

# 基于峰谷分时电价时区的电动汽车有序充电策略研究<sup>\*</sup>

郭放<sup>1</sup>, 孙鹏龙<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司 经济技术研究院, 河南 郑州 450052;  
2. 河南开放大学 机电工程与智能制造学院, 河南 郑州 450046)



郭放(1989—), 男, 高级工程师, 主要从事新型电力系统规划设计。

**摘要:** 针对电动汽车无序充电会导致配变总负荷峰谷差率增加的问题, 提出基于峰谷分时电价时区的有序充电策略。建立电动汽车无序充电数学模型, 采用蒙特卡罗模拟法估算电动汽车集群的无序充电负荷, 以电网总负荷的峰谷差率最小为优化目标, 采用遗传算法求解出最佳的谷电价时区。仿真结果表明, 与无序充电相比, 所提策略使电网总负荷的峰谷差率有效降低, 当电动汽车数量为1 000辆、用户响应度为0.9时, 有序充电时对应的总用电负荷峰谷差率相比无序充电时降低了14.6%, 验证了所提策略的有效性。

**关键词:** 峰谷差; 有序充电; 电动汽车; 充电策略; 分时电价

中图分类号: TM910.6 文献标志码: A 文章编号: 2095-8188(2025)10-0037-05

DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2025.10.005

## Research on Orderly Charging Strategy for Electric Vehicles Based on Time of Use Tariff Periods During Peak Valley Period

GUO Fang<sup>1</sup>, SUN Penglong<sup>2</sup>

(1. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China;  
2. College of Mechanical Electrical Engineering and Intelligent Manufacturing, Henan Open University, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the disorderly charging for electric vehicles can lead to an increase in the peak valley difference rate of the total load of the distribution transformer, an orderly charging strategy based on time of use tariff periods is proposed. A mathematical model of disorderly charging for electric vehicles is established. The Monte Carlo simulation method is used to estimate the disorderly charging load of the electric vehicle cluster. With the goal of minimizing the peak valley difference rate of the total load of the power grid, the genetic algorithm is used to solve the optimal valley tariff period. The simulation results show that compared with disorderly charging, the proposed strategy effectively reduces the peak valley difference rate of the total load of the power grid. When the number of electric vehicles is 1 000 and the user response is 0.9, the peak valley difference rate of the total electricity load corresponding to orderly charging is reduced by 14.6% compared with disorderly charging, which verifies the effectiveness of the proposed strategy.

**Key words:** peak valley difference; orderly charging; electric vehicles; charging strategy; time of use tariff

孙鹏龙(1988—), 男, 讲师, 研究方向为新能源汽车整车控制技术。

<sup>\*</sup> 基金项目: 河南省科技攻关计划项目(212102210030)

## 0 引言

发展新能源汽车是深入实施汽车强国国家战略的客观需求<sup>[1]</sup>。对于住宅小区供电系统而言,当相当数量的电动汽车同时进行充电时,由于电动汽车的充电负荷与小区电网基础用电负荷峰谷分布基本一致,致使电网总负荷的峰谷差显著增加,在用电高峰时配电变压器过载运行,在低谷期配电变压器低载运行,设备利用率低,影响供电系统的安全性、稳定性<sup>[2]</sup>。

电动汽车充电不仅受车主的主观因素影响,而且涉及电网运营方、用户的经济利益,国内外许多学者对有序充电进行了研究。黄柏强等<sup>[3]</sup>提出一种分时电价背景下光伏出力园区电动汽车的有序充电策略,该方法考虑了光伏出力的影响,但忽略了配电网总负荷的峰谷差率。李龙等<sup>[4]</sup>采用混合优化算法对响应分时电价的电动汽车的充电时间、顺序和地点进行动态寻优,但忽略了部分车主可能不响应分时电价。李敬航等<sup>[5]</sup>搭建充电站收益与电动汽车车主满意度博弈的充电数学模型。文献<sup>[6]</sup>提出了基于马尔可夫决策过程(MDP)的有序充电策略,但他们均忽略了电动汽车起始充电时的荷电状态。

本文以住宅小区配变负荷峰谷差为研究对象,对电动汽车的有序充电策略进行研究。采用峰谷分时电价方案,激励车主选择有序充电模式,以小区电网总用电负荷的峰谷差率最小为优化目标函数,采用蒙特卡罗-遗传算法求解出最佳的峰谷电价时区。

