DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190066

电动汽车两阶段多目标有序充电策略研究

陈 奎[1]，马子龙[1]，周思宇[1]，沈兴来[2]，蔺 华[2]

(1. 中国矿业大学电气与动力工程学院，江苏 徐州 221116；
2. 国网江苏省电力公司徐州供电公司，江苏 徐州 221000)

摘要：大量随机性电动汽车充电负荷的接入会对电网安全经济运行等方面产生不利的影响。在统计电动汽车用户出行规律、起始充电时刻等行为基础上，分析了充电站的充电负荷特性。在考虑配电设备运行安全和用户充电需求的前提下，综合充电负荷和原有负荷的特点，建立了以分时电价为基础、以减小负荷波动率和提高运营商效益为目标的两阶段多目标充电模型。提出了基于多种群遗传算法的两阶段多目标优化模型求解方法和有序充电控制策略。以小区充电站为例，验证了两阶段多目标有序充电控制策略在减小负荷波动率、削峰填谷、降低经济成本提高运营商效益等方面的作用。

关键词：电动汽车；有序充电；两阶段优化；经济成本；负荷波动

Charging control strategy for electric vehicles based on two-stage multi-target optimization

CHEN Kui[1], MA Zilong[1], ZHOU Siyu[1], SHEN Xinglai[2], LIN Hua[2]

(1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. State Grid Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221000, China)

Abstract: The access of large number of random electric vehicle charging loads will adversely affect the safe and economic operation of the power grid. Based on the statistics of user travel laws and starting charging time, the charging load characteristics of electric vehicle charging stations are analyzed. Under the premise of considering the operation safety of power distribution equipment and the user's charging demand, multi-target charging model of two stages optimization are established, with the aim of reducing load fluctuation rate and improving operator benefits, based on time-of-use electricity price, the characteristics of integrated charging load and original load. The two-stage and multi-objective optimization model solving method based on multi-population genetic algorithm and the ordered charging strategy are proposed. Taking the residential charging station as an example, the role of the two-stage and multi-objective control strategy in reducing the load volatility, cutting the peaks and filling the valley, reducing the economic cost is verified.

This work is supported by National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (No. 51707192).

Key words: electric vehicles; orderly charging; two-stage optimization; economic cost; load fluctuation

0 引言

随着电动汽车的推广和普及，大量电动汽车接入电网，若用户处于自由充电状态[1](即充电随机性和聚集性)，将会给电网带来更大负荷高峰，造成峰谷差增大、电力损耗增加、变压器过载，同时影响电网运行经济性[2-5]。若对电动汽车充电实行有序控制策略可以避免用电重叠时间和用电高峰期，从而降低峰谷差并提高经济效益。因此，合理的充电策略就显得十分重要。

文献[6]提出通过粒子群算法(POS)对功率限制值进行优化，并采用在线控制与离线控制相结合的有序控制策略实现负荷削峰填谷、降低负荷波动，但未充分考虑到用户充电行为的动态变化。文献[7]基于峰谷分时电价，建立了以电网负荷峰谷差率最小为目标的各时段优化模型，并通过智能算法实现优化求解，但未涉及减少电费成本和负荷波动的优化。文献[8]考虑到降低运营商和用户综合经济利

基金项目：国家杰出青年科学基金项目资助(51707192)

益，研究了分时充电价格对电动汽车充电行为的影响，通过 POS 算法寻优找到最优峰平谷划分时段以及分时电价结果，从而实现优化。文献[9]针对大规模电动汽车接入电网，提出控制每时段的电池投入数量，通过布谷鸟算法实现电网负荷波动最小的电动汽车有序充电策略。文献[10]基于变压器供电容量约束，在保证变压器不过载情况下，通过遗传算法以充电费用为最小目标函数，实现电动汽车的有序充电。

基于上述研究成果，本文以某居民住宅小区充电站为研究主体，通过分析用户出行习惯、用电需求以及夜间 4 段分时电价基础下的电力负荷曲线，以电网负荷波动最小与运营商经济利益最大为目标，提出充电功率分布的两阶段优化模型。本文采用多种群遗传优化算法(Multiple Population Genetic Algorithm, MPGA)对有序充电模型求解，算得充电站最优功率分布。最后通过算例验证有序充电的可行性，同时比较了有序充电与无序充电的结果，为电动汽车充电站有序充电策略提供依据。

1　住宅小区负荷特性与分时电价

1.1 居民出行习惯

城市居民利用电动汽车出行，用户白天从住宅区驶离至工商业区等工作地点，午间只有少数人回到住宅区，但晚间大部分用户下班后陆陆续续回到家中，利用夜晚休息时间为电动汽车充电。工作日期间，用户大多早上 8:00~9:00 左右到达工作地点，晚上 17:00~19:00 左右回到家中。因此，本文假定城市居民区用户均利用夜晚时间为电动汽车充电且一天一充。

