

# 一种基于 TMS320F2812的交流电机控制方案的实现

任先文<sup>1</sup>, 张吉<sup>1</sup>, 刘辉<sup>1</sup>, 孙严<sup>2</sup>, 解东光<sup>1</sup>, 谢立汀<sup>1</sup>, 谷延辉<sup>1</sup>

(1. 东北电力学院, 吉林 吉林 132012; 2. 京能热电股份公司, 北京 100041)

摘要: 叙述了三相交流电机空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 的原理, 探讨了采用空间矢量脉宽调制三相桥式电压型逆变器的电压输出能力。介绍了一种基于 DSP 生成 SVPWM 波形的方法, 给出了采用最新的 TMS320F2812 DSP 实现 SVPWM 控制的方案, 最后给出了在三相交流电机上的试验结果。

关键词: 数字信号处理器; 空间矢量脉宽调制; TMS320F2812; 矢量控制

中图分类号: TM762; TM34 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)02-0054-04

## 0 引言

在交流电机变频调速中 PWM 控制已经得到了日益广泛的应用, 其中经典的正弦脉宽调制 (SPWM), 它主要着眼于使逆变器输出的电压尽量接近正弦波, 使 PWM 电压波的基波成分尽量大, 谐波成分尽量小, 但是该方法仅仅是一种近似, 抑制谐波的能力有限。自德国西门子公司的 F. BLASCHKE 在 70 年代首先提出异步电机矢量控制理论以来, 矢量控制理论得到了不断的完善。电压空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 是把逆变器和电机视为一体, 控制电机获得幅值恒定的圆形旋转磁场。它能够明显地减少逆变器输出电压的谐波成分及电动机的谐波损耗, 降低转矩的脉动, 而且逆变器输出线电压基波最大幅值为直流侧电压, 这比正弦脉宽调制逆变器输出电压高出 15%<sup>[2]</sup>。在电机控制中, 由于电机的电气时间常数较小, 一般的微控制器不能满足要求, 所以, 在变频调速控制领域应用数字信号处理器 (DSP), 可使系统向高可靠性、高性能和维护方便的全数字方向发展。TI 公司最新推出的 TMS320F28xx 系列芯片 TMS320F2812, 可用于各种数字伺服控制和嵌入式控制系统, 是到目前为止用于数字控制领域性能最好的 32 位定点 DSP 系列芯片。为此, 本文基于 TMS320F2812 分析了空间矢量脉宽调制技术的基本原理, 利用 TMS320F2812 专用于 SVPWM 波形生成的硬件电路, 提出了新的 SVPWM 控制算法, 并研究了其工程实现。

## 1 SVPWM 的基本工作原理

空间电压矢量调制法是以三相对称正弦波电压供电时交流电机的理想磁通圆为基准, 用逆变器不同的开关模式所产生的实际磁通去逼近基准圆磁

通, 并由它们比较的结果决定逆变器的开关状态, 形成 PWM 波形。图 1 给出了典型的逆变器结构图<sup>[1]</sup>。

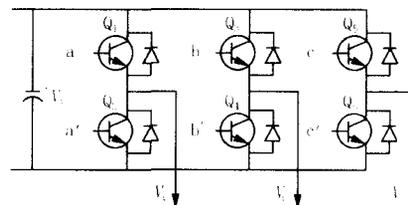


图 1 逆变器结构图

Fig 1 Structure of inverter

图 1 中所示的位于同一桥臂的功率管 (如:  $Q_1, Q_2$ ) 的导通状态是相反的。当同一桥臂的上桥臂功率管导通时, 下桥臂功率管一定是关断的。假设功率管导通状态为 1, 关断状态为 0。我们只通过上桥臂功率管的开关状态 (这里表示成开关向量  $[a, b, c]^T$ ), 就可以推算出线电压向量  $[V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}]^T$  及相电压向量  $[V_a, V_b, V_c]^T$ :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $V_{dc}$  为逆变桥的输入直流电压。

