

文章编号:1005-0523(2022)06-0056-10



# 考虑负荷分布均衡的电动汽车充电定价策略

梁士栋, 朱冰清

(上海理工大学管理学院, 上海 200093)

**摘要:**环境污染和能源危机问题越发严重,电动汽车因其低排放、低噪音等优势受到广泛关注。但大量接入电网充电的电动汽车将会对电力系统产生巨大影响。特别是生活区域,电动汽车用户普遍习惯下班后进入小区立即给电动汽车充电,而这一时期正值居民生活用电高峰时期,大规模不受控的充电行为将对供电系统产生安全风险,影响电网的正常运行。针对这一现象,以“削峰填谷”为主要目标建立住宅区内电动汽车充电电费定价的双层规划模型,下层是个人用户充电电费最小化模型,得到充电负荷,上层是电网负荷时间分布均衡模型,求得快、慢两种充电方式的分时电价,通过分时电价改变居民的充电行为,引导居民错峰充电,最后通过算例表明电网供电稳定性提高了 57.66%。

**关键词:**电动汽车;分时电价;双层规划模型;削峰填谷

**中图分类号:**U491

**文献标志码:**A

**本文引用格式:**梁士栋,朱冰清.考虑负荷分布均衡的电动汽车充电定价策略[J].华东交通大学学报,2022,39(6):56-65.

## Charging Pricing Strategy for Electric Vehicles Considering Balanced Time Distribution of Power Load

Liang Shidong, Zhu Bingqing

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** As environmental pollution and energy crisis become more and more serious, electric vehicles have attracted widespread attention due to their advantages of low emission and low noise. But a flood of electric vehicles plugged into the grid will have a huge impact on the power system. Especially in the living area, EV users are generally used to enter the community to charge their cars immediately after work, which makes this period the peak period of household electricity consumption. Large-scale uncontrolled charging behavior will cause security risks to the power grid and affect the normal operation of the power grid. On account of this phenomenon, a two-level programming model aiming at “peak cut” for time-of-use price of electric vehicles in residential areas was established. The lower was minimization model of charging cost for lower users, getting the charging load. The upper was load time distribution equilibrium model of upper power grid, obtaining time-of-use price of fast and slow charging power. It could change the charging behavior of residents by time-of-use price. Finally, the calculation example showed that the power supply stability of the grid was improved by 57.66%.

**Key words:** electric vehicles; time-of-use price; two-level programming model; peak cut

**Citation format:** LIANG S D, ZHU B Q. Charging pricing strategy for electric vehicles considering balanced time distribution of power load[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(6): 56-65.

收稿日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(71801153)

传统能源逐渐枯竭,环境问题日益严重,作为新能源产业的电动汽车因其低污染、高转换率的优点受到政府大力支持。随着汽油成本上升和电动汽车电池技术的不断进步,电动汽车逐渐成为传统燃油汽车的替代品,广受群众欢迎。在可预计的未来,电动汽车市场将不断扩大,电动汽车数量也将持续增多。但是,大规模电动汽车接入电网无序充电时,其负荷峰值可能超过电网的传输极限,打破电力系统的供需平衡,进而影响电网的电压稳定<sup>[1-3]</sup>。针对这些问题,可以从有序智能充电<sup>[4-8]</sup>、充电定价策略<sup>[9-13]</sup>等不同方面进行研究。本文就从价格方面考虑,从电网和用户的角度,通过价格引导用户的充电行为,保证电网平稳运行。

## 1 问题背景

### 1.1 问题描述

对于大部分电动汽车用户,尤其是每天固定时

间上下班的通勤人员,普遍会选择在自家住宅区充电,而许多用户下班回家后在用电需求已经达到高峰的时期立即给汽车充电,这些随机的充电行为会导致充电负荷和居民生活用电负荷在高峰期高度重叠。

本文从微观角度,以居民住宅区内的电动汽车为研究对象,同时考虑电网负荷的波动和小区电动汽车用户的利益,通过建立双层规划模型制定不同时段快、慢两种充电方式的电动汽车充电电价。通过价格的杠杆作用,针对每一辆电动汽车,改变用户每个时段的充电行为,使准备使用小区充电桩充电的用户错峰充电,达到电网负荷曲线“削峰填谷”的目的,保证居民生活用电正常,维护电网的安全稳定。

