

# 脉冲移位 PWM 控制 ZCS 电流型半桥变换器

郑连清, 王学亮, 李 鹏, 丁茂桃

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 提出一种改进的电流型零电流半桥电路拓扑。与传统的电流型半桥电路相比, 该拓扑电路增加了一个由辅助开关管、二极管以及电容组成的辅助支路, 采用脉冲移位 PWM 控制方法, 避免了直流偏磁的产生, 使开关占空比在一定范围内可调的情况下实现主功率开关管和辅助开关管的零电流开关(ZCS), 同时实现了整流二极管的软换流, 使得整流二极管反向电压等于输出电压。在分析该变换器的工作原理基础上, 研究了其工作特性, 进行了对主开关管实现 ZCS 条件的讨论和对电流占空比丢失的分析, 并且基于 Saber 仿真软件对该电路进行了仿真验证。结果验证了电路分析的正确性和设计的可行性。

**关键词:** 直流变换器; 电流型半桥; 零电流开关; 脉冲移位 PWM 控制

**中图分类号:** TM 46

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2011)04-0036-05

## 0 引言

电流型变换器在电动汽车、新能源发电以及不间断供电等应用领域有着广阔的空间<sup>[1-3]</sup>。而在中小功率场合, 电流型半桥变换器的应用尤为突出。

常规的对称半桥通常采用硬开关技术, 在高频应用场合开关损耗很大, 严重影响效率。采用软开关可以降低开关损耗, 提高开关频率从而减小变流器的体积。此外, 软开关还可以降低线路的电磁干扰<sup>[4]</sup>。在 PWM 电路中实现软开关的方法有 2 种: 一种是加辅助网络实现软开关<sup>[5-6]</sup>; 另外一种是通过控制策略实现软开关<sup>[7-9]</sup>。后者主要是通过控制策略实现软开关。

文献[10-11]提出将电流型半桥变换器作为燃料电池并网发电的中间级升压电路, 并且加入有源箝位辅助电路, 使得变换器可以运行在占空比小于 0.5 的状态下, 实现了开关管的零电压开通和关断。文中采用 2 个辅助开关管和 1 只电容组成辅助箝位支路。由于开关管数量多, 增加了电路的成本, 不利于电路的广泛应用。

文献[12-13]提出一种电流型零电流半桥变换器。此种电路虽不能像上述电路可以运行在占空比小于 0.5 的状态下, 但这不影响将其应用于燃料电池并网发电系统当中。但是此电路拓扑为了实现两开关管的零电流开关(ZCS), 以及消除变压器的磁不平衡问题, 电路占空比必须固定在 0.5, 因此只能通过脉冲频率调制的方法来实现电路的升压和稳压功能。由于输出电压的频率不是固定的, 因此对后级器件的选择提出更高的要求。而且控制电路要比传

统的固定频率 PWM 调制方式复杂。

本文提出了一种改进型拓扑, 增加了一个由辅助开关管、二极管以及电容组成的辅助支路, 采用脉冲移位 PWM 控制策略<sup>[14-15]</sup>, 实现了在开关占空比一定范围内可调的情况下功率开关管和辅助开关管的 ZCS, 改善了电路的性能, 使其更适于升压场合的应用。

## 1 工作原理

### 1.1 主电路拓扑

主电路拓扑如图 1 所示。其中,  $L_1$ 、 $L_2$  为滤波电感;  $V_{T1}$  和  $V_{T2}$  为主开关管;  $V_{D1}$ 、 $V_{D2}$  为与其串联的二极管;  $T_r$  为理想变压器, 原副边匝比为  $1:m$ ;  $L_k$  为变压器漏感;  $V_{D3} \sim V_{D6}$  组成全波整流电路;  $C_f$  为输出滤波电容;  $V_{Ts}$ 、 $V_{Ds}$  和  $C_s$  组成辅助支路用于实现 ZCS。

