

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201025

计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站有序充放电调度

程杉¹, 杨堃¹, 魏昭彬¹, 赵孟雨²

(1. 智慧能源技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

2. 国网河南省电力公司许昌供电公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对充电站无区别对待电动汽车的充放电、未考虑电池损耗的问题, 提出了基于节制放电策略和计及充、放电电价与充、放电功率优化的充电站调度模型。模型以配电网与充电站交互功率和充电站运营收益两方面为目标, 考虑电动汽车放电时的电池损耗问题, 根据配电网原始负荷的波动, 提出限制充电站放电行为只针对负荷高峰时段的策略。同时控制电池的单次放电深度, 以减小电池的损耗与放电成本。最后通过粒子群算法对模型进行求解, 算例的对比与分析验证了所提方法的有效性与合理性。

关键词: 电动汽车; 充电站; 充放电电价; 节制放电

Orderly charging and discharging scheduling of an electric vehicle charging station considering price optimization and discharge behavior control

CHENG Shan¹, YANG Kun¹, WEI Zhaobin¹, ZHAO Mengyu²

(1. Engineering Center for Intelligent Energy Technology (China Three Gorges University), Yichang 443002, China;

2. Xuchang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: There is a problem that charging stations treat EV charging and discharging without distinction. To tackle this an optimal scheduling model including dynamic charging price, discharging price, charging and discharging power based on discharge behavior control is proposed. The model takes the interactive fluctuation of power between the charging station and the distribution network and the operating income of the charging station as the objective, and according to the fluctuation of the original load of the distribution network, discharging is only for the peak load period. The cycle life of the battery is also considered to limit its single discharge depth to reduce the cost of battery loss and discharge. The model using a particle swarm optimization algorithm and the validity and rationality of the proposed method are verified by comparison and analysis of different examples.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607105).

Key words: electric vehicle; charging station; charging and discharging price; discharge behavior control

0 引言

全球电动汽车(Electric Vehicle, EV)产业正进入加速发展的新阶段, 而中国占据着世界上最大的EV市场。大量EV无序接入电网会加大系统负荷的峰谷差, 对电网的安全与稳定运行产生严重的影响^[1-2]。EV通过充电站接入电网, 在满足车主意愿的前提下对动力电池充、放电进行统一调度, 在满足充电需求的同时, 实现充电站经济收益和为配电网削峰填谷、提供辅助服务等多重效益^[3], 因此制定科学

合理的电价机制是实现此多重效益的有效手段^[4]。

目前, 关于与EV充放电电价的研究主要集中于两方面。

一是充电电价制定策略及其应用的EV充电设施规划和优化调度^[5-7]。文献[8]提出了基于博弈的电价制定策略, 建立了大规模电动汽车有序充电调度的分布式多智能体系统; 文献[9]则提出根据预测的配电网负荷波动情况对电网分时电价进行细分, 建立了以EV充电费用最小和起始充电时间最早为目标的有序充电控制模型。为了最小化负荷峰谷差, 文献[10]首先基于分时电价得到EV理想的充电时段, 然后在此时段内引入训练学习实现削峰填谷;

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607105)

文献[11]则考虑分时充电电价激励,提出了EV充电站和配电网的协同优化规划方法。

另一方面是EV放电定价策略及其应用的EV充放电优化调度^[12-14]。为了实现调峰和对换电站电池充电控制,文献[15]建立了考虑车主互动意愿、基于电网调峰策略的换电站实时定价模型;而文献[16]为了保证EV用户和电网公司都能获得收益的前提下制定放电电价,提出了基于静态贝叶斯博弈的EV放电定价方法;为了促进EV车主和代理商参与优化调度,文献[17]则提出了由EV代理商与电力公司参与的、基于模糊贝叶斯学习的放电电价双边谈判模型。

现有研究较少同时考虑充电与放电电价对EV优化调度产生的影响,对于充电站来说,对EV充电获取收益为其主要收入来源,而调度EV放电在削峰的同时对EV用户是有费用支出的,因此有必要研究动态充电电价、放电电价对充电站的收益与配网负荷波动的影响。基于此考虑,本文将EV的充、放电电价同时作为充电站优化调度时的决策变量。其次,EV频繁充、放电会加速电池老化,尤其是长期高频率过度放电将会严重缩短电池的使用寿命,更换电池的费用远远大于放电所得收益^[18]。因此,充电站需节制放电行为,使放电具有负荷高峰时段的针对性,更加高效,也有利于车主的长期利益以及国家提倡的环保理念。

