

基于 DSP 的数字化 SVPWM 三相逆变器闭环系统

定明芳,刘昌玉

(华中科技大学 水电与数字化工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 基于空间矢量脉宽调制技术 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)电流谐波少、转矩脉动小、噪声低等优点设计了一种高性能的 SVPWM 三相逆变器系统。该系统采用具有高效缓冲电路、适用于高开关频率的三相逆变器主电路,控制系统基于 DSP TMS320LF2407A,具有高速数据采集和实时数据处理的特点。通过应用 SVPWM 算法、快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)算法和数字比例积分微分 PID(Proportional-Integral-Derivative)算法等数字处理技术,采用闭环控制,具有良好人机交互界面和通信功能。实验结果表明,该系统控制精度高、动稳态性能好。

关键词: 三相逆变器; SVPWM; DSP; 闭环系统

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)12-0041-04

0 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,基于脉宽调制 PWM(Pulse Width Modulation)的三相逆变器得到了广泛的应用。比较流行的 PWM 技术包括正弦波脉宽调制 SPWM(Sinewave Pulse Width Modulation)和空间矢量脉宽调制 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)。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。

本文所述系统以 TI 公司的 DSP 芯片 TMS 320 LF2407A^①作为核心,组成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。系统利用了软启动技术使系统启动平稳,改善了启动性能。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,设置比例积分微分 PID(Proportional-Integral-Derivative)参数。通过 RS-485 通信接口,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,使之成为可调实验用逆变电源。

1 系统硬件设计

1.1 硬件结构

SVPWM 三相逆变器系统硬件结构如图 1 所示,

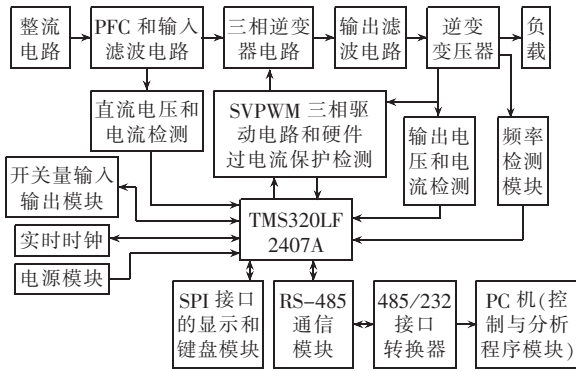


图 1 三相逆变器系统硬件结构图

Fig.1 Hardware structure of three-phase inverter system

本系统包括主电路,检测电路,驱动电路,控制电路及 SPI、SCI 通信接口电路 5 大部分。

a. 主电路包括整流电路、功率因数校正 PFC(Power Factor Correction)^[2]和输入滤波电路、三相逆变器电路、输出滤波电路^[3]、逆变变压器^[4]。

b. 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。

c. 驱动电路以 IR 2130 三相 IGBT 驱动芯片及其外围电路为基础形成的。

d. 控制电路以 DSP 芯片 TMS320LF 2407A 及其外围接口电路为基础形成。TMS320LF 2407A 芯片通过 SPI 接口与 MAX 6954 芯片连接,由 MAX 6954 及其外围电路驱动键盘和 LED 显示器。

e. TMS320LF 2407A 芯片接 SCI 接口,经高速光隔与 MAX 485 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 RS-485/232 转换器。

① Texas Instruments. TMS320LF2407A, TMS320LF2406A, TMS320LF-2403A, TM320LF2402A, TMS320LC2406A, TMS320LC2404A, TMS320LC2402A, DSP Controllers. 2003, 9.

1.2 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扑结构后,一定要加上相应的缓冲电路保护开关器件的主开关管^[5], L 和 C 是防止器件过高的 di/dt 和 du/dt 的2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 、 C_1 、 C_2 、 V_{D1} 、 V_{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 V_{T1} 、 V_{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:1个电容 C_1 在充电和放电过程中限制了2个开关管 V_{T1} 、 V_{T2} 的 du/dt ,没有最小开通时间限制,可回馈缓冲能量。

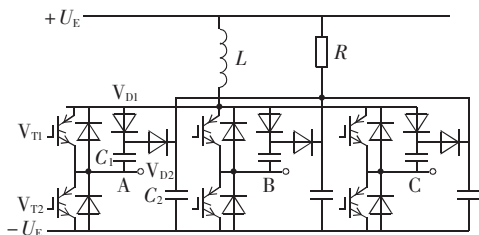


图 2 三相逆变器的主电路及其缓冲电路

Fig.2 Main circuit and snubber circuit of the three - phase inverter

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

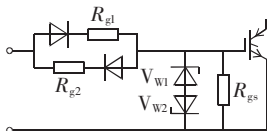


图 3 IGBT 的栅极保护电路
Fig.3 Protection circuit
of IGBT grid

关断时间。 R_{gs} 的大小与开关器件的反向电压承受能力有关, R_{gs} 越小, 开关器件关断时能承受的反向电压越高, 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 $10\text{ k}\Omega$ 左右。 V_{w1} 和 V_{w2} 为稳压管, 防止驱动电压超过开关器件的控制极最大耐压。

