

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002992

计及供需两侧的电动汽车有序充放电优化算法研究*

高少希 张达敏 陈伟川 陈鼎圣

(厦门理工学院 电气工程与自动化学院 厦门 361024)

摘要:大量电动汽车进行无序充电将给电网的安全运行带来“峰上加峰”的运行风险,作为一种移动的储能设备,大量电动汽车的无序放电也会对电网的稳定性造成重要影响,因此对电动汽车的充放电行为进行有序引导十分必要。首先,分析了某小区电动汽车无序充放电的负荷情况,并以峰谷分时电价为引导,研究不同响应度的下的日负荷情况;在此基础上综合考虑用户侧和电网侧利益,以电动汽车用户成本最低和小区日负荷峰谷差率最小为优化目标,选择峰谷分时区间为优化变量,构建电动汽车最优充放电模型,分别采用基于 Pareto 最优的多目标遗传算法 NSGA-II 和基于 Pareto 最优的粒子群算法求解,得到最优充放电时段,并对二者的优化结果进行比较。最后利用蒙特卡洛算法对算例进行仿真和分析验证,结果表明,利用所提出的有序充放电优化算法,用户可通过放电补偿充电费用,且 NSGA-II 算法更优。

关键词:电动汽车;充放电优化;NSGA-II;粒子群;用户成本;峰谷差率

中图分类号: TM73; TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Optimization algorithm research on ordered charge and discharge of electric vehicles considering supply and demand sides

Gao Shaoxi Zhang Damin Chen Weichuan Chen Dingsheng

(School of Electrical Engineering & Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract:The disorderly charging of large-scale electric vehicles (EVs) will increase the operation risk of peak-up-peak to the power grid. In addition, as a mobile energy storage device, the disordered discharge of a large number of EVs will also have an important impact on the stability of the power grid. Therefore, it is necessary to guide the charge and discharge behavior of EVs in an orderly manner. First of all, the general loads of disordered charge and discharge of electric vehicles in a residential area are analyzed, and the daily load under different response is studied under the guidance of peak-valley time-of-use electricity price. On this basis, considering both the benefits of the divers and the power grid, the optimal charge and discharge model of the EVs are constructed, which takes the lowest charging cost of the EVs and the minimum peak-valley difference of the daily load in the community as the optimization objectives, and selecting the peak-valley time-sharing interval as the optimization variable. The optimal charge and discharge time intervals are found by Pareto-based optimization multi-objective genetic NSGA-II and Pareto-based optimization particle swarm (PSO), respectively. The results by the different optimization algorithms are compared. Finally, the Monte Carlo algorithm is used to simulate and analyze the model. Simulation results show that users can reduce the charging cost to some extent through the discharge compensation, and NSGA-II algorithm is better than PSO.

Keywords:electric vehicle; charge and discharge optimization; NSGA-II; particle swarm; drivers' cost; peak-to-valley difference

0 引言

能源消耗所引发的环境问题日益凸显,电动汽车具

有环保、节能、高效的优点,近年来受到广泛关注^[1-2]。随着新能源技术与智能电网的快速发展,预计2040年中国电动汽车保有量或将超过2亿辆,相当于100个三峡电站的功率。利用电动汽车作为储能平台参与电网削峰填

谷成为一种可行方案^[3-4]。V2G (vehicle to grid) 技术将大量电动汽车的动力电池作为电网和可再生能源的缓冲,通过电动汽车充放电参与电网调度^[5]。然而,电动汽车进行充放电的时间存在很大的随机性^[6-7],如果大量电动汽车同时集中在电力负荷高峰期充电将加剧电网负荷峰谷差,加重电力系统负担^[8],影响电能质量,如造成电压下降、三相电压不平衡和谐波污染^[9-11]等问题。为此,需要采取一系列的措施来引导电动汽车的充放电行为,使电动汽车与电网良性互动,提高电网的稳定性和可靠性^[12]。文献[13]研究区域性电动汽车对电网的影响,采用蒙特卡洛算法仿真得到区域内电动汽车的充电负荷,但未对放电负荷进行计算。文献[14]表明大规模电动汽车入网会出现电网负荷大幅度增长的现象,同时造成负荷波动给电网带来不利影响,也未考虑电动汽车的放电行为。文献[15]在当前新能源处于高消纳水平的大背景下,提出电动汽车有序充电的分层控制策略,同样未考虑放电行为文献[16]采用需求侧管理策略对电动汽车进行有效引导,降低峰谷差率,但未考虑电网侧峰谷差率的优化问题。文献[17]采用的两种有序充电优化模式虽然都能够减小电网负荷波动,但只对比了响应度为 0.5 和 1 两种情况,并未考虑其他情况。文献[18]以峰谷差率最小和用户充电费用最小为目标,利用 NSGA-II 进行优化,峰谷差率得到下降,但未考虑优化时段及电动汽车的放电行为对电网的影响。

