

研究与设计

半桥式弧焊逆变器的设计和分析

周 晓¹, 刘裕国², 许建平¹, 王凤岩¹

(1.西南交通大学, 四川 成都 610031; 2.深圳东山和实业有限公司, 广东 深圳 518111)

摘要:半桥式弧焊逆变器实现的理论和相关技术已很成熟,但在产品化、实用化中,还有很多需要深入研究的问题。针对在实际中遇到的一些问题,结合已有的设计方法进行了分析和实验,做了焊接工艺评定。这部分工作是研究应用新的拓扑结构、控制方法等技术的基础。

关键词:弧焊逆变器;半桥;PI调节;平衡

中图分类号: TG434.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-2303(2005)08-0033-05

Design and analysis of half-bridge arc welding inverter

ZHOU Xiao¹, LIU Yu-guo², XU Jian-ping¹, WANG Feng-yan¹

(1.Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2.DSH company, Shenzhen 518111, China)

Abstract: Although the theory and relative technique realizing half bridge arc welding inverter is well developed now, there are still many problems need to be deeply researched during the production and realization. Focused on some problem met in practice, combined with the former design method, it made the analysis and experiment, evaluated the welding result, which give the foundation of research and application of the new topology and control technique, etc.

Key words: arc welding inverter; half bridge; PI adjust; balance

前言

逆变电路理论是具体应用的基础,建立在工业电子技术、半导体器件技术、现代控制理论、现代电力电子技术、半导体变流技术、脉宽调制技术和磁性材料物理等学科基础上。通过研究逆变电路理论的文献[1]、[2],我们对电路拓扑、功率元件设计和选择、控制方法设计和选择等工程问题有初步的了解。但逆变技术应用领域越来越广泛,在不同领域中具体的设计方法有根本的区别。逆变技术在焊接领域的应用有20多年的发展,从弧焊逆变电路理论的文献[3]、[4]来看,具体的电路形式是多种多样的,还有许多新的电路要通过实际应用来检验。

半桥式弧焊逆变器是一种成熟的电路,但作为具体应用,如何进一步改善控制、提高可靠性、降低

成本等方面的研究设计仍在继续。理论上认为半桥式适合中小功率应用,但随着电力器件的发展,现在已有500A的半桥式弧焊逆变器。我们在原有500A半桥式弧焊逆变器的基础上,设计了1台400A的半桥式弧焊逆变器,与全桥式400A弧焊逆变器作了比较,并进行了工艺实验。主要目的是进行逆变电路的优化,进行性能和工艺的改进,并为进一步系统地进行控制分析和改进打下基础。

1 主电路的设计

桥式逆变器有全桥式和半桥式。其中全桥式由于主变工作电压高,功率传输效率高,在国内的研究较为深入、广泛。由于半桥逆变器主变压器一次侧的电压只是全桥式的一半,如果它们的开关电流一样,半桥逆变器的输出功率将是全桥逆变器的一半。但是它们的主变磁心都工作在两个象限,在相同的工作频率下,主变压器的体积和传送的功率成正比。所以对相同输出功率的情况,两者的主变体积相

收稿日期: 2005-01-10; 修回日期: 2005-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50077018)

作者简介: 周 晓(1971—),男,湖北武汉人,博士,主要从事开关电源和弧焊逆变器的研究。

当。不同点是变比不一样,对于一般的弧焊逆变器半桥式变比约为 4:1,全桥式约为 8:1。在电流密度相同的情况下它们二次侧绕组导线的截面积相同,半桥式一次侧绕组导线截面积是全桥式的 2 倍,这个差别可由两者实际选用的绕组匝数不同来弥补。在此先对半桥式主变压器进行设计计算。

1.1 主变压器的理论计算

设计逆变变压器首先要根据逆变器的输出功率容量,合理设计工作频率,以使变压器具有可实现性和合理性。然后根据确定的工作频率和铁心材料供应情况进行比较、分析和估算,选择合适材料制成的合适形状的铁心,使变压器有可生产性和合理的成本。目前常用的逆变主变铁心材料有锰锌铁氧体和金属非晶态。

