

电动汽车充放电系统建模与仿真

刘月贤¹, 王天钰¹, 杨亚宇^{1,2}, 王晓茹¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 并网电动汽车既是随机的负荷又是移动的储能元件, 其充放电行为对电网的运行有较大影响, 而充放电系统的建模是研究电动汽车并网的基础。建立了由电压型 PWM 整流器和双向 DC/DC 变换器构成的电动汽车充放电模型; 针对电动汽车充电, 提出了一种新的控制策略, 在恒流阶段采用电流单环控制, 达到设定电压值后系统自动切换为电压电流双闭环控制, 实现恒流恒压充电。最后, 在 Matlab/Simulink 中仿真实现了电动汽车充放电控制策略, 并与单纯采用双闭环控制的恒流恒压充电策略进行了比较。仿真结果验证了充放电控制策略的正确性, 并证明了所提出的自动切换的充电控制策略的优越性。

关键词: 电动汽车; PWM 整流器; buck-boost 变换器; 充放电控制策略; 恒流恒压充电控制; 恒流放电控制

Modeling and simulation of electric vehicles' charge and discharge system

LIU Yue-xian¹, WANG Tian-yu¹, YANG Ya-yu^{1,2}, WANG Xiao-ru¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Grid-connected electric vehicles are not only the random loads but also the mobile storage components and their charge and discharge behaviors have big effects on the grid operation. Moreover, modeling of electric vehicles is the foundation for studying grid integration. Electric vehicles' charge and discharge model which consists of a voltage-source rectifier PWM and bi-directional DC-DC converter is established. A novel charge control strategy for electric vehicles is introduced which uses current loop control in the current constant stage and switches automatically to voltage and current double closed loop controls when the system reaches to the set voltage values to achieve constant current and constant voltage charge. Finally, the control strategy is simulated by using MATLAB/SIMULINK and compared with the charge strategy by adopting voltage and current closed loop controls merely, which demonstrates the effectiveness of charge and discharge strategy and proves the superiority of the proposed automatic-switchover charge control strategy.

Key words: electric vehicles; PWM rectifier; buck-boost converter; charge and discharge strategy; charge control of constant current and constant voltage; discharge control of constant current

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)13-0070-07

0 引言

全球能源危机和环境问题使节能减排的呼声越来越高, 国家智能电网项目的发展使电动汽车-电网互动技术 (Vehicle to Grid, V2G) 逐渐成为研究热点。V2G 技术是电动汽车 (Electric Vehicle, EV) 在受控状态下实现与电网信息和能量双向互动的新型技术。EV 不仅能从电网中吸收能量, 还可以在电网需要时将能量反馈给电网^[1]。文献资料显示, 大多数车辆一天当中约 95% 的时间处于空闲状态^[2]。随着 EV 保有量的提高, 相当于电网中拥有了大量分布式储能装置, 通过协调控制其充放电行为, 可完成

电网调峰服务^[3-4], 降低电网损耗、改善节点电压水平^[5], 平滑电网负荷和风电出力波动^[6-7]等重要作用。V2G 作为一项新开发的技术, 其发展需要相关政策和技术的发展与辅助, 对电动汽车充电负荷和充放电控制策略的仿真建模是研究其对电网影响和进行充放电控制的基础^[8]。

目前, EV 接入电网的拓扑结构主要有两种: 一种是 EV 经过 AC/DC 变换器接入电网^[9-11], 另一种是 EV 经过双向 DC/DC 变换器^[12-13]和 AC/DC 变换器接入电网^[9,14-20]。电动汽车电池模型, 可用恒定电阻^[10,14]或分段电阻^[9,15]代替, 但此时无法进行放电分析。放电分析时采用负电阻^[10]或直流电源^[14]模

拟。文献[16, 20]分别用电容与电阻串联模型和Rint等效模型模拟电池特性。另外, 在仿真中可选择Simulink中的蓄电池模型^[9, 18-19]。EV充电主要包括恒流、恒压^[14]和恒流恒压充电^[10-11, 16, 19-20]。文献[10-11]主电路拓扑未用双向DC/DC变换器, 故需通过控制PWM整流器实现恒流恒压充电。在使用DC/DC变换器的充电装置中, 可通过手动切换实现恒流和恒压模式的转换^[16, 19], 或采用电压外环电流内环闭环控制策略实现EV恒流恒压充电控制^[20], 称为策略1。