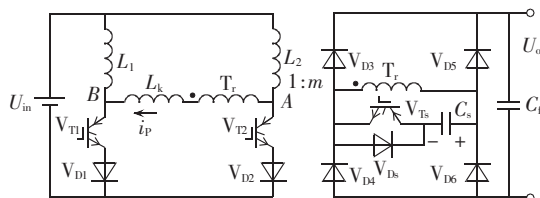


图 1 ZCS 主电路拓扑

Fig.1 Power circuit topology of ZCS current-fed converter

### 1.2 工作模式分析

在分析变换器工作原理之前, 作如下基本假设:

a. 变换器工作已经达到稳态;

b. 输入电压  $U_{in}$  恒定;

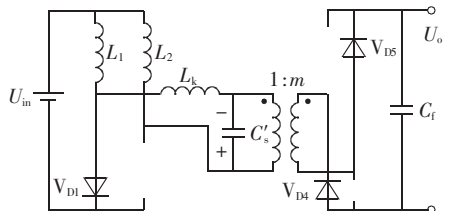
c. 输入滤波电感  $L_1$ 、 $L_2$  足够大, 使得流过滤波电感的电流可以看成恒流, 即  $L_1$  和  $L_2$  等效为恒流源, 并设  $L_1=L_2=L_r$ , 因此可设为电流等于  $I_{in}$  的 2 个恒流源;

d. 输出滤波电容  $C_f$  很大, 其和负载电阻的并联可等效为电压等于  $U_o$  的恒压源;

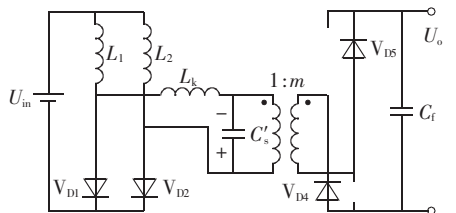
e. 谐振电感远远小于输出滤波电感,即  $L_k \ll L_1 = L_2$ 。

基于上述假设,该变换器在 1 个周期内可分为 9 个模式。各模式的等效电路如图 2 所示,变换器在 1 个周期内的主要工作波形如图 3 所示。为了简化分析,将变压器副边的并联辅助支路归算到原边,  $C'_s = C_s/m^2$ 。

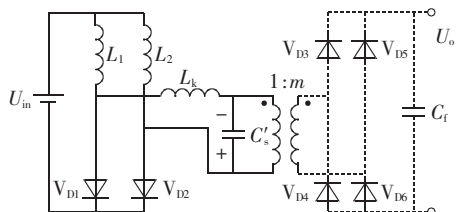
模式 1 ( $t_0$  时刻之前):  $V_{T1}$ 、 $V_{Ts}$  处于导通状态,  $V_{T2}$  处于断开状态,整流桥侧  $V_{D4}$ 、 $V_{D5}$  导通。  $U_{C'_s} = U_0/m$ ,



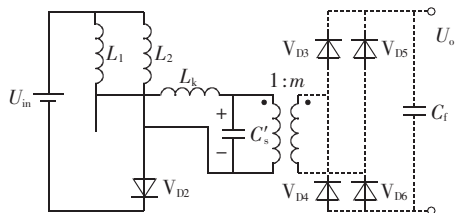
(a) 模式 1 ( $t_0$  之前)



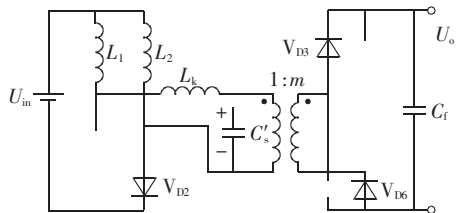
(b) 模式 2 ( $t_0 \sim t_1$ )



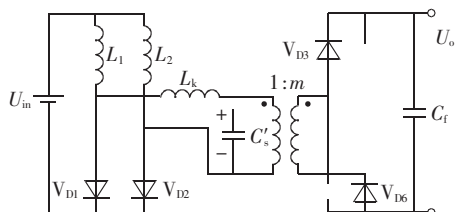
(c) 模式 3 ( $t_1 \sim t_2$ )



