

# 基于动态分时电价的电动汽车有序充放电研究

李伟生<sup>1</sup> 张继龙<sup>2</sup> 漆建平<sup>3</sup>

- (1. 山东省科学院 自动化研究所 济南 250014;
- 2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院 兰州 730050;
- 3. 太原理工大学 机械工程学院 太原 030024)

**摘要:** 大规模电动汽车随机无序充电将对电网安全运行带来巨大挑战,诸如增大负荷峰谷差、加大运营成本、增加谐波污染等。该文在考虑电动汽车充放电功率约束、电池容量约束的前提下,基于动态分时电价制度,建立电动汽车多目标优化调度模型,以降低电网负荷峰谷差率和用户充电成本,并采用改进学习因子与惯性权重的粒子群优化算法对模型进行求解。仿真结果表明,基于动态分时电价的调度策略比固定电价下优化效果更优,能够更好地减小系统负荷峰谷差率,提高负荷率,增加电力设备的利用率,降低电动汽车充电成本。

**关键词:** 电动汽车; 动态分时电价; 粒子群优化算法; 用户充电成本; 峰谷差率

**中图分类号:** TM73   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000 - 0682(2017) 04 - 0046 - 04

## A dynamic time - of - use price based order for charging and discharging of electric vehicles

LI Weisheng<sup>1</sup>, ZHANG Jilong<sup>2</sup>, QI Jianping<sup>3</sup>

- (1. Institute of Automation, Shandong Academy of Science, Jinan 250014, China;
- 2. College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
- 3. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The out - of - order charging of electric vehicles will bring great challenges to the safe operation of power grid, such as increasing the load of the peak - valley ratio, the operating costs, the harmonic pollution etc. In this paper, considering the constraints of the charging/discharging power and the electricity quantity stored in the battery of electric vehicles, based on dynamic time - of - use price system, establishing a multi - objective optimization scheduling model for electric vehicles, in order to reduce peak - valley ratio of grid load and valley load and charge cost of user. The model is solved by modifying particle swarm optimization algorithm based on learning factor and inertia weight. Simulation results show that the scheduling strategy based on dynamic time - of - use price is better than the fixed price, and it can reduce the system load peak - valley ratio better, increasing the load rate and the utilization of power equipment, reducing the charge cost of electric vehicles.

**Key words:** electric vehicles; dynamic time - of - use price; particle swarm optimization algorithm; charge cost of user; peak - valley ratio

## 0 引言

近年来,由于电动汽车在节能、环保、减排等方面的优越性,得到了社会的广泛重视。但大规模电动汽车在晚间用电高峰期集中充电,容易造成电网负荷“峰上加峰”,给电网安全稳定运行和长久规划带来不利影响<sup>[1-2]</sup>。随着动态分时电价的实施推

广,电动汽车用户可以选择在电价低谷期从电网充电,而在电价高峰时段向电网馈电,从而给电动汽车用户带来额外经济收入<sup>[3]</sup>。文献[4]分析了电动汽车充放电控制策略,讨论了电动汽车参与电网调节峰谷的可行性及实现方案。文献[5]基于分时电价机制,以车主满意度为前提,研究了电动汽车有序充电调度控制方法,仿真结果表明该方法可以降低电网负荷峰谷差。文献[6]分析了一种插电式混合动力电动汽车的集中充电方法,在实时动态电价背景下,利用动态差值估算算法优化电动汽车充电,从而

收稿日期: 2016 - 06 - 06

作者简介: 李伟生(1990),男,山东济南人,硕士,助理研究员,研究方向为电能转换与控制,直流充电系统设计。

为电动汽车用户和电网带来效益。

实施动态分时电价政策,可以引导用户合理分配用电时间段,有助于平衡负荷分布,实现削峰填谷。电动汽车推广普及后,可鼓励电动汽车车主尽可能避开用电高峰期而在用电低谷期充电,以避免电动汽车在负荷高峰期集中充电给电网造成“峰上加峰”,并且可提高负荷低谷期电力设备的使用率,提高电力系统的安全经济性,保证供电可靠性。

该文以私家电动车为研究对象,在动态分时电价背景下,建立电动汽车有序充放电优化调度模型,以减小日负荷峰谷差率和降低电动汽车用户充电成本为目标进行研究分析。

## 1 电动汽车充放电优化调度模型建立

### 1.1 目标函数

以连续可调的智能充电机的充放电功率为根据,只考虑充放电功率及充放电时间的优化,不涉及充放电地点的优化。所有入网电动汽车均采用常规充放电方式,并与电网建立通信联系,且 24 h 均可参与电网调度。每个时段(一天分为 24 个时间段)内电网负荷与电动汽车充放电功率均保持不变。