由美国交通部对普通家用车辆的使用情况统计结果[11]显示，车辆日行驶里程服从对数正态分布 $N(\mu_D, \sigma_D)$，其概率密度函数如式(1)所示。

$$f_D(L)=\frac{1}{L\sigma_D\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(\ln L-\mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] \tag{1}$$

式中：L 为汽车日行驶里程；μ_D=3.2，σ_D=0.88。

根据文献[11]可得，居民区内电动汽车返程到家时刻服从 $N(\mu_T, \sigma_T)$，假设到家时刻便是电动汽车充电时刻，因此其充电起始时刻概率密度函数如式(2)所示。

$$f_T(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{\sigma_T\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\dfrac{(x-\mu_T)^2}{2\sigma_T^2}\right], \mu_T-12<x<24\\ \dfrac{1}{\sigma_T\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\dfrac{(x+24-\mu_T)^2}{2\sigma_T^2}\right], 0<x<\mu_T-12\end{cases} \tag{2}$$

式中：x 为电动汽车充电起始时刻；μ_T=17.53，σ_T=2.96。

由式(2)分析统计可得，当电动汽车返回到住宅小区时，(state of charge) SOC 近似服从 $N(\mu_S, \sigma_S)$，其概率密度函数为

$$f_S(s)=\frac{1}{\sigma_S\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(s-\mu_S)^2}{2\sigma_S^2}\right] \tag{3}$$

式中：s 为电动汽车剩余 SOC 值；μ_S=0.3，σ_S=0.1。通过分析可得电动汽车剩余 SOC 水平概率分布如图 1 所示。

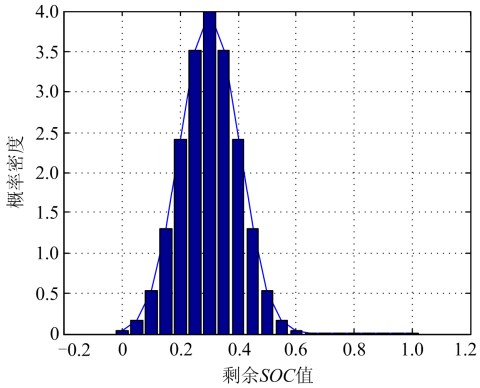


图 1 剩余 SOC 水平概率分布

Fig. 1 Probability distribution of remaining SOC levels

1.2 分时电价制度

分时电价模型通过制定合理的分时电价对电动汽车充电实施有序引导以实现国网公司与用户双赢。由于分时电价制度的提出，用户充电费用也随之改变，用户为了减小费用成本，将响应分时电价制度。随着城市的发展以及电动汽车的推广，城区供电压力增大，文献[12]将一整天时段调整为：谷时段(1:00~7:00)，平时段(7:00~8:00、11:00~15:00、22:00~1:00)，峰时段(8:00~11:00、15:00~22:00)。为了进一步鼓励用户积极调整用电负荷，本文采用 4 时段分时电价，即将峰时段划分为平峰与尖峰两个时段。平峰时段(17:00~18:00、20:00~22:00)，尖峰时段(18:00~20:00)。电价划分如表 1 所示。

表 1 分时电价划分

Table 1 Time-of-use price

区域划分	时段	分时电价/(元/kWh)
谷时段	1:00~7:00	0.4
平时段	7:00~8:00、11:00~15:00、22:00~1:00	1.2
平峰时段	15:00~18:00、20:00~22:00、8:00~11:00	2
尖峰时段	18:00~20:00	2.5

2　电动汽车充电站有序充电模型

2.1 电动汽车有序充电策略

通过对式(2)中 μ_T 和 σ_T 的分析，电动汽车充电负荷存在随机性与聚集性[12]，在无序充电模式下，电动汽车驶入充电站便以 P_{max} 功率充电，当 SOC 充至 95%以上才以小功率充电。为了更好地避免充电负荷与高峰负荷期的用电重叠时间 t_r，本文在夜间 4 时段分时电价基础上，采用分时段最优功率充电策略。基本内容如下：

1) 通过蒙特卡洛算法对小区日常基础负荷以及电动汽车充电站负荷进行预测。将预测结果导入充电站智能控制系统(Intelligent Control System, ICS)，结合变压器容量限制 P_c、用户充电需求 $W_{t,i}$、电动汽车停留时长 $t_{last,i}$ 等约束条件，分配夜间 4 时段充电功率限制值，生成 $\boldsymbol{P}_{lim}$=[P_{fh}, P_{ph}, P_p, P_l]。P_{fh} 记为平峰期功率限制值，P_{ph} 记为尖峰期功率限制值，P_p 记为平时段功率限制值，P_l 记为谷时段功率限制值。