### 1.2 符号说明

本文所用到的所有公式符号以及其简要说明如表1所示。

表1 公式符号说明  
Tab.1 Description of formula symbols

| Formula symbols                                          | Brief description                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $N=\{1,2,\dots,k\}$                                      | A collection of electric vehicles                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $n \in N$                                                | Electric vehicles serial number                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| $i_n=sm_n \text{ past } sh_n$                            | The time when electric car $n$ returns home(the time when electric car $n$ can start charging)                                                                                                                                                                                                                              |
| $j_n=em_n \text{ past } eh_n$                            | The time when electric car $n$ leaves home(the time when electric car $n$ must stop charging)                                                                                                                                                                                                                               |
| $T=\{0,1,\dots,23\}$                                     | A collection of periods of time                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| $T_n=[sh_n, eh_n]$                                       | A collection of electric vehicles $n$ parking slots                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| $t \in T$                                                | A period of time $t \in T$                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $T_t^n, T_t^n \in [0,1]$                                 | Charging time of electric vehicle $n$ in time period $t/h$                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $\delta_t^n$                                             | Charging state of electric vehicle $n$ in time period $t/h$<br>$\delta_t^n=(1,0,0)^T$ is electric vehicle $n$ is charged fast in time period $t$<br>$\delta_t^n=(0,1,0)^T$ is electric vehicle $n$ is charged slowly in time period $t$<br>$\delta_t^n=(0,0,1)^T$ is electric vehicle $N$ is not charged in time period $t$ |
| $c=(c_t^q, c_t^s, 0)$                                    | Unit charging price matrix for each period<br>$c_t^q$ is fast charging price in time period $t/(\text{yuan}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$<br>$c_t^s$ is slow charging price in time period $t/(\text{yuan}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$                                                                                          |
| $P=(P_q, P_s, 0)$                                        | Charging power matrix<br>$P_q$ is fast charging power/kW<br>$P_s$ is slow charging power/kW                                                                                                                                                                                                                                 |
| $\alpha, \beta$                                          | Weight coefficient                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| $S_n^{\text{EV}}$                                        | Charging load of electric vehicle $n$ in time period $t/(\text{kW}\cdot\text{h})$                                                                                                                                                                                                                                           |
| $S_t^{\text{EV}}$                                        | Total charging load in time period $t/(\text{kW}\cdot\text{h})$                                                                                                                                                                                                                                                             |
| $S_t^{\text{L}}$                                         | The base load of residents in time period $t/(\text{kW}\cdot\text{h})$                                                                                                                                                                                                                                                      |
| $\overline{S_t^{\text{EV}}} + \overline{S_t^{\text{L}}}$ | Average of total load over all time periods/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $C_a^n$                                                  | Electric vehicle $n$ 's charging expense before optimization/yuan                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $C_b^n$                                                  | Electric vehicle $n$ 's charging expense after optimization/yuan                                                                                                                                                                                                                                                            |
| $Q_n$                                                    | The charging demand of electric vehicle $n/(\text{kW}\cdot\text{h})$                                                                                                                                                                                                                                                        |
| $SOC_s$                                                  | Electric vehicles initial $SOC/\%$                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| $SOC_e$                                                  | Users expected $SOC/\%$                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $B$                                                      | Battery capacity/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$                                                                                                                                                                                                                                                                                |

1.3 问题假设

本文所研究的问题有如下几点假设。

- 1) 居民住宅区的充电桩实行一车一桩,每个用户根据电价自主选择充电时间段和充电方式,互不影响;
- 2) 用户的需求电量不超过停车时间内充电桩可提供的最大电量;
- 3) 对于分时电价未实施的情况,电动汽车用户的充电行为是归家后就立即以慢充方式充电;
- 4) 每辆电动汽车固定充电方式下的电池电量与时间呈线性关系。

2 模型建立

电网总负荷由所有电动汽车的充电负荷以及小区基础负荷组成,而所有电动汽车的充电负荷可通过每辆电动汽车的充电方案得到,同时,每辆电动汽车的充电方案受电网中的充电电价影响而改变;因此充电电价可根据电网总负荷制定。

根据上述特性,建立双层的电动汽车充电电费定价模型,双层模型参数的输入输出流程具体如图 1 所示。

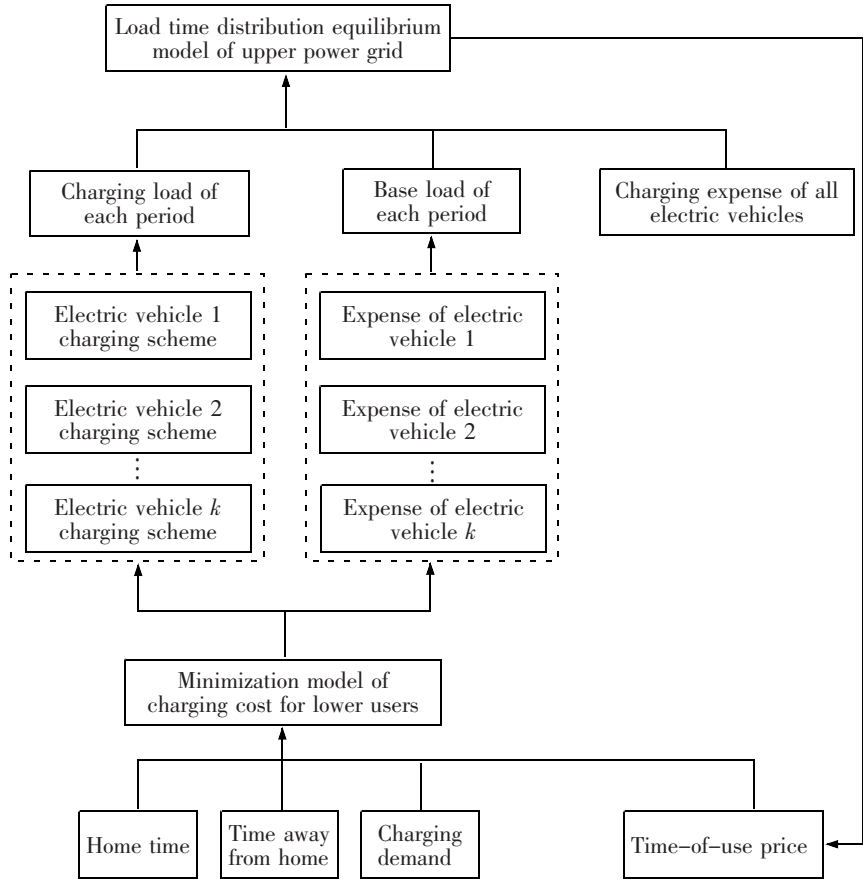


图 1 双层规划模型流程图  
Fig.1 Flow chart of two-level programming model

2.1 下层模型

将一天分为 24 h,每 1 h 为 1 个时间段,用  $t$  表示,下层模型的研究对象是使用电动汽车出行并最终会返回小区充电的用户,电动汽车总量为  $N$ ,电动汽车  $n \in N=\{1,2,\cdots,k\}$ ,可充电的时间段在用户返回小区时间  $i_n$  之后至离开小区时间  $j_n$  之前,开始

