

# 全负载范围零压零流软开关焊接逆变电源

朱志明, 赵 港, 陈 杰, 王琳化

(清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 在对典型全桥软开关功率变换电路进行研究与分类的基础上, 提出并设计分析了采用辅助谐振网络的全负载范围零压零流软开关全桥功率变换电路拓扑. 通过采用死区时间自适应调节的移相控制方法, 使移相控制的死区时间与受电路能量影响的谐振过程协调配合, 实现了超前臂功率器件全负载范围的零压开通和效果良好的近似零压软关断. 同时, 针对全桥移相功率变换电路滞后臂软开通和软关断在全负载范围难以兼顾的问题, 提出了零电压与零电流技术相结合的软开关实现方法, 通过多种辅助措施的协调配合, 实现了滞后臂功率器件全负载范围的零压开通和零压与零流相结合的软关断.

**关键词:** 零压零流软开关; 辅助谐振网络; 死区时间; 全负载范围; 焊接逆变电源

**中图分类号:** TG434 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2009)02-0009-04



朱志明

## 0 序 言

焊接电弧负载工作范围宽, 且存在空载和短路以及瞬态急剧变化等, 将软开关技术应用于焊接逆变电源时, 必须解决如下关键问题: (1) 实现全负载范围的功率器件软开关; (2) 保证空载和短路两种极限工作状态下的功率器件软开关; (3) 在电弧负载的动态变化过程中保持功率器件的软开关.

移相控制全桥功率变换电路是一种实现零压开关的有效方法, 只是功率器件的软开关负载范围有限, 特别是滞后臂. 为了拓宽其软开关负载范围, 研究人员提出了多种改进措施. 对于滞后臂而言, 主要有零压开关 ZVS 和零流开关 ZCS 两类.

实现滞后臂宽负载范围零压开关的关键是能量, 根据能量来源的不同, 电路拓扑可分为两类: 一类是通过减缓能量流失、利用电路原有能量实现滞后臂的零压开通, 如变压器初级或次级串入饱和电感<sup>[1]</sup>、变压器初级和滞后臂之间接入 LCD 辅助谐振网络<sup>[2]</sup>等; 另一类是通过附加额外能量实现滞后臂的零压开通, 如变压器次级并联无功电感<sup>[3]</sup>、滞后臂并联 LC 或 LCD 辅助谐振网络<sup>[4, 5]</sup>、变压器次级采用倍流整流电路<sup>[6]</sup>等.

所谓滞后臂的零流关断, 就是在移相控制全桥功率变换电路的环流过程中, 采取有效措施将变压

器初级电流衰减到零并保持, 直至开关器件关断. 电路拓扑也可分为两类, 一类是在环流过程中变压器初级电流衰减到零后, 电流有反向趋势, 如在变压器原边串联隔直电容<sup>[1]</sup>, 此时, 需要采取辅助措施阻断电流反向, 如串联饱和电感或二极管等; 另一类是在变压器初级电流衰减到零后, 电流自动保持为零, 如变压器次级无源箝位<sup>[7-9]</sup>、有源箝位<sup>[9, 10]</sup>、变压器初级增加辅助变压器网络<sup>[3]</sup>等.

通过在全桥功率变换电路的两臂并联 LC 辅助谐振网络, 为功率器件的零压开通提供附加能量, 并辅之以随电源输出电流变化而动态调整的死区时间控制, 可实现全负载范围的两臂功率器件零压开通; 通过在功率器件上并联吸收电容并在变压器初级回路串联隔直电容和饱和电感可实现超前臂功率器件的近似零压软关断和滞后臂功率器件的近似零压与零流相结合的软关断. 从而有效解决了功率器件软开通和软关断在全负载范围难以兼顾的问题.

## 1 功率变换电路拓扑及其工作过程

图 1 所示为移相控制全桥功率变换电路拓扑, 两桥臂均并联有辅助谐振网络和吸收电容, 在变压器初级回路串联有隔直电容和饱和电感. 在一个开关周期中, 变换器有 16 种工作模式.