2) ICS 预统计电动汽车辆数 N 以及充电负荷，通过优化控制器优化各时段充电功率，生成 $\boldsymbol{P}_c$=[P'_{fh}, P'_{ph}, P'_p, P'_l]。P'_{fh} 记为平峰期充电功率，P'_{ph} 记为尖峰期充电功率，P'_p 记为平时段充电功率，P'_l 记为谷时段充电功率。

3) 电动汽车驶入充电站后，与充电桩对接，由电池能量管理系统上传该车剩余 SOC 数据、电池容量 E_h、用户到达时刻 t_{back} 以及用户设定的离开时刻 t_{leav}。ICS 统计实际的充电负荷，经 ICS 判断负荷预测误差系数 ε，若误差系数 ε 大于精度要求，则再由优化控制器优化 3 段高峰期充电时长 $\boldsymbol{T}_h$=[t_{fh1}, t_{ph}, t_{fh2}]，限制电动汽车在用电高峰期的充电时长。向量 $\boldsymbol{T}_h$ 中各元素分别表示平峰期 1 充电时长、尖峰充电时长、平峰期 2 充电时长。

这种充电策略将高峰期充电功率划分为 2 段充电功率，平峰时段(17:00~18:00、20:00~22:00)采用 P'_{fh} 充电、尖峰时段(18:00~20:00)采用 P'_{ph} 充电。同时考虑到用户充电存在随机性等动态状况，进一步对 3 段高峰期充电时长 $\boldsymbol{T}_h$ 进行优化，在保证电动汽车用电需求的前提下，使综合效益最大化。

电动汽车接入充电站充电，通过 Matlab 软件编程建立有序充电策略算法，如图 2 所示。

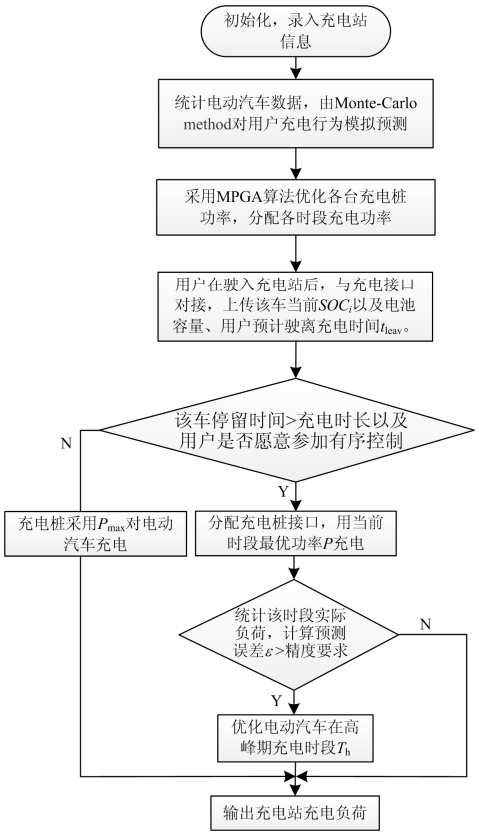


图 2 两阶段有序充电策略算法

Fig. 2 Orderly charging strategy algorithm of two-stage optimization

2.2 电动汽车充电模型

2.2.1 电动汽车充电数学模型

在电动汽车夜间返回时刻，剩余电量记为 SOC_{lim}。假设小区电动汽车数量为 N，用户从返回时刻 t_s 起立即充电，第 i 辆电动汽车充电负荷需求记为 $W_{s,i}$，则电动汽车用户总的负荷需求 W_s 为

$$W_s=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\left(SOC_{fina,i}-SOC_{lim,i}\right)\times E_h\right)}{\eta} \tag{4}$$

式中：$SOC_{final,i}$ 为用户期望达到的电量；E_h 为电动汽车蓄电池容量；η 为充电机充电效率。

第 i 辆电动汽车停留时长为

$$t_{stay,i}=t_{leav,i}-t_{back,i} \tag{5}$$

第 i 辆电动汽车充电时间为

$$t_{d,i}-t_{s,i}=t_{fh1,i}+t_{ph,i}+t_{fh2,i}+t_{p,i}+t_{l,i} \tag{6}$$

充电站夜间充电功率为

$$W_s=\sum_{i=1}^{N}\left(T_{h,i}\times P_{h,i}^{T}+P_p\times t_{p,i}+P_l\times t_{l,i}\right) \tag{7}$$

