

# 可控硅逆变式弧焊电源负载过程数学分析

白志范 张义 郑贵臣

(长春 吉林工业大学) (长春 吉林建工学院)

**摘要** 本文以可控硅逆变装置为研究对象,建立了数学模型,分析了理想化电流电压波形,与实测波形进行了对照;讨论了可控硅元件容量选择的依据,提出了在考虑可控硅可靠关断时应注意的问题,分析了反压及其维持时间和输出功率的关系,讨论了不同形状外特性曲线工作点的工作稳定性差异。

**关键词** 可控硅;逆变电源;数学分析

## 0 序 言

在多种可以作为逆变式弧焊电源核心电路的逆变器中,以半桥串联逆变器为高频环节的弧焊电源被认为是最有发展前途的。当然,只有以可控硅作为功率换流元件的逆变式弧焊电源才能实现这种方案。国内可控硅逆变焊机的开发,推广及应用中最大的阻力与疑虑,就是工作过程稳定性问题。本文旨在通过对半桥串联逆变式弧焊电源主电路建立数学模型与过程稳定性试验研究,从理论上阐明逆变焊机工作稳定性的一般数学分析基础,为设计研究与调试逆变焊机提供可参考的理论依据。

## 1 试验线路及条件

本文以 INS/P-315 型可控硅逆变式弧焊电源作为研究的基础。该焊机主电路如图 1 所示。该电路是一个半桥串联逆变器,也是逆变焊机的核心部分。在负载条件下将图 1 简化为等效电路如图 2。图中,将阻容保护  $C_3, R_3, C_4, R_4$  略去,  $L_1 = L_2 = L_0$  也略去,  $L_0$  为负载条件下输出变压器的漏感,因为  $L_0$  只与磁路磁阻  $R_u$ 、线圈匝数  $W$  及变压器结构形式有关,与工作频率  $f$  无关,所以可以用变压器漏感的测定值  $L$  来代替。 $L$  的测定方法按短路法,  $R$  为负载在变压器初级的折算值,并作如下假设:

(1)  $S_1$  及  $S_2$  为理想开关。

- (2) 直流电压  $E$  为恒压源。  
 (3) 半桥两臂严格对称, 即  $C_1 = C_2$ ,  
 (4) 电路处于稳定工作过程, 即  $S_1, S_2$  处在稳定的交替导通阶段, 不讨论逆变器启动时的过渡过程。

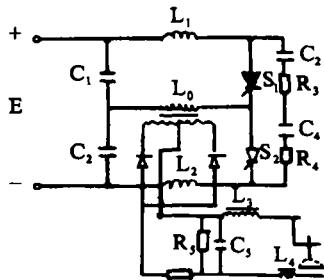


图1 逆变电源主电路

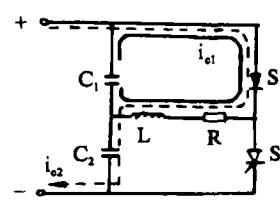


图2 简化等效电路

Fig.1 Main circuit of inverter power source

Fig.2 Simplified equivalent circuit

可控硅  $S_1, S_2$  及变压器  $B$  上的电压与电流波形是至关重要的, 因为前者的工作状态(电压及电流波形)影响逆变器的工作稳定性, 后者却影响焊机的输出功率, 这二者是本文要讨论的问题所在。

## 2 负载过程数学分析基础

在图2所示的等效电路中, 任何时刻都存在下式所表达的关系:

$$u_{C1} + u_{C2} = E \quad (1)$$

在可控硅  $S_1$  导通过程中, 有两个电流流过可控硅  $S_1$ , 即有

$$i_{S1} = i_{C1} + i_{C2} \quad (2)$$

式中  $i_{C1}$  为电容器  $C_1$  的放电电流,  $i_{C2}$  为电容器  $C_2$  的充电电流,  $i_{C1}$  及  $i_{C2}$  以相同的方向流过焊接变压器( $L$  及  $R$ )。由于半桥两臂对称以及两个电路的回路阻抗相等, 还因为存在式(1)的关系, 所以有

$$i_{C2} = i_{C1} \quad (3)$$

$$i_{S1} = 2i_{C2} = 2i_{C1} \quad (4)$$

在  $C_1 - S_1 - R - L$  组成的  $C_1$  放电回路中, 设  $S_1$  导通之前的  $u_{C1} = u_M$ ,  $i_{C1} = i_{C2} = 0$ , 在所选定的电流和电压参考方向下根据克希和夫第二定律可列如下方程:

$$-u_{C1} + u_R + u_L = 0 \quad (5)$$

式中  $u_R = R_i$ ,  $u_L = Ldi/dt$ ,  $i = 2i_{C1}$ ,  $i_{C1} = -C_2 \frac{du_{C1}}{dt}$

