

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.01.006

基于IGBT全桥式逆变焊机主电路的设计与仿真

尹路, 易吉良, 张宝

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 设计了一种以FB-ZVS-PWM的IGBT全桥逆变的工作方式为逆变电源主电路拓扑结构的逆变焊机主电路, 其结构由输入整流滤波电路、逆变器和输出整流电路3部分构成。分析了主电路的工作原理, 设置了元器件的参数, 并在此基础上进行了MATLAB仿真实验。在理论基础之上, 设计了原型机, 并进行实验。仿真实验结果和原型机实验结果均证明了所提出的电路设计的合理性和可行性。

关键词: 逆变器; 绝缘栅双极晶体管; 电弧焊; 逆变拓扑结构

中图分类号: TG434.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)01-0026-06

Design and Simulation of Main Circuit for IGBT-Based Full-Bridge Inverter Welding Machine

Yin Lu, Yi Jiliang, Zhang Bao

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Designed the main circuit of inverter welder with a FB-ZVS-PWM full-bridge IGBT inverter work as inverter main circuit topology, which consisted of the input rectifier filter circuit, inverter and output rectifier circuit. Analyzed the main circuit working principle and designed parameters of the components. Based on it, made the MATLAB simulation, and set up a prototype on the theoretical basis and made an experiment. The simulation result and prototype experimental result both demonstrated rationality and feasibility of the proposed circuit design.

Keywords: DC-AC inverter; insulated gate bipolar transistor (IGBT); electrode welding; inverter topology

0 引言

焊接电源是实现焊接的重要设备。特别是逆变焊机, 由于其性能突出, 具有其它链接方法不能比拟的优点, 因而在石油、化工、电子、制造、航空、宇航等领域中得到了广泛的应用。焊接技术现已成为一个国家制造业是否先进的衡量标准之一, 并且在制造业中起到了非常重要的作用^[1-2]。尤其是近半个世纪以来, 随着电力电子器件以及电力电子技术

的快速发展^[3], 焊接技术发展迅速, 焊接工艺也得到了优化和改善。

逆变焊机的发展经历了最初的晶闸管、大功率晶体、金氧半场效晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) 逆变焊机, 现主要为绝缘栅双极晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 逆变焊机。IGBT因为同时具备功率 MOSFET 和双极型晶体管的功能, 具有高速交换和高电压处

收稿日期: 2013-11-10

基金项目: 湖南工业大学研究生科研创新基金资助项目 (CX1302), 湖南省自然科学基金株洲市联合基金资助项目 (12JJ9042), 湖南工业大学自然科学基金资助项目 (2011HZX07)

作者简介: 尹路 (1985-), 男, 湖北天门人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力网络自动化技术及应用,

E-mail: hbtmyinlu668@163.com

理、大电流处理能力,因此在中大功率的逆变焊机中得到了普遍运用^[4]。本研究拟选用IGBT作为全桥逆变电路的功率器件,对中频逆变焊机的主电路进行设计。并且通过理论分析,对逆变焊接电源在主电路的设计及元件选择时所采用的依据和方法进行阐述。最后,在仿真结果的基础上进行实物实验,以验证所提出的中频逆变焊机主电路设计的合理性和可行性。

1 工作原理及设计

逆变弧焊电源按其组成结构可分为主电路和控制电路2部分。主电路的功能是将电网的电能传送给负载,其结构包括输入整流滤波电路、逆变器、输出整流滤波电路3部分。其中,逆变器是主电路的核心部分,由中频变压器和IGBT功率开关管组成。电源结构中除了主电路以外的部分即为控制电路。

目前,常用的主电路结构有单端正激式、推挽式、半桥式和全桥式4种,各种主电路结构的功能和组成如表1所示。

表1 常用主电路拓扑结构对比

项目	单端正激式	推挽式	半桥式	全桥式
U_{ce}	U_E	$2U_E$	U_E	U_E
I_c	I_c	I_c	$2I_c$	I_c
P_o	P_o	P_o	$P_o/2$	P_o
U_1	U_E	U_E	$U_E/2$	U_E
U_o	$U_E D/K$	$2U_E/K$	$U_E D/K$	$U_E D/K$
m	2	2	2	4
输出功率	小、中	大	中	大

