维普资讯 http://www.cqvip.com

移相控制 ZVZCS DC/DC 变换器主电路分析设计

罗 怡，许先果
（重庆大学，重庆 400044）

摘要：设计了一种用于焊接电源的全桥移相控制软开关型 DC/DC 变换器的主电路。通过仿真软件 Pspice 9.2 建立了主电路仿真模型，仿真分析了超前桥臂和滞后桥臂实现零电压、零电流开关的设计原理，并对其进行了验证。结果表明，该设计可大大减小开关损耗。此外，在设计了元器件存在误差的前提下，进行了蒙托卡诺分析。最后，通过实验验证了该设计可使变换器实现全范围的软开关。

关键词：移相控制 / 软开关；开关损耗
中图分类号：TM46 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-100X(2005)04-0017-03

Analysis and Design of a Zero-Voltage Zero-Current-Switching Converter based on Phase-shifted Control

LUO-Yi, XU Xian-guo
(*Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*)

Abstract: This paper presents a design of the main circuit of the soft-switch DC/DC inverter based on full-bridge phase-shifted control for welding power supply. With the simulation software of Pspice 9.2, the paper completes a simulation model of main circuit, analyzes the realization of ZVZCS in ahead bridge and lagging bridge and proves the sharp decrease of switching power loss. And the Monte Carlo Analysis is used to analyze the effects of some errors of components occurring. At last, the test results show that the full range soft-switch can be realized by experiment and design.

Key words: phase-shifted control/soft-switch; switch loss

1 引 言

随着电力电子技术的发展和半导体集成电路的普及，逆变电源不断向小型轻量化发展，这就迫使用于电源的 DC/DC 变换器也要小型化。因此，逆变电源高频化已成为重要的研究课题。软开关技术作为高频化的有效手段，受到了世界各国研究者的极大关注，他们正从电路分析和实用化两个方面进行积极的研究和开发[1]。软开关技术综合了 PWM 技术和谐振技术的优点，使得开关电源中功率开关器件实现了零电压或零电流的开通和关断，与硬开关电源相比，可大幅度减少开关损耗，降低开关器件的电压、电流应力，从而使电源的电磁干扰(EMI)减少，工作可靠性提高。本文研究设计了一种用于弧焊电源的移相控制软开关型 DC/DC 变换器，它采用 OrCAD 公司的最新 Pspice A/D V9.2 电路仿真软件，对其主电路进行了仿真分析，通过实验验证了该设计的合理性，也为电源的进一步设计提供了科学依据。

2 主电路设计及其工作原理

2.1 主电路设计

图 1 示出移相全桥控制主电路拓扑及其驱动信号时序图。

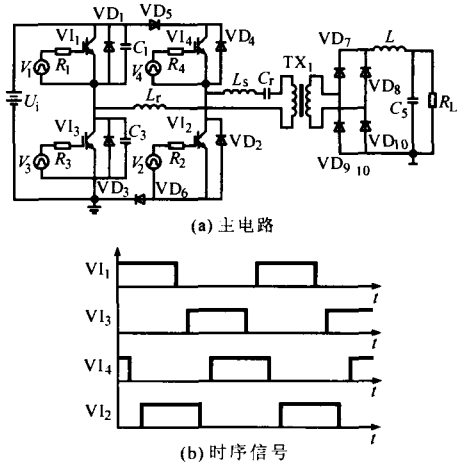


图 1 移相全桥控制主电路及其驱动信号时序图

图中 VD_1~VD_4——VI_1~VI_4 上反并联的续流二极管
C_1, C_3——谐振电容 C_r——隔直阻断电容
VD_5, VD_6——阻断二极管 TX_1——变压器
L_r——变压器漏感 L_s——饱和电感
V_1~V_4——IGBT 管的触发脉冲源
R_L——负载电阻

