

基于 V2G 的双向 AC/DC 变换器控制技术及其电流畸变问题的研究

荆磊, 邱茂航, 刘波, 汪小青, 陈敏,

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Research on control technology and current distortion of bidirectional AC/DC converter based on V2G

JING LEI, QIU MAOHANG, LIU BO, WANG XIAOQING, CHEN MIN

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: As the development of smart grid and electric vehicle technologies, the V2G concept has become a hotspot. It can decrease the fluctuation of power grid introduced by distributed resource, and has great potential in smart grid and electrical market. The bidirectional converter bears the charge and discharge function of the electric vehicle, and plays a vital role in the V2G technology. This paper review and research on critical control technology of the bidirectional converter, by comparative analysis we choose unipolar PWM modulation and the average current control for the converter. This paper also analyses the current crossing zero distortion of unipolar modulation, and put forward the corresponding solutions. Finally, a bidirectional AC/DC converter platform verifies the analysis and method.

KEY WORDS: Bidirectional AC/DC converter; V2G; unipolar modulation; zero crossing distortion

摘要: 随着智能电网和电动汽车技术的发展, V2G 成为一个研究热点,它能够减弱分布式能源给电网带来的波动,在智能电网和电力市场中具有很大的潜力。而双向变换器承担着电动汽车的充放电功能,在 V2G 技术中起着至关重要的作用。本文针对双向变换器的关键控制技术进行了综述和研究,通过比较分析选取了单极性 SPWM 调制和平均电流控制,同时就单极性调制电流在过零点附近产生的畸变进行了原理分析,并且提出了相应的解决方法。最后,通过一个 3kW 的双向 AC/DC 变换器实验平台证实了分析和方法的可靠性。

关键词: 双向 AC/DC 变换器; V2G; 单极性调制; 过零点畸变

1 引言

随着智能电网和电动车技术的发展,以及多种新能源发电接入电网的影响, V2G 技术日益成为研究的热点。V2G 技术的核心思想在于电动汽车和电网的互动,利用大量电动汽车的储能作为电网和可

再生能源的缓冲。当电网的负荷过高时,由电动汽车储能向电网馈电;当电网负荷低时,电动汽车用来存储电网过剩的发电量。通过调控安排充放电时间,实现合理有序的充放电管理,从而可以实现电网的削峰填谷的效果,提高系统运行效率,优化电网运行^[1-2]。而承担着电动汽车充放电功能的双向 AC/DC 变换器,是 V2G 技术中的核心和指令执行装置,其必须能够实现功率的双向流动,控制输入输出的电能质量,因此对其设计性能提出了较高的要求。

本文研究并对比分析了双向 AC/DC 变换器的几种基本控制技术,比较了其优劣势,最终出于效率等设计指标的考虑,选择了基于平均电流的双环控制和单极性 PWM 调制方式,控制框图如图 1 所示。双环控制中电压外环通过采样直流母线电压与电压参考比较生成内环电流参考,外环带宽较小,可以有效减弱外部噪声如二次纹波带来的干扰。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 调制由于每个周期只有两个开关管交替导通,因此相较于双极性调制可以降低开关损耗,提高效率,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 也比双极性调制要小^[3-5],因此本文选取了单极性调制方式。虽然单极性调制与双极性相比具有较低的开关损耗和较小的 EMI 干扰等优势,但是单极性调制电流波形在过零点附近会出现畸变^[6-8]。

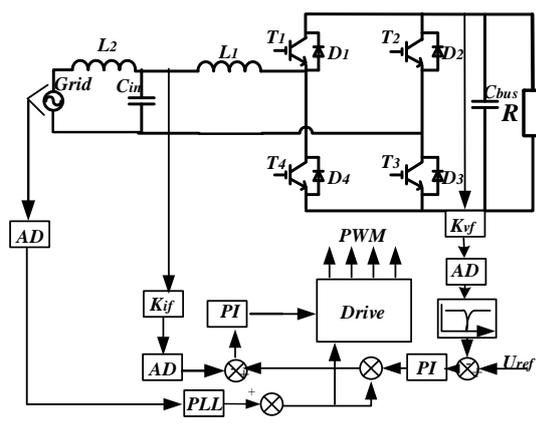


图 1 双向 AC/DC 变换器拓扑及控制框图

单极性调制方式电流过零畸变增加了双向 AC/DC 变换器的电流 THD，降低了电能变换质量。本文对电流过零点畸变产生的原因进行了分析，并提出了一种解决方法。文章最后通过一个 3kW 的实验平台验证了该方法的可靠性。

