

电动汽车入网一次调频控制策略研究

刘辉, 魏岩岩, 汪旒, 李正明

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对电动汽车维持电池能量和补给能量 2 种行为, 分别提出了电动汽车入网一次调频控制策略, 即维持电池能量调频控制和电池计划充电调频控制。用椭圆函数构建电池荷电状态与充/放电下垂之间的函数关系, 实现维持电池能量和频率下垂控制。根据用户充电需求和电池荷电状态, 实时修正计划充电功率, 满足用户充电需求。最后, 在 2 区域互联电网模型上进行仿真实验, 仿真结果验证了所提出控制策略的有效性。

关键词: 电动汽车; 一次调频; 频率下垂控制; 充电需求

V2G control for EVs participating in primary frequency regulation

LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, LI Zhengming

(School of Electrical Information and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Based on EV charging modes of maintaining the residual energy of the EV battery and increasing battery energy for EVs, two kinds of control strategies, maintaining battery energy and implementing planning charging of EVs, are proposed for EVs to take part in primary frequency regulation. In order to hold battery State of Charge (SOC) levels and at the same time implement the frequency droop control, an elliptic function is used to construct the correlation between the battery SOC and the charging/discharging droop. According to the charging demands of EV users and the battery SOC level of EV battery, the scheduled charging power of EVs is corrected in real time to achieve the charging demands of EVs users. At last, simulations on a two-area interconnected power system show the effectiveness of the proposed control strategies.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107054 and No. 51477070).

Key words: electric vehicle; primary frequency regulation; frequency droop control; charging demand

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)23-0090-06

0 引言

随着经济发展与能源供给和环境污染之间的矛盾日益激化, 减少对化石燃料的依赖性、节能减排、开发太阳能与风能等成为各国智能电网建设势在必行的发展趋势。电动汽车作为智能电网的重要组成部分, 在节能减排和减少对化石能源的依赖性等方面具备传统汽车不可比拟的优势^[1-3]。同时, 电动汽车作为一种新型充电负荷, 大规模电动汽车接入电网, 可为电网提供多种辅助服务, 如削峰填谷、旋转备用、频率调节等, 这是因为电动汽车肩负着充电负荷和分布式储能单元双重身份。在这种背景下, 电动汽车与电网互动(Vehicle to grid, V2G)技术研究

受到普遍重视, 成为国内外研究热点。

电动汽车具有快速的调节能力和响应特性, 其参与电网频率调节受到学者们普遍重视, 但大多数研究集中于电动汽车调频的成本效益分析, 其入网调频控制策略研究才刚刚开始。文献[4]采用最大 V2G 功率的二分之一作为计划充电功率, 文献[5]采用历史频率偏差估计 V2G 控制的计划充电功率, 文献[6]采用正态分布频率偏差估计充电功率。尽管这些控制策略能有效抑制电网频率波动, 但计划充电功率与电动汽车接入电网时间长度无关, 因此无法确保完成用户充电需求。考虑到车辆入网和离开时间以及用户充电需求, 提出了一种分散 V2G 控制策略^[7], 但该控制策略没有实时修正计划充电功率, 因而频率调节会导致电池能量偏离期望。

基于上述分析, 本文提出了电动汽车参与电网

一次频率调节的分散式 V2G 控制策略, 满足用户充电需求, 同时抑制电网频率波动。最后, 在 2 区域互联电网模型上验证所提出控制策略的有效性。

1 电动汽车调频控制问题

电动汽车参与电网一次频率调节可用图 1 进行描述。通过数据信息通信, “频率测量” 环节将电网频率信息传递给 “V2G 控制” 环节, 同时将电动汽车相关信息(包括用户充电需求和期望离开时间)传递给 “V2G 控制” 环节。当电网频率超过规定的死区时, “V2G 控制” 环节将根据电网频率偏移信息, 按控制策略发布控制命令, 控制 “充/放电机” 对电动汽车进行充/放电控制。由图 1 可见, 电动汽车 V2G 控制需要考虑电动汽车充电需求和电网频率调节。电动汽车充电需求行为可能是多种多样, 但总可分为维持电池能量和对电动汽车进行能量补给^[7]。电网频率调节是通过频率下垂控制实现。因此, 可给出电动汽车参与电网一次频率调节的控制结构图, 如图 2 所示。