在表1中, U_{ce} 为IGBT承受的外加直流电源电压; I_c 为输出功率大小一样时的电流; P_o 为相同 I_c 时的输出功率, U_1 为中频变压器原边电压; U_o 为输出电压; m 为功率管器件个数; U_E 为外加的直流电源电压; D 为IGBT的占空比; K 为变压器 T 的匝数比。

对比表1中各拓扑结构的相关数据,可知全桥式逆变电路具有较大的输出功率,常用于输出功率较大的场合。本设计中,因对功率开关管的耐压程度要求可以略低,故结合焊机的设计要求,选用全桥式逆变电路结构。本实验焊机的主要参数设置如下:逆变频率为28 kHz,输入电压为380(1±15%)V,空载电压为70 V,电流调节能力为30~500 A,输出的额定电流为500 A,输出的额定电压为60 V,额定负载持续率为60%。

所设计的主电路原理图见图1,其中的VT1和VT4作为一对组成桥臂、VT2和VT3作为一对组成另一组

桥臂,成对的2个桥臂相互轮流导通和关断,以使中频变压器 T_1 的一次侧绕组上的电压波形为正负方波,并且是对称互补的波形。

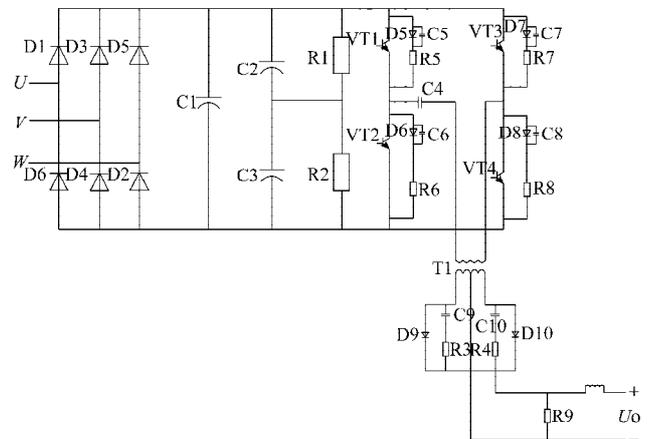


图1 主电路结构原理图

Fig. 1 The structural principle diagram of main circuit

主电路可分为输入整流滤波电路、逆变器、输出整流滤波电路3部分。

1) 输入整流滤波电路。该部分电路中,由D1~D6 6个二极管组成整流电路;电解电容 C_1 为高频滤波电容,它的功能是为了隔离逆变电路与输入电网之间的谐波干扰;电阻 R_1 和电容 C_2 并联、电阻 R_2 和电容 C_3 并联,然后串联,共同组成滤波电路。

2) 逆变器。由4个功率开关管IGBT(VT1~VT4)与中频变压器 T_1 一起组成逆变器;电阻(R_5 ~ R_8)与二极管(D5~D8)一起组成RCD吸收回路,其作用是为了减小功率开关管在导通和关断过程中电流和电压对IGBT的冲击。

3) 输出整流滤波电路。由快速恢复整流二极管D9与D10和平波电抗器 L_1 一起构成单相全波整流滤波输出电路模块; R_3 , C_9 与 R_4 , C_{10} 组成D9,D10的吸收回路。

1.1 输入电路设计

1.1.1 输入整流二极管的选取

三相桥式整流电路中,正弦半波的有效值和整流二极管的额定电流值之间的关系为

$$I_b = 1.57 I_{N,1}$$

式中: I_b 为整流电路中正弦半波电流的有效值;

