

DOI: 10.7667/PSPC171119

## 基于需求响应的电动汽车充放电电价与时段研究

闫志杰<sup>1</sup>, 张蕊萍<sup>1</sup>, 董海鹰<sup>1</sup>, 马喜平<sup>2</sup>, 李守东<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 大规模电动汽车无序充放电将会对电网负荷造成“峰上加峰”的不良影响, 因此合理引导充放电行为至关重要。首先, 计及电动汽车反向入网(vehicle-to-grid, V2G)情况, 在综合考虑电动汽车用户成本和电网公司利益的基础上, 制定了电动汽车充放电电价上下限。然后, 以电网负荷峰谷差率最小和电动汽车用户参与 V2G 成本最低为目标, 建立了充放电时段优化模型。最后, 用 NSGA-II 算法对该模型进行寻优求解。算例表明, 通过价格型需求侧响应的引导策略, 对实现系统负荷“削峰填谷”和提高电动汽车用户收益具有一定效果。

**关键词:** 电动汽车; V2G; 充放电电价; NSGA-II 算法; 需求侧响应

### Price and period research of electric vehicles charging and discharging based on demand response

YAN Zhijie<sup>1</sup>, ZHANG Ruiping<sup>1</sup>, DONG Haiying<sup>1</sup>, MA Xiping<sup>2</sup>, LI Shoudong<sup>1</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The disordered charging and discharging of large-scale electric vehicles will adversely affect the load of power grid, so it is very important to reasonably guide charging and discharging behavior. Firstly, taking into account the V2G, based on the comprehensive consideration of the cost of electric vehicle users and the interests of grid operators, the up and lower limit of charging and discharging price of electric vehicle is formulated. Then, the optimization model of charging and discharging time is established with the minimum peak load rate of power grid load and the lowest cost of V2G for electric vehicle users. Finally, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) is applied to solve the model. Analysis of calculation example shows that using the guidance strategy of price demand response has certain effects on realizing system load "peak shaving and filling valley" and improving the user income of electric vehicles.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61663019) and State Grid Gansu Corp Science and Technology Program (No. 522722160021).

**Key words:** electric vehicles; V2G; charging and discharging price; NSGA-II; demand response

## 0 引言

现如今, 环境污染、能源紧缺的问题变得日益严峻, 而造成这一系列问题的主要原因是现有的能量来源主要是不可再生的化石能源, 所以需要在减少化石能源使用的同时开发利用新能源。电动汽车(Electric Vehicle, EV)作为新能源汽车的代表, 较传统燃油汽车, 具有能耗低、污染小等优点, 并且可作为储能设备, 参与电网的调峰、调频<sup>[1-2]</sup>, 因而电动汽车有良好的发展前景。根据国务院及工业和信

息化部的预测, 2020 年全国电动汽车产销量将超过 500 万辆<sup>[3]</sup>。大规模电动汽车接入电网将会给电网运行带来很大负面影响, 如电网负荷增长、运行优化控制难度增加、电能质量下降等<sup>[4]</sup>, 因此, 如何最大程度降低这些影响是当前研究的重点。

文献[5]综合考虑输、配电层面, 运用电动汽车充放电双层优化调度方法, 提高配网经济性的同时降低了总网损。文献[6]将电动汽车换电站与光伏电源相整合, 在考虑光伏发电和换电需求不确定的情况下, 建立优化模型, 使换电站的净利润最大。文献[7]研究了不同类型的车在不同充电方式下对配网的影响, 表明通过合理分配不同充电方式下的电动汽车比例, 可减小其充电时对电网负荷的冲击。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61663019); 国网甘肃省电力公司科技支撑项目(522722160021)

文献[8]运用需求侧管理的方法,对电动汽车充放电进行有序引导,但只考虑了电网侧的效益,而忽略了电动汽车用户的利益。文献[9]提出一种智能充电调度策略,减小充电负荷对电网影响的同时降低了用户费用,但未考虑充放电过程中电池的损耗,当前电池价格占整车价格比重仍较高,所以电池的损耗成本是一个必须要考虑的问题。

随着 V2G 技术的不断成熟,电动汽车用户可以选择在谷电价时充电,峰电价时放电,从中得到收益<sup>[10]</sup>。合适的电价是促使用户改变充放电习惯和实现 V2G 的关键<sup>[11]</sup>。文献[12]针对配网负荷波动与分时电价时段不匹配问题,重新划分电价时段,但未涉及放电情况。文献[13]以车主收益最大为目标,采用实时电价规范电动汽车车主充电行为,算例表明若要抑制充电高峰,必须动态调整实时电价,但在当前电力市场环境下难以实现。

