

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.12.008

# 基于 SOC 的电动汽车参与电网调频控制策略研究

李宏玉<sup>1</sup>, 余超<sup>1</sup>, 张廷军<sup>2</sup>, 落文斌<sup>1</sup>

(1. 东北石油大学 电气信息工程学院 电工理论与新技术实验室, 黑龙江 大庆 163318;

2. 广西科技大学 电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006)

**摘要:**大量电动汽车无序接入电网会给电力系统安全稳定运行带来危害。利用汽车入网技术,电动汽车接入电网参与系统调频,但用户出行需求、电池损耗会受到影响。基于此,首先分析了电动汽车动力电池特性,建立了电动汽车参与系统调频模型,通过分析电动汽车动力电池荷电状态概率密度分布,提出考虑电池荷电状态的电动汽车参与系统调频控制策略。最后,模拟了以平抑电网频率波动为目标的电动汽车充放电场景,根据电池荷电状态,基于所提控制策略通 Matlab/Simulink 仿真,验证了电动汽车参与系统调频实际效果。

**关键词:**电动汽车; 电池; 荷电状态; 频率波动; 电力系统调频

**中图分类号:** TM761

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2018)12-066-07

## Research on the strategy of electric vehicles participating in power system frequency control based on SOC

LI Hongyu<sup>1</sup>, SHE Chao<sup>1</sup>, ZHANG Tingjun<sup>2</sup>, LUO Wenbin<sup>1</sup>

(1. Electrical Theory and New Technology Laboratory, School of Electrical Engineering & Information, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, P.R.China; 2. School of Electrical & Information

Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, P.R.China)

**Abstract:** A large number of unmanaged electric vehicles (EVs) connected to the power grid brings harm to the safety of the power system. By using the technology of V2G, EVs are connected to grid to participate in the system frequency modulation. However, the demand of batteries will be affected. In this research, by analyzing the distribution of probability density of EV battery state, the strategy of participating in system FM control considering battery state of charge was proposed. Based on the characteristics of battery of EVs, a model was built. The EV charging and discharging scenario, which aims at stability of the frequency fluctuation of the power grid, was simulated. According to the state of SOC of the battery, the simulation results based on the control strategy of Matlab/Simulink verify the actual effect of EV participating in the system frequency modulation.

**Keywords:** EV; battery; SOC; frequency fluctuation; power system FM

**收稿日期:** 2018-06-10

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51774088); 中国石油科技创新基金资助项目(2016D-5007-0201)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51774088), and the China Petroleum Science and Technology Innovation Fund Project(2016D-5007-0201).

**作者简介:** 李宏玉(1979—),男,副教授,主要从事电力系统综合自动化研究,(E-mail)1261476958@qq.com。

环境恶化和能源危机日益加剧,发展低碳经济成为国际社会关注焦点。电动汽车(EV)作为实现发展可持续经济有效途径之一,有别于传统燃油汽车,是缓解能源消耗巨大和环境恶化问题的主要措施,因而受到世界各国的重视,到 2030 年,中国电动汽车占比将高达 50% 以上<sup>[1-2]</sup>。同时,大量的 EV 接入电网也给电网的安全稳定运行带来了挑战。

对此,国内外学者对 EV 接入电网行为做了大量的研究。文献[3]介绍了储能技术在电力系统中具有削峰填谷,就地负荷功率补偿的能力;文献[4]介绍了 V2G 的概念及其可行性评估,根据不同应用对象将 V2G 分类,在发展前景上,电动汽车参与电网调频成为最有前景的辅助服务;文献[5]研究了电动汽车电池特性,验证了 EV 动力电池能够在短时间内快速响应电网频率需求,改善电网的运行特性;文献[6]首先分析了 EV 常用电池模型,在传统电力系统频率控制模型基础上,加入规模化 EV 功率模型得到了电动汽车参与单区域调频系统模型。在 EV 参与电网调频控制策略上国内外学者也做了大量研究。文献[7]介绍了车辆与电网互动模式下的有序充电模型,抑制电动汽车并网后的峰值负荷,平滑负荷曲线,并以调频经济收益最大化为约束,该调度策略的目标函数为线性函数,不足之处在于未考虑复杂的非线性约束条件;文献[8]分析了电动汽车充电优化方法,利用整数规划求解优化系统峰荷、抑制负荷波动模型,提出的但未考虑电动汽车荷电状态(SOC)的初始值的影响,与事实不符。