代入式(5), 则得:

$$2LC_1 \frac{d^2u_{c1}}{dt^2} + 2RC_1 \frac{du_{c1}}{dt} + u_{c1} = 0 \quad (6)$$

显然,这是个以  $u_{c1}$  为未知量的  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联放电的常系数二阶线性齐次微分方程。当  $R < 2\sqrt{L/2C}$  时,放电是衰减振荡过程,则  $u_{c1}$  及  $i_{c1}$  的暂态分量形式为:

$$u_{c1} = A e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi)$$

$$i_{c1} = B e^{-\delta t} \sin \omega t$$

式中  $A = \frac{\omega_0}{\omega} U_M$  ;  $\delta = R/2L$  ;  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$  ;  $\omega_0 = 1/\sqrt{2LC}$  ,  $B = U_M/L$  ,  $A$ 、 $B$  代入

上式则有

$$u_{c1} = \frac{\omega_0}{\omega} U_M e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

$$i_{c1} = \frac{1}{L} U_M e^{-\delta t} \sin \omega t \quad (8)$$

$u_{c1}$  及  $i_{c1}$  的相位差为  $\varphi$  角,衰减系数为  $\delta$ ,该正弦衰减振荡过程不可能进行到底,当  $\omega t = \pi$  时,  $i_{c1} = 0$  , 可控硅  $S_2$  自然关断,  $u_{c1}$  达到负方向极大值  $U_{反} = E - U_M$  , 将  $S_1$  反向封锁,式(7)、(8)的振荡结束,直到  $S_2$  可控硅被触发导通,一直维持  $i_{s1} = 0$  、 $U_{c1} = U_{反} = E - U_M$  这种常数状态。 $U_{反}$  为  $\omega t = \pi$  时刻的  $u_{c1}$  瞬时值,将  $\omega t = \pi$  代入式(7)则得

$$U_{反} = -U_M e^{-\delta\pi/\omega} = E - U_M \quad (9)$$

在  $\omega t = 0 - \pi$  时间内还同时存在  $C_2$  的充电过程,初始条件为  $\omega t = 0$  ,  $i_{c2} = 0$  ,  $u_{c2} = E - U_M$  , 根据  $u_{c2} + u_{c1} = E$  ,  $C_2$  充电峰值为  $U_M$  , 因为  $C_2$  充电回路与  $C_1$  放电回路的阻抗相同,所以在  $C_2$  充电回路中确定参数正方向,列方程如下:

$$u_{c2} + u_L + u_R = 0$$

同理求解有:

$$U_{c2} = E - U_M \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

$$i_{c2} = \frac{1}{\omega L} U_M e^{-\delta t} \sin \omega t \quad (11)$$

在  $\omega t = \frac{T}{2}$  时,  $S_2$  导通,  $C_1$  充电,  $C_2$  放电, 过程相同。设  $L = 150\mu\text{H}$ ,  $C = 8\mu\text{F}$ ,  $R = 2.5\Omega$ ,

$F = 2000\text{Hz}$ ,  $E = 514\text{V}$ , 用计算机作图得到如图 3 的各元件理想化波形,图 4 是条件相近情况下实测波形,比较图 3、图 4,可知,二者基本是相符合的。