根据图 1, 可以得出功率管的通断状态有 8 种模式, 如表 1 所示。

假定 d - q 平面的 d 轴和 q 轴分别对应于一个交流电动机的定子几何轴的水平 and 垂直方向, 将三相电压矢量变换到 d - q 坐标系下的 d - q 变换为:

$$T_{abc-dq} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

表 1 功率管开关状态及对应的相电压和线电压

Tab 1 Switches state of power tube and corresponding phase and line voltages

a管	b管	c管	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>	V <sub>ab</sub>	V <sub>bc</sub>	V <sub>ca</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	1	1
0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0

通过该变换可以得到代表三相相电压和的空间矢量。通过同样的变换,对应于 8 组开关模式的相电压可以在图 2 所示的 d-q 平面上示出。通过进行一个 d-q 变换,可以把 8 种组合方式相对应的相电压映射到一个 d-q 平面上,这等效于把 3 个向量(a, b, c)的投影映射到一个垂直于向量(1, 1, 1)的二维平面上去,这样就产生了 6 个非零向量和两个零向量<sup>[3]</sup>。非零向量形成了图 2 所示的六边形的轴,相邻两个非零向量之间成 60 角,零向量位于原点,它并不向电动机提供电压。这 8 个向量被称作基本空间向量,记做 U<sub>0°</sub>, U<sub>60°</sub>, U<sub>120°</sub>, U<sub>180°</sub>, U<sub>240°</sub>, U<sub>300°</sub>, U<sub>000</sub>, U<sub>111</sub>。而对给定的输出电压进行该变换就可以得到 d-q 平面下的给定参考电压 U<sub>out</sub> 的时间, U<sub>x</sub>, U<sub>x±60°</sub> 形成了包含 U<sub>out</sub> 在内的扇区。假定 PWM 的周期 T<sub>PWM</sub> 很小,且 U<sub>out</sub> 的变化相对较慢,则由式(4)可得式(5):

$$\frac{1}{T} \int_0^{(n+1)T} U_{out} dt = \frac{1}{T} (T_1 U_x + T_2 U_{x\pm 60^\circ}) \quad (4)$$

n = 0, 1, 2, ..., T<sub>1</sub> + T<sub>2</sub> - T

$$\int_0^{(n+1)T_{PWM}} U_{out} dt = T_{PWM} U_{out} = (T_1 U_x + T_2 U_{x\pm 60^\circ}) \quad (5)$$

n = 0, 1, 2, ..., T<sub>1</sub> + T<sub>2</sub> - T<sub>PWM</sub>

由式(5),得出在每个 PWM 周期,给定的参考电压 U<sub>out</sub> 可以通过逆变器在开关模式 U<sub>x</sub> 和 U<sub>x±60°</sub> 下持续时间 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> 来合成。由于 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> 的和小于等于 T<sub>PWM</sub>, 逆变器需要把零向量嵌入到一个周期的剩余时间。由此,式(5)变成了式(6):

$$T_{PWM} U_{out} = T_1 U_x + T_2 U_{x\pm 60^\circ} + T_0 \cdot (O_{000} \text{ or } O_{111}) \quad (6)$$

参考电压矢量是通过把给定三相相电压通过 d

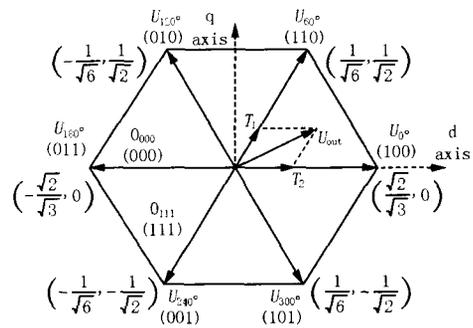


图 2 空间电压矢量

Fig 2 Space voltage vectors

- q 变换得到的,当给定输出电压是互差 120 的三相正弦电压时, U<sub>out</sub> 变成了一个绕 d-q 平面原点以所给定的频率为频率来旋转的向量, U<sub>out</sub> 的幅值的轨迹被限于由基本空间矢量形成的六边形之内。由此我们得出,合成的 U<sub>out</sub> 的最大幅值为 v<sub>dc</sub>√2, 相应的基本线电压和相电压输出电压的最大有效值为 v<sub>dc</sub>√2, v<sub>dc</sub>√6, 是普通 SPWM 技术所能提供电压的 2√3, 因此 v<sub>dc</sub> = √2 V<sub>RATE</sub>, 其中 V<sub>RATE</sub> 为电机的额定电压,图 3 所示为在假定参考电压 U<sub>out</sub> 位于由 U<sub>0°</sub>, U<sub>60°</sub> 所形成的扇区内时的空间矢量 PWM 波形。