1 EV出行特性模型

基于加拿大温尼伯市实际车辆数据^[19],建立EV行驶特性数学模型。

1.1 离开电网与接入电网的时间分布

离开电网时间 t_{dep} 的概率密度函数符合 χ^2 分布,即

$$f_d(t_{\text{dep},m}) = \frac{t_{\text{dep}}^{(l-2)/2} e^{-t_{\text{dep},m}/2}}{2^{l/2} K(l/2)} \quad (1)$$

式中, $K(z)$ 的定义式为

$$K(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (2)$$

式中: m 表示第 m 个时间窗口; $t_{\text{dep},m}$ 为车辆归一化后的离开电网时间,定义为 $t_{\text{dep}}/\Delta t$, Δt 为离散时间窗口的长度; l 为利用序列二次规划最小化均方误差求得的参数。

接入电网时间 t_{arr} 为 t_{dep} 的条件概率,即

$$P_{\text{arr}}(t_{\text{arr}} | t_{\text{dep},m}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} e^{-\frac{(t_{\text{arr}} - \mu_m)^2}{2\sigma_m^2}} \quad (3)$$

式中, μ_m 和 σ_m 分别为 t_{arr} 的均值和标准差。

1.2 日行驶里程分布

EV日行驶里程 R_d 的概率密度函数符合截断幂律分布^[20]:

$$f(R_d) = (d + R_d)^{-\beta} \exp(-R_d/\alpha) \quad (4)$$

其中,幂律分布参数 $\alpha=14.09$, $\beta=0.73$, $d=7.73$,其拟合效果图如图1。

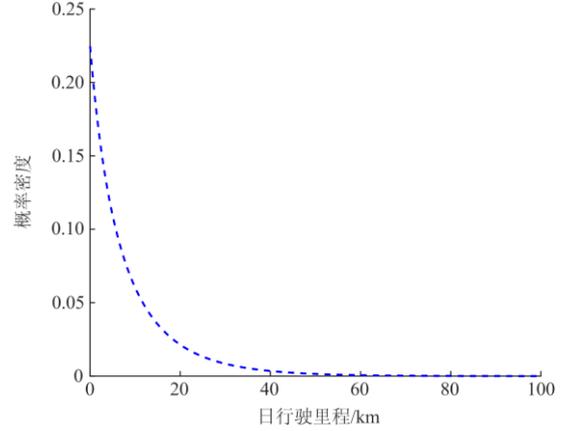


图1 电动汽车日行驶里程概率密度

Fig. 1 Probability distribution of EV's trip distance

1.3 期望荷电状态

根据EV接入电网时的初始荷电状态 S_s 和 R_d ,计算EV在离开电网时的期望荷电状态 S_e 。

$$S_e = S_s + \frac{R_d E_{d100}}{100E} \quad (5)$$

式中: E 为EV电池额定容量; E_{d100} 为行驶100 km所需的电能。

计算出 S_e 后,判断第 n 辆EV接入电网的时段区间是否合理,即

$$\frac{S_{e,n} - S_{s,n}}{P_{\text{max}}^{\text{EV}}} \leq t_{\text{dep},n} - t_{\text{arr},n} \quad (6)$$

式中, $P_{\text{max}}^{\text{EV}}$ 为单个时间窗口内最大充电功率。若车主设定的时间不满足式(6),充电站将要求车主调整。

2 充电站优化调度模型及其求解

2.1 EV电池损耗模型

EV电池的放电深度 D_{DoD} 定义为

$$D_{\text{DoD}} = S_1 - S_2 \quad (7)$$

式中, S_1 、 S_2 为放电前、后的荷电状态。

电池循环寿命 L 与电池的 D_{DoD} 密切相关^[21], D_{DoD} 越大 L 越小,二者之间的关系称为电池的放电特性曲线,表示为

$$L = L(D_{\text{DoD}}) \quad (8)$$

根据文献[22], 总放电量 L_{ET} 可视为 L 、 D_{DoD} 和 E 三者的乘积。由于购置电池成本 C_{bat} 保持不变, 则在某一 D_{DoD} 下 L_{ET} 越大、单位放电量的平均成本 K_{DoD}^b 越低, 电池利用效率越高。单次放电成本 K_{DoD} 为在某一 D_{DoD} 下 C_{bat} 与 L 的比值。 L_{ET} 、 K_{DoD}^b 和 K_{DoD} 分别表示为[22]

$$L_{ET} = L \times E \times D_{DoD} \quad (9)$$

$$K_{DoD}^b = \frac{C_{bat}}{L_{ET}} \quad (10)$$

$$K_{DoD} = \frac{C_{bat}}{L} \quad (11)$$

不同类型电池的放电特性不同, 电池的 L 一般随着 D_{DoD} 的增加而不断减小, 根据式(11)可知 K_{DoD} 不断增加, 因此, 充电站在对 EV 放电调度时, 需考虑电池损耗问题, 避免高放电深度引起过高的电池损耗成本。

