全桥逆变弧焊主电路中 RC 缓冲电路的分析与设计

田松亚, 李万刚, 孙 烨, 吴冬春 (河海大学机电工程学院, 江苏常州 213022)

摘 要: 在续流回路中续流二极管的开通与关断均产生负载的巨大变化, 会给线路带 来一定的 di/dt, 它与变压器的漏感、吸收回路电感以及杂散在线路中的电感作用, 会形 成电压浪涌, 给 IGBT 带来电压冲击, 这不利于 IGBT 的可靠工作。如果续流二极管始终 处于关断状态, 则在 IGBT 上不产生过电压, 这种关断轨迹有利于 IGBT 可靠工作。 建立 了全桥主电路中 IGBT 关断期间的数学模型, 求解该模型得到 U_@数学解析式, 得到变压 器的漏感越小, IGBT 的 U_@电压越小的结论。 根据具体的主电路参数, 计算出合理开关 轨迹下的 RC 缓冲电路中的电阻值, 根据缓冲回路电阻的功率限制和开关轨迹的要求 计算缓冲电容值, 通试试验证明了 IGBT 关断期间的数学模型是正确的. 关键词: 桥式逆变主电路: 开关轨迹; RC 缓冲电路: 电压浪涌



田松亚

中图分类号: TG434.5 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)03-081-04

0 序 言

逆变式弧焊电源的主电路形式主要有单端、半桥、推挽、全桥等几种形式,全桥式逆变电路是应用 最广的,国内外许多厂家如时代、瑞凌、日本松下、美 国林肯等焊机都采用此主电路结构。该电路的优点 是输出功率较大,要求功率开关管耐压较低,便于选 管¹¹。

主电路是焊机的基础,承担着转换和传递能量的任务,必须安全可靠地正常工作。逆变焊机中功 率器件 IGBT 的损坏是影响主电路正常工作的最主 要因素。IGBT 损害,不外乎是在开关过程中遭受了 过量 di/dt, dv/dt 或瞬时功率。缓冲电路的作用, 就是改变器件的开关轨迹,控制瞬态电压,降低瞬态 电压,降低开关损耗,保证 IGBT 的工作在安全区 内^[2]。

1 全桥逆变主电路工作原理

全桥式逆变主电路如图 1 所示。图中 E 为电网 输入电压经过整流滤波后得到的直流电源, $Q_1 ~ Q_4$ 是四个 IGBT。其中, Q_1 和 Q_4 是一组, Q_2 和 Q_3 是一 组。电源的逆变过程如下: 当 Q_1 和 Q_4 开通, Q_2 和 Q_3 关断时, 电源经过 Q_1 、变压器原边、 Q_4 构成导通 回路; Q_1 和 Q_4 由开通到关断, Q_2 和 Q_3 并不是立刻 开通,而是继续关断一段时间后才开通,以防止直通现象的发生;当 Q_2 和 Q_3 开通, Q_1 和 Q_4 关段时,电源 经过 Q_2 、变压器原边、 Q_3 构成导通回路;当 Q_2 和 Q_3 由开通到关断, Q_1 和 Q_4 并不是立刻开通,而是继续 关断一段时间后才开通,进入下一个逆变过程^[3]。



图 1 全桥式逆变主电路 Fig 1 Main circuit of full bridge inverter

从图 1 中可以看到, 在每个 IGBT 的 C, E 间都并 联了一个 RC 阻容缓冲回路(*R*₁, *C*₁, *R*₂, *C*₂, *R*₃, *C*₃, *R*₄, *C*₄)。对于硬开关的逆变全桥主电路, 由于存在 较大的开关应力, RC 缓冲电路是必不可少。

2 关断轨迹的选择

RC 缓冲回路参数对 IGBT 的开关轨迹有很大的 影响。图 2 是 RC 缓冲较重时 IGBT 的 U_{ce}波形示意 图。IGBT 模块内部的续流二极管 (D_1, D_2, D_3, D_4) 在 变压器原边续流期间 $t_1 \sim t_2$ 和 $t_3 \sim t_4$ 中未导通, $t_2 \sim t_3$ 和 $t_4 \sim t_5$ 分别对应 Q_1, Q_3 的导通时间和 Q_2, Q_4 的导通时间。