$I_{N,1}$ 为输入整流二极管的额定电流值。

由于每个整流管在一个周期内的导通时间是其周期的1/3,故输入整流管的电流有效值为

$$I_b = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \approx 0.58 I_d$$

式中 I_d 为输入电流的平均值,亦为中频变压器原边电流 I_1 ,从1.2节中的内容可知其大小为71 A。因此

$$I_{N1} = \frac{0.58I_d}{1.57} \approx 0.369I_d \quad (1)$$

为了满足 1.5~2.0 倍的安全裕值, 故其值要偏大, 考虑安全裕量并结合式 (1), 可得 I_{N1} 的大小范围为 39.3~52.4 A。

输入整流二极管的最大承受电压 $U_{m,i}$ 为

$$U_{m,i} = \sqrt{2}U_i \times 1.15 \approx 617.9 \text{ V}$$

式中: U_i 为输入母线电压, 取 380 V;

1.15 为电网的波动范围最大值。

综上所述, 考虑到空余足够大的安全裕量, 实际操作中, 应当选择额定电压为 1 200 V、额定电流为 52 A 的整流二极管 6 只。

1.1.2 输入滤波电容

为了使整流后输出的直流电变得更平滑, 可在输出的直流电两端加入滤波电容。电容的大小为

$$C = \frac{I_d}{\Delta u} T_1 \quad (2)$$

式中: Δu 为整流后输出纹波电压峰-峰值;

T_1 为滤波电容的放电时间。

当逆变焊机接收来自于母线的 380 V 电压, 空载时, 经过整流滤波后的纹波电压峰值大小近似为 540 V, 假设电网的电压波动系数为 6%, 从而可得到 Δu 的值为 32.4 V, I_d 直流电的平均值为 71 A, 而 T_1 为如下表达式:

$$T_1 = \frac{T}{6} - \frac{1}{\omega} \arccos \left(1 - \frac{\Delta u}{U_d} \right) \quad (3)$$

式中: T 为工频交流电周期, 大小为 20 ms;

ω 为工频的角频率, 大小为 $2\pi f$ 。

经过计算, 可得 T_1 为 2.2 ms^[7]。

将以上数据带入式 (2) 和式 (3) 中, 可以得到滤波电容 C 的大小, 为 3 877 μF 。而在实际设计的电路中, 常选用 4 个大小为 2 200 μF , 耐压值为 600 V 的电解电容, 且每 2 个电容先串联成一组, 再并联后使用到电路中。

1.2 逆变器的设计

1.2.1 中频变压器的设计

在逆变电路中, 变压器是其重要组成部分, 具有隔离电网和负载、功率传输、降低电压的功能, 对逆变器输出端的电气性能指标起着决定性的作用。变压器的制作关键在于把漏感量合理地减到最小, 结构紧凑, 因此要选择优良的铁芯材料。

1) 磁芯材料的选取

目前, 变压器的铁芯材料主要分为铁氧体、非晶合金和微晶软磁材料 3 种。其中, 铁氧体材料的发热量会随着频率、铁损的增加而升高, 因此, 铁氧体

铁芯材料正逐渐被其它新型铁芯材料所取代。与其它两种材料相比, 非晶态磁性材料的饱和磁感应强度较高 (为 0.6~1.5 T), 居里温度可达 350~700 °C, 电阻率可达 120~150 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$, 是硅钢片的 3 倍, 特别是它的矫顽力 H_c 很小, 从而其铁损较小。故综合上述因素, 本设计中选用非晶合金作为铁芯材料。

2) 匝数的计算

设变压器原边绕组为 N_1 , 副边绕组为 N_2 。变压器原边电压为互补对称的方波电压, 其幅值大小是电网输入三相电压 U_i 经整流滤波再逆变后输出的电压 U_1 , U_1 按电网无波动时的输入电压 380 V 计算, 故

$$U_1 = \sqrt{2}U_i \approx 1.414 \times 380 \text{ V} = 537.32 \text{ V}$$

式中 U_1 为中频变压器原边的幅值, 其大小接近似值取 540 V。

为了使焊条电弧焊引弧可靠, 焊机空载电压取 70 V, 并设有一定的调节范围, 将变压器二次侧电压大小设为 80 V, 则变压器的变比为:

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{540}{80} = 6.75 \approx 7$$