确定铁心窗口利用系数,要充分考虑逆变主电路的拓扑形式、输出电路形式以及绕制工艺。根据具体铁心材料和可能的绕组情况,合理设计铁心的工作状态和绕组铜线电流密度,既要节省材料,又要使铜耗与铁耗相匹配。采用面积乘法^[1]的主变计算式为

$$A_e A_c = \frac{P_o(1+\eta)}{\eta \cdot K_j f K_c K_e B_m}, \quad (1)$$

式中 A_e 为铁心截面积; K_e 为铁心截面积有效系数; A_c 为窗口面积; K_c 为窗口利用系数; K 为波形系数; j 为电流密度; f 为工作频率; P_o 为输出功率; η 为效率; B_m 为最大工作磁密。

有时为了不考虑电流密度选取,把它换算成电流密度比例系数,得

$$A_e A_c = \left(\frac{P_T \times 10^4}{K_j f K_c K_e B_m} \right)^{\frac{1}{1+x}}, \quad (2)$$

式中 P_T 为视在功率; K_j 为电流密度比例系数; x 为常数取 -0.17 ~ -0.12。

400 A 逆变焊机的输出功率为 16 kW,效率 0.85,电流密度取 6 A/mm²。通过计算,铁氧体磁心采用 UF90,一次侧绕组 28 匝,二次侧绕组 7 匝;非晶态磁心采用圆形磁心 MAC130-80-40,一次侧绕组 12 匝,二次侧绕组 3 匝。以上变压器的设计主要从一、二次侧绕组的额定电流入手进行计算,弧焊逆变器的型号根据输出额定电流为准。因此也可以说这种主变的设计是以输出的额定电流为依据。实际上电流和电压存在对偶关系,弧焊逆变器的电源整流后的直流电压可认为是常数,一般单相 300 V,三相 540 V。功率开关管的耐压选择就通常有 600 V、

1 200 V 等几种,主变压器的设计也可以考虑输入的情况,用伏秒积进行估算。实践中用铁心测试仪测出铁心在工作开关频率下的饱和压降,直接计算变压器一、二次侧匝数,作出简单准确的计算。这里饱和压降指完全模拟逆变焊机的工作状态,得出的铁心不至于磁饱和烧毁功率开关管所能承受的最高电压。

逆变变压器绕组的绕制主要考虑 2 个问题:一是尽量减小漏感;二是尽可能减少导体的涡流损耗和改善散热。这两方面对控制变压器的发热、提高变压器转换效率和降低关断电压尖峰和电路中的电压尖峰毛刺、提高逆变开关管的可靠性有重要作用。实际绕制时,为改善散热,铁氧体变压器采用立绕,二次侧绕组均匀绕制在一次侧绕组中;非晶态变压器采用多股线绕,二次侧绕组均匀叠绕在一次侧绕组中。

1.2 主电路形式的选择

在半桥式逆变电路中,一般不会发生变压器单向偏磁问题。通过运用微积分法求解两个半周期各自施加在高频变压器上的伏秒积,可以知道变压器在这种拓扑形式正、负半周期内的伏秒积相等。由于半桥逆变电路具有很难得的自动抗电路不平衡能力,对于电压型控制的逆变器是一种比较好的逆变主电路方案。

半桥式逆变电路只用两只开关管,而且对其耐压要求也不高,成本比较低。半桥电路开关管上电压为直流输入电压,在三相工频电源经整流滤波输入时大概为 540 V。实际选择功率开关管采用 150 A 的 IGBT 模块。电容的连接有几种选择,如图 1、图 2 所示。

