

基于双 CPU 的 UPS 全数字化控制系统

张超, 陈昌旺

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出了一种基于 TMS320LF2407A 和 MSP430F149 双 CPU 控制的 UPS, 介绍了系统的工作原理, 重点讨论了数字化控制策略, 包括: 软件锁相环, 数字电压调节器, 软启动等, 最后给出了样机的实验波形。该 UPS 实现了全数字, 智能化控制, 克服了传统 UPS 的局限性, 实验证明该新型 UPS 具有自动化程度高、抗干扰能力强、性能稳定的特点。

关键词: 不间断电源; 全数字化; 数字信号处理器

中图分类号: TM912 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2005)02-0062-04

0 引言

随着 IT 业的迅速发展, 不间断电源 (UPS, Uninterruptible Power Supply) 越来越广泛地用于银行、证券、军事、医疗、电力、航空航天等领域; 而且对 UPS 的性能要求也越来越高。从 20 世纪 60 年代最早的交流不间断供电系统到如今由全控型器件构成的静止型不间断电源, UPS 得到了飞快的发展。近些年来 UPS 正向高频化、绿色化、数字化、智能化的方向发展, 且随着电力电子技术的发展, 传统 UPS 大量采用的模拟控制的局限性越来越明显, 无论是从控制手段, 还是从控制性能及控制系统的可靠性来说, 数字控制均具有模拟控制所不能比拟的优越性, 研制高性能全数字化控制的 UPS 成为用户越来越迫切的需要。基于这种考虑, 本文提出了一种单相在线式 UPS 的全数字化控制系统, 该系统采用双 CPU 控制, 以高性能的 DSP 芯片 TMS320LF2407A 为主控 CPU, 单片机 MSP430F149 为辅控 CPU。

1 CPU 的结构特点

数字信号处理器 (DSP) TMS320LF2407A 是 TI 公司为应用于数字电机控制而设计的一款高性能、低功耗 CPU。丰富的面向应用优化的外设单元和高性能 DSP 内核相结合, 让实现各种实时、高效的数字化控制系统成为可能, 其主要特点有: 25 ns 的指令周期; 片内高达 32 k 字的 FLASH 程序存储器, 1.5 k 字的数据/程序 RAM, 544 字的 DARAM, 2 k 字的 SARAM; 两个事件管理模块 EVA 和 EVB, 共包括: 4 个通用定时器, 6 个捕获单元, 16 个 PWM 通道且内部集成了带死区功能的 PWM 电路; 16 通道 10 位 A/D 转换器; 控制器局域网络 CAN2.0B

模块, 串行通信接口 SCI 模块, 串行外设接口 SPI 模块; 40 个可单独编程或复用的 GPD。

MSP430F149 亦是 TI 公司设计的一款低电压、超低功耗的单片机, 采用 16 位 RISC 结构, 125 ns 的指令周期, 具有强大的处理能力, 其内部集成了丰富的片内外设, 包括: 12 位的 A/D 模块, 温度传感器, 2 个 16 位定时器, 2 通道串行通信接口 USART0 和 USART1 (可软件选择 UART/SPI 模式), 多达 60 kB 的 FLASH ROM 和 2 kB RAM。

2 系统结构及工作原理

系统由主电路和控制电路两部分组成, 其结构框图如图 1。其工作原理为: 在正常工作模式下, 市电经输入滤波, 整流后, 在直流母线上获得稳定的直流电压, 然后 DSP 根据检测到的输出电压和电流, 由软件锁相环跟踪市电频率和相位, 驱动逆变器, 生成相应的正弦波。同时 DSP 还根据检测到的蓄电池电压及充电电流实现对蓄电池的充电, 该模式下, 逆变器侧电子开关开通, 市电侧电子开关关断, 逆变器向负载供电; 当过载或逆变器故障时, 电子开关将切换到市电, 由市电向负载供电, 过载或故障消失后, 恢复到逆变器供电。在工作过程中, DSP 芯片 TMS320LF2407A 作为主控芯片, 控制整个 UPS 系统的运行。辅控单片机 MSP430F149 就其作用来说, 相当于一个人机接口芯片, 它有两个串口, 串口 USART0 与 DSP 通信, 传递运行数据, 以供 LCD 显示或上位机监控; 串口 USART1 与上位机通信, 以便运行人员监控 UPS 的运行状况, 同时也为组网, 实现远程集中监控提供了方便。

