

具有 V2G 功能的电动汽车快速充放电方法

吴凯,程启明,李明,白园飞,陈根

(上海电力学院 自动化工程学院,上海 200090)

摘要: 为充分发挥电动汽车的能量双向流动特性,提出一种具有 V2G 功能的电动汽车快速充放电方法。可逆充放电电机主要包括可逆 PWM 整流器和双向 DC/DC 变换器。可逆 PWM 整流器采用前馈解耦的电压电流双闭环控制,并用 LCL 滤波代替 L 滤波,在保证相同滤波效果条件下,降低电感值并提高了系统的响应速度;双向 DC/DC 变换器采用电流闭环控制来有效控制充放电电流维持在恒定值,采用脉冲充电和恒流放电使电动汽车的充放电电流维持在 35 A 左右,实现快速充放电功能。仿真结果证明了所提方法的正确性和可行性。

关键词: 电动汽车; 电池; V2G; 可逆 PWM 整流器; 双向 DC/DC 变换器; 脉冲充电; 恒流放电; 前馈控制

中图分类号: TM 76;U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.006

0 引言

电动汽车 EV(Electric Vehicle)清洁、环保、节能,成为未来新能源汽车发展的主要方向,也是解决全球能源紧缺和环境污染问题的有效途径^[1-2]。电动汽车和电网互动技术 V2G(Vehicle to Grid)是现代智能电网和智能微电网的重要组成部分,可以调节电网峰谷差,降低电网传统调峰、调频的备用容量,还有利于电网大量吸纳可再生能源发电量,提高电网运行的稳定性和经济性^[3-4]。可逆充放电电机是电动汽车和电网实现能量双向流动的载体,主要由可逆 PWM 整流器和双向 DC/DC 变换器组成,研究其高功率因数快速充放电对实现 V2G 功能具有重要意义。

三相电压型 PWM 整流器具有网侧电流谐波低、单位功率因数及高恒定直流侧电压等优点^[5-6],得到了广泛关注。文献[7]提出一种基于 SVPWM 的直接电流控制方法,实现电动汽车的高功率因数充电;文献[8]提出一种通过施加恒定扰动来抑制起动瞬间网侧电流冲击的方法,并提出利用 q 轴电流给定不为 0 的方法来校正整流器的功率因数;文献[9]提出在同样的谐波要求下,相对纯电感型滤波,LCL 滤波可以降低电感值的大小。对双向 DC/DC 变换器的研究集中在电路拓扑^[10-11]和控制^[12-14]2 个方面。要实现电动汽车的快速充放电,必须解决动力电池的极化问题^[15],文献[16]提出采用脉冲电流充电,适时进

行反向放电,消除电池的极化现象。

本文将可逆 PWM 整流器和双向 DC/DC 变换器应用到电动汽车快速充放电技术中,对可逆 PWM 整流器采用前馈解耦的电压电流双闭环控制策略,有效地提高了充电机的功率因数,保持充放电过程中直流母线电压的稳定;同时用 LCL 滤波器代替 L 滤波器,在达到相同滤波效果的前提下降低了电感值,提高了系统的响应速度。对双向 DC/DC 变换器采用电流闭环控制,并对充放电分别采用脉冲充电和恒流放电,有效地控制了充放电的电流,实现快速充放电功能。

1 可逆充电机的工作原理

非车载式可逆充电机主要包括可逆 PWM 整流部分、双向 DC/DC 变换部分、动力电池以及电池管理系统 BMS(Battery Management System),充电整体结构如图 1 所示。根据 BMS 对动力电池剩余电量的监测,设定不同的充放电运行模式,实现充电机潮流双向流动。充电时,从电网接入交流电由整流装置转换为稳定的直流电压,再经 DC/DC 变换装置降压后给动力电池充电;放电时,动力电池经 DC/DC 变换装置升压后逆变为交流电接入电网。



图 1 充电机整体框图

Fig.1 Overall diagram of charger

1.1 可逆 PWM 整流器

可逆 PWM 整流器由基于 LCL 滤波的三相电压型 PWM 整流器组成,既是电动汽车充电时的供电电源,又是电动汽车放电时的负载,且在电池的充放电过程中,具有单位功率因数、电能双向流动、低谐波