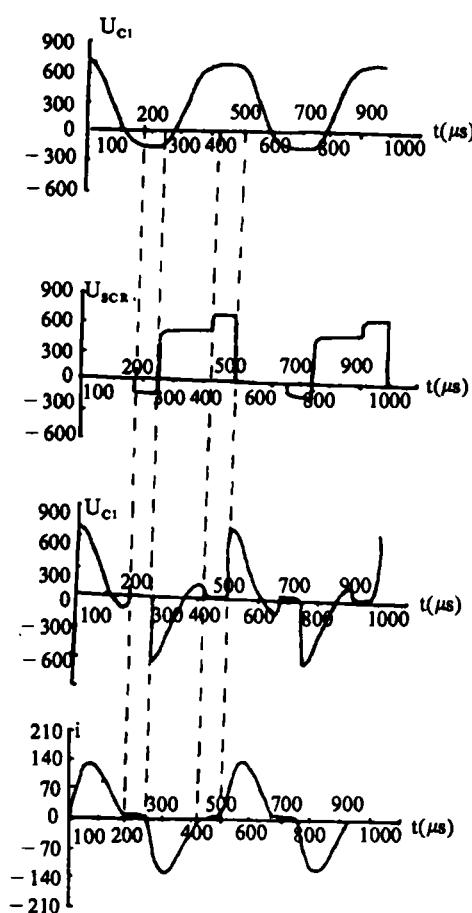


图3 理想化各元件电压电流波形

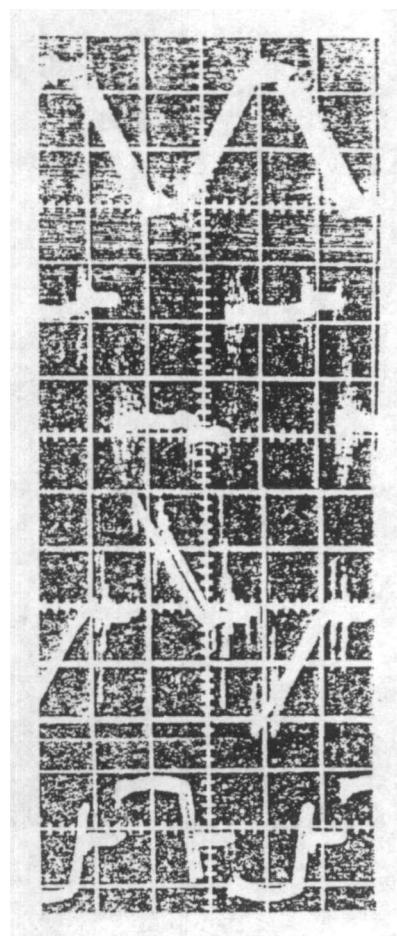
Fig.3 Ideal  $U$  and  $I$  wave forms in ideal units

图4 实际拍摄的波形

Fig.4 Wave forms in actual test

### 3 讨论

负载稳定条件下对逆变焊机主电路各元件建立的数学模型及用计算机测绘的理想化波形同实拍波形是基本相符合的。讨论以下几个问题：

(1) 流经可控硅的电流  $i_s$  是换流电容器的充电电流与放电电流之和。即

$$i_s = i_{C1} + i_{C2} = 2 \frac{1}{\omega L} U_M e^{-\delta t} \sin \omega t = i_{s2}$$

也就是说在一个工作周期内，每臂可控硅仅仅导通一次，所占时间不到一个工作周期的50%。

(2) 可控硅在  $\omega t = \pi$  时， $i_{s1} = 0$ ， $S_1$  自然关断，并同时被  $U_{C1}$  反向封锁，此时  $S_1$  承受一个数值为  $E - U_M$  的反向电压，即  $U_{\text{反}} = -U_M e^{-\delta \pi / \omega} = E - U_M$ ，线路参数  $L$ 、 $R$ 、 $C$  共同决

定了  $U_R$  及  $T_{反}$  的大小。  $U_{反}$  及其维持时间  $T_{反}$  共同保证可控硅的可靠关断是逆变器工作稳定性关键因素, 同时, 被关断的可控硅(如  $S_1$ )承受的反压越高(自然关断也越可靠), 则另一只可控硅( $S_2$ )将承受的正向电压超过电源电压  $E$  的数值就越大。所以在考虑  $S_1$  可靠关断要求有较高的  $U_{反}$  时, 要同时考虑到  $S_2$  是否会因正向转折而误导通引起逆变颠覆, 本成果  $U_{反}$  按  $50 \sim 100V$  设计,  $U_M = 514 + (50 - 100) = 564 \sim 614V$ , 泄放版保证在  $U_M > 700V$  时动作。