本文结合策略1和切换控制的特点, 提出并仿真了恒流阶段采用电流单环控制, 达到电压设定值

后自动切换为电压电流双闭环控制, 实现恒流恒压充电的控制策略, 称为策略2, 并与策略1的仿真结果进行比较。另外, 在Simulink中建立了电动汽车放电控制的模型, 实现了恒流放电控制。

1 电动汽车充放电系统拓扑结构

电动汽车接入电网能够实现充电和放电的双向能量流动, 因此, 充放电系统的主电路拓扑由三相电压型PWM整流器(Voltage-Source Rectifier, VSR)和双向DC/DC变换器组成, 如图1所示^[20]。

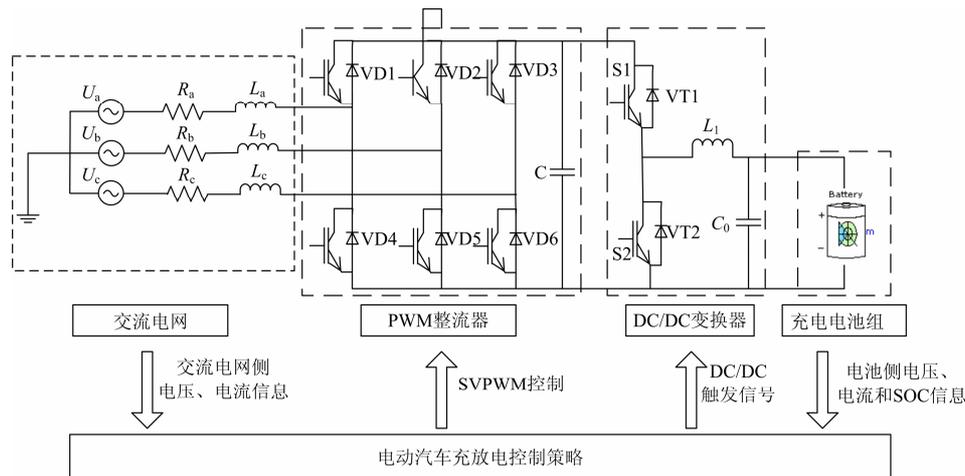


图1 电动汽车充放电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of charge and discharge system of EV

1.1 三相电压型PWM整流器^[21]

VSR使电网侧电流谐波减少, 功率因数提高, VSR采用电容进行滤波, 能输出稳定的直流电压, 实现电动汽车与电网的双向功率交换^[15, 17]。

根据基尔霍夫电流和电压定理, 在abc三相静止坐标系下, 可以建立VSR的一般数学模型。将abc三相坐标系下的数学模型转换为 $\alpha\beta$ 两相坐标系后, 可用于SVPWM算法产生控制PWM变换器的触发信号。另外, 将abc静止坐标系转换为dq旋转坐标系后, 不需要考虑旋转和频率变化问题, 使控制变得简单快捷, 而且PI调节器的增益和带宽可以无限大。SVPWM具有直流电压利用率高、谐波小、易于数字化实现等优点。因此, 本文基于 i_d/i_q 控制系统, 采用SVPWM算法进行PWM整流器控制^[22]。

1.2 双向buck-boost变换器^[23]

由于VSR的输出直流电压为恒定值^[24-25], 而电池充放电时, 其输出直流电压是不断变化的; 而且VSR相当于升压变换器, 其输出电压始终高于交流侧电压。因此, 必须增加DC/DC变换器, 将PWM

整流器的输出直流电压 U_d 调成期望的充电电压 U_0 ^[26]。

Buck-boost变换器的拓扑结构如主电路拓扑(图1)中的DC/DC变换器部分。电动汽车充电时, DC/DC变换器工作在buck降压模式下, 即开关S1由产生的触发信号控制通断, 以恒定的开关频率工作, 而开关S2始终处于截断状态。这时能量从 U_{dc} 流向电池, 通过调节S1的占空比可得到需要的充电电压或电流。当DC/DC变换器工作在boost模式下时, 开关S1始终处于截断状态, 开关S2以恒定的开关频率工作。此时PWM整流器工作在有源逆变状态, 能量经PWM整流器从电池流向反馈电网。