式中：$t_{p,i}$ 为平时段充电时长；$t_{l,i}$ 为谷时段充电时长。

充电站负荷预测误差系数 ε 为

$$\varepsilon=\left|\frac{W_{fore}-W_{s,i}}{W_{fore}}\right| \tag{8}$$

式中：W_{fore} 为 ICS 预测负荷；$W_{s,i}$ 为 i 时刻充电站统

计实际负荷；ε 越大则负荷偏差越大，反之则越小。

2.2.2 目标函数

上述两阶段优化策略是基于分时电价制度，针对夜间高峰期充电功率 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{h}}$ 和充电时间 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{h}}$ 进行双层优化，从而使电网的负荷波动最小和运营商经济利益最大。

(1) 电网负荷波动

电网负荷波动大小取决于负荷方差大小[13]。若负荷方差越大，则负荷曲线越陡、负荷波动越大、削峰填谷作用越弱，反之负荷方差越小，负荷波动越小、削峰填谷作用越强。其衡量方法如下。

$$L_{\mathrm{s}}(t)=W_{\mathrm{s}}(t)+L_{\mathrm{b}}(t) \tag{9}$$

$$\min f_1=\frac{\sum_{t=1}^{T}\left(L_{\mathrm{s}}(t)-\sum_{t=1}^{T}L_{\mathrm{s}}(t)/T\right)^2}{T}\quad \forall t\in T \tag{10}$$

式中：$W_{\mathrm{s}}(t)$为 t 时刻充电站总负荷；$L_{\mathrm{b}}(t)$为 t 时刻小区基础负荷；$L_{\mathrm{s}}(t)$为 t 时刻叠加后总负荷。

(2) 运营商的经济利益

运营商经济利益最大，则需要保证电动汽车在分时电价基础上的充电费用最小，即充电站充电费用成本最小。

$$\min f_2=\sum_{i=1}^{N}\left(\begin{bmatrix}t_{\mathrm{fh}1,i} & t_{\mathrm{ph},i} & t_{\mathrm{fh}2,i} & t_{p,i} & t_{1,i}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P'_{\mathrm{fh}}\times c_{\mathrm{fh}}\\ P'_{\mathrm{ph}}\times c_{\mathrm{ph}}\\ P'_{\mathrm{fh}}\times c_{\mathrm{fh}}\\ P'_{\mathrm{p}}\times c_{\mathrm{p}}\\ P_1\times c_1\end{bmatrix}\right) \tag{11}$$

式中：c_{fh} 为平峰时段电价；c_{ph} 为尖峰时段电价；c_{p} 为平时段电价；c_1 为谷时段电价。

2.2.3 约束条件

(1) 充电站内电动汽车数量约束

充电站里充电车数辆应小于或等于小区拥有的全部电动汽车数量。

$$N\le N_{\max} \tag{12}$$

式中：N 为充电站内电动汽车数量；$N_{\max}$ 为小区拥有的全部电动汽车数量。

(2) 各充电时段充电功率约束

充电功率应小于充电功率限制值。

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{h}}\le\boldsymbol{P} \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{P}_{\mathrm{h}}$ 为第 i 辆电动车在峰时段充电功率向量；$\boldsymbol{P}$ 为充电功率限制向量。

(3) 电动汽车充电时间约束

电动汽车充电时长小于或等于停留时长。

$$t_{\mathrm{d},i}-t_{\mathrm{s},i}\le t_{\mathrm{stay},i} \tag{14}$$

式中：$t_{\mathrm{d},i}$ 为第 i 辆电动汽车结束时刻；$t_{\mathrm{s},i}$ 为第 i 辆电动汽车起充时刻；$t_{\mathrm{stay},i}$ 为第 i 辆电动汽车停留时长。

2.3 优化模型求解方法

由于电动汽车充电站有序充电模型存在多个约束条件[14-18]，同时涉及多个非线性变量，要实现对多个目标的优化，需要有较强的鲁棒性和全局搜索能力。传统遗传算法(GA)[19]对有序充电模型多目标优化时，当群体中存在个别超常个体或者群体规模和多样性较小，将导致群体中所有个体容易趋于同一状态而停止进化，使该算法最终不能给出令人满意的解，这种现象也被称为早熟收敛问题。

为了避免群体在进化过程中出现的早熟收敛问题，本文采用多种群遗传优化算法(MPGA)弥补 GA 算法的不足。MPGA 通过对多个相对独立的种群同时进行优化，针对不同的种群设置不同的参数，以达到不同搜索目的。MPGA 引入移民算子实现对不同种群之间的联系，从而协同进化，各时段最优充电功率便是多个种群协同进化的综合结果。移民算子将各种群在进化过程中的最优个体周期性地插入到其他种群里，从而实现种群之间的信息交互。

