

## 研究与设计

# 软开关逆变式弧焊电源主回路参数设计

张光先, 邹增大, 尹海, 李思海  
(山东大学, 山东 济南 250061)

**摘要** 提出了一种新的软开关逆变弧焊电源的设计方案, 该方案基本上可实现空载、短路、燃弧全负载范围内的软开关状态。提出了引入无功电流分量解决空、轻载时软开关失败问题的方案, 以及几个主要谐振参数的设计方法。在实践中采用本方案, 表明降低了开关应力及损耗, 提高了整机可靠性, 降低了弧焊电源的成本。

**关键词** 软开关 逆变 弧焊电源

中图分类号: TG43 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2002)04

## Parameter design for main circuit of soft switch invert welding power source

ZHANG Guang-xian, ZOU Zeng-da, YIN Hai, LI Si-hai  
(Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract** This article introduces a new design plan of soft switch invert welding power source, which can almost get in soft switch state under no-load, short circuit or load. Also it gives a plan of solving the problem of soft switch in no-load and low load by taking idle current component into account, and the design methods about the main resonance parameter. It shows that can lower the switch stress, wastage, and cost but improves the reliability.

**Key words**: soft switch; invert; arc welding machine

## 序 言

全桥移相谐振的脉宽调制工作方式, 由于采用 PWM 控制, 控制特性较好, 回路电流峰值低, 已成功应用于通信电源中。但在逆变弧焊电源的应用中, 由于弧焊电源经常工作在输出开路、短路、燃弧等状态中, 负载范围宽, 在整个负载范围内实现软开关难度大, 实现软开关的条件范围窄<sup>[1]</sup>。本研究提出一种新的软开关逆变弧焊电源的设计方案, 解决如何在整个工作范围实现逆变弧焊电源软开关的问题。

## 1 主回路设计

主回路选全桥相移谐振式电路, 如图 1 所示。

IGBT<sub>1</sub>、IGBT<sub>3</sub> 为超前臂; IGBT<sub>2</sub>、IGBT<sub>4</sub> 为滞后臂; C<sub>1</sub>、C<sub>3</sub> 为超前臂电容; C<sub>2</sub>、C<sub>4</sub> 为滞后臂电容; C<sub>1</sub> = C<sub>3</sub> >> C<sub>2</sub> = C<sub>4</sub>, C<sub>X</sub> 为抑制环流电容, L<sub>X1</sub> 为变压器回路等效漏感, L<sub>X2</sub> 为饱和电感, T 为变压器。E 为输入电压, U<sub>o</sub> 为输出电压。

软开关实现过程分为以下模式:

模式 1 IGBT<sub>1</sub>、IGBT<sub>4</sub> 导通, 电流通路为: E<sup>+</sup> → IGBT<sub>1</sub> → L<sub>X1</sub> → L<sub>X2</sub> → C<sub>X</sub> → T → IGBT<sub>4</sub> → E<sup>-</sup>。

模式 2 IGBT<sub>1</sub> 截止, 电流通路为: E<sup>+</sup> → C<sub>1</sub> → L<sub>X1</sub> → L<sub>X2</sub> → C<sub>X</sub> → T → IGBT<sub>4</sub> → E<sup>-</sup>, IGBT<sub>1</sub> 两端电压上升。

收稿日期: 2001-12-17

作者简介: 张光先 (1965-) 男, 山东潍坊人, 副教授, 硕士, 主要从事逆变弧焊电源的开发与应用工作, 发表论文近

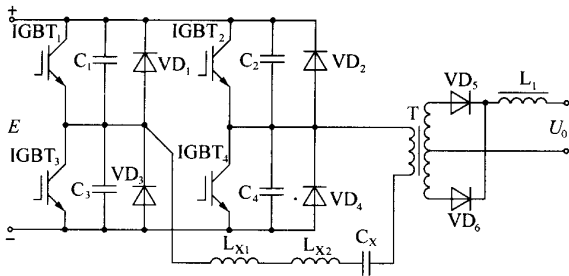


图 1 主电路形式

模式 3 当 IGBT<sub>1</sub> 电压至 E 时, VD<sub>3</sub> 导通 电流通路为: E<sup>-</sup> → VD<sub>3</sub> → L<sub>X1</sub> → L<sub>X2</sub> → C<sub>X</sub> → T → IGBT<sub>4</sub> → E<sup>-</sup>。

模式 4 IGBT<sub>4</sub> 截止, 电流通路为: E<sup>-</sup> → VD<sub>3</sub> → L<sub>X1</sub> → L<sub>X2</sub> → C<sub>X</sub> → T → C<sub>3</sub> → E<sup>-</sup>。