1.3 电动汽车充放电方法

电动汽车充电法包括常规充电、快速充电和更换电池法等^[27-28]。本文主要研究常规充电法^[15]包括恒流、恒压和恒流恒压充电。恒流充电具有充电时间长, 未考虑充电直流侧的电压上限, 效率较低等缺点。恒压充电时, 电流不可调节, 初始阶段电流过大, 会导致极板变形弯曲, 温度过高等现象。恒

流恒压充电第一阶段保持电流不变充电，第二阶段充电电压恒定。当电流下降到最小值，或接收到停止充电的信号时，电动汽车终止充电。

放电方法^[18]采用恒流模式，并随时检测蓄电池的端电压，当电池端电压小于设定值或电池 SOC 小于设定值时，电动汽车终止放电。

2 电动汽车充放电系统控制策略

2.1 三相电压型 PWM 整流器控制策略

经 dq 坐标变换可实现变换器输出有功与无功功率解耦的目标，d 轴电流 i_d 等效为有功功率电流，而 q 轴电流 i_q 等效为无功功率电流。但是 d、q 轴变量相互耦合，无法对电压进行单独控制。为此，本文采用电流前馈解耦法进行解耦，解耦后 d、q 轴上的变量可进行独立控制。解耦后电压方程如式 (1)。

$$\begin{cases} V_d = -(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(i_{dref} - i_d) + \omega Li_q + u_d \\ V_q = -(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(i_{qref} - i_q) - \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (1)$$

其中： K_{ip}, K_{il} 为 PI 调节器的比例环节和积分环节系数； i_{dref}, i_{qref} 为 d 轴和 q 轴电流参考值。

为实现 PWM 整流器直流侧电压恒定的控制，采用电压电流双闭环控制，其中电流内环反馈控制可以实现整流变换的功率因数校正。控制策略框图如图 2。

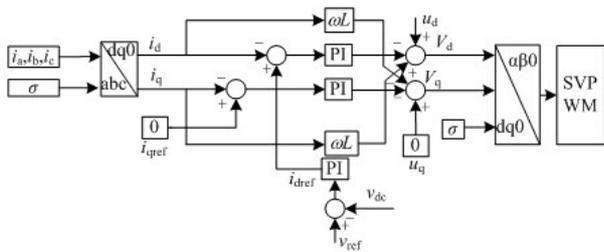


图 2 PWM 整流器控制策略框图

Fig. 2 Block diagram of VSR's control strategy

将交流电流 i_a, i_b, i_c 转换为 dq 坐标系的电流 i_d 和 i_q 。电压环将直流侧电压参考值 V_{ref} 和实测值 V_{dc} 的差值经 PI 调节后作为 i_d 的给定值 i_{dref} ，在功率因数为 1 的情况下，q 轴电流的参考值 i_{qref} 为 0。根据式(1)进行电流调节，得出系统所需的电压指令，最后利用 SVPWM 算法跟踪电压变化，产生控制 IGBT 管通断的信号。

2.2 双向 DC/DC 变换器充放电控制策略

2.2.1 电动汽车充电模式

恒流恒压充电的控制框图如图 3 所示。

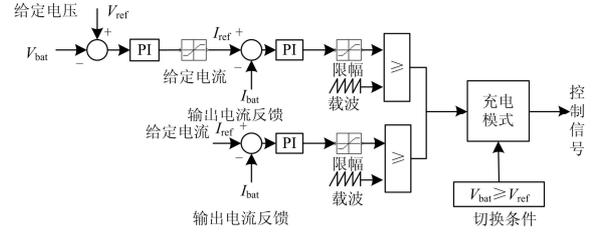


图 3 恒流恒压充电控制框图

Fig. 3 Block diagram of constant-current and constant-voltage charge

本文所提出策略（策略 2）采用切换方式实现恒流恒压充电，恒流阶段选择电流单环控制，将电流 I_{bat} 与设定值 I_{ref} 进行比较，经 PI 调节器后与三角波比较，产生输出信号控制开关 S1 的通断，实现恒流充电。