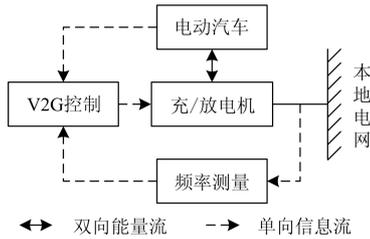


图 1 电动汽车参与电网一次频率调节的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of V2G control for EVs joining in primary frequency control of a power grid

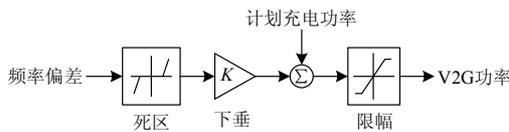


图 2 电动汽车参与电网一次频率调节的控制结构

Fig. 2 Structure on implementing V2G control for primary frequency regulation

可见, 电动汽车参与电网一次频率调节可理解为用户计划充电控制和频率下垂控制的综合。具体可归结为: 1) 计算计划充电功率, 完成电动汽车用户充电需求; 2) 设计充/放电下垂, 根据频率偏差, 实现频率下垂控制。

2 电动汽车调频控制策略

考虑到电动汽车维持电池能量和进行能量补给两种行为, 分别提出维持电池能量调频控制和计划充电调频控制策略。

2.1 维持电池能量调频控制策略

在这种情况下, 图 2 中的计划充电功率将为零, 因为电动汽车无需进行能量补给。为了维持电动汽车电池能量, 同时抑制电网频率波动, 设计充/放电下垂 K 与电动汽车电池能量的关系如图 3 所示。

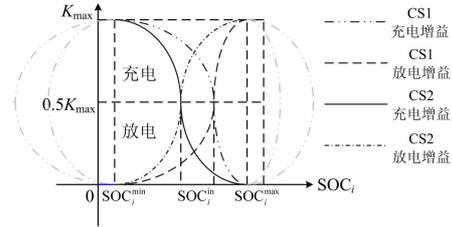


图 3 维持电池能量调频控制的充/放电下垂

Fig. 3 Charging/discharging droop for holding battery energy

在图 3 中, 用椭圆函数构建充/放电下垂与电池荷电状态(State of Charge, SOC)的映射关系, 相应的数学模型可表示如下。

1) 当 $SOC_{i,k} \leq SOC_i^{min}$ 时

$$\begin{cases} K_{i,k}^c = K_{max} \\ K_{i,k}^d = 0 \end{cases} \quad (1)$$

2) 当 $SOC_i^{min} < SOC_{i,k} \leq SOC_i^{in}$ 时

$$\begin{cases} K_{i,k}^c = \frac{1}{2} K_{max} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{(SOC_{i,k} - SOC_i^{min})^2}{(SOC_i^{in} - SOC_i^{min})^2}} \right) \\ K_{i,k}^d = \frac{1}{2} K_{max} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{(SOC_{i,k} - SOC_i^{min})^2}{(SOC_i^{in} - SOC_i^{min})^2}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

3) 当 $SOC_i^{in} < SOC_{i,k} < SOC_i^{max}$ 时

$$\begin{cases} K_{i,k}^c = \frac{1}{2} K_{max} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{(SOC_{i,k} - SOC_i^{max})^2}{(SOC_i^{in} - SOC_i^{max})^2}} \right) \\ K_{i,k}^d = \frac{1}{2} K_{max} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{(SOC_{i,k} - SOC_i^{max})^2}{(SOC_i^{in} - SOC_i^{max})^2}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

