

# 基于DSP的400 Hz中频电源的设计与研究

为了解决传统变频发电机组电源存在的效率低、噪声大等问题,基于DSP2812为控制核心设计了一款400 Hz输出的中频电源,给出了该电源的控制原理图,详细介绍了硬件电路组成与软件的实现策略和流程,设计中以输出电压和电流为基础实现双闭环控制策略,并使用Matlab中的Simulink进行了仿真分析,仿真结果证明:采用该方案设计的400 Hz中频电源能有效地提高电源利用效率,降低系统谐波,并且易于实现,可以广泛地应用于各种军用和民用设备上,具有很好的推广作用。

庄 丽/包头职业技术学院电气工程系



庄 丽/副教授

## 关键词/Keywords

DSP ·  
中频电源 ·  
双闭环 ·  
锁相环 ·  
Matlab ·

400 Hz中频电源是现代船舶中非常重要的一种供电电源<sup>[1]</sup>。其工作时可以将工频50 Hz转换成中频电源,由于采用先进的控制方法,中频电源的输出频率不受电网频率变化的影响,承担着为精密电子设备(如雷达、通信设备等)提供高品质电源的重任。相比于传统的变频发电机组,数字化的中频电源具有电路简单、控制灵活、电源转换效率高、输出频率范围宽以及谐波成分低等一系列优点<sup>[2]</sup>。本文以TI公司生产的DSP2812为控制核心设计中频电源,实时采集电源输出电压和电流的相位关系,采用数字PID控制算法和锁相环技术,使电源系统具有极高的动态和稳态特性,最终保证输出频率达到400 Hz。并且该系统具有相当高的操作灵活性,当输入电源发生变化时,可以通过键盘进行参数调整,以满足电源变化对输出提出的不同需求。

## 中频电源的原理及控制单元设计

### 1. 中频电源的工作原理

随着新型半导体技术的发展,中频

电源的结构不断完善,其硬件回路已经形成交—直—交的标准拓扑结构。中频电源的工作原理如图1所示,整流和逆变电路采用三相整流桥、IGBT等开关速度快的功率器件,将输入的三相工频交流电源整流成脉动的直流电,经过滤波电容和电抗器平波后变成一个恒定的直流电压,使用正弦脉宽调制(SPWM)斩波技术控制逆变部分功率器件的导通顺序,将恒定的直流电压逆变成频率可调的中频电流,提供给由感应线圈和谐振电容器组成的负载,构成谐振电路。

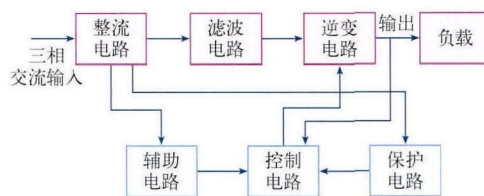


图1 中频电源工作原理

### 2. 数字控制电路设计

通过设计输入分析,采用TI公司生产的TMS320F2812处理器为核心控制器,该器件的主要特点如下:执行速度可达150 MIPS,满足逆变电源对快速计算和实时控制的要求;采用3.3 V为供电电压,内核电压1.8 V,降低了系统功耗;DSP内部有EVA、EVB两组事件管理器,可方便地产生多路带死区的PWM波;16个信道12位A—D转换模块<sup>[3-4]</sup>。

TMS320F2812整体控制结构如图2所示。在控制策略上采用逆变器的主流控制方法,即SPWM法。通过安装在负载侧的电流传感器检测中频电源的电流相位,电流传感器输出的小信号经过放大

电路放大、整形后输入到TMS320F2812的A-D转换模块；逆变电路的驱动型号由TMS320F2812的EVA模块发出，同时要在SPWM的调节周期中完成波形的控制。电源的保护主要包括过电压、过电流以及过温保护，在电源发生以上报警时，发出报警提示，关断PWM输出，同时关断整流部分的输出，根据报警提示判断出故障原因后方可重新上电。本产品在设计时，充分地吸收了国内外同类产品操作特点，采取了智能化设计方式，在电源没有输出前，通过系统前面板上的键盘及显示窗口设定电源相关参数，使之满足绝大多数的生产工艺要求。同时通过DSP芯片预留的SPI接口可以实现远程控制，进而构成DSC控制系统，满足现代化生产的需要<sup>[5]</sup>。