2 变换器控制策略研究

2.1 电流连续模式（CCM）下几种电流控制策略分析比较

由于电路工作于电流断续模式（DCM）下，电感的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比较大，一般适用于小功率场合，本文中的 3kW 的实验平台采用的是 CCM 工作模式。CCM 控制根据电感电流的控制方法又可以分为平均电流、峰值电流控制和滞环电流控制等。下面将对这三种主要的控制方式的优缺点进行简要分析比较。

峰值电流控制如图 2 所示，通过采样电感电流与电流参考进行比较，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。

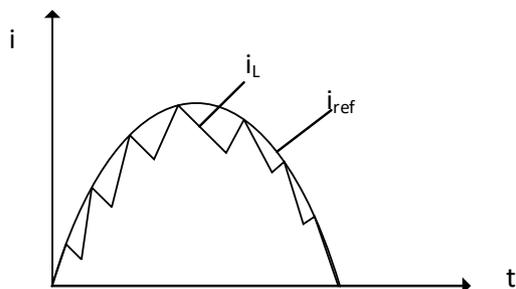


图 2 峰值电流控制

滞环电流控制如图 3 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个周期内频率持续变化，容易降低电路 EMI 性能。

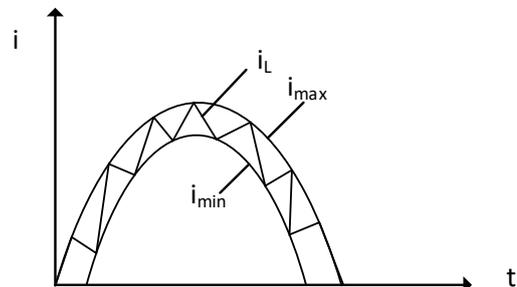


图 3 滞环电流控制

平均电流控制如图 4 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，可以有效的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的跟踪参考。而且在一个周期内频率恒定，EMI 性能比滞环电流控制好，且控制环路设计较为简单。

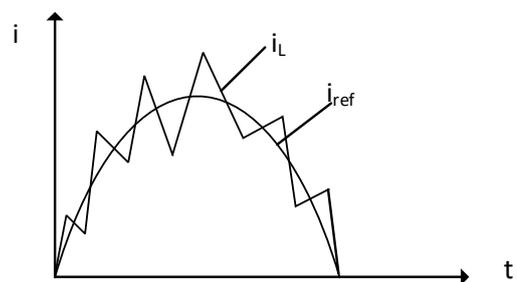


图 4 平均电流控制

通过以上的分析对比，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。

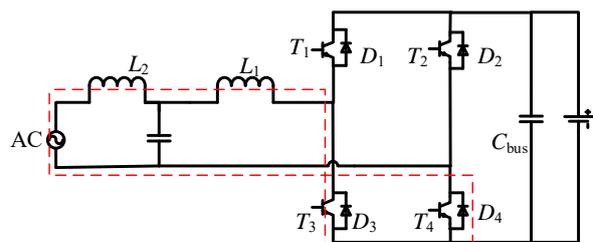
2.2 单极性 PWM 与双极性 PWM 的分析比较

对于单相全桥 AC/DC 变换器而言，最常用的调制方式有两种，即单极性 PWM 调制和双极性 PWM 调制。对于其他一些调制方案，如随机 PWM、简化 PWM 调制等方法，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。下面在本文所依托的 3kW 单相桥式双向 AC/DC 变换器实验平台的基础上，对比分析单极性和双极性 PWM 调制方法的优缺点。