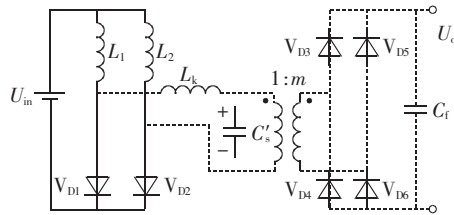
(d) 模式 4 ( $t_2 \sim t_3$ )



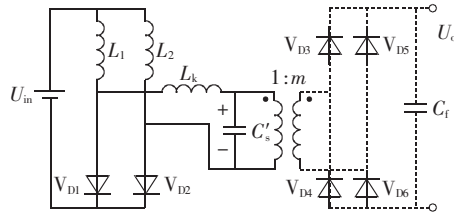
(e) 模式 5 ( $t_3 \sim t_4$ )



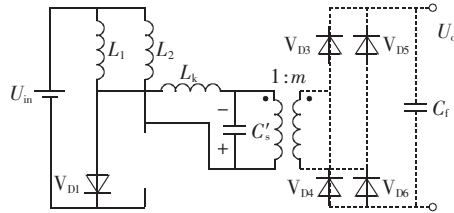
(f) 模式 6 ( $t_4 \sim t_5$ )



(g) 模式 7 ( $t_5 \sim t_6$ )



(h) 模式 8 ( $t_6 \sim t_7$ )



(i) 模式 9 ( $t_7 \sim t_8$ )

图 2 各工作模式等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of every working mode

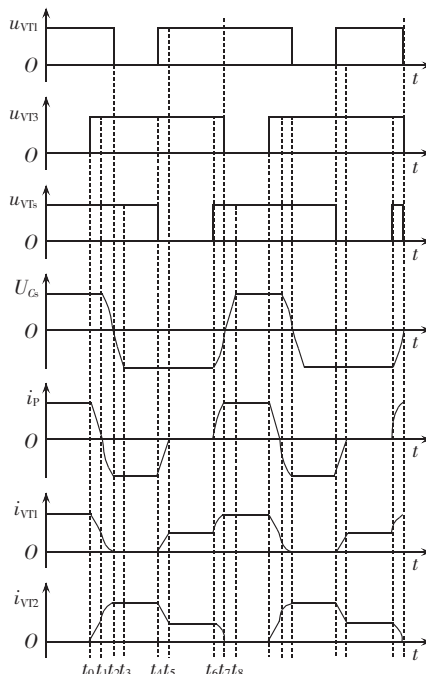


图 3 ZCS 半桥电路的控制时序

Fig.3 Control time sequence of ZCS current-fed half-bridge

$i_p = i_{in}$ , 相当于电流源  $L_2$  给负载侧供电。

模式 2 ( $t_0 \sim t_1$ ):  $t_0$  时刻, 开关管  $V_{T2}$  闭合, 由于  $t_0$  时刻之前, 电路已处于稳定状态, 所以谐振电感  $L_k$  中的电流不会突变, 因此开关管  $V_{T2}$  是零电流导通, 开关管导通之后,  $U_{Ab} = 0$ , 输出电压经过折算后完全加在谐振电感  $L_k$  两侧, 由于负载侧电压稳定, 因此相当于电感与电压源串联, 电流  $i_p$  按式 (1) 线性减少:

$$i_p(t) = I_{in} - \frac{U_o}{mL_k}t \quad (1)$$

到达  $t_1$  时,  $i_p=0$  时, 模态 2 结束。

模态 3 ( $t_1 \sim t_2$ ): 到达  $t_1$  时刻, 电流  $i_p$  降为零,  $V_{D3} \sim V_{D6}$  均处于关断状态, 此时并联电容  $C'_s$  与谐振电感  $L_k$  组成串联谐振回路, 开始谐振, 公式如下:

$$\begin{aligned} U_{C'_s}(t) &= \frac{U_o}{m} \cos(\omega_r t) \\ i_p(t) &= -\frac{U_o}{mZ_r} \sin(\omega_r t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $Z_r = \sqrt{L_k/C'_s}$ ;  $\omega_r = 1/\sqrt{L_k C'_s}$ 。

