

# 基于峰谷分时电价引导下的电动汽车充电负荷优化

欧名勇<sup>1,2</sup>, 陈仲伟<sup>1,2</sup>, 谭玉东<sup>1,2</sup>, 文明<sup>1,2</sup>, 周志成<sup>3</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南长沙 410004; 2. 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114;  
3. 长沙理工大学清洁能源与智能电网湖南省 2011 协调创新中心, 湖南长沙 410114)

**摘要:**在研究电动汽车用户充电需求的前提下, 利用蒙特卡洛方法对 2 种不同充电方式进行模拟并对其进行分析; 分析用户响应度对电动汽车有序充电的影响, 建立峰谷分时电价对电动汽车负荷影响的模型, 在模拟出电动汽车无序充电负荷的基础上, 用实际案例对模型进行验证, 利用多目标优化遗传算法进行求解, 验证峰谷分时电价对电网负荷优化的有效性。

**关键词:**电动汽车; 分时电价; 有序充电; 电价响应

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.007 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2020)05-0054-06

## Optimization of electric vehicle charging load based on peak-to-valley time-of-use electricity price

OU Mingyong<sup>1,2</sup>, CHEN Zhongwei<sup>1,2</sup>, TAN Yudong<sup>1,2</sup>, WEN Ming<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhicheng<sup>3</sup>

(1. Economic and Technical Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410114, China; 3. Hunan Province 2011 Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Under the premise of studying the charging demand of electric vehicle users, two different charging methods are simulated and analyzed by the Monte Carlo method. Firstly, the influence of user responsiveness on the orderly charging of electric vehicles is analyzed, and also the model of analyzing the influences of peak-to-valley time-of-use electricity price on electric vehicle load is established. Then, on the basis of simulating the disordered charging load of the electric vehicle, the model is verified by an actual case. The multi-objective optimization genetic algorithm is used to solve the problem, and the effectiveness of using peak-to-valley time-of-use electricity price to optimal the grid load is verified.

**Key words:** electric vehicle; time-of-use price; orderly charging; electricity price response

收稿日期:2018-11-09; 修回日期:2018-12-11

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A217000D); 湖南省自然科学基金青年基金(1547); 湖南省科技创新平台与人才计划(2019TP1053)

通信作者:谭玉东(1983-),男,博士,高级工程师,主要从事电网规划研究;E-mail:407928272@qq.com

近年来,在国内外石油资源紧缺,环境问题日益严重的情况下,电动汽车因具有显著的经济性与环境性,其发展迅速,在中国,至 2030 年,电动汽车数量将达到 6 000 万辆<sup>[1]</sup>。随着电动汽车数量的不断增加,由于其负荷在时间与空间上所具有的不确定性,使得当大规模电动汽车并网进行充电时会对电网造成负荷冲击。虽然会加剧负荷的波动性与随机性,但是若能够将电动汽车负荷好好利用作为可调度负荷资源,则能够抑制电网系统的峰谷差,为电网安全稳定运行提供更强有力的保障<sup>[2-5]</sup>。因此,实现电动汽车充电负荷的合理控制,避免电动汽车在系统负荷高峰时大量充电造成尖峰,高效的抑制峰谷负荷差,是电网面临的重要挑战。

目前,国内有很多学者参与了峰谷分时电价引导电动汽车用户参与有序充电的研究,文献[6]提出根据电动汽车类型的不同采用相适应的充电负荷计算方法,对电动汽车充电负荷进行较为精准的预测;文献[7]建立电动汽车负荷最优潮流模型,通过调配各机组出力以优化系统发电成本,在用户侧,将电池损耗和充电等待时间成本计入用户充电费用中,运用双层模型进行优化;文献[8]从电动汽车充电运营商方面考虑,利用动态响应峰谷电价形成有序充电,但文章未能考虑负荷波动造成电网的不稳定,大量电动汽车在后半夜充电又造成另一个用电高峰;文献[9]以电网峰谷差为目标函数,利用电网电价时段的划分来平抑区域配电网负荷的波动,使得电网安全稳定的运行。

