

# 考虑电动汽车用户行为特性的 电力系统经济调度

潘 华<sup>1</sup>, 梁作放<sup>1</sup>, 李永奎<sup>2</sup>, 薛强中<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学经济与管理学院, 上海 200090; 2. 同济大学经济与管理学院, 上海 200092)

**摘 要:**随着电动汽车的普及,电动汽车充电行为对电网的影响日益突出,大规模电动汽车的无秩序充电将会对电网的安全可靠与经济调度造成较为严峻的负面影响。在此背景下,考虑电动汽车用户行为特性,进行电力系统经济调度问题研究。首先,以实测数据为基础,考虑电动汽车充电的不确定性,分析充电起始时间和持续时间,得到电动汽车充电负荷的时间分布。然后,以系统的煤耗成本与阀点效应成本之和最低为目标函数,并采用罚函数法将约束条件引入其中,建立计及电动汽车充电的电力系统经济调度模型。最后,对电动汽车的不同充电行为,采用布谷鸟搜索算法分别对其进行实例仿真,验证所提模型的正确性,并分析电动汽车不同充电行为对系统的影响。

**关 键 词:**电动汽车; 不确定性; 规范充电; 经济调度; 布谷鸟搜索算法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.012 中图分类号:TM73 文章编号:1673-9140(2020)01-0096-06

## Power system economic dispatch considering the behavior characteristics of electric vehicle users

PAN Hua<sup>1</sup>, LIANG Zuofang<sup>1</sup>, LI Yongkui<sup>2</sup>, XUE Qiangzhong<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. School of Economic and Management, Tongji University, 200092, China)

**Abstract:** With the popularization of electric vehicles, the impact of electric vehicle charging is becoming prominent for power grids, and disorderly charging of large-scale electric vehicles also have severe negative influences on the safety and reliability of the power grid and economic dispatch. On this background, considering the behavior characteristics of electric vehicle users, the economic dispatch of power systems is studied. Firstly, on the basis of the measured data, the uncertainty of electric vehicle charging is considered and the charging start time and duration are analyzed to obtain the time distribution of electric vehicle charging load. Secondly, the minimum sum of the coal consumption cost and the valve point effect cost of the system is taken as the objective function, and the penalty function method is applied to add function constraints. An economic dispatch model of power system is then established with the impacts of electric vehicle charging in consideration. Finally, the different charging behaviors of electric vehicles are simulated with cuckoo search algorithms respectively to verify the correctness of the proposed model, and the effects of different electric vehicles charging behaviors are analyzed for power systems.

**Key words:** electric vehicle; uncertainty; specified charging; economic dispatch; cuckoo search algorithm

近年来,雾霾等环境污染问题日益突出,而电动汽车作为新一代交通工具,相对以燃烧汽油作为动力的传统汽车而言在保护环境、节能减排、减少人类对石油等化石能源的依赖等方面占据明显的优势<sup>[1-2]</sup>,因此逐步受到各国政府的重视,在汽车市场中所占份额日益提高。根据工业和信息化部预计,到 2030 年全国电动汽车(electric vehicle, EV)充电功率最多将占全国装机容量的 25%<sup>[3]</sup>。大规模电动汽车的无秩序充电将会对电网的安全可靠与经济调度造成较为严峻的负面影响<sup>[4]</sup>,因此针对大规模电动汽车接入电网进行充电的有关研究课题愈加重要。

目前,对电动汽车的相关研究尚处于起步发展阶段<sup>[5]</sup>,成果相对较少,亟需进行更深层次的研究。文献[4]以调度机构对充电代理机构的调度为基础模式,通过分析电动汽车用户的出行和能量需求得到电动汽车调度可行域,并考虑进传统最优机组组合模型中进行求解,但仅考虑了电动汽车充电代理机构,未考虑私家车日常充电行为;文献[6]提出了用来描述电动汽车的虚拟电车模型,并将其应用于求解含电动汽车与风电的机组组合优化问题;文献[7]以降低成本和改善负荷特性为目标,引入插电式混合动力汽车的行驶特性作为约束条件,建立了多目标动态经济调度模型;文献[8]将混合动力电动汽车充电总量作为约束条件,但是限定电动汽车每天只能向电网充放电各一次,有一定的局限性;文献[9]采用随机仿真方法研究了电动汽车的充电与放电功率的概率分布,并通过理论分析得出电动汽车入网电源出力的数学期望的解析表达式,由此构建了电力系统随机经济调度模型;文献[10]以 5 个月内电动汽车车载终端记录的行驶信息作为数据源,构建了电动汽车充电负荷的时间分布模型;文献[11]在考虑分时电价的基础上建立了涉及时空分布的电动汽车能耗模型,并采用蒙特卡洛模拟法对不同场景下的电动汽车充电进行仿真。

