

# 利用 SG3525 实现调频控制的感应加热电源

## Induction Heating Power Supply of PFM Control Based on SG3525

段海雁 山东大学 (济南 250061)

Duan Haiyan Shandong University (250061)

张光先 山东山大奥太电气有限公司 (济南 250101)

Zhang Guangxian Shandong SDU Aotai Electric (250101)

**摘要:** 本文介绍一种利用 PWM 集成控制芯片 SG3525 来实现加热电源调频控制的方法。给出主电路拓扑结构,并分析了控制原理和控制电路的设计,最后给出了实验结果。利用 SG3525 实现调频控制电路结构简单,设计比较灵活。

**叙词:** 感应加热 调频 SG3525

**Abstract:** The paper introduces a way about induction heating power supply of PFM control based on SG3525. The main circuit is presented, and control circuit is analyzed and designed, in the end giving the experiment's results. The way has the simple structure and flexible design.

**Keywords:** induction heating power supply PFM SG3525

[中图分类号] TM92 [文献标识码] A 文章编号:1561-0349(2006)11-0049-03

## 1 引言

感应加热技术具有加热温度高、加热效率高、速度快、加热温度容易控制,易于实现机械化、自动化、无空气污染等优点,现在感应加热电源已广泛应用于金属熔炼、透热、热处理和焊接等工业过程。

根据功率调节量的不同,感应加热电源有多种调功方式,调频调功是通过改变逆变器工作频率从而改变负载输出阻抗以达到调节输出功率的目的<sup>[1]</sup>。这种调功方式控制比较简单,可以对电路的工作频率进行直接控制,而且能对功率连续调整。本文正是基于调频调功这种方式,由 PWM 控制芯片 SG3525 控制实现加热电源。

## 2 主电路拓扑结构及控制原理

### 2.1 主电路结构

本文设计的感应加热电源为串联谐振式全桥 IGBT 逆变电

源,其逆变主电路结构如图 1 所示。输入采用三相 AC-DC 不控整流,输出采用负载串联谐振式全桥 DC-AC 逆变电路。整流输出的电压经高压大电容  $C_1$  滤波,逆变器主开关器件  $VT_1$ 、 $VT_2$ 、 $VT_3$ 、 $VT_4$  为 IGBT,  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  为反并联二极管。

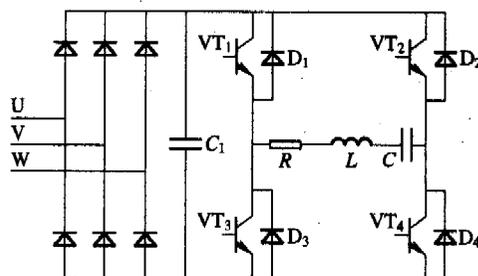


图 1 主电路结构图

### 2.2 控制原理

调频控制的原理就是:通过改变逆变器开关频率来改变输出阻抗以达到调节输出功率的目的。串联谐振等效电路如图 2 所示。负载等效阻抗为

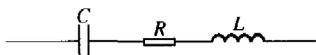


图2 负载等效电路图

$$Z = 1/j\omega C + j\omega L + R$$

则

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$= \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}$$

其中,  $f=1/(2\pi\sqrt{LC})$ ,  $f=f_0$ 时, 负载等效阻抗最小,  $|Z|=R$ , 此时功率输出最大;  $f>f_0$ 时, 负载呈感性, 且频率越大感抗越大, 功率减小;  $f<f_0$ 时, 负载呈容性, 且频率越小容抗越大, 功率减小<sup>[2]</sup>。图3为负载功率随频率变化的曲线(图中  $f_0$  为负载谐振频率;  $f$  为负载工作频率;  $P_0$  为负载谐振状态下的功率;  $P$  为负载工作时的功率。

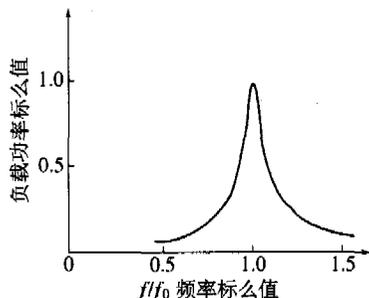


图3 负载功率随负载工作频率的变化关系

### 3 控制电路设计

#### 3.1 SG3525 简介

SG3525 是一种性能优良、功能齐全和通用性强的单片集成 PWM 控制芯片, 其输出驱动为推拉输出形式, 增加了驱动能力; 内部含有欠压锁定电路、软启动控制电路、PWM 锁存器, 有过流保护功能, 频率可调, 同时能限制最大占空比<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 控制电路设计

