

基于 V2G 的双向 AC/DC 变换器控制技术及 电流畸变问题的研究

荆 磊¹, 张俊峰², 邱茂航¹, 刘 波¹, 陈 敏¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080)

摘要: 随着智能电网和电动汽车技术的发展, V2G (vehicle-to-grid) 概念受到越来越多的关注, 其核心思想在于电动汽车和电网的双向互动, 通过调度实现电动汽车的有序充放电, 缓和新能源发电接入电网带来的波动, 优化电网运行。双向变换器是实现 V2G 技术的核心装置, 其不仅需要实现能量的双向流动, 还要能够控制输入输出的电能质量, 这便对变换器的控制提出了更高的要求。针对双向变换器的关键控制技术进行了分析、比较, 选取了单极性 PWM 调制和平均电流控制作为本文所提双向变换器的控制策略; 同时就单极性调制下电流过零点畸变的问题进行了理论分析, 并且提出了一种改进的过零点控制策略。最后通过一个 3 kW 的双向 AC/DC 变换器实验平台证实了所提方法的有效性和可行性。

关键词: 双向 AC/DC 变换器; V2G; 单极性调制; 电流过零点畸变

Research on Control Technology and Current Distortion of Bidirectional AC/DC Converter Based on V2G

JING Lei¹, ZHANG Junfeng², QIU Maohang¹, LIU Bo¹, CHEN Min¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd, Guangzhou 510080, China)

Abstract: With the development of smart grid and electric vehicle (EV) technology, the concept of vehicle-to-grid (V2G) has attracted more and more attention. Its core idea is the interaction between EVs and power grid, in which orderly charging and discharging of EVs is realized through scheduling, and the fluctuations brought by the connection of new energy power generation to power grid is alleviated. In this way, the operation of power grid is optimized. Bidirectional converter is a core device to realize the V2G technology, which not only needs to realize the bidirectional flow of energy but also needs to control the power quality of input and output, thus leading to higher control requirements for the converter. In this paper, the key control techniques of a bidirectional converter are analyzed and compared, and the control strategies of unipolar PWM modulation and average current control are selected for the bidirectional converter. Meanwhile, the problem of current zero-crossing distortion under unipolar modulation is theoretically analyzed, and an improved zero-crossing control strategy is proposed to solve this problem. At last, the validity and feasibility of the proposed method was proved through tests on a 3 kW bidirectional AC/DC converter platform.

Keywords: bidirectional AC/DC converter; V2G; unipolar modulation; current zero-crossing distortion

近年来, 随着智能电网和电动汽车技术的发展, V2G 技术也受到了越来越多的关注。V2G 技术

的核心思想在于电动汽车和电网的互动, 即利用大量电动汽车的储能作为新能源发电接入电网的缓冲。当电网的负荷过高时, 电动汽车的动力电池放电, 向电网馈电; 当电网负荷低时, 电动汽车存储电网过剩的发电量。通过智能调度来安排充放电时间, 实现合理有序的充放电管理, 从而可以实现削

收稿日期: 2017-11-23; 修回日期: 2018-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51477153)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51477153)

峰填谷,提高电网的运行效率,优化电网运行^[1-6]。而负责实现充、放电功能的双向 AC/DC 变换器,是 V2G 技术中的核心和指令执行装置,必须能够实现功率的双向流动,控制输入、输出的电能质量,因此对其控制技术提出了较高的要求。

本文对适用于双向 AC/DC 变换器的控制技术进行了分析比较,重点研究了单极性脉宽调制 PWM (pulse width modulation)、双极性 PWM 以及单极倍频 PWM 策略,分析了其优劣势,选择了单极性 PWM 和基于平均电流控制的双环控制策略。双环中的电压外环用来控制母线电压,用来获得一个稳定的直流母线电压,并通过采样母线电压与参考电压比较生成电流基准,且外环带宽设计的较小以有效减弱外部噪声带来的干扰。电流内环通过采样电感电流进行反馈,实现电流跟踪电网电压变化,获得较高的正弦度和功率因数,环路补偿简单,响应速度较快。单极性 PWM 由于每个周期只有 2 个开关管交替导通,因此相较于双极性和单极性倍频调制可以降低开关损耗,提高整机效率,且单极性调制的谐波性能要优于双极性调制,开关管承受的 du/dt 也比双极性调制下要小^[7-11],虽然单极性倍频 PWM 策略也能减小电感电流纹波,但是其共模特性较差,且功率开关管全部工作于高频开关状态,导致整机开关损耗较大,因此本文通过综合分析比较选取了单极性 PWM 方式。

