

# 全桥逆变电阻焊电源零电压的开通条件

王清<sup>1</sup>, 张相军<sup>2</sup>, 吴林<sup>1</sup>, 林尚扬<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 软开关逆变电源是目前焊接电源研究的热点, 移相式零电压逆变电路就是其中之一。本文通过对全桥移相式逆变电阻焊焊接电源工作状态及其各转换阶段的全面分析, 得出了实现零电压开通的条件是焊接变压器有足够的储能和控制软件与电路参数的匹配, 并对影响实现零电压导通的因素做了细致的分析。在此基础上对分析结果进行了试验验证, 得出了与理论分析一致的结论。另一方面试验结果还揭示了采用移相式逆变电路工作方式, 尽管由于某些原因使电路不能做到零电压开通, 也会使 IGBT 所承受的电压应力大大降低, 从而改善逆变电路的工作状态。

**关键词:** 软开关; 零电压; 逆变; 电阻焊电源

中图分类号: TG438.2 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2000)03-20-04



王清

## 0 序言

早期开发的逆变电阻焊焊接电源均采用硬开关技术。所谓“硬开关”是指强迫功率开关管在电压不为零伏时开通或电流不为零时关断。处于硬开关状态下的功率开关管在开关过程中的损耗大, 并且该损耗随着逆变频率的增大而增大, 因而限制了逆变频率的进一步提高。为了解决硬开关逆变电源存在的问题, 从 70 年代以来, 人们竞相开展各种软开关技术的研究。所谓“软开关”是指功率开关管在零电压状态下开通(简称 ZVS)或者在零电流状态下关断(简称 ZCS), 移相式零电压逆变电路就是其中之一。移相式零电压逆变电路的概念是在 90 年代初期提出来的, 而将该概念应用于焊接电源的研制, 则是近几年的事情<sup>[1~3]</sup>。本文将详细讨论实现全桥逆变电阻焊焊接电源零电压开通的方法与条件, 并对影响实现零电压导通的因素做了细致的分析。

## 1 移相零电压逆变电路工作原理

移相零电压全桥电阻焊焊接逆变电路原理示意图如图 1 所示, 在形式上它与常规的全桥逆变电路完全相同, 但是功率开关管 IGBT 的驱动和工作方式却完全不同。在通常的 PWM 逆变电路中, 位于对角线上的两个IGBT 是同时导通与关断的, 通过改变

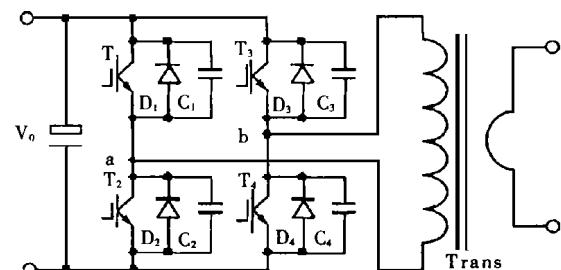


图 1 移相零电压全桥逆变电路原理图

Fig. 1 Circuit scheme of full-bridge phase-shifted zero-voltage converter

其导通占空比来控制向变压器初级侧提供能量的大小; 而在移相式逆变电路中, 由 T<sub>1</sub>—T<sub>2</sub>组成固定臂, T<sub>3</sub>—T<sub>4</sub>组成移相臂, 各 IGBT 所承受的栅—射极触发电压  $V_{GS}$ 与其导通流过电流的时间并不一致。逆变电路工作时, 四个 IGBT 均分别被施加一导通占空比略小于 50% 的  $V_{GS}$ , 而 IGBT 的导通时间则取决于位于对角线上的一组 IGBT(T<sub>1</sub>—T<sub>4</sub>或 T<sub>3</sub>—T<sub>2</sub>)上  $V_{GS}$ 同为高电平的时间以及 IGBT 向零电压过渡的转换时间; 通过改变向移相臂上两只 IGBT 施加的栅—射极触发电压时间来调节向变压器初级侧提供能量的大小, 其电压波形示意图如图 2 所示。图中  $\delta$  为避免