控制电路原理框图如图4所示, 控制电路采用负载电流闭环控制。正常工作时, 负载电流跟踪电流给定值, 经过 PI 调节器产生电压信号, 该电压信号控制芯片 SG3525 改变驱动频率, 从而改变负载电流频率, 使负载电流跟踪电流给定。为了防止开关器件换流开通时造成较大的尖峰电流, 控制逆变器开关工作频率略大于负载固有谐振频率, 为此在控制电路中还增加了相位限制电路, 以保证加热电源工作在弱感性状态。

##### 1. 电源的启动

电源稳态运行时的状态和启动时是不同的, 在电路刚启动时, 希望负载的工作功率从小到大逐渐增大, 这样就需要软启

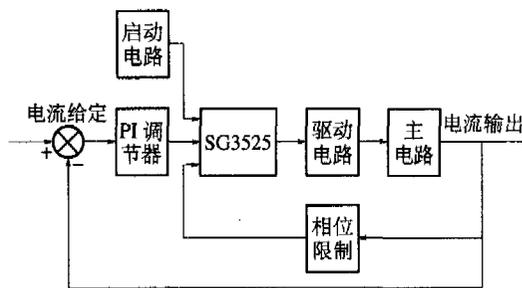


图4 控制电路原理图

动<sup>[4]</sup>。软启动的实现是通过缓慢调整负载工作频率来实现的, 具体电路如图5所示。

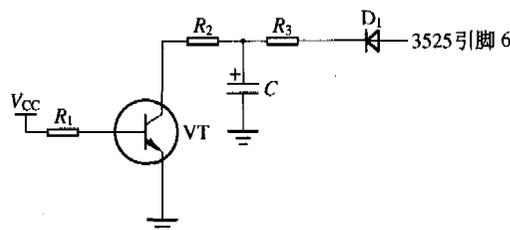


图5 电源启动电路图

SG3525 形成的控制脉冲信号频率  $f$  由下式决定:

$$f = 1/C_T(0.7R_T + 3R_D)$$

式中,  $C_T$  是 5 脚上的连接电容,  $R_T$  是 6 脚上的连接电阻,  $R_D$  是 5 脚和 7 脚之间的连接电阻。通过改变 6 号脚的电流大小, 实际上就等效于改变  $R_T$  的大小, 由公式可知, 这样就也就调节了 SG3525 输出的控制信号的频率。

如图5所示, 当三极管 VT 导通时, 电容 C 接地, 这时 6 号脚电流最大, 输出的控制信号频率最高, 功率最小; 当 VT 由导通变为截止时, 电容 C 开始充电, 流经 6 号脚的电流开始减小, 频率降低, 输出功率开始增大, 这样就实现了电源的启动。

##### 2. 相位限制

图6为相位限制电路, 3525 输出的两路电压驱动信号与电流反馈信号进行相位比较, 当提前检测到负载电流超前负载电压时, 输出同步信号送 SG3525 的 3 号引脚, 这时强制使驱动脉冲关断, 从而保证负载工作在弱感性状态。

##### 3. PI 调节电路

控制电路是以负载电流作为反馈量的, 通过改变电流给定值可以改变负载电流, 从而实现功率调节。当负载电流小于电流给定时, PI 调节电路输出电压增加, SG3525 的 6 号引脚电流减小, 频率减小, 功率增大, 负载电流增大; 反之, 当负载电流大于电流给定时, PI 调节电路输出电压减小, SG3525 的 6 号引脚电流增大, 频率提高, 功率减小, 负载电流减小。图7所示为 PI 调节电路。