MPGA 在进化的每一代中找到最优个体放精英种群中，精英种群不再参加算法程序，以确保各种群产生的最优个体不被丢失和破坏。最后，精英种群将作为算法程序终止的条件之一。多种群遗传优化算法流程图如图 3 所示。

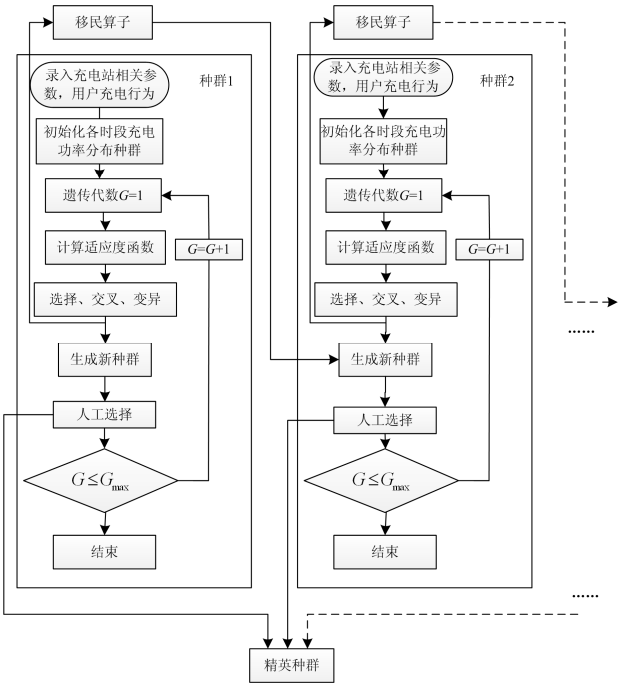


图 3 MPGA 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flowchart of MPGA

3　算例分析

本文以某居民住宅小区为例，假设该小区有1 000 辆私家车，其中电动汽车渗透率为 20%，通过分析用户出行规律，基本选在晚上充电。通过分析住宅小区的基础负荷，如表 2 所示，小区基础负荷峰值达到 3 791 kW，平均基础负荷为 2 211.8 kW。为了使配电设施容量满足经济效益，配电变压器的负载率在 0.5~0.6 为宜，因此住宅小区变压器容量选 4 MVA。

本文选取夜间充电时段为 17:00~6:00，电动汽车为“吉利帝豪 EV450”型号，蓄电池容量为 52 kW•h，充电效率为 0.9，每隔 30 min 为一个记录点。某住宅小区充电站有 100 台充电桩，充电桩额定充电功率为 10 kW，充电桩充电方式采用一桩一充。

表 2 小区基础负荷

Table 2 Normal daily load of residential area

kW

时刻	负荷	时刻	负荷	时刻	负荷
17:00	2 991	21:30	3 263	2:00	1 092
17:30	3 097	22:00	3 110	2:30	1 056
18:00	3 252	22:30	2 991	3:00	1 051
18:30	3 653	23:00	2 630	3:30	1 037
19:00	3 682	23:30	2 311	4:00	1 033
19:30	3 791	0:00	1 960	4:30	1 023
20:00	3 534	0:30	1 519	5:00	1 147
20:30	3 263	1:00	1 199	5:30	1 156
21:00	3 321	1:30	1 170	6:00	1 157

3.1 第一阶段优化分析

电动汽车在无序充电模式下，车辆进站后即插即充，并以充电桩额定功率充电，直至充满电后才与充电桩断开。无序充电过程中，电动汽车充电负荷与居民区常规负荷叠加，则会在用电高峰期(17:00~21:00)产生“峰上加峰”的现象[20]。叠加后的负荷在尖峰期使得变压器处于过载运行状态，导致变压器寿命减短，同时对运行安全性产生影响。

为了使小区配电设施安全、稳定地运行，同时兼顾该小区电动汽车用电需求，在分配各充电桩充电功率之前，先对各时段的充电功率进行限制。第一阶段优化通过 Monte-Carlo method 模拟电动汽车充电行为，对随机产生的充电负荷进行预测分析，结合各时段最大功率限制值，通过 MPGA 算法优化充电桩各时段充电功率，仿真结果如图 4 所示。

