

新型 ZCT-PWM 软斩波调功逆变电源的研究

崔冬明, 惠 晶

(江南大学, 江苏 无锡 214122)

摘要: 介绍一种用于逆变电源功率调节的新型零电流转换-脉宽调制 (Zero Current Transition-Pulse Width Modulation, 简称 ZCT-PWM) 直流斩波器, 与传统 Buck-PWM 斩波器相比, 增加了一个辅助功率开关器件及谐振电感和谐振电容等, 克服了传统 ZCT-PWM 斩波器不能零电流开通 (ZCS) 和负载续流二极管不能软关断的缺点。该斩波器具有开关损耗低, 结构简单, 控制方便等优点, 适合用于以 IGBT 为开关器件的高频电源场合。采用高速 IGBT 开关器件设计了一台 5kW/50kHz 逆变电源样机。实验结果表明, 该样机能高效、可靠地运行在高频大负载变化范围内。

关键词: 逆变器; 斩波电路; 调节/软开关

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2007)06-0040-03

Research on a Novel ZCT-PWM Soft Chopper Applied to Inverter's Power Regulation

CUI Dong-ming, HUI Jing

(Southern Yangtze University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A novel Zero Current Transition-Pulse Width Modulation (ZCT-PWM) DC/DC chopper is introduced to regulate the output power of an induction heating power in this paper. The proposed chopper owns to overcome the drawbacks of the conventional ZCT-PWM chopper, such as the main switching element is not turned on in soft switching state of Zero Current Switching (ZCS), and the main diode is turned off in hard switching state. By adding some auxiliary switching elements, a resonant inductor as well as a capacitor, and compared with the hard switching chopper, the proposed one can realize that the main switching element turns on in ZCS and the main diode turns off in soft state. The power system is provided with lower switching losses, simpler structure and easier controlled performance. It is particularly suitable for the high frequency induction heating power, which consists of high speed IGBTs and pursuits higher frequency cases. An experimental induction heating power has been implemented to evaluate the ZCT-PWM control performance. The results of the experiment show that the cost-effective prototype based on the proposed chopper is successfully operated at output up to 5kW and operating frequency up to 50 kHz.

keywords: inverter; chopper circuit; regulation/soft switching

1 引言

逆变电源以其环保节能等优点, 越来越广泛地用于现代工业中。目前, 逆变电源调功方式的研究已经非常广泛, 采用逆变侧调功, 同时进行频率跟踪的逆变电源控制方式, 其控制难度比较大, 而且功率调节范围窄^[1]。

近年来, 由于大功率开关器件的发展, 采用直流斩波调功方式的逆变电源越来越多, 其优点是结构简单, 控制方便, 但因大多采用 DC/DC 硬斩波电路, 使得电网侧的电流谐波分量和功率开关器件的损耗增大。虽然通过采用零电压转换-脉宽调制 (ZVT-PWM)、零电流转换-脉宽调制 (ZCT-PWM) 等软开关技术^[2-4]可以减少电路中功率开关器件的开关损耗, 但因它们不能同时解决主开关器件的零电流开通和

负载反并联续流二极管的软关断问题, 因而效果并不理想, 尤其是在大功率、高开关频率下, 采用 IGBT 作为开关器件时, 若不能实现零电流关断, 则因 IGBT 的关断拖尾电流造成的开关损耗会很大^[5]。

为此, 介绍了一种新型 ZCT-PWM 直流软斩波 DC/DC 变换器。它通过给主开关管并联一个辅助开关管, 并增加一只谐振电感和一只谐振电容, 既可克服传统 ZCT-PWM 斩波变换器存在的缺点, 又能减少 IGBT 开关器件的开关损耗, 为实现高频、大功率逆变电源场合下的软斩波调功提供了有效方案。

2 主电路拓扑与控制策略

图 1 示出采用 DC/DC 软斩波直流调功方式的逆变电源主电路拓扑。该拓扑包括不控整流器、直流斩波器和逆变器 3 部分。三相交流电源先通过不控整流器, 经电容 C_1 滤波后得到直流电压; 通过调节直流斩波器中主开关器件 VT_1 的占空比, 可调节直流斩波器的输出电压, 进而调节电源的输出功率; 逆