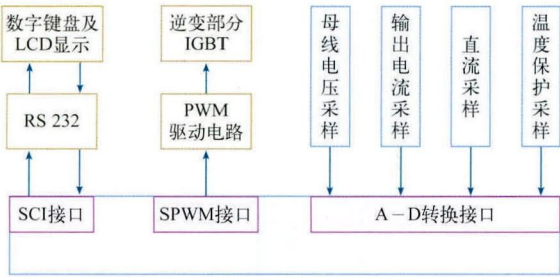


图2 TMS320F2812控制电路系统

3. 逆变器控制方法

在设计该中频电源时，对逆变部分的IGBT控制采用复合PID控制方法。当系统开机或者输出电压低于设定电压时，此时主电路的输入负载属于感性负载特性，输出电流频率和IGBT的驱动频率相差较大，需要采用PI控制方式，保证电源的输出频率和电压可以快速上升到给定值。随着负载电压的增加，系统进入到正常工作状态，当电压值大于给定电压值时，系统自动切换到闭环控制状态，此时适合使用锁相环技术对电压和电流信号直接存在的相位之差进行准确调整，使逆变器的频率输出跟随负载的变化而实时变化，保证频率的动态跟踪。逆变部分的工作流程如图3所示。

系统工作时，首先通过系统键盘设定起始频率并将该值存储在内部寄存器中。开机后检测负载侧输出电压和电流的相位信号，从而计算出检测频率值，该值与存储在寄存器中的设定频率进

行比较后，自动判断采用哪种控制方式。

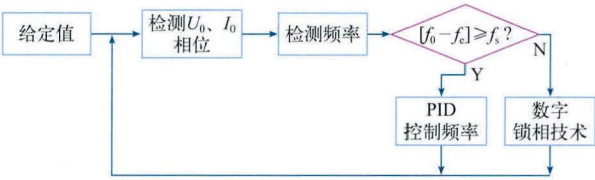


图3 逆变器控制工作流程

4. 频率跟踪及模块设计

中频电源在工作时，逆变器需要工作在谐振或准谐振状态，保证负载在高功率因数情况下运行，降低IGBT的功率损耗，同时为了保证逆变器的输出电压能够跟随负载电流的变化而变化，也能确保逆变器在工作热状态时输出额定频率，工件冷态时不会过载。因此中频电源在逆变器的控制策略上采用锁相环电路来提高电源对负载的适应性，锁相环技术水平的高低对电源的性能起到了至关重要的作用。

5. 数字锁相环的工作原理

数字锁相环（DPLL）从本质上解决了模拟锁相环电路存在的问题，因此具有稳定、可靠等特点，其基本结构如图4所示。主要由数字鉴相器（DPD）、低通滤波器（LPF）、压控振荡器（VCO）和分频器（分频系数 $N$ ）四部分组成。DPLL是相位检测与控制的闭环系统，工作原理如下：DPD接收VCO时的输出信号 $f_o$ ，并和外部输入频率信号 $f_i$ 进行比较，产生与相位差值成比例的信号，输出至LPF。相位差经LPF滤波波增减脉冲送至VCO的输入端，使输出信号 $f_o$ 发生变化，最终使输出信号频率和给定频率 $f_i$ 之间的相位差减小到零，直至频率达到同相为止。考虑到中频电源的输出频率较高，并且随着负载的变化工作频率也在不断变化，因此锁相要有宽泛的锁频范围。因此增加图4所示分频器，如果想改变锁相环的输出频