2.2 考虑节制放电的优化调度模型

2.2.1 目标函数

考虑充电站收益和充电站与配电网交互功率的优化目标为

$$\max f = \sum_{t=1}^T (P_t^c C_t^c - P_t^d C_t^d - P_t^B C_t^G) - \lambda \sum_{t=2}^T |P_t^{\text{in}} - P_{t-1}^{\text{in}}| \quad (12)$$

式中: P_t^c 、 P_t^d 和 P_t^B 分别为 t 时段内所有参与调度 EV 的充电功率、放电功率和 EV 充电站从配电网购电功率; C_t^c 、 C_t^d 和 C_t^G 分别为 t 时段内 EV 的充、放电电价和充电站购电电价; λ 为调节因子[23]; P^{in} 为充电站与配电网之间的交互功率。

2.2.2 约束条件

1) 充电站源荷约束

各时段内从配电网购电功率应该不大于配电网所能承受的最大负荷 P_t^{ex} , 即

$$P_t^{\text{ex}} \geq P_t^B = P_t^L + P_t^c + P_t^d \quad (13)$$

2) 每辆 EV 充电、放电功率约束

$$-P_{\max}^{\text{EV}} \leq P_{t,n}^d \leq 0 \leq P_{t,n}^c \leq P_{\max}^{\text{EV}} \quad (14)$$

式中: $P_{t,n}^c$ 、 $P_{t,n}^d$ 为第 n 辆 EV 的充、放电功率。

3) 离开电网时荷电状态约束

为保证出行需求, 每辆 EV 的 S_e 需满足:

$$S_{e,n} \geq S_{s,n} + \frac{R_{d,n} E_{d100}}{100E} \quad (15)$$

4) 荷电状态更新约束

非闲置状态下的 EV 荷电状态 S_{t+1} 为

$$S_{t+1,n} = S_{t,n} + \frac{(P_{t,n}^c + P_{t,n}^d) \Delta t}{E} \quad (16)$$

5) 荷电状态上、下限约束

为避免 EV 的动力电池过度充电、放电, 其荷电状态满足:

$$S_{\min} \leq S_{t,n} \leq S_{\max} \quad (17)$$

式中, S_{\min} 、 S_{\max} 分别表示 $S_{t,n}$ 的下限、上限。

6) 放电电量安全约束

$$0 \leq D_{DoD} \leq D_{DoD_{\max}} \quad (18)$$

式中, $D_{DoD_{\max}}$ 为 D_{DoD} 的上限。

7) 充、放电时段约束

$$\begin{cases} f^c = \begin{cases} 0 \text{ 或 } 1 & t \in [t_{\text{arr}}, t_{\text{dep}}] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ f^d = \begin{cases} 0 \text{ 或 } 1 & t \in T_{\text{set}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

式中: f^c / f^d 代表充/放电标志位; T_{set} 为充电站设置的允许放电时段集合。根据负荷曲线的分布情况设置适当的放电时段。

8) EV 的充放电状态约束

$$f_t^c + f_t^d \leq 1 \quad (20)$$

9) 动态电价上、下限约束

考虑代理商的运营成本和用户的承受能力, 设定充、放电电价的上下限。

$$C_{\min}^c \leq C_t^c \leq C_{\max}^c \quad (21)$$

$$C_{\min}^d \leq C_t^d \leq C_{\max}^d \quad (22)$$

式中: C_{\max}^c / C_{\max}^d 和 C_{\min}^c / C_{\min}^d 分别为充/放电电价的上下限。

2.3 模型求解

粒子速度 v 和位置 x 的更新公式如式(23)和式(24)所示。传统粒子群算法存在早熟、易陷入局部最优、效率低等缺陷。因此, 本文采用改进粒子群优化算法[24]求解此高维、多约束的优化问题, 引入交叉变异操作以提高种群多样性, 避免过早收敛[25]。

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 r_1 (p_b^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_b^k - x_{id}^k) \quad (23)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (24)$$

式中: k 为当前迭代次数; v_{id}^k 为粒子 i 在 d 维下的速度; x_{id}^k 为粒子 i 在 d 维下的位置; p_b^k 、 g_b^k 分别为局部最优解和全局最优解; w 为惯性权重; c_1 、 c_2 均为学习因子; r_1 、 r_2 均为[0,1]之间服从均匀分布的随机数。

