

基于 DSP 的 SVPWM 逆变电源研制

李巍, 冀捐灶, 郭庆, 刘开昌

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 传统逆变电源, 由于其多采用模拟式或模数混合式控制电路, 效率低、可靠性差, 难以满足高端电子设备的要求。为了改善逆变电源的输出波形质量, 提高其供电品质和可靠性, 结合当前科研任务, 通过分析空间电压矢量脉宽调制 (SVPWM) 的基本原理, 提出用 DSP 生成 SVPWM 波的逆变电源全数字控制方法, 在分析 TMS320LF2407A 数字信号处理器芯片特点的基础上, 给出系统实现的软硬件结构、控制算法和实现结果。原理样机试验表明, 该研制方案是可行和有效的。

关键词: DSP; SVPWM; 逆变器

Development of SVPWM inverter power supply based on DSP

LI Wei, JI Juan-zao, GUO Qing, LIU Kai-chang

(Engineering College, Airforce Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The control circuitry of the traditional inverter power supply are almost analog circuit or analog digital circuit, its efficiency is not high and the reliability is bad, and it is hard to satisfy the request of the high level electronics equipments. To improve the output wave quality of the inverter power supply, and raise its quality and reliability, this paper combines the current research task, through analyzing the basic principle of space voltage vector PWM (SVPWM), using DSP to produce SVPWM wave to accomplish control of the inverter power supply. Based on analyzing the characteristic of TMS320LF2407A DSP chip, the soft-hardware structure, control arithmetic and experiment result of the system design are given. The sample machine proves the possibility and the usefulness of the design scheme.

Key words: DSP; SVPWM; inverter

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)20-0060-04

0 引言

400 Hz 中频逆变电源在航空航天领域被广泛采用, 为日益增加的高端航空电子设备提供电源。该逆变电源要求电压波形接近于纯正弦, 且谐波含量不大于 5%, 工作电压为 115 V。目前大部分逆变电源控制电路采用的是模拟电路或模数混合电路, 系统维护不便且不易升级改造^[1]。本文结合具体科研任务, 采用具有较强运算能力和快速实时处理能力的 DSP 芯片生成空间电压矢量脉宽调制波 (SVPWM) 驱动 IGBT, 以改善逆变电源的输出性能, 提高可靠性。

1 空间电压矢量脉宽调制 (SVPWM) 原理

空间电压矢量脉宽调制是对三相电压源逆变器功率器件的一种特殊的开关触发顺序和脉宽大小的组合, 这种开关触发顺序将在定子线圈中产生三相互差 120°、波形失真较小的正弦波电流。实践证明, 和 SPWM 控制相比, SVPWM 具有直流电压利用率

高、器件开关次数少、易于实现数字控制等特点。正因如此, SVPWM 控制方法已不仅在电动机调速领域广泛使用, 而且还应用到其它负载的逆变电路中。

三相电压源逆变器原理如图1所示。逆变器桥臂的上下开关在任一时刻不能同时导通, 在不考虑死区效应时, 上下桥臂的开关呈互补状态。

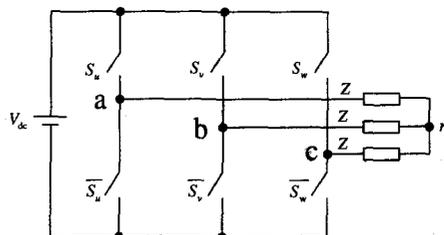


图1 三相逆变器原理图

Fig.1 Principle of three-phase converter

根据图1, 可以得到如下关系式:

$$\begin{cases} v_{an} = \left[S_a - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] V_{dc} \\ v_{bn} = \left[S_b - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] V_{dc} \\ v_{cn} = \left[S_c - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] V_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_a, S_b, S_c 为三相单极性二值逻辑开关函数。

