

弧焊逆变器主变压器特殊问题 分析与设计

周 晓,许建平,王凤岩

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:分析了弧焊逆变器主变压器的理想化模型和设计中的几个特殊问题。对设计时必须考虑的磁心选用、绕组选材以及绕制进行了描述。一般电路设计对磁性材料和绕组电流相互之间的电磁相互作用研究较少,而这对逆变器快速瞬态性能有重要影响。给出了具体全桥弧焊逆变器的设计方案并进行了详细分析。

关键词:弧焊逆变器;变压器;设计

中图分类号: TG434 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2007)02-0040-04

Analysis and design of main transformer of arc welding inverter

ZHOU Xiao, XU Jian-ping, WANG Feng-yan

(Southwest Jiaotong University Electrical Engineer College, Chengdu 610031, China)

Abstract: The ideal arc welding inverter's main transformer and several special problem in design process are analyzed. And described the magnetic core selection and wind line selection and how to make it. To the general circuit design it is no need to research the interaction of the transformer magnetic material and coil current, but it is very important to the study of transient character of inverter. And the detail design of full bridge for arc welding inverter is given and is analyzed.

Key words: arc welding inverter; transformer; design

0 前言

弧焊逆变器中变压器的作用包括:输出电气隔离;变换电参数,如变比不同,可达到改变输入输出电流和电压的功能;大功率整流二次侧移相不同,有利于纹波系数减小、传递能量、测量电压和电流。弧焊逆变器中主变压器是整个机器的核心。其中一、二次侧变比是一个涉及全局的重要参数。一次侧匝数与二次侧匝数的比值越高,则 IGBT 的最大导通电流越小,高频变压器的利用率越高,输出整流二极管的耐压要求越低。同时,弧焊逆变器短路状态时的电流冲击也越小。因此,变压器的一、二次侧变比应该设计成尽可能的大一些。弧焊逆变器对输出电压有两个要求:一是合适的空载电压。为了保证引弧成功率,需要足够高的空载电压。通常,空载电压为 60~90 V。应该指出,引弧成功率实际上主要取决于短路电流上升速度,该值越大,则引弧成功率越高。

而短路电流上升速度不仅与空载电压相关,还与输出电感值密切相关。弧焊逆变器的逆变频率提高,则输出电感可减小。因此,弧焊电源引弧性能好时空载电压可以适当降低,以便提高变压器的变比。弧焊逆变器对输出电压的第二个要求是满载电压符合要求的最大焊接规范。例如软开关弧焊逆变器在满载时二次侧导通比丢失最多,同时,电源寄生电阻导致的压降也最严重。对 10 kVA 以上的软开关弧焊逆变器的输出电压应优先考虑满载电压的要求,同时兼顾合适的空载电压。

1 理想变压器

变压器是电工、电子技术中常用的电气设备,是由两个耦合线圈绕在一个共同的心子上制成,其中一个线圈作为输入,接入电源后形成一次侧回路,另一个线圈作为输出,接入负载后形成二次侧回路。理想变压器忽略了铁心的变化过程,近似认为变比为

$$u_1 = \frac{N_1}{N_2} u_2 = n u_2, \quad (1)$$

收稿日期:2006-04-30

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工作。

$$i_1 = -\frac{N_2}{N_1} i_2 = -\frac{1}{n} i_2, \quad (2)$$

输入理想变压器的瞬时功率等于零,它既不耗能也不储能,将能量由一次侧全部传输到二次侧输出,在传输过程中将电压、电流按匝比作数值变换。理想变压器对电压、电流按匝比变换作用还反映在阻抗的变换上。在正弦稳态的情况下,当理想变压器二次侧终端接入阻抗 Z_L 时,则变压器一次侧的输入阻抗 Z_{11} 为

$$Z_{11} = -\frac{nU_1}{-\frac{1}{n}i_2} = n^2 Z_L, \quad (3)$$

理想变压器假设了3个条件进行理想化:变压器本身无损耗;耦合因素 $k=1$; L_1 、 L_2 和 M 均为无穷大,但保持 $\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = n$ 不变, n 为匝数比。工程上为了近似获得理想变压器的特性,通常采用磁导率 μ 很高的磁性材料做变压器的心子,而在保持匝数比不变的情况下,增加绕组的匝数,并尽量紧密耦合,使 k 接近1,同时 L_1 、 L_2 和 M 很大。