时间段以归家时刻的小时段  $t=sh_n$  表示,结束时间段以离家时刻的小时段  $t=eh_n$  表示,根据用户的归家和离家时间以及用户的需求充电电量  $Q$ ,制定电动汽车在小区停车期间每个时间段的充电方案。  
下层模型的目标函数是电动汽车  $n$  的充电费用最小化,由各时段不同充电方式充电量和单位电

价之积的总和求得,以此输出每个电动汽车的充电方案。

$$\min Z_1 = \sum_{t=sh_n}^{eh_n} P \cdot c \cdot \delta_t^n \cdot T_t^n \quad (1)$$

每个时间段充电方式仅为1种,由三行一列且仅有一个1的0-1矩阵 $\delta_t^n$ 表示, $\delta_t^n=(1,0,0)^T$ , $\delta_t^n=(0,1,0)^T$ , $\delta_t^n=(0,0,1)^T$ 分别表示电动汽车 $n$ 在 $t$ 时段快充、慢充、不充,则电动汽车在 $[i_n, j_n]$ 内所有时段的充电方式为 $[\delta_{sh}^n, \delta_{sh+1}^n, \delta_{eh}^n]$ ,这也是模型的决策变量。

约束条件①:如果电动汽车在 $t$ 时段停满1h,其充电时长为0或1h,如果没有停满1h,充电时长不能超过所停时间。

$$\begin{cases} 0 \leq T_t^n \leq \frac{60-sm_n}{60}, t=sh_n \\ 0 \leq T_t^n \leq \frac{em_n}{60}, t=eh_n \\ T_t^n=0 \text{ or } 1 \quad t \in [sh_n+1, eh_n-1] \end{cases} \quad (2)$$

约束条件②:充电方案必须满足用户的充电电量需求。

$$\sum_{t=sh_n}^{eh_n} P \cdot \delta_t^n \cdot T_t^n = Q_n \quad (3)$$

下层模型得到每一辆电动汽车的充电方案和充电费用,将每辆车的充电方案整理得到各个时段所有电动汽车的充电总负荷,与充电总费用一起作为上层模型的输入。

## 2.2 上层模型

上层模型的研究对象是小区的整个电网,考虑居民生活基础负荷加入电动汽车的充电负荷后对电网波动的影响,以及居民的电费变化程度,尽量使电费变化程度降低,从某种程度上也保证了电力供应商的利益。

目标函数是一天24h各个时间段的总负荷标准差以及电价改变前后用户充电总费用变化最小化,以此求得每个时间段内的快、慢充电价。

$$\min Z_2 = \alpha \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{24} [(S_t^{EV} + S_t^L) - S^{EV} + S^L]^2}{24}} + \beta \left| \sum_{N=1}^k (C_a^n - C_b^n) \right| \quad (4)$$

其中 $t$ 时段的充电总负荷由 $t$ 时段所有电动汽车的充电负荷求得

$$S_t^{EV} = \sum_{n=1}^k S_{n,t}^{EV} \quad (5)$$

电价改变后的电费为上层模型中得到的目标函数,电价改变前的充电电费由电动汽车需求电量和原固定电价求得

$$C_b^n = Q_n \cdot c_0 \quad (6)$$

约束条件为快、慢充电价不能超过最高电价,也不能低于最低电价。

$$\begin{cases} c_{t \min}^s \leq c_{ts} \leq c_{t \max}^s \\ c_{t \min}^q \leq c_{tq} \leq c_{t \max}^q \end{cases} \quad (7)$$

上层模型得到各个时间段的快、慢充电价,将其作为下层模型的输入数据,以此引导下层模型中用户的充电行为。

## 3 求解算法

本文提出的电动汽车充电电费定价模型是一个双层规划问题,利用嵌套迭代法求解。嵌套迭代法是指上层模型和下层模型的求解过程嵌套在一个迭代过程中,不断逼近满足迭代停止条件的解。首先随机生成一个上层模型的解,将其输入到下层模型中求解,得到下层模型的一个解输入到上层模型中,再得到一个上层模型的解,判断是否满足迭代停止条件,若满足则停止迭代输出结果,若不满足则继续循环迭代,直至满足迭代停止条件为止<sup>[14]</sup>。具体流程如图2所示。

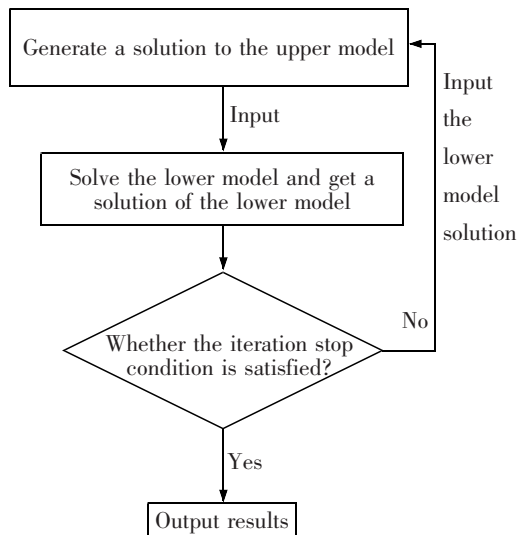


图2 嵌套迭代法流程

Fig.2 Nested iterative process

### 3.1 下层模型算法

下层模型利用符合用户“贪婪”决策心理的贪婪算法,用户在选择充电时间段以及充电方式时,总是优先选择单位电价最便宜的充电方式,下层算法就模拟这一心理,先找出当前最小时段电价  $\min\{c_s^t, c_q^t\}$ ,用该电价对应充电功率  $P_s^t$  或  $P_q^t$  充电,与电价对应时段的停车时间  $T_t$  计算得到此时充电量,如不满足充电需求则继续选择充电时段,直到满足需求电量  $Q$ ,以此获得每辆电动汽车的充电方案。