电动汽车在未来的电力系统优化调度中将作为电源与负荷 2 种角色存在以期达到削峰填谷的目的,从而能够减少发电机组、变电站及输电线路等,增强电网运行的安全性与经济性<sup>[12-13]</sup>。但是目前电动汽车在电网中充当电源尚存在技术、政策等诸多问题,因此该文的研究限于电动汽车充电。

该文考虑了电动汽车充电的不确定性,通过充电起始时间和持续时间,得到电动汽车充电负荷的时间分布,并对用户充电行为进行了规范。以系统的煤耗成本与阀点效应成本之和最低为目标函数,通过罚函数将部分约束引入目标函数中,构建适应度函数,由此转化为简单优化问题,建立计及电动汽车充电的机组优化调度模型。对电动汽车不同充电行为,分别采用布谷鸟搜索算法进行算例仿真,并分析电动汽车不同充电行为对电网的影响。

## 1 计及电动汽车用户行为特性的经济调度模型

### 1.1 电动汽车用户的行为特性研究

用户对电动汽车进行充电的行为具有随机性,由此将会对电网安全稳定与经济运行造成一定的负面影响,因此亟需对大量电动汽车用户无秩序充电行为进行相关研究。

电动汽车用户的行驶特性对电动汽车充电负荷有重要的影响。通过对文献[10]中的电动汽车充电时间的相关数据分析,能够得到充电行为的有关特性,分别如图 1、2 所示。

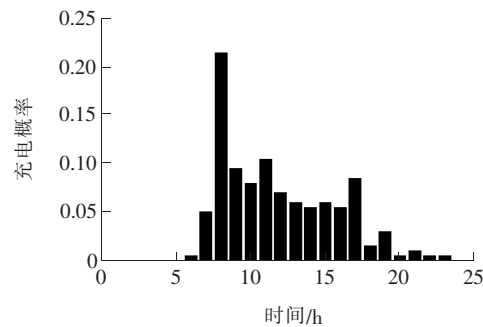


图 1 EV 充电占该时刻概率

Figure 1 Probability of EV charging per hour

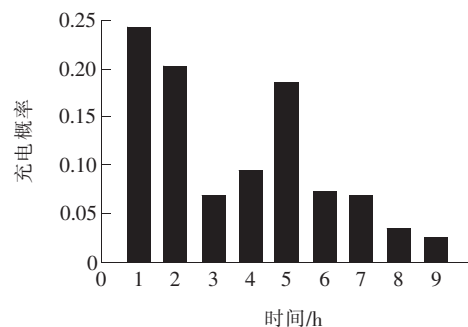


图 2 充电持续时间所占概率

Figure 2 Probability of durative charging time

由中心极限定理,把用户充电起始时间拟合成三峰高斯分布函数,即

$$f_s(x) = a_{s1} \exp(-((x - b_{s1})/c_{s1})^2) + a_{s2} \exp(-((x - b_{s2})/c_{s2})^2) + a_{s3} \exp(-((x - b_{s3})/c_{s3})^2) \quad (1)$$

式中  $a_s, b_s, c_s$  均为高斯函数的参数。拟合数值分别为  $a_{s1} = 0.2017, b_{s1} = -0.6335, c_{s1} = 0.1202$ ;  $a_{s2} = 0.09452, b_{s2} = -0.2395, c_{s2} = 0.2778$ ;  $a_{s3} = 0.06668, b_{s3} = 0.4712, c_{s3} = 0.4202$ 。拟合优度(R-square)为 0.9690,均方根误差(RMSE)为 0.0111,误差项平方和(SSE)为 0.0018。拟合结果较为接近数据分布。