该文在以上研究的基础上,根据电动汽车负荷影响因素进行分析,利用蒙特卡洛方法模拟电动汽车无序充电和有序充电负荷曲线,设立不同的响应系数以研究用户参与有序充电时负荷曲线的特点。研究峰谷分时电价价格弹性与电动汽车负荷之间的关系,建立峰谷分时电价优化模型,利用多目标优化遗传算法对模型进行求解,分析峰谷电价对电网负荷以及用户的影响。

## 1 电动汽车充电负荷建模

### 1.1 电动汽车充电需求分析

该文研究对象为纯电动私家车,电动汽车充电负荷的大小与行驶里程、返程时刻和电池特性等因素相关。由于电动汽车在停泊时才能进行充电,所

以停泊时间的长短决定了充电时长,电动汽车充电方式均为慢充。目前电动汽车电池主要以锂电池为主,锂电池的充电过程可近似认为是恒功率充电<sup>[10]</sup>。假设电动汽车每天充电一次并且充电过程不被中断,也不考虑突发事件对充电过程影响。

根据美国交通部门对传统燃油私家车进行调查所得到的统计数据,每日用户最后一次返程时刻  $t_0$  可以用正态分布表示,概率密度函数为

$$f_t(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right), & \mu_t - 12 < x \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_t + 24)^2}{2\sigma_t^2}\right), & 0 < x \leq \mu_t - 12 \end{cases} \quad (1)$$

其中均值  $\mu_t$  和方差  $\sigma_t$  分别为 17.6 和 3.4。

根据美国交通部 2009 年汽车出行报告,电动汽车日行驶里程  $S$  满足对数正态分布  $S \sim \log(\mu_s, \sigma_s^2)$ , 其概率密度函数为

$$f_s(x) = \frac{1}{x} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (2)$$

其中均值  $\mu_s$  和方差  $\sigma_s$  分别为 3.2 和 0.88。

日行驶里程  $S$  的电动汽车需要的充电时长为

$$T_c = \frac{SE}{P_c \eta_c} \quad (3)$$

式中  $E$  为电动汽车每公里耗电量;  $P_c$  为充电功率;  $\eta_c$  为充电效率。

### 1.2 电动汽车充电需求分析

该文假设电动汽车数量为 1 000 辆并进行充电行为仿真。无序充电时,电动汽车在最后一次返程后就开始以恒定功率充电,直到荷电状态(state of charge, SOC)达到 100%,期间不受电价激励影响。

电动汽车采用慢充充电方式  $P_c = 3 \text{ kW}$ ,  $\eta_c = 0.9$ ,每公里耗电量  $E$  为  $0.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}$ ,由于个体相互独立,故采用蒙特卡洛方法模拟,如图 1 所示。

由返程时刻以及充电时长而得到单辆电动汽车一天的入网负荷,再根据式(4)进行累加得到每个时间段的充电负荷,从而日负荷曲线:

$$P_{\text{sum}}(t) = \sum_{i=1}^N P_{ci} t_i \quad (4)$$

式中  $P_{ci}$  为第  $i$  辆电动汽车充电功率,  $t_i$  用来判断第  $i$  辆电动汽车在  $t$  时刻是否充电,0 为未充电,1 为充电。