单极性调制具有较低的开关损耗和较小的共模干扰等优势,但是电流波形在过零点附近会出现畸变^[12-15]。

单极性 PWM 方式下的电流过零畸变问题使得双向 AC/DC 变换器的电流总谐波畸变 THD (total harmonic distortion) 增加,降低了电能变换质量。根据 IEEE Std.929-2000 标准规定,变换器的并网电流 THD 要小于 5%,电流过零点畸变问题对双向车载变换器的实际应用造成了不利影响,研究改进的控制策略来解决电流过零畸变问题十分必要。本文对电流过零点畸变的主要原因进行了分析,得出慢管切换时调制波和电网电压不同步是电流过零畸变的产生的主要原因。基于此提出了一种改进的控

制策略,即通过补偿调制波和电网电压之间的相差来优化正负半周期工频桥臂开关管的切换,从而解决了电流过零点畸变的问题。最后通过一个 3 kW 的双向 AC/DC 变换器实验平台验证了该方法的可行性和有效性。

1 双向变换器主要控制策略研究

1.1 电流连续模式 (CCM) 下电流控制策略

电路工作于电流断续模式 DCM (discontinuous conduction mode) 时,最大峰值电流和电流纹波都比较大,开关管等器件的电流应力也比较大,一般适用于中小功率场合,因此本文中的 3 kW 的双向变换器实验平台采用的是电流连续模式 CCM (continuous conduction mode) 工作模式,其控制系统框图如图 1 所示。

CCM 控制根据电感电流的控制方法又可以分为平均电流控制、峰值电流控制和滞环电流控制等,控制策略如图 2 所示。

峰值电流控制如图 2(a) 所示,通过采样电感电流与参考基准进行比较,据此生成 PWM 控制信号,通过占空比来对电流进行调节控制。但是峰值电流控制对噪声比较敏感,而且在占空比超过 0.5 时会出现控制不稳定,需要额外加斜坡补偿。