对于逆变电路的变压器, 其原边绕组匝数为

$$N_1 = \frac{U_1 t_{on}}{2BS} \quad (4)$$

此次设计中, 采用 NOL-1208050 型号的非晶合金磁心, 横截面积为 8.75 cm^2 , 工作频率为 28 kHz, 则 PWM 的工作周期约为 36 μs , 为了防止 IGBT 上下桥臂短路发生直通现象, 应留有一定死区, 取最大占空比为 90%, 则每个功率管导通的最大时间为:

$$t_{on} = 18 \mu\text{s} \times 90\% = 16.2 \mu\text{s}$$

为了避免铁芯趋于饱和, 取铁芯饱和时磁感应强度大小的 1/3 作为铁芯正常工作时的最大磁感强度, 即 $B=0.25T$ 。将上述数据代入式 (4), 可得 N_1 为 28 匝, 进而可知变压器的副边匝数 N_2 为:

$$N_2 = \frac{N_1}{n} = \frac{28 \text{匝}}{7} = 4 \text{匝}$$

1.2.2 IGBT 的选择

IGBT 的作用是利用它可控的开关特性, 按固定规律地导通和关断将直流电压逆变成正负交替互补的方波电压。由此可知, IGBT 在整个逆变电源器件中的作用是不言而喻的。要使逆变焊机高效、稳定地运行, 必须把它的参数设置在正向偏置安全区域, 这样才不至于让脆弱的 IGBT 烧掉甚至炸毁。

1) IGBT 的额定电压 U_{cep}

输入电压经整流滤波后, 因为电网波动范围为 15%, 因此输出直流电压的最大值为:

$$U_d = \sqrt{2}U_i \times 1.15 \approx 617.9 \text{ V}$$

式中 U_d 为 IGBT 工作时至少应该能够承受的稳态时的电压值。

考虑到 1.5~2.0 倍的安全裕量, 关断时的 IGBT 的耐压峰值电压 $U_{cep,s}$ 最少应为:

$$U_{cep,s} = U_d * a \approx 926.9 \text{ V}.$$

式中 a 为安全裕值, 大小为 1.5。

IGBT 的额定电压 U_{cep} 应高于该电压, 实际电路设计中按电压大小为 1 200 V 取值。

2) 额定电流 I_{cs}

中频变压器原边电流值为

$$I_1 = I_N \frac{N_2}{N_1} = 500 \text{ A} \times \frac{4}{28} \approx 71 \text{ A},$$

式中 I_N 为焊机输出的额定电流。

则每个 IGBT 功率管流过的平均电流为

$$I = 0.5I_1 = 0.5 \times 71 \text{ A} = 35.5 \text{ A}.$$

故 IGBT 的额定电流计算值 I_{cs} 为

$$I_{cs} = \sqrt{2}I \times 1.5 \times 1.4 \approx 105 \text{ A}.$$

式中: I 为每只 IGBT 管上平均电流;

1.4 为峰值系数;

实际电路设计中, 额定电流 I_{cs} 根据二极管电流等级, 按 150 A 取值。

1.3 输出电路设计

1.3.1 整流二极管设计

在选择整流二极管时, 应该以较快的反向恢复时间和较小的反向恢复电流为宜。输出的整流部分选择的是变压器副边带有中心抽头的全波整流。由于 IGBT 的工作频率为 28 kHz, 要求二极管的反向恢复时间和恢复电流都很小, 因此本设计中选择快速恢复二极管。

对于单相全波整流电路, 硅整流二极管的输出额定电流 $I_{N,O}$ 为 $I_{N,O} = 0.5I_N = 0.5 \times 500 \text{ A} = 250 \text{ A}$ 。

输出整流二极管上所能承受的最大反向额定电压 $U_{m,o}$ 为

$$U_{m,o} = \frac{2U_m}{n} = \frac{2 \times 617.9 \text{ V}}{7} \approx 176.5 \text{ V}.$$