根据图1的算法流程,模拟得到1 000辆电动汽车在无序充电的情况的负荷曲线,如图2所示。

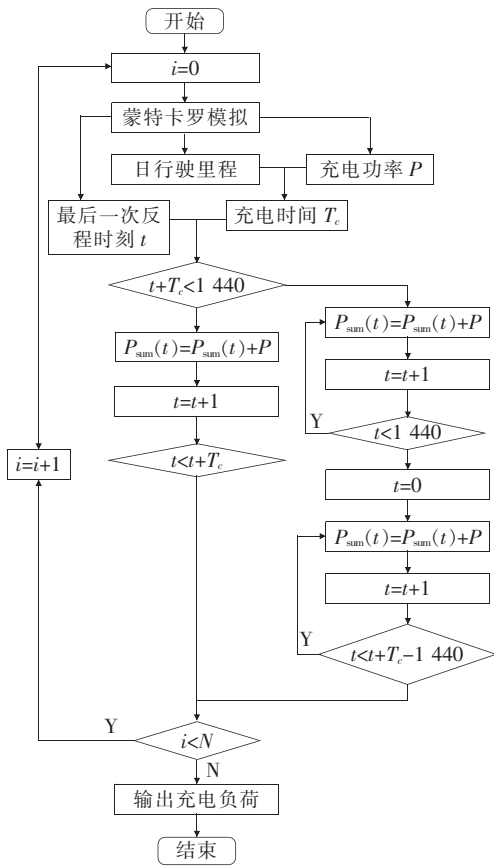


图1 电动汽车无序充电算法流程

Figure 1 Electric vehicle disorder charging algorithm flow

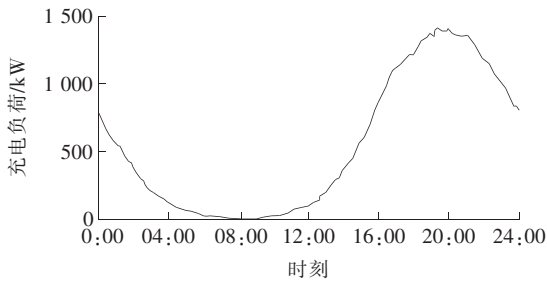


图2 电动汽车无序充电负荷曲线

Figure 2 Electric vehicle charging load disordered

## 2 电动汽车有序充电价格响应建模

### 2.1 电动汽车充电负荷的价格响应分析

专家学者对电价所具有的时空两重差异性进行了大量研究。由于电动汽车充电负荷具有时间与空间随机性,大规模高渗透率的电动汽车充电将对电网带来影响。合理的峰谷电价能够使电网调控电动

汽车进行有序充电,即电网公司以及提供电能服务的供应商通过电价引导用户在负荷低谷时充电,调控电动汽车的充电起始时间,对电网负荷尖峰进行优化。

假设高峰时段为17:00—24:00,电网通过建立分时电价机制引导电动汽车用户避开高峰时段而转移到非高峰时段充电。在高峰时段17:00—20:00,大多数车主为下班出行前充电,电价机制引导其提前充电,而高峰时段20:00—24:00,电动汽车车主已返回家中为第二天的出行充电。此时价格机制引导其滞后充电<sup>[11]</sup>。通过设置响应系数 $n$ 反映用户对价格响应的灵敏度。采用蒙特卡罗方法模拟响应系数 $n$ 分别为0.5、0.8时的电动汽车有序充电负荷曲线如图3所示。

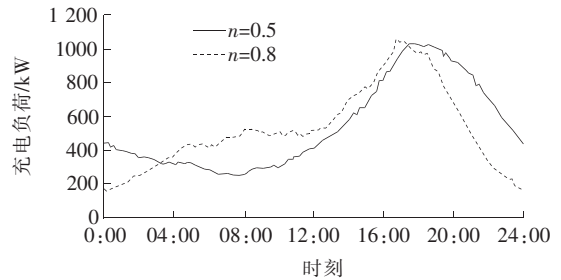


图3 电动汽车有序充电负荷

Figure 3 Electric vehicle orderly charging load

由图3可知,电动汽车在有序充电的情况下,峰谷差值得到减小,在设定的高峰时段负荷得到有效的削减。在 $n=0.8$ 时,高峰时段17:00开始的一段时间,提前充电的用户由于充电时长的影响,在17:00还未充电完毕,故会产生尖峰。但总体来说,随着响应度的提高,削峰的效果也越明显。因此,可以考虑通过设置不同的峰谷电价引导电动汽车充电负荷响应。

