

快变换交流方波埋弧焊电源研制

齐铂金, 王义朋, 王 曲

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 设计了一种双逆变电路结构的快变换交流方波埋弧焊电源, 该电源由全桥型一次逆变电路和半桥型二次逆变电路组成。二次逆变电路由续流耦合电感、小功率电压尖峰吸收保护逆变回馈电路、IGBT 半桥电路构成。一次逆变电路采用了电压、电流双闭环控制, 二次逆变电路采用“临界共同导通”的控制策略, 并对其电路换向过程进行了分析。试验结果表明, 这种交流方波埋弧焊电源在电流换向过程中换向速度快且无过零死区时间, 保证了电弧稳定性, 具有良好的工程应用前景。

关键词: 埋弧焊电源; 快变换; 交流方波; 逆变电路; 控制策略

Study on Submerged Arc Welding Power Source With High Commutation Rate AC Square-Wave

QI Bojin, WANG Yipeng, WANG Qu

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] A new submerged arc welding (SAW) power source containing two inverting circuits, which is consist of primary full-bridge circuit inverter and a secondary half-bridge circuit inverter, has been developed. The secondary inverter is composed of a coupling inductor, a half-bridge circuit realized by two IGBTs and a small power inverter feedback circuit for voltage spike absorption protection of IGBTs. The current and voltage double closed-loop control technology is adopted in the primary inverter. A “common lead” control strategy is used in secondary inverter, which makes commutation rate of current higher. Experimental results show that the submerged arc welding power source works well in polarity exchange performance with high polarity exchange speed and indecently short current zero-crossing time, which makes welding arc stable. The submerged arc welding power source has broad prospects of production application.

Keywords: Submerged arc welding power source; High commutation rate; AC square-wave; Inverting circuit; Control strategy

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.17.067

埋弧焊是一种效率高、工作条件好的焊接方式, 在重型机械、船舶工程、大型结构体等的焊接制造中起着重要的作用。相对直流(DC)埋弧焊来说, 交流(AC)方波埋弧焊能够调节更多的焊接参数, 焊接工艺适用性广, 并且磁偏吹小, 因此能够适应更广泛的焊接需求^[1-2]。

目前比较成熟的大功率交流埋弧焊电源主要有晶闸管式方波埋弧焊电源、绝缘栅双极型功率管(IGBT)型逆变埋弧焊电源等。晶闸管式埋弧焊机功率损耗大, 且多采用工频变压器, 其体积和重量都很大, 因此其应用受到一定的限制^[3-6]。相对而言, 采用IGBT的交流方波埋弧焊电源能够采用高频变压器进行变压输出, 其体积小, 效率高, 应用广泛。在文献[7]中, 逆变交流方波埋弧焊电源存在着较长过零时间(超过 $10\mu\text{s}$), 过零速度较慢(约 $0.25\text{A}/\mu\text{s}$)等问题, 影响电弧的稳定, 甚至会有

熄弧的可能。文献[3]中设计了一种带耦合电感的二次半桥电路, 其换向速度较快, 但在二次逆变电路中引入了功率开关K来控制续流回路中电容的充、放电, 增加了电路的复杂性和控制的难度。在提高弧焊电源变极性的转换速度上, 需要主电路拓扑和控制方法的结合才能达到好的效果。

本研究旨在采用传统的双逆变电路交流方波埋弧焊主电路拓扑的基础上, 对主电路拓扑进行改进并配合相应的控制策略, 研制了一种大功率快变换的交流方波埋弧焊电源, 在换向过程中实现了电流过零无死区时间, 过零速度最高可达 $90\text{A}/\mu\text{s}$, 解决了交流方波电源换向速度不够快等问题。

1 主电路拓扑设计

1.1 主电路拓扑结构

主电路采用以 IGBT 为开关器件的全桥型一次逆变电路和半桥型二次逆变电路,其结构如图 1 所示。三相 380V 电网电压经过输入整流、滤波后转换为较为稳定的直流电,再输入一次全桥结构的逆变电路。一次全桥逆变电路的 IGBT 的开关频率为 20kHz,直流电经过其开关控制后得到了交流方波电压(频率为 20kHz),输入到高频变压器的原边,经过变压器的降压将约 500V 的电压值降低到约 70V。变压器的副边电压经过二极管整流输入到二次半桥逆变电路,通过较低的开关频率将输出的电压转换为 10~100Hz 频率的交流方波电压。