图 2 IGBT 的 U_{ce} 波形示意图(续流二极管不导通) Fig. 2 Wave of U_{ce} in IGBT(freewheeling diode turns off)

图 3 是 RC 缓冲较轻时 IGBT 的 U_{ce} 波形示意 图。图 3 表明在续流过程中, 续流回路随着续流二 极管存在开通与关断进行转换。二极管开通与关断 均产生负载的巨大变化, 会给线路带来一定的 d*i*/ d*t*。它与变压器的漏感、吸收回露电感以及杂散在 线路中的电感作用, 形成电压浪涌⁴¹, 给 IGBT 带来 电压冲击, 这很不利于 IGBT 的正常可靠工作。



图 3 IGBT 的 U_{ce} 波形示意图(续流二极管导通) Fig. 3 Wave of U_{ce} in IGBT(freewheeling diode turns on)

在图 2 中,由于吸收回路 RC 的作用,在续流过 程中续流二极管始终处于关断状态,续流回路未发 生转换,减小了 d*i*/d*t*。这种 RC 参数下不产生 IG BT 的过电压,此关断轨迹有利于 IGBT 可靠工作。

3 IGBT 关断期间的波形分析

四个 IGBT 同时关断期间的电路模型如图 4 所

示。其中 L_r 是主变压器原边的漏感, R 是模拟负载 电阻r 在原边的等效电阻, $R = n^2 r$, n 为主变压器的 变比。电容 C_1, C_2, C_3, C_4 上的电压分别为 U_1, U_2, U_3, U_4 。



图 4 IGBT 关断期间的等效电路 Fig 4 Equivalent circuit during IGBT turn off

在四个 IGBT 都关断期间,由于变压器原边的漏 感储能,会形成 I 和 II 两个对称的续流回路。根据 该电路的对称性可列出如下方程,即

$$2L_{r}\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + U_{3} + i(R_{3} + R_{4} + 2R) = U_{4}.$$
(1)

$$i = C_3 \frac{\mathrm{d}U_3}{\mathrm{d}t} = -C_4 \frac{\mathrm{d}U_4}{\mathrm{d}t}.$$
 (2)

(3)

初始条件为 $U_4|_{r=0} = E; U_3|_{r=0} = 0;$ $2i|_{r=0} = \frac{\alpha E}{n^2 r} (\alpha$ 为占空比系数)。 由初始条件和式(2)可得 $U_3 = -U_4 + E.$

将初始条件和式(3)代入式(1)可得

$$U_3 = e^{At} (C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t) E + 0.5E_{\circ}$$
(4)

 $i = C_3 A e^{At} (C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t) E +$

$$C_{3}\mathrm{e}^{At}(-C_{1}\omega\sin\omega t + C_{2}\omega\cos\omega t)E, \qquad (5)$$

式中: $A = -(n^2 r + R_3)/2L_r$;

$$\omega = \sqrt{4L_{r}C_{3} - (n^{2}r + R_{3})^{2}2C_{3}^{2}/2L_{r}C_{3}};$$

$$C_{1} = -0.5; C_{2} = \left(\frac{1}{2n^{2}r} + 0.5C_{3}A\right) / \omega C_{3}.$$
则AB间的电压为

*U*_{AB}=*U*₃+*iR*₃。 (6) IG BT 的 CE 间电压小于电源电压 E (续流二极 管不导通)的条件为 *U*_{CD}≥0, 即

$$U_4 - iR_{3} \ge 0. \tag{7}$$

式中: C_1 , C_2 为系数, C_{3w} 为电容 C_3 的数值。从式 (7)可见变压器的漏感与 IGBT 的 CE 间电压 U_{ab} 或 U_{cd} 呈指数关系。如果 $L_r = 0$, 则续流 i = 0, $U_3 =$ 0.5E, $U_{AB} = 0.5E$, $U_{CD} = 0.5E$, 所以变压器的漏感 Lr.越小越好。