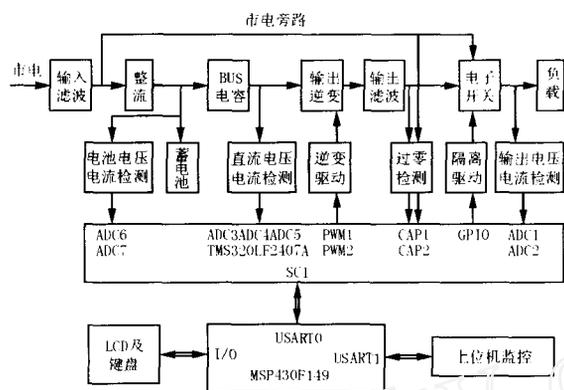


图 1 系统结构框图

Fig 1 Block diagram of the system

3 数字化控制策略

TMS320LF2407A 内部集成了丰富的外设单元及高性能 DSP 内核,其指令执行速度达到了 40 MIPS,配合其强大的指令运算功能,很容易实现各种实时、高效的控制算法。本控制系统充分利用了这些特点,与传统的模拟控制系统相比,系统除少量的外围电路外,大部分的控制模块均由软件实现,大大降低了系统的生产成本,提高了系统的工作效率。

3.1 软件锁相环

为了输出稳定的正弦波,系统必须提供一个基准正弦信号,其具体实现方法为:将一个正弦周期等分为 200 个点,计算出每一个点所对应的正弦值,将这些正弦值列成一个表格,程序中设置一个正弦指针,每隔一个载波周期正弦指针加 1,读取一个值。采用规则采样法生成 SPWM 波形,则参考正弦波可表示为: $V_{rk} = T_c / 2 \sqrt{1 + a \sin(2\pi / 200 * k)}$, 其中 T_c 为载波周期, a 为调制度。

逆变器输出电压和市电电压的频率、相位必须保持一致,以便逆变器和市电平滑切换,避免在切换时产生环流以及对负载的冲击,因此 UPS 必须设置锁相环,以跟踪市电频率和相位。当市电频率满足精度要求时,逆变器与市电同步运行;当市电频率不满足要求时,逆变器与 DSP 内部定时产生的 50 Hz 基准频率同步运行。具体实现原理为:将市电和逆变器输出降压,过零检测并处理成方波, DSP 的 CAP1 和 CAP2 分别捕获输入的上升沿并触发中断,在中断服务程序里,根据捕获的上升沿时刻即可计算出市电周期 T ,市电与逆变器的输出相位差 T ,并可判断出逆变器输出是超前还是滞后市电。

若市电频率不满足要求,则 $T_c = \frac{20 \text{ ms}}{200} = 100 \mu\text{s}$,

此时精确输出 50 Hz 的正弦波,不再跟踪市电;若满足要求,则改变载波周期 T_c ,使得 $T_c = T/200$,跟踪市电频率。当相位差 T 不为零时,则将参考正弦周期缩短或延长 T 来完成锁相,但为防止逆变器输出电压产生较大波动,调整并不是一次完成的,而是分多次调整,直至 $T = 0$,完成锁相,置锁相成功标志。

3.2 数字电压调节器

在整个电路中,电压调节器是至关重要的环节。由于 UPS 的负载通常都是非线性的,如计算机就是一种典型的非线性负载,非线性负载将会产生谐波电流,而 UPS 均带有输出滤波器,其输出内阻不为零,因此谐波电流注入 UPS,将会导致输出电压畸变。为了获得高质量的正弦输出电压波形,必须对输出电压补偿。传统的数字电压调节器采用瞬时 PD 控制,PD 控制对检测到的误差信号立即产生控制作用,跟踪快速,但应用到正弦逆变电源系统中,其比例作用和积分作用受到限制,跟踪效果不好,稳态精度差,对输出电压畸变的补偿效果不明显。

近几年来一些学者将重复控制应用到 UPS 中,以改善稳态误差,获得了较好的控制效果,重复控制对于消除非线性整流性负载及其它周期性干扰对逆变电源系统输出波形的影响,有明显的效果,重复控制虽然可以保证输出波形精确跟踪给定,但它却有一个致命的弱点,因为重复控制得到的控制指令并不是立即输出,而是滞后一个参考周期后才输出,这样如果系统内部出现干扰,消除干扰对输出的影响至少需要一个参考周期。干扰出现后的一个参考周期内,系统对干扰并不产生任何调节作用,这一个周期系统近乎处于开环控制状态。最严重的情况是输入直流电压突然跌落或上升,此后一个周期控制量基本保持不变,必然造成输出交流电压跟随输入直流电压出现大范围跌落或上升。因此如何解决重复控制动态相应速度慢的问题,是重复控制系统中设计的一个关键。

根据这种情况,综合两者的优点与不足,本文提出了一种基于瞬时 PD 控制和重复控制的新型复合控制策略,以保证系统具有较快的动态响应速度和较高的输出波形质量。其控制框图见图 2。其中 $P(z)$ 是逆变桥及滤波器,重复控制器由周期延迟正反馈环节和补偿器 $C(z)$ 组成, N 是数字控制器每个工频周期的采样次数,本系统为 200, $Q(z)$ 用以增强系统的稳定性,常取一个小于 1 的常数,如 0.95,周

