# 中频感应电炉电源分析[*1]

王海明

(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:** 文章介绍了某实验室25 kg、100 kg中频感应电炉电源装置构成及各器件的具体作用,并分析并联谐振中频电源和串联谐振中频电源在整流和逆变过程中的变化规律,同时给出主要参数计算公式。并结合实际使用情况比较分析,结果表明:串联谐振中频电源起动容易,更适用于频繁起动工作的场合;而并联谐振中频电源起动较为困难,不易使用在频繁起动场合,但并联谐振中频电源对负载适应能力强,在熔炼钢种随时变化场合应用较多。

**关键词:** 并联谐振、串联谐振、晶闸管、IGBT

**中图分类号:** TM461 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2019)03-0077-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.03.023

# Analysis on Power Supply of Medium Frequency Induction Furnace

*Wang Hai-ming*

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

**Abstract:** In this paper, it is introduced the composition of supply unit for 25 kg and 100 kg medium frequency induction furnace in a laboratory and the specific functions of each device, analyzed the changing rules of medium-frequency power supplies with parallel resonance and series resonance in rectification and contravariance, given the calculation formulas of main parameters as well as compared and analyzed combining with the actual use. The results showed that the medium-frequency power supply with series resonance was easy to be started, which was more suitable in workplace with frequent start; while the medium-frequency power supply with parallel resonance was more difficult to be started, which was not suitable to be used in workplace with frequent start, but it was with strong adaptive capacity to the load so that it was more used in workplace where the smelting steel grade changed at any time.

**Key words:** parallel resonance; series resonance; thyristor; IGBT

随着电力电子器件的不断发展,中频感应加热及中频感应熔炼技术得到了迅速的发展。新的集成化感应加热电源技术已趋于成熟,而自动调节、电子保护、监控环节等技术提高,使整机的可靠性、稳定性及效率都有了改善,中频感应加热电源广泛应用于熔炼工业领域。中频感应熔炼炉主电路的形式主要分为两种,一种为并联谐振中频电源,一种为串联谐振中频电源。某实验室25 kg感应电炉电源构成为并联谐振中频电源,逆变回路采用电力电子器件为快速晶闸管。100 kg感应电炉电源构成为串联谐振中频电源,逆变回路采用的电力电子器件为IGBT。现以某实验室25 kg、100 kg中频感应电炉为

* **收稿日期:** 2019-02-21

**作者简介:** 王海明(1983-),男,内蒙古巴彦淖尔市人,工程师,现从事实验轧机电气维护轧钢工作。

中国知网 https://www.cnki.net

研究对象，分别介绍两种中频电源的构成及利用不同电力电子器件构成的逆变回路比较。

## 1 并联谐振中频电源

并联谐振中频电源是国内最早应用的中频电源，因其适应性强，这种电路在生产及实验设备中被广泛应用。

某实验室25kg中频感应电炉的主电路原理图见图1。

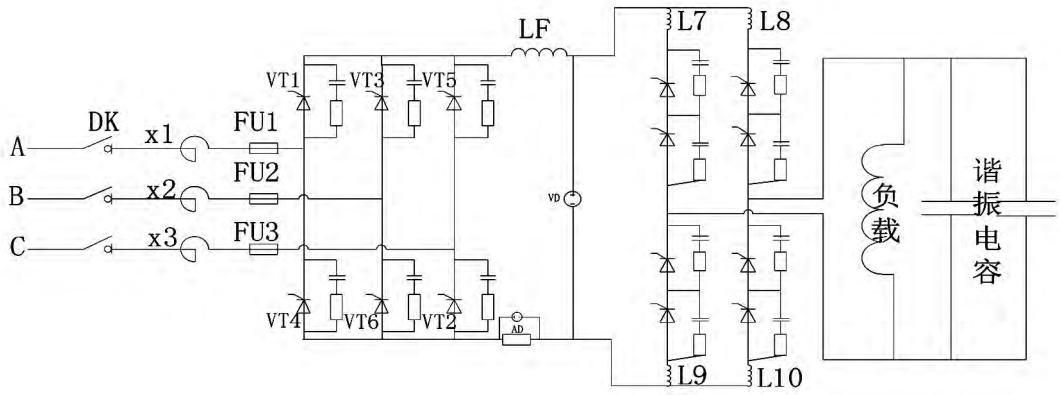



图1 并联谐振中频电源主电路图

主电路由隔离开关(DK)、进线电抗器(X1－X3)、快速熔断器(FU1－FU3)、整流器(VT1－VT6)、平波电抗器(LF)、逆变器、并联谐振负载(L、C)组成。整流器将三相工频交流电整流成直流电，平波电抗器是为了滤除整流电流波纹，并在感应器和补偿电容组成的并联谐振负载阻抗改变时，能够较好的适应加热过程中负载性质的变化。