通过对无序充电进行分析，18:00~22:00 时段是用户返程充电高峰期，电动汽车随到随充，导致

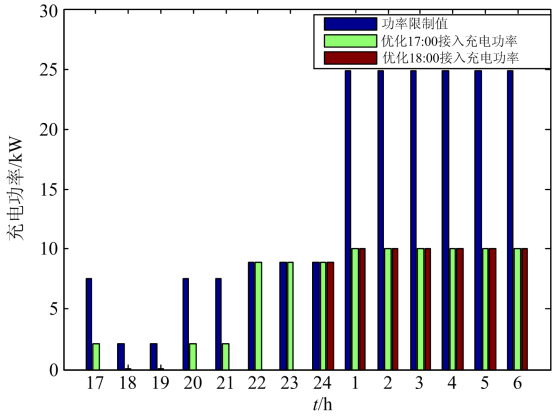


图 4 各时段充电功率大小

Fig. 4 Charging power at different time

负荷峰值超过其容量的 17.2%。这种充电方式使得变压器在该时段出现过载现象，严重影响了配电设备的运行安全性。

本文采用的第一阶段分时段功率优化方法将大部分峰时段负荷推送至平时段和谷时段充电。优化后的负荷峰值仅达到 3 793 kW，低于配电设备的容量，如图 5 所示。

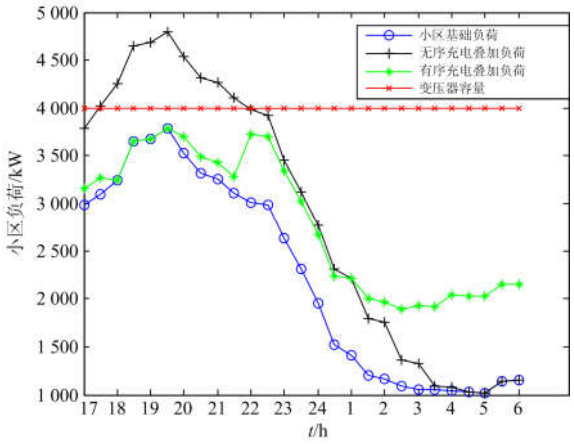


图 5 第一阶段负荷优化曲线

Fig. 5 Load optimization curve in first stage

无序充电与第一阶段优化充电特性如表 3 所示。通过对表 3 数据进行分析，分时段功率优化方法避免了基础负荷高峰期与电动汽车负荷高峰期的用电重叠时间。与此同时，相对于无序充电，尖峰负荷和峰谷差也大幅度降低。由于无序充电负荷具有较大的波动性，波动型负荷将导致供电电压的波动和闪变[21]，影响小区配电网系统的电能质量。通过第一阶段功率优化后，不仅平抑了负荷曲线，减小了负荷波动率[22]，同时也降低了运行商的电费成本，实现了电网公司与运营商共赢。

表 3 无序充电与第一阶段优化充电特性

Table 3 Disordered charging and first stage optimized charging characteristics

充电模式	尖峰负荷/(kW·h)	谷负荷/(kW·h)	负荷波动率/%	峰谷差/kW	充电站运营商电费/元
无序充电	9 189	7 088	107.5	3 768	14 318
各时段功率优化充电	7 189.2	10 083	25.74	1 899	5 364.98

3.2 第二阶段优化分析

上文分析的第一阶段分时段功率优化方法是基于 Monte-Carlo method 对充电负荷进行预测分析后再进行的优化控制。在实际生活中，用户充电存在一些随机因素，导致实际充电的负荷低于预测的负荷，因此需进一步对高峰期充电时长进行控制。

第二阶段优化控制是在第一阶段对功率优化后，由式(8)算出电动汽车接入后的预测误差，根据误差大小，优化高峰期充电时长。本文取预测误差 ε 在 20%~0%对负荷情况进行分析，预测误差 ε 越大则实际接入的电动汽车数量越少。通过图 6 可知，随着预测误差的增大，充电桩在高峰期的平均充电时长减少。

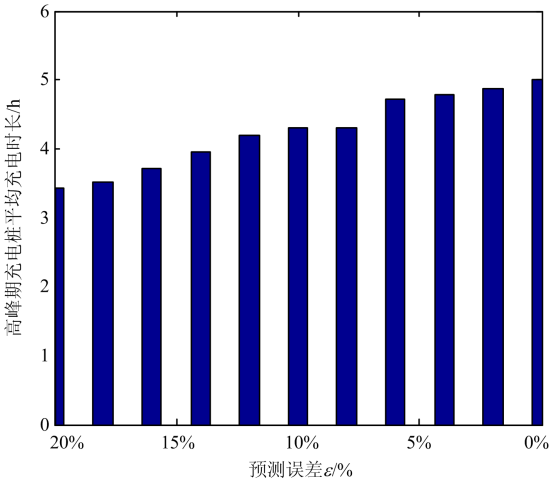


图 6 充电桩高峰期平均充电时长

Fig. 6 Average charging time of charging pile during peak period

分别对 20%、10%的预测误差进行仿真分析可知，两阶段优化算法能够更好地起到削峰填谷的作用，如图 7、图 8 所示。

第一阶段与两阶段优化对比如表 4 所示。由表 4 可知，两阶段优化控制相比第一阶段优化，高峰期负荷减少了，运营商电费也降低了，且随着 ε 增大，优化效果越明显。通过第一阶段优化控制与两阶段同时进行优化控制后，若仅采用各时段功率优化就忽略了由用户随机性所产生的预测误差，而利用两阶段优化控制能够最大限度地降低高峰期充电负荷和运行商电费成本，有利于充电站更加合理地运行。