收稿日期:2013-07-01;修回日期:2013-12-24

基金项目:上海市重点科技攻关计划项目(11510500800);上海市教委“085 工程”科研项目(Z08509122);上海市教委重点学科建设项目(J51301)

Project supported by the Key Science and Technology Plan of Shanghai Science and Technology Commission(11510500800), the Shanghai Municipal Education Commission “085 Project” Research Projects(Z08509122) and Shanghai Municipal Education Commission Leading Academic Discipline Project(J51301)

污染等优点。主电路拓扑结构如图 2 所示,图中, e_a 、 e_b 、 e_c 为电网三相交流电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为三相交流电流; U_{dc} 和 I_{dc} 分别为直流侧电压和电流; L_g 和 L 分别为网侧电感和整流侧电感; C_f 和 C 分别为滤波电容和直流侧电容; R_d 为阻尼电阻。

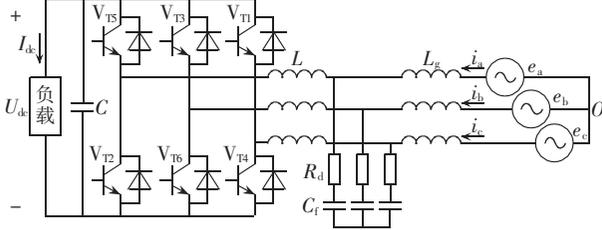


图 2 LCL 滤波的 PWM 整流器拓扑结构图

Fig.2 Topology of PWM rectifier with LCL filter

在相同滤波条件下,采用 LCL 滤波比采用单 L 滤波使用更小的电感值^[9],且在低频情况下,LCL 滤波器可以等效为 L 滤波器,等效电感 $L_T=L+L_g$ 。忽略滤波电容 C_f ,在以电网电压定向的同步旋转坐标系下,PWM 整流器其数学模型为:

$$\begin{cases} u_d = L_T \frac{di_d}{dt} - \omega L_T i_q + e_d \\ u_q = L_T \frac{di_q}{dt} + \omega L_T i_d + e_q \end{cases} \quad (1)$$

其中, u_d 、 u_q 分别为整流器交流侧电压矢量的 d 、 q 分量; i_d 、 i_q 分别为整流器交流侧电流矢量的 d 、 q 分量; e_d 、 e_q 分别为交流电源电压矢量的 d 、 q 分量。

1.2 双向 DC/DC 变换器

Buck-Boost 双向 DC/DC 变换器结构简单、可靠性高,易实现电压的双向控制,能满足电动汽车 V2G 的功能,拓扑结构如图 3 所示。

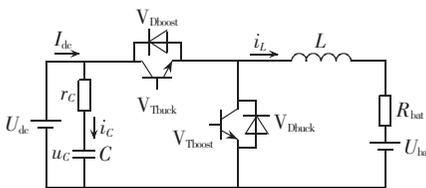


图 3 双向 DC/DC 变换器拓扑结构图

Fig.3 Topology of bi-directional DC/DC converter

电动汽车充电时,双向 DC/DC 变换电路由开关管 V_{Thuck} 、 V_{Dboost} 和电感 L 构成,工作在 Buck 模式。充电回路的电压基尔霍夫方程如下:

$$U_{dc} = L \frac{di_L}{dt} + R_{bat} i_L + U_{bat} \quad (2)$$

由此可得充电回路的传递函数为:

$$\frac{i_L(s)}{U_{dc}(s) - U_{bat}(s)} = \frac{1/R_{bat}}{\tau_1 s + 1} \quad (3)$$

其中, U_{dc} 为输入电压; U_{bat} 为电池充电电压; i_L 为充电电流; R_{bat} 为电池内阻; L 为滤波电感; τ_1 为电磁惯性时间常数。

充电回路的动态结构模型如图 4 所示。

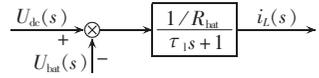


图 4 充电回路的动态结构

Fig.4 Dynamic structure of charging loop

放电时,DC/DC 变换电路由开关管 $V_{Thboost}$ 、 V_{Dboost} 和滤波电感 L 构成,变换器工作在 Boost 模式。放电回路的电压基尔霍夫方程如下:

$$L \frac{di_L}{dt} + R_{bat} i_L + U_{bat} = 0 \quad (4)$$

放电回路的传递函数为:

$$\frac{i_L(s)}{-U_{bat}(s)} = \frac{1/R_{bat}}{\tau_1 s + 1} \quad (5)$$

2 电动汽车充放电控制策略

2.1 PWM 整流器控制策略

由式(1)可以看出 d 、 q 轴变量相互耦合,为此提出基于 PI 调节器的前馈解耦控制策略并采用双闭环控制系统。采用基于 PI 调节器的前馈解耦控制策略时, u_d^* 、 u_q^* 控制方程为:

$$\begin{cases} u_d^* = -(K_{ip} + K_{il}/s)(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + u_d \\ u_q^* = -(K_{ip} + K_{il}/s)(i_q^* - i_q) - \omega L i_d + u_q \end{cases} \quad (6)$$

其中, K_{ip} 、 K_{il} 为电流内环比例调节增益和积分调节增益; u_d^* 、 u_q^* 为电压指令值; i_d^* 、 i_q^* 为电流指令值。

解耦后系统的结构框图如图 5 所示。

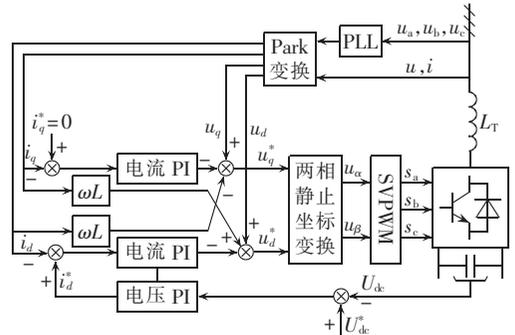


图 5 基于前馈解耦控制策略的控制结构

Fig.5 Structure of feedforward decoupled control

按典型二阶系统对电流内环 PI 参数设计^[8],将解耦后电流内环小惯性环节进行合并, d 轴和 q 轴的电流内环 PI 参数相同。电压外环 PI 参数设计与电流内环类似,电流内环和电压外环的 PI 参数分别如下:

$$\begin{cases} K_{ip} = \frac{6L_T}{15T_s K_{PWM} U_{dc}} \\ K_{il} = \frac{6L_T}{112.5T_s^2 K_{PWM} U_{dc}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_{up} = \frac{C}{5T_s} \\ K_{ul} = \frac{C}{100T_s^2} \end{cases} \quad (8)$$

其中, T_s 为开关周期; K_{PWM} 为 PWM 单元的增益; U_{dc} 为直流侧电压。

2.2 双向 DC/DC 变换器的控制策略

双向 DC/DC 变换器在不同的工作模式下对应的控制策略也不相同。本文是要控制充电和放电电流, 因此在充放电过程中都采用电流闭环控制。为消除被控量的稳态误差, 采用 PI 调节器, 控制结构如图 6(a) 所示。图中, K_s 是开环增益; τ_{oi} 是电流滤波时间常数。

根据电动汽车的常用动力电池—锂电池组的特性, 本文选择脉冲式快速充电方法对电动汽车进行充电, 放电时采用恒定大电流快速放电方法。脉冲充电使用间断的电流充电, 充电过程中有瞬时电流放电, 提高了电池的接受能力, 排除了极化现象, 缩短了充电时间, 提高了充电效率^[6]; 恒定大电流快速放电提高了电动汽车瞬间向电网供电的能力, 可用于电力系统的调峰和调频。充放电的控制框图如图 6(b) 和 6(c) 所示。

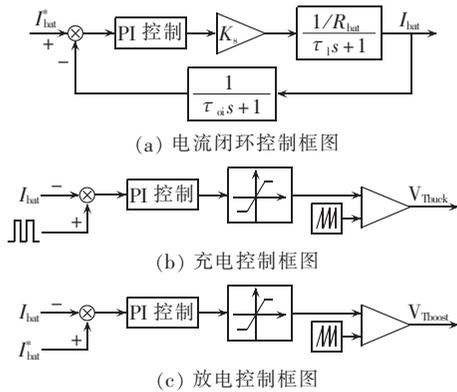


图 6 双向 DC/DC 控制结构

Fig.6 Structure of bi-directional DC-DC control

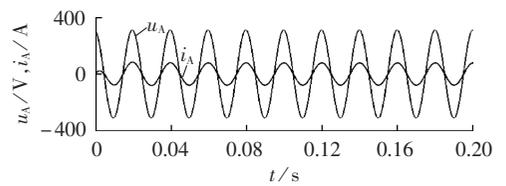
3 仿真结果分析

使用 MATLAB/Simulink 作为本文的仿真工具, 选择 SimPowerSystem 中自带的锂电池作为电动汽车的动力电池, 建立仿真模型。根据电动汽车动力电池的要求, 设置锂电池的标称电压为 150 V, 电池容量为 100 A·h, 充放电均采用大电流 (0.3 C, 即 30 A, C 为电池充放电倍率) 方式进行。