交叉操作表达如式(25)。

$$v_{id}^{rk} = \begin{cases} x_{id}^k & r < C_R \text{ 或 } j = j_r \\ p_b^k & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

式中: v_{id}^{rk} 为交叉产生的个体; C_R 为交叉因子, 取

0.1. 增加选择因子来均衡局部搜索和全局搜索, 提高搜索速度, 变异操作具体公式为

$$u_{id}^k = \begin{cases} p_{b,r_3,d} + F_{acc} (p_{b,r_4,d}^k - p_{b,r_5,d}^k) & r < R \\ G_{bd}^k + F_{acc} (p_{b,r_3,d}^k - p_{b,r_4,d}^k) + F_{acc} (p_{b,r_5,d}^k - p_{b,r_6,d}^k) & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

式中: u_{id}^k 为产生的变异个体; r_3-r_6 为服从随机分布的不重复选择的种群个体; F_{acc} 为服从均匀分布的收缩因子; R 为选择因子, 取 0.1。

设定粒子群位置和速度的维数为 $T \times V \times M$ 。其中, T 为调度周期, 设置为 24, V 为决策变量的个数, 即 $[P_t^c, P_t^d, P_t^b, P_t^m, f_t^c, f_t^d, C_t^c, C_t^d]$, M 为 EV 的数量, 求解流程图如图 2 所示。

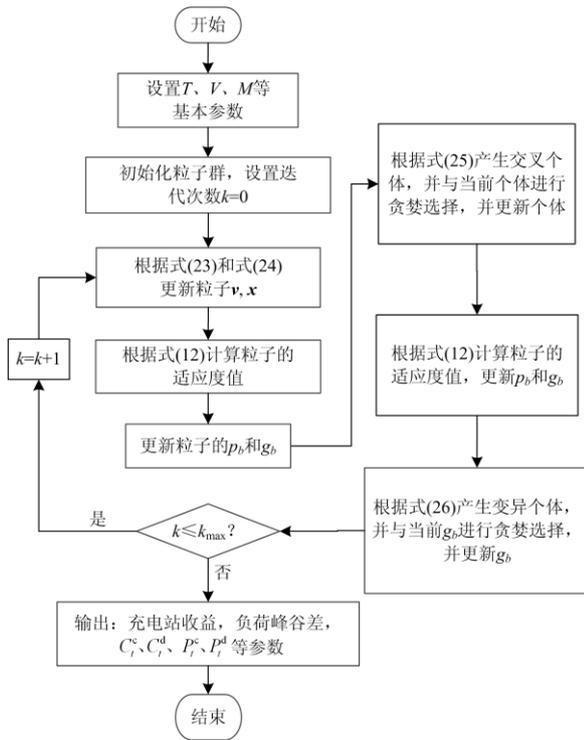


图 2 改进粒子群算法求解流程图
Fig. 2 Improved PSO solution flow chart

3 算例分析

3.1 参数设置

P_t^l 采用文献[26]中的数据, 负荷峰值为970.3 kW, 峰谷差为753.3 kW。配电网选用S13型变压器, 额定容量为1 250 kV·A。优化模型中, λ 取0.8^[25], EV参与调度数量为50辆, 最大迭代次数 k_{max} 为100。分时EV充电电价、放电电价的初始迭代值 C^{c0} 、 C^{d0} 和充电站向电网购电电价 C^G 如表1所示^[1], 更新电价的上下限 C_{max}^c 和 C_{min}^c 、 C_{max}^d 和 C_{min}^d 见表2^[15]。

表 1 分时电价参数设置 (元/kWh)

| 时段 | C^G | C^{c0} 、 C^{d0} |
|-----------------|-------|---------------------|
| T_1-T_8 | 0.365 | 0.4 |
| T_9-T_{12} | 0.869 | 2.0 |
| $T_{13}-T_{15}$ | 0.687 | 1.2 |
| $T_{16}-T_{17}$ | 0.687 | 2.0 |
| $T_{18}-T_{21}$ | 0.869 | 2.0 |
| $T_{22}-T_{24}$ | 0.687 | 1.2 |

表 2 更新电价上下限 (元/kWh)

| C_{min}^c | C_{max}^c | C_{min}^d | C_{max}^d |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.4 | 2.0 | 0.42 | 2.24 |

EV 的 $t_{arr,n}$ 、 $t_{dep,n}$ 和 $R_{d,n}$ 由对应的概率密度函数通过蒙特卡洛抽样得到, 且每辆 EV 的 $S_{s,n}$ 是在 0.1~0.5 之间随机分布, 采用同一电池型号。表 3 列出 EV 的其余参数设置。