期延迟正反馈环节对逆变器输出电压的误差进行逐工频周期的累加,补偿环节 $C(z)$ 的目的是改造系统,使重复控制器稳定。 $D(z)$ 为瞬时 PD 控制器。根据控制理论,复合控制系统的稳定性取决于各子系统的稳定性,只要 PD 控制器和重复控制器单独作用时系统是稳定的,那么复合控制作用的结果系统仍然是稳定的。

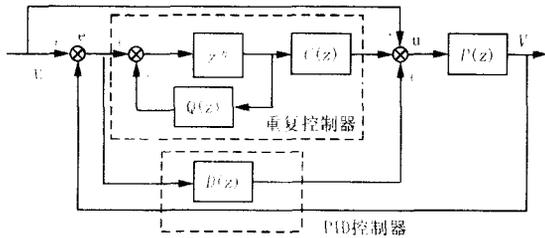


图 2 复合控制框图

Fig 2 Block diagram of complex control system

3.3 软起动及监控保护

UPS 刚开机时,它的各种控制电路都需要一定的过渡时间才能进入稳定工作状态,而且为了避免逆变器刚起动时电压突变对负载及功率开关管的巨大冲击,而造成 UPS 故障率大大提高,严重时 UPS 还会被直接损坏,因此在 UPS 的设计中增加“软起动”功能,即 UPS 开机后逆变器输出电压幅值不是一下突变到额定值,而是从零伏逐渐上升到额定值,稳定一段时间后,电子开关动作,逆变器输出额定电压。数字化 UPS 实现“软起动”是非常简单的,由前面 3.1 节可知只要以一定的间隔缓慢增加基准正弦波的幅值 V_r ,也就是缓慢增加调制度 a ,即可使输出电压缓慢上升到额定值,从而实现软起动。

为保证 UPS 在遇到各种异常情况时仍能安全可靠地运行,有必要设置各种保护控制电路。本设计中,DSP 实时检测输出电压电流,直流电压电流,蓄电池充电电压及充电电流等,将采集到的值与设定值相比较,越过上限或下限即采取相应的措施,由于 DSP 执行速度相当快,系统发生故障时 UPS 能迅速作出反映,防止故障进一步恶化。