### 2.2 电动汽车电价引导充电方式建模

峰谷分时电价是实施管理用户侧需求的有效措施之一,电网运行商根据负荷曲线的高峰低谷来划分峰谷电价,峰谷时段电价的改变将直接影响充电负荷的变化。在经济学中,价格是影响消费者进行消费的重要因素,该文只考虑电价对电动汽车用户充电行为的影响,忽略其他因素,引入价格弹性来表示电价变化对负荷造成的变化<sup>[12]</sup>。价格弹性为某一时刻电价的变化将影响所有时刻电量需求的变

化,影响本身时刻的电量需求变化称为自价格弹性,系数通常为负,而影响其余时刻的电量需求变化则称为交叉价格弹性,系数通常为正。

在价格弹性的引导下,使得用户在不同时段改变用电需求,以平抑负荷波动,达到削峰填谷的作用。某地区的电网负荷曲线如图 4 所示,考虑用户需求与电网曲线的实际情况,将一天划分为峰、谷、平 3 个时段,如表 1 所示。

表 1 峰谷时段的划分

Table 1 Partition of peak and valley period

峰时段	谷时段	平时段
16:00—24:00	0:00—8:00	8:00—16:00

以平抑电网负荷为目标,将一天分为 24 个时段,以电网原负荷与电动汽车负荷相叠加的峰谷均方差最小为目标函数。

$$F_1 = \min \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (P_0 + P_{EV} - \bar{P}_s)^2 \quad (5)$$

式中  $P_0$  为  $t$  时段不含电动汽车负荷的电网原始负荷;  $P_{EV}$  为  $t$  时段电动汽车充电负荷;  $\bar{P}_s$  为  $T$  个时段电网总负荷的平均值。

为了兼顾用户与电网利益,以达到双赢的目标,又设立电动汽车用户充电总费用最小:

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^T P_{EV} \cdot \pi_t \quad (6)$$

式中  $\pi_t$  为  $t$  时段电动汽车充电电价。

根据实际情况,提出以下约束条件:

①SOC 水平约束,即电动汽车任意时刻 SOC 水平不应超过上下限以保证汽车能正常行驶:

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (7)$$

②电价约束,即电价由发电成本电价以及浮动电价,从电网公司盈利与用户利益两方面考虑,分时电价不应低于成本电价的同时还应设立电价上限:

$$\pi_{\min} \leq \pi_t \leq \pi_{\max} \quad (8)$$

### 2.3 求解算法

遗传算法是受达尔文的进化论以及孟德尔的遗传学说影响,模仿自然界生物种群进化机制而发展起来的随机全局搜索方法和优化方法,特点是高效、并行、全局搜索。采用适者生存的原则,利用某种编码技术,通过适应度函数寻找新的近似解,在这个过

程中导致了种群中个体的进化,使得种群比之前更能适应环境,就像自然界的改造<sup>[11]</sup>。

该文涉及多目标和多约束的优化问题,当需要多个目标在区域内达到最优时,有时目标会相互冲突,对于求解此类问题的 Pareto 最优解有以下常用的几种方法:权重系数变换法,给每个子目标函数赋予权重系数后转变为单目标优化问题;并列选择法,将群体所有个体按照子目标函数划分子群体,各自选出适应度高的个体以得到新的子群体,再将其合并,不断进行至最大次数,最终得到多目标优化的 Pareto 最优解。由于权重系数分配问题会得到不同的结果可能导致得到与实际情况相偏差的解,故该文采用并列选择法。