针对以上问题,本文提出 3 点改进措施:

- 1) 针对目前已有研究工作未考虑电动汽车放电行为,本文综合考虑电动汽车充、放电行为对电网的影响;
- 2) 同时考虑电网侧和用户侧需求来合理引导电动汽车的充放电行为,研究在分时电价引导下的响应度与日负荷的关系,得到最佳响应度;
- 3) 以小区日负荷峰谷差率最小和用户成本最低为目标,采用 NSGA-II 算法和粒子群算法分别求解最优充放电时段和用户收益。

1 电动汽车有序充放电行为建模

电动汽车的充放电负荷与充电模式、动力电池特性和用户行为规律等密切相关。鉴于家用电动汽车是影响充电负荷的主要因素^[19],本文选择家用电动汽车与电网进行能量互动。

1.1 参数设定

本文采用蒙特卡洛模拟电动汽车无序充电曲线,假设采用常规充电模式,参数设定如下:

- 1) 电动汽车耗电量固定为 $0.15 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}$;
- 2) 电池充电功率 $P_i = 3 \text{ kW}$,放电功率 $P_d = 3 \text{ kW}$,电池容量 $B_i = 30 \text{ kW}$;

3) 当日充电电量为当日行驶耗电量,车辆最大里程为 200 km ,按照对数正态分布生成日行驶里程,大于 200 km 则按照 200 km 计算。

1.2 无序充放电负荷曲线

开始充电时刻和日行驶里程是决定电动汽车负荷在时间上分布的两个因素。假定电动汽车主要往返于居住地和工作地点,大部分地区的正常下班时间为 17:30,在没有实施峰谷电价引导的情况下,用户一般在到家后即对电动汽车充电,假设电动汽车每天最后一次行驶的时刻为其开始充电时刻。则电动汽车最后一次出行返回时刻服从分段正态分布^[20]。对小区内电动汽车无序充放电行为进行仿真,得到小区的总负荷曲线如图 1 所示。

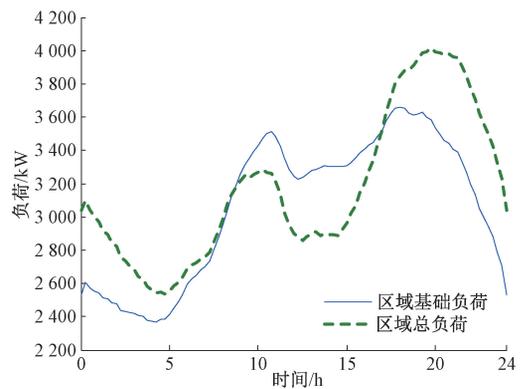


图 1 电动汽车无序充放电的总负荷曲线

Fig. 1 Total load curve of electric vehicle unorderd charging and discharging

由图 1 可知,电动汽车进行无序充放电时,充电时间较为集中,放电对电网负荷改善效果不明显,导致小区电网的日负荷曲线“峰上加峰”,峰谷差率由 36.93% 增加到 39.94%,增大 3.01%。

针对无序充电可能造成的“峰上加峰”现象,本文对电动汽车充放电行为进行有序引导。实现电动汽车有序充放电的控制方法主要分为两类,一类是直接对充放电负荷进行控制,另一类是通过控制电价引导用户充放电行为。本文采用分时电价来对电动汽车有序充放电进行讨论。

