

# 基于DSP的UPS逆变器数字化复合控制系统设计

周永鹏, 周伟健

(华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 将重复控制与比例控制构成的复合控制应用于UPS逆变器控制。本文分析了系统控制方案与软硬件功能要求, 给出系统的实现方案并用TI公司的DSP芯片TMS320LF2407A为核心设计了一个试验系统验证该复合控制算法。实验表明, 该控制方案可以较好的满足UPS逆变器的要求。

**关键词:** DSP; 逆变器; 重复控制

中图分类号: TM464 文献标识码: B 文章编号: 1003-7241(2006)10-0023-03

## The DSP based Compound-Control System Design for UPS Inverter

ZHOU Yong-peng, ZHOU Wei-jian

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A repetitive compound control is applied to the control system of UPS inverter. A prototype base on TMS320LF2407A is presented in this paper. Experiment proves the feasibility and validity of the scheme for UPS inverter.

**Key word:** DSP; inverter; repetitive control

### 1 引言

近年来, UPS因为可以有效的改善供电质量, 所以获得了广泛的应用, 也因此成为电力电子领域的研究热点。逆变器是UPS系统的核心, 在很大程度上决定了UPS的性能。较低的总谐波畸变率(THD)与快速的动态响应是UPS逆变器所期望达到的指标。随着离散控制理论与高速处理器件的迅速发展, 数字化控制技术是UPS的一个必然发展方向<sup>[1,4]</sup>。与传统的16位微控制器与单片机相比, DSP技术简化了系统硬件, 易于实现先进的控制算法, 提高系统的可靠性。本文将重复控制与比例控制构成的复合控制引入在线式UPS的逆变器控制, 应用TI公司的DSP器件(TMS320LF2407A)实现并验证了这种复合控制的有效性。

### 2 系统分析

重复控制技术出现于80年代, 其思想源于控制理论的内模原理<sup>[2]</sup>。该原理指出: 若要求一个反馈控制系统具有良好的跟踪指令以及抵消扰动影响的能力, 并且这种对误差的调节过程是结构稳定的, 则在反馈控制环路内部必须包含一个描述外部输入信

号动力学特性的数学模型。重复控制在稳态时可以近乎无静差的跟踪周期给定信号, 稳态时可以实现很好的波形质量, 有效的减小输出的THD。但是其对扰动的调节要滞后一个参考周期, 动态响应特性较差, 不满足UPS系统快速调节的要求。为改善系统的动态特性, 可以引入比例调节。比例控制的速度响应快, 可以补偿重复控制在动态特性上的不足。两者的结合构成的复合控制方案可以有使逆变器系统具有良好动、静态特性。

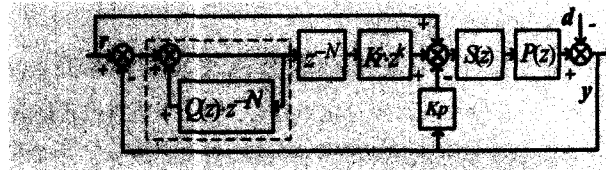


图1 系统控制框图

#### 2.1 系统控制方案选择

图1所示的为系统控制框图。系统采用重复控制与比例控制构成的复合控制方案, 对正弦指令信号实现瞬时反馈控制, 实现输出50赫兹正弦电压。这种复合控制结构具有鲁棒性强的特点, 并且易达到无超调的快速响应。

## 2.2 系统控制方案说明

$r$ 为电压指令,为50赫兹正弦参考信号。 $P$ 为控制对象, $y$ 为系统输出, $d$ 为负载或扰动。

图1中左侧的虚线框内为重复控制器内模结构图。该重复控制器的内模采用改进型结构。内模中的 $Q(z)$ 是为克服对象模型不精确的影响(增强系统鲁棒性)而设置的低通滤波器或一个小于1的常数,它使该内模成为一个准(周期)积分环节。在本系统中, $Q(z)$ 取0.95。 $N$ 是系统参考波一周期的采样次数。系统的采样周期为83.33微妙,所以 $N$ 值为240。

周期延迟环节 $z^{-N}$ 使得超前环节的设置成为可能。超前环节 $zk$ ( $k$ 为超前步长)它抵消补偿器 $S(z)$ 和对象 $P(z)$ 的相位滞后。比例系数 $Kr \in (0, 1)$ ,最终确定重复控制器输出的幅值。若减小 $Kr$ ,则增益稳定裕度增大,同时收敛速度变慢且稳态误差有所上升,反之则相反。

补偿器 $S(z)$ 改造对象特性,稳定系统。而 $S(z)$ 主要具有两个作用:(1)提供高频衰减特性,增强系统抗高频噪声的能力;(2)将 $P(z)$ 的中低频增益校正为1,使 $Kr$ 的调整归一化。

在本逆变器系统中, $Kr$ 取0.86, $k=6$ , $S(z-1)$ 则根据逆变器的 $L$ 、 $C$ 参数得到 $s$ 域的传递函数后离散化得到下式:

$$S(z) = \frac{0.07689z^2 + 0.1658z + 0.01778}{z^2 - 0.7897z + 0.05012} \quad (1)$$