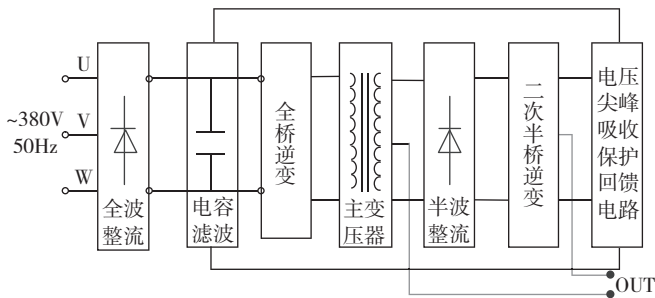


图1 埋弧焊电源主电路拓扑

Fig.1 Main circuit topology of SAW power source

此外为满足最大 1000A 的电流输出,文献 [5] 中采用了双全桥并联拓扑和均流控制技术,实现了高达 1000A 以上的电流输出,相当于将两台逆变焊机并联起来,导致电路结构复杂,此外还要考虑电流均衡问题。为使电路简单且满足大功率的输出要求,本研究中将二次逆变电路采用三路半桥直接并联的方式。

1.2 二次逆变电路结构

为了保证输出的变极性方波能够快速变换,二次逆变电路采用串接耦合电感的半桥式逆变电路,并带有小功率电压尖峰吸收保护逆变回馈电路。如图 2 所示为二次逆变电路结构。

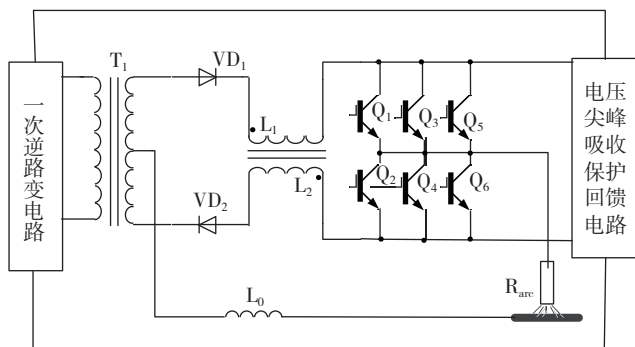


图2 埋弧焊电源二次逆变电路结构

Fig.2 Secondary inverter circuit of SAW power source

一次逆变后,高频电压经过高频变压器 T_1 降压到副边, T_1 副边的高频电压(20kHz)经过 VD_1 和 VD_2 的

半波整流后输入到串接耦合电感的半桥电路中,通过半桥电路中 Q_1 、 Q_2 的开关控制输出方波交流电。其中 L_1 、 L_2 是耦合电感,能够对输出电流起到滤波以及辅助加快极性转换速度的作用,并且维持电流的连续。

2 控制系统设计

2.1 一次逆变电路——双闭环控制

一次逆变电路主要是对电源系统的外特性进行控制,通过脉宽调制(PWM)控制调节 IGBT 的导通从而得到可靠的满足焊接需求的电源输出特性。本研究中主要采用了电压电流双闭环控制,对输出进行恒压恒流的控制策略,其控制原理框图如图 3 所示。