表1 各种磁心材料基本特性参数和物理性能

Tab.1 Basic parameter character and physical function

材料	B/T		磁导率 $\mu/H \cdot m^{-1}$	居里点 $T_c/^\circ C$	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot cm)$	矫顽力 $H_c/A \cdot m^{-1}$	密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	磁致伸缩 $\Delta l/mm$	涡流损耗 W/kg	铁损	材料温度 强度影响	适用 功率	价格	
	20 $^\circ C$	100 $^\circ C$												
硅钢	1.80	1.50	1000	600	40~50	30.0	7.56	0.30	<1	高	最好	小	大中	低
铁氧体	0.40	0.26	2000	100~180	$10^8 \sim 10^{12}$	6.0	—	—	>100	低	差	中	中、小	低
非晶	1.56	1.35	8000	450	120~150	4.0	7.20	0.03	20	低	较好	中	中	中
微晶	1.25	1.20	20000	650	80~125	1.2	7.25	0.03	50	低	较好	中	大、中	中
坡莫合金	0.75	0.70	20000	—	56	—	8.75	0.15	<10	中	较好	小	中、小	中

单端变换变压器由于变压器磁心工作于磁滞回线一侧,所以不存在偏磁现象。但在推挽和桥式变换电路中,由于变压器磁心工作于磁滞回线两侧,在开关器件饱和压降和开关时间不相同,将会造成变压器中正负半周期磁通的不对称,从而引起偏磁现象的产生。桥式主电路中,主开关的导通时间和通态压降不可能完全一样,变压器一次侧电压并非纯粹交流电压,其中还包括一部分直流分量。由于变压器一次侧绕组电阻较小,这样在多个循环之后,可能造成磁心饱和。因此抑制直流分量,防止偏磁现象产生成为研究全桥变换电路的一个重要课题。根据电容器隔直流通交流的特性,最简单的办法是在一次侧回路中串接一个电容器防止偏磁现象。第二种方法是采用电流瞬时控制技术,如电流峰值控制法,保证先工作的开关管导通后的电流与后工作的开关

2 逆变主变压器磁心的选择

磁性元件是现代弧焊逆变电源的重要组成部分,它对弧焊逆变电源的体积质量、电气性能、工作效率以及运行可靠性都起到非常重要的作用。虽然,磁性元件的精确设计非常困难,在实际中也没有必要。了解磁性材料的一些基本特性,掌握其设计的方法、步骤和设计原则,对我们开发和研制新型焊接电源和其他电源是非常有必要的。磁性元件是能量存储、电量隔离和转换的重要元件,在电源设备中处处能够遇到。根据所处的位置和功能,磁性元件主要分为四大类:变压器、电抗器、互感器和磁放大器。由于磁性元件的磁性材料是非线性的,其特性与温度、频率、气隙关系密切,参数测量困难,在进行磁性元件设计时涉及到的参数非常多,如:电压、电流、磁导率、温度、能量、电感量、漏感、铜损、铁损等,单就磁导率来说,就有初始磁导率、有效磁导率、真空磁导率等多种,因此,大多数情况下,磁性元件都需要进行自行设计。应用广泛的磁性材料主要有:铁氧体、非晶态合金、微晶合金、坡类合金等。表1列出了几种磁性材料的部分性能。

管导通后电流相等,也可防止偏磁发生。第三种是直接检测直流分量,在出现正(负)直流分量时,减小对应开关管的导通时间,也可减小偏磁现象。

主变压器铁心的磁化曲线和磁滞回线分别如图1、图2所示。在一个主开关工作周期内,磁心的磁状态从 b 到 a ,在关断时从 a 到 f 到 e ;然后由 e 到 d ,在关断时从 d 到 c 到 b 。考虑磁心材料的各向异性磁滞回线 ed 段和 ba 段不会完全对称。根据铁磁材料的磁畴理论,这两段是形成磁畴的过程。因此磁性材料的各向异性也会引起偏磁。而 afe 段和 deb 段是磁畴分解的过程,铁心本身成为激励源,因此使变压器有抗铁心偏磁的特性。

