实验室25 kg中频电源装置改进分析*

王海明,张立通,孙梦晨

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章针对某实验室25 kg中频感应炉普通并联谐振电源运行中出现故障及不足之处,对中频感应熔炼炉电源装置进行改进。结果表明:改进后并联逆变器负载电流从矩形波变为近似正弦波,触发信号的调节范围变宽,可达到恒功率输出,能有效克服普通并联逆变器容量小、不能满功率输出等缺点。

关键词: 并联逆变器;可控硅;平波电抗器;矩形波电流

中图分类号: TM464 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2020)03-0071-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.03.019

Analysis on Improvement of 25 kg Intermediate Frequency Power Supply Device in Laboratory

Wang Hai-ming, Zhang Li-tong, Sun Meng-chen

(*Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this article, it is introduced the power supply device of medium frequency induction melting furnace is improved aiming at the faults and deficiencies in the operation of common parallel resonant power supply of 25 kg intermediate frequency induction furnace in a laboratory. The results showed that the load current of parallel inverters changed from rectangular wave to approximate sine wave and the adjustment range of trigger signal became wider after improvement so that constant power output could be achieved. As a result, such shortcomings of common parallel inverters as small capacity and output without full power are overcome.

Key words: parallel inverters; thyristor; smoothing waves reactor; rectangular wave current

随着电力电子器件的大力发展,可控硅整流及逆变被广泛运用到早期的中频感应熔炼炉电源装置中,而中频感应熔炼炉负载电路多采用并联谐振原理。某实验室25 kg中频感应熔炼炉负载电路就使用了普通型的并联谐振方式。此方式的交流输出电流波形接近矩形波,使控制信号的提取较为困难,并且可控硅的动态参数要求较高。经多年使用,中频感应熔炼炉出现起动困难、过载保护、不能保持恒功率等问题,极大地影响了实验钢的冶炼。通过对原有设备参数及工作原理分析研究,对中频电源装置进行改进,在不改变冶炼所需工艺参数要求的前提下,在负载前段增加平波电抗器及线性电感元件,用以改善负载侧的电流波形。改进后的中频电源装置极好地克服了普通型并联谐振的问题。

1 实验室并联逆变器构成及工作原理

1.1 主电路构成

对实验室中频感应炉结构及工作原理分析,确

* 收稿日期:2020-03-09

作者简介:王海明(1983-),男,内蒙古巴彦淖尔市人,工程师,现从事实验室工业自动化维护工作。

中国知网 https://www.cnki.net

定实验室负载电路的工作状态参数。从而为改进中频电源提供依据。现主要介绍逆变及负载电路构成，见图1。

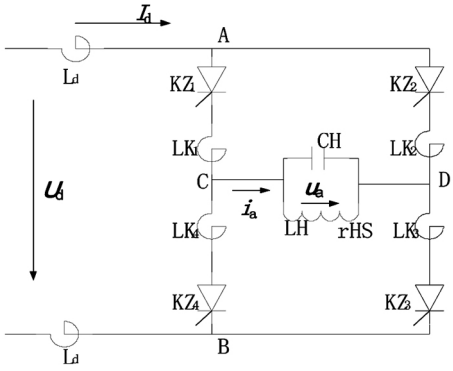


图1 并联逆变器的主电路

电路LH、rHS为感应圈的串联等效电路，CH是并联补偿电容器，两者组成逆变器的负载。逆变器由4个桥臂组成，KZ_1、KZ_2的阳极连接于共同A点，称共阳极组。KZ_3、KZ_4的阴极连接于共同B点。称为共阴极组。直流电源经滤波电感L_d加在AB间，负载连接于CD间。每个桥臂中所串的LK用以限制可控硅导通时的电流变化率[1]。

1.2 实验室并联逆变器工作原理

实验室并联逆变器利用周期性的导通桥式电路对角线一组可控硅（KZ_1、KZ_3和KZ_2、KZ_4），把整流得到的直流电流变成交变的中频矩形波电流。再由CH与LH、rHS组成的并联型负载电路对矩形波电流进行谐振。由于逆变电路品质因数较高，逆变电压近似正弦波。利用示波器对电路各参数进行采集，可以绘制电路各参数波形如图2所示。