滞环电流控制如图 2(b) 所示,电流参考有上下两个阈值。滞环电流控制具有动态响应快、控制模式自带限流功能等优点,但是滞环电流控制在一

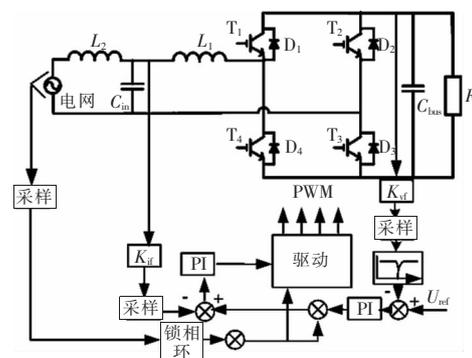


图 1 双向 AC/DC 变换器控制系统框图

Fig.1 Block diagram of control system of the bidirectional AC/DC converter

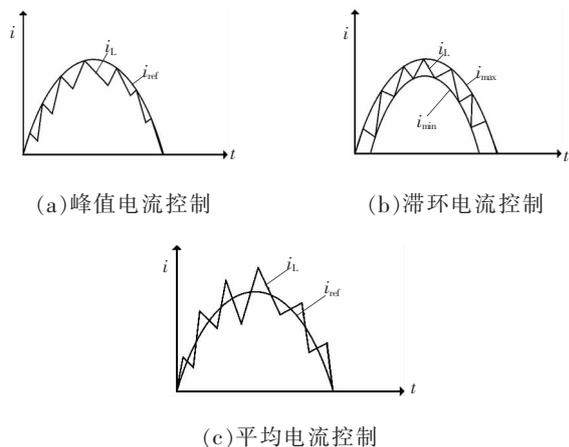


图 2 CCM 模式下电流控制策略

Fig.2 Current control strategies in CCM mode

个周期内频率持续变化,容易降低电路 EMI 性能。

平均电流控制如图 2(c)所示,同样也是采样电感电流,并与电流参考比较生成 PWM 控制信号。平均电流控制一般采用双环路控制,电压外环带宽较窄,环路响应速度慢,可以有效地减弱干扰对控制环路的影响;电流内环响应较快,使得控制的电流可以准确地跟踪参考。而且在一个周期内频率恒定,EMI 性能比滞环电流控制好,控制环路设计也较为简单。通过以上的比较分析可以知道,平均电流控制具有较优越的性能,故本文中实验平台采用的为平均电流控制方法。

1.2 PWM 方式的分析比较

脉冲宽度调制 PWM 在多种电力电子变换器中得到了越来越多的应用,其也发展出了各种不同类型的 PWM 策略。在多种调制方法中,有 3 种调制方式使用的最为广泛,分别是单极性 PWM、双极性 PWM 以及单极性倍频 PWM,对于其他一些调制方案,如随机 PWM、简化 PWM 等,虽然它们在减小 EMI 和开关损耗等方面具有优势,但是由于其复杂的控制策略,难以进行计算和实现,故不经常被采用。因此本文只针对前 3 种 PWM 策略进行分析比较。

本文中双向 AC/DC 变换器所采用的拓扑如图 3 所示。不同调制方式下的电感电流如图 4 所示。当电路工作于单极性 PWM 下时,电感电流的变化如图 4(a)所示,双极性调制和单极性倍频调制下

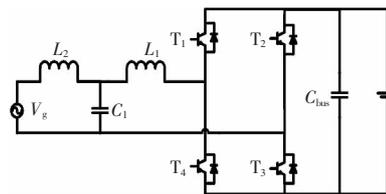
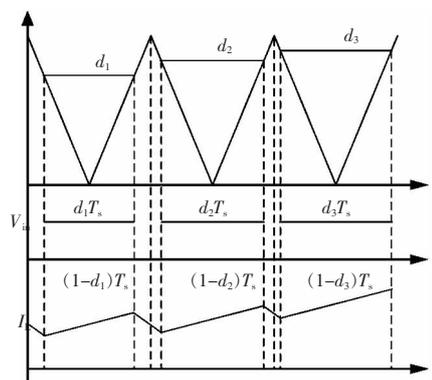
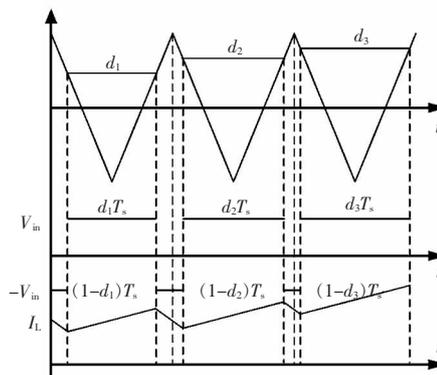


图 3 主电路拓扑

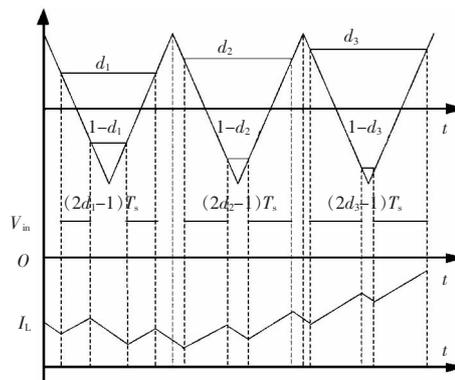
Fig.3 Topology of main circuit



(a)单极性调制下



(b)双极性调制下



(c)单极性倍频调制下

图 4 不同调制方式下的电感电流

Fig.4 Inductance current in different modulation modes

的电流变化分别如图 4(b)和(c)所示。由于在一个开关周期中,电流上升值与下降值近似相等,当使用单极性进行调制时,根据图 4,电流在一个开关周期中变化大小可表示为

$$\Delta i_{L(+)} = \frac{V_{dc} - v_g}{2L} dT_s \approx \Delta i_{L(-)} = \frac{v_g}{2L} (1-d)T_s \quad (1)$$