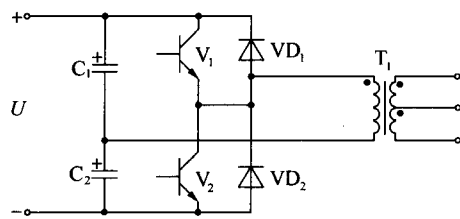


图 1 半桥变换器电路一

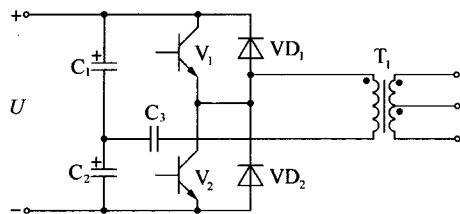


图 2 半桥变换器电路二

在图 1 所示电路中, C_1 、 C_2 作为 2 个臂与主变压器直接相连。2 个电容连接点电位随 V_1 、 V_2 导通情况而浮动, 能自动平衡两个开关管的伏秒积。 C_1 、 C_2 可采用功率电解电容, 实际用 2 200 μ F 电解电容, 工作正常。为了减少中频电流作用下的升温, 也可以采用无极性、具有低等效串联电阻的 20 μ F 的聚丙烯电容。但这种电路对控制要求高, 控制电路平衡性不好, 在输出电流小于 25 A 时 C_1 、 C_2 中点偏离 $U/2$ 达 100 V。当中点电位浮动不能满足平衡偏磁的要求时, 可在变压器一次侧串联电容 C_3 , 如图 2 所示。 C_3 电容值选择主要考虑串联谐振频率和电容器充电电压。一般串联谐振频率取主开关频率的 1/10, 要求电容值为

$$C_3 = \frac{1}{(2\pi f_R n)^2 L}, \quad (3)$$

式中 f_R 取谐振频率的 1/10; n 为主变压器变比; L 为二次侧电感。

考虑充电电压限制时, 取 C_3 工作电压为输入直流电压的 5%~10%, 要求的电容值为

$$C_3 = \frac{I_p}{U_C} \cdot \frac{T_s}{2}, \quad (4)$$

式中 U_C 为 C_3 工作电压; I_p 为变压器一次电流; T_s 为逆变开关周期。按式(4)算出的电容值比式(3)略大, 实际取 $C_3=10 \mu$ F, 通电测试后, 主变的对称性更好。

1.3 输出整流滤波电路的设计

主电路的逆变开关频率为 20 kHz, 主变压器二次侧采用带中间抽头的双绕组。这种设计输出整流一般为全波整流, 整流得到频率为 40 kHz 直流脉冲。由于整流的频率高, 必须采用快恢复二极管或肖特基二极管等适用于高频整流的二极管。输出滤波中的电感需要有续流回路, 全波整流的 2 个整流管在变压器二次侧电压为零时充当续流管, 同时导通。

对中高端脉冲电压进行滤波时, 一般对纹波电压要求不是太高。实际弧焊逆变器中采用电感滤波或 LC 滤波。电感滤波对输出电压的纹波要求不高, 只平滑供给负载电流, 减小电流纹波, 控制输出电流。这种滤波电路对整流二极管的冲击小, 可靠性高。由于弧焊逆变器存在负载短路和燃弧过程, 负载电压变化大, 特别是有频繁负载短路的过程, LC 滤波的电容一般在 1 μ F 以下, 不能使用一般电解电容, 否则电容会爆炸。

弧焊逆变器的输出电感对动特性有直接影响, 它限制了由于负载或控制引起的输出电流变化率。根据电子电抗器的提法, 输出电抗和 PI 调节器或其它反馈控制构成对瞬态情况的控制。一般认为输出电抗小则瞬态响应快, 实际采用 50 μ H 条形电感。

