

新型移相控制零电压 零电流开关 PWM 变换器

周林泉 南京经济学院 南京 (210003)

阮新波 南京航空航天大学 南京 (210016)

摘要: 提出了一种新型移相控制零电压零电流开关 PWM 全桥变换器, 这种变换器在传统零电压开关 PWM 变换器的基础上, 去掉串联在原边的谐振电感, 让滞后桥臂实现零电流开关, 从而解决了由谐振电感引起的副边占空比丢失。用这种控制方式研制成功了 3kW 开关电源, 其效率提高、可靠性增强。

叙词: 变换器 脉宽调制 零电压开关 零电流开关

A Novel Phase-shifted ZVZCS PWM Converter

Zhou linquan

Nanjing Economy College (210003)

Ruan xinbo

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (210006)

Abstract: A novel phase-shifted zero-voltage and zero-current switching PWM converter is proposed. Based on the zero-voltage switching PWM converter, the resonant inductor and anti-parallel diodes of lagging leg are removed. The converter achieves zero-current switching of the lagging leg and avoids the corresponding drawbacks such as secondary duty loss. A 3kW PWM converter using new control mode raised efficiency and reliability.

Keywords: converter PWM zero-voltage-switching zero-current-switching

1 引言

在 DC/DC 变换器中, 单管构成的变换器, 如 Buck、Boost、Buck-boost、Cuk 等电路拓扑结构适用于小功率应用场合, 而全桥电路则比较适用于中大功率场合。基本 PWM 全桥 DC/DC 变换电路由于开关管工作于硬开关状态, 损耗大、效率低, 必须采用缓冲电路来吸收开关管的电压尖峰。

近年来, 将谐振技术和 PWM 结合起来, 实现软开关 PWM 变换器成为一种趋势。移相控制零电压开关 PWM 全桥 DC/DC 变换器, 就是其中的一种, 其领先桥臂容易实现 ZVS, 滞后桥臂要实现 ZVS 比较困难。

另外, 全桥变换器主开关通常采用功率 MOSFET, 功率 MOSFET 的特点是开关速度比双极晶体管快, 具有无二次击穿

和可并联连接等优点, 但它的通态压降较大, 通态损耗也大。采用 MOSFET 作为开关管的全桥 DC/DC 变换器, 其开关频率可

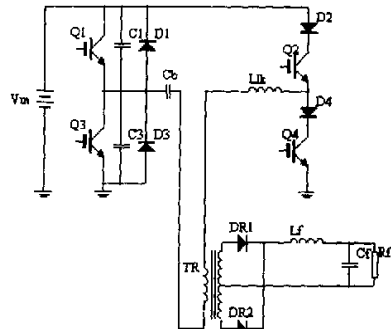


图 1 变换器主电路

达到 100KHz 以上。IGBT 是 80 年代中期出现的新型复合器件。由于它将 MOSFET 和 BJT 两者优点集于一身，因此发展很快，备受青睐。在电机控制、中频和开关电源以及要求快速、低损耗的领域，IGBT 有广泛的应用前景。IGBT 的最大特点是通态压降小，有高的耐压。但由于它存在电流拖尾现象，使其开关损耗大大增加，且影响工作频率的提高。采用 IGBT 作开关管的全桥 DC/DC 变换器，其开关频率通常只能达到 20-30KHz 左右。为了既能提高开关频率，以减小变换器的体积，又要提高效率，必须减小 IGBT 的开关损耗，尤其是电流拖尾造成的关断损耗，IGBT 最好工作在零电流开关状态。