$Kp$ 为比例环节的增益。 $Kp$ 越大则系统误差就越小,但是会减小系统阻尼,易引起系统振荡,为达到无超调的快速响应,其值在试验中获得。

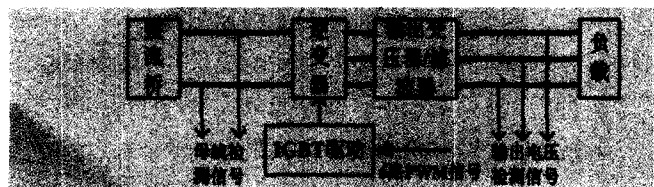
## 3 系统实现

由上述的设计方案进行系统设计,主要包括系统硬件设计与软件设计。

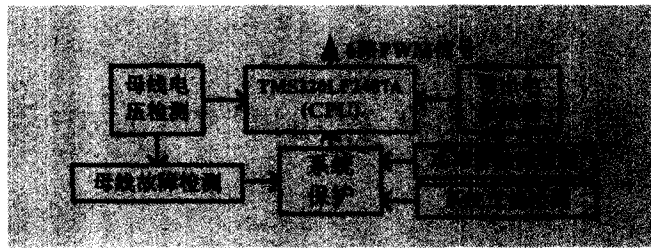
### 3.1 系统硬件设计

该系统由主电路和控制电路两部分组成,其结构如图2所示。主电路结构如图2.a所示,主电路采用功率部分采用的是3相全桥不控整流器(试验),通用3相逆变桥,输出接 $\Delta/Y_0$ 变压器与 $L$ 、 $C$ 滤波器后接负载。

系统控制部分CPU采用德州仪器TMS320LF2407A[3]。该器件为该公司C2000系列16位定点DSP,专用于电机或者逆变器控制DSP。该DSP片内集成的多种外设,极大的减少了外部电路的设计,利于降低成本,提高可靠性。以该CPU构成的逆变器控制电路结构框图如图2.b所示。



a 主电路结构框图



b 控制电路结构框图

图2 逆变器系统电路结构框图

控制系统前向数据通道主要是AD采样,包括逆变器3相输出电压与直流母线电压。由于TMS320LF2407A片内集成了16路的逐次比较型AD,所以无需外加AD。上述的信号经过滤波与波形调理后接入DSP的AD采样通道。

CPU (TMS320CLF2407A)负责信号处理,执行重复控制与比例控制的复合算法,并将结果归一化后生成SPWM占空比信号。CPU输出为3相6路SPWM波,用于驱动三相桥式逆变器的IGBT。由于芯片内部已经包含PWM的死区产生器,故外部没有死区控制电路。

系统保护模块为组合逻辑。直流母线掉电、过流,功率管过热、过流,系统过热等故障信号经两级逻辑实现逻辑电平的匹配(12V逻辑电平变换为3.3V逻辑电平)后相与,得到的信号接入CPU的功率保护引脚PDPINTA。硬件电路实现的功率保护功能集成在DSP芯片内,由软件使能。

### 3.2 系统软件设计

软件系统设计首先是确定系统的时钟。本系统外部晶振为10M赫兹,DSP内部通过锁相环获得系统工作时钟为40M。片内集成的AD实现实时采样,采样频率为12k赫兹。其中输出电压采样用于实现逆变器电压闭环瞬时反馈控制;直流电压采样用于实现占空比较正与系统保护。

DSP内部资源分配如下:定时器T1工作在连续增/减计数方式,用于生成SPWM的载波。定时器T2工作在连续增计数方式,其周期中断用于生成正弦指令、执行重复控制与比例控制复合算法、确定占空比,其流程图如图3所示。功率保护用于实现系统的保护功能。上述中断可以嵌套执行。由于功率保护的优先级最高,T2周期中断的优先级最低,所以在实现控制算法的同时可以有有效的实现系统保护。

逆变器所需的3相正弦指令由间接查表法获得。具体为将正弦波分为 $2M$ 等份,将 $[0, \pi]$ 等份保存为正弦表存储在FLASH中。每弧度对应的步长 $\theta$ 为:

$$\frac{M}{\pi} \quad (2)$$

根据即定的采样步长 $t$ ,输出电压频率 $f$ 与3相电角度之间的关系可以求出当前3相电角度 $\theta_x(k)$ 为,其中下标 $x$ 为相电压标识:

(下转第28页)

## 参考文献:

- [1] 范逸之,陈立元. Visual Basic 与 RS-230 串行通信控制[M]. 北京:清华大学出版社,2002.6.
- [2] 范逸之. Visual Basic 与分布式监控系统——RS232/485 串行通信[M]. 北京:清华大学出版社,2002.1.
- [3] 汤勃,徐立伟,饶润生. 基于VB的PC机与单片机串行通信程序设计[J]. 武汉理工大学学报,2004.8:534-536.

- [4] 张亚宜,熊兴隆,蒋立辉. VB6.0 在分布式监控系统数据通信中的应用[J]. 中国民航学院学报,2003.2:51-54.
- [5] 朱武,钟瑜,陈涛. 基于VB的石油馏程仪智监控系统的通信与数控处理[J]. 自动化技术与应用,2006,25(2):50-51.