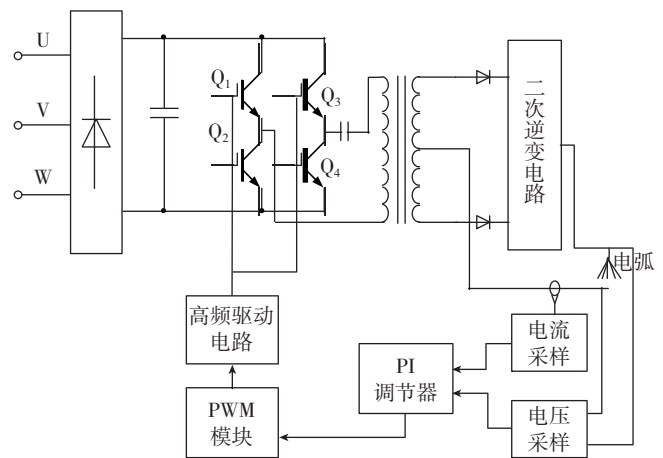


图3 双闭环控制原理

Fig.3 Double closed loop control principle

霍尔电压传感器、霍尔电流传感器分别采集电弧电压参数和焊接电流参数,然后与给定的电压电流进行比较后产生电压误差信号和电流误差信号。两个误差信号进入PI控制调节后,进入PWM模块产生相应占空比的PWM驱动信号,最后通过驱动电路产生相位相差 180° 的两路驱动信号,分别驱动 Q_1 、 Q_4 以及 Q_2 、 Q_3 两组 IGBT,从而产生高频交流方波信号,通过电压电流双闭环控制输出电压、电流。

2.2 二次逆变电路——“临界共同导通”策略

二次逆变电路决定了输出方波交流电的换向过程,其结构、参数以及控制策略对电源的输出性能有很大的影响。目前,二次逆变电源的换向控制策略主要有两类,一类是在正反两开关管交互导通阶段之间设置延迟时间,以防止直通现象,称为“共同截止”控制策略;另一类是让两组开关管存在几个微秒的共同导通时间,称为“共同导通”控制策略。认为“共同导通”策略能够加快电流的换向速度,同时也更能保持电弧的稳定^[7-10]。但是共同导通时间不宜过长,过长则会导致输出电流为零,且电流过零时间随着共同导通时间

的增加而增加。通过分析主电路切换过程,若“共同截止”、“共同导通”时间过长都将使输出电流出现过零死区,只有使上下桥臂切换介乎“共同截止”与“共同导通”之间,输出电流过零才无死区时间,这种控制策略本文称为“临界共同导通”控制策略。实际试验表明,由于 L_0 的存在,“临界共同导通”控制策略选取使上下桥臂切换时其驱动波形存在(1~2 μ s)的共同导通时间,效果最佳。

采用“临界共同导通”策略时,正向焊接电流向负向焊接电流转变过程中,将 R_{arc} 等效看作电弧的等效电阻, L_0 为输出回路电缆等效电感,二次逆变电路的工作过程如下。

(1) Q_1 导通, Q_2 截止:如图4所示,此时 T_1 高频电流经过 VD_1 的半波整流后,流向 L_1 , L_1 对高频半波电流进行滤波,流向 Q_1 、 R_{arc} 、 L_0 ,最终回到 T_1 的中心抽头。电流流向为 L_1 — Q_1 — R_{arc} — L_0 — T_1 中心抽头。此时输出电流是“正半波”。

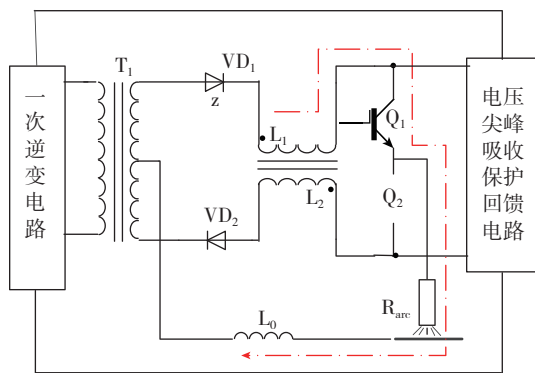


图4 Q_1 导通 Q_2 截止时的电流情况
Fig.4 Current condition when Q_1 on and Q_2 off

(2) Q_1 导通, Q_2 导通:在电流换向前, Q_1 、 Q_2 共同导通的时间,二次逆变电路进入“直通”状态。此时电流经过开关管 Q_1 之后分别流向电弧和通过开关管 Q_2 流向电感 L_2 ,由于分流的作用,电弧电流会迅速下降并且为电感 L_2 储能。此时的电流方向如图5所示, L_1 — Q_1 — R_{arc} — L_0 — T_1 的中心抽头以及 L_1 — Q_1 — Q_2 — L_2 — VD_2 — T_1 。利用共同导通阶段使电弧电流快速衰减,为电弧电流换向做好准备。