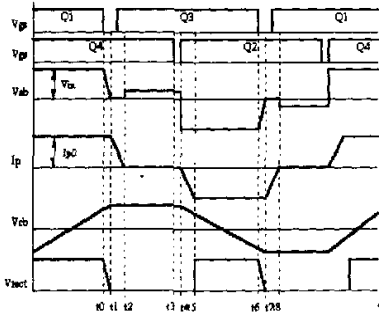


图 2 工作波形

本文提出的一种新型移相 ZVZCS-PWM DC/DC 变换器是在传统 ZVS PWM 全桥 DC/DC 变换器基础上改进得到的，如

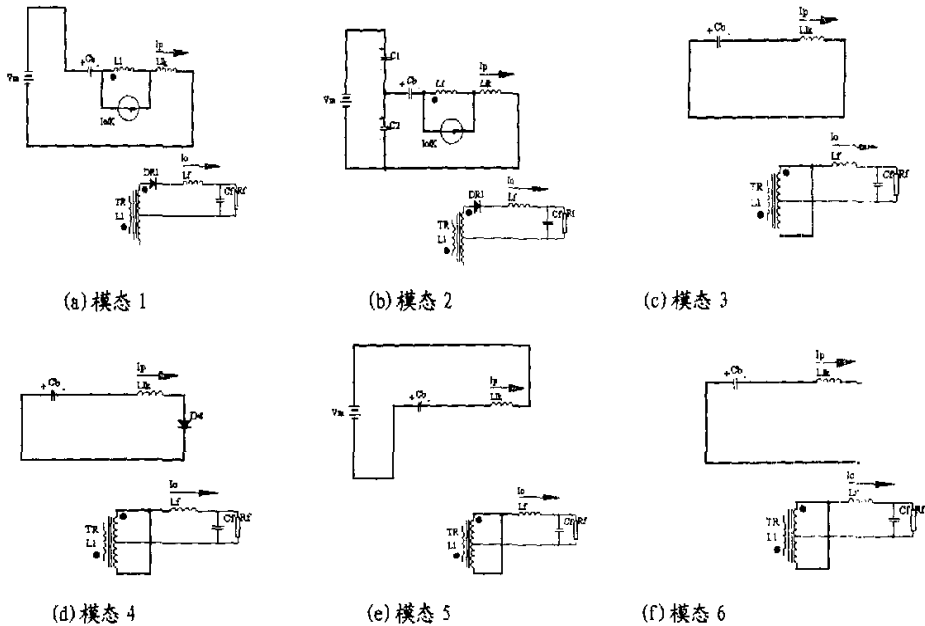


图 3 开关模式等效电路

②开关模式 2 [t₀, t₁]

在 t₀ 时刻，关断 Q1，由于 Q1 上并联有电容，因此 Q1 的关断是零电压关断。Q1 关断后，原边电流通过 C1 和 C3 进行续流，

图 1 所示。

2 工作原理和电路分析

分析其稳态工作过程时作如下几个假定：

- ①所有元器件都是理想的；
- ②阻断电容足够大；
- ③C1=C3=C_r；
- ④变压器原副匝比为 K；
- ⑤在开关过程中，输出滤波电感足够大。

在一个开关周期中，有 6 种开关模式，分述如下：

①开关模式 1 [t < t₀]

在该模式中，Q1 和 Q4 导通，输入功率传至负载，等效电路如图 3 (a) 所示。原边电流为副边电流折合到原边的值，阻断电容上的电压从负最大值线性增加到正的最大值，即：

$$I_p(t) = I_{p1} = I_o/K \quad (1)$$

$$V_{cb}(t) = \frac{I_o'K}{C_h}t - V_{cb0} \quad (2)$$

在 t₀ 时

$$V_{cb} = V_{cbf}$$

所用时间为

$$t_0 = \frac{2V_{cbf}C_h}{I_o'K} \quad (3)$$

等效电路如图 3 (b) 所示。

C1 上的电压线性增加，C3 上的电压线性下降。

$$V_{C1}(t) = \frac{I_{p0}t}{2C_r} \quad (4)$$

$$V_{C2}(t) = V_{in} - \frac{I_{p0}t}{2C_r} \quad (5)$$

在 t_1 时刻, C3 上的电压降至零, 该模式所用时间为:

$$t_{01} = \frac{2C_r V_{in}}{I_{p0}} \quad (6) \text{ ③开关模式 3 } [t_1, t_2]$$

C3 上的电压降至零后, D3 自然导通, 其等效电路如图 3 (c) 所示。

此后就可开通 Q3, 这样 Q3 即为零电压开通。D3 导通后, V_{cb} 被箝位至零, 阻断电容上的电压 V_{cb} 加至漏感上, 由假设阻断电容足够大, 则原边电流线性下降, 因而原边电流不足以提供副边的电流, 变压器副边的二个整流二极管同时导通, 副边绕组的电压为零, 原边绕组的电压也为零。原边电流的表达式为:

$$I_p = -\frac{V_{cb}t}{L_{lk}} + I_{p0} \quad (7)$$

其间所用时间为:

$$t_{12} = \frac{I_{p0}L_{lk}}{V_{cb}} \quad (8)$$

④开关模式 4 [t_2, t_3]