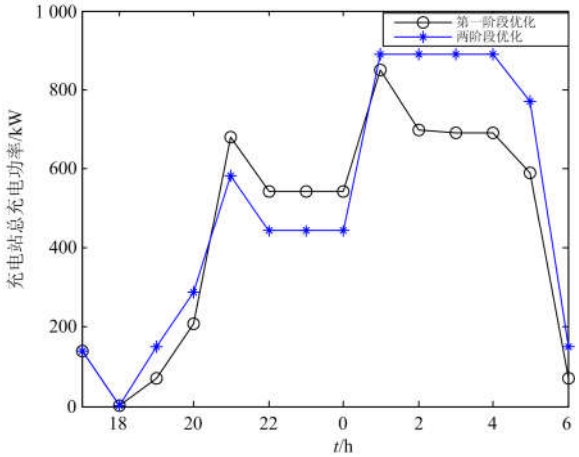


图 7 预测误差 ε 为 20%

Fig. 7 Forecast error ε is 20%

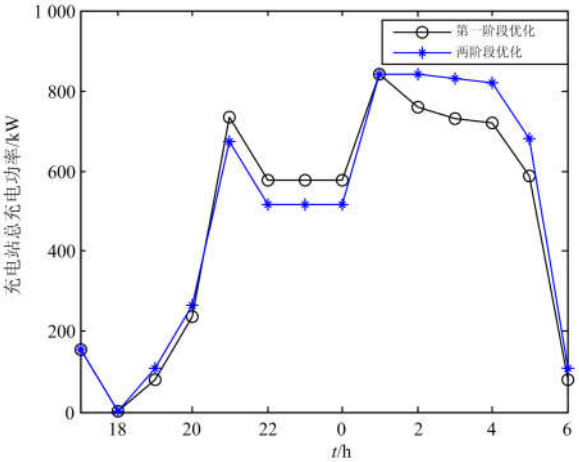


图 8 预测误差 ε 为 10%

Fig. 8 Forecast error ε is 10%

表 4 第一阶段与两阶段优化对比

Table 4 Comparison of the first step and the two phases

预测误差/%	第一阶段高峰期充电负荷/(kW·h)	两阶段高峰期充电负荷/(kW·h)	第一阶段电费/元	两阶段电费/元
20	415.82	285.87	4 418.8	3 790.1
16	435.31	324.86	4 533.7	4 011.4
12	454.8	383.33	4 898.2	4 542.9
8	474.29	409.32	5 012.4	4 696.2
4	500	480.7	5 259.8	5 168.5

4 结语

本文以用户一般充电规律和普通住宅小区充电站为背景，在保证用户充电需求和配电设备可靠运行的前提下，在引入分时电价制度的基础上，建立了两阶段有序充电优化模型。

两阶段有序充电优化模型是对充电功率与充电时间的双层优化。第一阶段对充电功率进行优化，能够大幅度降低经济成本和负荷波动率，使负荷曲线更加平缓，起到了削峰填谷的作用。第二阶段通过误差系数进一步对充电时长进行优化，使综合效益最大化。两阶段有序充电优化既考虑到了用户一般充电行为，也涉及个别用户随机充电行为。经仿真分析该优化模型更能适应实际情况，有利于电网的安全性，将来大规模推广，会产生很好的综合效益。

未来，随着电动汽车的推广和普及，用户随机性充电特性会给电网带来较大的波动，为了加大对用户有序充电的控制，下一步将构建多个小区充电站管理系统的互联和信息交流平台，通过统一管理和调度，提高各充电站的利用效率和经济安全综合效益。

参考文献

[1] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9.
GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9.

[2] 闫志杰, 张蕊萍, 董海鹰, 等. 基于需求响应的电动汽车充放电电价与时段研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 16-22.
YAN Zhijie, ZHANG Ruiping, DONG Haiying, et al. Price and period research of electric vehicles charging and discharging based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 16-22.

[3] 周凌锋, 王杰. 基于时空分布负荷预测的电动汽车充电优化[J]. 现代电力, 2018, 35(5): 10-16.
ZHOU Lingfeng, WANG Jie. Electric vehicles charging optimization method considering spatial and temporal distribution charging demands prediction[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(5): 10-16.