当 C<sub>4</sub> 电压至 E 时电流通路为: E<sup>-</sup> → VD<sub>3</sub> → L<sub>X1</sub> → L<sub>X2</sub> → C<sub>X</sub> → T → VD<sub>2</sub> → E<sup>+</sup>。

## 2 主回路中参数选择计算

以 ZX7 系列焊机为例, 焊接电源的外特性曲线如图 2 所示。

弧焊电源要全负载范围实现软开关可靠工作必须满足: 在 ADBO 整个包络线内的 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub> 要换流充分, 否则 IGBT 开通时, 并联在其两端的电容将直接向 IGBT 放电, IGBT 工作状况恶化。

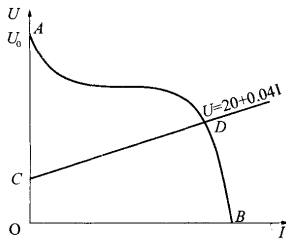


图 2 弧焊逆变电源的外特性曲线

### 2.1 空载、轻载时软开关实现问题

图 2 中, 空载及轻载时, 工作点在 A 点及附近区域。此时焊机输出电流很小, 而输出电压最高, C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub> 电容无法进行换流, 造成软开关模式失败。解决方法是在逆变桥内引入无功电流, 使超前臂和滞后臂电容换流完毕, 由于 C<sub>1</sub> = C<sub>3</sub> >> C<sub>2</sub> = C<sub>4</sub>, 只要考虑超前臂的换流安全, 则滞后臂的换流也会安全, 换流无功电流大小满足式:

$$\frac{I_S \cdot t_S}{2C_1} > E,$$

其中 I<sub>S</sub> 为换流期间的无功电流, t<sub>S</sub> 为死区时间, E 为电源电压。

### 2.2 负载区超前臂的软开关实现问题

超前臂为负载换流, C<sub>1</sub>、C<sub>3</sub> 的作用是降低关断损耗和改善关断轨迹, 等效电路如图 3 所示。

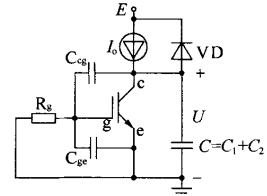


图 3 超前臂关断时的等效电路

其中, C = C<sub>1</sub> + C<sub>2</sub>, I<sub>o</sub> 是输出电流折算到一次侧回路的等效恒流源。假定 U 是 IGBT 的 c、e 两端电压, I 是流过 IGBT 中的电流, U<sub>cg</sub> 是 c、g 两端电压, U<sub>ge</sub> 是 g、e 两端电压。由于 E >> U<sub>ge</sub> 所以 U<sub>cg</sub> ≈ U, I<sub>C</sub> 是流过 C 中的电流。

#### 2.2.1 关断初期栅极电压变化规律

当 C = 0 时, 在 VD 导通之前 I = I<sub>o</sub>, 由于米勒效应, U<sub>ge</sub> 基本不变, 即:

$$\frac{U_{ge}}{R_g} = C_{cg} \frac{dU}{dt}$$

当 C ≠ 0 时,

$$\frac{U_{ge}}{R_g} = C_{ge} \left| \frac{dU_{ge}}{dt} \right| + C_{cg} \frac{dU}{dt}, \quad (1)$$

$$I_o = I + I_C,$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{I_C}{C},$$

选择 C 使  $\frac{I_C}{C}$  很小, 即

$$C_{cg} \frac{dU}{dt} \ll C_{ge} \left| \frac{dU_{ge}}{dt} \right|,$$

一般选择

$$C_{cg} \frac{dU}{dt} < (6 \sim 10) C_{ge} \left| \frac{dU_{ge}}{dt} \right|, \quad (2)$$

则式 (1) 可简化为:

$$\frac{U_g}{R_g} \ll C_{ge} \left| \frac{dU_{ge}}{dt} \right|,$$

U<sub>ge</sub> 即为指数衰减。由于 IGBT 开启门槛电平较高且与饱和电流对应的 U<sub>ge</sub> 相差不大, 所以在关断区内

$U_{ge}$ 基本上线性下降，

$$U_{ge} \approx U_{gem} - \frac{U_{gem} + U_{ger}}{2R_g} \cdot \frac{t}{C_{ge}} \quad (3)$$

