

利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究

何晨颖¹, 耿天翔², 许晓慧³, 张祥文³, 汪春³, 张聪¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;
2. 国网宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001; 3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 电动汽车既可作为可控性负荷, 也可作为分布式电源, 能够为电网提供可调度容量, 参与调频等辅助服务。但该可调度容量受用户出行需求及电池损耗等因素的制约, 不能无限制地调度。基于此, 对电动汽车采取“分散接入, 集中控制”的管理模式, 首先基于用户出行需求及电池使用寿命等约束, 对电动汽车可调度容量进行评估。进而建立了计及可调度容量的电动汽车集中管理器充放电静态频率特性模型, 以单区域系统为例模拟了电动汽车参与负荷调频的作用效果。仿真结果表明, 利用电动汽车可调度容量辅助电网调频, 不仅可以快速有效地减小系统频率偏差, 提高电能质量, 还能减小传统调频机组的备用容量, 进而提高电网经济性。研究电动汽车参与调频的作用效果时, 用户需求及电池损耗是不容忽视的影响。

关键词: 电动汽车; 负荷频率控制; 可调度容量; 用户需求

Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles

HE Chenying¹, GENG Tianxiang², XU Xiaohui³, ZHANG Xiangwen³, WANG Chun³, ZHANG Cong¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Electric vehicles (EVs) are not only controllable load, but also can serve as distributed energy storage unit. Therefore, ancillary services for the grid such as frequency regulation can potentially be provided by EVs with schedulable capacity. However, the schedulable capacity is limited by factors such as the constraints of user demand and the battery life. On the basis, a centralized control mode is applied to distributed EVs, and a model with charging and discharging static frequency characteristics of aggregators is developed considering EVs schedulable capacity. Then the load frequency control models including EVs for single area power system is developed for simulating load frequency control. The simulation results show that using EVs schedulable capacity for frequency regulation can not only reduce the system frequency deviation effectively, but also can decrease the reserve capacity of traditional frequency regulation unit, improving the electricity quality and economics of power system. Meanwhile, the result shows that user demand and battery life can not be neglected in EV participating in frequency regulation research.

This work is supported by National Key Technology Support Program (No. 2013BAA01B00) and National Natural Science Foundation of China (No. 51361130150).

Key words: electric vehicles; load frequency control; schedulable capacity; user demand

中图分类号: TM619

文章编号: 1674-3415(2015)22-0134-07

0 引言

随着化石燃料的减少, 环境与资源问题的加深, 节能减排越来越受到人们的重视。电动汽车以新能

源电力代替石油作为其主要动力能源, 具有碳排放低、环境友好等特点, 得到了各国的大力发展。预计 2030 年我国电动汽车保有量将占汽车保有量 5%~10%, 年生产销售量可达 2 000 万辆^[1]。

目前, 普遍认为电动汽车既可以作为一种可控性负荷, 也可作为一种分布式电源向电网反馈电能 (vehicle-to-grid, V2G), 通过合理的控制可以实现

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAA01B00); 国家自然科学基金委项目(51361130150)

电动汽车向电网提供备用容量^[2-6]。电动汽车控制具有快速响应的特点, 利用电动汽车为电力系统提供调频服务成为目前研究热点。文献[7]阐述了电动汽车参与电网调频调峰的分层管理方法, 介绍了电动汽车参与电网调频的控制过程。文献[8]基于电动汽车电池模型, 建立了电动汽车参与负荷频率调整的模型, 指出电动汽车作为一种电池储能移动设施, 通过有效的控制可以为系统提供快速的系统备用。文献[9]利用电动汽车的储能功能, 平抑可再生能源的间歇性。由于其能够快速响应频率的变化, 利用 V2G 技术的电动汽车可以很好地参与电网的频率调节。文献[10]对电动汽车充放电系统进行了建模, 提出一种新的充电控制策略, 说明了电动汽车并网后参与频率调节的可行性。文献[11]建立了计及电动汽车作为可控负荷和分布式电源参与系统调频的静态频率控制模型, 并提出一种对电动汽车充放电的协调控制策略。文献[12]考虑了用户使用的便利性以及电量约束, 建立了电动汽车群的 V2G 模型。文献[13]研究了电动汽车 V2G 参与系统频率调节的优化控制方法, 并分析了电池能量的收益问题。