4 RC 吸收参数的计算

RC 吸收回路参数的计算要基于主电路的形式 与主电路的参数,此电路的主要参数是焊机的逆变 频率为20 kHz, 焊机额定电流为350 A, 短路时最大 电流为 500 A, 变压器变比 10 ·1, 变压器漏感 10 #H。 4.1 电阻 R 的计算

当 t₁ 时刻, 即续流初始时刻, 电流 i 最大, 由于 短路过渡时最大电流可达 500 A. 所以续流初始时续 流电流 i 为 25 A, 在该时刻 U4 为 540 V, 代入式(8) 可得 R<21.6 Ω。

IGBT 开通时,有缓冲电容放电,电源给同臂另 一电容充电和给负载供电,这三股电流流过 IGBT, 若 R 过小,则充放电阻尼较小,开通尖峰电流较大, 这样会给 IGBT 造成较大的开通应力。久之,将会使 IGBT 失效, R 取 18 Ω。

4.2 电容 C 的计算

在RC 缓冲回路中, C 的值越大, 缓冲效果越 好。但是随着 C 的增大, R 上的功率随之增加, 缓 冲电路损耗将增加。考虑到实际的使用,缓冲电路 的功率损耗应该在100 W 以内。缓冲电路的功率损 耗可以由下式得到

$$P = P_{\rm L} + P_{\rm Co} \tag{8}$$

 $P_{\rm L}$ 来自于变压器漏感储存能量,续流开始时, 变压器原边储能为 $W=1/2L_i^2$,这部分能量由4个 吸收电阻全部消耗掉(忽略负载电阻在原边等效电 阻 R 的功率损耗),在一个逆变周期中有两次续流 过程,周期为T,所以

$$P_{\rm L} = \frac{W}{2T} \, . \tag{9}$$

将主电路参数代入可得 $P_{\rm L}=30.6$ W。

Pc 来自于吸收电容 C 充放电。以 C1, C3 来计 算,由图 2 所示的工作过程,在 $t_1 - t_2$ 阶段,电容初 始状态的能量为

$$W_{1s} = \frac{1}{2} C E^2.$$
 (10)

末态(IGBT 关断平衡时)能量为

$$W_{\rm lm} = \frac{1}{2} C[(\frac{E}{2})^2 + (\frac{E}{2})^2].$$
 (11)

过程的能量损耗为

$$W_{\rm l} = W_{\rm ls} - W_{\rm lm} = \frac{1}{4} G E^2$$
. (12)

这部分能量由 2 个吸收电阻以热量的形式消

 $t_2 - t_3$ 阶段, 电容由 E/2 充电至电源电压 E, 充电回路为电源 E-RC-导通的 IGBT,该电路为一个 简单的 RC 充电电路, 电容 C 的初态电压为 E/2, 充 电电流

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$
 (13)

式中: τ 为时间常数, $\tau = RC$; U = E/2。

在此过程中, 电阻中消耗的能量

$$W_2 = \int_0^t i^2 R \mathrm{d}t. \qquad (14)$$

将式(14)代入式(15)可解得

$$W_{2} = \frac{1}{2} C U^{2} (1 - e^{-\frac{2t}{\tau}}) \approx \frac{1}{2} C U^{2}, e^{-\frac{t}{\tau}} \leq 1.$$
 (15)

 $t_3 - t_4$ 阶段与 $t_1 - t_2$ 阶段均为续流过程,此阶 段电阻 R 上的消耗的能量 W3 与 W1 相同, 即

$$W_3 = W_1. \tag{16}$$

 $t_4 - t_5$ 阶段, 电容电压由 E/2 放电至零。放电 回路为电容 C一电阻 R一导通的 IGBT,该电路为一 简单的 RC 放电回路, 电容初态电压为 E/2, 末态电 压为零,能量均由电阻 R 消耗,所以此阶段电阻上 消耗的能量为

$$W_4 = \frac{1}{2}C(\frac{E}{2})^2$$
. (17)