(3) Q_1 截止, Q_2 导通:此状态下,流过开关管 Q_1 的电流迅速减小到零,电感 L_1 因电流的瞬间切断而产生感应电动势,由于互感作用电感 L_2 产生与 L_1 大小相等、方向相反的电动势,与一次逆变电路输出电压叠加形成反向电压,提高了反向电流的建立速度,因此能够迅速建立起电弧反向电流,形成电流输出“负半波”。换向过程完成,此时输出电流是“负半波”。电流方向如图6所示, T_1 的中心抽头— L_0 — R_{arc} — Q_2 — L_2 — VD_2 。

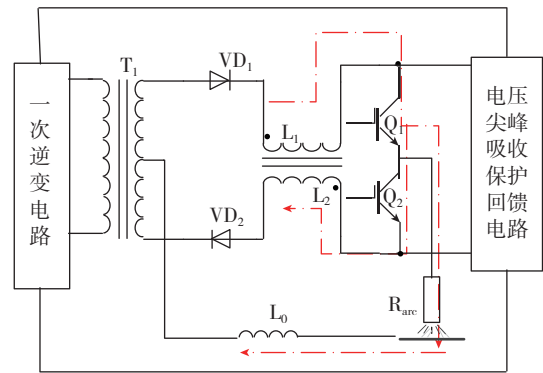


图5 Q_1 、 Q_2 都导通时的电流情况
Fig.5 Current condition when both Q_1 and Q_2 on

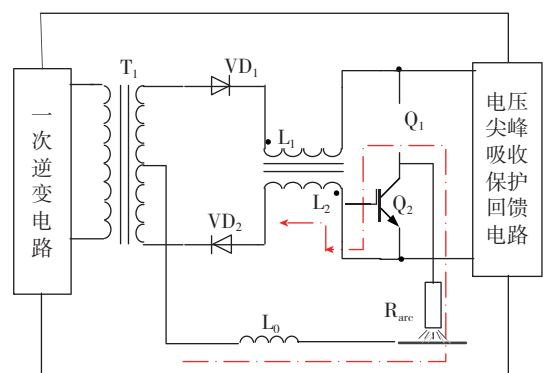


图6 Q_1 截止 Q_2 导通时的电流情况
Fig.6 Current condition when Q_1 off and Q_2 on

通过以上过程的分析,在“临界共同导通”控制策略下,所采用的续流电感使得二次逆变换向过程中的电流减小速度加快,电流过零无死区,并且能迅速建立起反向电流,保证电流极性的快速变换以维持电弧的稳定。

3 电源输出特性的测试

对埋弧焊电源进行了输出性能的测试,测量并绘制了电源的输出外特性,给出了二次逆变电路的PWM驱动波形,采集了电源变极性工作过程中正负600A的电流波形及其上升沿和下降沿波形。

电源输出电流分别给定为600A、450A和300A,通过改变输出负载的阻抗值,测量并记录负载两端的电压值和电流值,绘制电源的输出外特性曲线,如图7所示。可以看到,电源的空载电压为80V左右,电弧容易引燃。同时,电源的恒流特性良好。

由于变极性特性主要由二次逆变半桥电路决定,对其IGBT的控制采取“临界共同导通”策略,设置导通时间约2 μ s,其进入高频驱动电路的PWM信号和IGBT的驱动信号分别如图8、图9所示,PWM信号约2 μ s的共同导通时间,进入驱动电路后,由于驱动电路的延时和