4 实验结果及分析

图 3~8 是采用 Tektronix 公司生产的 TDS210 数字双踪示波器测得的实验结果,由于测量范围有限,测量时均采用了电阻分压。

从图 3 可以看出软起动波形与设计目标相符;图 4 表明软件锁相环跟踪精度高,可保证市电与逆变器平滑切换;图 5 和图 6 表明负载切换时电压超

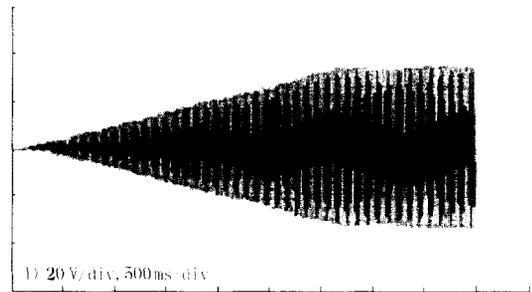


图 3 空载软起动波形

Fig 3 Output waveforms of soft-start without load

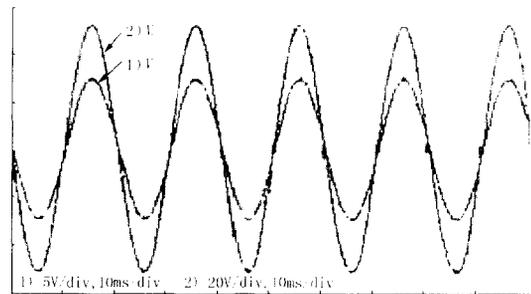


图 4 锁相环波形

Fig 4 Waveforms of PLL

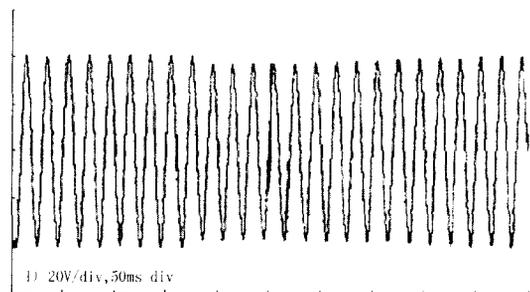


图 5 空载到满载切换

Fig 5 Output waveforms operating from no load to full load

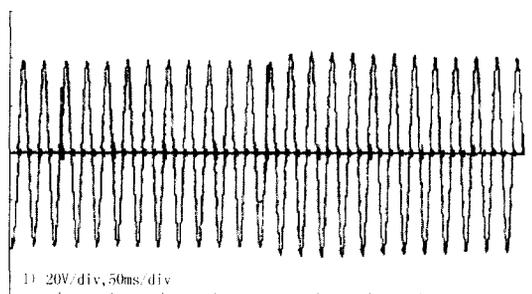


图 6 满载到空载切换

Fig 6 Output waveforms operating from full load to no load

调小;从图 7 和图 8 可以看出带整流性负载仅有 PD 控制时,系统输出电压畸变较大,总谐波畸变率

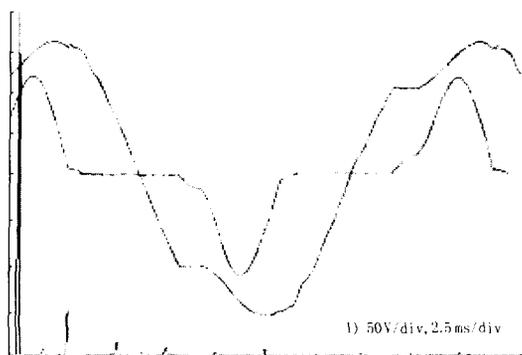


图 7 仅 PD 控制时逆变器带整流性
负载输出电压电流波形

Fig 7 Output voltage and current waveforms under
rectifier load only using PD controller

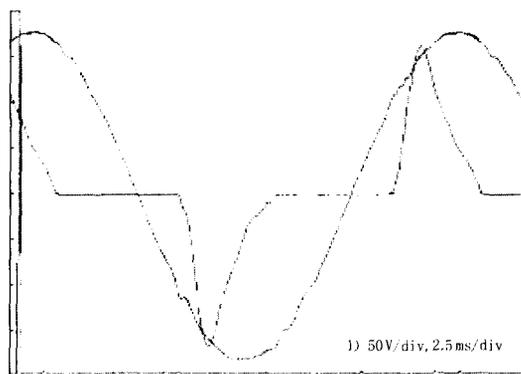


图 8 复合控制时逆变器带整流性
负载输出电压电流波形

Fig 8 Output voltage and current waveforms under
rectifier load using complex controller

(THD)大。复合控制时,系统稳态输出波形质量好,总谐波畸变率小。

5 总结

本文提出了一种基于双 CPU 的 UPS 数字化控制系统,有效地简化了系统设计,降低了生产成本,增加了系统的稳定性,减少了输出电压波形失真度,

从而可以向用户提供更加稳定、精确、高质量的电压波形。同时数字化的控制较模拟控制更加柔化、智能化、网络化,使得系统具有很强的可编程性,更易于更新和升级。

参考文献:

- [1] 李成章. 现代 UPS 电源及电路图集 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 1-20.
LI Cheng-zhang Modern UPS and Diagrams of Circuits [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001. 1-20.
- [2] 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. 1-46.
LIU He-ping TMS320LF240X DSP Structure, Principle and Application [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002. 1-46.
- [3] 肖化, 胡广莉. 智能化交流不间断电源 UPS 设计 [J]. 电力电子技术, 1997, 6(2): 31-34.
XIAO Hua, HU Guang-li The Design of Intelligent AC Uninterrupted Power Supply [J]. Power Electronics, 1997, 6(2): 31-34.
- [4] TOU Ying-yu, OU Rong-shyang, JUNG Shih-liang, et al High Performance Programmable AC Power Source with Low Harmonic Distortion Using DSP-based Repetitive Control Technique [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1997, 12(4): 290-293.
- [5] CHEN Jian, DUAN Shan-xu, LN Xin-chun, et al Analysis and Design of the DSP-based Fully Digital-controlled UPS [J]. Power Electronics and Drive System, 2001, 1: 22-25.

收稿日期: 2004-05-08; 修回日期: 2004-06-24

作者简介:

张超 (1980 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力电子与电力传动的研究, 研究方向为逆变电源及其并联技术; E-mail: firezc80@163.com

陈昌旺 (1962 -), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电力电子与电力传动的教学和科研工作。

A digital control system for UPS based on double CPUs

ZHANG Chao, CHEN Chang-wang

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A UPS based on double CPUs of TMS320LF2407A & MSP430F149 is proposed, and the principle of system operation is introduced. Some digital control strategies including software PLL, digital adjuster of the output voltage and the soft start are emphatically discussed. In the end, some experimental results based on prototype are provided. The UPS realizes complete digital/intelligent control and overcomes shortcomings of traditional UPS. The experimental results show that the new UPS has a high automatization, good anti-jamming and stable performance.

Key words: UPS; fully digitalization; DSP