本文分析了价格型需求响应引导电动汽车充放电过程中存在的问题,提出最优有序充放电策略,计及电动汽车反向入网,给出了电动汽车充放电电价上下限制定的一种方法,建立了考虑到电网侧和用户侧的利益充放电时段优化模型,运用算法对模型进行求解,通过算例验证了策略的可行性。

## 1 电动汽车有序充放电策略

当电动汽车数量达到一定规模时,在无引导措施下入网会给系统平稳运行带来新的考验<sup>[14]</sup>。假设电动汽车用户开始充电时刻为每天最后出行结束时刻,也即两者概率密度相同,则某地系统负荷曲线与充电概率如图 1 所示。

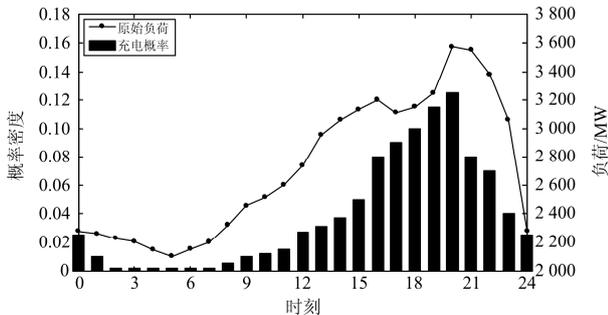


图 1 电网负荷曲线及 EV 充电概率

Fig. 1 Curves of grid load and EV charging probability

由图 1 可以看出,电动汽车充电概率在 20:00 时达到最大,但此时也是电网负荷的高峰时段,而在 2:00~7:00 间,系统负荷和电动汽车充电概率均非常低。无序充电下开始充电时刻与系统负荷的峰时段相重叠,使电网负荷峰谷差率增大。

引导电动汽车有序充放电也即引导需求侧响应,需求侧响应可分为激励型和价格型。分时电价是实现价格型需求侧响应的方法之一,用户根据自己的需求,改变充电时间,进而实现有序充电。

然而在当前电力市场中,峰谷电价下的三个时段已经事先设定好,每天的实际负荷却在实时变化,导致实际负荷时段与现有分时电价时段不对应<sup>[15]</sup>,以及谷电价时段设置较短且电动汽车在谷时段充电数量较高时,使负荷在原本低谷时段出现新波峰<sup>[16]</sup>。

所以,针对目前有序充放电策略的不足,本文在不改变原有分时电价的基础上,对充放电时段进行优化,将原有有序充放电策略加以改进,在保证电网稳定运行的同时尽可能减少电动汽车用户参与 V2G 的花费。

## 2 峰谷分时充、放电电价的制定

### 2.1 电量电价弹性矩阵

电价的变动导致电能需求量的变动称为电量电价弹性<sup>[17]</sup>,弹性系数和弹性矩阵分别如式(1)、式(2)所示。

$$\varepsilon = \frac{\Delta q / q}{\Delta p / p} \quad (1)$$

$$E = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1T} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2T} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{T1} & \varepsilon_{T2} & \cdots & \varepsilon_{TT} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $q$  表示电量;  $p$  表示电价;  $\Delta q$  和  $\Delta p$  分别表示电量和电价的相对增量;  $T$  为研究总时段数;  $\varepsilon_{ii}$  为自弹性系数;  $\varepsilon_{ij}$  为交叉弹性系数。

### 2.2 电动汽车充电电价制定

#### 2.2.1 充电电价下限

本文仅考虑私人用纯电动汽车,将电力部门制定的峰谷分时电价中的谷电价作为电动汽车充电电价下限,模型如式(3)所示。

$$P_{\min} = \begin{cases} P_v, & t_{v1} \leq t \leq t_{v2} \\ P_p, & t_{p1} \leq t \leq t_{p2} \\ P_n, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_v$  为谷电价;  $P_p$  为峰电价;  $P_n$  为平电价;  $[t_{v1}, t_{v2}]$  为谷电价时段;  $[t_{p1}, t_{p2}]$  为峰电价时段。