(1) 模式 1—正向传递能量. 功率器件 (IGBT)  $Q_1$  和  $Q_4$  导通, 变压器初级向次级传递能量, 辅助谐

振电感  $L_{a1}$  和  $L_{a2}$  储能。

(2) 模态 2—超前臂功率器件近似零压关断。 $Q_1$  关断, 变压器初级电流和电感  $L_{a1}$  中的电流  $i_{La1}$  共同使电容  $C_1$  充电、 $C_3$  放电。由于  $C_1$ 、 $C_3$  容量较大,  $C_1$  电压上升缓慢, 从而实现了  $Q_1$  的近似零压关断。当  $C_1$  电压上升到电源电压  $U_{in}$ ,  $C_3$  电压下降到零后,  $D_3$  导通, 将功率器件  $Q_3$  的电压箝位于零, 为  $Q_3$  创造了零压开通条件。

(3) 模态 3—超前臂功率器件零压开通。 $L_{a1}$  中的电流  $i_{La1}$  通过  $D_3$  续流, 在此期间使功率器件  $Q_3$  开通即为零压开通。自  $Q_1$  关断至  $Q_3$  开通的时间, 为超前臂的死区时间。该时间需根据负载电流的大小由控制电路进行动态调整, 以确保在全负载范围内实现  $Q_3$  的零压开通。

(4) 模态 4—超前臂辅助谐振网络谐振。电感  $L_{a1}$  和电容  $C_{a1}$ 、 $C_{a3}$  谐振, 电感  $L_{a1}$  中的电流减小至零后反向增加, 电容  $C_{a1}$  充电,  $C_{a3}$  放电。电感  $L_{a1}$  的储能将为下半周期  $Q_1$  的零压开通提供能量条件。

(5) 模态 5—变压器初级电流环流。 $D_3$  (或  $Q_3$ )、 $Q_4$  导通, 变压器初级电流环流, 直至  $Q_4$  关断。在此阶段, 变压器次级基本上或完全处于续流状态, 变压器初次级近似短接, 使得变压器初级电流可以在隔直电容的作用下以较快的速度下降, 从而实现滞后臂的近似零流关断。

(6) 模态 6—滞后臂功率器件近似零压零流关断。 $Q_4$  关断, 变压器初级剩余电流和电感  $L_{a2}$  中的电流  $i_{La2}$  共同使  $C_4$  充电,  $C_2$  放电。由于  $C_2$ 、 $C_4$  的作用, 限制了  $C_4$  电压的上升速度, 从而实现了  $Q_4$  在近似零流基础上的近似零压关断。变压器初级电流快速下降到饱和电感的饱和电流 (或者在环流阶段就已经小于饱和电流), 饱和电感进入非饱和状态, 从而使电感  $L_{a2}$  中的电流  $i_{La2}$  不会过多地从变压器初级电路流失。当  $C_4$  电压上升到电源电压  $U_{in}$ ,  $C_2$  电压下降到零时,  $D_2$  自然导通, 将  $Q_2$  的电压箝位于零, 为  $Q_2$  创造了零压开通条件。

(7) 模态 7—滞后臂功率器件零压开通。 $L_{a2}$  中的电流  $i_{La2}$  通过  $D_2$  续流并下降, 在  $i_{La2}$  不小于变压器初级反向电流的绝对值之前使功率器件  $Q_2$  开通即为零压开通。自  $Q_4$  关断至  $Q_2$  开通的时间, 为滞后臂的死区时间。

(8) 模态 8—滞后臂辅助谐振网络谐振。电感  $L_{a2}$  和电容  $C_{a2}$ 、 $C_{a4}$  谐振, 电感  $L_{a2}$  中的电流减小至零后反向增加, 电容  $C_{a4}$  充电,  $C_{a2}$  放电。电感  $L_{a2}$  的储能将为下半周期  $Q_4$  的零压开通提供能量条件。

(9) 模态 9—反向传递能量。功率器件 (IGBT)