当  $i_p = -I_{in}$  时, 流过  $V_{T1}$  的电流正好降为零, 此时关断  $V_{T1}$  即可实现  $V_{T1}$  的零电流关断。换流成功, 模态 3 结束。

模态 4 ( $t_2 \sim t_3$ ): 并联电容的反向充电阶段。由于  $V_{D3} \sim V_{D6}$  仍处于关断状态, 在此阶段中输入电感  $L_1$  对并联电容  $C'_s$  反向充电, 公式如下:

$$U_{C'_s}(t) = U_{C'_s}(t_2) - \frac{I_{in}}{C'_s}t \quad (3)$$

当  $U_{C'_s}(t) = -\frac{U_o}{m}$  时, 整流侧二极管  $V_{D3}, V_{D6}$  导通, 开始向负载供电。

模态 5 ( $t_3 \sim t_4$ ):  $t_3$  时刻, 整流侧二极管  $V_{D3}, V_{D6}$  处于导通状态, 并联电容中不再有电流流过。原边侧开始向副边侧供电。在此时段中关断开关管  $V_{Ts}$ , 由于并联电容  $C'_s$  中没有电流流过, 因此实现  $V_{Ts}$  零电流关断。在此阶段中, 原边继续经二极管  $V_{D5}, V_{D6}$  向负载稳定供电。

模态 6 ( $t_4 \sim t_5$ ):  $t_4$  时刻, 开关管  $V_{T1}$  闭合。类似模态 2 的情况,  $V_{T1}$  为零电流导通, 并由于负载电压的作用, 按式(4)线性减少:

$$i_p(t) = -I_{in} + \frac{U_o}{mL_k}t \quad (4)$$

到达  $t_5$  时刻,  $i_p(t_5) = 0$ , 二极管  $V_{D3}, V_{D6}$  关断, 停止向副边传送能量。

模态 7 ( $t_5 \sim t_6$ ): 由于在  $t_3$  时刻,  $V_{Ts}$  已经零电流关断, 所以在此模态中, 整个变压器原边支路被完全短接, 谐振电感  $L_k$  中没有电流流过, 输入滤波电感  $L_1, L_2$  分别充电。

模态 8 ( $t_6 \sim t_7$ ):  $t_6$  时刻, 辅助开关管  $V_{Ts}$  导通, 由于其串联的滤波电感  $L_k$  的作用, 因此  $V_{Ts}$  为零电流导通。 $V_{Ts}$  导通后, 并联电容  $C'_s$  与谐振电感  $L_r$  组成谐振回路, 电容  $C'_s$  开始放电, 整个模态过程类似模态 3, 其谐振公式如下:

$$\begin{aligned} U_{C'_s}(t) &= -\frac{U_o}{m} \cos(\omega_r t) \\ i_p(t) &= \frac{U_o}{mZ_r} \sin(\omega_r t) \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $Z_r = \sqrt{L_k/C'_s}$ ;  $\omega_r = 1/\sqrt{L_k C'_s}$ 。

当  $i_p = I_{in}$  时, 流过  $V_{T2}$  的电流正好降为零, 此时关断  $V_{T2}$  即可实现  $V_{T2}$  的零电流关断。换流成功, 模