#### 2.2.2 充电电价上限

电动汽车若要替代燃油汽车,需保证在一定条件下,使用电动汽车的花费较燃油汽车更低。

设  $C_1$  为燃油汽车的使用费用,则有

$$C_1 = C_{v1} + C_o + C_m \quad (4)$$

式中:  $C_{v1}$  为燃油汽车裸车购买的价格;  $C_o$  为总燃油费用;  $C_m$  为总维修保养费用。  $C_o$  由式(5)计算。

$$C_o = S_d \times W_o \times W_g^{100} \times N_{year} \quad (5)$$

式中:  $S_d$  为汽车年行驶公里数;  $W_o$  为油价;  $W_g^{100}$  为汽车百公里油耗;  $N_{year}$  为使用年限。

设  $C_2$  为电动汽车的使用费用, 则有

$$C_2 = C_{v2} + C_c + B_c - B_r \quad (6)$$

式中:  $C_{v2}$  为电动汽车裸车购买的价格;  $C_c$  为总充电费用;  $B_c$  为电池更换费用;  $B_r$  为电池回收收入。  $C_c$ 、 $B_m$  和  $B_r$  分别由式(7)、式(8)计算。

$$C_c = D_{year} \times \frac{P_{cmin} \times S_t \times N_t}{S_{1kWh}} \times N_{year} \quad (7)$$

$$B_r = B_{re} \times E_{av} \quad (8)$$

式中:  $D_{year}$  为电动汽车一年参与 V2G 天数;  $S_t$  为电动汽车平均每次行驶距离;  $N_t$  为每天出行次数;  $S_{1kWh}$  为每度电行驶距离;  $B_{re}$  为电池回收价格;  $E_{av}$  为电动汽车电池平均电量。

所以, 定义电动汽车充电电价上限  $P_{cmax}$  为燃油汽车的使用费用  $C_1$  与电动汽车的使用费用  $C_2$  之间的差值, 即

$$P_{cmax} = C_1 - C_2 \quad (9)$$

## 2.3 电动汽车放电电价制定

### 2.3.1 放电电价下限

由式(7)知电动汽车每天的充电费用为

$$C'_c = \frac{P_{cmin} \times S_t \times N_t}{S_{1kWh}} \quad (10)$$

峰时段反向馈电, 用户每天的收益为

$$I = -P_{cmin} W_{max} + P_d (W_{max} - W_e) - C_b \quad (11)$$

式中:  $W_{max}$  为单辆电动汽车充电一次的平均最大用电量;  $P_d$  为放电电价;  $C_b$  电池损耗。其中,  $C_b$  由式(12)计算。

$$C_b = P_{cmin} \times \left( \frac{1}{\eta_c \times \eta_d} - 1 \right) \quad (12)$$

式中,  $\eta_c$ 、 $\eta_d$  分别表示电池充、放电效率。

所以, 只有当电动汽车反向入网放电收益大于充电支出费用时, 电动汽车用户才会选择将电动汽车入网放电, 也即

$$-P_{cmin} W_{max} + P_d (W_{max} - W_e) - C_b \geq \frac{P_{cmin} \times S_t \times N_t}{S_{1kWh}} \quad (13)$$

求解得

$$P_d \geq \frac{1}{W_{max} - W_e} \left( \frac{P_{cmin} \times S_t \times N_t}{S_{1kWh}} + P_{cmin} W_{max} + C_b \right) \quad (14)$$

此价格即为放电电价下限  $P_{dmin}$ 。

### 2.3.2 放电电价上限

电动汽车放电只能在峰电价时段, 电价不应超过该时刻电网的销售电价<sup>[11]</sup>, 所以以电力部门制定的分时电价中的峰电价作为放电电价上限。

## 3 充放电时段选择

在工作日内, 电动汽车主要用来担当通勤的任务, 调查表明近一半的车辆一天中的行驶里程大约是 32 km<sup>[18]</sup>, 所以下班回家后仍然会剩余一定电量, 记为  $Q_c$ 。

$$Q_c = Q_i - Q_t - Q_{V2G} \quad (15)$$

式中:  $Q_i$  为电池额定容量;  $Q_t$  为电动汽车日行驶耗电量;  $Q_{V2G}$  为电动汽车放电量。其中,  $Q_t$  由式(16)计算。

$$Q_t = \frac{S_t \times N_t}{E} \quad (16)$$

式中,  $E$  为电动汽车能效, 单位为 km/kW·h。

参照国内绝大多数公司工作时间, 划定 17:00—18:00 时是下班出行高峰时段, 1~2 h 到家, 此时电网负荷正在逐步上升, 并在未来 3~4 h 达到高峰。而电动汽车结束一天行程后仍有剩余电量, 因此电动汽车用户可以选择在下班回家后至谷电价开始时刻前这一时间段向电网放电, 该时段记为  $T_{d1}$ 。