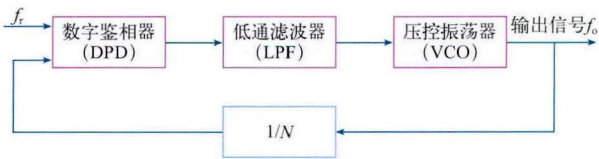


图4 数字锁相环基本结构框图

率,只需要调整分频器 $N$ 的取值,使输出频率可以根据负载的变化而快速地动态调整,从而使锁相环具有宽泛的变化范围。

## 软件流程及程序处理

电源开机后首先进行DSP初始化,包括系统初始化,EVA事件、A-D模块和SCI初始化;然后通过数字键盘进行工作频率、功率等相关参数的设定;正确设置参数后,电源进入正常工作状态,随着负载的逐渐增加,系统的输出频率跟随负载的频率而变化;最后当负载工作到额定状态时,IGBT的输出也达到了设定值,电源完成正常启动,此时控制系统通过检测电源的负载电压和输出频率以及DSP的控制,确保电源的输出频率和给定值相同。频率处理的主程序流程如图5所示。

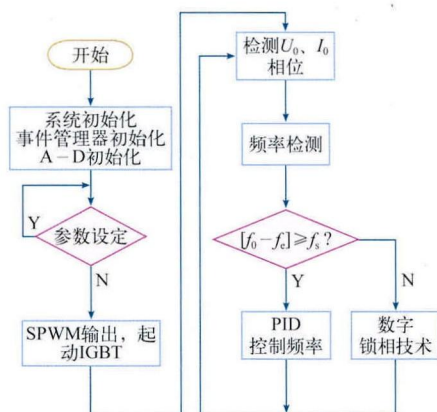


图5 频率处理主程序流程

以下列出了初始化系统及初始化事件管理器EVA部分程序。

```

#include "DSP28_Device.h"

void init_eva (void) ;

void main (void)
{
    InitSysCtrl () ;    //初始化系统
    EALLOW;
    GpioMuxRegs.GPAMUX.all = 0x00FF; // EVA
    PWM 1~6 pins
    GpioMuxRegs.GPBMUX.all = 0x00FF; // EVB
    PWM 7~12 pins
    EDIS;

```

```

DINT;    //关CPU中断
InitPieCtrl () ;    //初始化PIE控制寄存器
IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;
InitPieVectTable () ;    //初始化PIE中断向
量表
init_eva () ;    //初始化EVA
EINT;    //使能全局中断
ERTM;
for (; ; ) ;
}

//EVA初始化
void init_eva ()
{
    //初始化定时器
    //初始化定时器1
    EvaRegs.T1PR = 18750; //周期值--连续增减时,
    PWM频率= TCLK/ (2*T1PR) 频率设为1 000 TCLK
    = 75 M
    EvaRegs.T1CMPR = 0x3C00;
    EvaRegs.T1CNT = 0x0000;
    EvaRegs.T1CON.all = 0x1042; //定时器1控制寄
    存器
    //初始化定时器2
    EvaRegs.T2PR = 18750;
    EvaRegs.T2CMPR = 0x3c00;
    EvaRegs.T2CNT = 0x0000;
    EvaRegs.T2CON.all = 0x1042; //定时器2控制
    寄存器
    EvaRegs.GPTCONA.bit.TCOMPOE = 1; //通过逻辑
    产生T1/T2PWM
    EvaRegs.GPTCONA.bit.T1PIN = 1; //GP定时器1
    比较时低有效
    EvaRegs.GPTCONA.bit.T2PIN = 1; //GP定时器2
    比较时低有效
    EvaRegs.ACTR.all = 0x0006; //比较方式控制
    寄存器, 控制PWM引脚的高/低有效
    EvaRegs.DBTCNA.all = 0x0000; //静止死区
    EvaRegs.COMCONA.all = 0xA600; //比较控制

```

寄存器--禁止空间矢量PWM模式

## 实验结论及仿真

根据客户的需求设计了基于DSP2812控制的2 kV·A/400 Hz的中频电源应用于中频感应加热。主要技术参数如下：输入电压220 V±15%；电源频率50 Hz±5%；输出电压AC 115 V；输出频率400 Hz；电压畸变率小于4%；功率2 kV·A。