态 8 结束。

模态 9 ( $t_7 \sim t_8$ ): 电容正向充电阶段。此阶段类似模态 4, 电容充电公式如下:

$$U_{C'_s}(t) = U_{C'_s}(t_2) + \frac{I_{in}}{C'_s}t \quad (6)$$

当  $U_{C'_s}(t) = U_o/m$  时, 整流侧二极管  $V_{D4}, V_{D5}$  导通, 开始向负载供电。

至此, 一个完整的工作周期结束, 工作模态将回到模态 1。

## 2 ZCS 的实现条件<sup>[16]</sup>

实现开关管的零电流导通, 依靠的是电感电流不会突变。那么要实现开关管的零电流关断, 必须有足够的能量来使即将关断的开关管的电流减小到零, 即需要足够的能量来使谐振电感  $L_k$  的电流从 0 减小到  $-I_{in}$  (或从 0 增加到  $I_{in}$ ), 那么必须满足下式:

$$E = \frac{1}{2} C'_s U_o^2 \geq \frac{1}{2} L_s I_{in}^2 \quad (7)$$

要实现开关管的零电流关断, 由于  $V_{T2}, V_{T1}$  与  $V_{Ts}, V_{T2}$  的工作模态略有不同, 因此需要分别加以讨论。

a. 如果忽略导通的重叠时间, 则  $V_{T1}$  的关断时间是由  $V_{T2}$  的上升沿触发, 因此  $V_{T2}$  和  $V_{T1}$  的最小重叠导通时间:

$$t \geq t_{01} + t_{12} = \frac{I_{in} m Z_r}{U_o} + \frac{1}{\omega_r} \arcsin \left( \frac{I_{in} m Z_r}{U_o} \right) \quad (8)$$

b. 当  $V_{T2}$  关断时,  $V_{Ts}$  和  $V_{T2}$  的最小重叠导通时间:

$$t \geq t_{67} = \frac{1}{\omega_r} \arcsin \left( \frac{I_{in} m Z_r}{U_o} \right) \quad (9)$$

其中,  $Z_r = \sqrt{L_k/C'_s}$ ;  $\omega_r = 1/\sqrt{L_k C'_s}$ 。

## 3 对电流占空比丢失的分析

移位控制 ZCS PWM Boost 型半桥变换器存在着副边电流占空比丢失的现象。由于存在谐振电容从正向(或反向)变化到反向(或正向)输出电压的时间, 在这段时间里, 虽然原边有正向电流(或反向电流), 但谐振电容电压不足以使输出整流二极管导通, 负载由输出滤波电容供电。

从图上可以看出,  $t_{23}$  (即  $t_2 \sim t_3$ ) 以及  $t_{78}$  (即  $t_7 \sim t_8$ ) 这 2 个时间段为电容的反向(正向)充电时间, 即为占空比丢失时间:

$$t_{loss} = t_{23} = t_{78} = \left[ U_{C'_s}(t_2) + \frac{U_o}{m} \right] \frac{C'_s}{I_{in}} \quad (10)$$

由此得:

$$D_{loss} = \frac{t_{loss}}{T_s/2} = 2 \left[ U_{C'_s}(t_2) + \frac{U_o}{m} \right] \frac{C'_s}{I_{in} T_s} \quad (11)$$

## 4 仿真实验及结果分析

基于 Saber 仿真软件对改进的拓扑进行仿真验证, 仿真参数设置如下: 输入电压  $U_{in} = 60$  V, 额定输出电压  $U_o = 350$  V,  $P_o = 2.5$  kW; 开关频率  $f_s = 50$  kHz; 变

压器变比 1:2.25;输入滤波电感  $L_1=L_2=1\text{ mH}$ ;漏感  $L_k=2\text{ }\mu\text{H}$ ;输出滤波电容  $C_f=100\text{ }\mu\text{F}$ ;并联谐振电容  $C_s=370\text{ nF}$ 。仿真验证波形如图 4~7 所示。