式中 U_m 为 IGBT 逆变功率管承受的电压的耐压值。

考虑到安全裕量, 实际电路中输出整流二极管的额定电压为 300 V, 额定电流为 300 A, 共阴极的二极管 2 只。

1.3.2 输出直流滤波器设计

直流电抗器的铁心形状分为闭合与条形, 为了避免短路电流很大时发生饱和的现象, 应该选用一般硅钢片作为条形铁心。根据逆变频率为 20 kHz, 选择电感量的大小为 50 μH , 条形铁芯电感的计算公式为

$$L = 0.001 9 A_c N^{1.74}. \tag{5}$$

式中: A_c 为铁芯的横截面积, 单位为 cm^2 , 此处取 35 cm^2 ;

N 为线圈的匝数;

L 为电感量。

把相关数据带入式 (5), 经计算, 可得出线圈的匝数 N 为 12 匝。电路设计中, 电抗器的实际匝数要在不断地调试中修正和选取。

2 仿真及实验分析

根据图 1, 用 Matlab 建立系统主电路的仿真模型, 如图 2 所示。

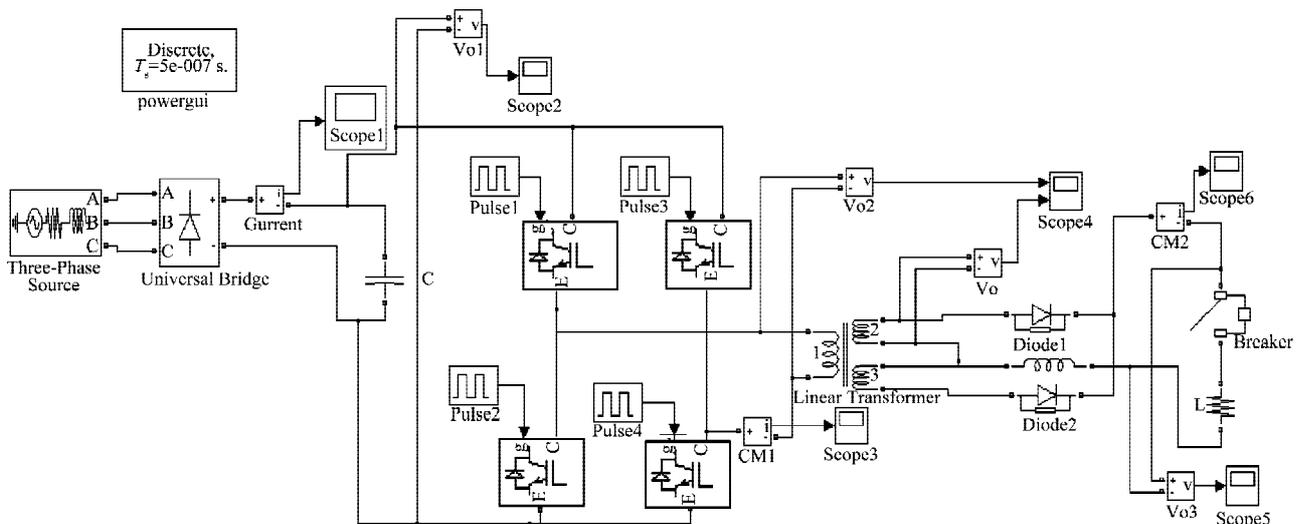


图2 主电路的仿真原理图

Fig. 2 Simulation schematic of main circuit

根据焊机的焊接要求, 系统的仿真时间设置为 1 s。仿真的具体参数如下: 输入电压为三相交流电

压,其大小为 380 V;频率变压器 T_1 的变比为 7,二次侧电感设为 0.000 8 H;隔直电容为 40 μF ;输出滤波电感的大小为 50 μH 。限于篇幅,仅给出了输出电压的实验结果情况。图 3 所示为主电路空载和带载时的输出电压波形仿真效果图,当 t 等于 1 s 时开始接入负载。