### 1.1 三相桥式全控整流电路分析

并联谐振中频电源的整流电路都采用三相桥式全控整流电路。由于平波电抗器(LF)的电感量较大，负载属于电感性负载，因此整流输出的负载电流连续且为一条直线。当$\alpha \leqslant 60°$，整流电路的输出波形与阻性负载时相同，导通规律与阻性负载时也相同。当$\alpha > 60°$时，由于电感(LF)的作用，在电源电压过零点后晶闸管仍然导通，直到下一个晶闸管触发导通为止，这样整流输出电压的波形中出现了负面积部分，但整流器输出电流仍为一水平线[1]。当控制角增大到90°时，输出电压波形中正、负面积相等，则输出电压的平均值$U_d = 0$。当$\alpha > 90°$时，整流电路工作在有源逆变工作状态。因整流电路装置后接大电抗器用于平波，同时充当负载角色，导致整流器电源装置的触发角增大，因此其的整流电路移相范围增加到150°。

### 1.2 逆变电路构成分析

负载电路中的电容器C与感应器线圈L并联，换流是基于并联谐振的原理。由晶闸管全控整流电路提供的直流电压$U_d$连续可调，并联逆变电路将直流电逆变成中频交流电供给负载。直流侧串有滤波大电感(LF)，因此属于电流型逆变器。因工作频率比较高，故逆变电路4个桥臂的晶闸管采用快速晶闸管。L7－L10为逆变晶闸管的换相电感，用于限制晶闸管换相时的电流上升率($d_i/d_t$)[2]。电容器(C)的作用主要是提供无功功率，使负载电流$I_1$总是超前$u_1$一定角度，达到自动关断换流晶闸管的目的。$I_L$为感应线圈中负载电流，一般会达到$I_0$的几到几十倍。

### 1.3 主电路参数定量计算(见图2)

主电路参数定量计算公式如下:

$$U_d = 2.34U_2\cos\alpha$$

$$I_d = P_d/U_d;$$

$$I_2 = I_d\sqrt{\frac{2}{3}}xI_d, I_{VTR} = I_d/\sqrt{3};$$

$$I_1 = 0.9I_d, I_{VRI} = I_1/\sqrt{2};$$

$$U_1 = \frac{11}{\cos\varphi}$$

$$I_L = QI_1$$

$$S = 3U_2I_2$$

$$\lambda = \frac{P_d}{S} = 0.95\cos\alpha$$

式中: $U_d$—— 整流直流电压平均值;

中国知网 https://www.cnki.net

$I_d$—— 整流直流电流平均值;
$U_2$—— 进线相电压有效值;
$I_2$—— 进线相电流有效值;
$U_1$—— 中频输出电压有效值;
$I_1$—— 中频输出电流有效值;
$P_d$—— 电源的输出有功功率;
$I_{VTR}$—— 整流管电流的有效值;
$I_{VRI}$—— 逆变管电流的有效值;
$\varphi$—— 逆变电路的功率因数角;
$S$—— 变压器容量;
$\lambda$—— 进线功率因素;
$Q$—— 谐振电路的品质因素(与感应器的设计有关),一般熔炼负载 $Q = 15 - 20$。