假设电动汽车在早上出发时是满电状态, 在保证当日回家行驶电量需求和临时用车电量需求下, 电动汽车用户可以选择在白天峰电价时段放电, 该时段记为  $T_{d2}$ 。

所以电动汽车放电时段  $T_d$  为

$$T_d = T_{d1} \cup T_{d2} \quad (17)$$

电动汽车用户选择在  $T_{d1}$  时段内放电, 将电量放至满足电池健康状态的最低值, 此时电网负荷也逐渐减小, 当电价到达谷时段, 用户选择开始充电并直至充满。该充电时段记为  $T_c$ 。

电动汽车单次充电持续时长为

$$t_c = \frac{(B_e - B_s) Q_i}{P_{c,c} \eta_c} \quad (18)$$

式中:  $B_s$ 、 $B_e$  分为充电开始、结束时刻电量;  $P_{c,c}$  为充电功率。

电动汽车单次放电持续时长为

$$t_d = \begin{cases} \frac{Q_c Q_{d\min}}{P_{d,d} \eta_d}, T_d \in T_{d1} \\ \frac{Q_i Q_{d\min}}{P_{d,d} \eta_d}, T_d \in T_{d2} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $Q_{d\min}$  为电池放电电量下限值。

## 4 时段优化模型

本文以电网负荷峰谷差率最小和电动汽车用户参与 V2G 花费最少为目标, 以 1 d 为一个周期, 1 h 为间隔, 对充放电时段进行寻优。

### 4.1 目标函数

1) 设电网原始日负荷为  $L_{n,j}$  ( $j=1, 2, \dots, 24$ ), 第  $j$  时段充电负荷为  $L_{c,j}$ , 第  $j$  时段放电负荷为  $L_{d,j}$ , 则电网日总负荷  $L_j$  为

$$L_j = \sum_{j=1}^{24} (L_{n,j} + L_{c,j} + L_{d,j}) \quad (20)$$

日峰谷差率用来表示电网一天的负荷波动大小, 将峰谷差率最小作为目标之一。

$$\min F_1 = \frac{[\max(L_j) - \min(L_j)]}{\max(L_j)} \quad (21)$$

式中:  $\max(L_j)$  为电网日负荷峰值;  $\min(L_j)$  为电网日负荷谷值。

2) 在实现有序充放电控制策略中, 不仅要考虑到电网的利益, 同时也要照顾到车主的利益, 因此以电动汽车用户参与 V2G 过程中花费最小为另一目标。

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{24} [p_{c,c} \times t_c \times p_{c\min} \times u_{i,j}] \quad (22)$$

式中,  $u_{i,j}$  为离散决策变量, 可取 0 或 1, 分别代表电动汽车在某一时刻的充放电状态。

### 4.2 约束条件

#### 1) 充放电状态约束

电动汽车在某一时刻状态唯一, 不能同时充放电。

$$P_{c,c}(i,j)P_{d,d}(i,j) = 0 \quad (23)$$

式中:  $P_{c,c}(i,j)$  为电动汽车  $i$  在  $j$  时段的充电功率;  $P_{d,d}(i,j)$  为电动汽车  $i$  在  $j$  时段的放电功率。

#### 2) 电池可用容量约束

$$SOC_{ij\min} \leq SOC_{ij} \leq SOC_{ij\max} \quad (24)$$

式中,  $SOC_{ij\min}$ 、 $SOC_{ij\max}$  分别为电动汽车  $i$  在  $j$  时段电池最小、最大可用容量, 考虑电池的使用寿命,  $SOC_{ij\min}$  取 0.2,  $SOC_{ij\max}$  取 0.9<sup>[19]</sup>。

### 3) 充放电时段约束

$$\begin{cases} t_{c1} < t_{c2}, t_{c1}, t_{c2} \in T_c \\ t_{d1} < t_{d2}, t_{d1}, t_{d2} \in T_d \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $[t_{c1}, t_{c2}]$  为充电时段;  $[t_{d1}, t_{d2}]$  为放电时段。