但目前的研究大多将电动汽车作为一种储能, 并没有考虑用户出行需求以及电池损耗等影响, 结果较为理想。本文在此基础上, 对电动汽车采用集中管理的模式, 综合考虑用户出行需求及电池寿命等约束, 对电动汽车可调度容量进行评估, 进而建立了计及可调度容量的电动汽车集中管理器充放电静态频率特性模型, 并对电动汽车参与的单区域系统的负荷频率控制模型进行了建模仿真。

1 计及电动汽车的负荷频率控制模型

电力系统频率是衡量电能质量的重要指标之一。负荷变化导致系统频率变化时, 电力系统通过频率的一次调整和二次调整使系统频率偏移限制在允许范围内。负荷频率控制是调整系统频率稳定于额定值, 保证电力系统安全、经济、稳定运行的有效控制方法^[14]。目前, 对负荷频率控制的研究已经较为成熟, 传统的单区域负荷频率控制模型如图 1 所示。其中: K 为积分控制增益; M 为发电机惯性常数; D 为负荷阻尼系数; R 为调速器调差系数; T_g 为调速器时间常数; T_{ch} 为汽轮机时间常数; ΔP_m 为发电机机械功率输出偏差; ΔP_L 为负荷扰动量。

1.1 电动汽车参与电网调频的控制模式

研究电动汽车参与电网调频, 首先需要建立电动汽车的静态频率特性模型。单辆电动汽车的容量对于电网调频的效益是微不足道的, 只有足够多的电动汽车容量才对电力系统的调频控制有意义。因

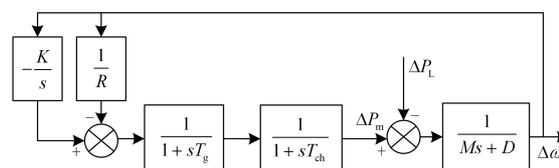


图 1 传统单区域频率控制模型

Fig. 1 Traditional model of single area power system

此, 对电动汽车采取“分散接入, 集中控制”的模式, 由集中管理器进行统一管理和控制, 以集中管理器为单元参与电网调频^[15]。电动汽车参与电网调频的控制模式如图 2 所示。

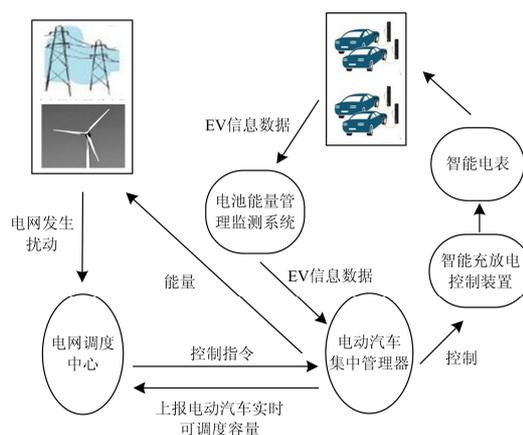


图 2 电动汽车参与电网调频的控制模式

Fig. 2 Control mode of EVs joining load frequency control

集中管理器由数据管理系统和控制系统两部分组成: 数据管理系统负责收集由电池能量管理监测系统和电网调度中心发送的实时数据以及相关历史数据; 控制系统负责对数据和指令进行分析, 优化计算, 执行控制指令, 从而改变电动汽车充放电功率^[16]。首先, 集中管理器基于由数据管理系统获得的电动汽车实时数据, 评估出电动汽车实时可调度容量大小并上报给电网调度中心。此时, 如果电网频率出现扰动, 调度中心将根据电动汽车静态频率特性向集中管理器下达能量需求指令。集中管理器则通过控制系统改变辖区内电动汽车的充放电功率, 从而使总的功率满足调频需求。

1.2 计及电动汽车可调度容量的集中管理器静态频率特性模型

既是负荷又是电源, 电动汽车充电功率可以在最大充电功率与最小充电功率之间变化, 因此每一辆电动汽车都可以等效为一个分布式电源。作为电动汽车的集合, 集中管理器可以作为整体等效为电源参与电网调频。

电动汽车集中管理器参与负荷一次频率调整

时,采用频率线性下垂特性,如公式(1)所表示,当检测到频率发生波动时,下垂控制回路会根据频率偏差按一定比例改变电动汽车的充放电功率。

$$\Delta P_{\text{Droop}} = k_p \cdot \Delta f \quad (1)$$

式中: ΔP_{Droop} 为电动汽车因下垂控制改变的充电功率; k_p 为电动汽车频率特性系数; Δf 为系统频率偏差量。

图3反应了电动汽车响应频率变化的下垂特性曲线,当系统频率稳定在额定值时,电动汽车的充电功率稳定在额定值 P_{ref} 。当频率小于 f_0 时,电动汽车开始向电网放电。而当频率降低到 f_{neg} 时,电动汽车达到放电功率的极限值。