2 控制系统及其软件设计

2.1 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, U_g 为给定电压, U_d 是 220 V 交流电压经整流后输出给三相逆变器的直流电压。通过 TMS320LF2407A 从软件上实现 SVPWM 脉冲波和数字 PID 调节。

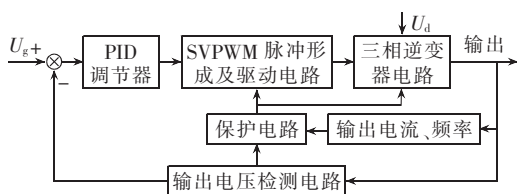


图 4 控制系统结构图

Fig.4 Structure of control system

2.2 软件设计

在 TMS320LF 2407A, 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 5 所示的主程序及快速傅里叶变换 FFT (Fast Fourier Transform) 变换子程序^[6-7]、数字 PID 调节器中断子程序、SVPWM 算法及驱动中断子程序^[8]、频率检测中断子程序、电压和电流检测中断子程序、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、软启动子程序^[9]等烧写进 TMS320LF 2407A 的 FLASH 内, 便形成了一个完整的 SVPWM 三相逆变器闭环控制系统。

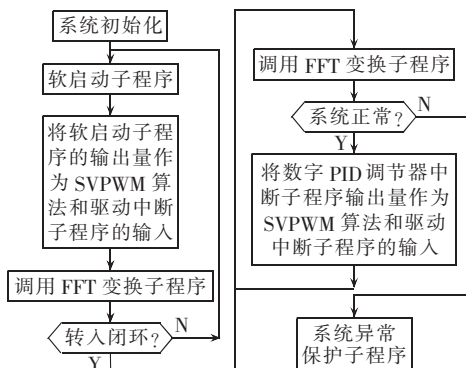


图 5 主程序流程图

Fig.5 Main program flowchart

本系统通过 TMS320LF 2407A 的 SPI 接口与显示、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。

2.3 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,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。TMS320LF 2407A 的事件管理器中含有 SVPWM 状态机硬件,通过对 TMS320LF 2407A 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 6 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 2 个零矢量 (000) 和 (111)。

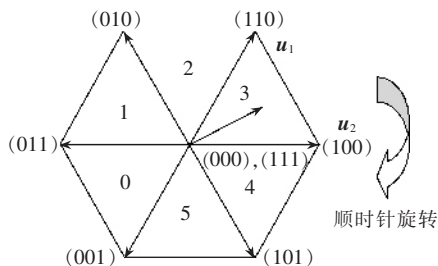


图 6 电压空间矢量图

Fig.6 Voltage space vector diagram

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 1 次 SVPWM 运算。在此之前根据用户的设置已经确定了输出电压频率 f ,输出线电压有效值 U_L ,直流母线电压 U 。图中, ϑ 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 ϑ 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 u 的 2 个电压空间矢量 u_1 和 u_2 对应该扇区的 2 个有效电压空间矢量,如图 6 中电压空间矢量 u 在 3 号扇区中,则 u_1 和 u_2 分别对应有效电压空间矢量(110)和(100)。 t_1 和 t_2 分别是 u_1 和 u_2 在 1 个采样周期 T_{PWM} 内对应的作用时间。 $t_1+t_2+t_0=T_{\text{PWM}}$,其中 t_0 为零矢量(000)或(111)的作用时间。

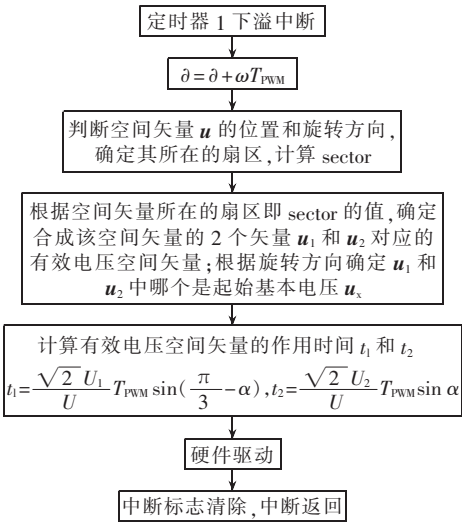


图 7 SVPWM 算法及驱动程序流程图
Fig.7 Flowchart of SVPWM algorithm and driver

SVPWM 程序的硬件驱动部分要完成的任务则是设置 TMS320LF 2407A 中相应的寄存器^[10],包括以下内容:

- a. 对 COMCONA 寄存器的第 12 位置 1,允许使用 SVPWM 功能;
- b. 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 u_s 的开关状态写入 ACTRA 寄存器的第 12~14 位;
- c. 将与 t_1 和 t_2 对应的比较值写入比较寄存器 CMPR₁和 CMPR₂。