该主电路设计为移相全桥零电压零电流开关脉宽调制(PS-FB-ZVZCS-PWM)变换器。它采用 IGBT 作为开关元件[2]，用 VI 表示，VI_1 与 VI_3 反相，为超前桥臂；VI_2 与 VI_4 反相，为滞后桥臂。当外电路电流流

定稿日期：2004-09-23
作者简介：罗 怡(1979-)，男，四川苍溪人，硕士研究生，研究方向为弧焊电源及焊接自动化。

维普资讯 http://www.cqvip.com

经 VD_1~VD_4 时,开关器件处于零电压、零电流状态。此时,开通或关断开关器件,都是 ZVS,ZCS 工作。C_1,C_3 分别是开关管的寄生电容与外接谐振电容之和,且 $C_1=C_3$。器件开通之前,并联电容上的电荷要放光,以确保器件安全;开关器件关断时,并联电容抑制 du/dt,消除 u,i 重叠时间,避免发生开关损耗。接入 VD_5,VD_6 是为了利用二极管的单向导电性来阻止反向电流,以克服在续流阶段引起的 LC 振荡,避免造成无谓的环流损耗。在箝位续流期间,L_r 的能量存储到 C_r 上,加快初级电流 i_p 的衰减,直至电流为零并保持[3]。有电流时,L_s 饱和,相当于短路;无电流时,L_s 脱离饱和,感抗很大,相当于开路。起到磁性开关的作用,以减小占空比 D 的丢失。

2.2 工作原理

每只开关管的导通接近于 180°,因开关管存在关断时间,在同一桥臂的开关管导通关断时,需要一定的延时时间,以避免直通,保证开关管安全。VI_1,VI_3 的导通时刻不变,控制 VI_2,VI_4 的导通时刻,使 VI_2 与 VI_1 的导通时刻相差 0°~180°。当 VI_1,VI_2 的移相角 φ=0°时,输出最大;当 VI_1,VI_2 的 φ=180°时,逆变器无输出。VI_3,VI_4 类似于 VI_1,VI_2。

VI_1 或 VI_3 的开通是通过 $L_r+L_s+N_2L$ 与 C_1,C_3 谐振,使 C_1 或 C_3 上的电压降为零,VD_1 或 VD_3 导通,从而为 VI_1 或 VI_3 创造了零电压开通条件。VI_2,VI_4 实现零电流开关的原理是:当 i_p 谐振到零时,因 C_r 和 L_s 的作用,使其在零状态保持一段时间。在此期间,VI_2,VI_4 实现了零电流开关。

3 主电路的仿真分析

3.1 仿真模型的建立

在分析上述设计和工作原理的基础上,建立了移相全桥控制主电路的仿真原理图。将主回路的输入等效为直流电源 U_i,V_1~V_4=20V,上升时间 t_r 和下降时间 t_f 均为 0.01μs,脉冲宽度 W=12μs,脉冲周期 T_s=30μs,VI_2 和 VI_4 的延迟时间分别为 t_d=5μs,t_d=20μs,以实现移相控制。对主电路进行瞬态响应分析,可得到各点的电压和电流波形。

3.2 ZVZCS 的实现

VI_1 先开通,经一定的 α 后,VI_2 导通,此时 L_s 饱和。随着 L_r 将能量转移到 C_r,由于 C_r 的并联吸收电容作用,使 VI_1 实现了近似零电压关断,当电流经 VD_3 续流,使 VI_3 两端的电压为零时,VI_3 实现了零电压开通;当加快环流衰减,使电流降为零时,关断 VI_2,实现了 VI_2 的零电流关断,L_s 脱离饱和,感抗很大,电流维持在零;然后开通 VI_4,实现了 VI_4 的近似零电流开通。另半个周期与此类似。整个周期,超前管均实现了零电压开通,近似零电压关断;滞后管均实现了近似零电流开通,零电流关断。图 2 示出仿真实现零电压零电流开通与关断的 VI_1,VI_4 的集-射极电压 u_{ce} 和集电极电流 i_c 波形。可见,仿真模型较好地实现了零电压零电流的开通与关断。