(3) 变压器在一个周期  $T$  内两次通电。变压器一次侧输入端电压波形 ( $U_B = U_L + U_R$ ) 就是电容器放电电压波形。因为  $C_1$  及  $C_2$  是交替放电, 所以变压器电压波形是不连续的, 在一个工作周期内有:

$$u_B = \frac{\omega_r}{\omega} U_M e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \Big|_0^{\pi} - \frac{\omega_r}{\omega} U_M e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \Big|_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2} + \pi}$$

因此, 焊接变压器相当于一个宽脉冲变压器。由于反压时间  $T_{反}$  的存在, 焊接变压器的电压波形尽管随着工作频率的提高, 变压器通电时间延长, 亦不会使变压器电压波形连续。焊接变压器设计可参考脉冲变压器的计算方法。其中一次匝数  $w_1$  的计算可按  $U_M$  来考虑。

(4)  $\omega t = \pi$  时,  $i_{C1} = 0$ ,  $i_{S1} = 0$ ,  $S_1$  被关断, 并同时被  $\omega t = \pi$  时刻的  $u_{C1}$  所封锁, 此时的  $U_{C1}$  称为  $S_1$  的反向电压或反向封锁电压。即

$$\begin{aligned} U_{反} &= u_{C1} = \frac{\omega_r}{\omega} U_M e^{-\delta t} \sin(\pi + \varphi) = \frac{\omega_r}{\omega} U_M e^{-\delta \pi / \omega} (-\sin \varphi) \\ &= \frac{\omega_r}{\omega} U_M e^{-\delta \pi / \omega} \cdot \left( -\frac{\omega}{\omega_0} \right) = -U_M e^{-\delta \pi / \omega} \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $U_M$  为  $\omega t = \pi$  时的  $u_{C2}$ ,  $\because E = u_{C1}(t) + u_{C2}(t)$

$$\text{即 } U_M = U_{C2} = E - \frac{\omega_r}{\omega} U_M e^{-\delta t} \sin(\pi + \varphi) = E + U_M e^{-\delta \pi / \omega} \text{ 移项 } U_M - U_M e^{-\delta \pi / \omega} = E$$

得

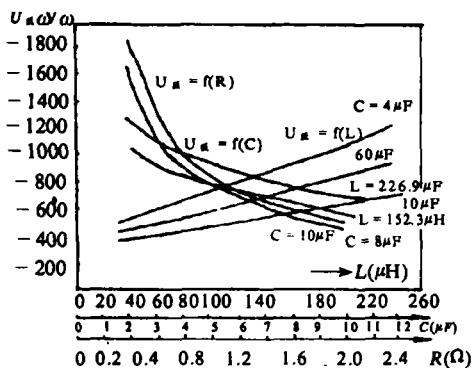
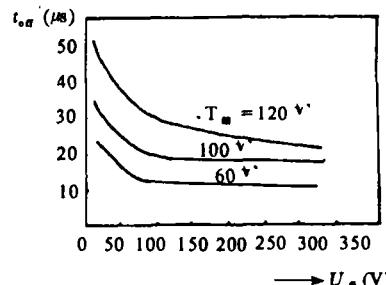
$$U_M = \frac{E}{1 - e^{-\delta \pi / \omega}} \quad (13)$$

代入式(12)得

$$U_{反} = E \left( 1 - \frac{1}{e^{-\delta \pi / \omega}} \right) = \frac{-E}{e^{-\delta \pi / \omega} - 1} \quad (14)$$

由式(14)可知, 回路参数  $R$ 、 $L$ 、 $C$  共同决定了  $U_{反}$  的大小, 用计算机作图则得图 5 所示的关系。

由公式(14)及图 5 可见, 回路参数中, 负载电阻  $R$  对  $U_{反}$  的影响最显著, 即衰减系数  $\delta$  越大,  $U_{反}$  越小, 焊接电弧功率越大,  $U_{反}$  越小。即大电流时有较小的  $U_{反}$ , 因为  $U_{反} \uparrow \rightarrow t_{off} \downarrow$ , 当  $U_{反} > 100V$  时,  $\Delta t_{off} \rightarrow 0$ , 而且结温的变化引起的  $\Delta t_{off}$  也在减小(图 6), 所以当  $U_{反} > 100V$  时, 有较高的关断可靠性, INS/P-315 逆变焊机按  $U_{反} > 100V$  设计。