1.3 电价模型

分时电价是根据电网实时的负荷状况和用户需求将 24 h 划分为峰、谷、平 3 个时间段。在保证正常用车的前提下,用户一般选择电价较低时充电,电价较高时放电。峰谷分时电价的时段模型为:

$$Price(t) = \begin{cases} pr_v, & t \in [t_{v1}, t_{v2}] \\ pr_p, & t \in [t_{p1}, t_{p2}] \\ pr_f, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: pr_v 、 pr_p 、 pr_f 分别为谷电价、峰电价和平电价; $[t_{v1}, t_{v2}]$ 为谷电价区间; $[t_{p1}, t_{p2}]$ 为峰电价区间,其他为平电

价区间。

1.4 充放电时刻

减少充电成本的途径就是使电动汽车充电时间段尽可能的处于谷时段内,放电时间处于峰时段内。若电动汽车充满电所需时长小于谷时段持续时长,则选择的充电开始时刻需保证其充电的全过程处于谷时段内;若充电所需时长超过谷时段持续时长,则电动汽车应在谷时段开始时刻进行充电,放电时刻的选择同理。

1) 起始充电时刻

$$t_{c,i,order} = \begin{cases} t_{v1} + rand \times (\Delta t - T_{c,i}), & T_{c,i} \in [0, \Delta t_v) \\ t_{v1}, & T_{c,i} \geq \Delta t_v \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_{c,i,order}$ 为充电开始时刻; $T_{c,i}$ 为充电时长; $rand$ 为 $[0, 1]$ 的一个随机数; Δt_v 为谷电价持续时长, $\Delta t_v = t_{v2} - t_{v1}$ 。

2) 起始放电时刻

$$t_{d,i,order} = \begin{cases} t_{p1} + rand \times (\Delta t_p - T_{d,i}), & T_{d,i} \in [0, \Delta t_p) \\ t_{p1}, & T_{d,i} \geq \Delta t_p \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_{d,i,order}$ 为放电开始时刻; $T_{d,i}$ 为放电时长; $rand$ 为 $[0, 1]$ 的一个随机数; Δt_p 为谷电价持续时长, $\Delta t_p = t_{p2} - t_{p1}$ 。

1.5 不同响应度的有序充放电模型

用户是否采取峰谷分时电价取决于多方面因素,即用户对峰谷分时电价具有不同的响应度,响应电价的车主根据分时电价来调整电动汽车充放电时刻。不响应的车主不考虑电价问题,电动汽车进行无序充放电。定义峰谷分时电价响应度为 η 。计算公式为:

$$\eta = \frac{n}{N} \quad (4)$$

式中: n 为响应分时电价电动汽车数量; N 为研究区域内电动汽车的总数量。

以响应度 0.5、0.8、1.0 为例,得到不同响应度下的日负荷曲线如图 2 所示,表 1 为 3 种响应度下的日负荷峰谷差率。

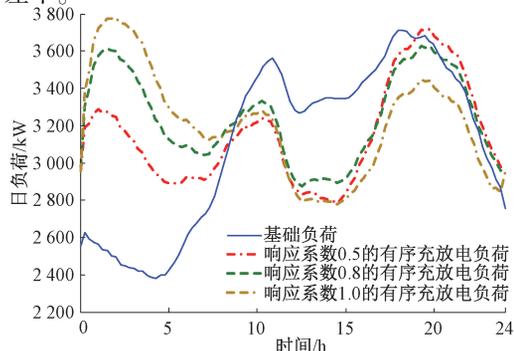


图 2 不同响应度下的负荷曲线

Fig. 2 Load curves at different responsiveness

表 1 三种响应度的峰谷差率

Table 1 Peak-to-valley difference

响应度	峰谷差率/%
0.5	25.13
0.8	22.62
1.0	28.10

通过仿真得到响应度 < 0.8 时小区日负荷曲线的波峰呈逐渐下降趋势,波谷呈上升趋势,波峰的负荷值仍然高于波谷。当响应度 $= 0.8$ 时,小区负荷曲线峰谷差率达到最低值,在此响应度前能够较好的进行削峰填谷。当响应度 > 0.8 时,车辆集中在谷时段充电,原本处于谷时段的负荷会高于处于峰时段的负荷,此时的峰值负荷甚至高于基础负荷的峰值,形成新的波峰,给电网带来压力,无“削峰填谷”效果。