## 1 电动汽车无序充电负荷分析

### 1.1 蒙特卡罗模拟无序充电负荷建模

典型住宅小区供电系统结构如图1所示。外部高压干线的高压电经电力变压器降压后转换为低压电,由低压干线分配给各楼栋的配电柜及公共用电配电柜,然后再分配给室内用电设备和电动汽车充电桩<sup>[7-8]</sup>。当大量电动汽车同时充电时,会使低压线路、高压线路及电力变压器负荷显著增大。

家用电动汽车充电可以近似为恒功率充电<sup>[9]</sup>。虽然每辆电动汽车的充电开始时间和充电时长都不一样,无法通过简单求和运算得到电

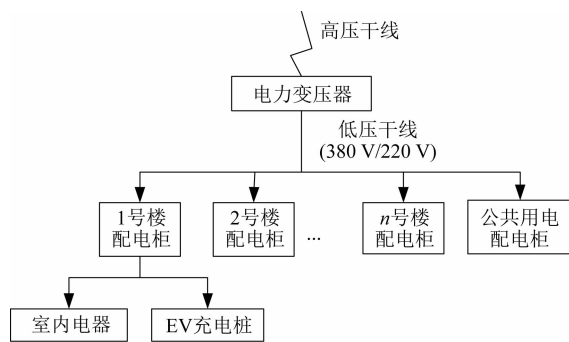


图1 典型住宅小区供电系统结构

动汽车集群的总体充电负荷,但是当电动汽车集群的数量达到相当规模时,其充电开始时间和充电时长就会符合一定的统计学规律。参照美国家用汽车出行统计数据<sup>[10-11]</sup>,电动汽车每日最后返回时刻 $T_R$ 和日行驶距离 $D$ 符合正态分布,其概率密度函数 $f_{T_R}(x)$ 、 $f_D(x)$ 分别为

$$f_{T_R}(x) = \begin{cases} \frac{1}{3.4 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - 17.6)^2}{2 \times 3.4^2}\right], & 5.6 < x \leq 24 \\ \frac{1}{3.4 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x + 24 - 17.6)^2}{2 \times 3.4^2}\right], & 0 < x \leq 5.6 \end{cases} \quad (1)$$

$$f_D(x) = \frac{1.069}{0.88 \sqrt{2\pi x}} \exp\left[-\frac{(\ln x - 3.2)^2}{2 \times 0.88^2}\right], \quad x \geq 0 \quad (2)$$

将电动汽车每日最后返回时刻作为充电开始时刻,电动汽车进行无序充电时的开始时刻就等于其每日最后返回时刻。假设电动汽车百公里耗电量均相同,且每次充电均充至满电量状态,则电动汽车进行无序充电时的充电时长 $T_L$ 为

$$T_L = \frac{DW}{100P_c} \quad (3)$$

式中:  $W$ ——电动汽车百公里耗电量;

$P_c$ ——电动汽车充电功率。

由此可以得到电动汽车无序充电时的充电开始时刻 $T_S$ 和充电时长 $T_L$ 的概率密度函数分别为

$$f_{T_S}(x) = \begin{cases} \frac{1}{3.4 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - 17.6)^2}{2 \times 3.4^2}\right], & 5.6 < x \leq 24 \\ \frac{1}{3.4 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x + 24 - 17.6)^2}{2 \times 3.4^2}\right], & 0 < x \leq 5.6 \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{T_L}(x) = \frac{1.069W}{88\sqrt{2\pi}P_Cx} \exp\left[-\frac{(\ln x - 3.2)^2}{2 \times 0.88^2}\right],$$

$$x \geq 0 \quad (5)$$

单辆电动汽车的用电负荷  $P_Y$  取值分两种情况:在充电时等于  $P_C$ ,在未开始充电或者结束充电后等于0。充电等待时间为  $T_C$ ,电动汽车在当前时刻  $t$  的充电状态判断方法:当  $t < T_S$  且  $t > T_S + T_C - 24$ ,或者  $t \geq T_S + T_C$  时,当前时刻为充电状态;否则当前时刻为非充电状态。由此可得  $P_Y$  的概率分布函数为

$$P(P_Y = P_C) = F_{T_S}F_{T_L}(t < T_S, t > T_S + T_C - 24) + F_{T_S}F_{T_L}(t \geq T_S + T_C) \quad (6)$$