由以上分析,可得

$$P_{\rm C} = \frac{\frac{W_1}{2} + W_2 + \frac{W_3}{2} + W_4}{T} = \frac{1}{2} C E^2.$$
(18)

综上分析, C 要满足 Pc<69.4, 解得 C<23.8 nF。 将 $R = 18 \Omega$ 代入续流二极管不导通的条件式(9), 解得 C≥17 nF, 所以 C 要在 17 nF 和 23.8 nF 之间取值, 综合 考虑 C 取 20 nF。

试验分析 5

5.1 电压浪涌

图 5 试验条件: 三相输入电压 50 V, 模拟负载 r=0.05 Ω,保护电容 C₁, C₂, C₃, C₄ 都是 30 nF,保护 电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 都是 10 Ω 吸收回路的电感为 12 //H, 变压器漏感为 20 //H, 占空比 ≥40 %。

从图 5 中可以看到, Uce的峰值比输入电压 25 V 高,已接近输入电压的一半。对于CO2焊,短路和燃 弧交替进行,短路时电流很大,在续流二极管导通的 时刻, IGBT 的 U_{ce}的波形中将出现很大的峰值, 这对 IGBT 的正常工作很不利。

5.2 四个 IGBT 关断期间电路模型的试验验证 图 6 是 试验测得 IGBT 的 U ee 波形图, 试验条

耗。



Fig. 5 U_{ce} experimental voltage wave

件: 三相输入电压 380 V, 负载 $r = 0.1 \Omega$, 保护电容 C = 20 nF, 保护电阻 $R = 18 \Omega$ 变压器漏感10 μ H, 占



图 6 U_{ce}波形 Fig 6 U_{ce}wave form

空比为 30%。 U_{ce}的电压小于电源, 故二极管不导通, 且与解析式结算结果一致。

6 结 论

(1) RC 缓冲电路中的 *R*, *C*, 可以改变器件的关断轨迹, 控制瞬态电压, 不合适的 RC 参数会造成 IGBT 失效, 降低焊机的可靠性。

(2)分析全桥主电路的工作过程,建立 IGBT 续 流期间数学模型,并求解出 U_{ce}电压数学表达式。

(3) 针对具体主电路的参数, 计算了 RC 的参数, 使 IGBT 按合适的关断轨迹工作。

(4)试验验证了所提出的续流过程数学模型, 为 RC 的计算提供了重要的数学依据。

参考文献:

- [1] 殷树言. CO₂ 焊接设备原理与调试[M]. 北京: 机械工业出版
 社, 2000.
- [2] 舒正国. 美 CDE 电容模块在缓冲电路中的应用[J]. 电气传动, 2001(5): 49-52
- [3] 赵家瑞. 逆变焊接与切割电源[M]. 北京. 机械工业出版社, 1996.
- [4] 潘岱灿. IGBT 逆变焊机的驱动和保护技术[J]. 采矿技术, 2002, 2(1): 27-28.

作者简介: 田松亚, 男 1963 年出生, 硕士, 副教授。主要从事逆变 焊机、焊接自动化等方面的教学和研究工作。发表论文 20 余篇。

Email: tiansongya@126.com

tent is 24.5% - 25.5%, B content is 1.30% - 1.40%, W content is 3.9% - 4.2%, V content is 3.0% - 3.2%.

Key words: alloy element; iron-base; hardfacing alloy; grinding abrasion

Effect of second phase particles on γ grain size and toughness and strength of CGHAZ in micro-calcium steel JIA Kunning, GAO Cainu, DO Linxiu, WANG Guodong (The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China). p73–76

Abstract: The thermal-stable particles of oxide containing Ca can be formed in micro-calcium steel which can be obtained by appending Si-Ca powder into carbon steel. The microstructure, γ grain size, strength and toughness of coarse grain heat affected zone(CG-HAZ) in micro-calcium and no micro-calcium steels were studied by SEM, microscope, tensile test and series impact experimental. The research show that the second phase particles have strong pinning force to γ grain boundary of CGHAZ in micro-calcium steel. It can retard γ grain growth in the course of welding, and fine γ grain in the CGHAZ, and improve the strength and toughness of CGHAZ in micro-calcium steel.