2 电动汽车有序充放电优化模型

由有序负荷曲线可知,当响应度超过 0.8 时将出现峰谷转移,因此需对电动汽车的充放电进行优化。充放电优化需要综合考虑两个方面。一是电网方面,无序充放电和峰谷电价引导的不合理充电会造成电网“峰上加峰”或形成新的波峰,故需对电动汽车充放电进一步引导,减小峰谷差,减小对电网的影响。二是用户方面,为了推广电动汽车的使用,必须保证在用户使用成本上有一定优势。

本文采用 NSGA-II 算法和粒子群算法进行优化,以实现峰谷差率最小和用户充电成本最低为优化目标,寻求最优充放电时间段,建立电动汽车最优充放电模型。时段的划分直接影响用户对电动汽车进行充放电的时刻,谷时段 $[t_{v1}, t_{v2}]$ 和峰时段 $[t_{p1}, t_{p2}]$ 为用户选择充放电时间的关键参数,不同的峰谷分时电价划分会影响日负荷曲线趋势,本文设定 t_{c1} 、 Δt_c 、 t_{d1} 、 Δt_d 4 个变量,根据式 (2)、(3) 计算电动汽车起始充放电时刻。

2.1 目标函数

一般地,算例地点选取在车辆较为集中的商业区及住宅小区,本文以厦门某小区内的电动汽车为研究对象。考虑充放电成本及电池损耗,在确保用户利益的情况下合理调度并改善电网负荷。

将每天 24 h 分为 96 个时间段,以 15 min 为单位,记录每辆电动汽车在每个时刻的充放电功率,即对于落在时间段 1~15 min 的都记为 15 min 这个时间点。

电网负荷的峰谷差可以用来表示电网负荷的波动,峰谷差越小表示负荷越稳定,因此可将电网的峰谷差作为电网的优化目标。目标函数 1 可表示为:

$$f_1 = \frac{\min(L_{\max} - L_{\min})}{L_{\max}} =$$

$$\min \left[\frac{\max \left(P_0 + \sum_{i=1}^N P_{ij} \right) - \min \left(P_0 + \sum_{i=1}^N P_{ij} \right)}{L_{\max}} \right] \quad (5)$$

式中： P_0 为电网中 j 时段的基本负荷功率； P_{ij} 表示第 i 辆电动汽车在 j 时刻的充放电功率，正值为充电，负值为放电； N 代表电动汽车数量。

在用户侧考虑到用户的充电成本，以用户充电成本最低为目标，建立目标函数 2 为：

$$\min f_2 = \sum_{j=1}^{96} \sum_{i=1}^N |P_{ij}| S_j \Delta t \quad (6)$$

式中： S_j 代表电网在 j 时刻的电价，正值为充电电价，负值为放电电价即用户对电网进行放电时的收益； Δt 为充放电的持续时间。

2.2 约束条件

一般情况下，充放电控制策略会受到线路的承载能力、出行时间、电池的功率、容量以及电动汽车总量等因素限制。本文认为所有电动汽车在各个时刻均可以参与调度，故充放电功率约束为：

$$P_{ij\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij\max} \quad (7)$$

式中： $P_{ij\min}$ 表示第 i 辆电动汽车在 j 时刻最大的充电功率，其值为负； $P_{ij\max}$ 表示第 i 辆电动汽车在 j 时刻最大的放电功率，其值为正。另外还需考虑电池的充电特性，对充放电电流进行限制，充电电流 $I_c < C/15$ ，放电电流 $I_d < C/3$ ， C 为电动汽车电池在一个小时内充满时需要的电流值，其约束条件为：

$$\begin{cases} 0 \leq I_c \leq C/15 \\ 0 \leq I_d \leq C/3 \end{cases} \quad (8)$$