[4] 刘安茳, 袁旭峰, 李靖. 基于分时电价的小区电动汽车有序充电策略研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2017, 34(5): 54-58.
LIU Anjiang, YUAN Xufeng, LI Jing. Research on orderly charging strategy of residential electric vehicle based on time-of-use electricity price[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science Edition), 2017, 34(5): 54-58.

[5] 王鑫, 周步祥, 唐浩. 考虑用户因素的电动汽车有序充放电控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 129-137.
WANG Xin, ZHOU Buxiang, TANG Hao. A coordinated charging discharging strategy for electric vehicles considering customers' factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 129-137.

[6] 齐先军, 李冬伟, 纪姝彦. 采用功率限制的住宅区电动汽车有序充电控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3715-3721.
QI Xianjun, LI Dongwei, JI Shuyan. A coordinated charging control strategy for electric vehicles in residential area with power limitation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3715-3721.

[7] 葛少云, 王龙, 刘洪, 等. 计及电动汽车入网的峰谷电价时段优化模型研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2316-2321.
GE Shaoyun, WANG Long, LIU Hong, et al. An optimization model of peak-valley price time-interval considering vehicle-to-grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2316-2321.

[8] 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 Fangyu, HUANG Mei, ZHANG Weige. Research on coordinated charging of electric vehicles based on TOU charging price[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2609-2615.

[9] 黄敏丽, 于艾清. 基于改进布谷鸟算法的电动汽车换电站有序充电策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1075-1083.
HUANG Minli, YU Aiqing. Study on coordinated charging strategy for battery swapping station based on improved Cuckoo search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1075-1083.

[10] 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.

[11] 严俊, 严凤. 峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充放电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 127-134.

YAN Jun, YAN Feng. An orderly charging and discharging strategy for residential electric vehicles based on peak-valley electricity tariffs[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 127-134.

[12] 魏大钧, 张承慧, 孙波, 等. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2972-2977.
WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2972-2977.

[13] 钱甜甜, 李亚平, 郭晓蕊, 等. 基于时空活动模型的电动汽车充电功率计算和需求响应潜力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 127-134.
QIAN Tiantian, LI Yaping, GUO Xiaorui, et al. Calculation of electric vehicle charging power and evaluation of demand response potential based on spatial and temporal activity model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 127-134.

[14] 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.

[15] 杨茜, 邓建慎, 李洪峰, 等. 电动汽车公共服务与互动平台设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 137-144.
YANG Xi, DENG Jianshen, LI Hongfeng, et al. Design and research on public service and interactive platform in electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 137-144.

[16] 曾正, 赵荣祥, 杨欢, 等. 电动汽车高渗透率的应对策略及换电站的最优规划[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 7-13.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan, et al. Responsive schemes to high penetration of electric vehicles and optimal planning of battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 7-13.

[17] 葛少云, 黄镪, 刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 1-5.
GE Shaoyun, HUANG Liu, LIU Hong. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 1-5.

[18] 郭联哲, 谭忠富, 李晓军. 基于用户响应下的分时电价优化设计模型与方法[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 24-28.
GUO Lianzhe, TAN Zhongfu, LI Xiaojun. Demand response based model and method for optimal design of time-of-use electricity price[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 24-28.

[19] 程玉桂, 黎明, 林明玉. 基于遗传算法和 BP 神经网络的城区中长期电力负荷预测与分析[J]. 计算机应用, 2010, 30(1): 224-226.
CHENG Yugui, LI Ming, LIN Mingyu. Forecasting and analysis on long-term/mid-term Electric load of city by GA-BP neural networks[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(1): 224-226.

[20] AGAH S M M, ABBASI A. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on residential distribution transformers[C] // 2012 2nd Iranian Conference on Smart Grids (ICSG): IEEE, 2012: 1-5.

[21] SU W, CHOW M Y. Performance evaluation of an EDA-based large-scale plug-in hybrid electric vehicle charging algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 308-315.

[22] 龚薇, 刘俊勇, 贺星棋, 等. 计及负荷波动率和互补系数的负荷恢复[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2490-2496.
GONG Wei, LIU Junyong, HE Xingqi, et al. Load restoration considering load fluctuation rate and load complementary coefficient[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2490-2496.

收稿日期：2019-01-15；　　修回日期：2019-05-16

作者简介：

陈　奎(1973—)，男，博士，副教授，研究方向为智能配电网和电能质量治理；E-mail: jdbh2001@163.com

马子龙(1994—)，男，通信作者，硕士研究生，研究方向为电动汽车接入电网影响及对策；E-mail: 1535899553@qq.com

周思宇(1994—)，男，硕士研究生，研究方向为电动汽车有序充电控制策略。E-mail: 648330161@qq.com

(编辑　魏小丽)