

DSP 技术在三相逆变器闭环系统中的应用

定明芳 刘昌玉

(华中科技大学水电与数字化工程学院 武汉 430074)

摘要: 该系统以 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320LF2407A 为基础, 形成了具有高速数据采集和实时数据处理功能的硬件平台, 在此平台上通过应用 SVPWM 算法, FFT 算法和数字 PID 算法等数字处理技术, 采用闭环控制, 形成了具有良好人机交互界面和通信功能的全数字化 SVPWM 三相逆变器系统。该系统具有很好的动稳态性能。

关键词: 三相逆变器 SVPWM DSP 闭环系统

中图分类号: TM464 图文标识码: A 文章编号: 1003-4862 (2006) 02-0009-04

Application of DSP Technique in Three-Phase Inverter Closed-Loop System

Ding Mingfang ; Liu Changyu

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

Abstract: *The system based on DSP chip TMS320LF2407A made by TI Company, has an excellent hardware architecture that can carry out data-sampling at a high speed and real-time data processing. By using the SVPWM algorithm, FFT algorithm, digital PID algorithm and with closed-loop system control structure, a digital three-phase SVPWM inverter closed-loop system is designed for friendly Man-machine interface and good communication function. The system has a good dynamic and static performance.*

Keywords: *three-phase inverter; SVPWM; DSP; closed-loop system*

1 引言

随着高开关频率功率电子元件(如 IGBT, IGCT, MOSFET)制造工艺的日渐成熟和 DSP 技术的高速发展, 基于 PWM 调制的三相逆变器得到了广泛的应用。比较流行的 PWM 技术包括正弦波调制 PWM (SPWM) 和空间矢量 PWM(SVPWM)。而 SVPWM 又因其电流谐波少, 转矩脉动小, 噪声低, 比常规 SPWM 直流电压利用率高而倍受青睐。本系统以 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320LF2407A 作为核心, 组成了具有高速数据采集和实时数据处理功能的硬件平台, 在此基础上应用 SVPWM 技术^[1], 采用电压型 PWM 逆变控制系统结构, 形成全数字化的三相逆变器闭环控制系统, 使输出电压精度和动稳态性能得到较大提高。本系统利用了软起动技术

使系统起动平稳, 改善了系统的起动性能。该系统具有良好的人机交互界面, 不但可以实时显示逆变器的状态, 还使用户可方便地通过键盘调节逆变器的输出电压和频率, 设置 PID 参数。通过 RS485 通信接口, 本系统可与远距离的 PC 机连接, 使用户可在远方对逆变器的状态进行监控, 并可发指令改变逆变器的输出电压和频率, 使之成为可调试用逆变电源。

2 SVPWM 三相逆变器闭环系统硬件设计

2.1 SVPWM 三相逆变器闭环系统硬件结构

SVPWM 三相逆变器系统硬件结构如图 1 所示, 本系统包括主电路, 检测电路, 驱动电路, 和控制电路以及 SPI、SCI 通信接口电路五大部分。主电路包括整流电路, 功率因数校正 (PFC) 和输

收稿日期: 2005-11-12

作者简介: 定明芳 (1976—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术和电机控制。

刘昌玉 (1962—), 男, 教授, 主要研究方向为智能调速器研究与开发, 工业控制, 智能检测和故障诊断。

入滤波电路，三相逆变器电路，输出滤波电路，逆变变压器；检测电路包括直流电压和电流检测电路，输出交流电压和电流检测电路，频率检测电路；驱动电路是以IR2130三相IGBT驱动芯片及其外围电路为基础形成的；控制电路以TI公司的DSP芯片TMS320LF2407A及其外围接口电路为基础形

成。TMS320LF2407A芯片通过SPI接口与MAX6954芯片连接，由MAX6954及其外围电路来驱动键盘和LED显示器；TMS320LF2407A芯片通SCI接口，经高速光隔6N137与MAX485芯片连接后，可与远处的PC机通过串行通信，当然PC机端需连接RS485/232转换器。