拟合得到的电动汽车起始充电时间的概率密度曲线如图 3 所示。

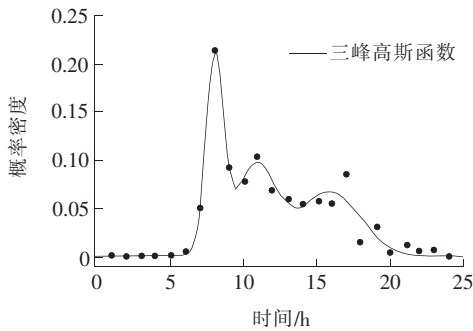


图 3 EV 开始充电时间的概率密度曲线拟合

Figure 3 Probability density curve of initial charging time

由图 1、3 可知,电动汽车开始充电的时间主要分布在 7:00 至 19:00,其中 8:00 充电的概率最大。

根据中心极限定理,把用户充电持续时间拟合成双峰高斯函数:

$$f_e(x) = a_{e1} \exp(-((x - b_{e1})/c_{e1})^2) + a_{e2} \exp(-((x - b_{e2})/c_{e2})^2) \quad (2)$$

式中 拟合参数分别为  $a_{e1} = 0.2848, b_{e1} = 1.392, c_{e1} = 0.9473$ ;  $a_{e2} = 0.1474, b_{e2} = 5.013, c_{e2} = 1.986$ 。R-square、RMSE、SSE 分别为 0.9224、0.343、0.0047。拟合结果较为接近数据分布。

拟合得到的电动汽车充电持续时间的概率密度曲线如图 4 所示。

由电动汽车起始充电时间和充电持续时间所占的概率以及式(1)、(2)得到 24 h 内各时刻电动汽车充电概率,如图 5 所示。

由图 5 可知,EV 正在充电的概率从 5:00 至 12:00 整体呈增大趋势,最大概率接近于 0.1,12 h 后则呈减少趋势。

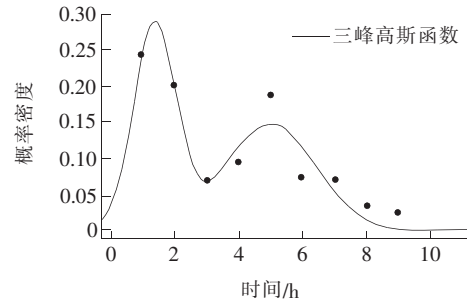


图 4 EV 充电持续时间的概率密度曲线

Figure 4 Probability density curve of electric vehicle charging duration

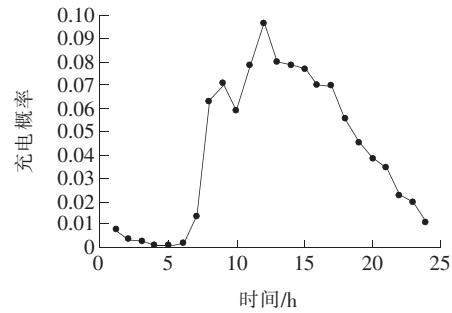


图 5 一天中 EV 每时刻充电所占概率

Figure 5 Probability of EV charging per hour in a day

由 EV 充电在  $t$  时段产生的负荷为

$$P_{EV}^t = p_c^t P_{EV} \quad (3)$$

式中  $p_c^t$  表示  $t$  时刻 EV 的充电功率; $P_{EV}$  表示 EV 充电功率之和。

## 1.2 常规机组发电成本

火电机组的煤耗成本:

$$f_m(P_i^t) = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i P_i^{t2} + b_i P_i^t + c_i) \quad (4)$$

式中  $i$  表示各火电机组序号, $t$  表示时刻; $T$  表示调度总时间, $N$  表示机组总数; $a_i, b_i, c_i$  分别表示第  $i$  台火电机组成本的相关系数; $P_i^t$  表示机组  $i$  在  $t$  时刻的有功功率。

当火电机组汽轮机的进气阀突然打开时,会增加机组的煤耗量即阀点效应,此现象增加的成本为

$$f_d(P_i^t) = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N \{d_i \sin[e_i (P_i^{\min} - P_i^t)]\} \quad (5)$$

式中  $d_i, e_i$  表示阀点效应的相关系数; $P_i^{\min}$  表示火电机组  $i$  有功功率下限。

由于火电机组的启/停存在时间长、成本高等缺点,因此该文对火电机组的启/停未予考虑。

## 1.3 目标函数及约束条件

以系统成本最小为目标构建的目标函数为

$$\min F(P_i^t) = f_m(P_i^t) + f_d(P_i^t) \quad (6)$$

式中函数的自变量为各火电机组出力。约束条件如下。

1) 忽略网损的系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^N P_i^t = P_{LD}^t + P_{EV}^t \quad (7)$$