电压达到设定值后，恒压阶段切换为电压电流双闭环控制策略。电压环的输出经 PI 调节作为电流环的输入，即为输出电流的参考值 I_{ref} ，电流将跟随电压给定，保持电压恒定。电流内环能够缩短系统的响应，减小调整时间。

2.2.2 电动汽车放电模式

放电模式采用电流负反馈控制方式，控制框图如图 4 示。

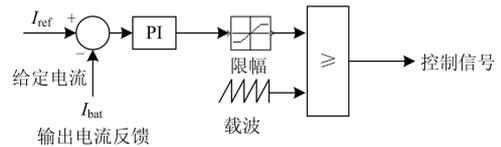


图 4 恒流放电控制框图

Fig. 4 Block diagram of constant-current discharge

根据需求，设定放电参考电流 I_{ref} 。电池放电电流实测值 I_{bat} 与参考值进行比较，产生控制信号控制 S2 开关管的开通时间来控制放电电流的稳定，实现恒电流放电的目的。

2.3 误差指标

本文在比较恒压阶段策略 1 和策略 2 的电压曲线波动情况时采用误差平方和和均方根误差两个指标。

误差平方和指电压波动曲线与直线 $U=270$ 对应点的误差的平方和，计算公式如式(2)。

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

均方根误差是电压波动曲线与恒压直线 $U=270$ 对应点误差平方和均值的平方根，计算公式如式(3)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

其中: y_i 为实际电压曲线数据; \hat{y}_i 为恒电压直线数据; w_i 为对应点的权重系数。

3 系统仿真分析

3.1 仿真系统参数

为验证本文所提出充放电控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 上建立了电动汽车充电和放电系统的仿真模型。系统参数如下, 交流电源电压为 380 V, 交流侧耦合电感 L 取 7 mH, 电阻 R 为 0.5 Ω , 直流侧电容 C 取 1 000 μF , 直流侧储能电感 L_1 为 7 mH, 直流母线稳压电容 C_0 取 2 000 μF 。模型中充电电池 battery 类型为 Lithium-Ion, 电池标称电压 240 V, 浮充电压 270 V, 终止放电电压为 220 V, 额定容量为 90 Ah, 充电时初始荷电状态 SOC 为 40%, 放电时为 80%。

实际中电动汽车充电需 6~8 h 才能充满, 为缩短仿真时间, 本文将蓄电池的额定容量设为 4 Ah, 所以在恒流充电模式下, 电池电压很快升高, 然后系统进入恒压充电阶段, 充电电流不断减小。

3.2 电动汽车充电仿真

电池电流 i_{bat} 和电压 V_{bat} 波形如图 5、图 6 所示。

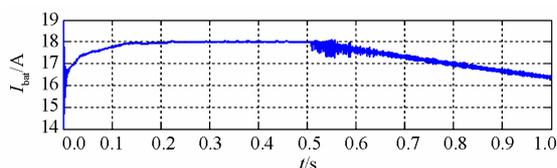


图 5 电动汽车充电电流 i_{bat} 变化曲线
Fig. 5 Current curve of EV charge

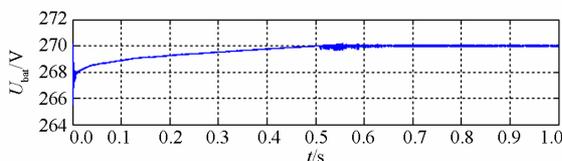


图 6 电动汽车充电电池端电压 V_{bat} 变化曲线
Fig. 6 Voltage curve of EV charge

从仿真曲线可看出, 本文所采取的充电控制策略实现了恒流恒压充电的目的。电流经短暂振荡后达到设定电流 18 A, 电池进入恒流充电区。此段时间电流保持 18 A 恒定不变, 电池端电压逐渐增大, 在 0.43 s 电压到达设定的浮充电压值 270 V, 进入恒压充电区, 电压保持恒定不变, 而电流逐渐减小。