1) 以日负荷峰谷差率最小为目标函数,即:

$$\min Y_1 = [\max (P'_{lj}) - \min (P'_{lj})] / \max (P'_{lj}) \quad (1)$$

$$P'_{lj} = P_{lj} + \sum_{a=1}^m P_{aj} \quad (2)$$

式中:  $P_{lj}$  为在第  $j$  时段原始负荷值,  $P'_{lj}$  是在第  $j$  时段叠加电动汽车充电负荷后的系统负荷值,  $P_{aj}$  为第  $j$  时段第  $a$  辆电动汽车的充放电功率(充电为正,放电为负),  $\max (P'_{lj})$ ,  $\min (P'_{lj})$  分别代表一天中日负荷最大值、最小值,  $j = 1, 2, \dots, 24$ ,  $m$  为电动汽车数量。

2) 在分时电价背景下,以最小化电动汽车用电成本为目标函数:

$$\min Y_2 = \sum_{j=1}^{24} \sum_{a=1}^m P_{aj} E_j \quad (3)$$

式中:  $E_j$  代表在  $j$  时段的电价。

以上 2 个目标函数是相互作用影响的,为兼顾两者协同最优,利用线性加权法,将多目标优化问题转变为单目标优化问题,并进行归一化处理,即:

$$\min Y = \mu_1 (Y_1 / Y_{1\max}) + \mu_2 (Y_2 / Y_{2\max}) \quad (4)$$

式中:  $Y_{1\max}$  为原始日负荷峰谷差率,  $Y_{2\max}$  为电动汽车最大随机充电成本,即电动汽车结束最后一次行程,开始充电至满电量的费用,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  分别为目标函数

$Y_1, Y_2$  的权重系数且  $\mu_1 + \mu_2 = 1$ 。

### 1.2 约束条件

该文不考虑电动汽车入网时间约束,只考虑车载电池容量约束、电动汽车充放电功率约束及线路容量约束。

#### 1) 电池容量约束

电池的容量不能超过额定值  $C_N$ ,考虑电动汽车的使用寿命,电池容量也不能低于额定值的 20%。

$$\begin{cases} \Delta C_{aj\min} \leq \Delta C_{aj} \leq \Delta C_{aj\max} \\ \Delta C_{aj\max} = (SOC_{\max} - SOC_{aj}) \\ \Delta C_{aj\min} = (SOC_{\min} - SOC_{aj}) \\ SOC = C_{re} / C_N \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $SOC$  为电池剩余容量百分比,即电池剩余容量与额定值  $C_N$  的比值,  $SOC_{aj}$  为电动汽车  $a$  在  $j$  时段电池剩余容量百分比,  $SOC_{\min}$  为  $SOC$  的最小值,取 0.2,  $SOC_{\max}$  为  $SOC$  的最大值,取 1,  $C_N$  为电池额定容量值,  $C_{re}$  为车载电池剩余容量值,  $\Delta C_{aj\max}$  为电动汽车  $a$  在  $j$  时段电池最大可调度容量,  $\Delta C_{aj\min}$  为电动汽车  $a$  在  $j$  时段电池最小可调度容量,  $\Delta C_{aj}$  为电动汽车  $a$  在  $j$  时段充放电容量。

#### 2) 充放电功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{aj\epsilon} \leq P_{Nc} \\ 0 \leq P_{aj\delta} \leq P_{Nd} \end{cases} \quad (6)$$

考虑线路功率容量约束不超过  $P_x$ , 则

$$-P_x \leq P_{aj} \leq P_x \quad (7)$$

综上得:

$$P_{aj\min} \leq P_{aj} \leq P_{aj\max} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_{aj\min} = \max (-P_x, -P_{aj\delta}) \\ P_{aj\max} = \min (P_x, P_{aj\epsilon}) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{aj\min}$ ,  $P_{aj\max}$  分别表示电动汽车  $a$  在  $j$  时段最小、最大充放电功率,  $P_{aj\epsilon}$ ,  $P_{aj\delta}$  分别表示电动汽车  $a$  在  $j$  时段的充电、放电功率值,  $P_{Nc}$ ,  $P_{Nd}$  分别表示电动汽车充电、放电功率额定值,  $P_x$  为线路容量。

## 2 优化算法

### 2.1 粒子群优化算法

以电动汽车在各时间段的充放电功率为优化变量。假设  $d$  维搜索域第  $i$  个粒子的位置和速度分别为  $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d})$  和  $V_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d})$ , 任何一次迭代,粒子都是追踪 2 个最优解来更新自己的速度和位置,第 1 个就是粒子自己发现的最优解,即个体最优值  $p_{best} - p_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,d})$ , 第 2 个就是所有粒子找到的最优解,即全局最优解  $g_{best} - p_g$ , 所

有粒子都是根据式(10)、式(11)来更新自己的速度与位置。

$$v_{i,j}(t+1) = \omega v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(t)] \quad (10)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad (11)$$