为了验证该方案的准确性，使用Matlab的

Simulink建立电源仿真模型，如图6所示。从仿真模型可以测得任意一相的输出电压，并根据电源的设计参数进行仿真分析，如图7所示。仿真结果表明：采用DSP2812作为控制核心，使用复合PID及数字锁相环控制策略，本文设计的逆变系统对工频电压进行变频后，可以得到谐波含量较少的400 Hz中频电压；合理的滤波电路降低了逆变回路的谐波成分，电压的THD=3.25%，满足设计要求。

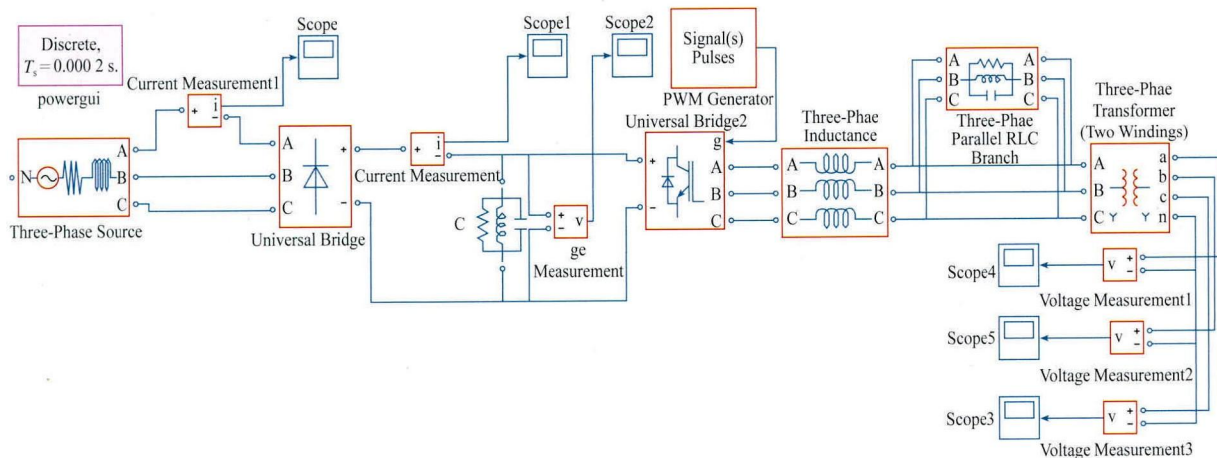


图6 400 Hz中频电源仿真模型

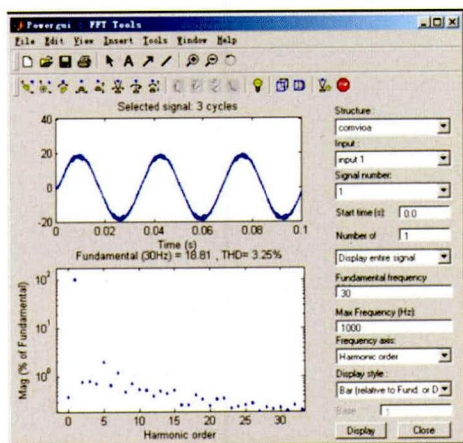


图7 中频电源谐波分析

## 结束语

本文基于先进的DSP 2812设计了输出频率为400 Hz的中频感应加热电源，介绍了中频电源控制部分的设计，并使用Simulink软件进行了仿真分析。本文设计的中频电源具有结构简单、操作方

便及可靠性高等优点。采用SPWM控制方式，可以根据负载的工作状态灵活地调整输出电压和输出频率，实现了电源的数字化控制，同时系统设计了完善的保护措施，避免因为故障造成系统停机，使逆变电源的模块化生产成为可能。

## 参考文献

- [1] 周坚侯. 基于DSP的中频电源的研究 [D]. 上海: 上海海事大学, 2007.
- [2] 孟志强. 中频电源并联逆变控制规律的研究 [J]. 湖南大学学报, 1995, 22 (6): 92-98.
- [3] 郑玉珍. DSP原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [4] 欧阳名三. DSP原理与技术 [M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2009.
- [5] 赵众, 王平. 400 Hz中频电源复合控制策略研究 [J]. 电力电子技术, 2006, 40 (3): 70-73.

(收稿日期: 2014-12-15) EA