可得在单极性调制下电感电流纹波最大值为

$$\Delta i_L = \frac{V_{dc} v_g - v_g^2}{2LV_{dc}} T_s \rightarrow (\Delta i_L)_{\max} |_{v_g = V_{dc}/2} = \frac{V_{dc} - T_s}{8L} \quad (2)$$

类似可得,双极性 PWM 调制下和单极性倍频 PWM 调制下的电感电流纹波最大值为 $\frac{V_{dc} T_s}{4L}$ 和 $\frac{V_{dc} T_s}{16L}$ 。

由以上分析可以看出,在开关频率一致的情况下,双极性 PWM 调制的最大电感电流纹波最大,单极性倍频 PWM 调制的最小。但是单极性倍频调制下共模噪声很大,这是由于桥臂侧地端和网侧地端的电位差在 0 和 V_{dc} 间高频变化,这就会通过之间的寄生电容等产生较大的共模干扰;而单极性调制下由于正负半周期慢管桥臂始终有一个管子处于导通状态,所以两侧地端的电位差恒定为 0 或者 V_{dc} ,只在正负半周期切换时会发生电位变化,因此共模噪声相较于单极性倍频调制小很多,同时由于单极性调制下只有一组桥臂工作于高频开关状态,另一组桥臂工作于工频开关状态,因此在开关管损耗和成本上也具有一定优势。综合以上,本文中双向 AC/DC 变换器采用单极性 PWM 方式。

2 电流过零畸变分析及改善

2.1 单极性调制下的电流过零畸变

单极性 PWM 虽然具有低的开关损耗、小的电流纹波以及较好的共模特性,但是其也有着电流过零畸变的缺陷。采用单极性调制时,变换器在电网电压过零点附近会有工频桥臂上下管切换的问题,由于控制环路造成的延迟和电网电压的影响等原因,会导致电流过零点畸变的产生。以本文搭建 3 kW 双向变换器实验平台为基础对电流过零点畸变

问题进行分析,并在此基础上提出了一种改善电流过零畸变的控制策略。

由于双向变换器正反向工作模式对称,故仅以逆变工作模式为例进行分析,工作于功率因数校正 PFC (power factor correction) 模式时的分析类似不再赘述。在单极性调制的逆变器中,一般情况下是在电网电压过零点处进行工频管的切换。假设网测电流能够准确跟踪电网电压,即实现单位功率因数。图 5 所示为逆变器输出到电网电压的简化示意,图中, V_g 为电网电压, V_k 为调制波电压。在基波分析中 LCL 滤波器近似为单 L 滤波器,可以得到调制波电压与电网电压的相位关系,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,调制波电压和电网电压存在相差,一般的控制策略会在电网电压过零点进行慢管切换,当慢管桥臂下管导通时,逆变器输出电压在 $0 \sim V_{dc}$ 变化;当慢管桥臂上管导通时,逆变器输出电压在 $-V_{dc} \sim 0$ 变化。控制程序中通过检测电网过零点,来给开关器件驱动信号,但由于 V_k 和 V_g 存在相差,电网过零点时调制波等效电压并未过零点,而在单极性 PWM 调制中调制波存在不连续点,如图 7 所示。以高频上管 T_1 的占空比 D_1 变化为例,根据单极性调制下电路工作模态可知,在正半周时 D_1 将按照正弦规律变化,而 T_3 的占空比与 T_1 互补,而当进入到负半周期时,高频管 T_1 和 T_3 在拓扑中的作用发生了互换,其占空比变化情况也相应的发生了互换。因此就单一开关管来看,如 T_1 ,其占空