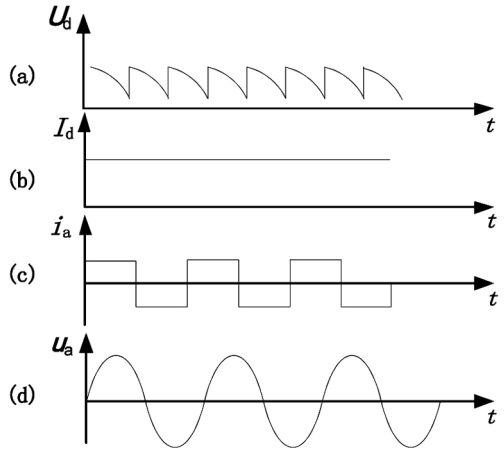


图2 普通并联逆变器参数图

1.3 实验室原并联逆变器不足之处

在冶炼过程中，由于逆变触发引前角调节不能太大。输出阻抗不能进行合理调节，不能达到恒功率输出[2]，造成熔炼时间增加，平均熔炼一炉时间40～50 min，功率消耗较大。同时中频电源装置在中频电压升到一定值时，出现频繁的过载保护跳闸，导致熔炼钢液温度不稳定，造成冶炼实验钢成品率降低。

分析采集电路参数波形，从波形图2(c)可以看出负载电流i_a为矩形波。导致可控硅在刚开通后和开始关断前的正向电流较大。这对可控硅的动态参数要求较高。同时在高频谐振时，负载电流的容量不能够制作的太大。在实际应用中发现，在使用快速可控硅时，通过矩形波电流时，电流损耗明显高于正弦波电流时的损耗，可控硅发热明显高于通过正弦波的情况。

2 实验室25 kg中频冶炼炉要求

根据冶炼实验钢的要求，熔炼炉要保证熔炼时间尽量缩短，中频感应炉在负载变化时能够恒功率输出。在熔炼过程中，感应炉要运行稳定，不能因熔炼过程负载参数变化频繁发生保护跳闸而影响熔炼。必须选用可靠的控制电路板实现稳定的控制及保护。

3 中频感应熔炼炉的改进

3.1 熔炼炉改进思路

针对熔炼炉可靠运行、稳定性要求，以及考虑改造成本问题。只是对负载端进行改造，在负载端增加电容及电感元器件，并配合负载端改造选用适当的控制电路板。用以达到缩短熔炼时间及稳定性的要求，并满足日常冶炼钢种多样性要求。

首先根据中频熔炼炉熔炼时间及热效率要求进行功率及频率选择。在确定功率、频率前提下，负载参数进行计算分析。根据冶炼参数要求进行功率控制柜选型。

3.2 中频电源输出功率及频率选择

根据现有坩埚尺寸及容量，将钢铁加热熔炼所需的热量及所需热量换算成电功率可按如下公式[4]计算。

$$Q = cTG \tag{1}$$

$$P_H = \frac{Q}{t} = \frac{cTG}{t} \tag{2}$$

中国知网 https://www.cnki.net

式(1)中的比热容按照中碳钢选取 c = 0.703 kJ/(kg·℃)，钢料升温T取1 550 ℃，熔炼钢铁质量 G 取25 kg，熔炼时间 t 取20 min。计算所需电功率为22.604 kW。考虑实际炉料情况多变，供电系统损耗(包括整流系统、变频系统、输电线路、电容器等)、感应圈的电损耗，热损耗、炉料热损耗等因素设计可控硅变频装置功率为100 kW能够满足日常实验。

炉料加热是利用金属中感生的涡流使炉料发热，通过热传递加热整只炉料致使炉料熔化。而感应电流在炉料存在加热深度，而加热深度与频率存在如下关系式[4]。

$$\Delta = 5\,030 \times \frac{\rho}{\mu_r f} \tag{3}$$

式中：Δ—— 电流透入深度，cm；

ρ—— 加热钢料电阻率，Ω·cm；

μ_r—— 相对磁导率；

f—— 频率，Hz。

据分析研究发现，当加热深度大于0.4倍炉料半径 r_2 时已经不能够通过增加频率来获得更高的加热效率(即 $\Delta \geqslant 0.4r_2$ 为频率的上限值)。感应器的电效率是随着频率的增加而提高的。但随着频率提高对电效率的改善有限，反而使感应炉的径向温差难以保证(即 $\Delta \leqslant 0.57r_2$ 为频率的下限值)。根据实际熔炼炉料不规则直径尺寸大小，液态炉料搅拌力需求等，选择中频电源工作频率为2 500 Hz能够满足实验室日常冶炼实验。