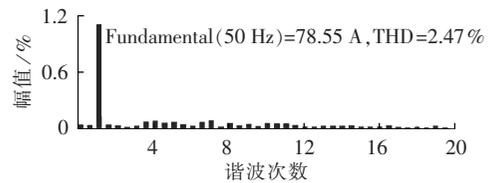
3.1 充电仿真

充电时可逆 PWM 整流器工作在整流状态, 电网侧电压、电流及功率波形如图 7 所示。从图 7 中可以看出网侧电流和电压保持同相位, 有功功率从电网流向电池, 无功功率为 0, 实现功率因数为 1, 且采用 LCL 滤波使电流谐波畸变保持在 3% 以下。

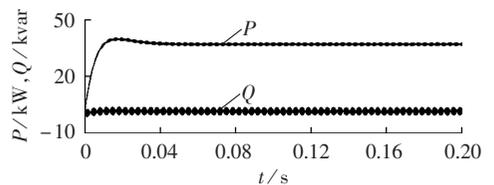
双向 DC/DC 变换器工作在降压模式, 电池的充电电压、充电电流如图 8 所示。采用基于电流闭环控制的脉冲充电方式, 充电电流保持在 0 A 和 35 A 这



(a) 网侧 A 相电压和电流



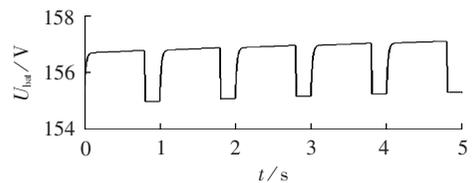
(b) A 相电流谐波频谱



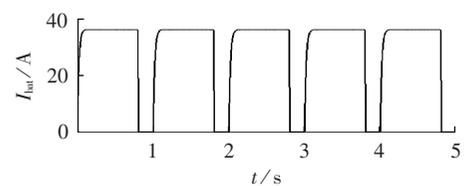
(c) 有功功率和无功功率

图 7 PWM 整流器波形

Fig.7 Waveforms of PWM rectifier



(a) 充电电压



(b) 充电电流

图 8 电池充电波形

Fig.8 Waveforms of battery charging

2 个状态, 充电电压随着充电时间的增长逐渐脉冲式增大。

为验证本文所提脉冲充电方法的快速性, 又对恒流和恒压 2 种充电方法进行对比仿真。设置 3 种充电方式的电池初始值相同, 电池的荷电状态 SOC (State Of Charge) 随时间的变化如图 9 所示。可以看出, 脉冲充电速度最快, 其次是恒流充电, 而恒压充电速度最慢。

3.2 放电仿真

放电时, 电动汽车动力电池通过电压提升后输入到可逆 PWM 整流器, 双向 DC/DC 变换器部分的仿真结果如图 10 所示。放电电流保持在 35 A 不变, 电池 SOC 线性下降, 放电电压经过 DC/DC 变换器提升后迅速达到稳定值, 保证了逆变器的输入电压。