定稿日期: 2006-09-12

作者简介: 崔冬明 (1980-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生。

研究方向为电力电子与电力传动。

变器采用锁相环技术,可实现逆变侧 ZCS。与直流调功方式相比,虽然逆变侧调功方式没有中间的直流斩波器,但要在逆变侧同时实现功率调节和频率跟踪,则存在控制复杂,调功范围窄的缺点。从整体上看,虽然斩波调功方式比逆变侧调功方式增加了一个斩波调功环节,但具有控制相对简单,控制精度高,调功范围宽的优点。

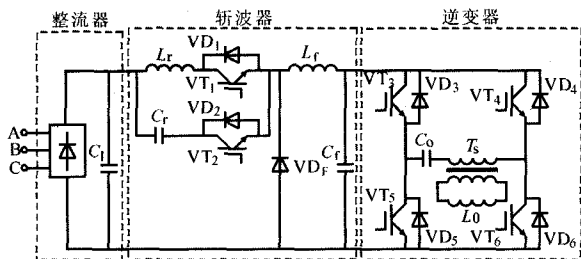


图 1 斩波调功式逆变电源主电路拓扑

3 软斩波器运行分析

图 2 示出图 1 的简化等效电路。滤波电路由滤波电感 L_r 和滤波电容 C_r 构成。为分析方便,现假定:①在一个开关周期内,输入电压和输出电流分别为常值;负载 R_L 相当于逆变器负载谐振时的等效阻抗;②电路中各元器件为理想器件。在一个周期内电路的稳定运行状态可分为 7 个运行阶段。图 3 示出一个周期内电路的工作理论分析波形。

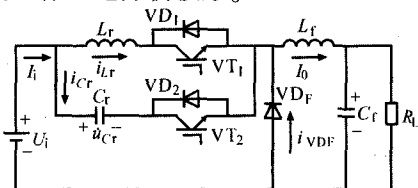


图 2 改进型 ZCT-PWM 斩波电路拓扑结构

图中 L_r ——谐振电感 C_r ——谐振电容
 VT_1, VT_2 ——主开关管和辅助开关管
 I_o ——负载电流,为恒定电流

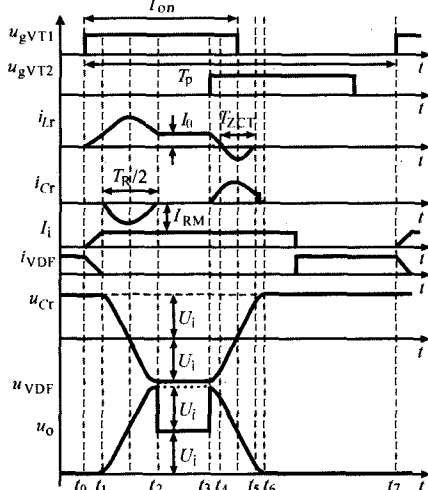


图 3 改进型 ZCT-PWM 稳态运行波形

图 4 示出各个工作模式的等效电路。各阶段的运

行模式如下:

(1) 模式 1 $[t_0 \sim t_1]$ 初始阶段, VT_1 处于关断状态,续流二极管 VD_F 导通续流。电路中,输入电流 $i_i=0$;谐振电感电流 i_{L_r} 等于谐振电容电流 i_{C_r} 等于零;续流二极管电流 i_{VDF} 等于负载电流 I_o ;谐振电容电压 u_{C_r} 等于输入电压 U_i 。

在 $t=t_0$ 时刻,使 VT_1 导通,电流开始流过 VT_1 ,在 L_r 和 L_r 共同作用下, i_{L_r} 开始线性增加, i_{VDF} 线性减小,形成 $U_i \rightarrow L_r \rightarrow VT_1 \rightarrow L_r \rightarrow R \rightarrow U_i$ 的闭合电流回路。电路方程为:

$$\begin{cases} i_{L_r} = i_{VT_1} = \frac{U_i}{L_r} (t - t_0) \\ i_{VDF} = I_o - i_{L_r} = I_o - \frac{U_i}{L_r} (t - t_0) \end{cases} \quad (1)$$

在该模式内, VT_1 中的电流 i_{L_r} 上升率受 L_r 和 L_r 的限制,使 VT_1 近似零电流开通(ZCS), VD_F 零电压关断(ZVS)。该时段下的运行模式见图 4a。

(2) 模式 2 $[t_1 \sim t_2]$ 在 $t=t_1$ 时刻, L_r 和 C_r 开始谐振,谐振回路为 $L_r \rightarrow VT_1 \rightarrow VD_2 \rightarrow C_r$,设谐振电流峰值