表 3 EV 参数设置

| 变量 | S_{max} | S_{min} | E/kWh | P_{max}^{EV}/kW | $N/辆$ |
|----|-----------|-----------|-----------------|-------------------|---------|
| 值 | 1 | 0.2 | 33 | 3 | 50 |
| 变量 | α | d | $D_{DoD_{max}}$ | T_{set} | β |
| 值 | 14.09 | 7.73 | 0.362 | $T_{10}-T_{24}$ | 0.73 |

3.2 仿真结果对比与分析

如图 3 所示为考虑节制放电的充放电调度结果及其优化前后充电站负荷曲线对比。定性来看, 考虑节制放电行为的充放电调度具有明显的削峰填谷效果: 在原负荷高峰期没有或较少安排 EV 充电(比如出行刚需), 充电负荷没有出现骤升骤降现象, T_3-T_5 、 T_7-T_{10} 、 $T_{11}-T_{15}$ 和 $T_{17}-T_{21}$ 等多个时段负荷波动为 0, 填谷效果良好; 放电行为只出现在负荷尖峰时段($T_{17}-T_{21}$)、次尖峰时段($T_{12}-T_{13}$), 节制放电有力地削峰、保证了系统运行的安全性。定量来看, 在 T_{12} 时充电站调度 EV 充、放电分别为 3 kW、120 kW, 削峰率达 15.81%; 在 T_{20} 时充电站分别调度 EV 充、放电为 29.31 kW、80.04 kW, 削峰率达 8%; T_3 、 T_4 、 T_5 和 T_6 充电站分别调度 EV 充电 122.21 kW、138 kW、115.58 kW 和 117 kW, 填谷率分别为 34.43%、38.88%、32.56%、25%, 填谷后 T_3-T_5 负荷波动率为 0(T_7-T_{10} 、 $T_{11}-T_{15}$ 和 $T_{17}-T_{21}$ 等多个时段也为 0)。

本文充电站对 EV 的充放电调度同时考虑了充放电电价优化和放电行为节制, 为了验证有效性将其结果与其他策略进行对比:

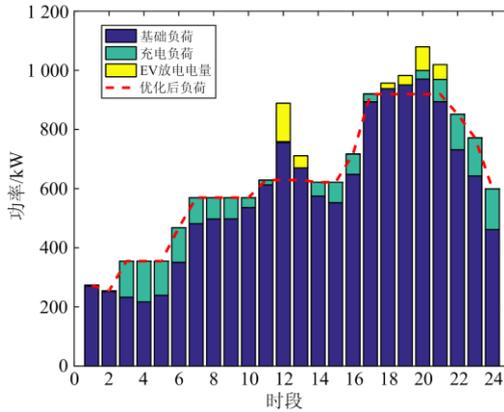


图3 调度结果以及优化前后负荷曲线对比

Fig. 3 Comparison of dispatch solution and load curve before/after optimization

策略一: 采用分时电价、不考虑节制放电的调度。

策略二: 采用动态统一充放电电价、不考虑节制放电的调度。

策略三: 采用分时电价、考虑节制放电的调度。

本文策略: 采用动态电价、考虑节制放电的调度。

表4和图4所示为不同策略的对比结果。由表4可见, 采用本文策略的负荷峰谷差和负荷均方差相比策略一和二分别均下降了9.78%、2.41%和11.89%、2.22%, 但充电站收益分别提高了1.1%和下降了4.83%, 同时策略三与策略一相比峰谷差和均方差都降低了3.5%和1.9%。这是因为节制放电使得放电行为更加集中在负荷高峰时段和次高峰时段, 放电总量多, 削峰效果明显, 使峰谷差和均方差降低。而从式(12)可得, EV的放电费用属于充电站收益的支出部分, 因此本文策略相比于策略二充电站收益略有下降, 但是从可持续发展的角度来看, 这样能避免电池频繁充放电, 减少电池的损耗。从另一个侧面可以合理推测, 考虑节制放电、充电站引导EV车主选择放电时段, 对于区域充电站群的调度, 是有利于配电网的安全稳定运行的。再由图4可直观看出, 采用节制放电策略调度结果的削峰能力整体优于未采用节制放电策略, 例如策略一与策略三、策略二与本文策略的对比, 且在抑制尖峰时段($T_{17}-T_{21}$)和次尖峰时段($T_{12}-T_{13}$)的削峰效果都强于相应策略。