### 3 仿真案例

该文以长沙市某 10 kV 馈线地区的典型日负荷数据作为基础数据,基于遗传算法求解多目标电网充电负荷优化问题。假设 2 000 辆电动汽车参与充电,图 4 分别为电动汽车无序充电负荷曲线、电网日负荷曲线及含无序充电电动汽车负荷曲线。

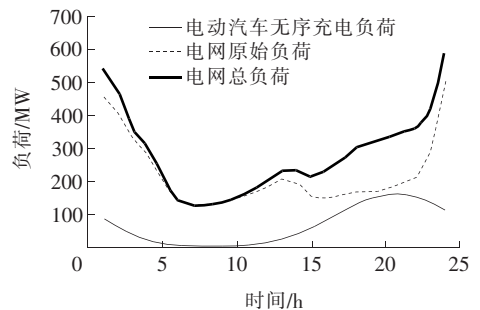


图 4 电网系统原始总负荷

Figure 4 Grid system original total load

设立初始电价为 1 元/(kW·h),最低充电电价不得低于发电边际成本电价 0.25 元/(kW·h),最高电价不得高于 2 元/(kW·h)。根据参考文献<sup>[13]</sup>可以得到电动汽车峰谷平时段的价格弹矩阵:

$$Q = \begin{pmatrix} -0.623 & 0.324 & 1 & 0.230 & 5 \\ 0.355 & 3 & -0.616 & 6 & 0.221 & 6 \\ 0.321 & 5 & 0.303 & 8 & -0.606 & 5 \end{pmatrix} \quad (9)$$

根据遗传算法求解出此多目标函数和多约束条件电动汽车充电负荷模型,得到优化后的峰谷平时段电价,如表 2 所示,优化后负荷曲线如图 5 所示。

表 2 优化后峰谷平电价

Table 2 Optimized peak and valley price

元/(kW·h)		
峰时电价	谷时电价	平时电价
1.15	0.3	0.9

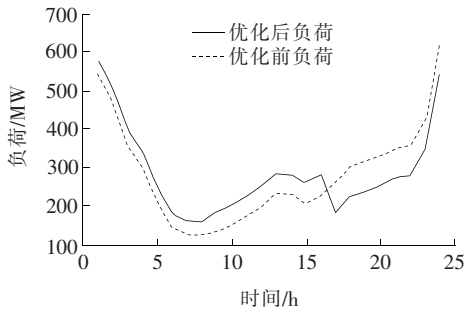


图 5 优化后系统总负荷

Figure 5 Total system load after optimization

由图 5 优化后系统总负荷可以看出,设立的谷、平时段负荷上升,峰时段负荷下降,起到了削峰填谷的作用。

该文将目标函数的原始值与优化后的值进行对比,其结果如表 3 所示。

表 3 优化结果及对比

Table 3 Optimization results and comparison

模式	电动汽车充电 总费用/万元	负荷均 方差	峰荷/ MW	谷荷/ MW
优化前	1.552	131.17	620	128
优化后	0.807	108.00	580	182

由上述图表可知,当电动汽车进行无序充电时,将会对电网造成不小的影响如峰谷差增加,存在电网波动,线路过载的可能,从而对电网运行的经济性和稳定性造成影响。通过该文建立的峰谷分时电价优化模型,用遗传算法进行求解,相比优化前系统总负荷均方差与峰谷差明显减小,系统负荷曲线更为平滑,减少了由于电网负荷波动大而造成的边际成本,比如延缓变压器投资等,增加了电网稳定性与经济性。从用户角度出发,充电费用的减少反过来促进更多用户进行有序充电,实现了用户与电网的双赢。

## 4 结语

该文对电动汽车用户充电行为进行研究,分析了基于用户对电价响应度的不同电动汽车充电负荷

曲线的特点。以电网峰谷均方差最小为目标,根据峰谷分时电价引导充电方式建立电动汽车有序充电模型,采用多目标多约束的遗传算法来进行迭代求解,得到了优化后的电动汽车峰谷分时电价方案,通过算例可得到以下结论:

1)大规模高渗透率的电动私家车进行无序充电时,导致电网峰谷差增加,对电网稳定运行造成影响;

2)峰谷分时电价对电动汽车入网行为的影响可起到削峰填谷的作用,随着用户对电价响应度的提高,其作用越明显;

3)建立峰谷分时电价引导充电方式模型能比较准确地反映电价变化引起电动汽车负荷曲线变化的规律。峰谷电价方案能够对用户充电行为进行有效的引导,对电网稳定性和经济性起到一定的作用。

## 参考文献:

- [1] 侯慧,樊浩,谢俊,等. 分时电价下价格理性用户最优充电策略[J]. 中国电力,2018,51(1):171-178.  
HOU Hui, FAN Hao, XIE Jun, et al. The optimal charging strategy of EV rational user based on TOU power price[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 171-178.
- [2] 阎怀东,马汝祥,柳志航,等. 计及需求响应的电动汽车充电站多时间尺度随机优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(10): 71-80.  
YAN Huaidong, MA Ruxiang, LIU Zhihang, et al. Multi-time scale stochastic optimal dispatch of electric vehicle charging station considering demand response [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (10): 71-80.
- [3] 吴芮,周良松,姚占东. 基于实时电价的电动汽车智能充电导航[J]. 中国电力,2020,53(4): 131-138+146.  
WU Rui, ZHOU Liangsong, YAO Zhandong. Intelligent charging navigation for electric vehicles based on real-time electricity price[J]. Electric power, 2020, 53(4): 131-138+146.
- [4] 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.
- [5] 陈芳,王艳,尹自力,等.电动汽车多因素负荷对湖南某地区电网的影响研究[J].智慧电力,2018,46(2):40-44.  
CHEN Fang, WANG Yan, YIN Zili, et al. Study on influence of electric vehicle multi-factor load on regional power grid in hunan province [J]. Smart Power, 2018, 46(2): 40-44.
- [6] 佟欣,郭春林,张明智.基于价值函数的电动汽车充电价格引导研究[J].电力建设,2016,37(9): 30-35.  
TONG Xin, GUO Chunlin, ZHANG Mingzhi. Price guide of electric vehicles charging based on cost function [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9): 30-35.
- [7] 高亚静,吕孟扩,梁海峰,等.基于离散吸引力模型的用电需求价格弹性矩阵[J].电力系统自动化,2014, 38(13): 103-107+144.  
GAO Yajing, LV Mengkuo, LIANG Haifeng, et al. Power demand price elasticity matrix based on discrete attraction model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 103-107+144.
- [8] 张聪,许晓慧,孙海顺,等.基于自适应遗传算法的规模化电动汽车智能充电策略研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(14): 19-24.  
ZHANG Cong, XU Xiaohui, SUN Haishun, et al. Smart charging strategy of large-scale electric vehicles based on adaptive genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 19-24.
- [9] 吴红斌,侯小凡,赵波,等.计及可入网电动汽车的微网系统经济调度[J].电力系统自动化,2014,38(9): 77-84+99.  
WU Hongbing, HOU Xiaofan, ZHAO Bo, et al. Economical dispatch of microgrid considering plug-in electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 77-84+99.
- [10] 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策略设计[J].电力系统自动化,2013,37(1): 191-195.  
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [11] 罗卓伟,胡泽春,宋永华,等.电动汽车充电负荷计算方法[J].电力系统自动化,2011,35(14): 36-42.  
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [12] 徐智威,胡泽春,宋永华,等.充电站内电动汽车有序充电策略[J].电力系统自动化,2012,36(11): 38-43.  
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43.
- [13] 张文亮,武斌,李武峰,等.我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J].电网技术,2009,33(4):1-5.  
ZHANG Wenliang, WU Bin, LI Wufeng, et al. Discussion on development trend of battery electric vehicles in china and its energy supply mode[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 1-5.