算法步骤如下。

Step 1 用户选择当前电价最小的充电时段和充电方式,判断此时充电量是否能满足需求电量  $Q$ ,如果能满足进入 Step 2,如果不能满足,返回继续选择。

Step 2 判断充电量是否超出需求电量,如果是,缩短所选时段中电价最高时段的充电时间,进入 Step 3。如果不是,直接进入 Step 3。

Step 3 输出用户充电方案,包括各时段充电方式和充电时长,计算用户充电费用。

### 3.2 上层模型算法

上层模型利用粒子群算法求解,粒子群算法适用于解决连续优化问题,也适合求解上层非整数规划模型所要得到的电价,上层算法将下层模型得到的解作为粒子群算法中的目标函数输入。

设算法的种群规模为  $pN$ ,第  $i$  次迭代时所有粒子在搜索空间的位置坐标如矩阵(8)所示。

$$X_i = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & \cdots & x_{48} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{pN} & \cdots & x_{48} \end{bmatrix} \quad (8)$$

最终的全局最优粒子所在位置就是所要求的解,前 24 个分别对应 24 个时段的慢充电价,后 24 个为各时段的快充电价。

算法步骤如下。

Step 1 初始化,随机生成每个粒子,一个粒子代表各时段快、慢充电价。

Step 2 计算每个粒子的适应度,适应度由下层模型中求得的充电方案反映的充电负荷和充电电费表达,将各个粒子作为历史最优位置保存,找出各个粒子中的全局最优位置。迭代次数  $i=0$ 。

Step 3 更新每个粒子的速度和位置,评估每个粒子的适应度值,更新每个粒子的历史最优位置,更新群体的全局最优位置,如果迭代次数  $i < \max \text{ iter}$ ,返回

Step 3 继续更新,如果  $i = \max \text{ iter}$ ,输出结果。

## 4 算例仿真

### 4.1 参数设置

#### 4.1.1 居民小区基础负荷

选取某 200 户小区的居民生活用电基础负荷<sup>[15]</sup>,以 1 h 为一个时段间隔,将一天分为 24 个时间段。该小区的基础负荷曲线如图 3 所示。

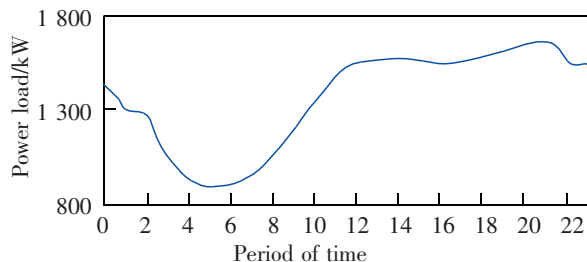


图 3 小区基础负荷曲线

Fig.3 Cell base load curve

#### 4.1.2 居民用电行为特征

居民小区用户的用电行为特征包括离家时间分布、归家时间分布和电动汽车耗电情况。用户的归家时间可视为用户可开始充电的时间,服从正态分布。而用户结束充电时间应早于离家时间,离家时间也服从正态分布,用户的归家和离家时间决定居民充电时间范围。电动汽车耗电情况可通过车辆充电起始电荷状态反映,车辆充电起始电荷状态影响居民的需求充电电量以及充电所需时间。

某电动汽车厂商对于用户车辆接入充电时电池起始荷电状态的调研数据<sup>[16]</sup>如图 4 所示。

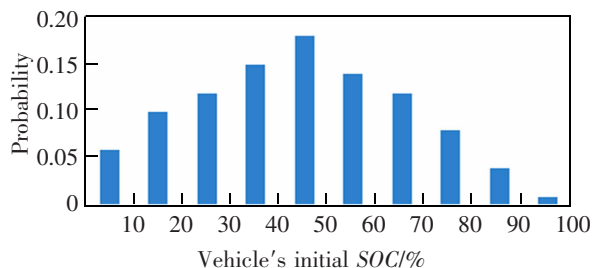


图 4 车辆起始 SOC 分布概率

Fig.4 Distribution probability of vehicle's initial SOC

充电需求量根据车辆起始荷电状态,由期望、起始荷电状态以及电池容量求得,计算式为

$$Q_n = (SOC_e - SOC_s) \cdot B \quad (9)$$

4.2 仿真设计

将电动汽车的快、慢充电功率设置为15 kW和 7 kW,充电功率在充电过程中保持不变。原固定电价为 0.75 yuan/(kW·h)。住宅区约有 200 户居民,电动汽车保有量为 50 辆,假设小区用户期望荷电状态  $SOC_e$  为 100%,车型统一比亚迪 e6,电池容量为 82 kW·h。因本文的调度对象以电动汽车为通勤工具的小区居民,所以设定最晚归家时间在 15:00—21:00,最早离家时间在 5:00—11:00,最晚归家时间分布和最早离家时间分布如图 5、图 6 所示,由图可知算例参数比较符合实际情况。