电池可用容量由 SOC (state of charge) 表示，其百分比显示电池容量的大小，电池容量的约束条件为：

$$SOC_{ij\min} \leq SOC_{ij} \leq SOC_{ij\max} \quad (9)$$

式中： SOC_{ij} 代表第 i 辆电动汽车在 j 时刻的 SOC； $SOC_{ij\min}$ 为电池 SOC 的下限； $SOC_{ij\max}$ 为电池 SOC 的上限。本文设定 $SOC_{ij\min}$ 为 0.1， $SOC_{ij\max}$ 为 0.9。

3 算例分析

3.1 NSGA-II 算法

样本车辆为 500，种群规模为 100，迭代次数设置为样本电动汽车总数 500 次，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.05，采用 NSGA-II 算法，其计算步骤如图 3 所示，算法迭代终止后得到的小区总的日负荷曲线如图 4 所示。

由图 4 可知，在遗传算法优化策略下，小区总负荷曲线的波峰和波谷均有所改善，日负荷峰值为 3 480 kW，负荷谷值为 2 780 kW，峰谷差率为 20.11%。

优化后的充放电时段如表 2 所示。

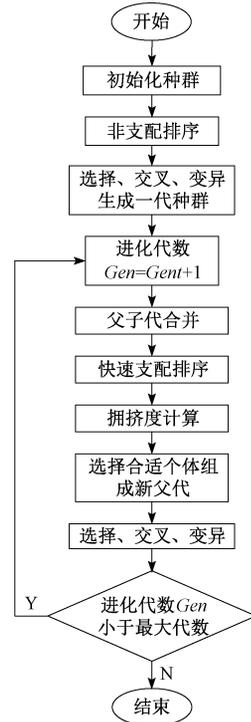


图 3 NSGA-II 流程

Fig. 3 NSGA-II flowchart

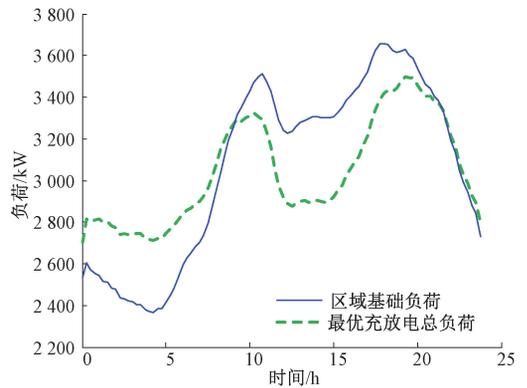


图 4 最优充放电负荷曲线

Fig. 4 Optimal charge and discharge load curve

表 2 最优充放电时段

Table 2 Optimal charge and discharge interval

充电时段	00:00~09:00
	09:30~14:30
放电时段	17:00~21:30

算法迭代终止后得到的 Pareto 前沿分布如图 5 所示。

3.2 基于 Pareto 最优的粒子群算法

电动汽车参数设置与遗传算法一致，粒子群规模设

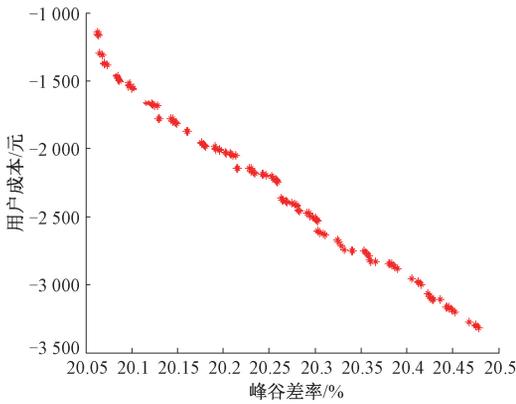


图 5 NSGA-II Pareto 前沿分布