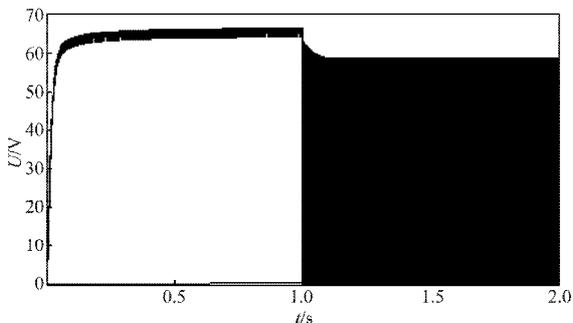


图3 空载和负载时的输出电压波形

Fig. 3 The output voltage waveforms when no-load and load

从图 3 中可以看出,空载时焊机主电路输出的稳态电压值大约为 66 V,电压脉动较小,较好地满足了设计要求;当接入负载时,其电压大小在 60 V 以内,满足额定电压的要求。

图 4 所示为空载时焊机主电路仿真波形的局部放大图。

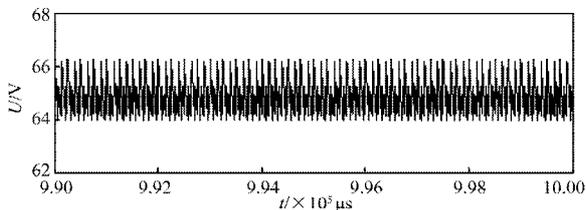


图4 空载时输出电压波形

Fig. 4 The output voltage waveform when no-load

从图 4 中可以看出,由于有稳压电容且无法形成回路,因此输出电压幅值一直维持在 65.2 V 左右,电压脉宽值在 2 V 以内。

图 5 所示为带载时焊机主电路仿真波形的局部放大图。

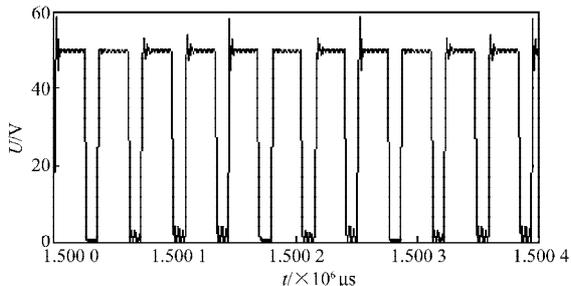


图5 带载时输出电压波形

Fig. 5 The output voltage waveform with load

从图 5 中可以看出,带载时焊机主电路构成回

路,其负载阻值很小,近似于短路,这使得电流得以释放,故其形状为占空比约为 60% 的方波。

从仿真的结果和参数要求分析,可知本系统的设计是可行的。

为了进一步验证设计的可行性,在仿真的基础上设计了如图 6 所示的实物图。

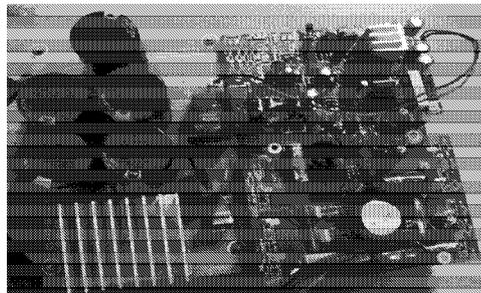


图6 逆变焊机设计实物图

Fig. 6 The designed physical picture for inverter welding machine

图 6 所示逆变焊机实物图中,其左半部分为输入整流电路部分的整流模块,其整流桥在散热片下面;右半部分是逆变电路部分的逆变模块。在此基础上进行了实验和测试,所得结果如图 7 和 8 所示。