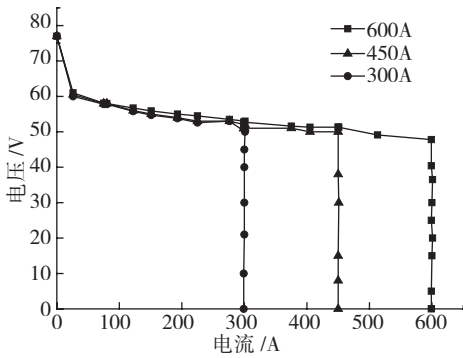


图7 电源的输出外特性曲线

Fig.7 External characteristic of power source

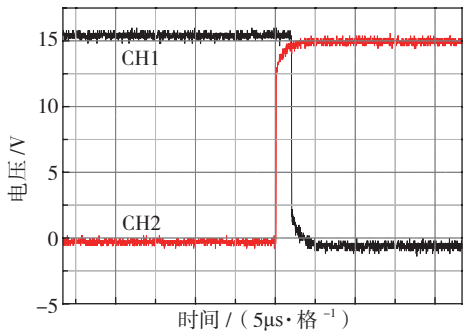


图8 二次逆变电路PWM信号

Fig.8 PWM signal of secondary inverter circuit

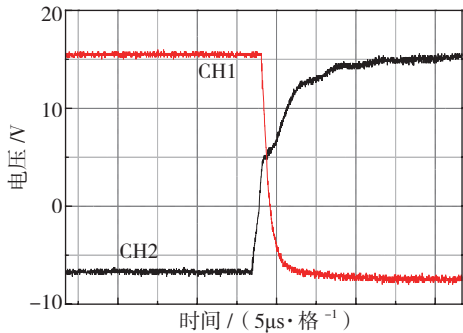


图9 IGBT驱动信号波形

Fig.9 Drive signal waveform of IGBT

上升速度有限,形成了极短的共同导通时间。

此外,根据实际的焊接情况以及控制需求,设置脉冲方波电流的频率为50Hz,占空比为50%时测得实际变极性工作过程中正负600A输出电流波形如图10所示,可以看到输出电流的波形换向快速。图11所示为电流换向过程的波形图,电流从负600A上升到约正300A及从正600A下降至负300A仅用时10μs左右,即电流变化率高达90A/μs,且电流过零无死区时间,极大地提高了电源的电流变换速度。

从试验结果来看,所研制的交流方波埋弧焊电源输出电流的外特性控制稳定,变极性换向过程迅速,电流过零无死区时间,电弧稳定。

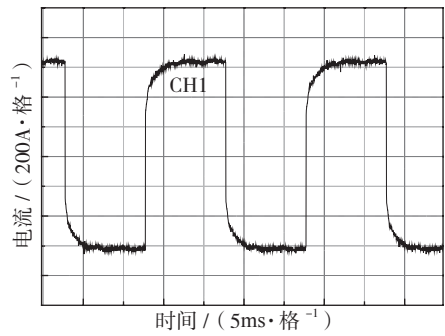
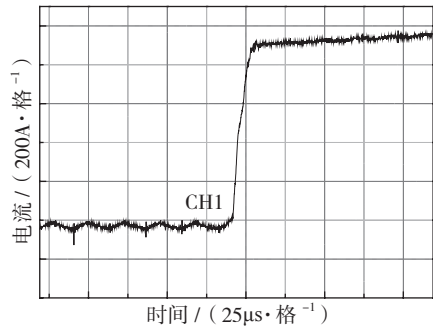
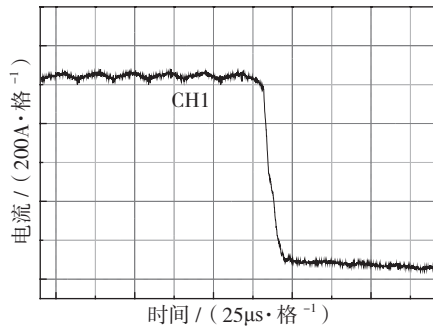


图10 输出电流波形

Fig.10 Output current waveform



(a) 上升沿波形



(b) 下降沿波形

图11 输出电流换向过程中波形

Fig.11 Waveforms of output current commutation process

4 结论

(1) 研制了一种双逆变电路结构的快变换交流方波埋弧焊电源,该电源由全桥型一次逆变电路和半桥型二次逆变电路组成,二次逆变电路由续流耦合电感、小功率电压尖峰吸收保护逆变回馈电路、IGBT半桥电路构成。

(2) 交流方波埋弧焊电源的变极性主要是由二次逆变电路所决定的,采用了“临界共同导通”的控制策略,分析了在这种策略下的变极性切换的过程,表明“临界共同导通”策略的变极性的切换效果好,切换速度快。

(3) 快变换交流方波埋弧焊电源的输出特性测试表明,在电流极性转换的过程中,无过零死区时间,变极性速度(电流变化速率)可达90A/μs。

(下转第76页)