1.4 输入滤波的设计

一般为了减少直流电压纹波, 弧焊逆变器的输入滤波电容取得较大, 通常为 2 200 μ F, 3 300 μ F 的功率电容。这样可以保证输入电压纹波在 50 V 以下。但最近有文献提出^[3], 过大的输入电容会降低逆变器的功率因素。另外大的功率电容的成本高, 如果实际产品中能选用适当小的功率电容, 不但降低成本还能提高性能。按文献所给数据取输入电感 1.3 mH、输入电容 100 μ F、负载 0.1 Ω 调节输出电流看输入电压波形, 电流从 20 A 调到 100 A 电压纹波从 50 V 上升到 100 V, 而 100 A 以上纹波电压变化不大。但考虑到瞬态网压尖峰等因素, 最后输入电感取 300 μ H, 电容取 1 100 μ F, 在实验过程中输入电压正常。

2 控制电路的调试

2.1 外特性和动特性控制

逆变系统中, 控制电路和主电路同样重要, 两部分相互配合, 共同工作, 才能构成完整的逆变系统。逆变器的控制电路主要是控制逆变器输出, 使其输出特性适应焊接的需要。逆变器外特性除影响系统的稳定性外, 还关系到焊接工艺参数。外界干扰使弧长变化时, 将引起系统工作点移动和焊接工艺参数出现静态偏差。为获得良好的焊缝成形, 要使工艺参数的静态偏差愈小愈好。针对手弧焊和 TIG 焊的电弧静特性, 选择恒流和缓降外特性与之相配合, 来满足系统的稳定条件, 保证焊接工艺参数稳定。逆变器外特性形状还考虑逆变器的引弧性能、熔滴过渡等作修正。

实际设计的弧焊逆变器为手工焊和直流氩弧焊两用, 其中手工焊有长弧和短弧两档; 在手工焊中设有推力控制; 控制电路的设计包括控制系统的性能设计和控制电路中各个电路环节的设计; 对动特性的设计采用 PI 调节, 并通过实际焊接工艺进行参数选择。

2.2 功能逻辑电路

控制电路除了进行与输出特性和工艺性能直接相关的设计外, 还要有如手焊转氩弧焊等功能转

换的数字逻辑电路的设计。为了方便用户使用,提高焊机的自动化程度,功能逻辑电路的设计也很重要。在半桥式弧焊逆变器的设计中,主要的改进之处就是这部分电路。主要的功能有数显、功能转换、工作和故障指示、过电压过电流保护等。电压电流值的预设和预设值的数显,电压电流值在焊接时用同一个数显得到实际值,电压和电流显示的转换由开关控制。功能转换是用面板上的一个三档选择开关选择氩弧焊、短弧、长弧特性。进一步数字电路设计还将完成脉冲焊参数和交直流参数的调节等功能。

要完成这些具体繁杂的逻辑功能,如采用一般的数字逻辑电路,需要有 ULN2004、CD4049、HD4011、NE555 等 10 多个 IC。为了加强集成化程度,简化电路,便于二次开发,我们选用了可编程的 PUC 中央处理电路来完成这些逻辑功能。通过实际焊接工作条件下功能转换和保护的应用,证明它有较好的抗干扰能力和实用性。

3 与全桥电路的比较

在主电路和控制电路的设计上,半桥逆变器和全桥逆变器有很多相似之处,但作为两种常用主电路,又有明显的区别。相关资料中通常列出它们的逆变拓扑,作定性的比较和分析。在此我们主要通过具体的产品设计和性能价格等市场估计,作细致的比较。事实上,如今市场上 400 A、500 A 的弧焊逆变器中采用半桥主电路和全桥主电路的都有。通过比较,很难得到哪个更好的结论,只是对各自不同的特点进行分析。

功率电路上的比较是很明显的,主要是主变压器一次侧绕组和功率开关管有一倍的差别。其他情况相同时,半桥式主变一次侧电流是全桥式的两倍,所以在相同电流密度时导线截面积应该是全桥式的两倍。不过如果同时取一次侧每匝绕组上压降相同,半桥式主变压器一次侧匝数是全桥式的一半。综合考虑这两方面,两种拓扑的一次侧绕组总截面积和导线电阻值基本相同。而一次侧绕组的铜耗为 $P=I^2R$,这样半桥式的一次侧铜耗要大。400 A 半桥式采用一个 150 A/1 200 V 的 IGBT 模块,需要 2 路驱动,而全桥式用 2 个 75 A/1 200 V 模块,需要 4 路驱动。