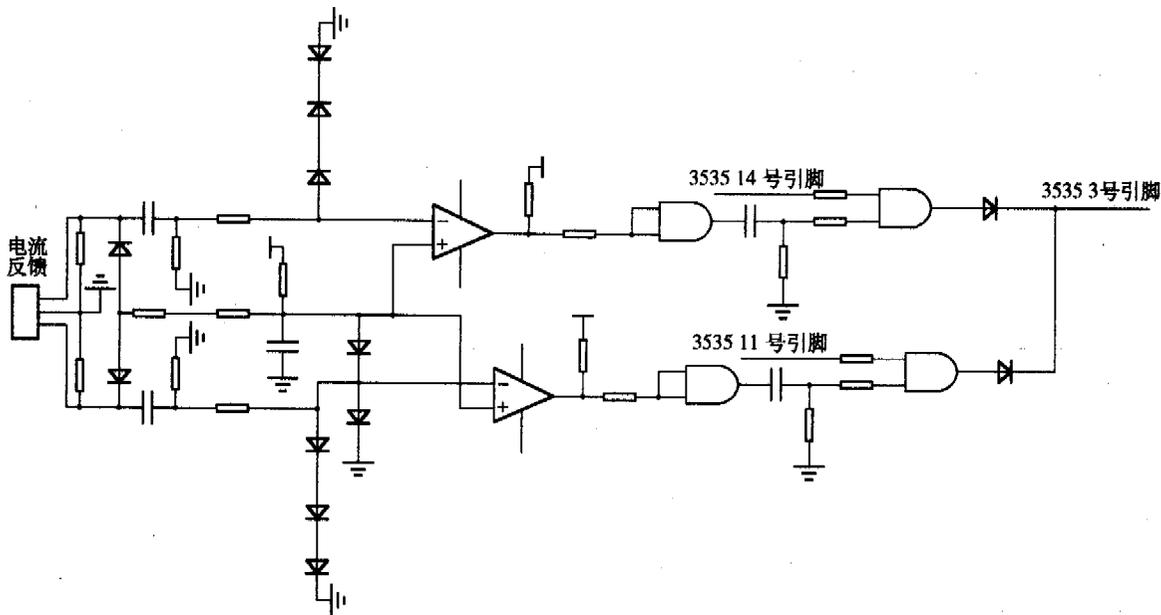


图6 相位限制电路

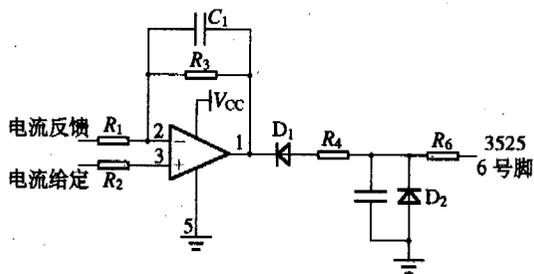
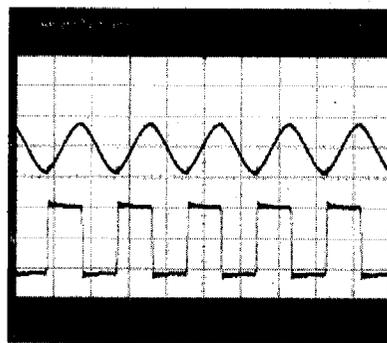
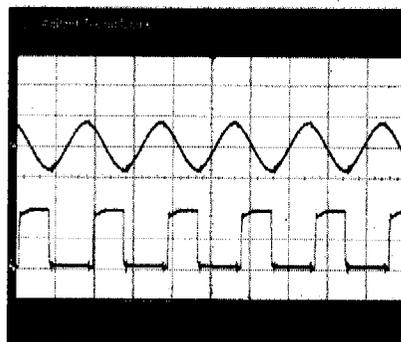


图7 PI调节电路



(a)输出电流和  $VT_1$  ( $VT_4$ ) 的驱动电压波形



(b)输出电流和  $VT_2$  ( $VT_3$ ) 的驱动电压波形

图8 负载工作在52kHz时的波形图

#### 4 实验结果

基于以上理论分析和控制电路的设计,设计了一台50kHz/30kW的感应加热电源实验样机。图8(a)为 $VT_1$ ( $VT_4$ )的驱动电压和输出电流波形,图8(b)为 $VT_2$ ( $VT_3$ )的驱动电压和输出电流波形。从图中可知,输出电流为标准正弦波,且保持连续,同时,两路驱动脉冲信号超前负载电流,这表明实测结果与理论设计的要求相符合。

#### 5 结语

实验表明,利用SG3525设计的调频控制的感应加热电源电路结构简单,工作可靠,输出电流波形好。根据SG3525的特点设计的启动电路和PI调节电路设计新颖,能够实现加热电源的可靠启动和负载功率的连续调节。

#### 参考文献

[1] 戚宗刚,柳鹏,陈辉明. 感应加热调功方式探讨[J]. 金属热处理

理. 2003,28(7).

[2] 戚宗刚. 串联感应加热电源技术研究[C]. 浙江大学硕士学位论文论文. 2004,22.