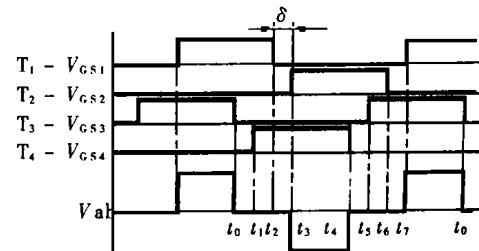


图 2 移相逆变电路工作波形示意图

Fig. 2 The waveform scheme of a FB-PS-ZV converter

同侧桥臂直通而设置的死区时间。

## 2 电路运行模式分析

为了分析电路运行模式,特作如下假设:

(1) 所用功率开关管 IGBT 均为理想元件,忽略其正向压降及开关时间; (2) 四个 IGBT 两端并联电容相等且为常数; (3) 忽略变压器绕组及线路中的寄生电阻。

$t < t_0$  时为功率传输阶段, 电路的工作状态为  $T_1-T_4$  导通,  $T_3$ 、 $T_2$  两端并联电容  $C_3$ 、 $C_2$  被输入电源充电至电源电压  $V_0$ , 变压器原边电压  $V_{ab} = V_0$ , 初级电流由  $a$  点通过变压器初级线圈流向  $b$  点, 功率由变压器原边传送到负载。

$t_0-t_1$  为续流阶段, 在  $t_0$  时刻,  $T_4$  栅—射极触发电压由高电平变为低电平,  $T_4$  截止, 由于流经电感的电流不能跃变, 此时  $b$  点的电位高于  $a$  点电位, 初级电流继续由  $a$  点通过变压器初级线圈流向  $b$  点, 电感释放能量。初级电流一部分通过对  $T_4$  并联电容  $C_4$  充电形成回路, 一部分通过  $T_3$  并联电容  $C_3$  向滤波电容放电形成回路。随着放电过程的进行,  $C_3$  两端的电压很快降低, 直至  $T_3$  反向并联二极管  $D_3$  导通。此时  $T_3$  两端的电压约为零伏, 为  $T_3$  的零电压导通创造了条件。

$t_1-t_2$  为右桥臂转换与续流阶段, 在  $t_1$  时刻向  $T_3$  栅—射极触发电压,  $T_3$  在零电压条件下导通, 此时因为  $T_3$  处于反向偏置状态, 即其射极电位高于集电极端电位,  $T_3$  没有电流流过; 之后在变压器电感储能足够的条件下, 电感释放能量过程继续进行, 初级电流继续由  $a$  点流向  $b$  点, 并通过  $T_3$  两端反向并联二极管  $D_3$  形成回路。

$t_2-t_3$  为左桥臂转换与续流阶段, 在  $t_2$  时刻  $T_1$  关断, 通过对  $T_1$  两端并联电容  $C_1$  的充电与  $T_2$  两端并联电容  $C_2$  的放电, 初级电流继续维持由  $a$  点流向  $b$  点。随着  $C_2$  的不断放电,  $T_2$  两端的电压越来越低, 直至降为零伏, 从而为  $T_2$  的零电压导通创造条件。

$t_3-t_4$  为功率传输阶段, 此时  $T_3$ 、 $T_2$  导通,  $T_1$ 、 $T_4$  两端并联电容  $C_1$ 、 $C_4$  被输入电源充电至电源电压  $V_0$ , 变压器原边电压  $V_{ba} = V_0$ , 初级电流由  $b$  点通过变压器初级线圈流向  $a$  点, 功率由变压器原边传送到负载。