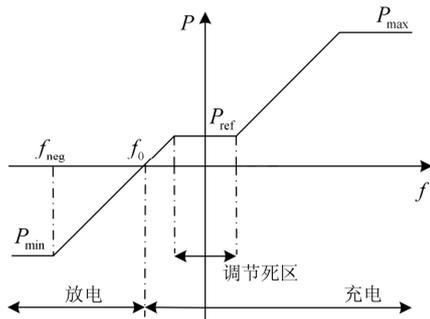


图3 电动汽车下垂控制特性

Fig. 3 Generic droop control for EVs

为了保证电池寿命,应该避免电动汽车进行频繁的充放电操作。因此,当频率在很小范围变化时,电动汽车不响应,仅由传统调频器承担调频任务,因此该频率特性模型增加调节死区模块。

如果要使系统的频率最终恢复运行在额定频率,需要进行频率的二次调节。电动汽车参与电网二次调频,与传统电力系统的二次调频类似,根据积差调频法,在电动汽车模型中增加一个积分控制器,积分控制增益根据暂态响应的需求进行调整。电动汽车频率控制模型如图4所示,图中频率偏差信号经过积分器后将得到频率偏差积分信号,按照一定的比例系数分配给传统机组和电动汽车集中管理器,其中电动汽车的积分比例系数为 α_{EV} 。

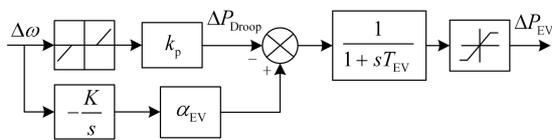


图4 电动汽车频率控制

Fig. 4 Frequency control model of EVs

考虑到通信和控制过程中存在的延迟效应,采用一阶惯性环节来模拟电动汽车控制过程中存在的

时延。其中 T_{EV} 为电动汽车充放电时间常数。

电动汽车作为一种交通工具,首要任务是满足用户的出行需求,并且尽可能地减小对电池的损耗。因此,电动汽车可参与电网调频的容量是有限的,该模型中考虑了电动汽车的可调度容量,即增加了功率限幅模块。当系统频率大幅上升时,如果所有可控汽车均动作并且达到了最大充电功率或者电池已充满而停止充电,则表示此时已达到电动汽车等效发电容量的下限;当系统频率较大幅度下降时,如果所有可控汽车均动作并且由于为满足用户的出行需求或电池寿命约束而不能继续放电或减小充电功率,则表示此时已达到电动汽车等效发电容量的上限。而当所需容量在可调度容量范围之内,则根据集中管理器的等效调频特性模型计算得到电动汽车集群所需要提供的容量,进而对电动汽车的充放电功率进行控制,以满足电网功率需求。因此,正确评估电动汽车实时可调度容量是实现电动汽车有效参与电网调频的关键。

2 电动汽车实时可调度容量评估方法

计算电动汽车可调度容量的范围需要确定可上调容量和可下调容量。将电动汽车等效为分布式电源,当电网出现频率波动时,将电动汽车可增大的负荷容量等效于可减小的发电容量,称为可下调容量;将电动汽车可减小的负荷容量等效于可增大的发电容量,称为可上调容量。具体如图5所示。

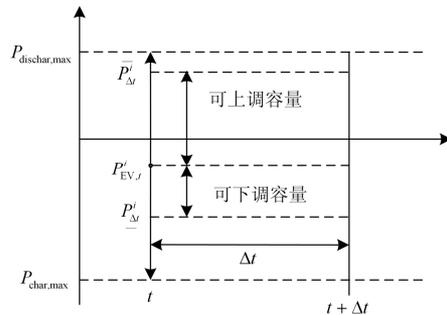


图5 电动汽车可调度容量示意图

Fig. 5 Schedulable capacity of EVs

图5中 $P_{\text{EV},t}^i$ 为当前时刻电动汽车充放电功率,定义 $P_{\text{EV},t}^i > 0$ 为放电, $P_{\text{EV},t}^i < 0$ 为充电。 $P_{\text{dischar,max}}$ 为最大放电功率(为正值,表示放电), $P_{\text{char,max}}$ 为最大充电功率(为负值,表示充电)。 Δt 为可调度容量持续的时间长度,本文研究一二次调频时,设置 $\Delta t = 0.5 \text{ h}$ 。 $\overline{P_{\Delta t}^i}$ 、 $\underline{P_{\Delta t}^i}$ 分别为 Δt 时间内充放电功率的上限和下限,计算两者的具体原理后文将详细说