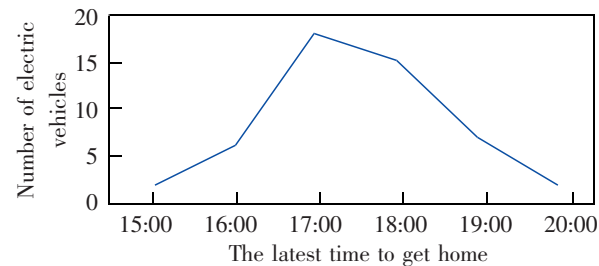


图 5 仿真最晚归家时间分布

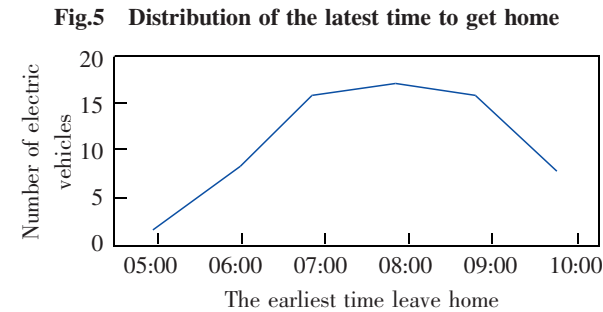


图 6 仿真最早离家时间分布

Fig.6 Distribution of the earliest time to leave home

4.3 仿真结果

仿真实验通过 Python 运行,上层粒子群算法种

群个数为 50 个,迭代次数 1 000 次,目标函数权重系数分别为 0.6,0.4,双层规划模型算法迭代效果如图 7 所示。

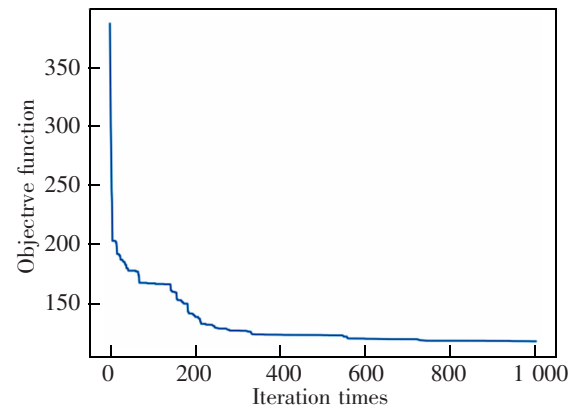


图 7 迭代图

Fig.7 Iterative figure

4.3.1 充电电费

最终求解得出的分时电价如图 8 所示,最高电价为 17:00—18:00 时段间的快充电价,高达 1.03 yuan/(kW·h),相应的慢充电价高达 0.79 yuan/(kW·h),该时段为居民用电高峰期,较高的电价能引导居民避开高峰时段充电;相比之下,快、慢充电价较低的是 12:00—16:00 这个时段,为居民用电量一般时段,也是通勤人员在外上班时间,最低仅有 0.44 yuan/(kW·h),但快充电价明显高于慢充电价,高约24.20%,较高电价差能引导在该时段充电的居民优先选择慢充方式;而对于用电低谷时期 2:00—7:00 时间段,快、慢充电价相差不大,快充电价高于慢充电价仅约 4.34%,居民可以在该时段选择快充方式,对电网影响较小。总体来看,快、慢充分时电价的制定较为合理。