$t_4-t_5$ 、 $t_5-t_6$  以及  $t_6-t_7$  仍为续流、右桥臂转换、左桥臂转换及续流阶段, 分析过程同前。

上述各阶段等效电路拓扑结构见图 3。

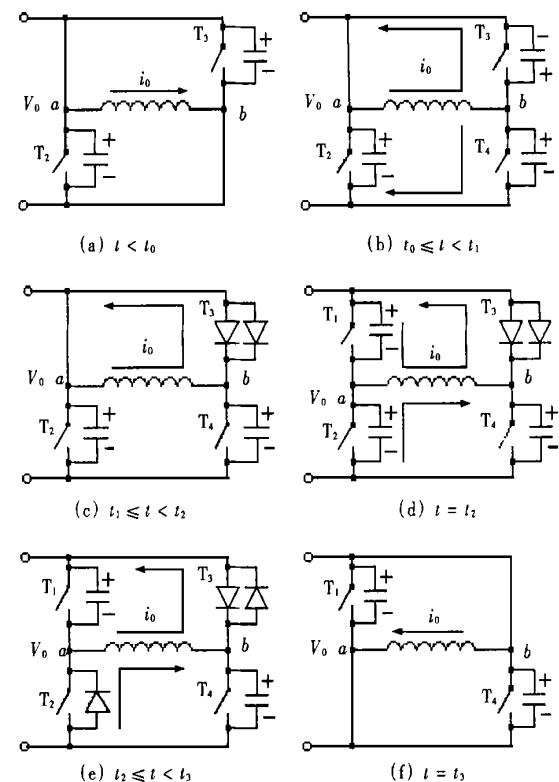


图 3 半周期内逆变电路各阶段等效电路拓扑

Fig. 3 Equivalent circuit of a FB-PS-ZV converter in a half cycle

## 3 影响零电压转换因素之讨论

### 3.1 死区时间 $\delta$ 的设置

从前面电路运行模式分析过程中可以看出, 死区时间  $\delta$  的设置在零电压转换过程中起着十分重要的作用, 该作用主要体现为两点。

(1) 防止位于同一桥臂上的两个功率开关管同时导通而导致的直通现象的发生。

(2) 变压器电感与并联在功率开关管两端的电容主要是在该时间段内产生谐振, 从而为功率开关管的零电压开通创造条件。

由于  $\delta$  在零电压转换电路中所起的特殊作用, 在设置其长短时必须给予足够重视。如果  $\delta$  设置时间过短, 将导致功率开关管在其两端电压没有达到零电压时导通; 如果设置时间过长, 一方面会造成电路导通占空比的损失增大, 另一方面还会在初级电流较小的情况下造成功率开关管两端的电压重新增大。

### 3.2 变压器电感对零电压转换的影响

焊接变压器电感的大小, 是决定逆变电路能否实现零电压转换的关键因素之一。从前面电路运行模式分析过程中可知, 在转换过程中, 电感是否储存有足够的能量, 决定了逆变电路能否实现零电压转

换。根据电工学原理,当电流  $i$  流经电感器时,电感所吸取的总能量为

$$W = \int_0^t L i dt, \quad (1)$$

或者

$$W = \frac{1}{2} L I^2, \quad (2)$$

式中:  $W$  为电感器所吸收的能量,  $J$ ;  $t$  为电流流经电感的时间,  $s$ ;  $L$  为电感器的电感值,  $H$ ;  $i$  为流经电感器的电流瞬时值,  $A$ ;  $I$  为流经电感器的电流有效值,  $A$ 。

式(2)表明,电感器所吸收的能量与其电感值成正比,与流经其上的电流有效值的平方成正比。对于逆变焊接电源而言,假设其实现零电压转换所需的电感器储能为一定值,显然电感越大,所需流经焊接变压器初级的电流就越小。也就是说,增大焊接变压器电感值有利于零电压转换的实现。

### 3.3 并联电容对零电压转换的影响

并联电容在逆变电路中的作用为:(1)与焊接变压器电感一起构成谐振回路,为实现零电压转换创造条件;(2)吸收由于电路寄生元件震荡而产生的高电压,对功率开关管起过压保护作用。

在谐振期间并联电容极性变化所需的能量主要依靠变压器电感所释放的能量,为了减小电感储能,总是希望尽量减小并联电容极性变化所需的能量。根据电工学理论,在电容两端施加一定电压时,电容所存储的能量为

$$W = \frac{1}{2} C v_c^2, \quad (3)$$

式中:  $W$  为电容器从供电电路中吸取的能量,  $J$ ;  $C$  为电容器的电容值,  $F$ ;  $v_c$  为电容两端的电压值,  $V$ 。