式中  $U_{gem}$ 为工作电流对应的临界饱和栅极电平； $U_{ger}$ 为门槛电平。

### 2.2.2 IGBT 的关断功耗 [2]

IGBT 的关断分为两部分：一是场效应管的关断过程，二是内部载流子的自身复合过程。整个关断过程可等效为图 4。

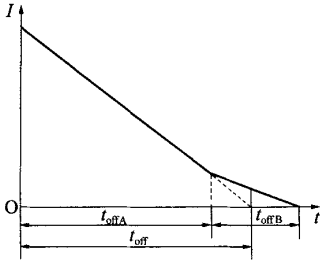


图 4 IGBT 关断时的电流波形

$t_{offA}$ 为电流下降时间； $t_{offB}$ 为电流拖尾时间，关断过程 IGBT 上的功耗主要由  $t_{offA}$ 、 $t_{offB}$  决定，设关断电流简化为线性下降，关断时间为  $t_{off}$ 。IGBT 关断时的电流波形如图 4 所示。IGBT 中的电流：

$$I = I_o - I_o \frac{1}{t_{off}} t$$

IGBT 二端电压：

$$U = \frac{1}{C} \int_0^{t_{off}} \frac{t}{t_{off}} dt = \frac{I_o}{2C} \cdot \frac{t_{off}^2}{t_{off}}$$

IGBT 的功耗，当  $\frac{I_C}{C}$  很小，在  $t_{off}$  内， $U < E$  时，

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T_{off}} \int_0^{T_{off}} UI dt \\ &= \frac{1}{T_{off}} \int_0^{T_{off}} (I_o - I_o \frac{t}{T_{off}}) \cdot \frac{I_o}{2C} \cdot \frac{t^2}{T_{off}} dt \\ &= \frac{I_o^2 \cdot T_{off}}{24C} \end{aligned} \quad (4)$$

当  $\frac{I_C}{C}$  较大，在  $t_{off}$  内的  $t_{off}$  时刻， $U = E$ ，则二极管 VD 导通续流。

同理可得在  $t_{off}$  内 IGBT 上的功耗：

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T_{off}} \int_0^{t_{off1}} 0 UI dt + \frac{1}{T_{off}} \int_0^{t_{off1}} UI dt + \int_0^{t_{off2}} UI dt \\ &= \frac{I_o^2}{2Ct_{off}} \left( \frac{t_{off1}^3}{3} - \frac{t_{off1}^4}{4t_{off}} \right) + EI_o \left( \frac{t_{off}}{2} - t_{off1} + \frac{t_{off2}^2}{2t_{off}} \right) \end{aligned}$$

在此种工作状态 IGBT 的功耗较大，实际一般选择 C 在  $t_{off}$  内使  $U \leq E$ ，即：

$$E \geq \frac{I_o}{2C} \cdot \frac{t_{off}^2}{t_{off}}$$

$$C \geq \frac{I_o}{2E} \cdot t_{off} \quad (5)$$

根据式 (5) 可计算出电容量大小。

### 2.3 负载区滞后臂的软开关实现问题

超前臂关断后，电路进入环流阶段，变压器回路中电流通过串联电容  $C_X$  而衰减，使回路中通态损耗变小，滞后臂关断时损耗变小，关断时电流为 0 最理想。假设环流时等效电路为图 5 所示，在以下分析略去滞后臂的关断死区时间。

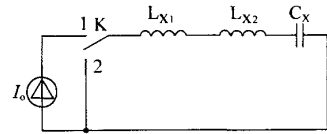


图 5 环流回路的等效电路图

$L_{X1}$  为等效漏抗； $L_{X2}$  为饱和电感， $C_X$  为串联电容，假设  $L_{X2}$  饱和电流相对于工作电流约为 0，电容电压幅值为  $U_C$ ， $L_{X1}$  初始电流为  $I_o$ ，K 在 1 位为超前臂导通，K 在 2 位时为环流位置。 $T_{on}$  为超前臂导通时间。 $t$  是电流衰减约为 0 的时间。

K 在位置 1 时，即导通期间  $T_{on}$  内，电容  $C_X$  上的电压变化为：

$$2U_C = \frac{I_o T_{on}}{C_X} \quad (6)$$

K 在位置 2 时，即环流期约  $T/2 - T_{on}$  内，电容  $C_X$  上的电压为：

$$U_C = (L_{X1} + L_{X2}) \frac{di}{dt} \quad (7)$$

由于  $L_{X2}$  处于饱和，故  $U_C = L_{X1} \frac{di}{dt}$ 。

从式 (6) 式 (7) 可得：

$$t = \left[ \frac{\pi}{2} - \text{Arctan} \left( \frac{T_{on}}{2\sqrt{L_{X1} C_X}} - \frac{1}{2T_{on}\sqrt{L_{X1} C_X}} \right) \right] \sqrt{L_{X1} C_X}$$

在一个周期内有

$$T_{on} + t \leq \frac{T}{2}$$

设弧焊电源逆变频率为 50 kHz，利用式 (8) 式 (9) 可得一族曲线，如图 6 所示。曲线与直线  $T_{on} + t = 10\mu s$  的交点为零导通区的范围，在图中取一曲线

