的充电

表 1 电动汽车参数

Table 1 Parameters of electric vehicles

参数设置	参数值
最小荷电状态	0.1
最大荷电状态	0.9
充电功率/kW	20
充电效率/%	97
百公里耗电量/kWh	14
电池容量/kWh	20
电网出售价格/元	0.8

表 2 电动汽车用户满意度权重

Table 2 Weights of electric vehicle customer satisfaction

用户类型	经济满意度权重	预约满意度权重
经济偏好型	0.75	0.25
无偏好型	0.50	0.50
预约偏好型	0.25	0.75

站与未采用本文策略的普通充电站。未采用本文策略的普通充电站是指其中 3 个充电站根据电网公司的售电价格统一定价，不进行折扣策略。电动汽车用户最终选择何种充电站还是要由用户对于各充电站的满意度来决定。

这 2 种不同情况的充电站对客户、该充电站以及其他充电站的影响主要从 2 个角度来分析，即从电动汽车用户的角度以及充电站的角度分析。

1) 从电动汽车用户的角度进行分析。

对经济偏好型、无偏好型和预约偏好型电动汽车用户分别采用策略充电站与普通充电站充电的数量进行统计，如表 3 所示。

表 3 不同类型充电电动汽车数量

Table 3 Numbers of different types of charging electric vehicles

用户类型	电动汽车数量/辆	
	采用策略充电站	普通充电站
经济偏好型	69	31
无偏好型	78	22
预约偏好型	74	26

对经济偏好型、无偏好型和预约偏好型电动汽车用户分别采用策略充电站与普通充电站充电的充电费用进行分析，如表 4 所示。

表 4 电动汽车用户平均充电费用

Table 4 Average charging cost of electric vehicle users

用户类型	平均充电费用/元	
	采用策略充电站	普通充电站
经济偏好型	13.85	14.64
无偏好型	14.23	14.70
预约偏好型	15.00	14.75

由表 3 和表 4 可见，选择采用策略充电站的经济偏好型用户可以享受比无偏好型以及预约偏好型



更低的充电费用, 而这也符合人们选择其各自偏好型的初衷。另外, 选择普通充电站的电动汽车用户的充电费用差别不大, 这是因为普通充电站并没有采用相关的差异化策略。采用策略充电站的经济偏好型和无偏好型用户的充电费用比普通充电站低, 而预约偏好型的充电费用比普通充电站略高, 这也是由策略与策略之间以及采用策略与否之间的差异造成的。

对经济偏好型、无偏好型和预约偏好型电动汽车用户分别采用策略充电站与普通充电站充电的预约等级进行分析, 如表 5 所示。

表 5 电动汽车用户平均预约等级  
Table 5 Average reservation levels of electric vehicle users

用户类型	电动汽车数量/辆	
	采用策略充电站	普通充电站
经济偏好型	69	31
无偏好型	78	22
预约偏好型	74	26

由表 5 可见, 选择采用策略充电站的预约偏好型用户可以享受比无偏好型以及经济偏好型更低的预约等级, 也就意味着预约偏好型用户的便利程度更高, 而这也符合人们选择其预约偏好型的初衷。另外, 选择普通充电站的电动汽车用户的预约等级差别不大, 这是因为普通充电站并没有采用相关的差异化策略。

2) 从充电站的角度进行分析。

当电动汽车用户分别为经济偏好型、无偏好型和预约偏好型时, 各充电站的收益以及采用策略充电站与普通充电站的收益如图 2 所示。图中序号为 1 和 2 的充电站为采用本文策略的充电站, 其余为普通充电站。