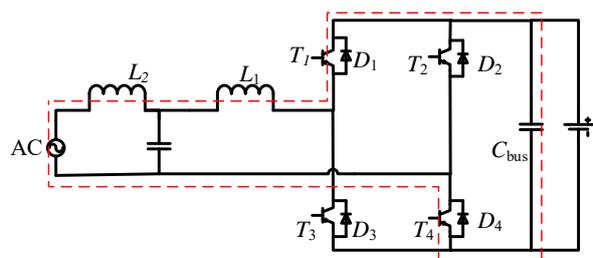
2.2.1 单极性 PWM 调制分析

双向 AC/DC 变换器当能量由电网流向直流母线时，电路工作在整流状态；当能量由直流母线流向电网时，电路工作在逆变状态。因此电路的控制要兼顾到正反两个方面的功能与性能。由于控制方法上的统一，下面单就整流 PFC 工作模式进行分析，逆变工作模式下的分析类似，在此不再赘述。

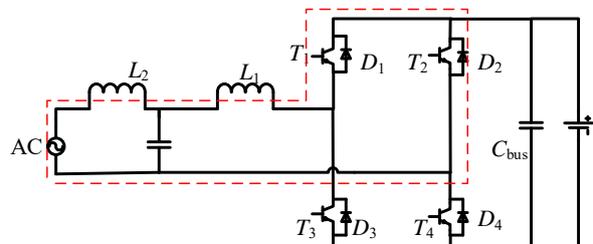
如图 5 所示，为双向变换器工作于 PFC 模式下，不同工作状态时的基本电流回路。



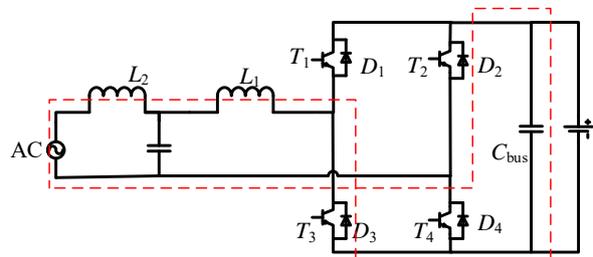
(a) 交流侧正半周电感充电



(b) 交流侧正半周电感放电



(c) 交流侧负半周电感充电



(d) 交流侧负半周电感放电

图 5 单极性 PWM 调制不同工作状态下电流回路

当电网侧电压为正时，若 T3 导通，电网电压给电感充电，电感电流上升，此时有

$$L \frac{di_L}{dt} = V_g + V_{dc} \quad (1)$$

当 T3 关断时，电感放电，电网电压和电感共同给电容充电，电感电流下降，此时有

$$L \frac{di_L}{dt} = V_g - V_{dc} \quad (2)$$

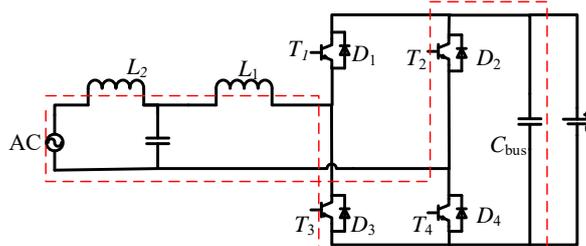
可以看出，电路的工作状态为基本的 boost 电路。而在电路工作过程中，T1 管的体二极管也处于高频工作状态，其反向恢复问题非常严重，导通损耗也较大，降低了整机效率。故基于同步整流的思想，在电网正半周时，对 T1 也进行高频 PWM 控制，使电流大部分时间流经 MOS 管的沟道不是体二极管，且 T1 为碳化硅 MOS 管，极大的改善了反向恢复问题。

当电网侧电压为负时，电流回路及工作原理类似，不再赘述。

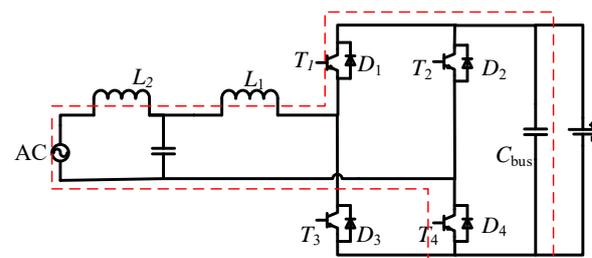
由以上分析可以看出，在单极性 PWM 调制方式下，即使为了避免反向恢复问题，将续流二极管换成开关管，在每个周期中也只有 2 个开关管处于高频工作状态。而且在单极性调制下，桥臂电压始终在 0 到 V_{dc} 和 -V_{dc} 到 0 变化，相较于双极性调制而言，其谐波性能比较好。