对于 180° 导电类型的逆变器来说(如图 1 所示), 它的三个桥臂六个导电功率器件共形成八种开关模式, 空间电压矢量 PWM 法基于对三相电压转换成二相平面, 产生八个相应空间电压矢量(如图 2 所示): 六个有效空间电压矢量形成一个正六边形, 两个零矢量位于中心位置。对于任意给定的三相基波电压瞬时值, $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, 在复平面上可以定义电压矢量为:

$$v = 2(v_{an} + v_{bn}e^{j2\pi/3} + v_{cn}e^{-j2\pi/3})/3$$

6 个空间电压矢量将复平面分为 6 个扇区, 设采样周期为 T_s , T_1 和 T_2 为相邻两个矢量在一个周期中的持续时间, θ 为合成矢量相角, m 为 SVPWM 的调制比。假设参考向量 U_{ref} 在电压向量空间以角速度 ω 均匀旋转。如果 v 在第 III 扇区, 由伏安平衡法则和矢量合成的平行四边形法, 利用三角形正弦定理可得:

$$\begin{cases} T_1 = mT_s \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_2 = mT_s \sin \theta \\ T_{0,7} = T_s - T_1 - T_2 \end{cases} \quad (2)$$

同理可以计算 U_{ref} 在其它扇区内空间矢量作用的时间。在每个调制周期内, 为使逆变器输出波形对称, 把每个基本矢量的作用时间都一分为二, 同时两个零矢量 U_0 和 U_7 作用时间也相同。

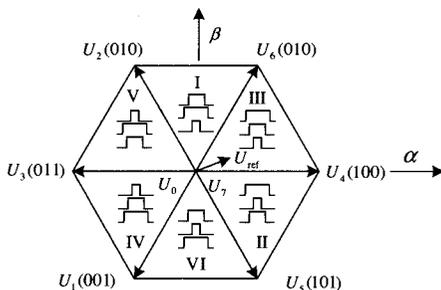


图 2 SVPWM 向量、扇区、波形

Fig.2 Vector, sector, wave of SVPWM

2 SVPWM 控制算法实现

通过对 SVPWM 信号的分析, 实现 SVPWM 的控制算法步骤如下:

2.1 分析各扇区边界处 U_α / U_β 的取值与 U_α 和 U_β 的关系

可通过如下规律判断 U_{ref} 所处的扇区。

扇区 $N=A+2B+4C$, 其中:

- 1) 如果 $U_\beta > 0$, 则 $A=1$; 否则 A 为 0。
- 2) 如果 $\sqrt{3} U_\alpha - U_\beta > 0$, 则 $B=1$, 否则 B 为 0。
- 3) 如果 $\sqrt{3} U_\alpha + U_\beta < 0$, 则 $C=1$, 否则 C 为 0。

2.2 判定相邻两矢量作用的时间

前面讨论了未饱和时各扇区相邻两矢量作用的时间。若出现饱和 ($T_s < T_1 + T_2$), 则取:

$$\begin{cases} T_1 = T_1 * T_s / (T_1 + T_2) \\ T_2 = T_2 * T_s / (T_1 + T_2) \end{cases} \quad (3)$$

2.3 确定比较器的切换点

先作如下定义:

$$\begin{cases} T_a = T_0 / 4 = T_s - T_1 - T_2 \\ T_b = T_a + T_1 / 2 \\ T_c = T_b + T_2 / 2 \end{cases} \quad (4)$$

那么可计算出空间矢量比较器切换点 T_{c1}, T_{c2}, T_{c3} 如下表所示:

表 1 空间矢量比较器切换时间表

Tab.1 Switch time of space vector comparator

扇区号	VI	I	II	III	IV	V
T_{c1}	T_b	T_a	T_a	T_c	T_c	T_b
T_{c2}	T_a	T_c	T_b	T_b	T_a	T_c
T_{c3}	T_c	T_b	T_c	T_a	T_b	T_a

2.4 PWM 输出

根据表 1 及式 (4) 计算出每个采样周期内各切换点 T_{c1}, T_{c2} 和 T_{c3} 后, 将它们与一定频率和幅值的三角载波作比较, 当 $T_{cx}(x=1,2,3)$ 与三角载波的值相等时就改变 PWM 波形的状态 (实现了占空比的填写)。

3 SVPWM 波生成

本文选用 TMS320LF2407A DSP 处理器产生 SVPWM 波。TMS320LF2407A 是 TI 公司 2000 系列芯片之一, 具有较强的运算能力和快速实时处理能力,

内含产生对称空间矢量PWM波形的事件管理器模块EVA和EVB, 每个事件管理器模块包括通用定时器、比较单元、捕获单元以及正交编码脉冲电路。通过对周期寄存器、比较寄存器和比较方式寄存器、死区控制寄存器以及计数模式合理的设置产生需要的PWM波形。具体步骤如下:

1) 设定调制频率, 定义比较输出引脚的输出方式(设置ACTRA[0~11]), 设置COMCONA寄存器(即将COMCONA[12]置1), 使能空间矢量PWM模式。

2) 将正弦波周期除以两倍通用定时器输入时钟的周期, 将该值送入周期寄存器。

3) 设置TICON的值, 定时器选择连续增/减计数模式, 以产生对称的PWM波形。

4) 将所需PWM周期(即载波周期)除以两倍通用定时器输入时钟的周期, 将该值送入周期寄存器($T1PR = T_s / 2T_{Gpimer}$)。

5) 根据 U_{ref} 的标幺值计算其在每均匀分布的 N 个时刻的电压 α , β 分量。

6) 根据 U_α / U_β 的取值与 U_α 和 U_β 的关系和公式 $N=A+2B+4C$ 确定扇区。

7) 根据所在扇区来即时装载比较方式寄存器ACTRA的值。

8) 根据 U_{ref} 的分量和所在扇区, 即时计算, 为比较寄存器赋值。

4 硬件设计

逆变器的硬件结构^[2]如图3所示, 主要由主电路、控制电路、驱动电路和变压器组成。主电路采用典型的AC/DC/AC逆变电路, 将输入的三相交流电经整流、滤波后供给逆变器。

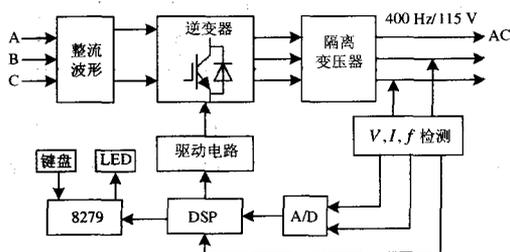


图3 逆变器的硬件结构图

Fig.3 Hardware structure of inverter

系统控制部分由TMS320LF2407A DSP、信号检测电路、驱动与保护电路等部分组成, 主要完成逆变桥SVPWM驱动信号的产生、信号检测及故障

处理、故障显示、键盘按键检测及逻辑控制等。DSP是控制系统的核心, 它接收外部信息, 按预定算法实时计算三相PWM波形数据, 并由它产生三相6路PWM信号, 然后再经驱动电路去驱动逆变功率开关, 完成三相SVPWM逆变。

驱动电路采用日本三菱公司为驱动IGBT设计的专用集成电路M57959L及其外围电路构成。DSP输出SVPWM信号可通过驱动模块M57959L直接驱动IGBT管。当M57959L检测到IGBT管上的过流信号持续时间大于 $2.5 \mu s$ 时, 则发出故障信号, 否则保护电路不动作。故障信号产生EXTINT中断, 封锁各路SVPWM信号, 快速关断IGBT。

在逆变器中, 每只开关元件上都另配有缓冲保护电路, 逆变器经隔离变压器输出3相115 V/400 Hz交流电。

5 软件设计

为了提高程序执行的速度和效率, 本文采用汇编语言编写程序。主程序完成系统的初始化, 对各参数值进行设定, 并对主电路进行控制。主程序采用顺序结构, 在程序执行过程中, 对电压、电流和频率等重要参数进行监控, 各监控值经LED显示。在监控过程中, 若发现故障, 则对故障进行报警、并快速封锁触发脉冲、跳闸以保护主电路。由于TMS320LF2407A DSP处理器芯片特点之一是有完善的保护功能, 只要在命令寄存器中写入相应的控制命令字, 系统就能在发生故障时立即封锁脉冲。主程序流程图如图4所示。

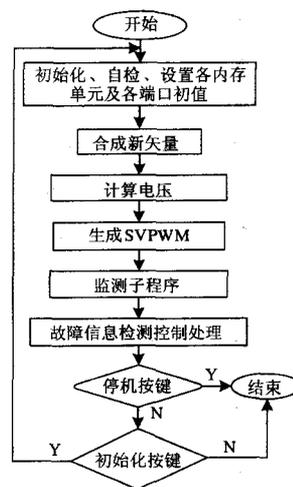


图4 主程序流程图

Fig.4 Flow chart of the main program

6 实验结果和结论

据文中所述方案, 设计并制作了一台功率为

500 W 的逆变电源原理样机。实验结果表明:通过合理安排零矢量作用时间,可以有效改善 PWM 谐波特征,使谐波减小,并且提高了电压利用率。实现 SVPWM 算法简单方便,采用电压空间矢量 PWM 作为信号源,电流谐波少,脉动小,噪音低,不但控制电路简单,而且系统的可靠性也得到了很大提高。功率器件的开关频率为 20 kHz,输出电压为 AC115 V/400 Hz。其实验波形如图 5 所示。