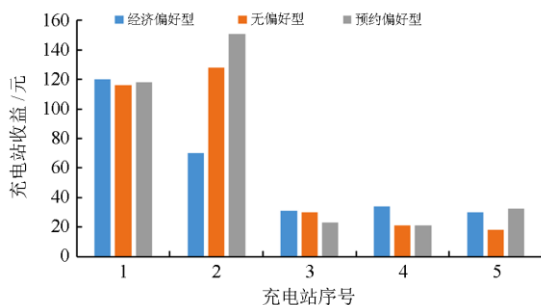


图 2 充电站效益

Fig. 2 Benefits of charging station

由图 2 可知, 三种偏好型总的趋势都是采用本文策略充电站的收益远大于普通充电站的收益。由此可见, 不论用户偏好如何, 采用策略的充电站的

收益远远大于未采用充电站的收益, 说明采用本文策略可以有效提高充电站收益。

对比三种偏好型可知, 采用策略充电站的收益随着经济满意度权重的降低而升高。这是由于为了使比较分明, 同时使普通充电站更有竞争力, 算例中设定普通充电站的电价较采用策略充电站的电价低一部分。因此普通充电站的收益更低, 同时用户受经济影响较大时, 会更偏向于普通充电站。随着经济满意度权重的增加, 会有较多的用户选择普通充电站, 而采用策略的充电站的收益会稍有降低。但从大的趋势上看, 采用本模型策略的充电站对用户更有吸引力, 从而获得更大的收益。

当电动汽车用户分别为经济偏好型、无偏好型和预约偏好型时, 各充电站的电动汽车充电数量如图 3 所示。

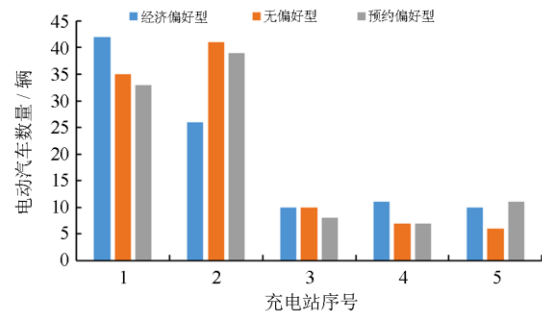


图 3 电动汽车数量

Fig. 3 Numbers of electric vehicles

由图 3 可知, 三种偏好型总的趋势都是采用策略的充电站的电动汽车数量远大于普通充电站的数量, 此结论与充电站的收益相似。由此可见, 采用策略的充电站对于电动汽车用户的吸引力远远大于普通充电站。

综上, 采用动态调整策略的充电站比普通充电站对电动汽车用户更有吸引力, 从而有更高的收益。电动汽车用户能够选择不同的偏好型, 到达其预期的目标。

## 5 结论

本文建立了电动汽车用户充电折扣返利及预约优先级动态调整策略, 能够制定相应的折扣优惠策略以提高电动汽车用户的满意度以及充电站的收益。对本文策略进行仿真, 可得出如下结论。