$$P(P_Y = 0) = 1 - P(P_Y = P_C) \quad (7)$$

式中:  $F_{T_S}, F_{T_L}$ —— $T_S, T_L$  的概率分布函数,由概率密度函数求积分得到。

由于无法得到单辆电动汽车用电负荷的解析式,本文采用蒙特卡罗模拟法来求解单辆电动汽车充电负荷期望值<sup>[12]</sup>。具体步骤如下。

(1) 以  $f_{T_S}(x)$  和  $f_{T_L}(x)$  为概率密度函数,取 10 000 个样本点  $[T_S(j), T_L(j)]$ ;

(2) 判断当前时刻  $t(i)$  与  $T_S(j), T_L(j)$  的关系,确定电动汽车是否为充电状态;

(3) 统计充电状态的样本个数  $N(i)$ ;

(4) 计算电动汽车充电负荷期望值  $E(P_Y)$ ,可表示为

$$E(P_Y) = \frac{N(i)P_C}{10\,000} \quad (8)$$

电动汽车集群的充电负荷等于单辆电动汽车的充电期望值和汽车数量的乘积。当电动汽车的数量为 1 000 时,利用 MATLAB 软件仿真,电动汽车集群充电负荷曲线如图 2 所示。

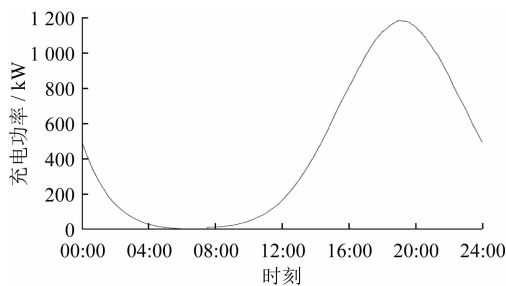


图2 电动汽车集群充电负荷曲线

## 1.2 无序充电对小电网配变负荷的影响

小区配变用电负荷曲线如图3所示。典型住

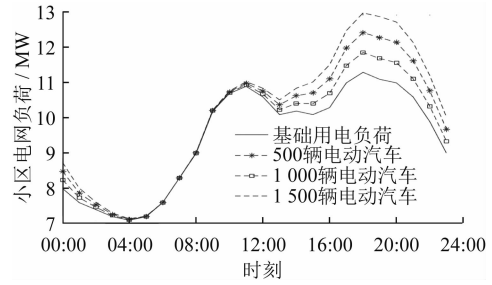


图3 小区配变用电负荷曲线

宅小区的基础用电日负荷曲线如图3中的实线所示<sup>[13]</sup>。将基础用电负荷与电动汽车集群的无序充电负荷相加,就得到小区电网的总用电负荷。不同数量的电动汽车无序充电时对应的小区电网总用电负荷曲线如图3中的虚线所示。

对比图2和图3可知,小区电网的基础用电负荷高峰时区为  $[09:00, 13:00]$ 、 $[17:00, 21:00]$ ,低谷时区为  $[00:00, 7:00]$ ;电动汽车集群无序充电负荷高峰时区为  $[17:00, 22:00]$ ,低谷时区为  $[04:00, 13:00]$ 。两者的峰谷时区存在较大重叠。

对于小区电网配变用电负荷:峰值负荷为 11.2 MW,谷值负荷为 7.0 MW,峰谷差率为 37.5%。不同数量的电动汽车集群无序充电时小区电网总用电负荷如表1所示。由表1可知,电动汽车无序充电导致小区电网总用电负荷的峰谷差率增大,且随着电动汽车数量的增加,总用电负荷的峰谷差率也随之增大。

表1 不同数量的电动汽车集群无序充电时  
小区电网总用电负荷

电动汽车数量/辆	峰值负荷/ MW	谷值负荷/ MW	峰谷差率/ %
500	11.8	7.1	39.8
1 000	12.4	7.1	42.7
1 500	13.0	7.1	45.4

## 2 电动汽车有序充电策略

### 2.1 有序充电优化模型

对于住宅小区而言,大部分电动汽车在最后一次返回后停车时间  $> 10$  h,其动力电池从 50% 剩余电量充满仅需要 3 ~ 4 h<sup>[14-15]</sup>,因此通过对充电时间进行有序控制,使其避开基础用