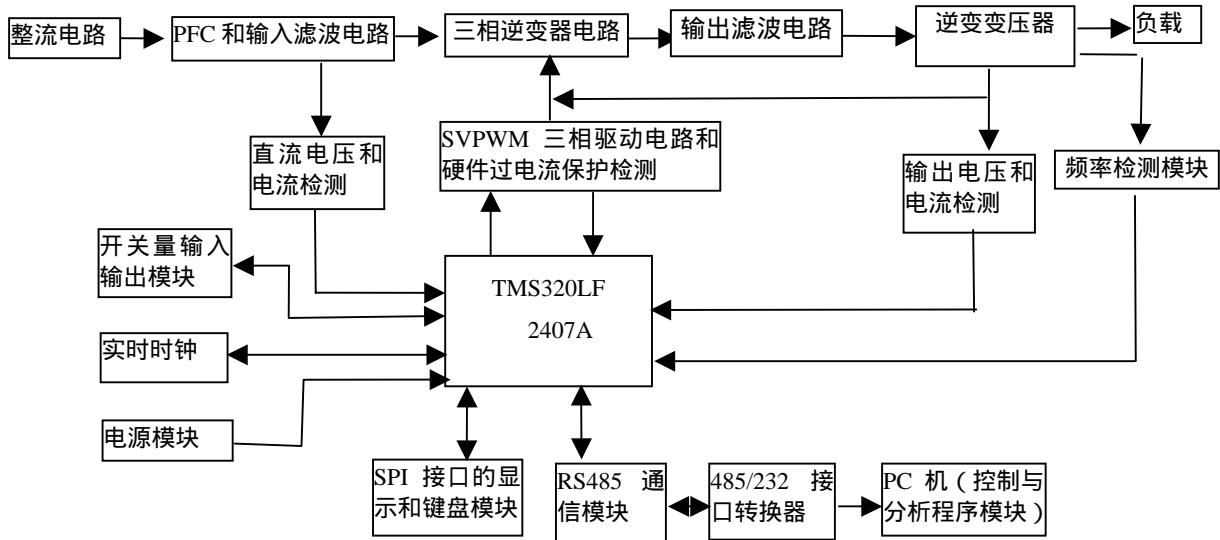


图1 三相逆变器系统硬件结构图

2.2 三相逆变器电路及其缓冲电路

在三相逆变器电路中开关器件的保护至关重要，所以在选择了逆变器的拓补结构后，一定要加上相应的缓冲电路保护开关器件的主开关极^[2]，L和C是防止器件过高的di/dt和dv/dt的两个关键元件。本系统选用的三相逆变器电路及其缓冲电路如图2所示，图中L、R、C1、C2、D1、D2等元件为缓冲电路元件（仅标注A相，B，C相中相应元件亦为缓冲元件）。开关器件T1，T2等选用带反并联快恢复二极管的IGBT。该缓冲电路的主要特点是：一个电容C1在充电和放电过程中限制了两个开关管T1、T2的dv/dt，没有最小开通时间限制，可回馈缓冲能量。

中 R_{g1} 和 R_{g2} 是栅极驱动限流电阻。 R_{g1} 决定开通时间， R_{g2} 决定关断时间。 R_{gs} 的大小与开关器件的反向电压承受力有关， R_{gs} 越小，开关器件关断时能承受的反压越高，但对驱动电路不利，因为电压型开关器件驱动电路一般都按脉冲工况设计， R_{gs} 过小时驱动电路实际上变成了连续工况， R_{gs} 一般可选在10K左右。 W_1 和 W_2 为稳压管，防止驱动电压超过开关器件的控制极最大耐压。