表4 不同策略下各种指标的比较

Table 4 Index comparison with different strategies

| 指标 | 策略一 | 策略二 | 策略三 | 本文策略 |
|--------|---------|---------|-------|--------|
| 充电收益/元 | 1 010.7 | 1 073.7 | 952.6 | 1021.8 |
| 峰谷差/kW | 736.9 | 681.2 | 710.8 | 664.8 |
| 均方差/kW | 240.5 | 216.7 | 236.0 | 211.9 |

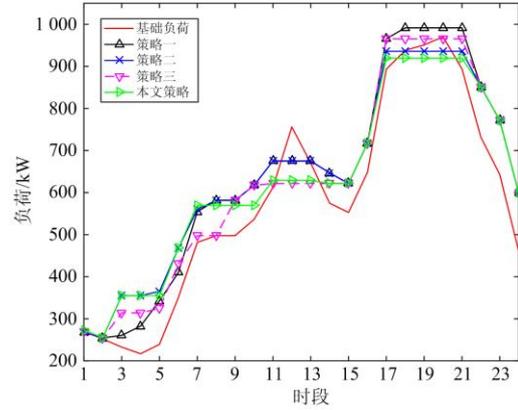


图4 不同策略下的负荷曲线

Fig. 4 Load curves with different strategies

如图5所示为编号49的EV荷电状态曲线。其入网可调度时段为 T_1-T_{16} , 初始荷电状态 $S_{1,49}=0.36$, 在非放电时段(T_3-T_{10})充电至最大值 $S_{10,49}=1$, 然后在 $T_{12}-T_{14}$ 时段进行放电, 回馈电网以减小负荷峰值, 并且放电结束时荷电状态为0.82, 满足模型中约束条件18的要求, 最后, 在剩余时段($T_{14}-T_{16}$)充电至满电, 并离开电网。

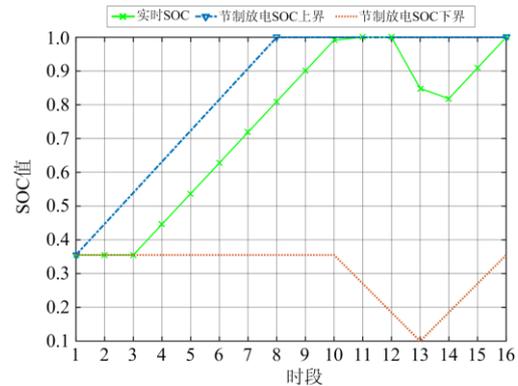


图5 编号49的EV荷电状态曲线

Fig. 5 SOC curve of No.49

如图6所示为优化后的EV充、放电电价曲线。在基础负荷低谷时段(T_3-T_5), 充电电价逐渐降低, 大量EV进行充电, 此时主要加强填谷效果; 在负荷尖峰时段($T_{17}-T_{21}$)和次尖峰时段($T_{12}-T_{13}$), 放电电价比较高, 充电电价较低, 通过节制放电引导EV集中进行放电, 减少EV充电负荷, 主要达到削峰效果; 根据表4和式(12)可知, 充电站为了减小与配电网的功率交互, 充电站以舍弃部分收益换取更好的削峰填谷效果。而在最后负荷低谷时段($T_{22}-T_{24}$), 为保证EV离开电网时的电量, 所有的EV会集中进行充电, 因此, 充电电价逐渐升高以补偿峰时段损失的部分EV给充电站的放电收益。

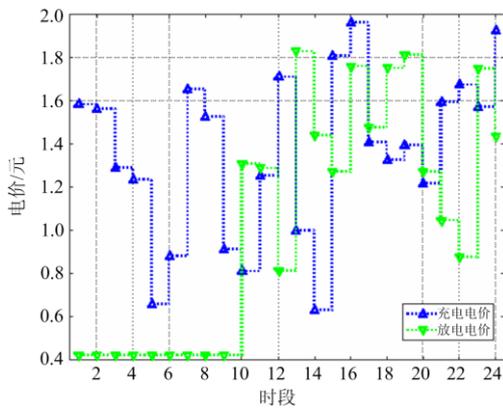


图 6 优化后的充、放电电价

Fig. 6 Optimized charging and discharging prices

根据图 5 可知, 电动汽车放电深度 D_{DOD} 为 0.181 8, 通过式(8)的曲线关系^[27]可知 L 约为 8 000 次, 由式(9)一式(11)计算得到如图 7 所示编号为 49 的 EV 放电成本曲线。由于本文所有 EV 的电池为同一型号, 其购置电池成本为定值, 从图中可知, K_{DOD} 要远高于 K_{DOD}^b , 因此充电站在调度 EV 时可以主要考虑 K_{DOD} 的影响, 需要控制其电池的放电深度, 即在某一时段的所有参与放电的 EV 中, 充电站可以优先控制 D_{DOD} 较小的 EV 进行放电, 尽量延长电池使用寿命, 减少不必要的资源浪费。