1) 本文所建立策略能够帮助充电站制定相应的折扣优惠策略, 以吸引电动汽车用户, 提高充电站收益。

2) 本文所建立策略针对不同类型电动汽车用

户, 可提高经济满意度或预约满意, 从而提高电动汽车用户的充电满意度。

### 参考文献

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见 [EB/OL]. (2015-10-09) [2019-12-13]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/201510/09/content\\_10214.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/201510/09/content_10214.htm).  
General Office of the State Council, PRC. Guiding opinions of general office of the state council on accelerating the construction of electric vehicle charging infrastructure [EB/OL]. (2015-10-09) [2019-12-13]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/201510/09/content\\_10214.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/201510/09/content_10214.htm).
- [2] TU Hao, FENG Hao, SRDIC S, et al. Extreme fast charging of electric vehicles: a technology overview[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5(4): 861-878.
- [3] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.
- [4] THIBAUT L, DE NUNZIO G, SCIARRETTA A. A unified approach for electric vehicles range maximization via eco-routing, eco-driving, and energy consumption prediction[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2018, 3(4): 463-475.
- [5] 侯慧, 徐焘, 柯贤彬, 等. 电动汽车快充对配电网的风险研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(16): 87-93.  
HOU Hui, XU Tao, KE Xianbin, et al. Research on risks of electric vehicle charging to distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(16): 87-93.
- [6] 杨洪明, 李明, 文福拴, 等. 利用实时交通信息感知的电动汽车路径选择和充电导航策略[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(11): 106-113.  
YANG Hongming, LI Ming, WEN Fushuan, et al. Route selection and charging navigation strategy for electric vehicles employing real-time traffic information perception[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(11): 106-113.
- [7] 苏粟, 杨恬恬, 李玉璟, 等. 考虑实时动态能耗的电动汽车充电路径规划[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(7): 136-147.  
SU Su, YANG Tiantian, LI Yudi, et al. Planning of electric vehicle charging path considering real-time dynamic energy consumption[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(7): 136-147.
- [8] 严奔遥, 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.
- [9] CERNA F V, POURAKBARI-KASMAEI M, ROMERO R A, et al. Optimal delivery scheduling and charging of EVs in the navigation of a city map[J]. *IEEE Transactions on smart grid*, 2018, 9(5): 4815-4827.
- [10] 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.
- [11] 王均, 黄琦. 基于优惠券激励的需求响应双层优化机制[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(1): 108-114.  
WANG Jun, HUANG Qi. Coupon incentives based customers voluntary demand response program via bilevel optimization mechanism[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(1): 108-114.
- [12] 潘振宇, 余涛, 王克英. 考虑多方主体利益的大规模电动汽车分布式实时协同优化[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(12): 3528-3541.  
PAN Zhenning, YU Tao, WANG Keying. Decentralized coordinated dispatch for real-time optimization of massive electric vehicles considering various interests[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(12): 3528-3541.
- [13] 符兴锋, 何国新, 曹月明, 等. 基于动态分时计费的动力电池系统预约充电费设计方法研究[J]. *汽车技术*, 2018(4): 43-46.  
FU Xingfeng, HE Guoxin, CAO Yueming, et al. Research on design method of reserving charging for power battery system based on dynamic time-of-use billing[J]. *Automotive Technology*, 2018(4): 43-46.
- [14] 戴依诺, 戴忠. 电动汽车预约充电策略研究[J]. *电力需求侧管理*, 2016, 18(1): 40-43.  
DAI Yinuo, DAI Zhong. Research on electric vehicle reservation charging strategy[J]. *Power Demand Side Management*, 2016, 18(1): 40-43.
- [15] 黄贵鸿, 雷霞, 芦杨, 等. 考虑用户满意度的电动汽车用户侧最优智能充放电策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(24): 40-47.  
HUANG Guihong, LEI Xia, LU Yang, et al. Optimus smart charge-discharge tactics in electric vehicle user

- profile considering user's satisfaction[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(24): 40-47.
- [16] 应飞祥, 徐天奇, 李琰, 等. 含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(21): 92-100.  
YING Feixiang, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on day-to-day scheduling optimization strategy of a commercial virtual power plant with an electric vehicle charging station[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(21): 92-100.
- [17] 孙国强, 徐广开, 沈培锋, 等. 规模化电动汽车负荷的柔性台区协同经济调度[J]. *电网技术*, 2020, 44(11): 4395-4404.  
SUN Guoqiang, XU Guangkai, SHEN Peifeng, et al. Coordinated economic dispatch of flexible district for large-scale electric vehicle load[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(11): 4395-4404.
- [18] 侯慧, 薛梦雅, 陈国炎, 等. 计及电动汽车充放电的微电网多目标分级经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(17): 55-67.  
HOU Hui, XUE Mengya, TANG Guoyan, et al. Multi-objective hierarchical economic dispatch for microgrid considering charging and discharging of electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(17): 55-67.
- [19] 安杨, 李华强, 阚力丰, 等. 考虑用户综合满意度的居民区电动汽车充放电优化策略[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(6): 7-13.  
AN Yang, LI Huaqiang, KAN Lifeng, et al. Optimization strategy of charging and discharging electric vehicles in residential areas considering user satisfaction[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2019, 56(6): 7-13.

---

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

侯 慧(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电动汽车与电网互动等; E-mail: houhui@whut.edu.cn

王逸凡(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车与电网互动; E-mail: 3449306787@qq.com

黄 亮(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电动汽车电力设备开发等。E-mail: 35644519@qq.co