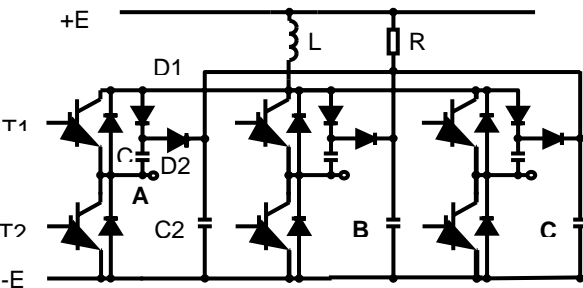


图2 三相逆变器的主电路及其缓冲电路

另外开关器件的控制极保护也是十分重要的，本系统中的IGBT的栅极保护电路如图3所示，其

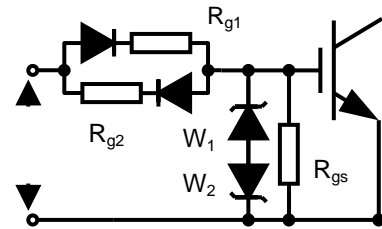


图3 IGBT的栅极保护电路图

3 三相逆变器的控制系统及其软件设计

3.1 SVPWM三相逆变器控制系统

三相逆变器控制系统结构如图4所示， V_g 为给定电压， V_d 是市电经整流后输出给三相逆变器的直流电压。通过TI公司的DSP芯片TMS320LF2407A从软件上实现SVPWM脉冲波和数字PID调节^[3]。

3.2 SVPWM三相逆变器控制系统的软件设计

在 DSP 芯片 TMS302LF2407A ,测频电路以及电压电流检测电路等组成的硬件平台的基础上,将

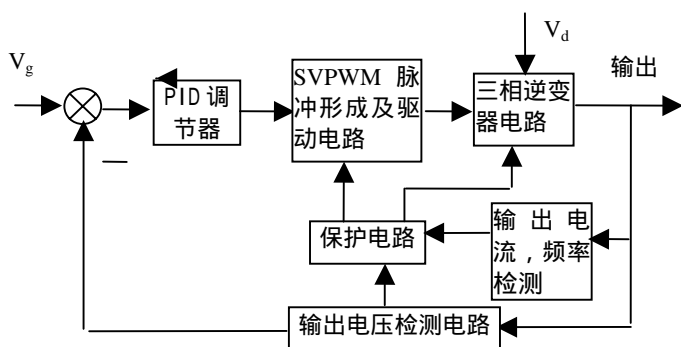


图 4 三相逆变器控制系统结构图

图 5 所示的主程序及表 1 所列的 FFT 变换子程序^[4], 数字 PID 调节器中断子程序, SVPWM 算法及驱动中断子程序, 软启动子程序等烧写进 TMS302LF2407A 的 FLASH 内, 便形成了一个完整的 SVPWM 三相逆变器闭环控制系统。

表 1 子程序列表

数字 PID 调节器中断子程序	SVPWM 算法和驱动中断子程序
频率检测中断子程序	电压电流检测中断子程序
FFT 变换子程序	软启动子程序
系统异常保护子程序	SCI 串行通信中断子程序
显示驱动中断子程序	键盘驱动中断子程序

本系统通过 TMS302LF2407A 的 SPI 接口与显示和键盘模块进行通信, 从而可实时地显示输出电压、频率和 PID 参数, 并可通过键盘设置这些量。本系统通过串行通信接口可与 PC 机进行串口通信, 这样便可在远方对逆变器工作状况进行监控。

3.3 SVPWM 算法及其驱动程序

一个好的程序应该把硬件驱动和算法分离。通过 SVPWM 的理论, 我们先在程序的算法部分计算出与 DSP 中相应寄存器对应的变量的值, 然后在程序的硬件驱动部分把这些变量进行格式转换后填入对应的寄存器中以驱动相应硬件。TI 公司的 DSP 芯片 TMS320LF2407A 的事件管理器中含有 SVPWM 状态机硬件, 通过对 TMS302LF2407A 的事件管理器相应寄存器进行正确设置可以产生 SVPWM 波。

如图 6 所示整个电压空间矢量极坐标系被 6 个有效电压空间矢量分为六个扇区, 标号为 0~5, 这 6 个有效电压空间矢量分别是 (001) (011) (010), (110), (100), (101), 另外还有两个零矢量 (000) 和 (111)。