为 I_{RM} , 电路方程为:

$$\begin{cases} i_{L_r} = i_{VT_1} = \frac{U_i}{Z} \sin \omega(t - t_1) + I_o \\ i_{C_r} = -i_{VD_2} = -\frac{U_i}{Z} \sin \omega(t - t_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad Z = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$

在该模式下, C_r 两端的电压降低, VD_F 两端的电压升高。在 $t=t_2$ 时刻,流经 VT_1 的电流再次达到 I_o , $u_{C_r} = -U_i$, VD_2 在准 ZCS 模式下关断。该时段下的运行模式见图 4b。

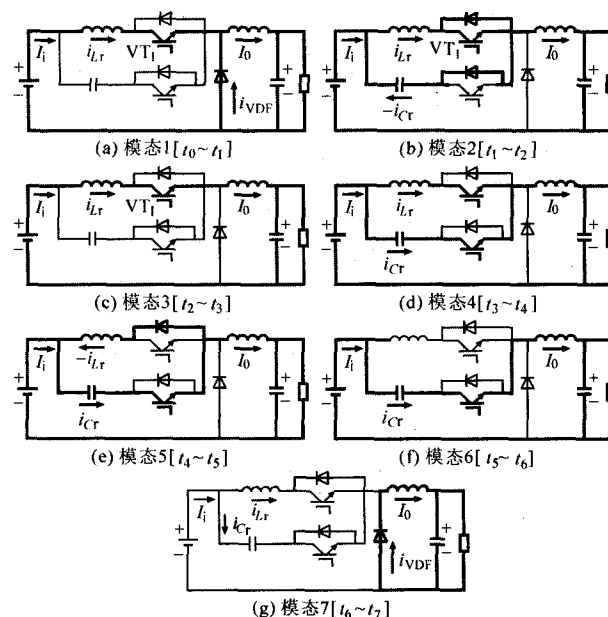


图 4 各个工作模式等效电路图

(3) 模式 3 $[t_2 \sim t_3]$ 该阶段为 PWM 控制阶段。在

该阶段, $i_{Lr}=i_{VT1}=I_0$, 一直持续到 VT_2 导通。该时段下的运行模态见图 4c。

(4) 模态 4 [$t_3 \sim t_4$] 在 $t=t_3$ 时刻, 使 VT_2 导通, L_r 和 C_r 继续谐振, 谐振回路为 $L_r \rightarrow C_r \rightarrow VT_2 \rightarrow VT_1$ 。电路

方程为:

$$\begin{cases} i_{Lr}=i_{VT1}=I_0 - \frac{U_i}{L_r} \sin\omega(t-t_3) \\ i_{Cr}=i_{VT2} = \frac{U_i}{Z} \sin\omega(t-t_3) \end{cases} \quad (3)$$

该时段下的运行模态见图 4d。

(5) 模态 5 [$t_4 \sim t_5$] 在 $t=t_4$ 时刻, 二极管 VD_1 开通, 谐振电流反向流过 VT_2 和 VD_1 。电路方程为:

$$\begin{cases} i_{Lr}=-i_{VD1} = -\frac{U_i}{Z} \sin\omega(t+t_3,4-t_4)I_0 \\ i_{Cr}=i_{VT2} = \frac{U_i}{Z} \sin\omega(t+t_3,4-t_4) \end{cases} \quad (4)$$

在 $t=t_5$ 时刻, 流过 VT_2 的电流再次降到 I_0 , 流经 VT_1 的电流变为零, VD_1 自然关断。在该阶段内必须关断 VT_1 , 以保证 VT_1 是在 ZVZCS 状态下关断的。该时段下的运行模态见图 4e。

(6) 模态 6 [$t_5 \sim t_6$] 在该时段, C_r 以恒定电流 I_0 充电; 在 $t=t_6$ 时刻, C_r 两端的电压 u_{Cr} 达到最大值 U_i ; 同时, I_0 从 VT_2 转移到 VD_F , VD_F 以 ZVS 的状态开通。在 $t=t_6$ 时刻后, VT_2 两端的电压 $u_{VT2}=0$, 到 VT_1 的下一个驱动信号到来之前, 必须封锁 VT_2 上的驱动信号, 以保证 VT_2 在 ZVS 状态下关断。该时段下的运行模态见图 4f。