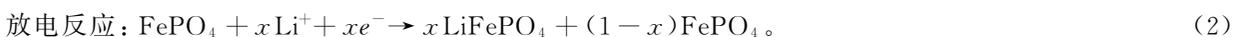
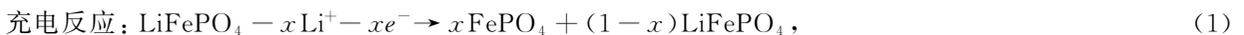
综上,通过合理的控制策略,EV 利用 V2G 技术可以进行电网调频辅助服务,其中考虑 EV 的 SOC 是制定调频策略的重要依据<sup>[9]</sup>。现有的 EV 调频优化策略还存在各种问题。本研究通过分析 EV 动力电池特性,建立了 EV 参与电网调频模型,考虑电池的 SOC 控制 EV 充放电优先级,基于算例,验证了该方法的可行性和有效性。

## 1 EV 电池模型

### 1.1 电池模型

动力电池作为能量储存装置,是 EV 的重要组成部分,也是 EV 参与系统调频可调度容量大小的指标<sup>[10]</sup>。目前,在 EV 领域应用的动力电池主要有铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池,其中磷酸铁锂电池具有体积功率密度大、安全性高、自放电率低、成本价格低的优势,因而在我国电动汽车中广泛使用。本研究选用磷酸铁锂电池进行建模。

磷酸铁锂电池的充放电过程从本质上来讲是锂离子在正负两极来回移动并嵌入脱出的过程,其内部发生了一个可逆的氧化还原反应<sup>[11]</sup>。铁锂电池正负极反应方程式为:



目前 EV 电池模型种类很多,合理有效的电池模型是研究电池 SOC(S)的一个重要工具,其中使用最多的是 Thevenin 模型,很多模型都是在此模型基础上改进而来。图 1 是 Thevenin 模型示意图。

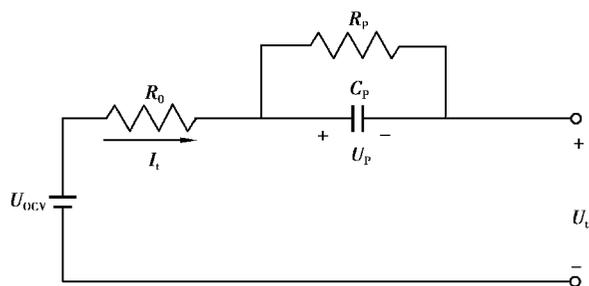


图 1 Thevenin 模型

Fig.1 Thevenin model

图 1 中: $U_{OCV}$  表示电池的开路电压; $R_0$  为电池的欧姆内阻; $R_p$  为电池的极化内阻; $C_p$  为电池的极化电容,与电池的极化内阻  $R_p$  并联构成电池的暂态反应回路; $U_p$  为电容两端电压; $U_t$  为电池的端电压; $I_t$  为负载电流。

由电池的 Thevenin 模型,可以得出:

$$U_{OCV} = U_t + R_0 I_t + U_P, \quad (3)$$

$$I_t = \frac{U_P}{R_p} + C \frac{dU_P}{dt}. \quad (4)$$

电动势  $E_{OCV}$  在数值上等于电池的开路电压  $U_{OCV}$ , 电池的  $S$  与  $E_{OCV}$  之间存在固定的非线性函数关系:  $E_{OCV} = f[S(t)]$ , 在 Thevenin 模型基础上结合安时法得到:

$$S_t = S_{t_0} - \frac{1}{Q_0} \int_{t_0}^t \eta I_t dt. \quad (5)$$

式中:  $S_{t_0}$  为初始  $S$  值;  $S_t$  为  $t$  时刻电池的  $S$  值;  $\eta$  为折算库伦效率;  $Q_0$  为电池容量。

## 1.2 电池动态功率模型

本研究中 EV 动力电池均采用磷酸铁锂电池, 考虑开路电压与电流的微增量, 在不计电池电能传输过程中损耗的情况下, 电池向电网传输的功率  $P_{V2G}$  可表示为:

$$P_{V2G} = U_t I_t, \quad (6)$$

$$I_t = I_0 + \Delta I_t, \quad (7)$$

$$U_t = U_0 + \Delta U_t. \quad (8)$$

由式(5)-(8)可得电能功率增量为:

$$\Delta P_{V2G} = U_0 \Delta I_0 + I_0 \Delta U_0 \quad (9)$$

式中:  $I_0$  为电池测电流初始值;  $U_0$  为电池测电压初始值;  $\Delta I_0$  为电流微增量;  $\Delta U_0$  为电压微增量;  $\Delta P_{V2G}$  为电池功率增量。