SVPWM 的算法及驱动程序流程如图 7 所示,

在定时器 1 的下溢中断程序中完成一次 SVPWM 运算。在此之前根据用户的设置已经确定了输出电压

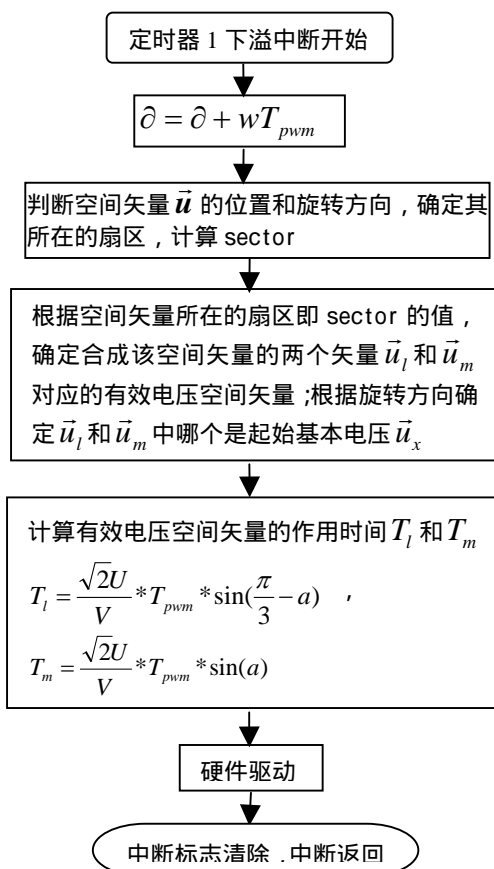


图 5 主程序流程图

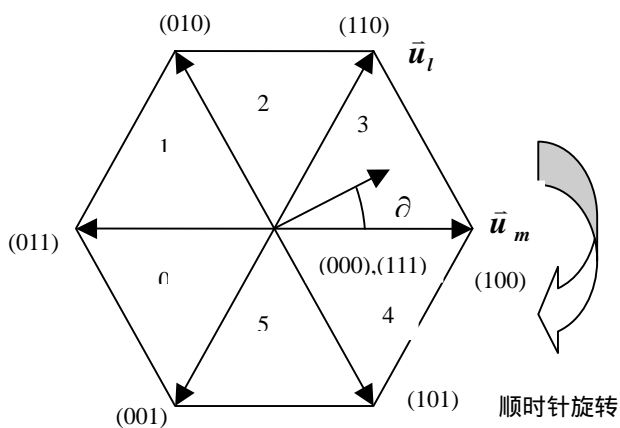


图 6 电压空间矢量图

频率 f , 输出线电压有效值 U , 直流母线电压 V 。图中 $\hat{\theta}$ 为电压空间矢量的角度, sector 为扇区号, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, T_{pwm} 为采样周期。在系统初始化时 $\hat{\theta}$ 的初始值设为 0, sector 的初始值也设为 0。在确定了扇区后, 可确定合成 \vec{u} 的两个电压空间矢量 \vec{u}_l 和 \vec{u}_m 对应哪两个有效电压空间矢量。如图 6 中电压空间矢量 \vec{u} 在 3 号扇区中, 则 \vec{u}_l 和 \vec{u}_m 分别对应有效电压空间矢量 (110) 和 (100), T_l 和 T_m

分别是 \bar{u}_l 和 \bar{u}_m 的在一个采样周期 T_{pwm} 内对应的作用时间。 $T_l+T_m+T_0=T_{pwm}$ ，其中 T_0 为零矢量 (000) 或 (111) 作用的时间。

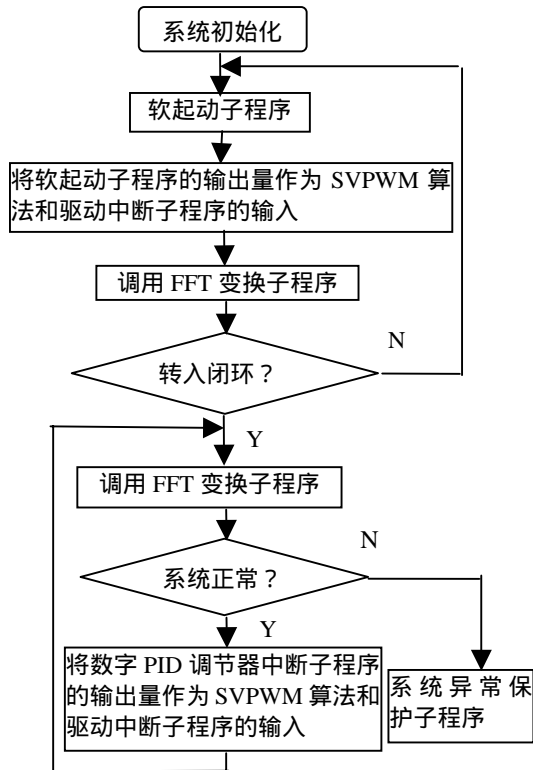


图 7 SVPWM 的算法及驱动程序流程图 (即定时器 1 下溢中断子程序)