Fig. 5 NSGA-II Pareto frontier distribution

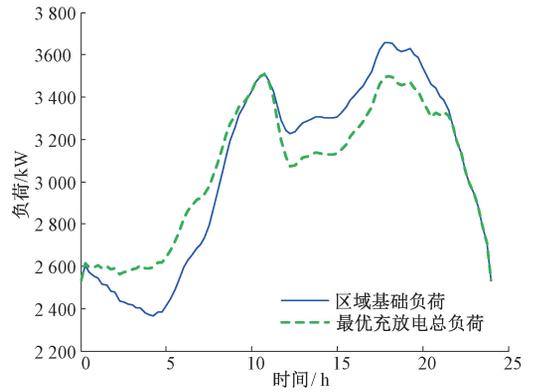


图 7 最优充放电负荷曲线

Fig. 7 Optimal charge and discharge load curve

定为 100, $\omega_{\max} = 0.9$, $\omega_{\min} = 0.4$, 迭代次数为 500, 粒子速度按经验值取 $V_{\max} = 0.5$, $V_{\min} = -0.5$ 。流程如图 6 所示, 得到的小区总的日负荷曲线如图 7 所示。

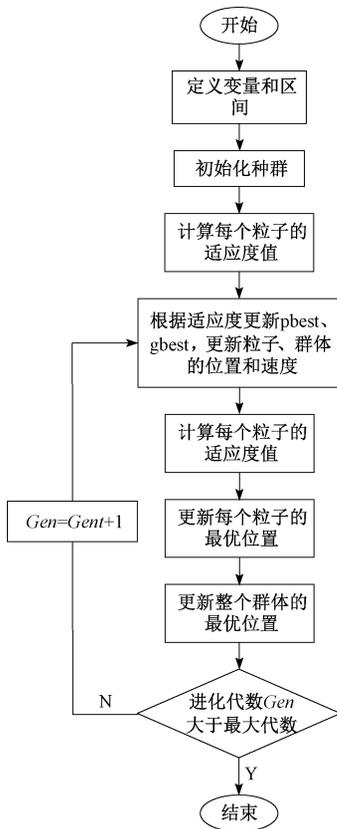


图 6 粒子群算法流程

Fig. 6 Particle swarm algorithm flowchart

由图 7 可知, 在粒子群算法优化策略下, 小区总负荷曲线的波峰和波谷也都有所改善, 日负荷曲线峰值为 3 500 kW, 谷值为 2 500 kW, 峰谷差率为 28.57%。

优化后的充放电时段如表 3 所示。

表 3 粒子群最优充放电时段

Table 3 Particle swarm optimal period

充电时段	00:00~09:00
放电时段	10:30~15:00 17:30~21:30

算法迭代终止后得到的 Pareto 前沿分布如图 8 所示。

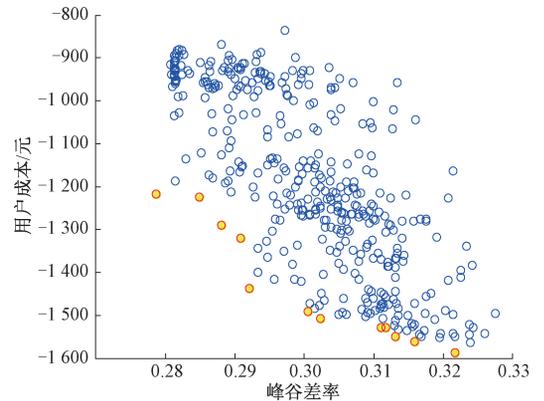


图 8 粒子群 Pareto 前沿分布

Fig. 8 Particle swarm Pareto frontal distribution

3.3 结果分析

通常情况下, 多目标函数的各个子目标相互矛盾, 不存在一个解能使每个子目标同时达到最优。本文中降低峰谷差率和减小用户成本这两个子目标函数是一种矛盾关系, 因此在制定相关充放电策略时需要综合考虑这两方面的因素。Pareto 前沿分布较为均匀时, 目标函数优化所得到的取值范围比较合理。由图 5 和 8 可知, 对于本文中用户成本和峰谷差率这两个目标优化所得到的解的取值范围比较合理。通过最优充放电和有序充放电对比图来阐释该问题, 如图 9 所示。