在系统频率控制中, 系统根据频率偏差  $\Delta f$  进行有功调节, 可得:

$$\Delta P_{V2G} = U_0 \frac{U_{OCV} - U_P - U_0 - \Delta U_0}{R_0} - I_0 \frac{\Delta f k_b}{1 + s T_b}. \quad (10)$$

式中:  $k_b$  为电池功率增益;  $T_b$  为电池功率调整时间常数。

由式(6)-(10)可建立 EV 动力电池功率模型, 如图 2 所示。

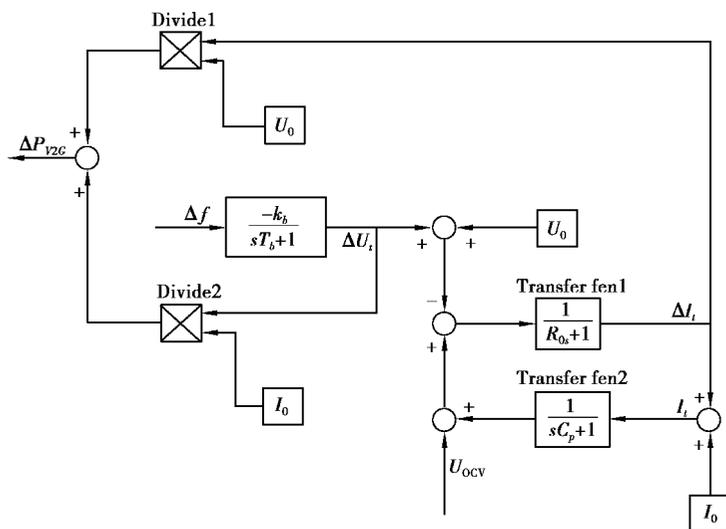


图 2 EV 动力电池功率模型

Fig.2 EV power cell power model

## 2 EV 参与系统调频控制策略

### 2.1 EV 参与系统调频模型

传统的电力系统频率控制模型主要由发电机—负荷模型、调速器模型、原动机模型等部分组成<sup>[12]</sup>, 在此

基础上加入规模化电动汽车功率模型,采用自发电控制(automatic generation control, AGC)方式,使用合理的假设对其进行线性化处理,得到单区域 EV 参与系统调频模型,如图 3 所示。

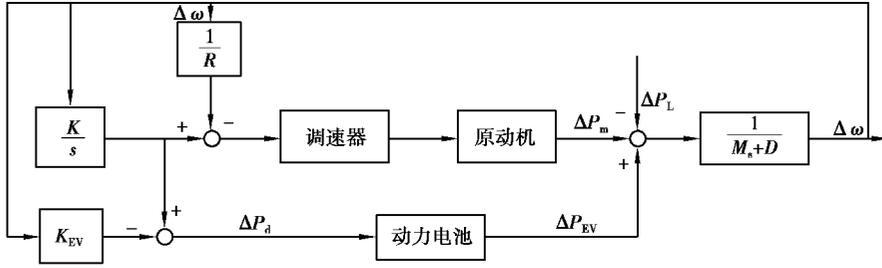


图 3 EV 调频系统模型

Fig.3 EV FM system model

图 3 中: $K$  为 AGC 增益; $K_{EV}$  为 EV 频率响应系数; $R$  为机组调差率; $M$  为发电机惯性常数; $D$  为负荷-阻尼常数。

### 2.2 调频控制策略

利用 EV 动力电池充放电进行电网调频,要充分考虑电池的  $S$  和功率需求,首先进行 EV 电池充放电模式的选择。为保证用户出行安全和电池寿命,只有电池初始  $S$  值处于相关设置的区间才可以参与系统调频<sup>[13]</sup>。

EV 参与电网调频采用集群代理商模式,代理商将调频信号分配至 EV,同时接收 EV 相关的信息。EV 参与电网调频时,能量变化较大,势必会对电池产生影响,代理商需要考虑 EV 用户行驶需求,保障用户 EV 出行的安全可靠,需要控制参与调频 EV 的  $S$  值在一个安全的范围内。尽管 EV 的  $S$  因用户行驶概率具有随机性,但总体遵循正态分布  $S \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,其概率密度  $f(s)$  为:

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(s_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (0 \leq s \leq 100\%), \quad (11)$$

$$s_0 = \left(1 - \frac{td}{d_R}\right) \times 100\% \quad (12)$$

式中: $s_0$  为  $S$  的初始值; $t$  为行驶的时间(d); $d$  为日行驶里程; $d_R$  为电动汽车最大行驶距离; $\mu$  取值 0.5;标准差  $\sigma$  取值 0.3。

根据上述正态分布,电池  $S$  值的概率密度分布如图 4 所示,其中电池的  $S$  变化范围为 0~100%。

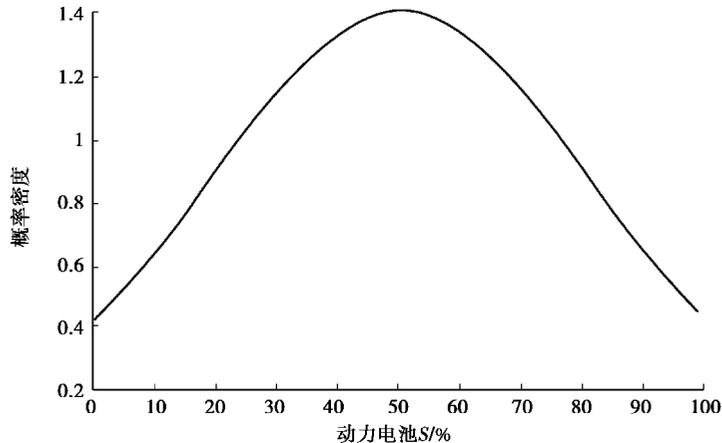


图 4 动力电池 SOC 概率密度分布图

Fig.4 The probability density distribution of power battery SOC

由图 4 可得 EV 的  $S$  日常分布区间, 设定调频控制时动力电池  $S$  在合理的范围内变化, 保证用户对于电动汽车的正常使用, 这样也能够降低参与调频对电池寿命造成不可逆的损伤的可能性。本研究选择  $S$  为  $0.2\% \sim 0.9\%$  的 EV 参与调频, 在保证系统频率稳定的前提下, 依据电池  $S$  值制定 EV 功率信号分配策略, 功率分配信号依据电池组  $S$  值大小, 参考分配策略生成功率响应信号。系统频率需要下调时, 电池充电, 根据电池端压是否大于限定值, 选择充电模式, 若电池端压大于限定值, 就选择恒压限流充电, 若电池端压未达到限定值, 则选择恒流充电, 直到电池  $S$  满足约束条件; 系统频率上调时, 电池选择放电, 一般选择恒功率放电, 当电池  $S$  小于或等于下限或系统波动时间结束时结束放电, 其程序逻辑如图 5 所示。