$Q_3$  和  $Q_2$  导通, 变压器初级向次级传递能量。电路开始后半周期的工作过程。

自此, 电路开始后半周期的工作过程, 与前半周期的工作过程完全对称。

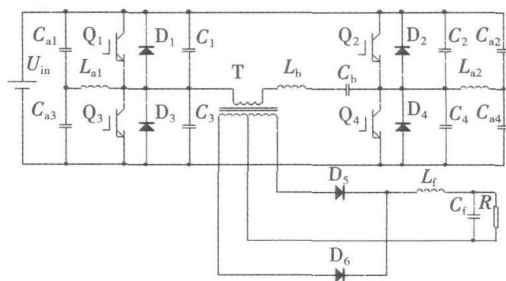


图 1 采用辅助谐振网络的全桥功率变换电路拓扑

Fig 1 Full-bridge power converter topology with auxiliary resonant network

## 2 超前臂软开关能量分析

### 2.1 吸收电流能量实现近似零压关断

超前臂采用近似零压软关断, 即在功率器件关断时, 转移电流能量, 减缓器件电压的上升速度。常用的方法是在功率器件上并联吸收电容。吸收电容越大, 近似零压软关断效果越好, 但零压开通就越困难, 需要采取有效措施解决开通瞬间的电容放电问题, 特别是在电源空载和轻载时, 以保证器件的零压开通。总之, 吸收电容参数对于实现器件的软开通与软关断是一个矛盾, 需要折中考虑。

### 2.2 增加辅助能量实现零压开通

零压开通要求电路能提供足够的能量来完成功率器件并联电容的充放电。电源空载及轻载时, 由于变压器初级电流很小, 无法实现功率器件的零压开通, 此时, 必须采用增加辅助能量的措施。

图 1 所示的 LC 辅助谐振网络是用以产生附加能量的有效途径。其参数设计需要考虑如下因素:

(1) 在能够提供足够大的附加能量, 以满足空载时功率器件并联电容充放电需要的前提下, 辅助电感电流要尽量小, 以减小对功率器件软关断的附加压力。(2) 谐振网络的谐振周期要足够大, 以避免辅助电容出现负电压及高于直流电源电压的情况。

### 2.3 死区时间的自适应调节

如上所述, 自  $Q_1$  (或  $Q_3$ ) 关断至  $Q_3$  (或  $Q_1$ ) 开通的时间, 即为超前臂的死区时间。为了实现开关器件的零压开通, 死区时间必须满足一定的条件。在  $Q_1$  (或  $Q_3$ ) 关断后, 变压器初级电流和辅助谐振电流给  $Q_1$  和  $Q_3$  并联电容充放电, 并使  $Q_3$  (或  $Q_1$ ) 反并联

二极管导通所需的时间决定了死区时间的下限;同时,从 $Q_1$ (或 $Q_3$ )关断到流过 $Q_3$ (或 $Q_1$ )的反并联二极管电流减小到零的时间为死区时间上限。只有在死区时间的下限和上限之间使 $Q_3$ (或 $Q_1$ )开通,才能实现器件的零压开通。死区时间上下限的时间差为死区可控时间,它的大小反映了用于功率器件零压开通能量的富余程度。

当电源输出电流不同时,电路提供给功率器件并联电容充放电的能量不同,用于零压开通能量的富余程度也不同,所以死区时间下限、死区可控时间随输出电流或变压器初级电流的变化而变化,这就要求控制系统能够动态灵活地调整死区时间以满足功率器件零压开通的需要。一般来说,死区时间下限随着负载电流的增大而减小,死区可控时间随着负载电流的增大而增加。相比之下,死区时间对直流输入电压的变化并不敏感。因此,控制系统可以根据电源输出电流或变压器初级电流对死区时间进行动态自适应调节,以实现死区时间与受电路能量影响的谐振过程的配合,保证功率器件在电源输出电流不同时均能实现零压软开通。

### 3 滞后臂的软开关实现

一般来说,在移相控制的全桥功率变换电路中,滞后臂的零压软开通条件比超前臂恶劣,若单纯采用零压软开关,则滞后臂的软开通和软关断矛盾在全负载范围内很难协调。采用零流软关断与零压软开关相结合的技术,即在环流过程中采取措施衰减变压器初级回路电流,实现滞后臂的零流或近似零流关断,并在此基础上通过功率器件并联吸收电容实现近似零压软关断,采用与超前臂相同的辅助谐振网络,实现滞后臂的全负载范围零压开通,则可以彻底解决滞后臂软开通与软关断的矛盾。

#### 3.1 环流过程衰减电流能量实现近似零流关断

在变压器初级串联隔直电容,可以在环流期间有效衰减变压器初级回路电流,使滞后臂实现零流关断或近似零流关断。此外,隔直电容还可以防止变压器偏磁饱和。

虽然在变压器原边串联隔直电容,可以使滞后臂实现零流(或近似零流)关断,但变压器初级电流衰减到零后会继续减小而反向,为了防止环流过程中变压器初级回路电流反向,在变压器初级串联了饱和电感。当变压器初级电流小于饱和电流后,饱和电感进入非饱和状态,电流进一步减小的速度显著降低,同时可有效避免滞后臂辅助电流流入变压器初级回路,为滞后臂的软开通提供了保障。