作者简介:吴海平(1982-),男,福建人,在读研究生,研究方向:嵌入式技术.

(上接第24页)

$$\theta_A(k) = [\theta_A(k-1) + 2\pi ft] \bmod(2\pi)$$

$$\theta_B(k) = [\theta_A(k) + 2\pi/3] \bmod(2\pi) \quad (3)$$

$$\theta_C(k) = [\theta_B(k) + 2\pi/3] \bmod(2\pi)$$

将当前电角度  $\theta_x(k)$  通过式(4)调整至  $q(k) \in [0, \pi]$ .

$$q(k) = \theta_x(k), \theta_x(k) \in [0, \pi]$$

$$q(k) = \theta_x(k) - \pi, \theta_x(k) \in (\pi, 2\pi) \quad (4)$$

由  $q(k)$  通过式(6)可以得到当前角度对应的正弦值的偏移量:

$$Index = \text{int}[\partial * q(k)] \quad (6)$$

由该偏移量可以在正弦表中得到相应的正弦值的绝对值,再根据角度所在的区域判断正负得到正弦值.

M 值越大,则生成的正弦波越精确.本系统取 M 值为 300,对应的步长  $\partial$  通过式(2)计算为 95.493.

系统的主程序实现系统初始化与控制系统常量参数的初始

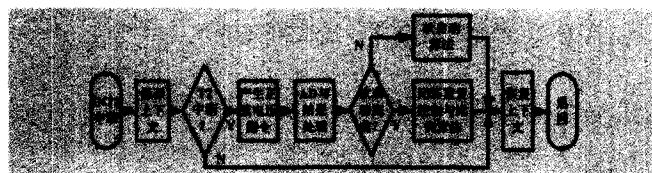


图3 T2中断流程图

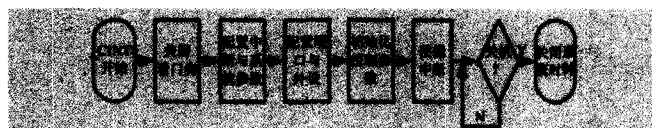


图4 主程序流程图

化。其流程图如图4所示。

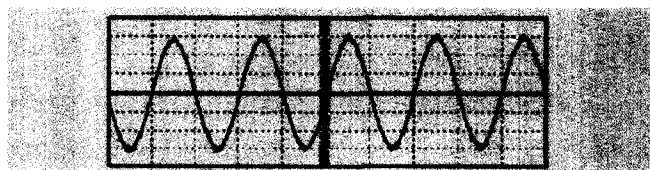
## 4 试验结果

根据上述的系统设计设计了一个试验系统,该系统参数如下:控制芯片为TMS320CLF2407A,系统工作频率为40MHz,逆变器功率管驱动为双极性SPWM IGBT驱动,开关频率为10kHz,死区时间为3.5 $\mu$ s,直流母线电压为460伏,输出滤波电感为3.8mH,滤波电容为200 $\mu$ F,负载为1KW阻性负载。

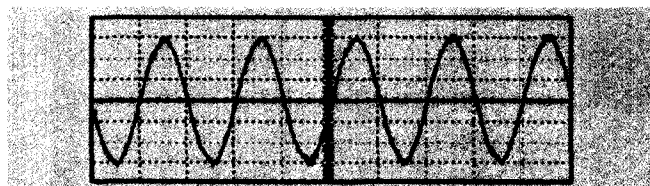
该试验系统试验结果如图5所示。图5.a所示为一相空载稳态输出电压波形,图5.b所示为一相闭环稳态输出电压波形。由试验结果可以看出,采用重复控制与比例控制构成的复合控制方案可以很好的满足UPS逆变器要求,空载与带负载时稳态电

压波形可以很好的输出50Hz正弦波,带1KW负载时压降百分比小于0.1%,且波形失真极小,达到UPS产品国家标准指标要求。

## 5 结论



a 空载W相输出电压电压波形(t=10ms/格)



b W相负载1KW 输出电压电压波形(t=10ms/格)

图5 系统输出电压波形

本文所介绍的UPS逆变器控制是同时采用重复控制与比例控制的复合控制方案。系统以DSP作为主控芯片,提高了系统集成度,抗干扰能力强,而且调试方便,获得了良好的效果。经试验证实该复合控制方案是一种有效的控制方案,在满足UPS输出性能要求的同时,可以有效的降低成本。

## 参考文献:

- [1] 高军,黎辉,杨旭,王兆安. UPS逆变器数字化控制技术[J]. 电工技术,2001(12):7-9.
- [2] 张凯,等. UPS逆变电源重复控制技术研究. 华中理工大学学报[J], 2000(6):34-36,39.
- [3] 刘和平. TMS320LF240x DSP结构、原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [4] 王根平,等. 用DSP和IGBT实现三相/三相矩阵变换器[J]. 自动化技术与应用,2004,23(11):79-81.

作者简介:周永鹏(1952-),男,教授,研究方向:电力电子与运动控制。