每个用户优化前后的充电电费变化如图 9 所

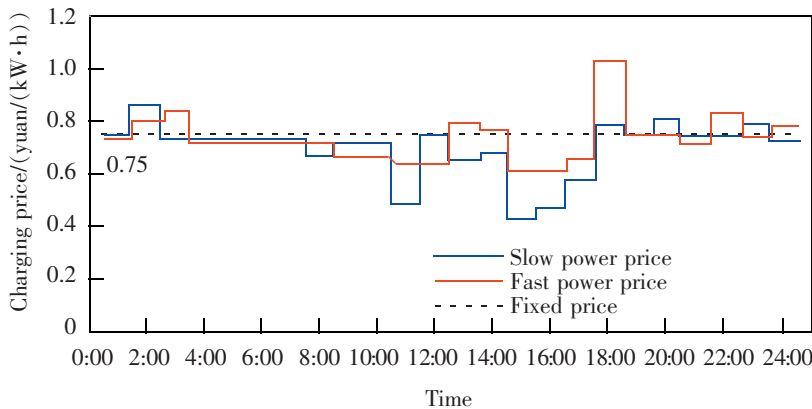


图 8 优化后各时段快、慢充电价

Fig.8 Each period of fast and slow charging price after optimization

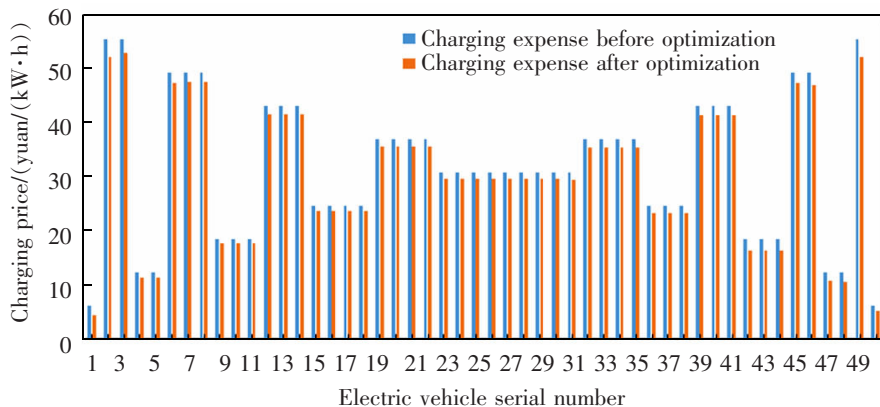


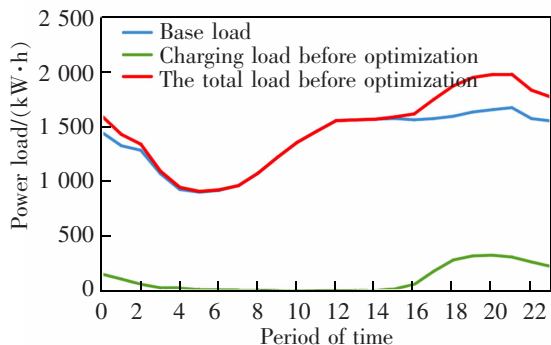
图9 优化前后用户充电费用对比图

Fig.9 Comparison diagram of user charging expense before and after optimization

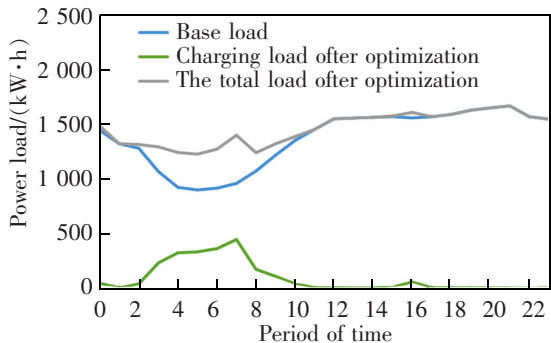
示,快、慢充电价都使得用户能在响应分时电价后的充电电费得到一定的减少,一定程度保证了居民对分时电价的响应度。平均降低率为 5.78%,平均每名用户电费降低约为 1.5 yuan。

#### 4.3.2 电网负荷

通过仿真得到 24 个时段各种负荷曲线的优化前后对比图,如图 10 所示。



(a) Comparison diagram of load curves before optimization



(b) Comparison diagram of load curves after optimization

图10 优化前后各负荷曲线对比图

Fig.10 Comparison diagram of load curves before and after optimization

优化前的电网总负荷标准差为 350.05,优化后降为 148.21,当日最高与最低负荷的差值由

1 068.95 kW·h 降为 442.75 kW·h,电网的供电稳定性提高了 57.66%;优化前电网最高负荷为 1 972.55 kW,对电网安全运行造成一定影响,优化后电网最高负荷降至 1 667.90 kW,降低了 15.44%,对避免电网超负荷运载,保证电网安全具有一定的有效性。由图 11 所示,本次优化明显起到了对原负荷曲线“削峰填谷”的作用。

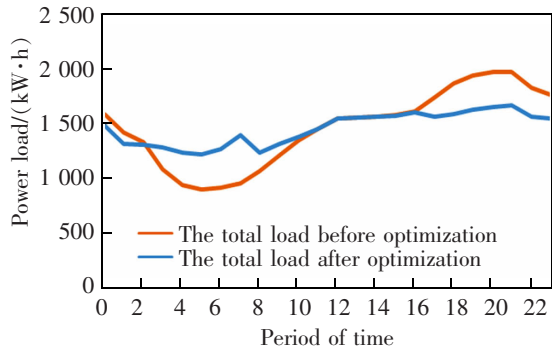


图11 优化前后总负荷曲线对比图

Fig.11 Comparison diagram of total load curves before and after optimization

#### 4.3.3 充电时长

每辆电动汽车的快、慢充的充电时长如图 12 所示,每辆电动汽车充电时长明显减少,平均减少了 29.17%,比较符合车主希望尽可能减少充电时长的心理。除此之外,优化后电动汽车的快充时长较慢充时长明显更少,有 68%的电动汽车还是以慢充方式为主,这也尽量减少了电动汽车的电池损耗。

#### 4.3.4 结果差异性分析

所有参数设置保持一致,将模型分别运行 30 次,得到结果如表 2。目标函数总体偏差 21.85,其中总负荷标准偏差 22.01,电费变化波动为 59.55,结果差异性较小。