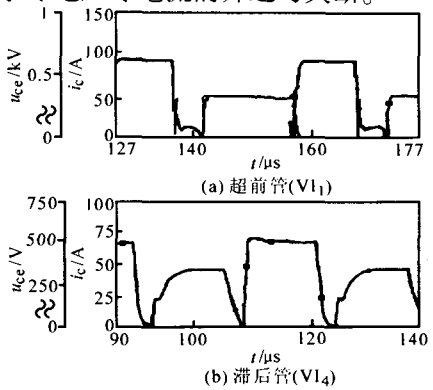


图 2 VI_1 和 VI_4 的 u_{ce} 和 i_c 仿真波形

3.3 软开关损耗

由于功率开关管在零电压或零电流条件下自然开通或关断,所以较大程度上解决了硬开关型弧焊电源功率开关损耗 P_c 过大的缺点。图 3 示出仿真模型中开关管的 P_c。超前管为零电压开通,近似零电压关断;滞后管为近似零电流开通,零电流关断,电压与电流几乎没有重合,理论上不存在 P_c。可见,仿真模型中 VI_3 只有较少的关断损耗 P_{off},VI_2 也仅有非常少的 P_c。

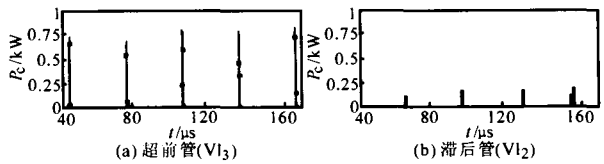


图 3 VI_3 和 VI_2 的 P_c

3.4 蒙托卡诺分析

由于电子元件值存有误差,会因此造成电路中的特性偏移。设计中,必须确认其偏移程度是否仍在规格范围之内。蒙托卡诺分析 (Monte Carlo Analysis)的主要的目是分析元件误差对电路特性的影响程度[4]。

一般而言,元件的误差分布状态呈现一种高斯分布曲线,因此它对线路特性的影响也应呈现高斯分布曲线。将蒙托卡诺分析的随机数设置为高斯分布曲线,使得统计结果更接近真实的情况。同时,将图 1 中所有的 R,L,C 元件的误差范围都设为 10%,即误差值等于 10%。执行随机抽样的次数设为 100 次,使作出来的统计图表更精细可靠。对 VI_3 和 VI_2 开关过程中的 P_c 进行蒙托卡诺分析,图 4 示出以直

维普资讯 http://www.cqvip.com

方统计图形式给出的分析结果。

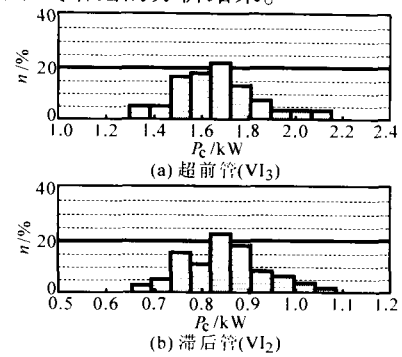


图 4　VI_3 和 VI_2 开关过程中的 P_c 蒙托卡诺分析

图中　n——几率,%

由统计图的分析数据可见,100 次抽样中,VI_3 的输出平均值$\bar{P}_{coVI3}$=1660.48W，输出平均偏差值$\Delta\bar{P}_{coVI3}$=160.937W,输出最大值$P_{co\ maxVI3}$=2154.4W,输出最小值$P_{co\ minVI3}$=1293.02W,输出中间值$P_{co\ 0\ VI3}$=1640.56W,输出结果中 10% 不超过 1465.57W,90% 不超过 1887.27W;VI_2 的$\bar{P}_{coVI2}$=844.357W,$\Delta\bar{P}_{coVI2}$=87.2779W,$P_{co\,maxVI2}$=1088.73W,$P_{co\,minVI2}$=642.551W,$P_{co0\,VI2}$=844.514W,10%不超过 736.651W,90%不超过 959.479W。可见,在元件误差 10%的情况下,开关管的P_c是很小的。若分析结果不能满足要求，则可调整误差范围再进行分析。采用这种仿真分析法,其分析效率更高,它可在实际设计中为确定元件的误差范围提供依据。