3.2 场景设置

算例场景的设置包括电动汽车场景设置、电力系统仿真参数设置以及负荷波动模拟三部分。算例中的单区域电力系统，对于电动汽车规模，设置为一个区域内有 1 个集中管理器(Aggregator, AG)，负责对当地电动汽车进行管理，辖区内共有 500 辆电动汽车。为了评估电动汽车的实时可调度容量，对当前时刻各电动汽车数据进行设定。充电，最大充电与放电功率均为 5 kW，充放电效率为 95%。利用统计学方法确定电动汽车用户行为的概率分布，为模拟充电场景，本文参考文献[18]中对用户行为的研究，设置各参数如表 1。

表 1 单区域系统电动汽车实时数据

Table 1 Instant parameters of EVs for single area

并网时段	电池容量/kWh	起始电量 SOC/%	期望电量 SOC/%	并网时间	离网时间
白天	40	N(55,15)	85	N(8.5,0.5)	N(17.5,0.5)
晚上		N(45,15)	90	N(19,0.5)	N(7.5,0.5)

该系统有两台 330 kVA 的发电机和两台 740 kVA 的发电机，发电机组总容量为 2 880 kVA。其负荷情况和电动汽车参数见表 2^[19]。

表 2 系统负荷和电动汽车数据

Table 2 Conventional and EV load parameters

常规负荷	电动汽车负荷	电动汽车调节死区	区域总负荷
977 kW	1 288 kW	±0.1 Hz	2 265 kW

对模型中的参数全部进行标幺化，取区域总负荷 2 265 kW 作为基准值，计及电动汽车集中管理器的单区域负荷频率控制模型的仿真参数设置如表 3 所示。

表 3 系统仿真模型参数

Table 3 Simulation parameters of single area model

基准容量/kW	M	D	R	T _g	T _{ch}	T _{EV}	α _{EV}	α _{TR}	k _{Droop}
2265	7.8	0.8	0.04	0.2 s	0.3 s	0.5 s	0.45	0.55	15

3.3 结果分析

基于上述模型，首先根据上文所提出的可调度容量的评估方法对集中管理器可调度容量进行评估，确定可调度容量的上下幅值，评估结果如表 4 所示，结果全部采取标幺值。

表 4 电动汽车实时可调度容量

Table 4 Schedulable capacities of EVs

区域	可上调容量	可下调容量
单区域	0.057 8	-0.038 3

图 7 所示为单区域系统中利用电动汽车可调度容量参与调频和无电动汽车参与时系统频率变化的对比情况。从图中可以看出，在负荷增加阶段，不计电动汽车参与的系统频率变化超调量为 0.015 8，计及电动汽车参与的超调量为 0.012 5，相比减小了 20.9%。对比系统调节时间，有电动汽车参与的调节时间比无电动汽车参与缩短了 16.7%。在负荷减小阶段，不计电动汽车参与的频率变化超调量为 0.015 8，计及电动汽车参与的超调量为 0.012 4，相比减小了 21.5%。系统调节时间相比减小了 21.5%。因此可以看出，当负荷扰动引起频率波动时，利用电动汽车可调度容量参与电力系统调频，能够有效减小系统频率偏差，缩短系统的调节时间，从而提高电能质量。

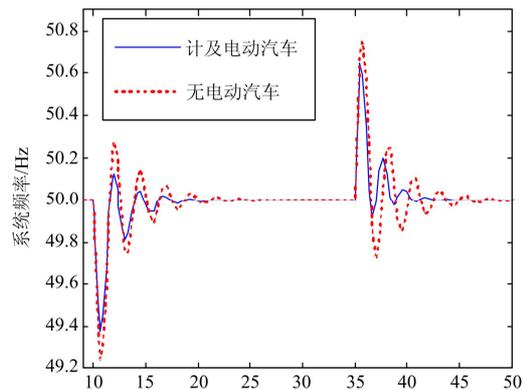


图 7 单区域系统的频率变化

Fig. 7 Frequency deviation in single area power system

图 8 所示为当出现负荷扰动时，电动汽车集中管理器出力以及有无电动汽车参与时常规机组的出力对比情况。可以看出，无论是负荷增加阶段还是减小阶段，利用电动汽车可调度容量辅助电网调频时，传统机组的出力变化量均小于不计电动汽车时的出力变化。表明电动汽车的参与可以有效减小传统调频机组的备用容量，提高电网运行的经济性。