#### 3.2 增加辅助能量实现滞后臂零压软开通

在一定的电路参数下,变压器初级回路串联隔直电容和饱和电感的方法不能同时实现较大容量焊接电源全负载范围的零流软开通和零流软关断,且单纯的零流软开通无法解决开通时刻功率器件寄生电容的瞬间放电问题。并且在滞后臂功率器件上也需要并联一定的吸收电容(比超前臂功率器件并联的吸收电容容量小),以使在零流软关断条件恶劣、变压器初级回路电流不能衰减到足够小时,通过吸收电流能量,减缓开关器件关断时电压上升速度,在近似零流软关断的基础上实现近似零压软关断。

为了解决功率器件并联电容(包括寄生电容)在器件开通时刻的瞬间放电问题,图1在滞后臂也并联了LC辅助谐振网络,用以提供零压软开通所需的辅助能量,同时辅之以随输出电流或变压器初级电流变化而动态调整的死区时间控制,实现了全负载范围内滞后臂开关器件的零压开通。

滞后臂的死区时间上限为辅助谐振电流等于已经反向的变压器初级电流的绝对值。相对于超前臂,滞后臂的死区时间变化范围较小,在一定的电路参数匹配下甚至可以固定不变。

### 4 试验结果

图2和图3所示为实测的电源空载状态两臂功率器件电压电流波形,电流为负的部分为流过IGBT反并联二极管的电流。

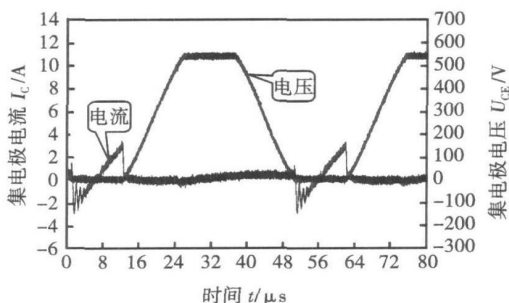


图2 空载状态的超前臂功率器件电压电流波形

Fig. 2 Current and voltage waveforms of power devices in lead leg (open-load)

图4和图5所示为实测的电源输出电流400 A,电压36 V时的两臂开关器件的电压电流波形。电流波形中包括了开关器件寄生电容的充电电流。

由图2~图5可见,在电源全负载范围内,功率变换电路的两桥臂实现了完全的零压开通;同时,超

前臂实现了近似的零压关断,而滞后臂实现了近似零流与近似零压相结合的软关断。

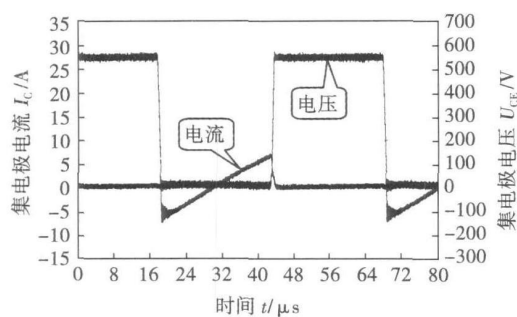


图 3 空载状态的滞后臂功率器件电压电流波形

Fig. 3 Current and voltage waveforms of power devices in lag leg (open-load)

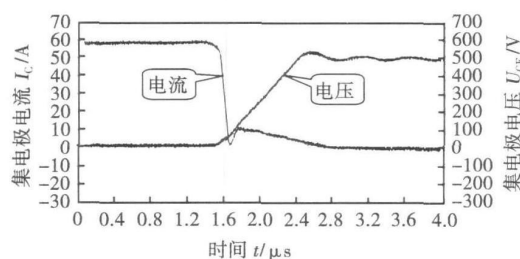


图 4 电源输出 400 A/36 V 时的超前臂功率器件电压电流波形

Fig. 4 Current and voltage waveforms of power devices in lead leg

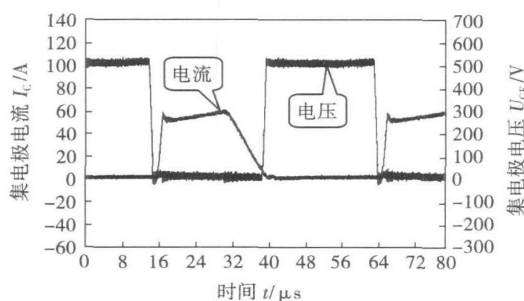


图 5 电源输出 400 A/36 V 时的滞后臂开关器件电压电流波形

Fig. 5 Current and voltage waveforms of power devices in lag leg

## 5 结 论

(1) 通过增加辅助谐振网络、功率器件并联吸收电容及参数的合理设计,采用死区时间自适应调节的移相控制方法,使得死区时间与受电路能量影响的谐振过程协调配合,实现了超前臂功率器件全负载范围的零压开通和近似零压软关断。