式(3)表明电容器从供电电路中吸取的能量与其电容值成正比,与其两端的电压的平方成正比。对于某一特定的逆变电路,电容器两端的电压可以认为一定值,其从供电电路中吸取能量的多少主要取决于电容的大小。也就是说在逆变电路中,减小功率开关管两端并联电容值,有利于零电压转换的实现。但是如果将并联电容设得过小,又不利于对功率开关管过压保护。因此在零电压逆变电路中应综合考虑并联电容值的大小。

### 3.4 移相臂与固定臂对零电压转换的影响

从前面电路运行模式分析过程中可以看出,位于移相臂(即右桥臂)上的两个功率开关管  $T_3$ 、 $T_4$  总是先于固定臂(即左桥臂)上的两个功率开关管  $T_1$ 、 $T_2$ 发生零电压转换。这就意味着在移相逆变电路中,位于移相臂上的功率开关管与位于固定臂上的功率开关管相比,前者更容易实现零电压转换,而当

焊接电流较小时,可能会由于变压器储能不足而导致固定臂上的功率开关管不能实现零电压转换。

## 4 试验结果分析

### 4.1 试验结果测试方法

在逆变电路工作时,由于其工作频率较高,用一般的方法很难观察和记录电路各点信号变化的细节。为此,在试验中采用了惠普 54615B 记忆示波器观察和捕捉电路各点的典型电压波形,用摄像机加以记录,再用计算机将摄像机信号输出后加以分析研究。

### 4.2 试验结果分析

图 4 显示了实现了零电压开通时 IGBT 棚—射极触发电压信号与集—射极承受电压之间的关系。结合图 2、图 4 可以看出,在向 IGBT 棚—射极施加触发电压信号之前,电路经历了续流及转换阶段,具体体现在随着并联于功率开关管两端电容的放电,IGBT 集—射极电压不断降低,最终降至零伏以下,在此时向 IGBT 棚—射极施加触发电压,即保证了 IGBT 在集—射极电压为零伏的情况下开通,实现了逆变电路的零电压开通。

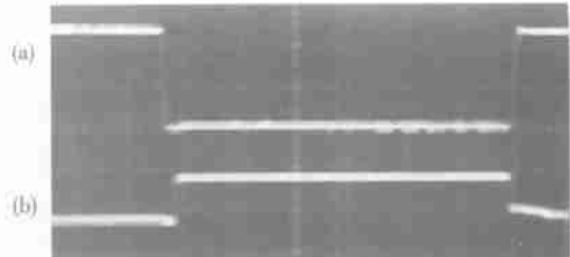


图 4 零电压开通时 IGBT 电压波形

Fig. 4 Voltage waveform of IGBT in ZV turn on state

(a) Collector—emitter voltage waveform

(b) Gate—emitter voltage waveform

图 5 显示了逆变电路参数不匹配时 IGBT 棚—射极触发电压信号与集—射极承受电压之间的关系。从中可以看出此时虽然 IGBT 集—射极电压也下降了许多,但在施加棚—射极触发电压信号时,IGBT 集—射极电压并未下降至零伏。此时无论是在棚—射极触发电压信号施加时还是在该信号结束时,IGBT 集—射极电压均有跃变,这显然不利于 IGBT 的长期使用。需要指出的是,与普通硬开关逆变电路相比,采用移相逆变电路工作方式,虽然由于某些原因使电路不能做到零电压开通,也会使 IGBT 所承受的电压应力大大降低,从而改善逆变电路的工作状态。