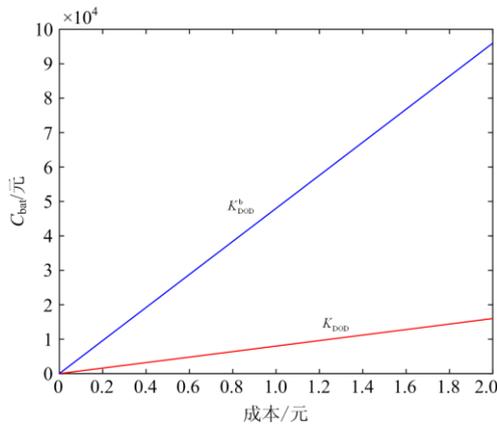


图 7 编号 49 的 EV 的放电成本曲线

Fig. 7 Discharge cost curves of vehicle No.49

4 结论与展望

针对充电站在调度中无区别对待 EV 的充电行为与放电行为的问题, 提出了同时将 EV 的充电电价、放电电价与充放电功率作为决策变量的优化调度模型, 同时考虑了 EV 充放电对配电网运行稳定性和充电站运营经济性的影响, 以及根据原始负荷

的波动情况, 充电站设置允许放电时段, 使得 EV 在放电电价的引导下只能在高峰时段放电, 考虑到电池的循环寿命, 限制其 EV 电池放电深度。结果显示, 该模型可以在保证充电站运营商收益的同时, 更加具有针对性地削峰填谷; 充、放电价可以根据负荷波动的情况而动态变化, 从而又对 EV 响应起到较好的激励作用, 达到控制 EV 有节制地进行有序充放电和降低 EV 入网对电网运行产生波动性的效果。

充电站的优化调度是尽可能满足多方利益的一个优化问题, 文中只量化了充电站的收益、配电网与充电站之间的交互功率波动, 未全面考虑充电站、配电网、EV 用户三者之间的利益关系, 下一步可制定更为具体、公平、多方共赢的调度模型。

参考文献

- [1] SUN Siyang, YANG Qiang, YAN Wenjun. Optimal temporal-spatial PEV charging scheduling in active power distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 379-388. DOI: 10.1186/s41601-017-0065-x.
- [2] 程杉, 王贤宁, 冯毅焜. EV 充电站有序充电调度的分散式优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 39-46. CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 39-46.
- [3] CHENG Shan, FENG Yichen, WANG Xianning. Application of Lagrange relaxation to decentralized optimization of dispatching a charging station for electric vehicles[J]. Electronics, 2019, 8(3): 288.
- [4] ZHAO Mengyu, WEI Zhaobin, XV Kangyi, et al. Integrated energy optimization of dispatching a charging station with electric vehicles[C] // 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), September 6-9, 2019, Yichang, China: 670-673.
- [5] GAGANGEET S A, NEERAJ K, MUKESH S, et al. Energy trading with dynamic pricing for electric vehicles in a smart city environment[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2019, 127: 169-183.
- [6] 严俊, 严凤. 基于两步规划的电动汽车充换电服务设施选址方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 48-56. YAN Jun, YAN Feng. Location method of charging and