(7) 模态 7 [$t_6 \sim t_7$] 该阶段为 PWM 的控制阶段。该阶段的长短由斩波器的频率和控制脉冲占空比决定。在 $t=t_7$ 时刻, 一个开关周期结束, 另一个开关周期开始。该时段下的运行模态见图 4g。

4 实验结果

为验证上述理论分析, 设计了一台 5kW/50kHz 的逆变电源样机, 主要开关器件采用高速 IGBT 器件。其中, VT_1 的型号为 IXGH25N120A; VT_2 的型号为 IXGH25N100A。经过一段时间的稳定运行, 得到了不同负载下的系统运行状态。图 5a 示出输出功率 $P_o=2.5kW$ 时 VT_1 和 VT_2 的驱动电压 u_{gVT1} 和 u_{gVT2} 实验波形。图 5b, c 分别示出 VT_1 和 VT_2 实现 ZCS 开通和 ZVZCS 关断时的驱动电压 u_{gVT1} , u_{gVT2} 和电流 i_{VT1} , i_{VT2} 实验波形。图 5d 示出 VD_F 实现 ZVS 开通和关断时的电压 u_{VDf} 和电流 i_{VDf} 实验波形。由波形可见, 实验结果与理论分析基本一致。图 6 示出在有效调功范围运行下新型 ZCT 软斩波器和传统 Buck 硬斩波器的输出功率 P_o 、效率 η 曲线。由图可见, 采用新型软斩波器时系统效率平均提高了 7% 左右, 在额定

输出功率下, 系统的最大效率可达 98%。

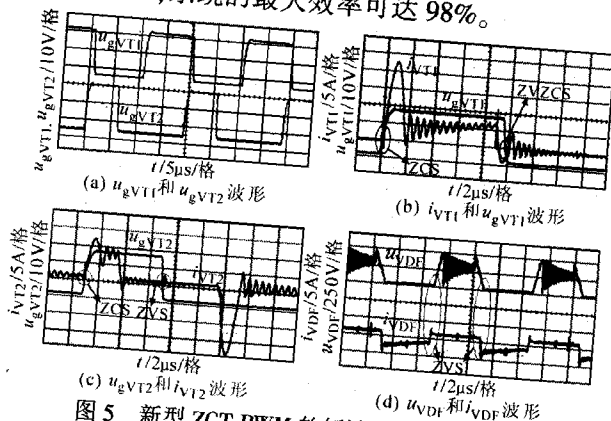


图 5 新型 ZCT-PWM 软斩波器的实验波形

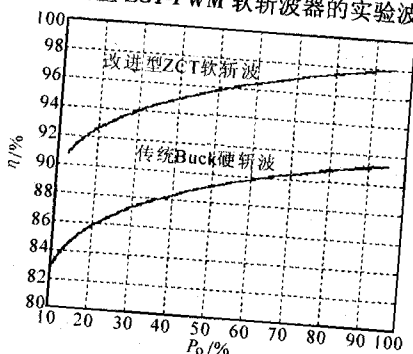


图 6 功率-效率关系曲线

5 结论

介绍的新型 ZCT-PWM 直流斩波器可作为高频大功率逆变电源的软斩波调功器。通过调节斩波器的输出电压就可调节系统的输出功率, 而且可将功率控制与逆变侧的频率跟踪控制分开, 使得系统的控制得以简化, 可靠性得以提高。实验结果表明, 采用该软斩波器的逆变电源可在高频下实现其宽负载变化范围内的稳定运行, 并保证有较高的转换效率。因而它的出现, 为进一步增加系统的容量提供了保证。

参考文献

- [1] 戚宗刚, 柳鹏, 陈辉明. 感应加热调功方式探讨[J]. 金属热处理, 2003, 28(7): 54~57.
- [2] Hua Guichao, Ching-Shan Leu, Jiang Yimin, et al. Novel Zero-voltage-transition PWM Converter [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1994, 9 (2): 213~219.
- [3] Mao Hengchun, F C Y Lee, Zhou Xunwei, et al. Improved Zero-current-transition Converters for High-power Applications [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1997, 33 (5): 1220~1232.
- [4] Ching-Jung Tseng, Chern-Lin Chen. Novel ZVT-PWM Converters with Active Snubbers [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1998, 13(5): 861~869.
- [5] Stein C M O, Hey H L A. True ZCZVT Commutation Cell for PWM Converter [J]. IEEE Trans. on Power Electron, 2000, 15(1): 185~193.