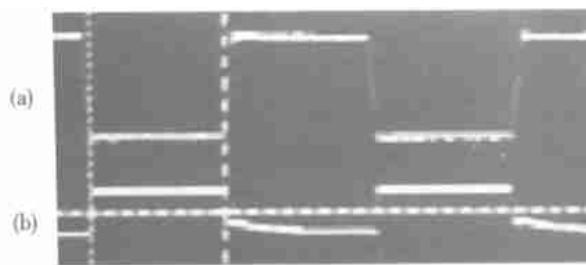


图5 电路参数不匹配时IGBT电压波形

Fig. 5 Voltage waveform of IGBT in non-matched circuit parameters state

- (a) Collector-emitter voltage waveform
- (b) Gate-emitter voltage waveform

## 5 结论

(1) 采用全桥移相式逆变电路可以实现功率开关管的零电压导通, 实现的条件是焊接变压器电感有足够的储能和控制软件与电路参数的匹配。

(2) 与普通硬开关逆变电路相比, 采用移相式逆变电路工作方式, 尽管由于某些原因使电路不能做到零电压开通, 也会使 IGBT 所承受的电压应力大大降低, 从而改善逆变电路的工作状态。

## 参考文献:

- [1] Sabate J A, et al. Design consideration for high-voltage high-power full-bridge zero-voltage-switched PWM converter[ C]. IEEE APEC Rec., 1990. 275~284.
- [2] Jung-Goo Cho, et al. Zero-voltage and zero-current-switching full-bridge PWM converter for high-power application[ J]. IEEE Transaction On Power Electronics, 1996. 11(14): 622~628.
- [3] 张相军, 微机控制软开关逆变电阻焊机的研制[ D]. 哈尔滨: 哈尔滨焊接研究所, 1999.

**作者简介:** 王清,男,1956年12月出生,哈尔滨工业大学在读博士生,哈尔滨焊接研究所高级工程师。长期从事电阻焊电源与焊接工艺研究。主持开发研究的项目曾获机械部科技进步一等奖。

## 欢迎订阅《金属热处理》(月刊)

《金属热处理》(月刊)简介:1958年创刊,1979年公开发行。国内统一刊号:CN11—1860/TG。国际刊号:ISSN 0254—6051, CODEN: JRECDB. 刊名商标注册号:第309308号。广告经营许可证:京海工商广字0012号。邮发代号:2—827(国内)0687M(国外), 联合征订代号:7767(国内)。大16开108页,2001年年订价为84元(国内)和90美元(国外)。

1. 办刊特点: (1)研究所、学会、协会合办, 拥有资深编委、高级顾问52名, 其中两院院士9名, 185名通讯员遍布全国各省市, 精英荟萃, 开门办刊; (2)理论联系实际, 普及与提高并重, 促进行业技术进步, 努力为提高机电产品质量和企业的经济效益服务; (3)注重国际交流, 信息量大, 精品意识强, 广告宣传效果好。

2. 主要业绩: (1)1982年以来一直荣获机械部、国家机械局优秀期刊奖, 1992、1996年连续两届荣获全国优秀科技期刊一、二等奖, 公认为我国冶金和机械类专业核心期刊和行业会刊, 先后成为中国科技论文统计分析用刊、中国科学引文库来源刊、光盘国家工程中心来源刊; (2)1980年以来对外发行10多个国家与地区, 与国外10家、国内50家知名期刊保持交换关系; (3)先后被Ulrich期刊库和CA、MA、Ei、AI、PK、日速报等国际重要检索系统所收录, 1996年美国金属学会热处理学会在向其会员推荐的美国内外15种期刊中本刊名列第二, 成为国际著名刊物之一。

3. 广告简则: 在社会主义市场经济条件下, 广告在企业经营活动中起着越来越重要的作用, 广告是市场经济的先导, 作为沟通生产与消费的中介, 广告具有辅佐企业、开拓市场和引导消费的特殊功能。因此广告的宣传是十分严肃的。为此, 我刊依据广告法结合本行业的实际认真审核, 确保所刊登广告内容真实可靠。

主办单位:国家机械工业局北京机电研究所

中国热处理学会

中国热处理行业协会

编辑部地址:北京市海淀区学清路18号

邮 编:100083

电 话:010—62922277 转318或62935465

传 真:010—62920623, 62924532

广告联系人:周莉 吴惠文