- swapping service facilities based on a two-step planning[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(14): 48-56.
- [7] 王哲, 殷帅兵, 王军生, 等. 基于层次分析法与模糊物元分析的城市充电站选址决策方法[J]. *新能源汽车供电技术*, 2018, 2(1): 1-7.
WANG Zhe, YIN Shuaibing, WANG Junsheng, et al. Method based on AHP and fuzzy matter-element to solve location decision of electric vehicle charging station[J]. *Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles*, 2018, 2(1): 1-7.
- [8] KARFOPOULOS E L, HATZIARGYRIOU N D. A multi-agent system for controlled charging of a large population of electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 1196-1204.
- [9] 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设计[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.
- [10] 辛昊, 严正, 许少伦. 基于多代理系统的电动汽车协调充电策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(1): 48-54.
XIN Hao, YAN Zheng, XU Shaolun. Multi-agent system based coordinated charging strategy for electric vehicles[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(1): 48-54.
- [11] 段豪翔, 吕林, 向月. 计及分时充电电价激励的电动汽车充电站与配电网协同规划[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(1): 103-110.
DUAN Haoxiang, LÜ Lin, XIANG Yue. Coordinated planning for electric vehicle charging station and distribution network considering time-of-use charging price[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA 2017*, 29(1): 103-110.
- [12] 王璟, 王利利, 郭勇, 等. 计及电动汽车的微电网经济调度方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(17): 111-117.
WANG Jing, WANG Lili, GUO Yong, et al. Microgrid economic dispatch method considering electric vehicles[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(17): 111-117.
- [13] 于娜, 于飞, 黄大为, 等. 基于多代理系统的电动汽车充放电分布式协同调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 1-9.
YU Na, YU Fei, HUANG Dawei, et al. Multi-agent system based charging and discharging of electric vehicles distributed coordination dispatch strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 1-9.
- [14] KEVIN A M, VIGNESH S, TAPAS K D, et al. Empowering end-use consumers of electricity to aggregate for demand-side participation[J]. *Applied Energy*, 2019, 248: 372-382.
- [15] 张齐东, 黄学良, 陈中, 等. 电动汽车电池更换站集群充电控制策略研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(12): 447-453.
ZHANG Qidong, HUANG Xueliang, CHEN Zhong, et al. Research on control strategy for the uniform charging of electric vehicle battery swapping station[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(12): 447-453.
- [16] 孙波, 王振兴, 赵文会. 基于静态贝叶斯博弈的电动汽车放电电价分析[J]. *可再生能源*, 2015, 33(11): 1686-1692.
SUN Bo, WANG Zhenxing, ZHAO Wenhui. Analysis of discharge price based on the static Bayesian game[J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(11): 1686-1692.
- [17] 张谦, 蔡家佳, 李春燕, 等. 基于模糊贝叶斯学习的电动汽车放电电价谈判策略[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 61-71, 343.
ZHANG Qian, CAI Jiajia, LI Chunyan, et al. The negotiation strategy of discharging price of electric vehicle based on fuzzy Bayesian learning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 61-71, 343.
- [18] ZHOU Chengke, QIAN Kejun, ALLAN M, et al. Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 26(4): 1041-1050.
- [19] ASHTARI A, BIBEAU E, SHAHIDINEJAD S. WPG01 driving cycle 2010[EB/OL]. [2020-08-01]. http://dx.doi.org/10.5203/ds_bib_2.
- [20] 王岱, 管晓宏, 吴江, 等. 基于车辆行驶行为特性建模的 EV 充放电策略与分析[J]. *电网技术*, 2014, 38(9): 2322-2327.
WANG Dai, GUAN Xiaohong, WU Jiang, et al. Vehicle driving pattern based modeling and analysis of centralized charging/discharging strategy for plug-in electric vehicles[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(9): 2322-2327.
- [21] KEMPTON W, TOMIĆ J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 144(1): 268-279.
- [22] 董婷婷. 增程式电动车能量管理及电池寿命研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

- DONG Tingting. Study on energy management and battery life for extended-range electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [23] WANG Dai, GUAN Xiaohong, WU Jiang. Integrated energy exchange scheduling for multimicrogrid system with electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 4(2): 1762-1774.
- [24] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的EV充电站规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 12-21.
- CHENG Shan, WU Siyuan, SUN Weibin. Optimal planning of charging stations for electric vehicles considering voltage stability of distribution system and the quality of service[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 12-21.
- [25] 程杉, 赵孟雨, 魏昭彬. 计及动态电价的电动汽车充放电优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报: 1-7 [2021-05-07].<https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000578>.
- CHENG Shan, ZHAO Mengyu, WEI Zhaobin. Optimal scheduling of electric vehicle charging and discharging with dynamic pricing[J]. Proceedings of the CSU-EPSA: 1-7[2021-05-07].<https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000578>.
- [26] 杨健维, 苟方杰, 黄宇, 等. 基于不确定性测度的居民小区 EV 充电分时电价制定策略[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 96-102.
- YANG Jianwei, GOU Fangjie, HUANG Yu, et al. Residential area electric vehicle charging pricing strategy based on uncertainty measure[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 96-102.
- [27] DONG Tingting, ZHAO Fuquan, LI Jun, et al. Design method and control optimization of an extended range electric vehicle[C] // 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 6-9, 2011, Chicago, America: 1-6.

收稿日期: 2020-08-22; 修回日期: 2020-11-19

作者简介:

程杉(1981—), 男, 通信作者, 工学博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行优化与控制、智能电网能量管理、智能计算及其在电力系统中的应用等; E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

杨堃(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源微电网运行优化与控制; E-mail: 466243864@qq.com

魏昭彬(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统可靠性分析及其分散式优化。E-mail: 18482163517@163.com

(编辑 葛艳娜)