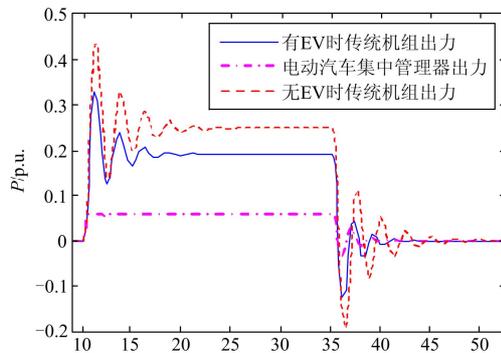


图 8 电动汽车和常规机组出力

Fig. 8 Outputs of EVs and traditional frequency regulation unit

图 9 所示为电动汽车参与调频时, 计及电动汽车可调度容量和不计及两种情况下系统频率的变化。从图中可以看出, 在负荷增加阶段, 计及可调度容量时系统频率变化的超调量为 0.012 5, 不计可调度容量时系统频率变化的超调量为 0.012 4, 相比计及可调度容量时超调量减小了 8%。对比系统调节时间, 不计及电动汽车可调度容量时的调节时间缩短了 14.7%。在负荷减小阶段, 计及电动汽车可调度容量时的超调量为 0.012 4, 不计电动汽车可调度容量时的频率变化超调量为 0.011 6, 相比计及电动汽车可调度容量时超调量减小了 9.35%, 此时系统调节时间基本相同。

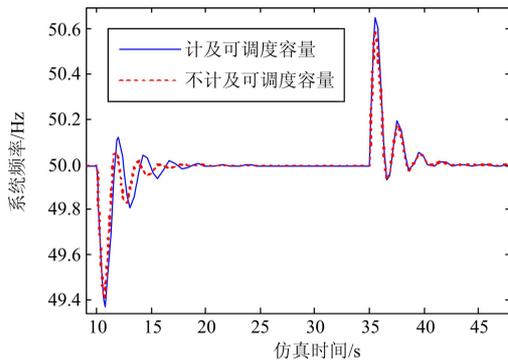


图 9 单区域系统的频率变化

Fig. 9 Frequency deviation in single area power system

从图 10 中可以看出, 在负荷增加阶段, 考虑电动汽车可调度容量时, 电动汽车集中管理器的出力达到其可调度容量的上限值 0.057 8。而当不计及电动汽车可调度容量时, 电动汽车出力已经超过其最大可上调容量, 因为为了满足用户的用电需求以及电池寿命约束, 有相当数量的电动汽车不能参与到调频中来。在负荷减小阶段, 在扰动刚发生时, 不计及可调度容量的情况下电动汽车的频率改变量实际上超过了可调度容量的下限值, 因此图 9 中, 扰

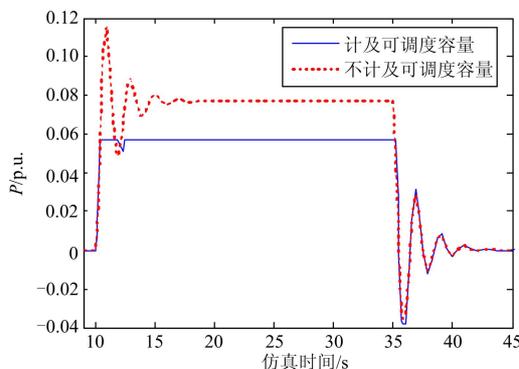


图 10 电动汽车集中管理器出力

Fig. 10 Outputs of EVs aggregators

动发生以后, 计及可调度容量时频率变化的超调量更大。由此可以看到, 为了准确研究电动汽车参与调频的作用效果, 用户需求及电池损耗是不容忽视的影响。

4 结论

电动汽车可以为电网提供可调度容量, 参与电网调峰调频等辅助服务。本文对电动汽车采取“分散接入, 集中控制”的模式。根据用户出行需求及电池寿命等因素, 对电动汽车辅助电网调频的可调度容量进行了评估。从而, 建立了计及电动汽车可调度容量的集中管理器充放电静态频率特性模型。在此基础上, 以单区域系统为例模拟了利用电动汽车可调度容量参与负荷频率控制的作用效果, 并利用 Matlab/Simulink 进行了建模仿真。仿真结果表明, 用户出行需求以及电池损耗决定了电动汽车可调度容量, 进一步利用电动汽车可调度容量辅助电网调频, 不仅可以快速有效地减小系统频率偏差, 还能够减小传统调频机组的备用容量, 从而提高电网电能质量和经济性。