### 4.3 模型求解

本文运用 NSGA-II 算法求解所建立的多目标模型, 采用非支配解排序和精英保留策略, 收敛速度快且 Pareto 解集分布性好。

由于在多目标优化问题中无法找到一个解同时满足所有目标函数, 只能求得非支配解集或 Pareto 解集。所以本文采用模糊理论在 Pareto 解集中选取最优解, 由于两个目标函数均要求最小化, 宜选用偏小型模糊隶属度函数表示。用式(26)求得标准化 Pareto 解集中解的标准化满意度, 用式(27)比较选择出具有最大  $\omega$  值的 Pareto 最优解作为最优折中解。

$$\omega_n = \begin{cases} 1 & F_n \leq F_n^{\min} \\ \frac{F_n^{\max} - F_n}{F_n^{\max} - F_n^{\min}} & F_n^{\max} > F_n > F_n^{\min} \\ 0 & F_n \geq F_n^{\max} \end{cases} \quad (26)$$

$$\omega = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \omega_n \quad (27)$$

式中:  $\omega_n$  为 0, 1 时表示对第  $n$  个目标函数完全不满意和完全满意;  $F_n^{\max}$ 、 $F_n^{\min}$  分别为第  $n$  个目标函数的最大值和最小值。

## 5 算例分析

### 5.1 参数设置

#### 5.1.1 仿真参数

电网负荷数据仍采用图 1 中的夏季典型日负荷数据, 该地区电动汽车总数为 30 万辆, 车型选择比亚迪 e6, 相关数据如表 1 所示。应用 NSGA-II 算法求解中, 种群规模大小为 140, 最大迭代次数取 100, 交叉概率和变异概率分别取 0.9 和 0.1。

表 1 电动汽车参数

Table 1 Parameters of EV

参数	取值
电池储能容量/(kW·h)	58.5
额定充、放电功率/kW	9.6
充、放电效率/%	90、85
百公里耗电量/(kW·h/100km)	19.5

#### 5.1.2 充电电价上、下限计算

分时电价采用文献[12]所列数据, 各时段对应的电价分别为:  $P_p=2.0$  元/(kW·h),  $P_n=1.2$  元/(kW·h),  $P_v=0.4$  元/(kW·h), 将谷电价作为充电电价下限, 得  $P_{c\min}$  为 0.4 元。

比亚迪 e6 裸车价格 30.98 万元，燃油汽车选择宝马 3 系，裸车价格为 32.59 万元。将电网负荷数据去除周末节假日，一年计为 260 天，设两种类型的车每天出行距离均为 32 km，宝马 3 系百公里油耗  $W_g^{100}$  为 6.2 元(L/100 km)，油价  $W_o$  为 6.5 元/L，比亚迪 e6 每度电平均行驶里程  $S_{1kWh}$  为 4.762 km/(kW·h)，电池回收价格计为原价的 10%，设两种车均使用 12 年，比亚迪 e6 电池组质保 6 年，6 年后重新更换电池，更换电池价格  $B_c$  为 78 000 元，由式(4)和式(5)得使用燃油汽车的费用  $C_1$  为 388 390.2 元，由式(6)一式(8)得使用电动汽车的费用  $C_2$  为 388 386.4 元，则电动汽车充电电价上限  $P_{cmax}$  为 3.8 元/(kW·h)。

5.1.3 放电电价上、下限计算

由 5.1.1 节电动汽车参数知电动汽车充、放电效率分别为 90%、85%，假设电动汽车平均单次最大行驶距离为 20 km，则充电一次的平均最大用电量  $W_{max}$  为 5.85 kW·h，由式(10)一式(14)得电动汽车参与 V2G 放电电价下限  $P_{dmin}$  为 1.84 元/(kW·h)。将峰电价作为放电电价上限，由 5.1.2 知  $P_{dmax}$  为 2.0 元/(kW·h)。

5.2 仿真结果分析

当电动汽车数量为 30 万辆时，仿真结果分别如表 2、图 2 所示。

表 2 V2G 下最优峰谷电价时段

Table 2 Optimal peak-valley price period for V2G

典型日负荷	夏季典型日	
最优时段	充电时段	00:08—06:37
	放电时段	19:25—21:12
峰谷差率/%	原始	41.73
	无序充放电	46.51
	有序充放电	37.92
	最优有序充放电	32.28