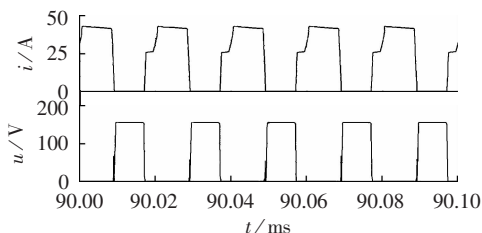


图4 主开关管  $V_{T1}$  的电流、电压仿真波形

Fig.4 Simulative waveforms of main switch  $V_{T1}$

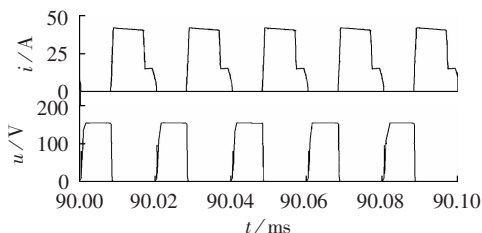


图5 主开关管  $V_{T2}$  的电流、电压仿真波形

Fig.5 Simulative waveforms of main switch  $V_{T2}$

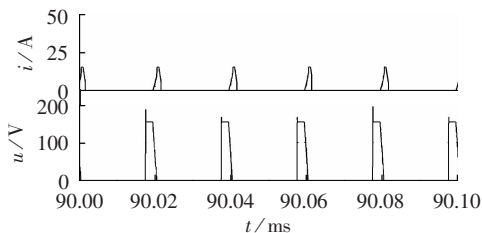


图6 辅助支路的电流、电压仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms of auxiliary switch

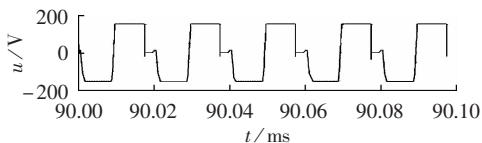


图7 变压器原边电压仿真波形

Fig.7 Simulative waveform of transformer voltage at primary side

由图 4 和图 5 可知,2 个主开关管关断时电流降为零后电压升高,实现 ZCS 关断;导通时依靠漏感的作用延缓电流的上升速率实现 ZCS 导通,功率管的电压电流应力较小。

由图 6 可知,当辅助开关管两端电压降为零时,管内电流才开始由零增加,亦能较好地实现 ZCS 导通与关断。

由图 7 可知,变压器原边的交变电压有效地抵消了直流分量,避免了不对称控制所引发的直流偏磁问题,提高了对变压器磁芯的利用率。

## 5 结论

本文研究了一种对称 PWM 控制 ZVS 半桥变换器,它具有如下优点:

a. 采用脉冲移位 PWM 控制方案,增加由辅助开关管和二极管构成的支路,可以实现功率器件的软开关,且器件所受应力小,变换器可靠性高;

b. 该变换器结构较简单,兼具有对称半桥变换器变压器磁芯利用率高,控制特性线性和不对称半桥变换器能实现软开关的特点;