(下转第56页)

路便是“内部总线结构”，简称为 IBA。IBA 拓扑结构用隔离变换器把主供电电压降为内部总线电压，然后，利用多个非隔离负载点 (ni POL) 转换器再次作 DC-DC 转换，直至最终所需的电路电压。这个原理显著地提高了效率并降低了整体成本。

在这里介绍的应用中，除了降低成本，不同的技术要求同样是关注的焦点。图 2 所示的线路适用于小功率电源供应，并且提供一个最理想的解决方案。这个线路中，非隔离的 DC-DC 变换器 R-785.0-yy 把一个高变化的输入电压转换为准确稳定的 5V 总线电压，因此其后的隔离 DC-DC 变换器可以得到高度稳定的输入电压，从而即使没有再经过调制类也能输出紧容差电压。这种串联方式的 DC-DC 变换器的整体效率仍能达到 75%，比成本高很多的一体化 (all-in-one) 解决方案的效率还高，并且节约了印制板空间。选择逆向电流分离主要是出于成本考虑。原始的 IBA 布局因为系统只用了一个隔离器而节约成本，同时整体效率得到提高，而逆向 IBA 的成本优势在于使用了实用的、应用面广并且低价格的低功率隔离 DC-DC 变换器。

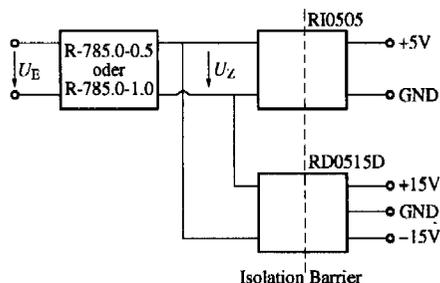


图 2 逆向 IBA (内部总线结构)

模块解决方案进一步的优势是用户可通过将任意的输出电压进行任意组合以满足设计者的供应要求。宽输入电压特性在多供应源和需要备用电池消除供电中断的系统中非常有用。考虑到电池供电系统或是类似的能量存储系统的要求，可以再次参考图 2。当储存的能量释放，输出电压往往会下降，而充电过程中输出电压上升。上述的转换器可以在充电和放电全过程中保持输出正常。内部总线电压越低，在输出异常之前要求单次能量释放就越多，需要强调的是，如果选择非常低的总线电压，则其后的变换器的效率也会相对降低。

在需要考虑暂时性供电中断的应用中，往往会使用辅助能量储备器，即后备电容。这里用到了与前面电池供电应用类似的观点。后备电容容量越小，单次释放能量时电压下降得越大，这样一来，对板面空间的要求就减小很多，尤其当使用了更高的供电电压时更是如此。图 3 所示电路就防止了主电源的供应中断影响到输出。当输入电压降到电容器电压值以下时，二极管 D 阻止了后备电容 C<sub>s</sub> 的反向放电。图 4 给出了当电源中断时电压随时间的变化关系。U<sub>E</sub> 是储备电容器的电压值，U<sub>V</sub> 是供电电压值，U<sub>Emin1</sub> 是允许的最小输出电压，U<sub>Emin2</sub> 是允许的最小内部总线电压。如果输出电压是由内部总线电压经过升压转换器得到的，那么后备电容的放电就可以更彻底。这样就可以用更小的后备电容来处理更大的供电中断。

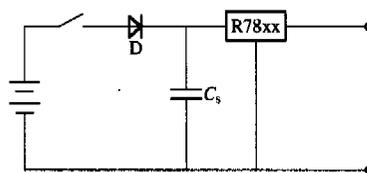


图 3 储能电路

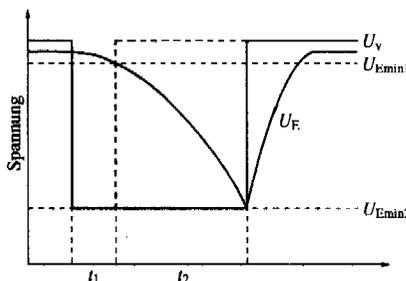


图 4 电源中断时的电压时间关系

总之，RECOM 的 R78 系列转换器不仅具有元件密度高 (8.5W/cm<sup>3</sup>)、体积小 (0.9cm<sup>3</sup>)，以及价格优惠等优点，还有上述的高技术优势。不过，在比较其不同的解决方案时，对整个系统的总成本和总的空间要求也常常需要进行比较。

收稿日期:2006-08-20

定稿日期:2006-10-15

(上接第 51 页)

- [3] 李爱文, 张承慧. 现代逆变技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 毛鸿, 吴兆麟, 侯振程. 感应加热电源无相差频率跟踪控制电路 [J]. 电力电子技术, 1998, 2.

作者简介

段海雁, 女, 1982 年生, 山东大学控制科学与工程学院在读硕士研究生, 研究方向为电力电子应用与研究。

收稿日期:2006-07-25

定稿日期:2006-09-30