(2) 针对全桥移相控制电路滞后臂软开通和软关断在宽负载范围难以兼顾的问题,通过多种辅助措施协调配合,实现了滞后臂功率器件全负载范围的零压开通和零压与零流相结合的软关断。

## 参考文献:

- [1] 王 聪. 软开关功率变换器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 谭瑞民, 瞿文龙, 张克强. 一种新型二极管辅助换流网络软开关 PWM 全桥变换器[J]. 电工电能新技术, 2001(4): 14—18, 60.  
Tan Ruimin, Qu Wenlong, Zhang Keqiang. A novel DARNC soft-switching full-bridge converter [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2001(4): 14—18, 60.
- [3] 侯润石. 软开关式逆变弧焊电源的研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2005.
- [4] 张小周, 段卫东, 马 竞. 直流软开关电源研制中的零电压换向[J]. 电气传动自动化, 2004, 26(5): 15—18.  
Zhang Xiaozhou, Duan Weidong, Ma Jing. ZVS in design of PWM DC/DC soft switching power supply [J]. Electrical Drive Automation, 2004, 26(5): 15—18.
- [5] 刘胜利. 现代高频开关电源实用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [6] 孙 强, 郑湘渝, 余 娟. 倍流整流方式 ZVS PWM 全桥变换器的控制系统设计[J]. 通信电源技术, 2005, 22(2): 22—24.  
Sun Qiang, Zheng Xiangyu, Yu Juan. Control system design of current doubler-rectifier ZVS PWM FB converter [J]. Telecom Power Technologies, 2005, 22(2): 22—24.
- [7] 孙铁成, 王高林, 汤平华, 等. 基于数字信号处理器控制的新型全桥移相式零电压零电流开关 PWM DC-DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2005 25(18): 46—50.  
Sun Tiecheng, Wang Gaolin, Tang Pinghua, et al. Novel full bridge phase-shift ZVZCS PWM DC-DC converter based on DSP control [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 46—50.
- [8] 还 芳, 徐至新, 谢勇刚. 移相全桥 ZVZCS 变换器及数字控制研究[J]. 通信电源技术, 2003, 20(2): 1—5.  
Huan Fang, Xu Zhixin, Xie Yonggang. Study on phase-shift ZVZCS full bridge converter and its digital controlled [J]. Telecom Power Technologies, 2003, 20(2): 1—5.
- [9] 许 峰, 徐殿国, 柳玉秀. 一种新型的全桥零电压零电流开关 PWM 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 147—152.  
Xu Feng, Xu Dianguo, Liu Yuxiu. A novel zero-voltage and zero-current-switching (ZVZCS) full bridge PWM converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 147—152.
- [10] 赵振民, 岳云涛. 一种基于 UC3879 控制的全桥软开关 DC/DC 变换器[J]. 电力电子技术, 2005, 39(3): 107—110.  
Zhao Zhenmin, Yue Yuntao. Research on a soft switching DC/DC full-bridge converters based on UC3879 controller [J]. Power Electronics, 2005, 39(3): 107—110.

作者简介: 朱志明, 男, 1964 年出生, 博士, 教授. 主要从事焊接过程控制及自动化、现代功率电子技术与电能变换、人工智能与焊接工程应用软件方面的研究和开发工作. 发表论文 80 余篇。

Email: zzm@mail.tsinghua.edu.cn

## MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

### Self-adaptive control method of the pulsed CO<sub>2</sub> welding inverter

JIANG Lipai<sup>1</sup>, ZOU Yong<sup>1,2</sup>, YU Jianrong<sup>1</sup> (1. Opto-Mechatronic Equipment Technology Beijing Area Major Laboratory, Beijing Institute of Petro-chemical Technology, Beijing 102617, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China). p1—3