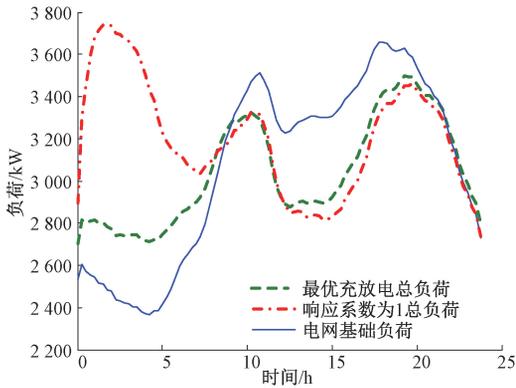


图 9 最优充放电和有序充放电对比

Fig. 9 Comparison of optimal and ordered charge

由图 9 可知,在电价的谷时段,采取有序充放电调控时,全部车辆集中在谷时充电,峰时放电,这样充电费用减少,放电收益最多。当进行最优调控时,为避免“峰上加峰”,电动汽车没有集中在谷时充电,部分电动汽车在平价时段和峰价时段充电,充电成本增加,用户总收益降低,不同模式的电网日负荷和用户收益如表 4 所示。

表 4 不同模式电网日负荷和用户收益

Table 4 Different mode of daily load and user income

	峰谷差率/%	收益/元
无序	39.94	-2 992.37
有序	28.10	2 042.72
NSGA-II 优化	20.11	1 639.05
粒子群优化	28.57	1 238.23

分析表 4 可知,NSGA-II 算法的峰谷差率和用户成本都较粒子群算法低。对于优化的时间段二者相差不多,两者有一个共同点,优化后的电动汽车充放电时段均超出电网公司划定的峰谷时间段。由有序充放电可知,若电动汽车对分时电价全部响应,集中在同一时间段充电或放电,将导致在谷时形成新的波峰,峰谷差率增大。而通过最优算法可以将一部分车辆充电时间挪到平时或者峰时,放电时段挪到平时,达到平滑负荷曲线的作用,降低峰谷差率。

4 结论

本文研究了电动汽车充放电对小区日负荷的影响情况以及用户使用电动汽车的成本问题。在电动汽车无序充放电的基础上,利用峰谷分时电价引导电动汽车有序充放电,寻找最佳响应度。为了更好地“削峰填谷”,本文建立以小区日负荷曲线峰谷差率最小和用户成本最低

为目标的充放电优化模型,并采用 NSGA-II 算法和粒子群算法对模型进行求解得到 Pareto 最优解集。算例仿真分析表明,两种优化策略均能够在保证电网负荷峰谷差率减小且用户的成本最低,但 NSGA-II 的优化效果更好。

参考文献

- [1] 张吉宣, 贾建芳, 曾建潮. 电动汽车供电系统锂电池剩余寿命预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3): 60-66.
ZHANG J X, JIA J F, ZENG J CH. Prediction of residual life of lithium battery in power supply system of electric vehicle [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(3): 60-66.
- [2] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
WANG X F, SHAO CH CH, WANG X L, et al. Summary of charging load and dispatching control strategy of electric vehicle [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2013, 33(1): 1-10.
- [3] ROTERING N, ILIC M. Optimal charge control of plug-in hybrid electric vehicles in deregulated electricity markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1021-1029.
- [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, 25.
HU Z CH, SONG Y H, XU ZH W, et al. The influence and utilization of electric vehicles connected to the power grid [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2012, 32(4): 1-10, 25.
- [5] 周健飞, 孙宇轩, 代军. 基于 V2G 技术的微电网调峰控制策略研究[J]. 电力与能源, 2019, 40(3): 351-353.
ZHOU J F, SUN Y X, DAI J. Research on peak regulation control strategy of microgrid based on V2G technology [J]. Electric Power and Energy, 2019, 40(3): 351-353.
- [6] ASHAR A, BIBEAU E, SHAHIDINEJAD S, et al. PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 341-350.
- [7] LI G, ZHANG X. Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic power flow calculations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 492-499.
- [8] KWON M, JUNG S, CHOI S. A high efficiency bi-directional EV charger with seamless mode transfer for V2G and V2H application [C]. IEEE Energy Conversion