3 弧焊逆变器的特殊问题

弧焊逆变器的特殊性在于在主变压器一次侧

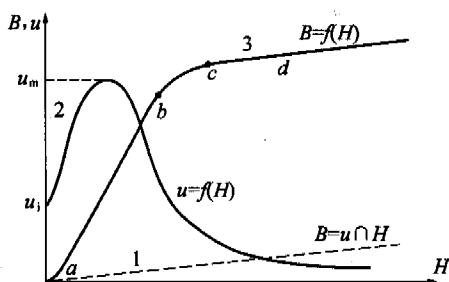


图 1 磁化曲线
Fig.1 Magnetization curve

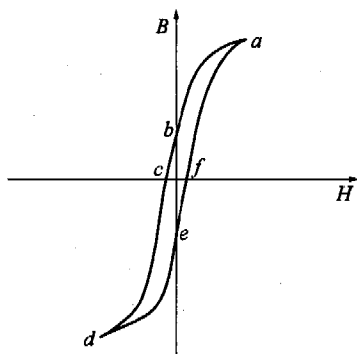


图 2 磁滞回线
Fig.2 magnetic hysteresis curve

利用开关进行控制,使变压器的工作状态受控。比起工频变压器,主变压器的工作频率高了 400 倍左右。根据磁性材料的磁畴理论,磁心的技术磁化过程受到了控制,而磁滞时间减小了。主变压器的设计关键是磁心的选择和一次侧绕组的确定。根据磁路理论,当变压器一次侧线圈加上恒定电压 U 时,磁心磁通线性增大。电压和磁通的关系为

$$U = N \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

在通电时间 t_m 内,磁通 ϕ 的变化量为

$$\Delta\phi = \frac{1}{N} \int_0^{t_m} U dt \quad (5)$$

同时,为防止磁心出现饱和,允许最大的磁通变化量为

双向激磁

$$\Delta\phi_m = [B_m - (-B_m)] \cdot S = 2B_m \cdot S \quad (6)$$

单向激磁

$$\Delta\phi_m = [B_m - B_r] \cdot S = \Delta B \cdot S \quad (7)$$

在 t_m 内令: $\Delta\phi = \Delta\phi_m$ 得

$$N_{min} = \frac{U \cdot t_m}{2B_m \cdot S} \quad (8)$$

或

$$N_{min} = \frac{U \cdot t_m}{\Delta B \cdot S} \quad (9)$$

式中 U 为变压器绕组电压; N 为变压器一次绕组匝数; B_m 为最大工作磁通密度; S_c 为磁心有效截面积; t_m 为变压器上矩形脉冲电压持续时间。

设计时考虑单位的一致性,采用下式

$$N_{min} = \frac{U \cdot t_m}{2B_m \cdot S_c} \cdot 10^2 \quad (10)$$

式中 U 为电压(单位: V); B_m 为磁通密度(单位: G); S_c 为面积(单位: cm^2); t_m 为时间(单位: μs)。

根据以上分析,一次绕组的匝数取决于磁心性质和一次侧的伏秒面积。对于确定的主变压器,每匝绕组的压降近似为一个常数,其大小表现了磁心能传送的功率。伏秒面积的数值表现了一次绕组的技术磁化性能。对于电力变压器,通常高压绕组和低压绕组叠绕,高压绕组绕制在外。对于逆变主变压器,有叠绕和混合立绕等绕制方法,考虑改善散热和具体匝数,通常二次绕组绕制在外以便于散热。

4 具体设计分析

在进行主变具体设计时,由于磁心和绕组导线都有一定的规格,存在着具体选用的问题。磁心的选择包括材料和具体尺寸,而导线则选择单股截面积和股数。根据一般情况给出初始条件。输入电源电压为三相 380 V AC 50 Hz; 一次绕组电压 $U_1=540$ V; 电压 $U_2=67$ V; 逆变频率 $f=20$ kHz; 工作周期 $T=50 \mu s$; 最大脉冲宽度 $t_m=25 \mu s$; 额定焊接电流 $I_2=315$ A; 输出功率 $P=12.6$ kW; 额定负载持续率 60%。

4.1 最大磁通密度的确定 B_m

根据铁损特性曲线,确定最大磁通密度 $B_m=0.4$ T, $\Delta B=2B_m=0.8$ T。

4.2 确定铁心尺寸

将以上数据代入面积乘积公式可得

$$S_w S_c = \frac{P \times 10^2}{0.53 \times f \times \Delta B \times J} = \frac{12\ 600 \times 100}{0.53 \times 20\ 000 \times 0.8 \times 3.5} = 40.92 \text{ cm}^4 \quad (11)$$

式中 S_w 为变压器窗口面积; S_c 为磁心截面积; P 为变压器视在功率; f 为开关工作频率; ΔB 为工作磁通密度; J 为电流密度。

查产品目录数据,可选 ONL-120×70×30 的铁芯。此时铁心的有效截面积 $S_c=5.25 \text{ cm}^2$ 。铁心护盒窗口直径 $d=67 \text{ mm}=6.7 \text{ cm}$ 。