放电时 PWM 整流器工作在逆变状态, 波形如图

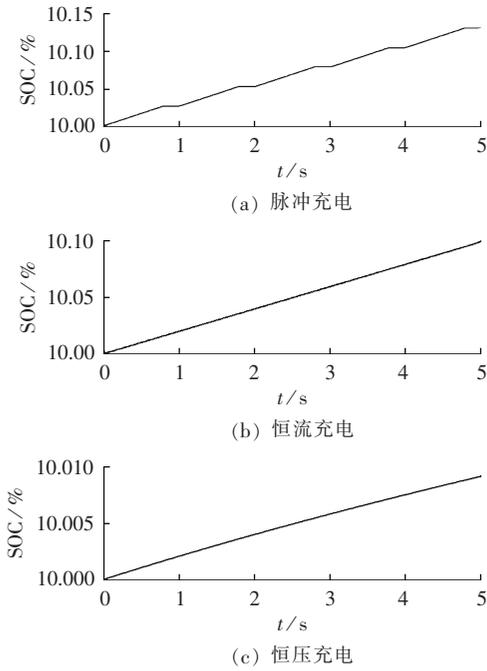


图 9 SOC 变化
Fig.9 Waveforms of SOC

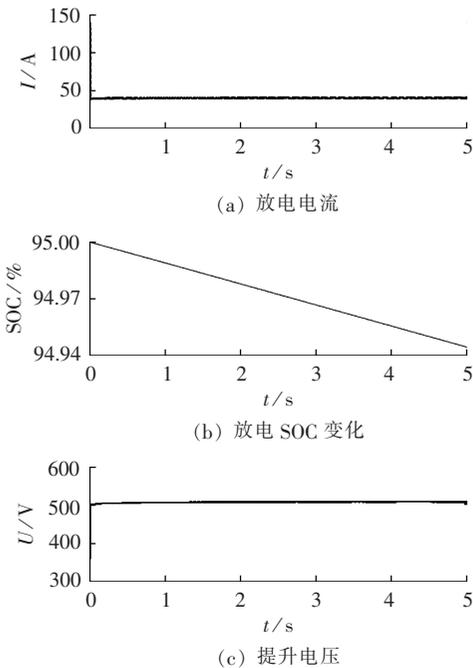
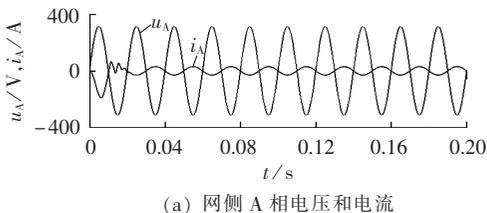


图 10 电池放电波形
Fig.10 Waveforms of battery discharging

11 所示。可以看出,网侧电压和电流相位相差 180° ,有功功率从电池流向电网,无功功率为 0,实现功率因数为 -1 ,同时网侧电流谐波畸变率仅为 2.59% 。



(a) 网侧 A 相电压和电流

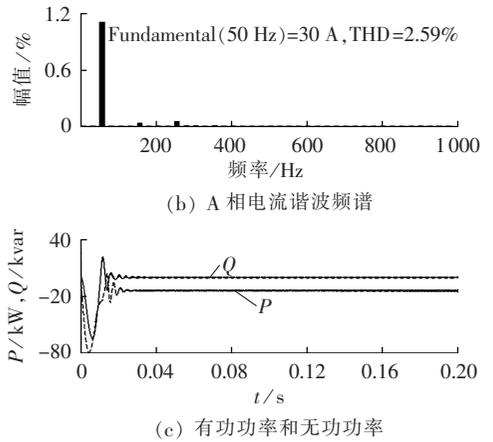


图 11 PWM 逆变器波形
Fig.11 Waveforms of PWM inverter

4 结论

本文建立了具有 V2G 功能的电动汽车充放电电机模型,将可逆 PWM 整流器和双向 DC/DC 变换器应用到电动汽车快速充放电技术中。可逆 PWM 整流器选择基于 LCL 滤波的三相电压型 PWM 整流器的拓扑结构,采用前馈解耦的电压电流双闭环控制策略,实现充放电的功率因数为 ± 1 ,把网侧电流谐波畸变率控制在 3% 以下,同时保证直流母线电压快速稳定。双向 DC/DC 变换器采用电流闭环控制,并对充放电分别采用脉冲充电和恒流放电,有效地控制了充放电的电流,实现快速充放电功能。仿真结果表明,网侧电流谐波小,功率双向流动,且功率因数近似达到 ± 1 ,系统动态响应快,控制方法简单且易于实现。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王建,吴奎华,刘志珍,等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):47-52.
WANG Jian,WU Kuihua,LIU Zhizhen,et al. Impact of electric vehicle charging on distribution network load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8): 47-52.
- [3] 刘晓飞,张千帆,崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报,2012,27(2):121-127.
LIU Xiaofei,ZHANG Qianfan,CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(2):121-127.
- [4] MARRA F,SACCHETTI D,TRAEHOLT C,et al. Electric vehicle requirements for operation in smart grids[C]//2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Manchester,UK:IEEE Press,2011:1-7.