3.3　对实验室坩埚负载分析

实际负载电路由感应圈和熔炼炉料构成，感应圈和熔炼炉料的关系如同一个变压器，感应圈为原边，熔炼炉料既是变压器铁芯，又是变压器副边，副边是单匝而且是短路的。为计算方便，本文直接给出电阻、电感、电抗、阻抗等，公式不做推导说明。通过实际测量感应圈负载参数有：

感应圈内径 D_1 = 22 cm；

感应圈长度：L_1 = 30 cm；

感应圈匝数：n_1 = 7；

切割装料高度：20 cm ≤ h_2 ≤ 30 cm；

炉料平均直径 D_2 = 10 cm。

以日常化钢铁为例，已知数据有：

液态炉料电阻率：130×10^{-6} Ω·cm；

液态炉料密度：ρ_2 = 7.0 g/cm^3；

液态炉料相对磁导率：μ_r = 1。

3.3.1　感应圈和炉料电阻估算

铜制的感应圈相当于电感元件，其本身存在着电阻。钢铁炉料同样存在电阻。这里给出单匝感应线圈电阻 R_1 及炉料电阻 R_2 公式如下[4]：

$$R_1 = \rho_1 \frac{\pi D'_1}{kL_1\Delta_1} \tag{4}$$

$$R_2 = \rho_2 \frac{\pi D'_2}{h_2\Delta_2} \tag{5}$$

式中：R_1、R_2—— 铜管和液态炉料的电阻率，Ω·cm；

D'_1、D'_2—— 感应圈和炉料的计算直径，cm，($D'_1 = D_1 + \Delta_1$；$D'_2 = D_2 - \Delta_2$)；

L_1、L_2—— 电流在感应圈和炉料的透入深度，cm；

k—— 填充系数，炼钢炉取0.8；

h_1—— 感应圈的高度，cm；

h_2—— 装炉料的高度，cm。

一般取铜管电阻率 $\rho_1 = 2 \times 10^{-6}$ Ω·cm；填充系数 K = 0.8。装料高度 h_2 = 28 cm。把测量数据和已知数据代入上述两公式得到单匝线圈电阻 R_1 = 40.8×10^{-6} Ω 和炉料电阻 R_2 = 113.6×10^{-6} Ω。

3.3.2　感应圈和炉料感抗估算

感应圈是一只有限长的螺管线圈，其存在电感。炉料在电磁感应场内同样存在电感，而两者之间必存在互感。这里按照单匝感应圈计算电感 K_1，炉料电感和两者之间的互感 K_2。进而利用电感进行电抗的计算。计算公式如下[4]：

$$L_1 = \frac{\pi^2 D'^2_1}{l_1} K_1 \times 10^{-3} \tag{6}$$

$$L_2 = \frac{\pi^2 D'^2_2}{l_2} K_2 \times 10^{-3} \tag{7}$$

$$M_{12} = \frac{\pi^2 D'^2_1}{2h} \sqrt{F} \tag{8}$$

$$X_1 = 2\pi f L_1 \tag{9}$$

$$X_2 = 2\pi f L_2 \tag{10}$$

$$\omega M = 2\pi f M_{12} \tag{11}$$

式中：K_1—— 感应线圈的校正系数，取 K_1 = 0.75；

K_2—— 炉料校正系统，取 K_2 = 0.88；

l_1、l_2—— 为感应圈和炉料的长度，cm；

F—— 互感系数，熔炼炉取1.75；

f—— 熔炼炉设计频率，本设计 f = 2 500 Hz。

把实际测量感应圈参数和炉料参数代入公式(6)，(7)可得：L_1 = 120.846×10^{-3}(μH) 和 L_2 = 24.286×10^{-3}(μH)。