4) 当 $SOC_{i,k} \geq SOC_i^{max}$ 时

$$\begin{cases} K_{i,k}^c = 0 \\ K_{i,k}^d = K_{max} \end{cases} \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: $K_{i,k}^c$ 和 $K_{i,k}^d$ 分别是第 i 辆电动汽车第 k 时刻的充、放电下垂; K_{max} 是最大 V2G 下垂; $SOC_{i,k}$ 、 SOC_i^{in} 、 SOC_i^{min} 和 SOC_i^{max} 分别是第 i 辆电动汽车第 k 时刻、入网时刻、最小和最大荷电状态。

考虑到式(1)~式(4), 可用充/放电下垂和系统频率偏差计算电动汽车 V2G 功率为

$$P_{i,k} = \begin{cases} K_{i,k}^c \Delta f_k & (\Delta f_k > f_d, \text{且} K_{i,k}^c \Delta f_k < P_{\max}) \\ K_{i,k}^d \Delta f_k & (\Delta f_k < -f_d, \text{且} K_{i,k}^d \Delta f_k > -P_{\max}) \\ P_{\max} & (\Delta f_k > f_d, \text{且} K_{i,k}^c \Delta f_k \geq P_{\max}) \\ -P_{\max} & (\Delta f_k < -f_d, \text{且} K_{i,k}^d \Delta f_k \leq -P_{\max}) \\ 0 & (|\Delta f_k| \leq f_d) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{\max} 为最大 V2G 功率; f_d 为电动汽车参与电网频率调节的死区。

根据式(1)~式(5), 电动汽车维持电池 SOC 的调频控制策略可理解为: 当 $SOC_{i,k} < SOC_i^{\text{in}}$ 时, $K_{i,k}^c > K_{i,k}^d$, 电动汽车从电网吸收的电能将多于释放给电网的电能, 这促使电动汽车电池 SOC 增加。反之, 亦然。特别地, 当 $SOC_{i,k} = SOC_i^{\text{in}}$ 时, $K_{i,k}^c = K_{i,k}^d$, 电动汽车吸收的电能将等于释放的电能, 使电池 SOC 保持不变。因此, 在这种控制策略的作用下, 电动汽车在参与电网频率调节的同时, 电池能量将被维持在 SOC_i^{in} 等级。

2.2 计划充电调频控制

由图 2 可见, 为了在参与电网频率调节的同时完成电动汽车用户的充电需求, 需要制定充电计划, 即计算电动汽车的实时计划充电功率。根据用户充电需求和电池荷电状态, 电动汽车的实时计划充电功率计算可为

$$\int_{t_i^{\text{in}}}^{t_i^{\text{out}}} P_i^s(k) dk = (SOC_i^e - SOC_i^{\text{in}}) E_i^r \quad (6)$$

式中: t_i^{in} 和 t_i^{out} 分别是第 i 辆电动汽车接入和期望离开电网时间; $P_i^s(k)$ 为第 i 辆电动汽车的计划充电功率; SOC_i^e 为第 i 辆电动汽车的期望 SOC。

若考虑常数充电功率, 式(6)则可表示为

$$P_{i,k}^c = \frac{(SOC_i^e - SOC_{i,k}) E_i^r}{t_i^{\text{out}} - t_k} \quad (7)$$

式中: $P_{i,k}^c$ 为第 i 辆电动汽车的常数计划充电功率; t_k 为当前时刻; E_i^r 为电池额定容量。应该指出的是, 常数计划充电功率将随着电池 SOC 状态和时间变化而变化, 有利于完成电动汽车用户的充电需求。