窗口面积为 35.25 cm^2 , 考虑到通风和绕线留出相应空间,取窗口利用系数 1/3, 则 $S_w=35.25 \text{ cm}^2/3=11.75 \text{ cm}^2$ 。

实际的 $S_{\text{w}}S_{\text{c}}$ 值大于计算出的值,因此这个铁心是适用的。

4.3 一、二次侧绕组匝数确定

变压器结构如图 3 所示。将有关数据代入设计公式,可得

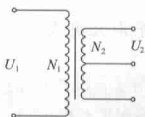


图 3 主变压器

Fig.3 Main transformer

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot I_m}{2B_m \cdot S_c} \times 10^3 = \frac{540 \cdot 25}{2 \cdot 4000 \cdot 5.25} \times 10^3 = 32.14, \quad (12)$$

取整数 16 匝。此时,变压器的工作磁感应强度 $B_m = 0.4 \text{ T}$ 。

变压器变比

$$K = \frac{540}{67} \approx 8, \quad (13)$$

则二次侧匝数 N_2 为

$$N_2 = \frac{N_1}{K} = \frac{32}{8} = 4 \text{ 匝}, \quad (14)$$

实际二次电压为

$$U_2 = \frac{N_1}{K} = \frac{540}{8} = 67.5 \text{ V}, \quad (15)$$

4.4 导线线径计算

二次回路额定电流为 315 A,负载持续率为 60%。由此可求出持续率为 100% 时的连续电流

$$I_2 = \sqrt{\frac{60\%}{100\%}} \cdot 315 = 244 \text{ A}, \quad (16)$$

折算到变压器一次的电流为

$$I_1 = \frac{I_2}{K} = \frac{244}{8} = 30.5 \text{ A}, \quad (17)$$

电流密度取 3.5 A/mm^2 ,则一次侧绕组导线截面积为

$$S_1 = \frac{I_1}{J} = \frac{30.5}{3.5} = 8.77 \text{ mm}^2, \quad (17)$$

工作频率 20 kHz,温度 100 °C 时,高频电流最大穿透深度 $\Delta = 0.53 \text{ mm}$,导线最大直径应小于 2Δ 。因此可选择 $\phi 1.0$ 以下漆包线。取 $\Phi 0.51$ 漆包线多股并行绕制,单股截面积为:

$$\frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 0.51^2 = 0.204 \text{ mm}^2, \quad (19)$$

$$\text{导线股数为 } \frac{8.77}{0.204} = 42.89, \text{ 取 } 43 \text{ 股}。$$

二次侧绕组上下各流过一半,即 $\frac{244}{2} = 122 \text{ A}$ 。

二次侧绕组导线截面积为

$$S_2 = \frac{I_2}{J} = \frac{122}{3.5} = 35 \text{ mm}^2, \quad (20)$$

导线股数为 170 股。一、二次侧绕组采用叠绕,一次侧绕组在内二次侧绕组在外,分成两个线包,据此确定线长。空载电压和负载电压的转变可以通过反馈电路实现。而在磁饱和和焊接电源中,由于电路不可控,原副边绕组必须分开绕成两个分离的线包以满足实际工作条件。

5 结论

分析了逆变主变压器设计的方法;铁心材料和绕组的选择、设计,磁性材料的均匀性和各向异性和一、二次侧电路的直流分量对偏磁和抗偏磁有重要影响;变压器绕组的绕制方法及其在铁心上的分布对原副边绕组的耦合有直接影响;工程设计中,原副边变比用匝数比代替,而实际上变比要小于匝数比。

参考文献:

- [1] 邱关源.电路[M].北京:高等教育出版社,1999.
- [2] 徐德淦.电机学[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [3] 宛德福.磁性物理[M].北京:电子工业出版社,1987.
- [4] 冯慈璋.电磁场[M].北京:高等教育出版社,1996.

国家标准下达三项电焊机标准制修订计划

国家标准化管理委员会 2006 年 11 月下达了 2006 年第二批制修订国家标准项目计划,其中电焊机行业有三项国家标准制修订任务,详细情况见下表。

序号	标准编号	标准名称	标准性质	被修订标准号	采用的国际标准号	完成年限
1	20068536-Q-604	弧焊设备 第 10 部分:电磁兼容性 (MEC)要求	强制	—	IEC60974-10:2004	2008
2	20068537-Q-604	电阻焊机的安全要求	强制	GB15578-1995	—	2007
3	20068538-Q-604	弧焊设备 第 6 部分:限制负载手工金属弧焊电源	强制	—	IEC60974-10:2003	2007