可看出:当  $T_{on}$  在  $A \sim B$  范围内都可保证为滞后臂零电流关断。选定一条曲线,来保证  $T_{on}$  工作范围,此曲线对应一个  $L_x C$  值。电路中的  $L_x$  值已知后,可选定  $C$  值。 $L_x$  主要由漏抗来决定,可以测量出来。

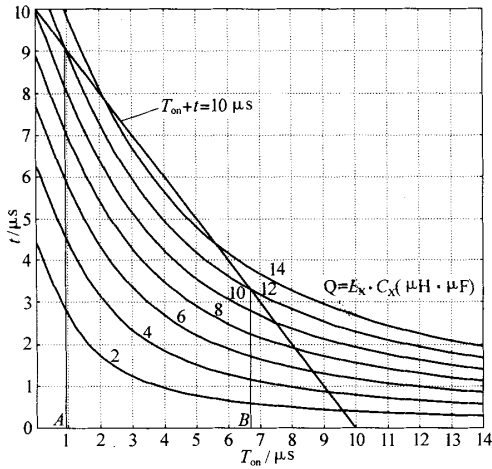


图 6 滞后臂零电流关断的范围

### 3 电路的实现

#### 3.1 实现中的几个主要问题

以 ZX7 - 500 手弧焊为例,其 IGBT 用 100A/1200V,主变压器采用非晶铁心绕制,串在变压器一次侧的电容采用高频 CBB 系列电容。

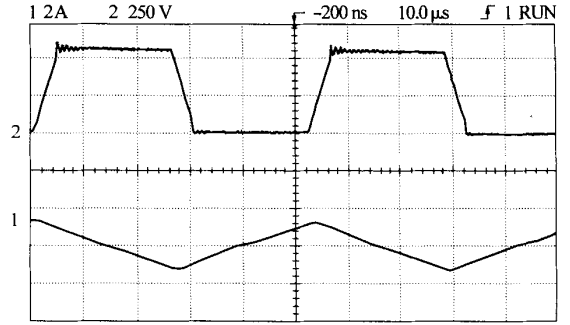
由于没有现成的控制芯片,本设计是在电流型芯片 UC3846 的基础上改造使用。

由于饱和电感功耗很大,且电感量易发生变化,设计应选择损耗小、矩形度好的铁心材料。

#### 3.2 主电路中的几个波形(见图 7)

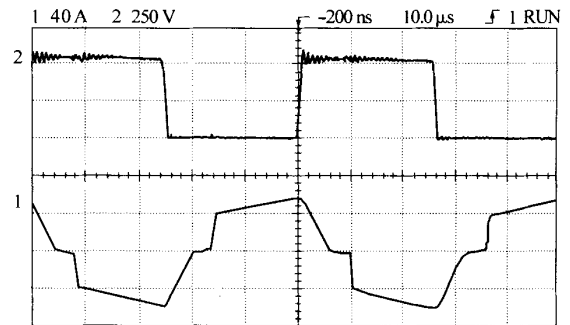
### 4 生产应用

该方案已成功应用于实践,并推广至  $CO_2$  平特性弧焊电源,使得此类弧焊电源可靠性增加,成本下降,并且此方案已在奥太焊机上应用,生产数千台弧焊电源,取得明显经济效益。



1- 电流波形; 2- 电压波形。

a 空载时



1- 电流波形; 2- 电压波形。

b 负载时

图 7 IGBT<sub>1</sub> 两端电压波形与变压器一次侧电流波形

### 5 结论

a. 提出的计算方法,可正确地计算出软开关的工作区域,以及开关管的工作状态。利用所提出的计算方法,可得到开关管的关断损耗及主回路中几个主要参数值。

b. 提出了一种实现全负载软开关的方案,经实际应用取得良好效果。

#### 参考文献:

- [1] 张占松,蔡宣三.开关电源的原理与设计[M].北京:电子工业出版社,1998.
- [2] 郑利军,任天良,姜燕.PWM 方式开关电源中 IGBT 的损耗分析.电力电子技术[J],1999,33(5) 58-60

IECQ 是什么组织 IECQ 是 IEC 电子元器件质量评定体系的简称,1981 年 1 月 1 日开始工作,它是一个隶属于 IEC,但又相对独立的,凡 IEC 成员国均可申请参加。它在认证管理委员会(CMC)主持下工作。IECQ 是世界性的自愿性认证机构,其宗旨是促进国家或国际间的贸易往来,按照严格的程序规则,以国际标准为依据,对生产厂的技术能力和管理水平实行全面的检验和评定,对要求认证的元器件,按标准规定进行测试鉴定。对于符合质量要求的授予合格标志和证书,以确保产品质量达到和保持标准规定的质量水平。认证合格的产品,在销售和使用时可不再检验或试验。