考虑到最大 V2G 下垂和式(7), 计划充电调频控制的数学模型可表示为

$$P_{i,k} = \begin{cases} K_{\max} \Delta f_k + P_{i,k}^c & (|K_{\max} \Delta f_k + P_{i,k}^c| < P_{\max}) \\ P_{\max} & (K_{\max} \Delta f_k + P_{i,k}^c \geq P_{\max}) \\ -P_{\max} & (K_{\max} \Delta f_k + P_{i,k}^c \leq -P_{\max}) \\ P_{i,k}^c & (|\Delta f_k| \leq f_d) \end{cases} \quad (8)$$

对应于式(8), 计划充电调频控制原理可用图4进行描述。由图4可见, 当系统频率偏移在死区内时, 电动汽车仅执行计划充电。一旦系统频率偏移超出死区, 电动汽车充/放电功率将由计划充电功率和频率下垂控制功率组成, 抑制系统频率偏移, 同时执行计划充电。

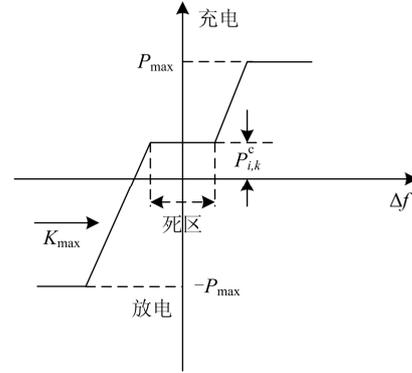


图 4 计划充电调频控制原理

Fig. 4 Frequency regulation with scheduled charging of an EV

考虑到电动汽车充/放电效率, 从电网侧看, 电动汽车的充/放电功率可表示为

$$P_{i,k}^g = \begin{cases} P_{i,k} / \eta^c & (P_{i,k} \geq 0) \\ P_{i,k} \cdot \eta^d & (P_{i,k} < 0) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{i,k}^g$ 为电网侧 V2G 功率; η^c 和 η^d 分别为充、放电效率。

当电动汽车完成充电需求而仍没离开电网时, 电动汽车参与电网的调频控制策略将自动由计划充电调频控制转换维持电池能量的调频控制策略。

3 仿真系统

3.1 电网模型

为了便于讨论电动汽车参与电网频率调节仿真, 建立两区域互联电网模型, 如图5所示。风力发电如图6所示, 波动时间间隔为1 s。电网一次和二次频率调节的负荷扰动分布可近似为均值为零的正态分布, 可用慢速大幅值和快速小幅值的白噪声序列表示。互联电网具体参数见表1。

3.2 V2G 仿真参数

在前面章节, 我们将电动汽车充电行为分为维持电池能量和对电动汽车进行能量补给两类。为了方便描述, 将它们分别记为类型1和类型2。V2G 仿真相关参数见表2。

表 1 电网模型参数

Table 1 Parameters of power grid model

| 参数 | 区域 A | 区域 B |
|------------------|--------|--------|
| 最大负荷/MW | 20 000 | 10 000 |
| PI 控制器的比例和积分增益 | 1,0.01 | 1,0.01 |
| 负荷频率控制时间周期/s | 4 | 4 |
| 频率偏差系数/(p.u./Hz) | 0.15 | 0.075 |
| 机组惯性/(p.u.·s) | 0.32 | 0.16 |
| 负荷阻尼系数/(p.u./Hz) | 0.04 | 0.02 |
| 区域同步系数/(p.u./Hz) | 0.04 | |
| 一次调频死区/Hz | 0.033 | |
| 频率采样时间/s | 0.1 | 0.1 |
| 通信延迟/s | 1 | 1 |
| 区域控制误差 ACE 死区/MW | 20 | 20 |
| 爬坡速率/(MW/min) | 400 | 200 |
| 风功率波动时间常数/s | 1 | 1 |
| 一次调频死区/Hz | 0.033 | |
| 频率采样时间/s | 0.1 | 0.1 |
| 通信延迟/s | 1 | 1 |
| 区域控制误差 ACE 死区/MW | 20 | 20 |
| 爬坡速率/(MW/min) | 400 | 200 |
| 风功率波动时间常数/s | 1 | 1 |