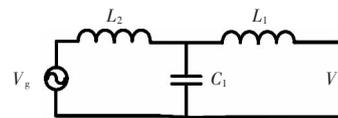


图 5 逆变器输出到电网电压的简化示意

Fig.5 Simplified diagram of the output of inverter to grid voltage

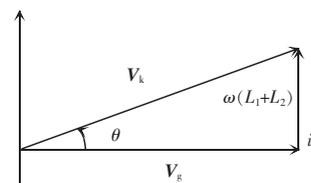


图 6 电压相位关系

Fig.6 Relationship of voltage phase

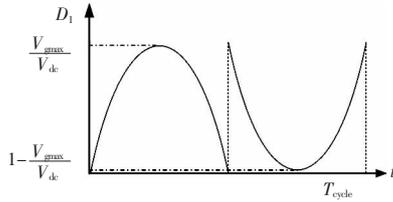


图 7 单极性 PWM 调制波示意

Fig.7 Schematic of modulation wave under unipolar PWM

比在正负半周期出现了不连续的情况,也即是说,在存在延迟时切换慢管,会使得调制电压不连续,电流必然会产生畸变。

据此提出一种解决电流过零畸变的方法,即在电网电压过零点时,将慢管的切换延迟一个角度 θ ,即工频管的切换时间应选取在调制波的等效电压过零点处。则满载时角度偏置的计算,公式为

$$v_k = \sqrt{V_g^2 + (\omega LI)^2} \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

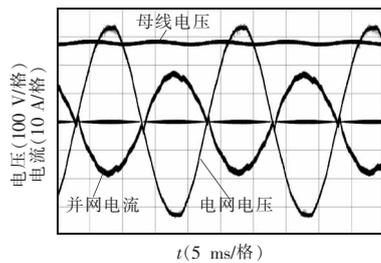
式中, $L=L_1+L_2$ 。

$$\tan \theta = \frac{\omega LI}{V_g} = \frac{314 \times 0.0016 \times 14}{220} = 0.03197 \quad (4)$$

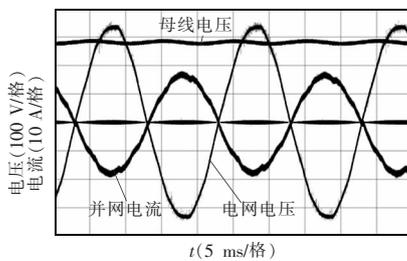
$$\theta \approx 1.83^\circ = 0.032 \text{ rad} \quad (5)$$

根据图 6 可计算出不同功率下应该补偿的相位角,即

$$\tan \theta \approx \theta = \frac{P}{V_g^2} \omega L = k \frac{P}{V_g^2} \quad (6)$$



(a) 未加过零点相位补偿时



(b) 加入过零点相位补偿后

图 8 实验波形

Fig.8 Experimental waveforms

采用这种改进控制策略,在一台 3 kW 的双向变换器实验平台上进行了实验,图 8 为过零点相位补偿前后的实验波形。从图中可以看出,补偿前的实验波形中电流在过零点附近存在明显畸变,如前述分析,这是由于延时和调制波不连续导致的,即存在延迟时若按照电网电压过零点进行切换,延迟的调制波并未同步于拓扑的变化而变化,这种不同步产生了电流的畸变;而补偿前后电流过零点畸变的问题得到了较好的改善,从而证实了所提方法的有效性。

3 结语

本文在单相双向 AC/DC 变换器的基础上,分析了其比较常用的几种控制方法,由于基于平均电流的双环控制具有频率恒定,EMI 性能较好以及控制环路设计较为简单的优点,单极性 PWM 调制方式具有开关损耗小、谐波性能较好的优点,故基于变换器效率和 EMI 等性能指标的考虑,本文选择了基于平均电流的双环控制策略和单极性 PWM 方式。因单极性 PWM 在过零点附近会出现电流畸变,故本文对电流畸变产生的原因进行了简要分析,并据此提出了一种过零点相位补偿的控制方法,最后通过实验验证了方法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] Kempton W, Tomic J. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 144(1): 280-294.
- [2] Su Wensong, Eichi H, Zeng Wente, et al. A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(1): 1-10.
- [3] Chen Maohang, Qiu Min, Liu Bo, Jing Lei. A simplified control strategy to precisely control the reactive power through bi-directional switching in single phase bidirectional AC/DC converter for V2G techniques[C]// 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, USA, 2017: 1558-1562.