SVPWM 程序的硬件驱动部分要完成的任务是设置 DSP 芯片 TMS320LF2407A 中相应的寄存器^[5], 包括:

(1) 对 COMCONA 寄存器的第 12 位置 1, 允许使用空间矢量 PWM 功能。

(2) 根据电压空间矢量所处的扇区和旋转方向, 将方向参数写入 ACTRA 寄存器的第 15 位, 其中 0 代表逆时针, 1 代表顺时针。将起始基本电压空间矢量的 \bar{u}_x 的开关状态写入 ACTRA 寄存器的第 12~14 位。

(3) 将与 T_l 和 T_m 对应的比较值写入比较寄存器 CMPR1 和 CMPR2。

4 实验结果和结论

实验验证, 由于采用了软启动技术本系统启动快速而且平稳。在系统快速稳定后, 改变给定电压, 系统能快速响应, 输出稳定的三相交流正弦波电压, 且输出电压精度可达 1%。图 8 为输出线电压的 SVPWM 波形及其经过输出滤波电路后的正弦波交流电压波形。本系统除能通过人机交互界面在现

场对系统进行控制和监视外, 还可通过串口通信在远处的 PC 机上对系统进行监控。

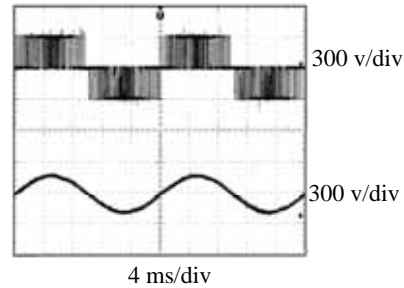


图 8 输出线电压的 SVPWM 波形和经过输出滤波电路后的线电压波形

三相逆变器电压空间矢量 PWM (SVPWM) 的优化控制^[1]本身比较复杂, 而是当系统采用闭环控制后, 就更需要系统具有高速数据采集和实时数据处理功能, 所以控制系统核心最好由数字信号处理器 (DSP) 构成。即使在采用了以 DSP 为核心的数字化的控制系统后, 若用纯软件的方法实现三相逆变器电压空间矢量 PWM 优化控制, 也会耗费系统很大一部分资源, 不利于系统实现其它的功能。TI 公司推出的 DSP 芯片 TMS320LF2407A 是一款比较经济实用的 DSP 芯片, 专门设置了空间矢量状态机这一硬件系统, 使 SVPWM 易于实现, 节约了有限的系统资源, 减少了软件工作量。系统应用软启动技术后, 启动快速而平稳, 启动性能得到很好的改善。系统采用闭环控制方式可提高系统的控制精度, 改善系统的动态特性, 增强系统的稳定性和鲁棒性。系统具有友好的人机交互界面和串口通信功能, 使用户在现场和远端都可以方便地对其进行监控。

参考文献:

- [1] 陈常清, 邓智泉. 优化开关模式在高频 SVPWM 逆变器中的应用. 电力电子技术, 2004 (3)
- [2] 叶云魁, 陶生桂, 龚熙国. 电力机车专用三电平逆变器的设计与应用. 电气传动自动化, 2005 (1)
- [3] 吴晓朝, 吴捷, 李全国. 一种基于满意度的 PID 参数整定方法. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2005 (2)
- [4] Hu Zhong and Wan Honghui. A Novel Generic Fast Fourier Transform Pruning Technique and Complexity Analysis. IEEE Trans. Signal Process. Vol.53, pp.274-282, Jan. 2005.
- [5] Texas Instruments. TMS320LF2407A, TMS320LF2406A, TMS320LF2403A, TMS320LF2402A, TMS320LC2406A, TMS320LC2404A, TMS320LC2402A, DSP Controllers. 2003, 9