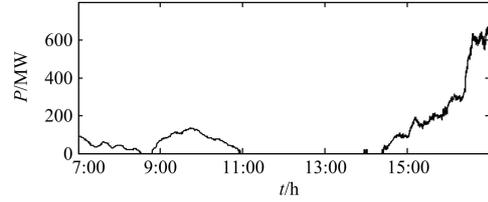


图 6 具有 1 s 时间间隔的风力发电

Fig. 6 Wind power in a time series of 1 second

表 2 V2G 仿真参数

Table 2 Parameters for V2G simulations

| 参数名称 | 类型 1 | 类型 2 |
|-------------------|-----------|--------|
| 电动汽车数量 | 30 000 | 10 000 |
| 电池容量/kWh | 32 | |
| 频率死区/Hz | 0.01 | |
| 充/放电效率 | 0.92/0.92 | |
| 最大 V2G 功率/kW | 7 | |
| 最大 V2G 增益/(kW/Hz) | 120 | |
| 最大/最小 SOC/p.u. | 0.9/0.1 | |

3.3 电池 SOC 模型

伴随电动汽车充/放电, 电池能量的变化量^[8]可表示为

$$\Delta E_i = \int_0^k P_i(k) dk \quad (10)$$

式中, ΔE_i 为电动汽车电池能量变化。

考虑到式(10), 则第 k 时刻电动汽车电池能量可表示为

$$SOC_{i,k} = SOC_i^{in} + \frac{1}{E_i^r} \Delta E_i \quad (11)$$

4 仿真分析与讨论

在 Matlab 的 Simulink 环境下, 基于相同的 V2G 仿真参数和电网模型参数(见表 1 和表 2), 分别对所提出的控制策略和文献[7]的控制策略建立仿真模型, 并进行比较分析。为了方便表述, 称本文所提出的 V2G 控制策略为 CS1 (Control Strategy 1), 以及文献[7]的 V2G 控制策略为 CS2。

4.1 仿真情境分析

据统计^[9], 用户通常早上 8 点上班, 下午 5 点下班回家, 因此假定电动汽车接入电网的时间段为上午 8 点至下午 5 点。为了模拟电动汽车电池 SOC 状态的随机分布特性, 假定电池 SOC 服从正态分布如表 3 所示。采用蒙特卡洛方法, 对电动汽车电池 SOC 状态进行随机抽样, 并建立仿真模型。

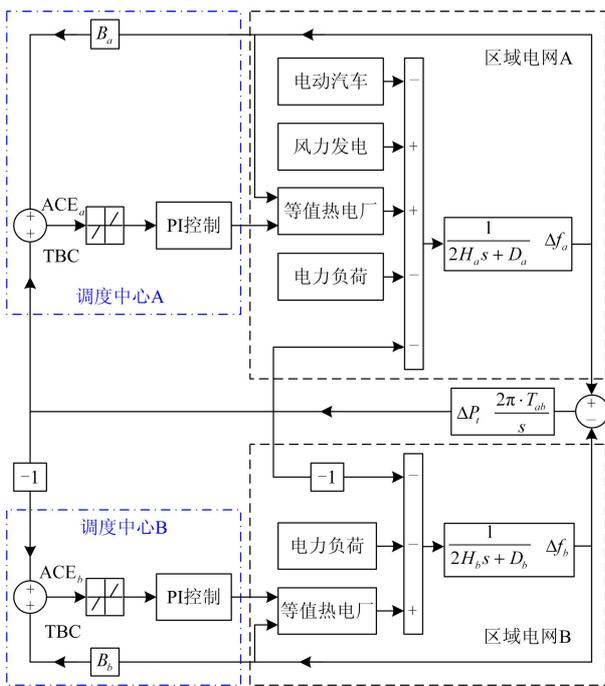


图 5 2 区域互联电网模型

Fig. 5 A two-area interconnected power model

表 3 电动汽车电池 SOC 正态分布情境
Table 3 Normal distribution for EV battery SOC_s

| | 类型 1 | 类型 2 |
|--------------|--|--|
| 初始 SOC/p.u. | SOC ~ N(0.7, 0.01) SOC ∈ [0.6, 0.8] | SOC ~ N(0.4, 0.01) SOC ∈ [0.3, 0.5] |
| 期望 SOC/ p.u. | | SOC ~ N(0.7, 0.01) SOC ∈ [0.6, 0.8] |