参考文献

- [1] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.
- [2] MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] HOSSEINI S S, BADRI A, PARVANIA M. The plug-in electric vehicles for power system applications: The vehicle to grid (V2G) concept[C] // Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International: IEEE, 2012: 1101-1106.
- [6] 戴欣, 袁越, 傅质馨, 等. 用户侧电动汽车放电策略及其经济效益评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 55-61.
- [7] DAI Xin, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Discharge strategy and economic benefits evaluation of electric

- vehicles in user side[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(6): 55-61.
- [5] 武星, 殷晓刚, 宋昕, 等. 中国微电网技术研究及其应用现状[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 142-149.
WU Xing, YIN Xiaogang, SONG Xin, et al. Research on microgrid and its application in China[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 142-149.
- [6] 林方, 袁越, 王敏, 等. 电动汽车接入微网研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(10): 80-85.
LIN Fang, YUAN Yue, WANG Min, et al. Study of microgrid with electric vehicle[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(10): 80-85.
- [7] GARCIA-VALLE R, LOPES J A P. Electric vehicle integration into modern power networks[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2012: 155-229.
- [8] 黄媛, 刘俊勇, 陈井锐, 等. 计及电动汽车入网的负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 24-28.
HUANG Yuan, LIU Junyong, CHEN Jingrui, et al. Load frequency control considering vehicle to grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 24-28.
- [9] PILLAI J R, BAK-JENSEN B. Vehicle-to-grid systems for frequency regulation in an Islanded Danish distribution network[C] // Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE: IEEE, 2010: 1-6.
- [10] 刘月贤, 王天钰, 杨亚宇, 等. 电动汽车充放电系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 70-76.
LIU Yuexian, WANG Tianyu, YANG Yayu, et al. Modeling and simulation of electric vehicles' charge and discharge system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 70-76.
- [11] 张谦, 周林, 周维维, 等. 计及电动汽车充放电静态频率特性的负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 74-80.
ZHANG Qian, ZHOU Lin, ZHOU Luowei, et al. Load Frequency characteristics of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 74-80.
- [12] SHIMIZU K, MASUTA T, OTA Y, et al. Load frequency control in power system using vehicle-to-grid system considering the customer convenience of electric vehicles[C] // Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on: IEEE, 2010: 1-8.
- [13] HAN S, HAN S, SEZAKI K. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 65-72.
- [14] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-hill, 1994: 389-411.
- [15] GUILLE C, GROSS G A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation[J]. Energy Policy, 2009, 37(11): 4379-4390.
- [16] 薛红红. 电动汽车与电网互动技术之协调充电策略探究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.
XUE Honghong. The research of coordinated charging strategies on vehicle to grid technology[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2012.
- [17] ZHOU C, QIAN K, ALLAN M, et al. Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1041-1050.
- [18] 许佳佳, 艾欣, 金鹏, 等. 区域电动汽车充放电控制策略[J]. 华东电力, 2013, 39(12): 2045-2049.
XU Jiajia, AI Xin, JIN Peng, et al. Research on charging and discharging control strategy for regional EV[J]. East China Electric Power, 2013, 39(12): 2045-2049.
- [19] MARKEL T, KUSS M, DENHOLM P, et al. Communication and control of electric vehicles supporting renewables[J]. IEEE Vehicle Power & Propulsion, 2009: 27-34.

收稿日期: 2015-04-20; 修回日期: 2015-07-28

作者简介:

何晨颖(1993-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事规模化电动汽车与电网交互机理等方面的研究工作;
E-mail: wendyhalls@qq.com

耿天翔(1982-), 男, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为电力调度运行管理;

许晓慧(1981-), 男, 博士后, 高工, 主要从事新能源发电、电动汽车方向的研究工作。

(编辑 葛艳娜)