式中： $\omega$ 表示惯性权重， $c_1, c_2$ 表示学习因子， $r_1, r_2$ 表示0~1的随机数。

### 2.2 算法流程

采用改进学习因子与惯性权重的粒子群优化算法求解电动汽车在各时段的充放电功率，将每辆电动汽车在每个时段的充放电功率作为粒子的位置坐标，粒子维数为 $24m$ （ $m$ 为电动汽车数量），如式(14)所示：

$$X_i = [\underbrace{P_{1,1} P_{1,2} \dots P_{1,24}}_{\text{电动汽车1的24个时刻}} ; \dots ; \underbrace{P_{m,1} P_{m,2} \dots P_{m,24}}_{\text{电动汽车m的24个时刻}}] \quad (14)$$

粒子群优化算法具体求解步骤如下：

- 1) 设置算法基本参数，初始化粒子位置和速度；
- 2) 根据约束条件修改粒子位置；
- 3) 计算粒子适应值，存储个体最优位置与全局最优位置；
- 4) 更新粒子位置和速度；
- 5) 根据约束条件修改粒子位置；
- 6) 计算粒子适应值，记录并更新个体最优位置与全局最优位置；
- 7) 判断是否达到迭代次数，若是输出计算结果，否则返回步骤4)。

## 3 算例分析

### 3.1 仿真参数设定

假设系统中运行的电动汽车全为日产 Altra 电动汽车，电池容量  $33 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，百公里耗能  $14.2 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，常规充电功率  $5 \text{ kW}$ ，电动汽车总数为 200，初始 SOC 均为 0.2，线路容量  $P_x = 15 \text{ kW}$ ， $P_{Ne} = P_{Nd} = 54 \text{ kW}$ ，负荷曲线采用文献[2]。粒子群个数  $N$  为 40，粒子速度范围设为  $[-1, 1]$ ，最大惯性权重  $\omega = 0.5$ ，学习因子  $c_1 = c_2 = 2$ ，最大迭代次数  $t_{\max}$  为 1000，原始负荷峰谷差率为  $Y_{1\max} = 56.25\%$ ，定义电动汽车渗透率为可调度电动汽车与电动汽车总量的比值。该文分别仿真计算在 30%、50% 渗透率的情形，在 30% 渗透率下， $Y_{2\max} = 1694$ ，50% 渗透率下， $Y_{2\max} = 2824$ ，固定电价为  $0.75 \text{ 元/kW} \cdot \text{h}$ 。

### 3.2 结果分析

在 30% 渗透率下，分时电价与固定电价下优化的负荷曲线与原始负荷曲线对比结果如图 1 所示，从图中能够看出在两种电价制度下都可实现负荷的削峰填谷。从表 1 得出，基于分时电价的充放电优化比固定电价峰谷差率降低 1.45%，系统负荷率提高了 0.75%。在分时电价下受调度电动汽车总吸收电能为  $826 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，充电成本为 197.8 元，而在固定电价下吸收电能为  $714 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，充电成本为 535.5 元，电动汽车在分时电价制度下比固定电价下吸收电能多  $112 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，而充电成本却降低 337.2 元。

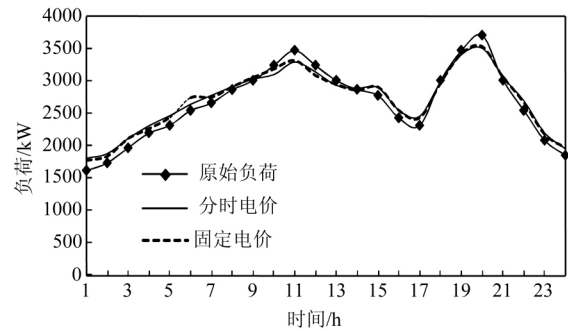


图 1 30% 渗透率下优化后的负荷曲线

表 1 30% 渗透率下分时电价与固定电价优化结果对比

电价制度	峰谷差率 /%	负荷率 /%	充电吸收电能 /kW·h	用户成本 /元
分时电价	49.17	76.23	826	197.8
固定电价	50.62	75.48	714	535.5

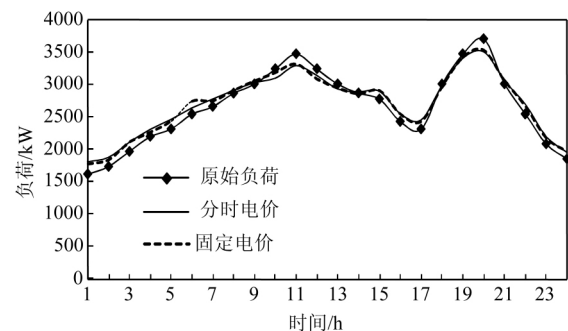


图 2 50% 渗透率下优化后的负荷曲线

表 2 50% 渗透率下分时电价与固定电价优化结果对比

电价制度	峰谷差率 /%	负荷率 /%	充电吸收电能 /kW·h	用户成本 /元
分时电价	43.94	79.06	1546	385.5
固定电价	45.69	77.99	1417	1062.7