式中  $P_{LD}^t$  表示  $t$  时段的一般负荷值;  $P_{EV}^t$  表示  $t$  时段电动汽车充电负荷。

2) 发电机组出力约束。

$$P_i^{\min} \leq P_i^t \leq P_i^{\max} \quad (8)$$

式中  $P_i^{\max}$ 、 $P_i^{\min}$  分别表示火电机组  $i$  的有功出力上、下限,  $i=1, 2, \dots, N$ 。

3) 发电机组爬坡速率约束。

$$-D_i \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq U_i \quad (9)$$

式中  $D_i$ 、 $U_i$  分别表示火电机组  $i$  有功功率的最大变化速率。

## 2 调度模型的求解

### 2.1 布谷鸟搜索算法

含电动汽车的电力系统动态调度模型属于高维、线性、多约束的优化问题,求解较为复杂,目前求解此问题多采用智能优化算法,如差分进化算法<sup>[7]</sup>、粒子群优化算法<sup>[14]</sup>、遗传算法<sup>[15]</sup>等。这些算法多是模拟自然界某种现象或某种动物行为的算法,广泛应用于电力系统的经济调度当中。

该文采用 Xin-She Yang 教授于 2009 年提出的布谷鸟搜索算法(cuckoo search algorithm, CS), CS 具有程序参数少、随机搜索路径与寻优能力较强等优点,求解问题时不用重新设置参数<sup>[16]</sup>,能够较好地求解该文建立的调度模型。CS 是模拟布谷鸟借巢下蛋行为,并将莱维飞行模式结合在一起的一种元启发式智能优化算法<sup>[17]</sup>。

### 2.2 函数处理

布谷鸟搜索算法是基于无约束的全局最优化算法<sup>[18]</sup>,因此该文采用罚函数法将约束条件引入到目标函数中,将约束优化问题转化为简单约束优化问题。适应度函数为

$$F = F(P_i^t) + \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \sigma \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} \max \left| \sum_{i=1}^N P_i^t - P_{LD}^t - P_{EV}^t \right| \\ \max_{i=1,2,\dots,N} [P_i^t - P_i^{\max}] \\ \max_{i=1,2,\dots,N} [P_i^{t-1} - D_i - P_i^t] \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad (10)$$

式中  $F$  为适应度函数值;  $\sigma$  为罚常数。

## 3 算例分析

该文以 24 h 为调度周期引入实例进行仿真分析,所采用的 6 个火电机组的相关数据及负荷详见文献<sup>[19]</sup>。电动汽车充电功率采用文献<sup>[10]</sup>中交流充电功率 7 kW,选取电动汽车样本数量为 5 万辆。布谷鸟蛋被发现的概率取  $p_a = 0.25$ 。

为规范用户充电行为,假设图 5 中的电动汽车充电概率值向后顺延 12 h。以用户自发充电行为和规范后的充电行为特性,对日负荷特性进行分析。

计及自发充电行为和规范行为的负荷以及原负荷曲线如图 6 所示。

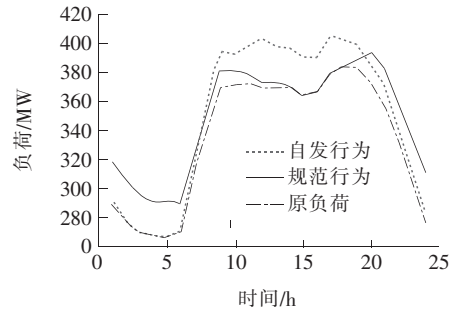


图6 电动汽车充电对电网负荷影响

Figure 6 Effect of electric vehicle charging on power grid load

从图 6 可以看出,电动汽车用户自发充电行为不但没有起到填谷的作用,反而使负荷峰值增大,此情况的峰谷差率为 0.338 7。电动汽车用户的规范充电行为虽然使峰值稍微变大,但是填谷效果更明显,此情况的峰谷差率为 0.265 3。相较于原负荷的峰谷差率 0.303 1,用户自发充电行为明显增大了负荷的峰谷差率,给电网带来了更大的风险;规范行为充电则相对减小了负荷峰谷差率,更有利于电网的安全运行。

电动汽车充电概率采用第 1.1 节中通过用户行为特性得到的概率值。运行程序可得,在调度周期 24 h 内,系统成本最小为 519 825 \$。当取得最优解时,调度方案如图 7 所示。