3 实验结果

实验表明,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 所示为输出线电压的 SVPWM 波形 u_{ab} 及其经过输出滤波电路后的正弦波交流电压波形 u'_{ab} 。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。

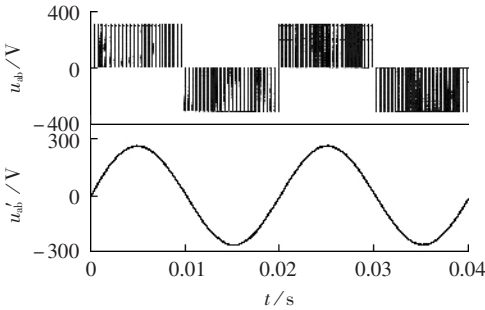


图 8 输出线电压的 SVPWM 波形及经过输出滤波电路后的线电压波形
Fig.8 SVPWM waveform and its filtered waveform of line voltage output

4 结语

三相逆变器电压 SVPWM 的优化控制本身比较复杂,而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 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 SVPWM 优化控制,也会耗费系统很大一部分资源,不利于系统实现其他的功能。TMS320LF 2407A 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,启动性能得到了很好的改善。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[J]. 电力电子技术,2004,38(3):52-54.
CHEN Chang-qing,DENG Zhi-quan. Applications of optimal switching patterns in a high-frequency inverter using Space Vector Pulse-Width Modulation (SVPWM)[J]. Power Electronics,2004,38(3):52-54.

[2] 杨益平,应建平. 一种新颖的功率因数校正控制技术研究[J]. 电力电子技术,2005,39(1):35-36.
YANG Yi-ping,YING Jian-ping. Research on a novel power factor correction circuit[J]. Power Electronics,2005,39(1):35-36.

[3] 宋强,刘文华,严干贵,等. 大容量 PWM 电压源逆变器的 LC 滤波器设计[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(3):345-348.
SONG Qiang,LIU Wen-hua,YAN Gan-gui,et al. LC filter design for high-power PWM voltage source inverter[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2003,43(3):345-348.

[4] 张宇,康勇,陈坚. 三相输出变压器对逆变器并联的影响[J]. 电力电子技术,2005,39(4):24-26.
ZHANG Yu,KANG Yong,CHEN Jian. Influence of three-phase transformers on parallel inverters[J]. Power Electronics,2005,39(4):24-26.

[5] 叶云魁,陶生桂,龚熙国. 电力机车专用三电平逆变电源的设计与应用[J]. 电气传动自动化,2005,27(1):26-29.
YE Yun-kui,TAO Sheng-gui,GONG Xi-guo. Design and making

- of three-level inverter special for railway engine[J]. Electrical Drive Automation, 2005, 27(1): 26-29.
- [6] 陈天翔, 段建东, 张保会, 等. 用傅里叶变换测量介质损耗因数 $\tan \delta$ 的软件同步算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 58-62. CHEN Tian-xiang, DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, et al. New emendatory FFT algorithm of measuring dielectric loss factor $\tan \delta$ [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 58-62.
- [7] HU Zhong, WAN Hong-hui. A novel generic fast Fourier transform pruning technique and complexity analysis[J]. IEEE Trans Signal Process, 2005, 53(1): 274-282.
- [8] 吴晓朝, 吴捷, 李全国. 一种基于满意度的 PID 参数整定方法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33(2): 39-42. WU Xiao-chao, WU Jie, LI Quan-guo. An algorithm for tuning PID parameters based on satisfactory degree[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2005,

33(2): 39-42.

- [9] 余致廷, 肖岸文, 董璞, 等. 基于分级变频高转矩软起动器的研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 31(6): 46-50. SHE Zhi-ting, XIAO An-wen, DONG Pu, et al. Study of high torque soft starter based on discrete frequency[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2004, 31(6): 46-50.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

定明芳(1976-), 男, 湖北洪湖人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术和电机控制 (E-mail: dingmingfang003@sohu.com);

刘昌玉(1962-), 男, 湖北洪湖人, 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。

DSP-based closed-loop control system of three-phase SVPWM inverter

DING Ming-fang, LIU Chang-yu

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

Abstract: Owing to less current harmonics, lower torque ripple and lower noise of SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) technique, a three-phase SVPWM inverter system is designed with high performance. Its main circuit has efficient snubber, applicable to high on-off frequency, and its control system is based on DSP (Digital Signal Processor) TMS320LF 2407A, suitable for high speed data sampling and real-time data processing. Applying SVPWM algorithm, FFT (Fast Fourier Transform) algorithm, digital PID (Proportional-Integral-Derivative) algorithm, a closed-loop control system of digital three-phase SVPWM inverter is made, which has friendly man-machine interface and communication function. Experiment results show that the system has higher control precision, better static and dynamic performance.

Key words: three-phase inverter; SVPWM; DSP; closed-loop control system