- Congress and Exposition (ECCE), 2015: 5394-5399.
- [9] BOSOVIC A, MUSIC M, SADOVIC S. Analysis of the impacts of plug-in electric vehicle charging on the part of a real low voltage distribution network [C]. 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 2015: 1-5.
- [10] ESSA M J M, CIPCIGAN L M. Effects of randomly charging electric vehicles on voltage unbalance in micro grids [C]. 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2015: 1-6.
- [11] 王健. 电动汽车充电站对电力系统的谐波影响及抑制方法研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
WANG J. Research on harmonic influence and suppression method of electric vehicle charging station on power system [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [12] 葛少云, 黄镠, 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 SH Y, HUANG L, LIU H. Optimization of peak-valley electricity price for orderly charging of electric vehicles [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 1-5.
- [13] 张振夫, 黄小庆, 曹一家, 等. 考虑分时电价的电动汽车充电负荷计算 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 24-29.
ZHANG ZH F, HUANG X Q, CAO Y J, et al. Charge load calculation of electric vehicle considering time-sharing electricity price [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 24-29.
- [14] 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 ZH W, HU Z CH, SONG Y H, et al. Orderly charging strategy of electric vehicle charging station based on dynamic time-sharing price [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2014, 34(22): 3638-3646.
- [15] 占恺娇, 胡泽春, 宋永华, 等. 含新能源接入的电动汽车有序充电分层控制策略 [J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3689-3695.
ZHAN K Q, HU Z CH, SONG Y H, et al. Hierarchical control strategy for orderly charging of electric vehicles with new energy access [J]. Power Grid Technology, 2016, 40(12): 3689-3695.
- [16] 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 J W, WAN Y F, ZHENG P W, et al. Orderly charge and discharge strategy of electric vehicle based on demand side management [J]. Journal of Electrical Engineering, 2014, 29(8): 64-69.
- [17] 刘星平, 李世军, 于浩明, 等. 住宅小区内电动汽车有序充电优化模式 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 238-245.
LIU X P, LI SH J, YU H M, et al. Optimization mode of orderly charging of electric vehicles in residential district [J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 30(20): 238-245.
- [18] 肖浩, 裴玮, 孔力. 含大规模电动汽车接入的主动配电网多目标优化调度方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(S2): 179-189.
XIAO H, PEI W, KONG L. Multi-objective optimal dispatching method for active distribution network with large-scale electric vehicle access [J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 32(S2): 179-189.
- [19] 白高平. 电动汽车充(放)电站规模化建设与电网适应性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
BAI G P. Study on large-scale construction of electric vehicle charging (discharge) power station and power grid adaptability [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [20] 杨晓东, 张有兵, 赵波, 等. 供需两侧协同优化的电动汽车充放电自动需求响应方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 120-130.
YANG X D, ZHANG Y B, ZHAO B, et al. Automatic demand response method for charge and discharge of electric vehicles based on collaborative optimization of supply and demand sides [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 37(1): 120-130.

作者简介



高少希, 现为厦门理工学院硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: 957027550@qq.com

Gao Shaoxi is a M. Sc. candidate at Xiamen University of Technology. Her main research interest includes power electronics and

power drives.



张达敏(通信作者), 2013年于浙江大学获得博士学位, 现为厦门理工学院副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源发电技术, 电力电子变流器电流预测控制等。

Zhang Damin (Corresponding author) received Ph. D. from Zhejiang University in

2013. Now, He is an associate professor and M. Sc. supervisor at Xiamen University of Technology. His main research interests include renewable energy generation and predictive control in power electronics converters.



陈伟川, 现为厦门理工学院硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: 272987495@qq.com

Chen Weichuan is a M. Sc. candidate at Xiamen University of Technology. His main research interest includes power electronics and

power drives.



陈鼎圣, 现为厦门理工学院硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: 409467109@qq.com

Chen Dingsheng is a M. Sc. candidate at Xiamen University of Technology. His main research interest includes power electronics and

power drives.