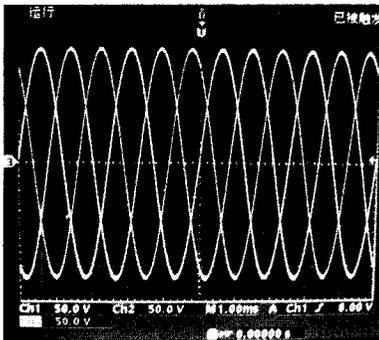


图 5 样机的实验波形

Fig.5 Wave of the sample inverter

由实验结果表明系统控制方案的正确性,输出电压的谐波得到有效抑制。由于采用的 M57959L 驱动电路具有自保护功能,使得 IGBT 逆变器的工作更加可靠。经过测试得到:电压稳定度小于 1%,频率稳定度为 0.05%,总谐波含量为 3%。若超负载达到 180%时,电源立即自动关闭,实施保护。

参考文献

- [1] 陈天锦,姚为正.基于 DSP 控制的逆变电源装置的研究[J].继电器,2004,33(4):39-44.

CHEN Tian-Jin, YAO Wei-zheng. Study of Inverter Supply Device with DSP Based Control[J].Relay, 2004,33(7):39-44.

- [2] 吴定会,李三东,纪志成.基于 dSPACE 空间电压矢量 PWM 设计与实现[J].电力电子技术,2005,39(1):22-24.
WU Ding-hui, LI San-dong, JI Zhi-cheng. Design and Realization of Space Voltage PWM based on dSPACE [J]. Power Electronics, 2005,39(1):22-24.
- [3] Pinto J O P, Bose B K, de Silva L E B, et al. A Neural Network-Based Space-Vector PWM Controller for Voltage Inverter Induction Motor Drive[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2000, 36(6):1628-1636.
- [4] 冯玉生.400Hz 静止式逆变电源车的研究[J].机电工程, 2004,21(5):41-43.
FENG Yu-sheng. Research of 400 Hz Static-inverter Type Vehicular[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2004,21(5):41-43.
- [5] 王晶晶,徐国卿,王麾.基于 DSP 的两种 SVPWM 技术实现方案研究[J].电工技术杂志,2003,(1):39-42.
WANG Jing-jing. Study and Realization of Two Different SVPWM Technique with DSP[J]. Electrotechnical Journal, 2003,(1):39-42.

收稿日期:2007-03-06;

修回日期:2007-04-24

作者简介:

李巍(1982-),男,硕士研究生,研究方向为电能处理与监控;E-mail:liwei20012008@126.com

冀捐灶(1966-),男,硕士,副教授,研究方向为现代电力电子工程、电能处理与监控;

郭庆(1981-),男,博士研究生,研究方向为电能处理与监控。

(上接第 42 页 continued from page 42)

- [5] 冯剑红,谢汶.电力信息安全体系结构研究及安全策略[J].四川电力技术,2006,29:59-62.

FENG Jian-hong, XIE Wen. Research of Electric Power Information Security Architecture and Its Security Strategy [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2006, 29: 59-62.

- [6] 刘岩,伍祥生.数字水印技术及其在电力系统中的应用[J].电力信息化,2005,(3).

LIU Yan, WU Xiang-sheng. The Technology of Digital Watermark and the Application on Power System [J]. Power Information,2005,(3).

- [7] 吴军基,盛琪.小波数字水印在电力系统信息安全中的

应用[J].电力自动化设备,2004,(24).

WU Jun-ji, SHENG Qi. Application of Wavelet-based Digital Watermark in Power System Information Security [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,(24).

收稿日期:2007-01-21;

修回日期:2007-06-11

作者简介:

尹成群(1953-),男,教授,主要研究方向为应用电子,信号与信息处理;

李丽(1982-),女,硕士研究生,主要研究方向为视频水印;E-mail:li20040504@126.com

吕安强(1979-),男,硕士研究生,助教,主要研究方向为图像与视频水印技术、信道编码。