对用户充电行为进行一定规范后,运行程序求系统最优,此时机组最优出力调度方案如图 8 所示。表 1 为二者最优成本对比。电动汽车规范充电行为比自发无序充电行为能够节约成本约 37 126 \$。

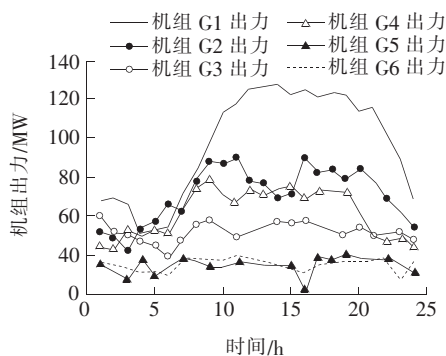


图7 电动汽车自发充电行为时机最优调度方案

Figure 7 Optimal dispatching scheme for electric vehicle spontaneous behavior

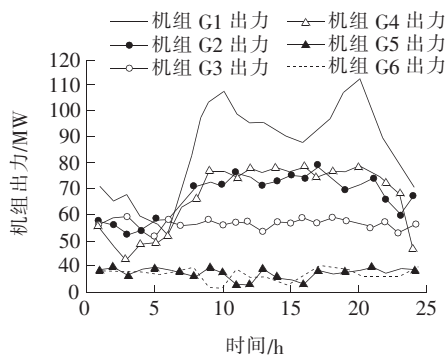


图8 电动汽车规范充电行为时最优调度方案

Figure 8 Optimal dispatching scheme for electric vehicle standard behavior

表1 电动汽车充电行为成本结果对比

Table 1 Comparison of the cost of electric vehicle charging

充电行为	总成本	充电行为	总成本
自发行为	519 825	规范行为	482 699

由图6和表2可以看出,电动汽车自发无序充电不仅使负荷峰谷差增大,降低了电网安全性,而且还会使系统发电成本增高;电动汽车规范充电不但能够减小峰谷差,增大电网安全运行,更能减少系统的发电成本。

## 4 结语

该文以实测数据为基础,考虑了电动汽车充电的不确定性,通过充电起始时间和持续时间,得到了电动汽车充电负荷的时间分布,并对用户充电行为进行了规范。以煤耗成本与阀点效应成本之和最低为目标函数,并通过罚函数法构建适应度函数,建立了计及电动汽车充电的火电机组经济调度模型。对

电动汽车不同充电行为,分别采用布谷鸟搜索算法进行求解,验证了模型和算法的正确性。结果表明,电动汽车无序自发充电使负荷峰谷差增大,而规范充电行为则使峰谷差降低。与此同时,电动汽车规范充电行为比无序自发充电行为具有更高的经济性。

## 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+25.  
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10+25.
- [2] 王闪闪,赵晋斌,毛玲,等. 基于电动汽车移动储能特性的直流微网控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):31-38.  
WANG Shanshan, ZHAO Jinbin, MAO Ling, et al. A control strategy based on mobile energy storage characteristic of electric vehicles in DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 31-38.
- [3] 王斐,李正烁,叶萌,等. 电动汽车充电对电网的影响及其优化调度研究述评[J]. 南方电网技术,2016,10(6): 70-80.  
WANG Fei, LI Zhengshuo, YE Meng, et al. Review on research of impact of electric vehicles charging on power grids and its optimal dispatch[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(6): 70-80.
- [4] 陈彬,王业磊,许昭,等. 计及电动汽车充电调度可行域的电力系统机组最优组合[J]. 华北电力大学学报,2014,41(1): 38-44.  
CHEN Bin, WANG Yelei, XU Zhao, et al. Unit commitment in power systems considering the charging dispatch feasible region of plug-in electric vehicles[J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(1): 38-44.
- [5] 曲荣海,秦川. 电动汽车及其驱动电机发展现状与展望[J]. 南方电网技术,2016,10(3): 82-86+8.  
QU Ronghai, QIN Chuan. Development status and prospects of electric vehicles and their drive motors[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 82-86+8.
- [6] 荣经国,艾欣,吴界辰,等. 考虑高比例电动汽车及风电协同参与的机组组合策略[J]. 智慧电力,2019,47(5): 25-31.  
RONG Jingguo, AI Xin, WU Jiechen, et al. Unit com-