- [4] 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.
- [5] Sortomme E, El-Sharkawi M A. Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-Grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 131-138.
- [6] 刘晓东, 徐朋, 方伟, 等. 3 kW 车载充电机的研究与实现[J]. 电源学报, 2017, 15(3): 126-132.
Liu Xiaodong, Xu Peng, Fang Wei, et al. Research and Implementation of 3 kW on-board charger[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(3): 126-132(in Chinese).
- [7] Xia Yinglai, Ayyanar R. Comprehensive comparison of THD and common mode leakage current of Bipolar, Unipolar and hybrid modulation schemes for single phase grid connected full bridge inverters[C]// 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Tampa, USA, 2017: 743-750.
- [8] Yao Zhilei, Xiao Lan, Gong Chunying. Half-bridge-type inverter with hysteresis current control and Unipolar modulation[C]// 2010 5th Industrial Electronics and Applications. Taiduing, Taiwan, 2010: 1113-1117.
- [9] Marandi D, Sowmya T N, Babu B C. Comparative study between Unipolar and Bipolar switching scheme with LCL filter for single-phase grid connected inverter system[C]// 2012 IEEE student's conference on Electrical, Electronics and Computer Science. Bhopal, India 2012: 1-4.
- [10] Wang Mengqi, Guo Suxuan, Huang Qingyun, et al. An isolated bi-directional single-stage DC-AC converter using wide-band-gap devices with novel carrier-based Unipolar modulation technique under synchronous rectification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(3): 1832-1843.
- [11] Soomro J, Memon T D, Shah M A. Design and analysis of single phase voltage source inverter using Unipolar and Bipolar pulse width modulation techniques[C]// 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering. Putrajaya, Malaysia, 2016: 277-282.
- [12] Wu Fengjiang, Sun Bo, Zhao Ke, et al. Analysis and solution of current zero-crossing distortion with Unipolar hysteresis current control in grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4450-4457.
- [13] Sharma R, Ball J A R. Unipolar switched inverter low-frequency harmonics caused by switching delay[J]. IET Power Electronics, 2009, 2(5): 508-516.
- [14] Mesemanolis A, Pontikidis D, Demoulias C. A new modulation technique for reduced harmonic distortion of current in PV inverters[C]// 2011 IEEE EUROCON-International Conference on Computer as a Tool. Lisbon, Portugal, 2011: 1-4.
- [15] Wu T F, Kuo C L, Sun K H, et al. Combined Unipolar and Bipolar PWM for current distortion improvement during power compensation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(4): 1702-1709.



荆磊

作者简介:

荆磊(1992-),男,硕士,研究方向:车载双向变换器,E-mail:jinglei@zju.edu.cn。

张俊峰(1978-),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向:电力系统稳定分析,发电机励磁系统及 PSS 控制技术,电力电子在电力系统中的应用,E-mail:flyleaf170@126.com。

邱茂航(1990-),男,硕士,研究方向:基于 V2G 的双向 AC/DC 变换器,E-mail:21410175@zju.edu.cn。

刘波(1992-),男,硕士,研究方向:高性能 DC/DC 变换器,E-mail:liubo28@zju.edu.cn。

陈敏(1979-),男,中国电源学会会员,博士,副教授,研究方向:模块化光伏微型逆变器技术、基于电压源逆变器的柔性微型电网研究、基于智能电网的电动车 V2G 技术研究、柔性直流输电技术研究、MMC 模块化多电平研究,E-mail:calim@zju.edu.cn。