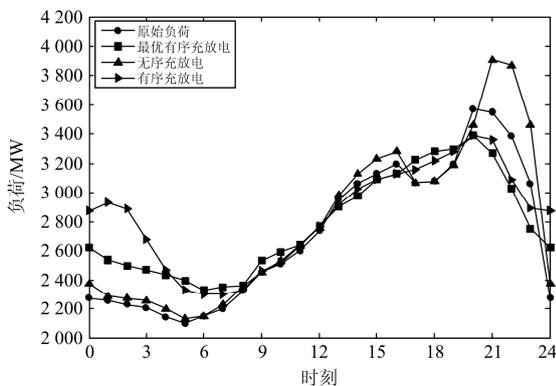


图 2 峰谷电价时段优化前后的负荷曲线

Fig. 2 Load curves before and after optimization of peak-valley price

由表 2、图 2 可以看出，无序充放电情形下，系统负荷峰谷差明显变大，出现了新的最高峰荷，与原始负荷相比，峰谷差率增加了 4.78%，影响了系统的安全性，且相邻时段的负荷变化不稳定，使电网控制难度增加。有序充放电情形下，将充电负荷转移到谷时段，峰值负荷降低，但由于谷电价时长设置不合理，导致系统负荷在低谷时段出现了新的高峰，同样对电网系统不利。在采用最优的充放电策略情形下，使系统负荷峰谷差率由 41.73%减小到 32.28%，起到了较好的“削峰填谷”作用，还避免了电动汽车在某一时段内集中充电。

在采用最优有序充放电策略下，不同数量的电动汽车接入电网后的负荷曲线和峰谷差率分别如表 3、图 3 所示。

表 3 不同数量 EVs 接入后峰谷差率

Table 3 Peak-valley ratio of different numbers of EVs

电动汽车数量/万辆	峰谷差率/%
0	41.19
10	37.16
20	33.53
30	30.85

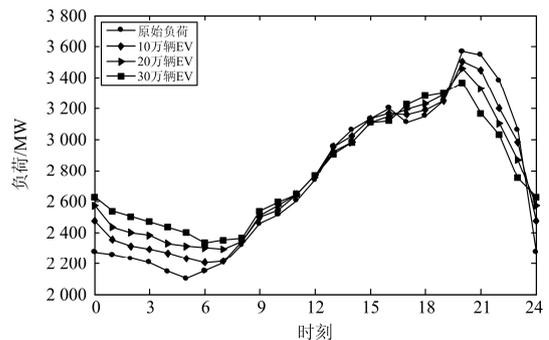


图 3 不同数量 EVs 接入后电网负荷曲线

Fig. 3 Grid load curves of different numbers of EVs

由图 3、表 3 可以看出，当电动汽车数量越多时，减小系统峰谷差的作用越明显，当电动汽车数量达到 30 万辆时，峰谷差率比无电动汽车接入时减小了 10.64%。

单辆电动汽车 1 d 内平均充放电电量及相应费用如表 4、表 5 所示。

由表 4 知，采用最优充放电策略后，与无序情况相比，充电电量由峰时段大量转移到了谷时段，放电电量均集中到峰时段，平、谷时段电量降至 0。

由表 5 知，在最优充放电策略下，充电费用较无序时有所增加，但通过放电获得了一定的收益，总体而言，用户平均每天收益由 1.44 元增长到了 6.95 元。

表 4 优化前后各时段充放电电量

Table 4 Charging and discharging electric quantity in different periods before and after optimization

		峰时段	平时段	谷时段
无序充	充电电量/(kW·h)	12.51	4.91	2.26
放电	放电电量/(kW·h)	4.78	7.53	3.14
最优有序	充电电量/(kW·h)	2.55	4.64	14.42
充放电	放电电量/(kW·h)	14.32	0	0