电负荷的高峰期,转移到基础用电负荷的低谷期,就可以降低小区电网总用电负荷的峰谷差率。

本文通过设置峰谷分时电价的方式引导用户自主选择有序充电,即采用峰电价和谷电价两种计价费率,将充电时间划分为峰电价时区和谷电价时区。当车主开始充电时,可以自由选择2种充电模式。如果选择即时充电模式,则采用当前电价时区的费率进行计费且立即开始充电;如果车主选择有序充电模式,则充电桩会等待进入谷电价时区再开始充电。

设谷电价时区为 $[t_1, t_2]$ ,对于在峰电价时区选择有序充电模式的电动汽车,其开始充电时刻被转移至谷电价时区,计算公式为

$$T_s = \begin{cases} \text{rand}[t_1, t_2 - T_L], T_L \leq \Delta t \\ t_1, T_L > \Delta t \end{cases} \quad (9)$$

式中: rand——时区 $[t_1, t_2 - \Delta t]$ 内的一个随机数;

$\Delta t$ ——谷电价时区时长,  $\Delta t = t_2 - t_1$ 。

根据式(9)可知,当用户响应度(即选择有序充电模式的车主比例)确定时,有序充电策略仅与峰谷电价时区有关,以电网总负荷峰谷差率最小为优化目标,建立有序充电优化模型为

$$\begin{aligned} & \min z(t_1, \Delta t) \\ & \text{s. t. } 0 \leq t_1 < 24 \\ & 0 \leq \Delta t < 24 \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $z$ ——电网总负荷峰谷差率关于 $t_1$ 和 $\Delta t$ 的函数。

### 2.2 遗传算法求解优化模型

式(10)所描述的有序充电优化模型是一个二元函数在自变量定义域内求解最小值的问题,且目标函数 $z$ 的解析式未知,使用遗传算法可以求解该有序充电优化模型,求解步骤如下。

(1) 种群初始化。对种群进行初始化,在2个自变量的取值范围内随机生成 $k$ 个初始种群对 $(t_1, \Delta t)_i$ 。

(2) 适应度计算。适应度值就是目标函数值 $z(t_1, \Delta t)$ 。

(3) 选择操作。选择算子为 $1/z_i(t_1, \Delta t)$ ,采用轮盘赌法对父本进行选择,个体 $i$ 被选择的概率 $P_i$ 为

$$P_i = \frac{1/z_i(t_1, \Delta t)}{\sum_{j=1}^k 1/z_j(t_1, \Delta t)} \quad (11)$$

(4) 交叉操作。对选择出的父本个体进行单点交叉遗传。交叉操作示意如图4所示。



图4 交叉操作示意

(5) 变异操作。对交叉操作后的个体进行变异,变异概率为0.01。变异操作示意如图5所示。

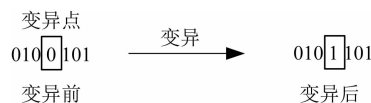


图5 变异操作示意

(6) 反复迭代寻优。直到迭代次数 $N_c$ 达到设定进化次数 $N$ ,则终止算法。算法流程如图6所示。

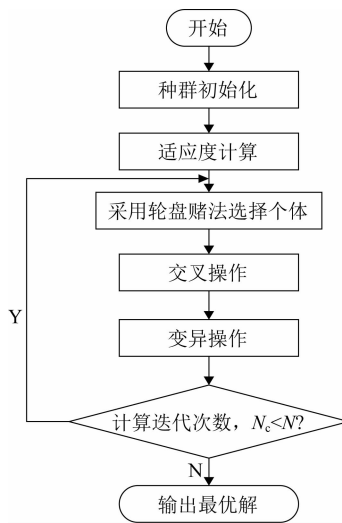


图6 算法流程

## 3 仿真分析

设置用户响应度为0.9,即90%车主选择有序充电模式,10%车主选择即时充电模式,电动汽车数量为1000辆。使用MATLAB软件中的遗传算法工具箱求解有序充电优化模型,得到谷电价时区最优值为[00:20,07:45]。

小区电网的基础用电负荷曲线及无序、有序充电时的总用电负荷曲线如图7所示。由图7可见,采用有序充电策略后,处于峰电价时区的电动汽车无序充电负荷大部分被转移到谷电价时区,相比于无序充电时的总用电负荷曲线,有序充电时的总用电负荷曲线更加平缓。