PWM 整流器直流侧电压波形如图 7, 电池充电输出功率特性曲线和内阻曲线如图 8、图 9。

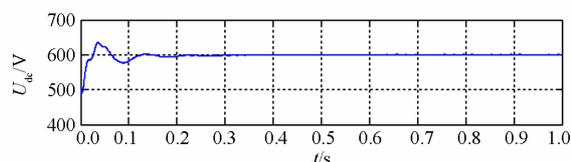


图 7 电动汽车充电 PWM 整流器直流侧电压 V_{dc} 曲线
Fig. 7 PWM rectifier DC side voltage curve of EV charge

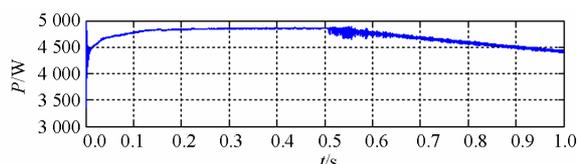


图 8 电动汽车充电输出功率 P 特性曲线
Fig. 8 Output power characteristic curve of EV charge

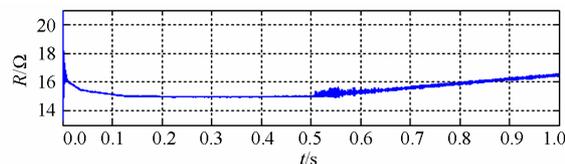


图 9 电动汽车充电电池内阻 R 变化曲线
Fig. 9 Resistance curve of battery

从图 7 可看出, PWM 整流器控制策略可以保证交流电经过整流后, 直流侧电压恒定在 600 V。图 8、图 9 为电动汽车输出功率的特性曲线和电池内阻 R 变化曲线, 呈非线性, 符合蓄电池实际的充电情况。

3.3 充电控制策略对比

对比策略 1 和策略 2 两种充电控制策略, 图 10 为采用策略 1 充电时的电池端电压曲线, 图 11 为采用策略 2 充电时的电池端电压曲线。

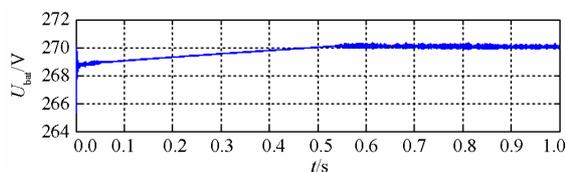


图 10 策略 1 方式下电池端电压 V_{bat} 变化曲线
Fig. 10 Voltage curve with charge strategy 1

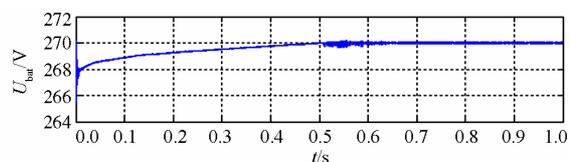


图 11 策略 2 方式下电池端电压 V_{bat} 变化曲线
Fig. 11 Voltage curve with charge strategy 2

从图 10、图 11 的对比可以看出，在 0.6 s 进入恒压阶段，本文所提出的充电控制策略（策略 2）的电压波动明显小于策略 1 的情况。由于策略 2 由恒流向恒压模式的转换需要切换控制，故在 0.5~0.6 s 的恒压阶段电压波动较大。为量化两种策略下电压波动情况，分别将策略 1 和策略 2 中 0.6 s 后电压曲线与 270 V 恒定电压直线进行比较，误差如表 1 所示。