- [5] 马宏伟,李永东,郑泽东,等. 一种 PWM 整流器的模型预测控制方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):21-24.
MA Hongwei,LI Yongdong,ZHENG Zedong,et al. Model predictive control of PWM rectifier[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):21-24.
- [6] 丁祖军,刘保连,倪伟. PWM 整流器中优化变结构控制策略的设计[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):76-83.
DING Zujun,LIU Baolian,NI Wei. Design of improved variable structure control for PWM rectifier[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):76-83.
- [7] SHI Lei,XU Haiping,LI Dongxu,et al. A novel high power factor PWM rectifier inverter for electric vehicle charging station [C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS). Beijing,China:IEEE Press,2011:16.
- [8] 郭伟,王跃,王兆安,等. 应用于电动汽车充电站的 PWM 整流器控制方法[J]. 电工技术学报,2012,27(2):153-157.
GUO Wei,WANG Yue,WANG Zhao'an,et al. Control strategy for PWM rectifier in electrical vehicle charging station [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(2):153-157.
- [9] LISERRE M,BLAABJERG F,HANSEN S. Design and control of an *LCL*-filter-based three-phase active rectifier[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2005,41(5):1281-1290.
- [10] 朱成花,张方华,严仰光. 两端稳压软开关双向 Buck/Boost 变换器研究[J]. 南京航空航天大学学报,2004,36(2):227-230.
ZHU Chenghua,ZHANG Fanghua,YAN Yangguang. Development of dual voltage control soft-switching bi-directional Buck/Boost converter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2004,36(2):227-230.
- [11] 刘胜永,唐安琼. 一种新颖的软开关双向 DC/DC 变换器分析与设计[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):28-31.
LIU Shengyong,TANG Anqiong. Analysis and design of soft-switching bidirectional DC-DC converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):28-31.
- [12] 张方华,朱成花,严仰光. 双向 DC-DC 变换器的控制模型[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):46-49.
ZHANG Fanghua,ZHU Chenghua,YAN Yangguang. The controlled model of bi-directional DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(11):46-49.
- [13] JAIN M,JAIN K P,DANIELE M. A bi-directional DC-DC converter topology for low power application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2000,15(4):595-600.
- [14] 景中焰,黄熙,郑琰,等. 一种双相结构的同步 Buck DC/DC 变换器[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):113-117.
JING Zhongzhao,HUANG Xi,ZHENG Yan,et al. Two-phase synchronous Buck DC/DC converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):113-117.
- [15] IKEYA T. Charging operation with high energy efficiency for electric vehicle value-regulated lead-acid battery plates[J]. Journal of Power Sources,2000,91:130-136.
- [16] 王喜瑜,丁军,周希德. 电动汽车动力蓄电池快速充电关键技术探究[J]. 北方交通大学学报,1997,21(4):485-490.
WANG Xiyu,DING Jun,ZHOU Xide. Research on key techniques for quick charging of electrical vehicle's batteries [J]. Journal of Northern Jiaotong University,1997,21(4):485-490.

作者简介:



吴 凯

吴 凯(1989-),男,江苏镇江人,硕士研究生,研究方向为电动汽车接入电网相关问题(**E-mail**:wukai_just@163.com);

程启明(1965-),男,江苏盐城人,教授,研究方向为电力系统自动化、发电过程控制、先进控制及应用等(**E-mail**:chengqiming@sina.com)。

Fast charging and discharging method for electric vehicle with V2G function

WU Kai,CHENG Qiming,LI Ming,BAI Yuanfei,CHEN Gen

(College of Automation Engineering,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China)

Abstract: To make full use of the bi-directional energy flow of EV(Electric Vehicle),a fast charging and discharging method is proposed for EV with V2G function. The reversible charger of EV contains a reversible PWM rectifier and a bi-directional DC/DC converter. The former is controlled by the feedforward decoupled voltage-current dual close loops and its *L* filter is replaced by *LCL* filter,which decreases the inductance for same filtering effect and improves the system response speed;the latter is controlled by the current close loop to effectively keep the pulse charging or constant-current discharging current around 35 A for realizing the fast charging and discharging function. Simulative results show the validity and feasibility of the proposed method.

Key words: electric vehicles; electric batteries; V2G; reversible PWM rectifier; bi-directional DC/DC converter; pulse charging; constant-current discharging; feedforward control