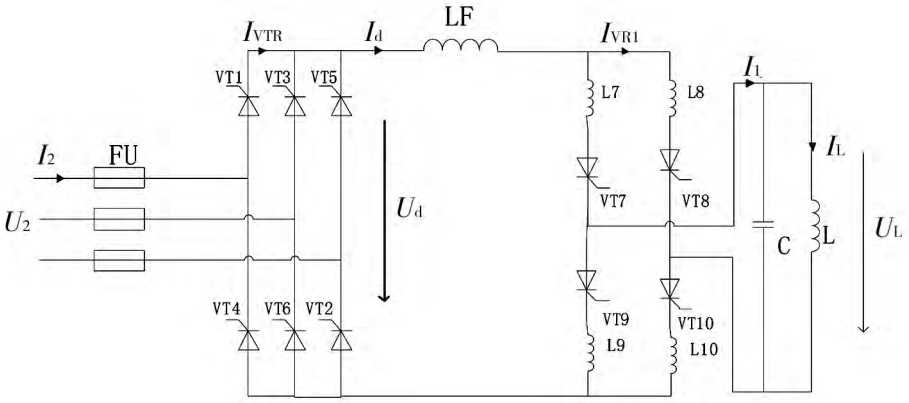



图 2　并联谐振逆变电路的电压电流

由公式可知,整流直流电压 $U_d$ 与触发角 $\alpha$ 大小及电源电压有关。在电源电压一定时,增大整流触发角,直流电压值会减小; 直流电流 $I_d$ 与整流器输出的有功功率相关,与整流器的设计有关; 逆变电压 $U_1$ 与直流电压和逆变功率因素角有关。逆变电流 $I_1$ 直接由直流电压 $I_d$ 控制。

## 2　串联谐振中频电源

某实验室 100 kg 感应电炉电源装置为串联谐振中频电源,它与并联谐振中频电源整流部分相同,逆变电路采用了 IGBT 电力电子器件。现就实验室 100 kg 感应电炉电源逆变电路进行分析介绍。

串联谐振中频电源整流部分与并联谐振整流部分原理相同,整流电压,电流参数计算相同。现就串联谐振逆变电路进行简单介绍,电路原理图如图 3 所示。

逆变电路共有 4 个桥臂,可以看成由两个半桥电路组合而成。把桥臂 $V_1$ 和桥臂 $V_4$ 作为一对,桥臂 $V_2$ 和 $V_3$ 作为一对,成对的两个桥臂同时导通,两对交替各导通 180°。二极管 VD1 – VD4 在对应的 IGBT 没有导通时起续流作用,其输出电压 $u_0$ 的波形为锯齿波,其幅值高出半桥电路一倍[2]。

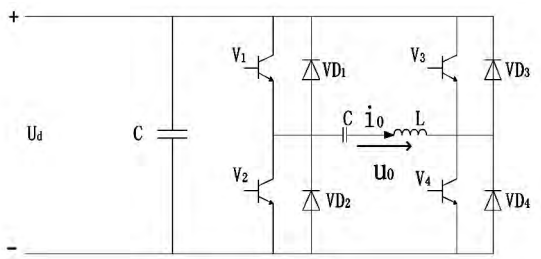



图 3　串联谐振电路图

逆变电路电压、电流定量分析:

$$U_{a1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_d = 0.9U_d \tag{1}$$

$$I_a = \eta\frac{U_dI_d}{U_{a1}\cos\varphi} = 1.1\frac{I_a\eta}{\cos\varphi} \tag{2}$$

$$P = U_{a1}I_d\cos\varphi \times 10^3 \tag{3}$$

$$U_{DRM} = \sqrt{2}u_d \tag{4}$$

$$I_V = \frac{P \times 10^3}{3.14 \times U_{a1}\cos\varphi} \tag{5}$$

式中: $U_{a1}$—— 输出中频电压基波分量有效值;
$I_a$—— 输出电流有效值;
$\eta$—— 逆变器的效率;
$U_d$—— 整流直流电压平均值;
$I_d$—— 整流直流电流平均值;

中国知网　https://www.cnki.net

$P$—— 输出功率;

$U_{DRM}$——IGBT 承受的最大峰值电压;

$I_V$—— 流过 IGBT 正向平均电流;

$\varphi$—— 逆变电路的功率因数角。

从串联谐振公式可以看出,串联谐振负载电流是一个与整流电流 $I_d$ 逆变器效率有关的物理量。而并联谐振负载电流等于整流电流 0.9 倍;串联谐振电压是整流电压 $U_d$ 的 0.9 倍,并联谐振电压与逆变器效率有关的物理量。两者正好相反。