- mitment strategy considering cooperated dispatch of high proportion of electric vehicles and wind power generation[J]. *Smart Power*,2019,47(5):25-31.
- [7] 邱威,张建华,刘念,等. 计及插电式混合动力汽车规模化接入的多目标发电优化调度[J]. *电工技术学报*,2013,28(12):160-167.
- Qiu Wei,Zhang Jianhua,Liu Nian,et al. Multi-objective optimal generation dispatching with large-scale plug-in hybrid electric vehicles penetration[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2013,28(12):160-167.
- [8] 陆凌蓉,文福拴,薛禹胜,等. 计及可入网电动汽车的电力系统机组最优组合[J]. *电力系统自动化*,2011,35(21):16-20.
- LU Lingrong,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Unit commitment in power systems with plug-in electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2011,35(21):16-20.
- [9] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. *电力系统自动化*,2010,34(20):22-29.
- ZHAO Junhua,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2010,34(20):22-29.
- [10] 李晓辉,李磊,刘伟东,等. 基于动态交通信息的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. *电力系统保护与控制*,2020,48(1):117-125.
- LI Xiaohui,LI Lei,LIU Weidong,et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicles based on dynamic traffic information[J]. *Power System Protection and Control*,2020,48(1):117-125.
- [11] 高鹏彦,赵兴勇,姚方,等. 考虑电动汽车时空分布的充电负荷建模[J]. *电力科学与技术学报*,2019,34(3):47-55.
- GAO Pengyan,ZHAO Xingyong,YAO Fang,et al. Modeling of charging loads considering the temporal and spatial distributions of electric vehicles[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2019,34(3):47-55.
- [12] 吴国沛,莫一夫,张勇军,等. 计及调度-用户两侧差异化需求的电动汽车可调度潜力评估[J]. *电力科学与技术学报*,2019,34(2):68-75.
- WU Guopei,MO Yifu,ZHANG Yongjun,et al. Schedulable potential evaluation of electric vehicles considering different requirements of dispatchers and users[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2019,34(2):68-75.
- [13] 荆朝霞,钟童科,林志龙,等. 电动汽车充电行为对电网负荷曲线的影响[J]. *南方电网技术*,2013,7(1):80-84.
- JING Zhaoxia,ZHONG Tongke,LIN Zhilong,et al. The impact of electric vehicles charging behavior on the load curve of power grid[J]. *Southern Power System Technology*,2013,7(1):80-84.
- [14] 高亚静,赵开轩,张占龙,等. 含风电场与电动汽车充换电站的电力系统经济调度[J]. *中国电力*,2013,46(11):84-88+93.
- GAO Yajing,ZHAO Kaixuan,ZHANG Zhanlong,et al. Power system economic dispatch containing wind power and electric vehicle battery swap station[J]. *Electric Power*,2013,46(11):84-88+93.
- [15] 刘延博,邱晓燕,邱高. 考虑电动汽车用户响应的微电网运行优化[J]. *高压电器*,2016,52(4):163-169.
- LIU Yanbo,QIU Xiaoyan,QIU Gao. Optimal operation of micro grid account of the response of electric vehicle user[J]. *High Voltage Apparatus*,2016,52(4):163-169.
- [16] 赵玉新,杨新社,刘利强. 新兴元启发式优化方法[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [17] 兰少峰,刘升. 布谷鸟搜索算法研究综述[J]. *计算机工程与设计*,2015,36(4):1063-1067.
- LAN Shaofeng,LIU Sheng. Overview of research on cuckoo search algorithm[J]. *Computer Engineering and Design*,2015,36(4):1063-1067.
- [18] 陈乐,龙文. 求解工程结构优化问题的改进布谷鸟搜索算法[J]. *计算机应用研究*,2014,31(3):679-683.
- CHEN Le,LONG Wen. Modified cuckoo search algorithm for solving engineering structural optimization problem[J]. *Application Research of Computers*,2014,31(3):679-683.
- [19] 万隆,高明亮,梁作放,等. 基于布谷鸟搜索算法的含风电场电力系统动态调度[J]. *山东理工大学学报:自然科学版*,2015,29(6):1-5.
- WAN Long,GAO Mingliang,LIANG Zuofang,et al. Dynamic economic dispatch of wind farm based on cuckoo search algorithm[J]. *Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition)*,2015,29(6):1-5.