中国知网　https://www.cnki.net

把实际测量感应圈参数和炉料参数代入公式(8)可得: $M_{12} = 18.256 \times 10^{-3}$(μH)。

把计算所得电感及互感代入公式(9)(10)(11)分别得到 $X_1 = 1\ 897.28 \times 10^{-6}\ \Omega$; $X_2 = 381.29 \times 10^{-6}\ \Omega$; $\omega_M = 286.62 \times 10^{-6}\ \Omega$。

3.3.3 感应圈和炉料阻抗估算

计算感应圈和炉料的阻抗,首先计算感应圈与炉料系统的变换系数。可以参考文献[4]所给公式变换系数:

$$\rho_0^2 = \frac{W^2M^2}{R_2^2 + X_2^2} \tag{12}$$

把上述计算所得的数据代入公式(12)可得: $\rho_0^2 = 0.524$。

可根据折合阻抗公式[4](13)(14)(15)计算相应的电阻,电抗,阻抗值如下:

$$R_0 = R_1 + \rho_0^2 R_2 \tag{13}$$

$$X_0 = X_1 - \rho_0^2 X_2 \tag{14}$$

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} \tag{15}$$

代入数据估算单匝线圈阻抗值 $Z_0 = 1\ 733.4 \times 10^{-6}\ \Omega$。折算到原边阻抗 $Z = Z_0 \cdot n^2 = 84.94 \times 10^{-3}\ \Omega$。其中: n^2 为感应圈的匝数平方值,n 值7匝。

3.4 可控硅中频电源装置选型

为了节约成本,实验室只对中频电源并联逆变端进行改造。增加电容器和平波电抗器不会对负载产生不良影响。并为满足上述计算参数对中频感应功率柜进行了选型。联合厂设备部,决定选用锦州东方电炉有限公司生产的KGPS-100/2.5晶闸管变频装置。该装置可提供:

输出功率: 100 kW;

额定直流电压: 500 V;

额定输出中频电压: 750 V;

输出电流: 200 A;

输出频率: 2.5 kHz。

该装置配有可靠的控制电路板,对冶炼不同钢种,不同炉料具有很好的适应能力。

主要控制技术参数设计如下:

可变频率范围: 400~8 000 Hz;

起动方式: 零电压软启动;

调整方式: 电流、电压双闭环调节;

整流触发脉冲移相范围: 0~150°;

整流触发脉冲形式及脉宽: 双窄脉冲列 18°;

整流触发脉冲最大触发电流: >800 mA;

逆变触发脉冲电源: >8 V;

逆变触发脉冲电流: >750 mA。

4 逆变电路构成及工作原理分析

4.1 改进型逆变电路组成

在设计的过程中,充分的考虑了原普通并联逆变型不足。在整流输出端与逆变端之间增加平波电抗器和线性电感元件,给负载起动提供能量,同时起到降低负载侧电流的变化率作用,使电流波形更加接近正弦波。改进型并联逆变器主电路的构成如图3。

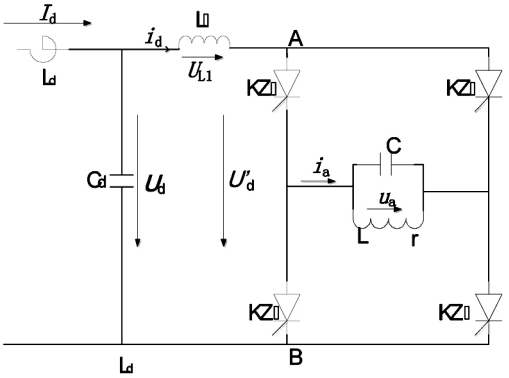


图3 改进型并联逆变器原理图

图3中: C_d 为增加平波电容,L_1 为增加线性电感,KZ_1—KZ_4 组成桥式逆变电路。C、L 和 r 组成了并联振荡负载电路。

4.2 改进后逆变电路工作原理

改进型并联逆变器工作原理与普通型相同,都是控制对角线一组可控硅周期性导通,从而使负载两端的电流方向发生周期性的变化。在负载和补偿电容构成的负载间发生谐振。但是由于增加了平波电抗器和线性电感等能量元件,使逆变端能量得到了补偿,电流变化率降低,电流得到了改善。又因振荡电路的品质因素 Q 值较高,与简单并联逆变器一样,其两端电压 U_a 近似正弦波。同样利用示波器对电路各参数进行采集,可得改进后电路各参数波形如图4。