Key word: micro-calcium; γ grain boundary; γ grain size; toughness

Deformation control of complex space curve welded joint

WANG Junheng¹, GAO Hongming¹, ZHANG Guangjun¹, XIE Meirong², WU Lin¹ (1. National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Capital Aerospace Machinery Corporation, Beijing 100076, China). p77–80

Abstract: A type work-piece has some features such as thin wall, dense space curve welded joint, easy to deform when heated, a high demand of gap and unfitness and so on. According to the structure characteristic and the states of heating and stress for the welding parts, the distortion mechanism of the work-piece has been further investigated and subsection linear control strategy for current to suppresses the distortion has been proposed. Based on the relationship between the gap and the welding current, the subsection linear control strategy for the current has been implemented by using the signals of virtual ARC _ON/OFF companied by the current control signals produced by PLC. It has been approved that the control strategy can be successfully applied in the actual welding production and improves the quality and productivity of the work-piece.

Key words: space curve welded joint; arc welding robot; PLC; subsection linear current control

Analyze and design of RC snubber circuit in full-bridge invertermain circuitTIAN Songya, LI Wangang, SUN Yan, WuDong chun (The College of Mechanical & Electrical Engineering Ho-hai University, Changzhou 213022, Jiangsu, China). p81–84

Abstract: A great change of load occurs by freewheeling diode turning on and turning off in freewheeling circuit, it acts great

quality of di/dt on main circuit. Voltage surge happens at the action of transformer leakage, induction of snubber and circuit induction, and hams IGBT by high voltage, and influences IGBT reliable work. If freewheel diode is in state of turning off, over high voltage will not produce, and it is good switching trace. Match model of IG-BT U_{∞} and U_{∞} voltage equation is derived during turning off, and it shows that the less transformer leakage, the less voltage surge. According to main circuit parameter, R is calculated in good switching trace, and capacitance is calculated at the requirement of resistance power in snubber circuit and switching trace, and model is testified by the experiment. Reliability of main circuit is improved in full bridge inverter.

Key words: full bridge inverter main circuit; switching trace; RC snubber circuit; voltage surge

Microstructure in Fe⁻ Cr⁻ C hardfacing alloys with high C and Cr YANG Wei, WEI Jianjun, HUANG Zhiquan (Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450052, China). p85–88

Abstract: The effects of C and Cr on microstructures of Fe-Cr-C hardfacing alloys were studied. While the content of carbon is about 6.0%, the content of chromium changed, and while the content of chromium is about 40%, the content of carbon changed. The results show that C and Cr can both increase quantity of (Cr, Fe)₇C₃ primary carbide. With the content of Cr and C increasing, the shape of the primary carbide of Fe⁻ Cr⁻ C hardfacing alloy layers become more and more integrate, and the distributing of the primary carbide also becomes more and more dense. The size of the respective primary carbide gets bigger. The content of Cr in (Cr, Fe)₇C₃ primary carbide become more when the content of Cr are increased under the C content of 6.0%; but with the Cr content of about 40% the carbon content increasing makes the content of Cr in (Cr, Fe)₇C₃ primarry carbide fewer.

Key words: high-chromium cast iron; hardfacing alloy; primary carbide (Cr; Fe)₇C₃; microstructure; submerged arc welding

Microstructure and mechanical property of cast iron spraywelding LEI Ali, FENG Lajun (School of Materials Science and Engineering, Xi an University of Technology, Xi an 710048, China). p89–92

Abstract In order to avoid chill and quenched structures spheroidal graphite iron was spray-welded using oxyacetylene spray torch with self-fluxing alloy powder F101 and Ni60. It was also welded using arc welding with cast iron electrode Z308. The tensile strength hardness and metallurgical structure of samples were inspected The results indicate that chill, quenched structure and crack were appeared in the welds of arc cold welding. The hardness of fusion zone of using Ni60 alloy powder increased up to 701 HV, and it is badly harder than that of base metal. The hardness of heataffected zone and weld using F101 alloy powder is almost the same as that of base metal. Metallurgical structures indicate that there exists