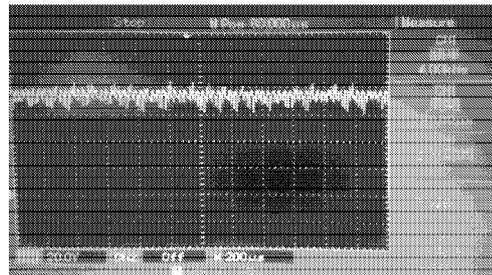


图7 空载时输出电压的实测波形

Fig. 7 The measured waveform of output voltage when no-load

从图 7 中可以看出,所设计的逆变焊机,空载时输出的电压波形为脉宽小于 15 V,其值大约为 70 V 左右的纹波。

在焊接过程中,逆变焊机中频变压器副边的电压将经过单相全波整流后的电压加载到负载中,此时负载两端的波形如图 8 所示。

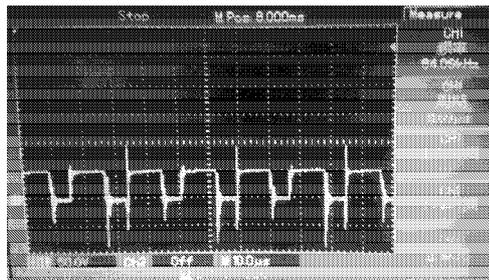


图8 带载时输出电压的实测波形

Fig. 8 The measured waveform of output voltage with load

由图8可看出,由于全波整流,该波形的频率变为原来的2倍;当导通和关断IGBT时,由于系统主回路电感的存在,导致了尖峰的出现。对比仿真图和实验图可以看出,两者的波形基本相似,这说明所设计的逆变焊机主电路较好地满足了系统的要求,达到了较为理想的效果。

3 结论

通过对以FB-ZVS-PWM的IGBT全桥逆变的工作方式为逆变电源主电路拓扑结构的逆变焊机主电路的设计,可得到如下结论:

1) 在逆变焊机领域里,使用的主要功率开关器件是IGBT,因此逆变焊机的安全性能主要是由IGBT决定的,所以选择恰当的IGBT至关重要。此外,为了避免出现烧管或者炸管现象,还应当充分考虑IGBT安全裕量的留取。

2) 在输入电路中,整流二极管所标有的数据是该二极管生产厂家给出的额定值,即为平均值,当计算如何选取时须进行换算。选取滤波电路的电容时,也必须充分考虑其余量,经探讨,余量以稍微过剩5%左右为宜。

3) 输出电路部分的输出整流二极管最好不要采用普通的二极管,应采用快速恢复二极管为宜。

4) 通过仿真及设计实物实验,证实了本研究所提出的设计方案是合理的、可行的,达到了预期的效果。

参考文献:

- [1] 陈善本,吴林.焊接智能化技术现状与发展[C]//第十次焊接会议论文集:第一册.哈尔滨:黑龙江人民出版社,2001:12-17.
Chen Shanben, Wu Lin. Welding Intelligent Technology Status and Development[C]//The Tenth Welding Conference Proceedings: Volume I. Harbin: Heilongjiang People's Publishing House, 2001: 12-17.
- [2] 易志华.国外电焊机发展概况:上[J].电焊机,1996,26(5):1-5.
Yi Zhihua. General Situation of Foreign Electric Welding Machines[J]. Electric Welding Machine, 1996, 26(5): 1-5.
- [3] 张光先.逆变焊机原理与设计[M].北京:机械工业出版社,2008:86-98.
Zhang Guangxian. Inverter Welding Machine Principle and Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 86-98.
- [4] 黄俊,王兆安.电力电子技术[M].5版.北京:机械工业出版社,2009:98-112.
Huang Jun, Wang Zhaoan. Power Electronics Technology [M]. 5th Edition. Beijing: China Machine Press, 2009: 98-112.
- [5] 于明.IGBT在逆变焊机中的正确选择和使用[J].电焊机,2011,41(5):14-16.
Yu Ming. Effective Application and Selection of IGBT in Welding Inverter[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(5): 14-16.
- [6] 顾公兵,田松亚,姚河清.IGBT全桥式CO₂逆变焊接电源主电路的设计[J].电焊机,2003,33(11):18-23.
Gu Gongbing, Tian Songya, Yao Heqing. Design of Main Circuit of Inverter Power Based on IGBT Full Bridge Used in CO₂ Welding Machine[J]. Electric Welding Machine, 2003, 33(11): 18-23.
- [7] 王晓菲,陈克选,肖笑.DSP控制的IGBT逆变式GAMW焊接电源主电路设计[J].电焊机,2009,39(11):65-68.
Wang Xiaofei, Chen Kexuan, Xiao Xiao. Design of Main Circuit of DSP Controlled IGBT Inverter Type GAMW Welding Power Source[J]. Electric Welding Machine, 2009, 39(11): 65-68.

(责任编辑:廖友媛)