2.2.1 双极性 PWM 调制分析

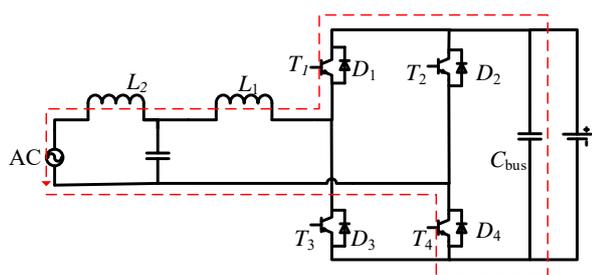
双极性 PWM 调制下，单相桥式双向 AC/DC 电路工作于 PFC 模式时的不同工作状态如图 6 所示。



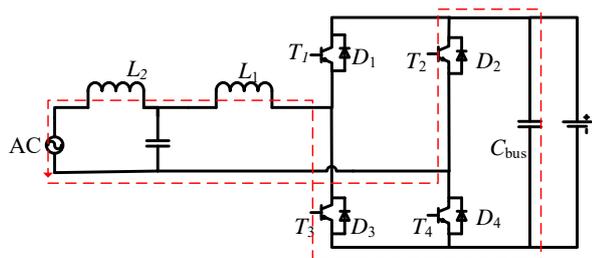
(a) 交流侧正半周电感充电



(b) 交流侧正半周电感放电



(c) 交流侧负半周电感充电



(4) 交流侧负半周电感放电

图 6 双极性 PWM 调制不同工作状态下电流回路

当电网电压为正时, T2 和 T3 管导通, 电网电压和母线电压共同为电感充电, 电感电流上升, 此时有

$$L \frac{di_L}{dt} = V_g + V_{dc} \quad (3)$$

当 T2 和 T3 关断, T1 和 T4 导通时, 电感放电, 电网电压和电感共同为电容充电, 电感电流下降, 此时有

$$L \frac{di_L}{dt} = V_g - V_{dc} \quad (4)$$

在双极性 PWM 调制过程中, 每个周期桥式电路的 4 个开关管都工作于高频状态, 相较于单极性调制来说, 开关损耗大, 降低了效率。而且双极性调制下, 桥臂输出电压在 $-V_{dc}$ 和 V_{dc} 之间变化, 其谐波性能较差。故出于效率等指标的考虑, 本文中的 3kW 单相桥式双向 AC/DC 变换器采用单极性 PWM 调制方式。

3 改善单极性调制过零畸变的控制策略

单极性 PWM 调制虽然具有低的开关损耗, 使得变换器具有较高的效率, 且 EMI 性能也优于双极性 PWM 调制, 但是其也有着电流在过零点附近发生畸变的缺点。

采用单极性调制时, 变换器在电网电压过零点附近会有慢管桥臂上下管的切换问题, 由于控制环

路造成的延迟和电网电压的影响等原因, 可能会导致电流过零点畸变的产生。下面就本文所涉及的 3kW 实验平台所产生的过零畸变问题进行分析, 并在此基础上提出了一种改善电流过零畸变的解决方法。

以逆变工作模式为例进行分析, 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。由图 7 所示逆变器输出到网压的简化示意图, 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 8 所示。

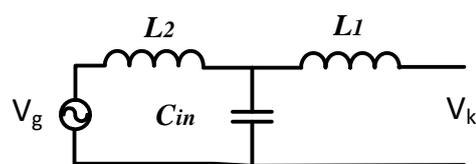
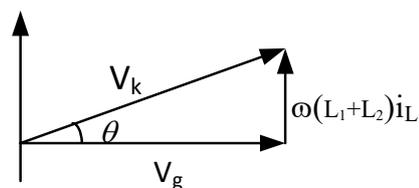
图 7 逆变器输出到电网的简化示意图 (V_g 为电网电压, V_k 为调制波电压)