中国知网 https://www.cnki.net

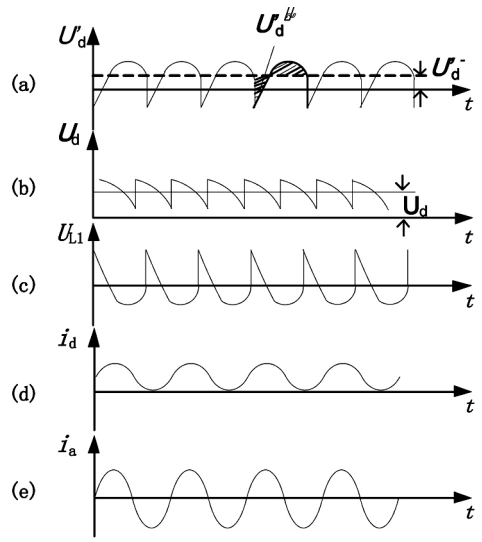


图 4　电路改进后参数波形

根据图 3 改进型并联逆变器原理图假设: 平波电容 C_d 两端电压为整流平均电压 U_d。负载两端电压 U'_d 中含有直流分量 U'^{-}_d 和交流分量 $U'^{\sim}_d$。L_1 为一线性电感。由于电感 L_1 两端只能有交变电压(实际中 L_1 一般只有几十微享的线性电感) ,电容 C_d 两端几乎只有直流电压(电容一般制作比较大) 。故负载端电压 U'_d 中的直流分量必定与电容 C_d 两端电压 U_d 相等,交流分量必定与电感 L_1 两端电压相等。根据电路分析可得如下关系式[3]:

$$\begin{aligned} UL_1 &= U_d - U'^{-}_d \\ &= U_d - (U'^{-}_d + U'^{\sim}_d) \\ &= -U'^{-}_d \end{aligned} \tag{16}$$

$$L_1 = \frac{di_d}{dt} = U_{L_1} \tag{17}$$

$$i_d = \int \frac{U_{L_1}}{L_t} d_t + I_0 \tag{18}$$

分析关系表达式可知: U_{L_1} 波形与 $U'^{\sim}_d$ 波形方向相反,只是幅值相差一定量值。i_d 波形为类似正弦波形,又因是在整流器后面,所以波形全部在正半轴上。可得 i_d 波形如图 4(d) 所示。负载两端电流 i_a 波形由 i_d 交替导通后形成,只是把 i_d 波形的偶次半波倒相后所得,故 i_a 波形类似正弦波如图 4(e) 所示。可见负载两端电流 i_a 由原来的方波变为类似正弦波。

5　普通型与改进型并联逆变比较

从设备实际运行中观察发现,改进型并联逆变器功率和熔炼时间都有改善,改进型并联逆变器输出功率达到了 100 kW,实际熔炼时间为 25 ~ 28 min,功率消耗明显较低。

在通过原理分析比较图 2 与图 4 各波形可以发现,负载侧电流从矩形波变为近似正弦波。这就从根本上解决了起动信号提取困难问题,起动更加容易。改进型并联逆变器负载电流波形由矩形波变为近似正弦波,可控硅触发信号的提取更加容易,逆变触发引前角较矩形波大。功率调节范围较大,有利于初始捣制的坩埚烘炉和烧结。

6　结论

(1) 改进型并联逆变器在冶炼时间上大大缩短,从而使能源消耗大大降低。

(2) 在冶炼过程中,与普通型并联逆变器比较,因负载参数变化引起保护跳闸的故障率大大降低。

(3) 由于负载电流变为近似正弦波,不需要使用动态参数太高的可控硅,从而降低了可控硅成本。

参　考　文　献

[1]　王兆安,黄俊. 电力电子技术(第 4 版) [M]. 北京: 机械工业出版社,2000.

[2]　赵新宇. 中频感应炉电源逆变电路改进及应用研究 [J]. 工业加热,2003,(2) : 43 - 44.

[3]　张树桐,王振邦. 改进型单相并联逆变器 [J]. 河北工学学报,1975, (1) : 14 - 29.

[4]　章舟,童军. 铸造感应电炉使用指导 [M]. 北京: 化学工业出版社,2013.

中国知网　https://www.cnki.net