在 50% 渗透率下，分时电价与固定电价下优化的负荷曲线与原始负荷曲线对比结果如图 2 所示，

表2为两种电价制度下的负荷峰谷差率与电动汽车用户充电成本优化对比结果。分时电价下优化电动汽车充放电功率系统负荷峰谷差率比固定电价下降1.75%,负荷率提高了1.07%,电动汽车充电成本也更低。在分时电价制度下,50%电动汽车参与系统调度比30%电动汽车参与调度峰谷差率降低了5.23%,负荷率提高了2.83%。仿真结果表明,在动态分时电价下调度控制电动汽车充放电过程可以降低电网负荷峰谷差,提高系统负荷率,增加电力设备的利用率,并降低电动汽车充电成本,给电动汽车用户带来经济效益。未来电动汽车规模化应用以后,基于动态分时电价的电动汽车充放电优化调度带来的经济效益将更明显。

#### 4 结论

该文在动态分时电价背景下,考虑充放电功率约束、电动汽车能量约束建立了电动汽车多目标充放电优化模型,并采用改进学习因子和惯性权重的粒子群优化算法求解,通过算例进行仿真分析。结果表明,控制电动汽车充放电过程可以起到平抑负荷波动与减小电网负荷峰值的效果,分时电价情况下比固定电价优化效果更优,能够更好地减小系统负荷峰谷差率,提高负荷率,并且电动汽车充电成本更小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨秀菊,白晓清,李佩杰,等.电动汽车规模化接入配电网的充电优化[J].电力自动化设备,2015,35(6):31-36.
- [3] 温令云.基于CROA的智能电网电动汽车调度运行研究[D].青岛:青岛大学,2014.
- [4] 韩海英,和敬涵,王小君,等.基于改进粒子群算法的电动车参与负荷平抑策略[J].电网技术,2011,35(10):165-169.
- [5] 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设计[J].电力系统自动化,2013,37(1):191-195.
- [6] 邹文,吴福宝,刘志宏.实时电价下插电式混合动力汽车智能集中充电策略[J].电力系统自动化,2011,36(11):30-37.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 阮文骏,王蓓蓓,李扬,等.峰谷分时电价下的用户响应行为研究[J].电网技术,2012,36(7):86-93.

### CNKI 推出《中国高被引图书年报》

日前,中国知网(CNKI)中国科学文献计量评价研究中心推出了一套《中国高被引图书年报》,该报告基于中国大陆建国以来出版的422万余本图书被近3年国内期刊、博硕、会议论文的引用频次,分学科、分时段遴选高被引优秀学术图书予以发布。据研制方介绍,他们统计并分析了2013—2015年中国学术期刊813万余篇、中国博硕士学位论文101万余篇、中国重要会议论文39万余篇,累计引文达1451万条。根据统计数据,422万本图书至少被引1次的图书达72万本。研制方根据中国图书馆分类法,将72万本图书划分为105个学科,分1949—2009年和2010—2014年两个时间段,分别遴选被引最高的TOP10%图书,共计选出70911本优秀图书收入《中国高被引图书年报》。统计数据显示,这7万本高被引优秀图书虽然只占全部图书的1.68%,却获得67.4%的总被引频次,可见这些图书质量上乘,在同类图书中发挥了更加重要的作用。该报告还首次发布各学科“学科h指数”排名前20的出版单位的评价指标,对客观评价出版社的社会效益——特别是学术出版物的社会效益具有重要的

参考价值。

该报告从图书被引用的角度出发,评价图书的学术影响力,弥补了以销量和借阅等指标无法准确评价学术图书的缺憾,科学、客观地评价了图书、图书作者以及出版单位对各学科发展的贡献。

《中国高被引图书年报》把建国以来出版的图书全部纳入评价范围属国内首创,是全面、客观评价图书学术影响力的工具,填补了目前图书学术水平定量评价的空白,在帮助图书馆建设特色馆藏和提高服务水平、帮助出版管理部门了解我国学术出版物现状、帮助科研机构科研管理、帮助读者购买和阅读图书等方面,均具有较强的参考价值,也为出版社评估出版业绩、决策再版图书、策划学科选题提供有用的信息。

《中国高被引图书年报》由《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司出版。该产品的形式为光盘电子出版物,分为理学、工学、农学、医学、人文科学和社会科学6个分卷,随盘赠送图书,欢迎您咨询、订购。咨询电话:010-82710850 82895056 转8599, email: aspt@cnki.net