4　实验与结果

采用图 1 设计的 ZVZCS 变换器主电路进行实验。开关管选用富士公司生产的 2MBI400N-060 型 IGBT 模块,采用 UC3875 为核心构成软开关电源移相 PWM 控制器。直流输入电压 U_i=550V,空载电压 U_0=70V。图 5 示出带负载时超前桥臂和滞后桥臂的软开关实测波形。其中,图 5a 是超前桥臂开关管的驱动电压 u_{ge} 和 u_{ce} 波形。超前桥臂开关管的 u_{ge} 在转变为栅极正偏压之前，在谐振换流作用下,u_{ce} 提前下降为零并维持，直到 u_{ce} 再次恢复前,u_{ge} 转变为零,从而实现了开关管的零电压开通关断;图 5b 是滞后桥臂开关管的 u_{ge} 和 u_{ce} 波形。它类似于图 5a 的过程,最终实现零电流开通与关断。实验结果证明,采用本文设计研制的移相 ZVZCS 变换器可实现全范围的软开关,达到大幅度减小P_c的目的。

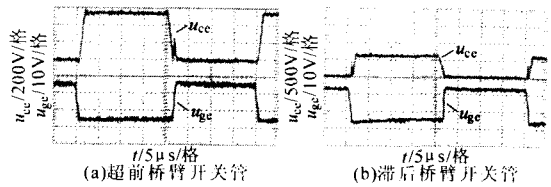


图 5　超前桥臂开关管和滞后桥臂开关管的软开关实现

5　结　论

通过 Pspice 仿真及实验验证了设计的 PS-FB-ZVZCS-PWM 变换器。它能实现超前臂的零电压开通，近似零电压关断，以及滞后臂的近似零电流开通,零电流关断,并能大大降低开关管的 P_c。通过蒙托卡诺分析可得，当 R,L,C 元件的误差为 10%时，对开关管的 P_c 影响不大。该仿真分析及其实验结果为电源的进一步设计提供了可靠的科学依据。

参考文献

[1]　何希才,姜余祥.新型稳压电源及其应用[M].北京:国防工业出版社,2002.

[2]　黄石生.新型弧焊电源及其智能控制[M].北京:机械工业出版社,2000.

[3]　陈树君,卢振洋,黄鹏飞,等.双零软开关弧焊逆变电源[J].焊接学报,2002,23(3):1~5.

[4]　郑光钦.全能 OrCAD 混合电路仿真[M].北京:中国铁道出版社,2000.

(上接第 10 页)

5　结　论

提出了一种根据占空比变化相应调整补偿时间的死区补偿方法，并在补偿过程中综合考虑了开关管导通压降造成的电压畸变。同时,基于 F240 DSP,提出了一种简单易行的数字化补偿方法。它可用于三相逆变器的死区补偿。实验证明,该方法具有良好的补偿效果。

参考文献

[1]　S G Jeong,M H Park.The Analysis and Compensation of Dead-time Effects in PWM Inverters[J].IEEE Trans.on Ind. Electron,1996,38(2):108~114.

[2]　Jong Woo C, Seung Ki S.Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation [J].IEEE Trans. on Power Election,1996,11(2):211~227.

[3]　Won Seok Oh,Yong Tae Kim,Hee Jun Kim.Dead Time Compensation of Current Controlled Inverter Using Space Vector Modulation Method[A].Power Electronics and Drive Systems '95,Proceeding of International Conference [C]. 1995,1:374~378.

[4]　孙向东,钟彦儒.一种新颖的死区补偿时间测量方法[J].中国电机工程学报,2003,23(2):103~107.