至时刻 t_2 , 原边电流为零, 并试图反向增加, 但由于 Q2 的集电极中串有二极管, 使反向电流不可能产生, 原边电流维持为零。Q4 仍然开通, 但没有电流流过。等效电路如图 3 (d) 所示。

即在该模式中,

$$I_{p(t)} = 0$$

⑤开关模式 5 [t_3, t_4]

在 t_3 时关断 Q4, 随后打开 Q2。这样, Q4 实现了零电流关断, 而 Q2 则为零电流开通。等效电路模型如图 3 (e) 所示。

⑥开关模式 6 [t_4, t_5]

Q2 开通后, 原边电流通过 Q2、Q3 导通, V_{in} 和 V_{cb} 加至漏感两端, 原边电流反向线性增加, 副边两个整流二极管仍然同时导通, 原副边电压都为零。原边电流的表达式为:

$$I_p(t) = -\frac{V_{in} + V_{cb}t}{L_{lk}} \quad (9)$$

该模式所用的时间为

$$t_{45} = \frac{I_{p0}L_{lk}}{V_{in} + V_{cb}} \quad (10)$$

至时刻 t_5 , 原边电流增加至副边电流折算至原边的电流值, 副边整流管 DR1 截止, 副边电流完全通过 DR2, 由第二个副边绕组提供。

至此已完成了—个开关周期的工作过程。

3 设计中应考虑的几个问题

(1) 实现滞后桥臂的 ZCS 的条件

从前面的分析中可以看出, 原边电流 i_p 必须在滞后桥臂关断或开通之前从负载电流减小到零。从式 (3) 和式 (5) 可以推出 i_p 从负载电流减小到零的时间 t_{12} 为:

$$t_{12} = \frac{I_{p0}L_{lk}}{V_{cb}} = \frac{2C_r L_{lk}}{t_0} = \frac{4C_r L_{lk}}{DT_s} \quad (11)$$

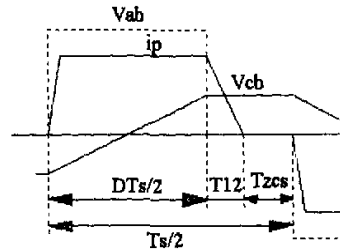


图 4 最大占空比的确定

式中, D 是占空比, T_s 是开关周期。从上式可知, t_{12} 与负载电流无关, 与占空比 D 成反比。也就是说可以在任意负载和输入电压变化范围内实现滞后桥臂的零电流开关。

(2) 最大占空比 D_{max}

该变换器的最大占空比可由下式表示:

$$D_{max} = 1 - \frac{t_{12} + T_{ZCS}}{T_s/2} \quad (12)$$

式中 T_{ZCS} 是实现滞后桥臂 ZCS 的时间, 它由器件的关断特性所决定, 如 IGBTs 的少子复合时间。

4 仿真与实验结果

为了验证本电路的工作原理, 采用 PSPICE 软件对电路做了仿真分析。并采用此方案, 研制成功 28.5V/100A 飞机用开关电源。仿真和实验所用的参数为:

- 输入直流电压: $V_{in} = 270\text{VDC}$;
- 输出直流电压: $V_o = 28.5\text{VDC}$;
- 变压器原副边匝比: $K = 7$;
- 变压器原边漏感: $L_{lk} = 10\mu\text{H}$;
- 阻断电容: $C_b = 2\mu\text{F}$;
- 并联电容: $C1 = C3 = C_r = 15\text{nF}$;
- 输出滤波电感: $L_f = 30\mu\text{H}$;
- 输出滤波电容: $C_f = 10000\mu\text{F}$;
- 开关管: IGBT, CT60AM-20;
- 串联二极管为: DSEP2×31-03A;
- 输出整流二极管: MEK95-06 DA;
- 开关频率: $f_s = 50\text{KHz}$