c. 辅助开关管可以全负载范围基本实现软开关工作。

## 参考文献:

- [1] YAKUSHEV V, MELESHIN V, FRAIDLIN S. Full-bridge isolated current fed converter with active clamp[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Dallas, Texas, USA: IEEE, 1999: 560-566.
- [2] QIAO C M, SMEDLEY K M. An isolated full bridge boost converter with active soft switching[C]//Power Electronics Specialists Conference, 2001, PESC, 2001 IEEE 32nd Annual. Vancouver, Canada: IEEE, 2001: 896-903.
- [3] KONG X, TCHOI L, KHAMBADKONE A M. Analysis and control of isolated current-fed full bridge converter in fuel cell system[C]//Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE. Busan, South Korea: IEEE, 2004: 2825-2830.
- [4] 吕征宇, 钱照明, GREEN T C. 软开关 AC/DC 变换器的电磁干扰研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 14-18.  
LÜ Zhengyu, QIAN Zhaoming, GREEN T C. Soft switched AC/DC power converter and their EMI property improvement[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 14-18.
- [5] YOSHIDAL K, MAEOKA T, ISHII T, et al. Novel zero-voltage-switched half-bridge converter with active current-clamped transformer[C]//Power Electronics Specialists Conference, 1996. PESC '96 Record, 27th Annual IEEE. Baveno, Italy: IEEE, 1996: 632-637.
- [6] 郑连清, 姜洪立, 朱军, 等. 一种改进的 ZVZCS 全桥 PWM 变换器[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 19-22.  
ZHENG Lianqing, LOU Hongli, ZHU Jun, et al. Improved ZVZCS full-bridge PWM converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 19-22.
- [7] 林渭勋. 现代电力电子电路[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 387-420.
- [8] 顾亦磊, 陈士杰, 吕征宇, 等. 单开关 DC/DC 变换器的一种软开关实现策略[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 130-133.  
GU Yilei, CHEN Shijie, LÜ Zhengyu, et al. Strategy for single switched DC/DC converters to achieve soft switching[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 130-133.
- [9] 周林泉, 阮新波. 一种新颖的 ZCZVS PWM Boost 全桥变换器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 90-94.  
ZHOU Linquan, RUAN Xinbo. A novel ZCZVS PWM Boost full bridge converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 90-94.
- [10] HAN S K, YOON H K, MOON G W, et al. A new active clamping zero-voltage switching PWM current-fed half-bridge converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(6): 1271-1279.
- [11] JANG S J, WON C Y, LEE B K, et al. Fuel cell generation system with a new active clamping current-fed half-bridge converter[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 332-340.

- [12] LEMBEYE Y, BANG V D, LEFEVRE G, et al. Novel half-bridge inductive DC-DC isolated converters for fuel cell applications[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 203-210.
- [13] LEFEVRE G, BANG V D, FERRIEUX J P, et al. New soft switching ZVS and ZCS half-bridge inductive DC-DC converters for fuel cell applications[C]//International Power Electronics Congress, 10th IEEE. Puebla, Mexico: IEEE, 2006: 1-6.
- [14] MAO Hong, ABU-QAHOUQ J, DENG Songquan, et al. A new duty-cycle-shifted PWM control scheme for half-bridge DC-DC converters to achieve zero-voltage-switching[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC'03. Eighteenth Annual IEEE. Miami, USA: IEEE, 2003: 629-634.
- [15] MAO Hong, ABU-QAHOUQ J A, LUO Shiguo, et al. A modified ZVS half-bridge DC-DC converter[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04. Nineteenth Annual IEEE. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2004: 1436-1441.
- [16] 周林泉. 软开关 PWM Boost 型全桥变换器的研究[D]. 南京:

南京航空航天大学自动化学院, 2006.

ZHOU Linquan. Soft-switching techniques for PWM Boost full-bridge converters[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006.

(编辑: 李育燕)

#### 作者简介:

郑连清(1964-), 男, 浙江金华人, 教授, 博士, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail: lqzheng64@tom.com);

王学亮(1986-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为软开关功率变换器(E-mail: xue.liang@163.com);

李 鹏(1983-), 男, 陕西汉中, 人, 硕士研究生, 研究方向为大功率软开关功率变换器;

丁茂桃(1984-), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

### ZCS current-fed half-bridge DC/DC converter with duty-cycle-shifted symmetrical PWM control

ZHENG Lianqing, WANG Xueliang, LI Kun, DING Maotao

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** An improved ZCS (Zero Current Switching) current-fed half-bridge DC/DC converter is presented. Compared with conventional current-fed half-bridge topology, an auxiliary branch consisting of an auxiliary switch, a diode and a capacitor is added. The duty-cycle-shifted symmetrical PWM control is applied to avoid magnetic bias; the adjustable duty-cycle to realize the ZCS of main and auxiliary switches; and the soft commutation of rectifier diode to make its reverse voltage equal to output voltage. Its operational principle is illustrated. The conditions to realize ZCS and the loss of duty cycle are analyzed. Simulations with Saber indicate the correctness of circuit analysis and the feasibility of design.

**Key words:** DC/DC converter; current-fed half-bridge; ZCS; duty-cycle-shifted symmetrical PWM control