在控制上,由于半桥式少两路驱动,电路相对简单。两者的二次侧主电路相同,所以在采用二次侧采样的反馈电路中,它们的采样值完全相同。对两种

拓扑的 PI 调节参数进行分析比较,发现实际上完全不同。这是由于它们主回路的工作方式不同引起的,半桥式主变压器一次侧工作电压大概只有全桥式的一半。

4 焊接工艺性能实验

通过电路参数的调整,进行了工艺实验,得到碱性焊条和纤维素焊条焊接时有好的工艺性能。纤维素焊条在药皮中加入 25%~40% 的纤维素,有一个很大的气体保护环境,同时获得较大的电弧推力。在立焊、向下焊接位置时熔渣和铁水不往下淌,可保证焊缝底层焊透,但在下向焊时容易断弧,由于在管道焊接过程中断弧会导致焊缝成型不好,同时还由于处理断弧焊缝而加大工作量,所以对弧焊逆变器提出比较高的要求。实验证明,带有阶梯推力可调的恒流外拖外特性(外拖点设为 15 V)适合于高纤维素焊条的焊接。

为了得到好的焊接工艺效果,改变相关的主电路和控制电路参数,由专业焊工分别进行试焊,并通过焊缝对比和焊工评价测试焊机的性能。对工艺性能影响大的元件和电路主要有输出电抗器和反馈电路中的 PI 调节器等。对电抗器测试的结果如表 1 所示。

表 1 不同输出电抗时试焊的工艺效果

输出电抗/ μH	焊接工艺效果
30	较好
50	好
100	好
500	较差

对 PI 调节器的两种常用的校正环节进行了参数调整和测试,如图 3、图 4 所示。

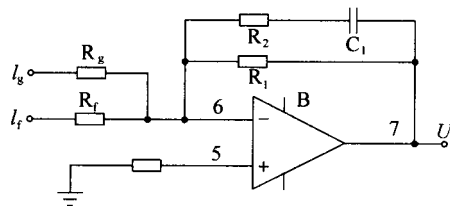


图 3 滞后校正环节

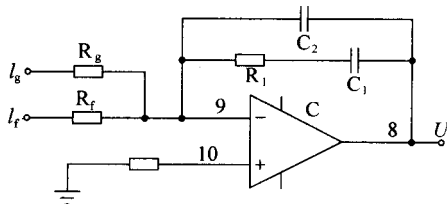


图 4 超前滞后校正环节

图 3 所示校正环节的传递函数为

$$G(s) = -K(\tau_1 s + 1)/(\tau_2 s + 1), \quad (5)$$

式中 $K = R_2/(R_g//R_1)$; $\tau_1 = R_1 C_1$; $\tau_2 = (R_1 + R_2)C_1$ 。

根据式(5)给出的关系,取 $R_g = R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_1 = 10 \text{ }\Omega$; 对 C_1 、 R_2 进行试验选择,结果如表 2 所示。

表 2 调节滞后校正环节参数试焊工艺效果

C_1/nF	$R_2/\text{k}\Omega$	工艺效果	C_1/nF	$R_2/\text{k}\Omega$	工艺效果
1	100	较差	10	100	较好
1	500	较好	10	500	好
1	1 000	较差	10	1 000	较好

由试焊结果,选择 $C_1 = 10 \text{ nF}$; $R_2 = 500 \text{ k}\Omega$ 。

图 4 所示校正环节的传递函数为

$$G(s) = -K(\tau_1 s + 1)/(\tau_2 s + 1), \quad (6)$$

式中 $K = 1/(R_g//R_1)(C_1 + C_2)$; $\tau_1 = R_1 C_1$; $\tau_2 = (C_1//C_2)R_1$ 。

根据式(6)给出的关系,取 $R_g = R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, 对 C_1 、 C_2 、 R_2 进行试验选择,结果如表 3 所示。