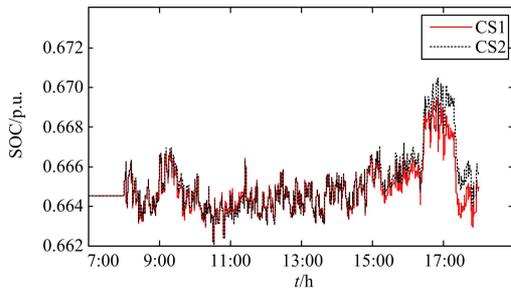
4.2 随机分布仿真比较

假定风力发电和电动汽车均接入区域 A，为了便于控制策略 CS1 和 CS2 比较，在后面的讨论中，我们将随机选择一辆电动汽车进行展示。由表 4 可见，与无电动汽车参与电网频率调节相比，电动汽车的充/放电控制能有效抑制电网频率偏移，控制策略 CS1 和 CS2 的控制效果相近。由图 7(a)可见，与控制策略 CS2 相比，控制策略 CS1 能更好地维持电动汽车电池能量，因为在期望电池 SOC 附近，控制策略 CS1 具有更大的充/放电功率，这可在图 8 中得到证实。由图 8 可见，在 0.7 p.u.SOC 附近，CS1 将可获得更大的充/放电功率(正如图 7(b)所示，相对于 CS2，CS1 的充/放电功率略大)，这有利于维持电池 SOC 在 0.7 p.u.附近。

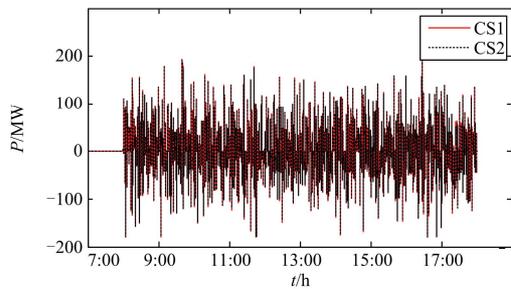
表 4 随机分布情境下频率偏移比较

Table 4 Comparisons on frequency deviation under random distributions

| 频率偏差/Hz | 无 V2G | CS1 | CS2 |
|---------|----------|----------|----------|
| 最大值 | 0.164 2 | 0.080 6 | 0.080 5 |
| 最小值 | -0.181 0 | -0.104 1 | -0.103 0 |
| 均方差 | 0.037 1 | 0.020 3 | 0.020 3 |



(a) 电动汽车实时 SOC



(b) 电动汽车总的 V2G 功率

图 7 随机分布情境下类型 1 电动汽车的仿真比较
Fig. 7 Simulations of type 1 under random distributions

由图 9(a)可见，相对于 CS2 而言，CS1 更有利于完成电动汽车用户的充电需求，这是因为控制策略 CS1 能实时修正电动汽车的计划充电功率。因此，在充电快结束时，CS1 比 CS2 释放了更多的电能，抑制电池 SOC 偏高。