表 1 电压波动误差

Table 1 Error of voltage fluctuation

策略	误差平方和	均方根误差
策略 1	3 915	0.086
策略 2	546.2	0.032

由表 1 可以看出，策略 1 的误差平方和和均方根误差远远大于策略 2 的值，即本文的充电控制策略电压波动性小于策略 1，证明了本文所提出策略的优越性。

3.4 电动汽车放电算例仿真

放电电流波形如图 12 所示，放电时的输出功率特性曲线如图 13 示。

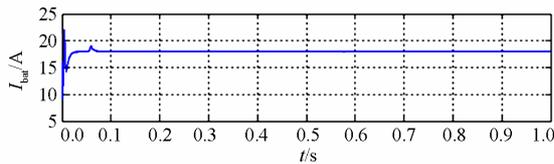


图 12 电动汽车放电电流 i_{bat} 变化曲线

Fig. 12 Current curve of EV discharge

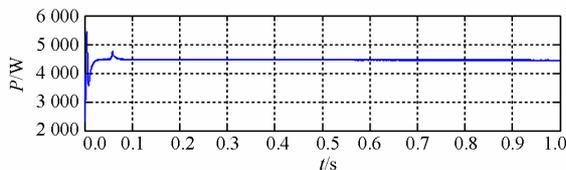


图 13 电动汽车放电输出功率 P 特性曲线

Fig. 13 Output power curve of EV discharge

仿真结果表明，本文放电控制策略实现了恒流放电的目的。放电电流经短暂振荡后，达到设定电流值并保持恒定放电。随着放电的进行，电池端电压将缓慢下降。

由于放电过程中电压变化较小，从图 13 可以看出，电池输出功率基本恒定。电动汽车参与 V2G 工作时，可以根据需要设置相应的输出功率。

4 结论

(1) 本文建立了电动汽车充电负荷模型，其输

出功率曲线的仿真结果与文献[9]中实测电池充电过程数据拟合曲线相同。并且完成了电动汽车的充放电控制策略，仿真结果验证了所建立模型的正确性，能够实现恒流恒压模式充电和恒流模式放电。

(2) 本文仿真比较了策略 1 和策略 2 在恒压充电阶段的电压波动情况，并分别计算了与期望电压值的误差平方和与均方根误差，仿真结果及误差指标证明了所提出控制策略的优越性。

参考文献

[1] 钟童科. 大规模电动汽车的充放电行为及其对电网的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
ZHONG Tong-ke. A study on charging-discharging behaviors of large-scale electric vehicles and their impact on power grid[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[2] KEMPTON W, LETENDRE S. Electric vehicles as a new power source for electric utilities[J]. Transportation Research (Part D), 1997, 3(2): 157-175.

[3] 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 Shao-yun, HUANG Liu, LIU Hong. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 1-5.

[4] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 30-37.
YAO Wei-feng, ZHAO Jun-hua, WEN Fu-shuan, et al. A charging and discharging strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-37.

[5] 李惠玲, 白晓民, 谭闻, 等. 电动汽车入网技术在配电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(增刊 1): 22-27.
LI Hui-ling, BAI Xiao-min, TAN Wen, et al. Application of vehicle to grid to the distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(S1): 22-27.

[6] 鲍谚, 姜久春, 张维戈, 等. 电动汽车移动储能系统模型及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 36-43.
BAO Yan, JIANG Jiu-chun, ZHANG Wei-ge, et al. Model and control strategy of electric vehicle mobile energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 36-43.