图 8 逆变模式下电压矢量图

从矢量图中可以看出, 调制波电压和电网电压存在相差。单极性控制中, 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, 此时切换慢管, 会使得调制电压不连续, 电流必然会产生畸变。

据此可以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 , 使得调制波电压连续, 从而消除其对电流波形畸变的影响。利用这里, 在 3kW 的双向变换器实验平台进行了实验, 图 9 和图 10 分别为过零点相位补偿前后的实验波形图, 从波形图中可以看出, 补偿前后电流过零点畸变的问题得到了较好的改善, 从而证实了方法的可行性。

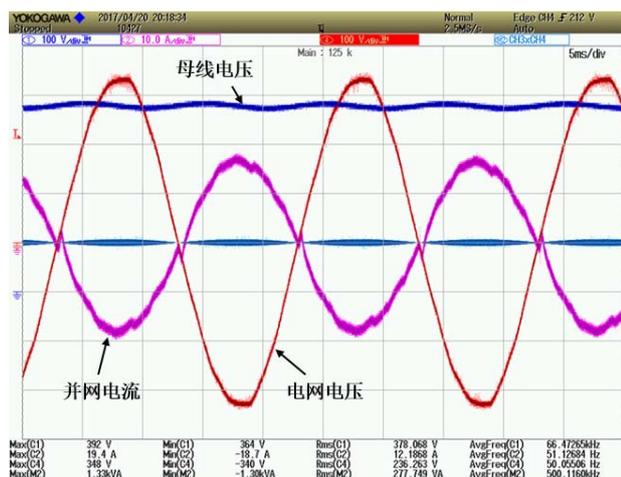


图9 未加过零点相位补偿时的并网电流(紫色)波形图

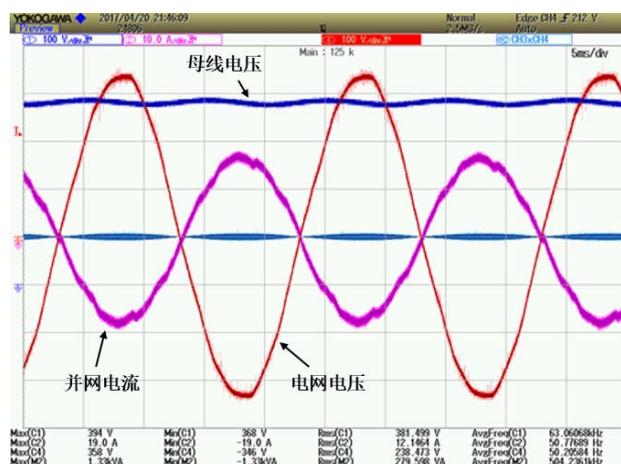


图10 加入过零点相位补偿后并网电流(紫色)波形

4 结论

本文在单相桥式双向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,以及单极性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,本文中选择了基于平均电流的双环控制策略和单极性PWM调制方式。但是单极性PWM调制在过零点

附近会出现电流畸变,文章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可行性。

参考文献

- [1] Kempton W, Tomić 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 W, Eichi H, Zeng W, 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] Y. Xia and R. Ayyanar, Comprehensive comparison of THD and common mode leakage current of bipolar, unipolar and hybrid modulation schemes for single phase grid connected full bridge inverters, 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, 2017, pp. 743-750.
- [4] 陈贤明, 吕宏水, 刘国华. 单相整流/逆变H桥剖析及仿真研究[J]. *电气传动自动化*, 2012, 34(5):1-7.
- [5] 贾舒方. 基于BOOST结构的单周期高效率PFC设计[D]. 电子科技大学, 2014.
- [6] 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.
- [7] Wu F, Sun B, Zhao K, 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.
- [8] 孙向东, 杨惠, 李佳, 等. 用于电动汽车充电的单相PWM整流器调制方式研究[J]. *电气传动*, 2016, 46(3):34-38.