表 3 调节超前滞后校正环节参数试焊工艺效果

C_1/nF	C_2/nF	$R_1/\text{k}\Omega$	工艺效果	C_1/nF	C_2/nF	$R_1/\text{k}\Omega$	工艺效果
1	1	50	较好	10	10	50	较差
1	1	100	好	10	10	100	较好
1	1	200	较好	10	10	200	较差

5 结论

从优化逆变电路、改善性能、工艺的目的出发,在已有的 500 A 半桥弧焊逆变器基础上,设计、分析、

试验了 1 台 400 A 半桥式弧焊逆变器。采用不同磁心和参数设计了两套主变并分别试用,效果良好。对输入、主电路形式、输出分别进行设计和分析。对输入滤波参数作了大的调整,对 3 种主电路都给出参数和试验结果。为进行系统分析控制电路,对传统的 PI 控制和相关的输出滤波给出了 16 组参数下的工艺评定。对数字逻辑电路作了可编程中央处理器的改进和调试。

通过与全桥式弧焊逆变器的比较,认为两种拓扑形式各有特点。在降低铜耗上全桥式略好于半桥式,在简化电路和抗偏磁等方面半桥式优于全桥式。通过实验和分析,得出主电路形式和反馈控制电路参数有密切关系。主电路形式不同,即便对全桥和半桥这样的相似情况,反馈控制电路参数如 PI 调节器参数也有明显区别。

参考文献:

- [1] 李爱文.现代逆变技术及其应用[M].北京:科学出版社,2000.
- [2] 张占松.开关电源的原理与设计[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [3] 刘 竹.逆变式弧焊机[M].四川:四川科学技术出版社,2004.
- [4] 陈树君,卢振洋,殷树言,等.弧焊逆变电源的输入性能分析与滤波电路参数优化[J].电焊机,2004,24(6):36-40.

Page 11 工艺手段,是钢管制造过程的关键工序,为确保焊缝质量采取以下措施。

3.1 焊前准备

焊件坡口形式与尺寸符合图纸及工艺规定,施焊前将坡口两侧各 50 mm 范围内的污物清除干净。焊条在保温筒中按规定要求烘干(400 °C×1 h),以降低扩散含氢量,防止裂纹及气孔。焊丝要求严格清洗和烘干,焊剂按规定要求烘干,烘干温度为 200~300 °C,保温 1 h。

3.2 焊接

焊接时宜采用小规范、多焊道焊接,严格控制线能量和层间温度,以使焊接接头的力学性能处于最佳状态。为防止夹渣及其他缺陷的存在,每道焊缝焊后应认真清理焊渣。

3.3 焊接过程中的抽查

对焊接线能量、焊接顺序、焊层清根、预热、后热及环境要求等进行抽查,有违反工艺要求的应及

时进行纠正。

3.4 焊缝焊后检查

焊缝焊后按技术要求进行外观检查;对全部焊缝按 JB1152-81 标准进行 100% 超声波探伤,要求纵缝 B I 级合格,环缝 B II 级合格;按 GB3323-87 对纵焊缝进行 50% 的 X 射线探伤 II 级合格,对环焊缝进行 20% 的 X 射线探伤 III 级合格;钢管校圆后再按 JB3965-85 对纵焊缝进行 100% 的磁粉探伤 II 级合格;对壁厚 $\delta \geq 54 \text{ mm}$ 的钢管校圆后再按 JB1152-81 对纵焊缝进行 100% 超声波探伤 B II 级合格。

4 结论

羊湖电站压力管道按上述工艺参数进行焊接,投入运行以来的情况证明生产中采用的焊接工艺是正确的,其焊接质量达到了 DL5017-93《压力钢管制造安装及验收规范》及 SLJ201-80《水工建筑及金属结构制造安装验收规范》规定的要求。