图 5 给出了在输出满载 100A 时的仿真和实验波形对比图。5(a) 是原边电压 V_{AB} 和原边电流 i_p 波形。该图表明当 $V_{AB} = 0$ 时, 阻断电容 C_b 上的电压使 i_p 从折算到原边的负载电流减小到零, 从而实现滞后桥臂的零电流开关。与移相 ZVS PWM 变换器相比, 本变换器不存在原边环流, 因而可以提高变换效率, 图 5 (b) 是阻断电容的电压波形, 当原边电流正向流动时, 阻断电容电压是增加的。而当原边电流反向流动时, 阻断电容电压是减小的。图 5 (c) 是滞后桥臂开关管的电流和驱动波形, 该图说明滞后桥臂是零电流开关的。图 5 (d) 是领先桥臂开关管的电压和驱

动波形, 该图说明领先桥臂是零电压开关的。

5 结论

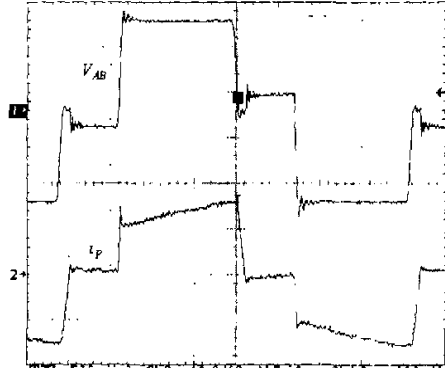
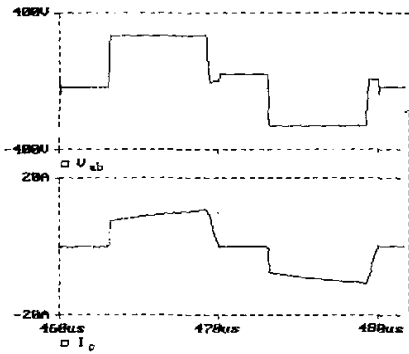
本文提出的新型移相零电压零电流 PWM 变换器有如下优点:

①去掉了谐振电感, 避免了谐振电感带来的副边占空比丢

失;

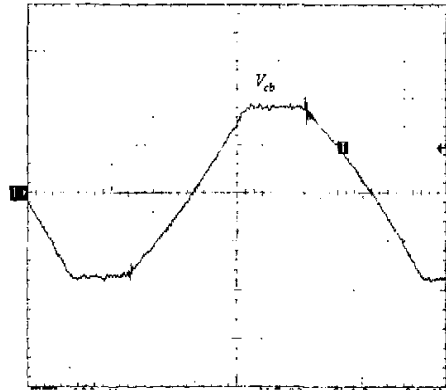
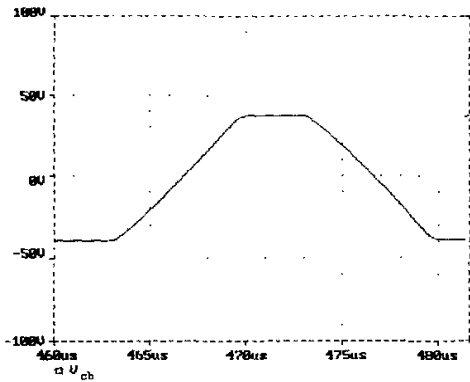
②不存在移相零电压 PWM 变换器的原边环流, 提高了变换器的变换效率;

③可以在任意负载和输入电压变化范围内实现滞后桥臂的零电流开关。



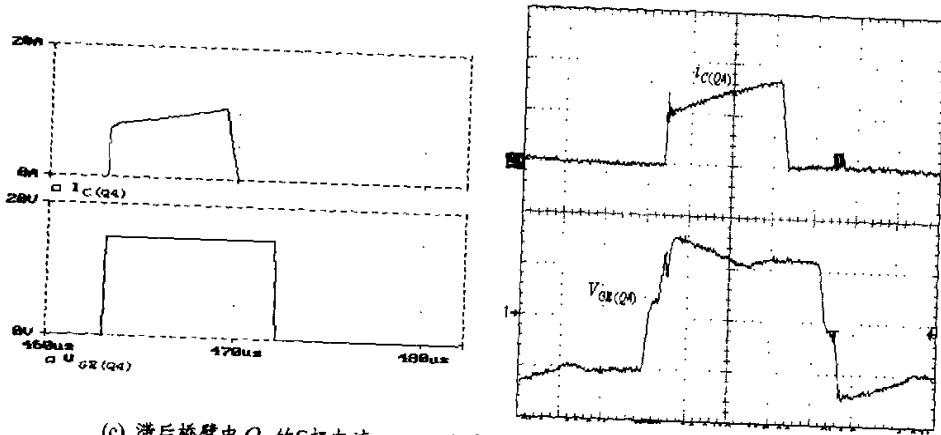
(a) 原边电压 V_{AB} (上面曲线) 和原边电流 i_p (下面曲线)