表 5 EV 用户 1d 内充电费用与放电收益

Table 5 Charging expense and discharging earnings of EV user in one day

	无序充放电	最优有序充放电
充电费用/元	2.01	4.34
放电收益/元	3.45	11.29
收益/元	1.44	6.95

## 6 结论

为实现电动汽车有序充放电, 本文以价格型需求侧响应为引导, 制定了电动汽车充放电电价, 提出一种最优有序充放电策略, 以峰谷差率最小和电动汽车用户花费最小为目标, 以满足电池容量和充放电时段为约束, 建立了最优有序充放电时段优化模型。由算例结果表明, 采用了最优有序充放电策略后, 电动汽车充电负荷由系统负荷高峰时段转移到了负荷低谷时段, 且避免了某一时段过于集中充电, 放电负荷则全部集中到了系统负荷高峰时段, 随着电动汽车数量的增加, 对降低整个系统负荷峰谷差的作用越明显。经济性方面, 电动汽车用户选择在谷电价时段充电, 峰电价时段放电, 每辆电动汽车平均一天收益相较无序充放电增加了 5.51 元, 保证了电动汽车用户的利益。

## 参考文献

[1] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.  
 MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.

[2] 赵文会, 李阮, 孟航. 引入期货的电动汽车与电网互动电能交易模式[J]. 广东电力, 2017, 30(1): 27-32, 58.  
 ZHAO Wenhui, LI Ruan, MENG Hang. Futures trade based interactive electric energy transaction mode for electric vehicles and power grids[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(1): 27-32, 58.

[3] 中华人民共和国国务院. 节能与新能源汽车产业发展规划[EB/OL]. [2012-07-09]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2012-07/09/content\\_3635.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2012-07/09/content_3635.htm).  
 The State Council of the PRC. Energy-saving and new energy automotive industry development plan[EB/OL]. [2012-07-09]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2012-07/09/content\\_3635.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2012-07/09/content_3635.htm).

[4] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.  
 HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.

[5] 胡文平, 何立夫, 陈杰军, 等. 考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 22-28.  
 HU Wenping, HE Lifu, CHEN Jiejun, et al. A bi-layer optimization based schedule considering large-scale electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 22-28.

[6] CHENG Yu, ZHANG Chengwei. Configuration and operation combined optimization for EV battery swapping station considering PV consumption bundling[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 276-293. DOI: 10.1186/s41601-017-0056-y.

[7] 徐国钧, 刘永胜, 李题印, 等. 基于层次分析和概率模拟的电动汽车对配网负荷影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 38-45.  
 XU Guojun, LIU Yongsheng, LI Tiyan, et al. Study on the impact of electric vehicle charging load integrated into distribution network based on analytic hierarchy process and probabilistic simulation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 38-45.

[8] 孙近文, 万云飞, 郑培文, 等. 基于需求侧管理的电动汽车有序充放电策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 64-69.  
 SUN Jinwen, WAN Yunfei, ZHENG Peiwen, et al. Coordinated charging and discharging strategy for electric vehicles based on demand side management[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 64-69.

[9] 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.

[10] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J].

- 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.
- LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan, CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [11] 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 Ding, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Research on optimal time of use price for electric vehicle participating V2G[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 15-25.
- [12] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.
- SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [13] 王彪, 尹霞. 实时电价下含 V2G 功能的电动汽车理性充放电模型及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 90-96.
- WANG Biao, YIN Xia. Modeling and analysis on the rational charging and discharging of electric vehicle with V2G function under real-time prices[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 90-96.
- [14] 刘利平, 杨雄平, 李昱来, 等. 计及电动汽车接入的供电可靠性最优分时电价模型[J]. 广东电力, 2017, 30(5): 56-62.
- LIU Liping, YANG Xiongping, LI Yulai, et al. TOU prince model of reliability optimization considering electric vehicles Accessing[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(5): 56-62.
- [15] 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.
- [16] QI Wei, XU Zhiwei, SHEN Zuojun, et al. Hierarchical coordinated control of plug-in electric vehicles charging in multifamily dwellings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1465-1474.
- [17] 秦祯芳, 岳顺民, 余贻鑫, 等. 零售端电力市场中的电量电价弹性矩阵[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 16-19.
- QIN Zhenfang, YUE Shunmin, YU Yixin, et al. Price elasticity matrix of demand in current retail power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 16-19.
- [18] TAYLOR M J, ALEXANDER A. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-6.
- [19] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 30-37.
- YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-37.

收稿日期: 2017-07-26; 修回日期: 2017-11-20

作者简介:

闫志杰(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车与电网互动技术; E-mail: yanzhijie\_5@163.com

张蕊萍(1974—), 女, 通信作者, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: zhrp@mail.lzjtu.cn

董海鹰(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化运行与智能控制、新能源发电优化控制。

(编辑 张爱琴)