**Abstract:** The pulsed CO<sub>2</sub> welder, which controls its pulse current wave by the constant current control method, is need to solve an important problem of automatical regulating the pulsed CO<sub>2</sub> welding arc voltage, since without the constant arc voltage output curve it will lose the ability of self-adjusting arc length. In this paper, a new method is proposed for self-adaptive control of the pulsed CO<sub>2</sub> welding arc voltage. Its operating principle is through arc voltage feedback control of the peak current time to make the pulsed CO<sub>2</sub> welder yield sloping output characteristics so as to realize the self-adaptive adjusting of its arc voltage. By taking the slope rate as the criterion of its algorithm, this control method can determine the slope rate of welder output curve and adjust the self-adaptive control intensity in quantity.

**Key words:** pulsed CO<sub>2</sub> welding; arc voltage; self-adaptive control; inverter

### Sensing and control on the keyhole condition during controlled pulse key-holing plasma arc welding

JIA Chuanbao<sup>1</sup>, WU Chuansong<sup>1</sup>, ZHANG Yuming<sup>2</sup> (1. Institute for Materials Joining, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Center for Manufacturing, University of Kentucky, Lexington KY 40506, USA). p4—8

**Abstract:** According to the strategy of controlled pulse key-holing, a new sensing and control system is developed for monitoring and controlling the keyhole condition during plasma arc welding (PAW). Through sensing and processing the efflux plasma voltage signals acquired during the welding processes with different levels of welding current, the quantitative relationship of the welding current, efflux plasma voltage and backside weld width of the weld is established. PAW experiments show that the efflux plasma voltage can reflect the state of keyhole and backside weld width accurately. Based on this, welding experiments under closed-loop control are conducted on ordinary plate and workpiece with varied thermal conditions, which have validated the stability and reliability of the developed keyhole PAW system.

**Key words:** controlled pulse key-holing; efflux plasma voltage; keyhole; plasma arc welding

### Full-load range zero-voltage zero-current soft switching inverter arc welding power supply

ZHU Zhiming, ZHAO Gang, CHEN Jie, WANG Linhua (Key Laboratory for Advanced Materials Pro-

cessing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China). p9—12

**Abstract** Depending on the research and classification of typical full-bridge soft-switching power converters, a full-load range zero-voltage zero-current soft-switching full-bridge power converter topology with auxiliary resonant network was put forward, designed and analyzed. By using dead time adaptive regulated phase-shift control method, which makes the dead time conjugate with the resonance processes affected by the circuit energy, the full-load range zero-voltage turn-on and proximate zero-voltage soft turn-off with effective results are realized for the power devices of converter's lead leg. At the same time, aimed at the problem of soft turn-on and soft turn-off being difficult to be compatible in the full-load range for the power devices of converter's lag leg, a realizing method of soft-switching is proposed, which makes the zero-voltage and zero-current technology combined together. Through the cooperative function of various auxiliary measures, the full-load range zero-voltage turn-on and soft turn-off combined zero-voltage with zero-current are realized for the power devices of converter's lag leg.

**Key words:** zero-voltage zero-current soft-switching; auxiliary resonant network; dead time; full-load range; inverter arc welding power supply

### Special welding machine and welding process for all position automatic pipeline welding

CHEN Shujun<sup>1</sup>, LU Zhenyang<sup>1</sup>, REN Fushen<sup>1,2</sup>, LIANG Junzhi<sup>3</sup>, YAN Zheng<sup>3</sup>, CHEN Jiang<sup>3</sup> (1. School of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. School of Mechanical Science and Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China; 3. Pipeline Research Institute of CNPC, Langfang 065000, China). p13—16

**Abstract** A special arc energy regulator is developed to realize the all position automatic root welding of pipeline welding. This generator adopting the self-adaption technology of short circuit energy and burning energy, breakthrough conventional matching relationship of the output voltage and the wire speed for the GMAW. Ensure the arc stability under the lower voltage and higher current, to adapt the high energy input of the all position root welding of pipeline.

**Key words:** pipeline welding; root welding; all position welding; single sided weld with double sided formation

### Analysis of arc interference and control strategy for double wire

AC-DC SAW GAO Ying, LI Huan, HUANG Zongren, YANG Xinxin (School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p17—20

**Abstract** In the AC-DC double wire SAW system, the interference of two arc is serious. It makes the welding process unstable.