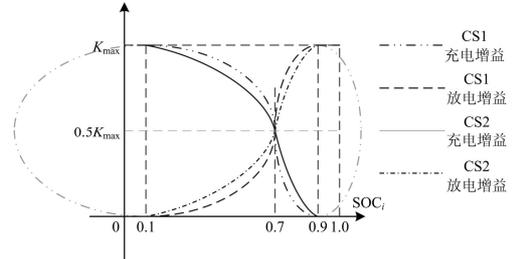
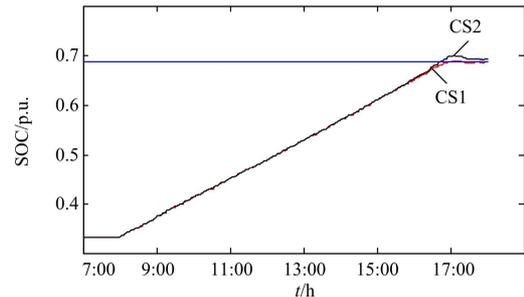
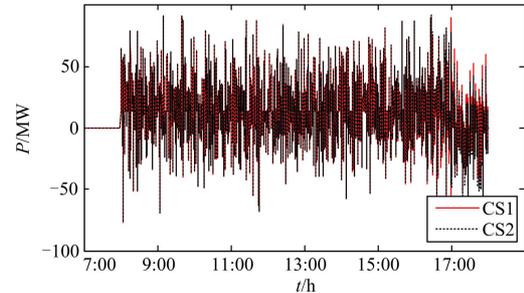


图 8 控制策略 CS1 和 CS2 原理对比

Fig. 8 Comparisons for strategies CS1 and CS2



(a) 电动汽车实时 SOC



(b) 电动汽车总的 V2G 功率

图 9 随机分布情境下类型 2 电动汽车的仿真比较
Fig. 9 Simulations of type 2 under random distributions

总之，电动汽车调频控制策略能在满足用户充电需求的同时抑制电网频率波动，但控制策略对电网频率的抑制能力与电动汽车规模、车辆入网时段和用户意愿相关。

5 结论

电动汽车作为智能电网的重要组成部分备受电力工业关注，其参与电网频率调节研究是当前国际热点，但入网调频控制策略研究还刚开始。本文针对电动汽车一次调频控制难以同时兼顾电网调节需求和用户充电需求这一问题，提出了新的电动汽车一次调频分散控制策略，满足用户充电需求，同时

抑制电网频率波动。在 2 区域互联电网模型上的仿真结果表明: 与现有控制策略相比, 提出的电动汽车一次调频控制策略不仅能有效地抑制电网频率波动, 同时能实时修正用户充电功率, 完成用户充电需求。

参考文献

- [1] 葛少云, 黄镠, 刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 1-5.
GE Shaoyun, HUANG Liu, LIU Hong. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Technology, 2012, 40(10): 1-5.
- [2] 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.
MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of influence of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.
- [3] 徐鹏, 陈祺伟, 连湛伟, 等. 一种电动公交车充换电站动力电池全自动更换技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 150-154.
XU Peng, CHEN Qiwei, LIAN Zhanwei, et al. An EV charging/swap station[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 150-154.
- [4] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 559-564.
- [5] OTA Y, LIYANAGE M, YOKOYAMA A, et al. Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) considering charging request and battery condition[C] // Proc IEEE PES Innovative Smart Grid Technol Conf Europe, October, 2010: 1-6.
- [6] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. Autonomous distributed vehicle-to-grid for ubiquitous power grid and its effect as a spinning reserve[J]. Council Electric Engineering, 2011, 1(2): 214-221.
- [7] LIU H, HU Z, SONG Y and LIN J. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3480-3489.
- [8] MASTUA T, YOKOYAMA A. Supplementary load frequency control by use of a number of both electric vehicles and heat pump water heaters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1253-1262.
- [9] LUO Z, SONG Y, HU Z, et al. Forecasting charging load of plug-in electric vehicles in China[C] // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, July, 2011.

收稿日期: 2015-02-06; 修回日期: 2015-03-31

作者简介:

刘 辉(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统非线性控制, 电动汽车与电网互动技术研究;

魏岩岩(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车与电网互动技术研究; E-mail: wyy903@126.com

汪 旒(1980-), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统控制, 电力系统最优化研究。

(编辑 周金梅)