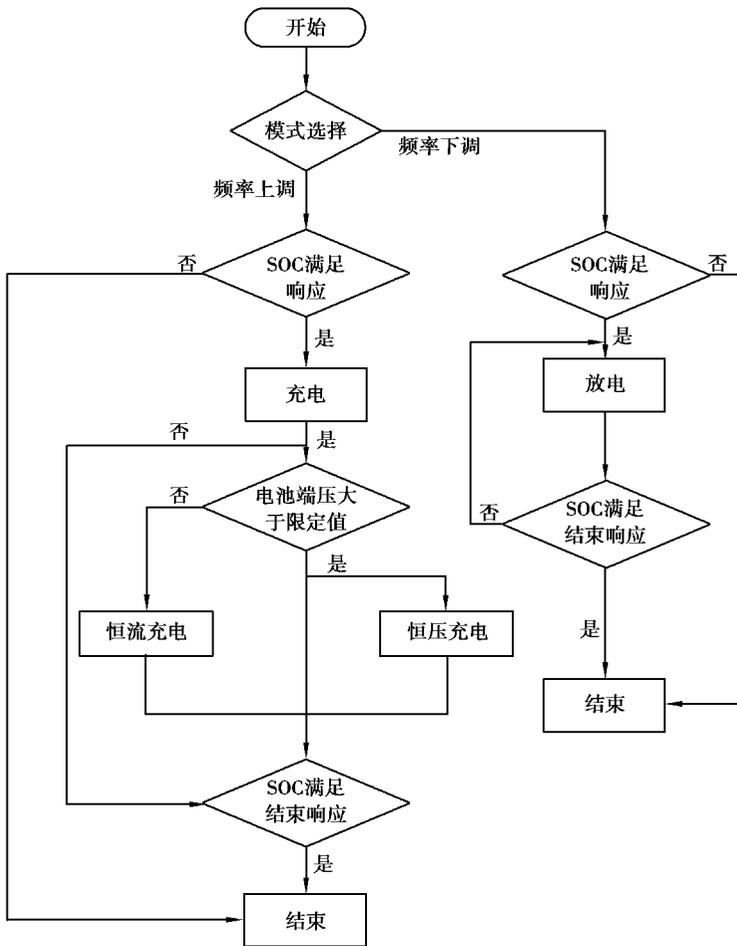


图 5 控制策略图

Fig.5 Control strategy map

考虑电池  $S$  的 EV 参与系统调频控制策略主要依据不同  $S$  值设置电池充放电优先级, 电池组响应情况如下: 动力电池  $S$  值为  $20\% \sim 40\%$  时由于需要确保 EV 的出行需求, 接入电网默认进行充电, 参与电网频率下调的工作; 动力电池  $S$  值为  $40\% \sim 60\%$  时, 此区间电池  $S$  状态比较灵活, 可同时进行充放电行为, 参与电网调频时可以同时参与频率的上调和下调; 为延长动力电池寿命, 参与系统调频动力电池最好“浅充浅放”, 当动力电池  $S$  为  $60\% \sim 80\%$  时, EV 接入电网, 默认进行对电网放电, 参与系统频率上调。此外, 还应考虑动力电池群自身功率限制情况。当没有符合信号响应要求的动力电池组, 或动力电池组即使均达到自身功率响应限值依然无法满足系统要求时, 将由储能模块来弥补差额<sup>[14]</sup>。

### 3 实验验证

本研究以单区域系统为例, 算例模型均在 MATLAB/Simulink 中建立, 设置系统中有 300 辆 EV 能够参与系统频率控制, 采用的电动私家车电池容量为 50 Ah, 充电功率为 4.8 kW, 放电功率为 8 kW, 平均持电池

最低电量为 20%，表 1 为系统的一部分参数。

表 1 仿真模型参数  
Tab.1 Simulation model parameters

模型参数	参数	参数值
发动机惯性常数	$M$	5/3
负荷-阻尼系数	$D$	1/6
EV 放电频率响应系数	$K_{EV}$	10
调速器速度调节	$R$	0.05
同步系数	$D$	0.6
系统容量/MW		10
基准频率/Hz		50

假设在某时刻,区域突然减少 0.5 MW 的负荷,图 6 为扰动情况下 EV 未参与负荷频率控制情况,图 7 为 EV 参与负荷频率控制情况。由图 6、7 可知,发生扰动时,未接入 EV 系统最大频率偏差约为 0.3 Hz,接入 EV 系统最大频率偏差约为 0.13 Hz,相比 EV 未参与时频率偏差减少了 57%。未接入 EV 系统,在调频机组的作用下超过 50 s 后系统频率恢复至基准频率附件;而 EV 接入后,相同扰动下系统恢复时间只用了 17 s,相比 EV 未参与时超调量减少了 66%。可以看出,接入 EV 参与系统调频后,在发生频率扰动时,系统频率可以较快恢复至安全范围之内,EV 参与系统调频具有很好的实际效果。