图 5  $U_R = f(L, C, \omega)$  关系曲线Fig.5  $U_R = f(L, C, \omega)$  relation curve图 6  $U_R$  与  $t_{off}$  关系曲线<sup>[1]</sup>Fig.6  $U_R$  and  $t_{off}$  relation curve

$\omega$  反压时间与逆变频率无关  $\omega$  逆变频率仅仅影响反压维持时间  $\omega$  如果不考虑温度对  $t_{off}$  的影响  $\omega$  应有  $\omega$

$$T_R \geq 20 \mu s; \quad \forall T = 2\left(\frac{\pi}{\omega} + T_R\right), \quad \forall T_R = 200 - \frac{\pi}{\omega}$$

$$\text{即 } 200 - \frac{\pi}{\omega} \geq 20, \quad \omega \leq \frac{\pi}{180}$$

$$\text{由于 } \omega = \frac{1}{2TC} \left(\frac{R}{2L}\right)^2$$

$$\text{所以有 } L^2 - \frac{2}{C} \left(\frac{10}{\pi}\right)^2 L - \left(\frac{10}{\pi} R\right)^2 \leq 0 \quad (15)$$

式  $\omega$  保证了在焊机最大输出功率  $\omega$  最大逆变频率  $\omega$  条件下  $T_R > t_{off}$  能可靠关断  $\omega$  INS/P-315 焊机主电路参数的设计在  $R = 32V/300A \Rightarrow 21.2V/30A = 0.1 \Omega$   $0.01\Omega$  条件下  $L, C$  的配合关系应首先满足式  $\omega$  5000 如果主电路参数  $L - R - C$  能保证衰减振荡  $\omega R < 2\sqrt{L/2C}$   $\omega$  尽量采用漏感小的焊接变压器  $\omega$  在保证输出容量足够时  $\omega$  尽量小的换流电容值  $\omega$  INS/P-315 焊机主电路参数的确定综合考虑了以上诸因素最后通过试验修正取得了最佳  $L - C$  的匹配  $\omega$

#### 4 结 论

$\omega$  以 INS/P-315 型焊机为代表的半桥串联逆变式弧焊电源的主电路数学模型及各元件理想化电流电压波形  $\omega$  是分析及讨论逆变焊机负载过程稳定性的基础  $\omega$  由实测波形与理想化波形基本上是相符合的  $\omega$

$\omega$  逆变焊机在保证负载过程稳定性设计与分析中  $\omega$  考虑了以下主要因素  $\omega$  SCR 元件承受的  $di/dt$  值  $\omega$  SCR 元件承受的反向封锁电压  $U_R$   $\omega$   $U_R$  的维持时间  $T_R$   $\omega$

$\omega$  理论上计算及设计  $\omega$  加上试验修正  $\omega$  是确定合理参数保证负载过程稳定性的合理

方法。

(4) 主电路换流电容及变压器漏感, 是影响负载过程稳定性最敏感的因素, 同时二者(尤其是电容)又显著地影响焊机的输出容量, 因此, 在保证输出容量足够条件下应尽量减少  $L$  及  $C$  值, 不仅可以使  $T_{\text{反}}$  提高, 而且  $C$  的减小又有助于焊机效率的提高。

(1993年6月14日收到修改稿)

#### 参考文献

- 1 W 赫格拉.晶闸管.北京:机械工业出版社, 1984.
- 2 邱关源.电路.北京:人民教育出版社, 1979.
- 3 陈小敏.半桥串联逆变式弧焊电源稳定性研究.吉林工业大学硕士研究生毕业论文, 1986. 7.

### Mathematic analysis of loading process of SCR invertor welding power source

Bai Zhifan, Zhang Yi

(Jilin University of Technology, Changchun)

Zheng Guichen

(Jilin Architectural and Civil Engineering Institute)

**Abstract** The SCR invertor equipment is researched and its mathematic models are established in this paper. The ideal wave forms of  $U_f$  and  $I_f$  are analysed and compared with the wave forms in actual test. The choice of SCR capacity is discussed. The problems concerning the stable shutting of SCR are put forth. The relation among the reverse voltage, holding time and out-put power is discussed and the difference in working point stability for different out-put characteristic curves is also studied.

**Key words** SCR; invertor power source; mathematic analysis