- [7] 于大洋, 宋曙光, 张波, 等. 区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 24-29.
YU Da-yang, SONG Shu-guang, ZHANG Bo, et al. Synergistic dispatch of PEVs charging and wind power in Chinese regional power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 24-29.
- [8] 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.
HU Ze-chun, SONG Yong-hua, XU Zhi-wei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [9] 曹琦琦. V2G 建模及接入系统分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
CAO Qi-qi. Research on modeling and access system analysis of V2G[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [10] 宋维庭, 耿新民. 基于 PWM 的电动汽车 V2G 双向充放电装置研究[J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(3): 280-284.
SONG Wei-ting, GENG Xin-min. Research on charge and discharge equipment of V2G technology based on PWM[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(3): 280-284.
- [11] 蔚兰, 岳燕, 刘启中, 等. 电动汽车蓄电池充放电装置控制系统设计[J]. 电力电子技术, 2009, 43(9): 69-71.
WEI Lan, YUE Yan, LIU Qi-zhong, et al. Research on the DC traction power supply of the urban rail transit[J]. Power Electronics, 2009, 43(9): 69-71.
- [12] 刘庆丰, 冷朝霞, 孙晋坤, 等. 基于简化统一模型的 DC-DC 开关变换器数字优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 118-125.
LIU Qing-feng, LENG Zhao-xia, SUN Jin-kun, et al. A novel optimal control for DC-DC converters based on simplified unified model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 118-125.
- [13] 张晓峰, 吕征宇. 混合动力车用全数字电流控制型双向 DC/DC 变换器[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 84-89.
ZHANG Xiao-feng, Lü Zheng-yu. Digital-current controlled bi-directional DC/DC converter in the hybrid electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 84-89.
- [14] 丁石川, 陈权, 薛钟兵, 等. 智能电动汽车充放电技术分析仿真研究[J]. 电气应用, 2013, 32(9): 24-28.
DING Shi-chuan, CHEN Quan, XUE Zhong-bing, et al. Simulation and analysis of intelligent electric vehicles' charging and discharging[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(9): 24-28.
- [15] 高洋. 电动汽车储能对电力系统的影响及控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
GAO Yang. Research on influence and control method of EV energy storage of the power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [16] 何启晨. 电动汽车车载充放电电机功率变换拓扑及其控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
HE Qi-chen. Research of the power converter and its control strategies used in on-board bi-direction charge of electric vehicle[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [17] 梁宵, 肖志恒, 李浪. V2G 双向功率变换电动汽车充放电系统及其控制方法[J]. 电源技术应用, 2012(10): 75-76.
LIANG Xiao, XIAO Zhi-heng, LI Lang. Charging and discharging system of electric vehicle with bi-directional power converter and its control method[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2012(10): 75-76.
- [18] 任增田. 基于 PWM 整流技术的充放电系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
REN Zeng-tian. The research of charging and discharging system based on PWM rectifier technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [19] 杨伟新, 黄梅. 基于 simulink 的 V2G 充放电电机建模与仿真[J]. 电子设计工程, 2011, 19(12): 136-139.
YANG Wei-xin, HUANG Mei. The research of V2G bi-direction charger based on simulink[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(12): 136-139.
- [20] 张宏坡. 基于 V2G 应用的车载充放电电机的研究与设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
ZHANG Hong-po. Research and design of charging-discharging device on vehicle for V2G

- application[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [21] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
ZHANG Xing, ZHANG Chong-wei. PWM rectifier and its control[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [22] 康伟, 张丽霞, 康忠健. 电流型双向 PWM 整流器 SPWM 与 SVPWM 控制输出特性比较[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 39-44.
KANG Wei, ZHANG Li-xia, KANG Zhong-jian. Comparative studies on SPWM and SVPWM control-output characteristic of bi-direction current source rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 39-44.
- [23] 林渭勋. 现代电力电子电路[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
LIN Wei-xun. Modern power electronic circuit[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [24] 冯婧. 基于 PWM 整流器的可逆充电技术的研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2009.
FENG Jing. Research on reversible charge and discharge device technology based on PWM rectifier[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2009.
- [25] 郑世芳. 智能可逆充放电装置的研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2007.
ZHENG Shi-fang. Research on intelligent reversible charge and discharge device[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2007.
- [26] 魏克新, 高国振, 李华平, 等. 用于电池测试系统的双向 DC/DC 变换器的研究[J]. 电气传动, 2010, 40(2): 37-40.
WEI Ke-xin, GAO Guo-zhen, LI Hua-ping, et al. Research of bi-directional DC/DC converter using in the battery test system[J]. Electric Drive, 2010, 40(2): 37-40.
- [27] 李瑞生, 王晓雷, 周逢权, 等. 灵巧潮流控制的电动汽车智能化充电站[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 87-90.
LI Rui-sheng, WANG Xiao-lei, ZHOU Feng-quan, et al. The system of electric vehicle intelligence charge station with smart power flow control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 87-90.
- [28] 周逢权, 连湛伟, 王晓雷, 等. 电动汽车充电站运营模式探析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 63-66.
ZHOU Feng-quan, LIAN Zhan-wei, WANG Xiao-lei, et al. Discussion on operation mode to the electric vehicle charging station[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 63-66.

收稿日期: 2013-09-26

作者简介:

刘月贤(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: liuyuexianf@163.com

王天钰(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化;

杨亚宇(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。