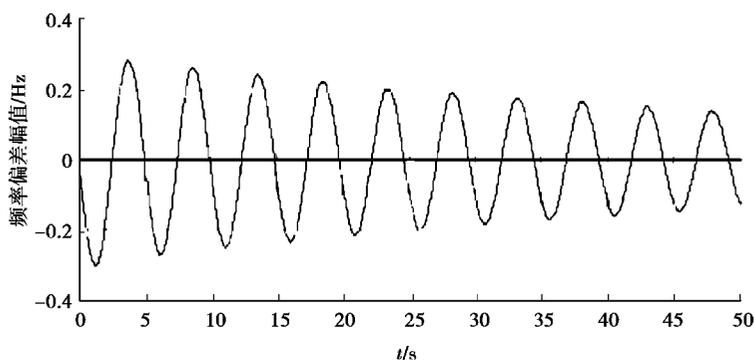


图 6 无 EV 参与系统调频

Fig.6 No EV participates in system tuning

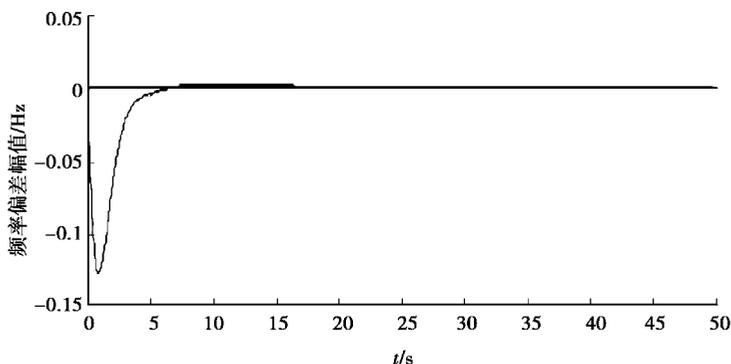


图 7 有 EV 参与系统调频

Fig.7 EV participates in system tuning

## 4 结 语

本研究对 EV 接入电网参与电网调频进行了探讨,在分析 EV 动力电池特性基础上,建立了电动汽车参与电网调频模型,提出了考虑电池荷电状态设置动力电池充放电的优先级参与电网调频控制策略,实现了电动汽车参与电网调频的功能。仿真结果表明,在电动汽车广泛应用的前提下,利用电动汽车作为储能元件的特点,能够有效抑制电网负荷的波动和缩短频率调整时间。

### 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. Impact and utilization of electric vehicle access to power grid [J]. Journal of Chinese Electrical Engineering,2012,32(4):1-10,25. (in Chinese)
- [ 2 ] Sortomme E, El-Sharkawi M A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):351-359.
- [ 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 ] Hamid Q R, Barria J A. Congestion avoidance for recharging electric vehicles using smoothed particle hydrodynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(2):1014-1024.
- [ 5 ] 周林.电动汽车参与电力系统频率调整研究[D].重庆:重庆大学,2015.  
ZHOU Lin. Study on frequency adjustment of electric vehicles in power system [D]. Chongqing Chongqing University,2015. (in Chinese)
- [ 6 ] Richardson P, Flynn D, Keane A. Local versus centralized charging strategies for electric vehicles in low voltage distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2):1020-1028.
- [ 7 ] 冉振亚,曹文明,杨超,等.燃料电池/蓄电池双能源电动汽车动力系统仿真[J].重庆大学学报(自然科学版),2004(10):29-32.  
RAN Zhenya, CAO Wenming, YANG Chao, et al. Simulation of power system of fuel cell/battery dual-energy electric vehicle[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition),2004(10):29-32. (in Chinese)
- [ 8 ] Saber A Y, Venayagamoorthy G K. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid: A cost-emission optimization[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(3):898-911.
- [ 9 ] Borba B S M C, Szklo A, Schaeffer R. Plug-in hybrid electric vehicles as a way to maximize the integration of variable renewable energy in power systems: the case of wind generation in northeastern Brazil[J]. Energy, 2012, 37(1):469-481.
- [10] 彭志远,杨亚联,秦大同,等.一种估计混合动力用 Ni-MH 电池单体 SOC 的方法[J].重庆大学学报,2011,34(5):19-25.  
PENG Zhiyuan, YANG Yalian, Qin Datong, et al. A method for estimating the monomer SOC of Ni-MH batteries for hybrid power [J]. Journal of Chongqing University,2011,34(5):19-25.(in Chinese)
- [11] 黄宇,杨健维,何正友.基于双层离散粒子群优化的智能小区车辆与家庭互动调度策略[J].电网技术,2015,39(10):2690-2696.  
HUANG Yu, YANG Jianwei, HE Zhengyou. Based on two-level discrete particle swarm optimization, intelligent residential vehicle and family interaction scheduling strategy [J]. Grid Technology,2015,39(10):2690-2696.(in Chinese)
- [12] 刘和平,许巧巧,胡银全,等.自适应卡尔曼滤波法磷酸铁锂动力电池剩余容量估计[J].重庆大学学报,2014,37(1):68-74.  
LIU Heping, XU Qiaoqiao, HU Yinquan, et al. Estimation of residual capacity of iron phosphate power battery by kalman filter[J]. Journal of Chongqing University,2014,37(1):68-74.(in Chinese)
- [13] Wu C, Mohsenian-Rad H, Huang J. Vehicle-to-aggregator interaction game[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):434-442.
- [14] 姜伊.考虑寿命的电动汽车动力电池参与电网调频策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.  
JIANG Yi. Research on the strategy of electric vehicle power battery in the power grid of electric power grid considering life span[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2016.(in Chinese)