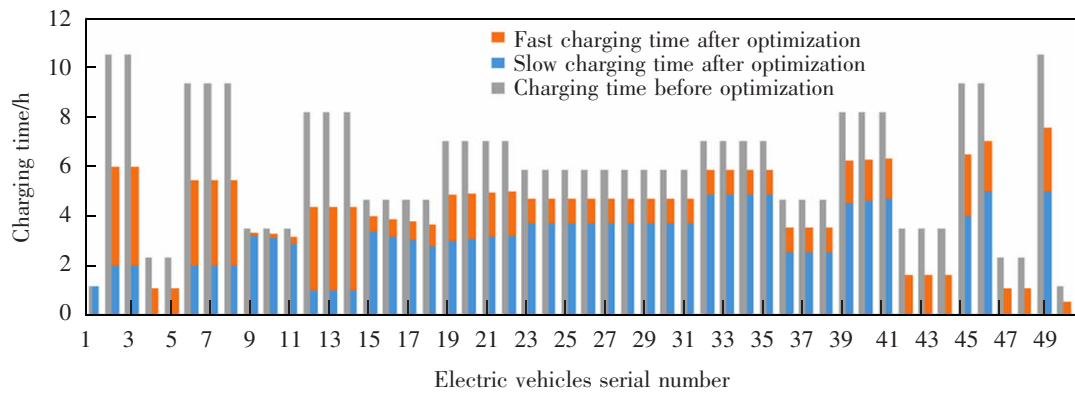


图 12 优化前后充电时长对比图

Fig.12 Comparison diagram of charging time before and after optimization

表 2 模型结果的差异性

Tab.2 Differences in results of models

| No. | Standard deviation<br>of load | Changes in total<br>charging expense/<br>yuan | Objective<br>function |
|-----|-------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|
| 1   | 149.388 351 3                 | -117.322 786 8                                | 133.566 367 6         |
| 2   | 166.852 480 1                 | -60.237 077 7                                 | 121.905 055 4         |
| 3   | 152.281 830 5                 | -141.687 757 4                                | 147.376 183 1         |
| 4   | 146.189 217 3                 | -137.122 315 8                                | 140.585 432 8         |
| 5   | 155.538 447 0                 | -170.704 780 2                                | 160.177 722 8         |
| 6   | 159.809 406 5                 | -141.561 033 8                                | 151.129 296 5         |
| 7   | 187.855 448 9                 | -144.604 638 3                                | 169.620 092 9         |
| 8   | 157.518 524 6                 | -172.972 829 1                                | 159.961 862 0         |
| 9   | 144.620 147 1                 | -200.889 394 3                                | 166.680 541 5         |
| 10  | 180.508 279 4                 | -98.479 748 0                                 | 146.971 037 9         |
| 11  | 150.641 113 7                 | -44.326 349 7                                 | 108.115 208 1         |
| 12  | 153.397 709 4                 | -117.019 683 2                                | 138.846 498 9         |
| 13  | 144.606 877 4                 | -169.253 930 5                                | 154.465 698 7         |
| 14  | 143.684 030 1                 | -167.058 867 1                                | 153.033 964 8         |
| 15  | 149.133 194 9                 | -93.481 149 1                                 | 126.872 376 5         |
| 16  | 168.165 206 6                 | -5.425 304 8                                  | 103.069 245 9         |
| 17  | 180.437 810 3                 | -44.060 619 5                                 | 125.886 934 0         |
| 18  | 153.637 156 2                 | -174.851 736 3                                | 162.122 988 3         |
| 19  | 163.532 446 7                 | -199.197 648 7                                | 177.798 527 5         |
| 20  | 196.299 904 6                 | -42.711 475 7                                 | 134.864 533 0         |
| 21  | 154.122 107 0                 | -195.265 610 2                                | 170.579 508 3         |
| 22  | 144.445 654 7                 | -65.153 720 0                                 | 112.728 880 8         |
| 23  | 143.908 138 1                 | -139.917 634 9                                | 142.311 936 8         |
| 24  | 154.155 709 4                 | -200.846 470 8                                | 172.832 014 0         |
| 25  | 157.450 347 0                 | -179.762 98 20                                | 166.375 401 0         |
| 26  | 149.879 666 7                 | -183.961 136 2                                | 163.512 254 5         |
| 27  | 253.273 514 6                 | -62.230 053 6                                 | 176.856 130 2         |
| 28  | 158.096 757 8                 | -196.562 165 9                                | 173.482 921 1         |
| 29  | 168.518 459 0                 | -173.929 058 9                                | 170.682 698 9         |
| 30  | 147.522 728 9                 | -228.552 240 7                                | 179.934 533 6         |

4.3.5 权重系数灵敏度分析

将目标函数中的权重系数做灵敏度分析,如表 3 所示,权重系数每变动 10%时,目标函数变化率分别为 25.65%,16.4%,21.34%,9.32%,平均变化率为 18.18%。

表 3 权重系数的灵敏度

Tab.3 Weight coefficient sensitivity

| No. | $\alpha$ | $\beta$ | Standard<br>deviation of<br>load | Changes in total<br>charging<br>expense/yuan | Objective<br>function |
|-----|----------|---------|----------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| 1   | 0.5      | 0.5     | 206.504 067 5                    | -135.530 445 9                               | 171.017 256 7         |
| 2   | 0.55     | 0.45    | 163.501 635 1                    | -33.577 627 5                                | 100.518 086 5         |
| 3   | 0.6      | 0.4     | 148.210 424 8                    | -74.782 482 8                                | 117.011 005 1         |
| 4   | 0.65     | 0.35    | 156.558 730 9                    | -187.474 334 5                               | 167.379 192 1         |
| 5   | 0.7      | 0.3     | 143.395 484 1                    | -186.668 031 3                               | 155.207 7946          |

4.3.6 电动汽车数量的影响分析

设小区家庭户数仍为 200 户,一户最多有一辆电动汽车,考虑电动汽车家庭占比分别为 25%,40%,55%时的影响,结果如表 4 所示,随着电动汽车数量的增加,电网中可调控的充电负荷增大,负荷标准差有一定下降,但总电费变化因数量增加而逐渐上升,总体来看,目标函数平均偏差为 40.41。

表 4 电动汽车数量对结果的影响

Tab.4 The impact of the number of electric vehicles on the results

| Number of<br>electric<br>vehicles | Standard<br>deviation of<br>load | Changes in total<br>charging<br>expense/yuan | Objective<br>function |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| 50                                | 148.210 424 8                    | -74.782 482 8                                | 117.011 005 1         |
| 80                                | 112.354 667 7                    | -116.518 089 4                               | 114.020 036 4         |
| 110                               | 91.440 113 3                     | -365.852 681 5                               | 201.205 140 6         |