(实验波形的时间标尺: $2.5\mu s/div$, 电压标尺: $150V/div$, 电流标尺: $10A/div$)

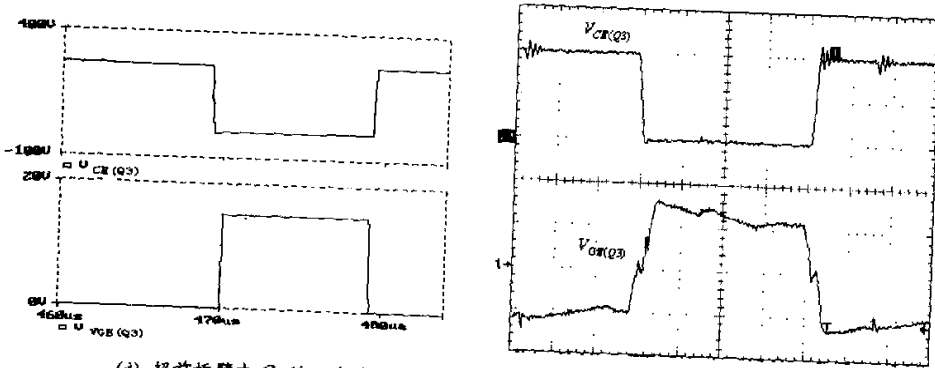


(b) 阻断电容电压 V_{cb}

(实验波形的时间标尺: $2.5\mu s/div$, 电压标尺: $25V/div$)



(c) 滞后桥臂中 Q_4 的 C 极电流 $i_{C(Q4)}$ (上面曲线) 和驱动电压 $V_{GE(Q4)}$ (下面曲线)
 (实验波形的时间标尺: $2.5\mu s/div$, 电流标尺: $10A/div$, 电压标尺: $10V/div$)



(d) 超前桥臂中 Q_3 的 CE 极电压 $V_{CE(Q3)}$ (上面曲线) 和驱动电压 $V_{GE(Q3)}$ (下面曲线)
 (实验波形的时间标尺: $2.5\mu s/div$, 电压标尺: $150V/div$ (上), 电压标尺: $10V/div$ (下))

图 5.10 仿真与实验结果

参考文献

[1] 阮新波, “移相控制零电压开关 PWM 变换器的研究”, 南京航空航天大学博士论文, 1996 年 5 月
 [2] 阮新波, “PWM DC/DC 全桥变换器的软开关技术研究”, 南京航空航天大学博士后研究报告, 1998 年 6 月
 [3] K. Cen, and T. A. Stuart, “A study of IGBT turn-off behavior and switching losses for zero-voltage and zero-current switching”, IEEE APEC, 1992, PP411-418
 [4] J. G. Cho, J. A. Sabate, G. Hua, and F. C. Lee, “zero-voltage and zero-current-switching full bridge PWM converter for high power applications”, IEEE PESC, 1994, pp102-108

[5] J. A. Sabate, V. Vlatkovic, R. B. Ridley F. C. Lee, and B. H. Cho “Design considerations for high-voltage high-power full-bridge zero-voltage-switched PWM converter”, IEEE APEC'90 PP275-284

作者简介

周林泉, 男, 1963 年 12 月生, 硕士, 讲师。主要从事功率变换的研究。

阮新波, 男, 1970 年出生, 毕业于南京航空航天大学, 博士、副教授、IEEE 会员。在国际国内期刊和会议上发表论文 20 余篇, 获得一项部级科技进步三等奖, 主持一项航空基金项目。研究方向是直流变换器的软开关技术, 逆变器的软开关技术, 功率因数校正技术及开关电源的建模分析。