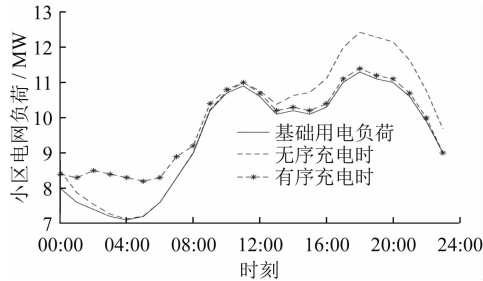


图7 小区电网的基础用电负荷曲线及无序、有序充电时的总用电负荷曲线

经计算,有序充电时小区电网的总用电峰值负荷、谷值负荷及峰谷差率如表2所示。由表2可知,小区电网总用电负荷的峰谷差率相比于无序充电时的42.7%,采用有序充电策略后减少了14.6%,验证了本文提出的有序充电策略的有效性。

表2 有序充电时小区电网的总用电峰值负荷、谷值负荷及峰谷差率

充电方式	峰值负荷/MW	谷值负荷/MW	峰谷差率/%
无序充电	12.4	7.1	42.7
有序充电	11.4	8.2	28.1

## 4 结 语

(1) 本文提出了一种基于峰谷分时电价时区的有序充电策略,以电网总负荷峰谷差率最小为优化目标,采用遗传算法求解出最佳的谷电价时区。仿真结果表明,与无序充电相比,该有序充电策略使电网总负荷的峰谷差率有效降低。

(2) 本文提出的有序充电策略通过电价激励引导用户自主选择有序充电,不影响充电效果,可节省充电费用,且无需更换小区电网的供电设备,实用性强。

### 【参考文献】

[1] 胡志勇,郭雪丽,王爽,等.考虑响应意愿的电动汽车群-空调集群需求响应策略研究[J].电力系统

保护与控制,2023,51(15):109-119.

- [2] 邓慧琼,张晓飞,曾凡淦,等.动态分时电价机制下的电动汽车充放电调度策略研究[J].智慧电力,2023,51(3):59-66,78.
- [3] 黄柏强,陈建基,李盛佳,等.分时电价背景下光伏出力园区电动汽车的有序充电策略[J].电器与能效管理技术,2022(9):58-65.
- [4] 李龙,贺瀚青,张钰声,等.配电网接纳电动汽车充电负荷能力的评估方法[J].电网与清洁能源,2022,38(11):107-116.
- [5] 李敬航,杨德玲,赖伟坚,等.住宅小区充电站电动汽车有序充电方法[J].电力需求侧管理,2021,23(3):31-35.
- [6] DHIMAN G, GARG M, NAGAR A, et al. A novel algorithm for global optimization: Rat swarm optimizer [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 12(8): 1-26.
- [7] YU Y, LIU M, CHEN D, et al. Dynamic grouping control of electric vehicles based on improved  $k$ -means algorithm for wind power fluctuations suppression [J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 542-553.
- [8] 董涛,雍静,赵瑾,等.含光、储、电动汽车居民小区电力负荷综合管理系统[J].重庆大学学报,2021,44(8):45-58.
- [9] LI C, FU Y, CUI X, et al. Dynamic time prediction for electric vehicle charging based on charging pattern recognition [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2023, 24(2): 299-313.
- [10] 敖羿.居民区电动汽车充电有序控制策略研究[D].南昌:南昌大学,2021.
- [11] 肖丽,谢尧平,胡华锋,等.基于V2G的电动汽车充放电双层优化调度策略[J].高压电器,2022,58(5):164-171.
- [12] 张颖,伏睿,唐林权,等.V2G车网互联的双向AC/DC变换器直流阻抗模型及特性分析[J].电器与能效管理技术,2024(4):74-81.
- [13] 李景丽,时永凯,张琳娟,等.考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(7):94-102.
- [14] 牛高远,孟凡提,陈天锦,等.计及天气因素影响的V2G有序充放电控制策略研究[J].电器与能效管理技术,2022(9):51-57.
- [15] 李红岩,刘苗苗,贾甜,等.基于蒙特卡洛算法的电动汽车有序充电控制策略研究[J].电器与能效管理技术,2021(5):59-64.

收稿日期:2025-05-24