4.3.7 价格不敏感用户数量的影响分析

设总共为 50 辆电动汽车，一辆电动汽车代表一户家庭，价格不敏感用户分别为 10,25,40 户，结果如表 5 所示，对价格积极响应的用户数量越多，

目标函数越小，实验效果越好；因此提高用户对电价的响应程度是利用分时电价调整负荷曲线需要考虑的关键因素之一。

表 5 价格不敏感用户数量对结果的影响  
Tab.5 The effect of the number of price-insensitive users on results

| Price-sensitive users | Price-insensitive users | Standard deviation of load | Changes in total charging expense/<br>yuan | Objective function |
|-----------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| 40                    | 10                      | 181.031 718 0              | -57.371 119 0                              | 131.567 478 4      |
| 25                    | 25                      | 253.352 193 9              | -67.510 302 1                              | 179.015 437 2      |
| 10                    | 40                      | 313.356 321 9              | -16.728 264 9                              | 194.705 099 1      |

5 结论

针对住宅区内大规模电动汽车无序接入电网的现象建立双层规划模型，为一天 24 个时段分别制定不同的电价，下层模型利用上层得到的分时电价，引导每名电动汽车用户错峰充电，保证所有用户充电费用最小化，将下层模型得到的充电负荷输入上层优化分时电价，逐渐平抑电网波动，“削峰填谷”，保证电网安全。

1) 优化模型不但大大减小了电网负荷波动，供电稳定性提高 57.66%，也一定程度降低了用户的充电费用，电动汽车的充电时长平均减少 29.17%。

2) 该模型在优化适用时间上没有限制，也可适用于周末节假日时期。

3) 电动汽车用户的归家、离家时间具有很强的随机性，以后还应考虑这一因素，加强模型的鲁棒性；另外小区电动汽车充电桩数量有限，本文考虑的是所有电动汽车“一车一桩”的情况，未来还可以进一步分析共享充电桩下的电动汽车充电电价策略。

参考文献：

[1] CLEMENTNYNS K,HAESSEN E,DRIESEN J. The impact of charging plugin hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010,25(1):371-380.

[2] MITRA P,VENAYAGAMOORTHY G K. Wide area control for improving stability of a power system with plug-in electric vehicles[J]. IET Generat Transmiss Distrib,2010,10(4): 1151-1163.

[3] MAKASA K J,VENAYAGAMOOTRHY G K. Estimation of voltage stability index in a power system with Plug -in Electric Vehicles[C]//2010 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control-VIII (IREP). IEEE,2010: 1-7.

[4] SORTOMME E,HINDI M,MACPHERSON S,et al. Coordinated charging of plugin hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2011,2(1):198-205.

[5] DEILAMI S,MASOUM A S,MOSES P S,et al. Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2011,2(3):456-467.

[6] WU X,HU X,YIN X,et al. Stochastic optimal energy management of smart home with PEV energy storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,9(3):2065-2075.

[7] 李秋硕,肖湘宁,郭静,等. 电动汽车有序充电方法研究[J]. 电网技术,2012,36(12):32-38.

LI Q S,XIAO X N,GUO J,et al. Research on orderly charging method of electric vehicle[J]. Power Grid Technology,2012,36(12):32-38.

[8] 杨秀菊,白晓清,李佩杰,等. 电动汽车规模化接入配电网的充电优化[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):31-36.

YANG X J,BAI X Q,LI P J,et al. Charging optimization of electric vehicles scaled to the distribution network[J]. Power Automation Equipment,2015,35(6):31-36.

[9] CAO Y,TANG S,LI C,et al. An optimized EV charging model considering TOU price and SOC curve[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2011,3(1):388-393.

[10] MOGHADDAM Z,AHMAD I,HABIBI D,et al. A coordinated dynamic pricing model for electric vehicle charging stations[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2019,5(1):226-238.

- [11] RUI T, HU C, LI G, et al. A distributed charging strategy based on day ahead price model for PV-powered electric vehicle charging station[J]. Applied Soft Computing, 2019, 76: 638–648.
- [12] 常方宇, 黄梅, 张维戈. 分时充电价格下电动汽车有序充电引导策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2609–2615.  
CHANG F Y, HUANG M, ZHANG W G. Orderly charging guidance strategy for electric vehicles under time-sharing charging price[J]. Power Grid Technology, 2016, 40(9): 2609–2615.
- [13] 项顶, 宋永华, 胡泽春, 等. 电动汽车参与 V2G 的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 15–25.  
XIANG D, SONG Y H, HU Z C, et al. Research on the optimal peak-to-valley tariff for electric vehicle participation in V2G[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2013, 33(31): 15–25.
- [14] 黎俊廷. 基于预约的高速公路差异化定价模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.  
LI J T. Research on expressway differentiated pricing model based on reservation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [15] 黑桐. 居民小区内电动汽车有序充放电策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.  
HEI T. Research on orderly charging and discharging strategy of electric vehicles in residential communities[D]. Jinan: Shandong University, 2018.

- [16] 张新城. 居民区电动汽车负荷调度策略及其控制系统的研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
ZHANG X C. Research on load scheduling strategy and control system of electric vehicles in residential areas[D]. Jinan: Shandong University, 2020.



第一作者: 梁士栋(1990—), 男, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 研究方向为车辆优化调度, 2011年本科毕业于山东理工大学, 2014年硕士毕业于吉林大学, 2017年博士毕业于吉林大学。E-mail: sdliang@hotmail.com。



通信作者: 朱冰清(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车充电优化调度。E-mail: zhuhq1997@yeah.net。

(责任编辑: 刘棉玲)