## 3 串并联谐振中频电源区别

对实验室两种形式的中频电源装置使用中发现,对炉料的要求 100 kg 感应电炉明显高于 25 kg 感应电炉,100 kg 感应电炉炉料加装时要密实些;100 kg 感应电炉在负载与逆变电路之间用变压器隔离,这很好的隔离了逆变后残留的直流部分。但是变压器产生高温,必须采用水冷却系统进行单独冷却,以保证其正常工作。具体区别见表 1、表 2。

通过表 1、表 2 可以看出并联谐振与串联谐振区别有:

(1) 串联谐振逆变器和并联谐振逆变器的差别,源于它们所用的振荡电路不同,前者是用 L、R 和 C 串联,后者是 L、R 和 C 并联。

(2) 串联谐振逆变器起动容易,适用于频繁起动工作的场合;而并联谐振逆变器需附加起动电路,起动较为困难。

(3) 串联谐振逆变器的输入电压恒定,输出电压为矩形波,输出电流近似正弦波,换流是在晶闸管上电流过零以后进行,因而电流总是超前电压一 $\varphi$ 角。

(4) 串联谐振逆变器的功率调节方式有二:改变直流电源电压 $U_d$ 或改变晶闸管的触发频率,即改变负载功率因数 $\cos\varphi$。并联谐振逆变器的功率调节方式,一般只能是改变直流电源电压 $U_d$。改变 $\cos\varphi$ 虽然也能使逆变输出电压升高和功率增大,但所允许调节范围小。

(5) 串联谐振逆变器中的晶闸管由于承受矩形波电压,故 $d_u/d_t$ 值较大,吸收电路起着关键作用,而对其 $d_i/d_t$ 要求则较低。在并联谐振逆变器中,流过逆变晶闸管的电流是矩形波,因而要求大的 $d_i/d_t$,而对 $d_u/d_t$ 的要求则低一些。

表 1 中频电源并联形式与串联形式比较

| 项目 | 中频电源主电路的形式 | |
|---|---|---|
| | 并联型 | 串联型 |
| 输出电压波形 | 正弦波 | 矩形波 |
| 输出电流波形 | 矩形波 | 正弦波 |
| 感应圈基波电压 | 逆变输出电压 | Q×逆变输出电压 |
| 感应圈基波电流 | Q×逆变输出电流 | 逆变输出电流 |
| 直流滤波环节 | 大电抗 | 大电容 |
| 反并二极管 | 不用 | 用 |
| 换流重叠影响 | 串联电抗及分布电感引起换流重叠 | 无 |
| 对换流失败保护 | 容易 | 较难 |
| 负载适应性 | 范围较大 | 范围较小 |

表 2 不同电力电子器件,不同连接方式组成逆变电路特点比较

| 项目 | 晶闸管并联型 | 晶闸管串联型 | IGBT 并联型 | IGBT 串联型 |
|---|---|---|---|---|
| 调功方式 | 调压调功 | 调频调功 | 调压调功 | 调频调功 |
| 功率因数 | 低功率运行低 | 始终较高 | 低功率运行低 | 始终较高 |
| 谐波含量 | 低功率运行高 | 高低功率运行变化不大 | 低功率运行高 | 高低功率运行变化不大 |
| 同功率同频率设备制造成本 | 较低 | 较高 | 较高 | 较高 |
| 维修难易程度 | 较低 | 较低 | 较高 | 较高 |
| 适合匹配炉体容量 | 大中小容量都容易匹配 | 大中容量 | 中小容量 | 中小容量 |

## 4 结束语

从实验室感应电炉的使用情况看,快速晶闸管并联谐振优点是负载适应能力较强,可以作为感应透热、熔炼、淬火及其他感应加热设备的供电电源。串联谐振中频电源的适应能力比较弱,IGBT 型串联谐振逆变电路开关的速度更快,热稳定性好,需要的驱动功率小而且驱动电路简单。但是负载功率不能太高,只能使用在中小功率电力电子设备中。

## 参 考 文 献

[1] 王兆安,黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社,2005.

[2] 章舟,童军. 铸造感应电炉使用指导 [M]. 北京: 化学工业出版社,2014.

中国知网 https://www.cnki.net