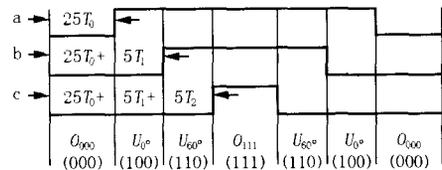


图 3 空间矢量 PWM 波形

Fig 3 Waveform of space vector PWM

## 2 SV PWM 在三相交流感应电机中的应用

### 1) 系统部分

如图 4 所示,本系统采用开环控制,并利用交直交电压源型变频器向电机供电。

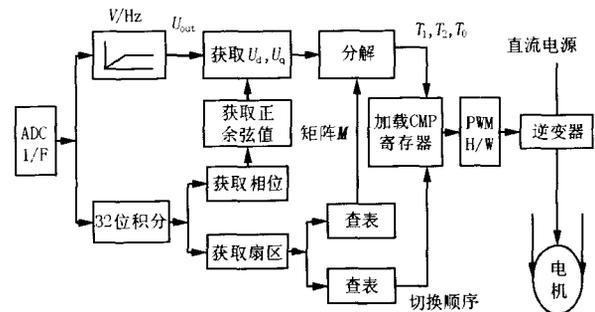


图 4 系统结构图

Fig 4 Structure of the system

## 2) 硬件部分

硬件部分用 DSP 加 IPM 智能功率模块 (PM75CSA120) 来实现, 其中 DSP 部分采用了德州仪器公司 (TI) 最新推出的 TMS320F2812。TMS320F2812 DSP 实现了高性能数字信号处理器 (DSP) 与高精度模拟及闪存的完美结合。它的主要性能有:

a 150 MIPS 的执行速度使得指令周期缩短为 67 ns, 从而提高了控制器的实时控制能力。

b 高性能的 32 位 CPU, 单周期 32  $\times$  32 MAC 操作, 这种单周期性操作是微处理器本质的变革。

c 基于 C/C++ 高效 32 位 TMS320C28x<sup>TM</sup> DSP 核心, 与 TMS320F24x/LF240x 程序代码通用, 并支持 DSP/BDS<sup>TM</sup> 实时操作。

d 片内存储器空间为 36 k  $\times$  8 bit, 内含 128 k FLASH 可用于在开发及对现场软件进行升级时的简单再编程。有 128 bit 加密位。

e 结合了 32 位数字处理能力, 由独特的 'Q-math' 程序库支持, 该函数库可显著简化多应用开发, 这种结合使设计人员在几秒钟内就可将浮点算法通过端口与定点处理器相连——比在传统 16 位设备中的数学算法转换速度快得多。

f 12 位 ADC, 16 通道, 最快转换速度: 80 ns, 并且其双采样装置可在紧密的控制环路中提供关键的支持。

g 包括两个 EV 模块, 每个 EV 模块包括通用定时器, 全比较单元, CAP 和 GEQ 电路。这两个 EV 模块可以驱动 2 个三相电机或者 4 个两相电机。

## 3) 软件部分

基于恒 V/F 比原理及 SVPWM 技术的三相交流感应电机控制算法, 主要包括以下几步:

a 配置时间和比较单元以产生对称 PWM 波。

b 获得给定速度。

c 利用 V/F 函数得到参考电压向量的幅值。

d 得到基于给定频率的  $U_{out}$  相。

e 决定  $U_{out}$  在哪个扇区, 分解  $U_{out}$  以得到  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_0$ 。

f 决定开关模式和次序, 把计算好的比较值装载到相应的比较寄存器。

主程序流程图如图 5 所示。

本算法是用 32 位积分法得到参考电压向量的相角, 用象限映射法计算正弦和余弦函数, 利用扇区表查找分解矩阵及 PWM 通道触发次序。GP 定时器 1 中利用全比较单元来产生 PWM 输出的时间基

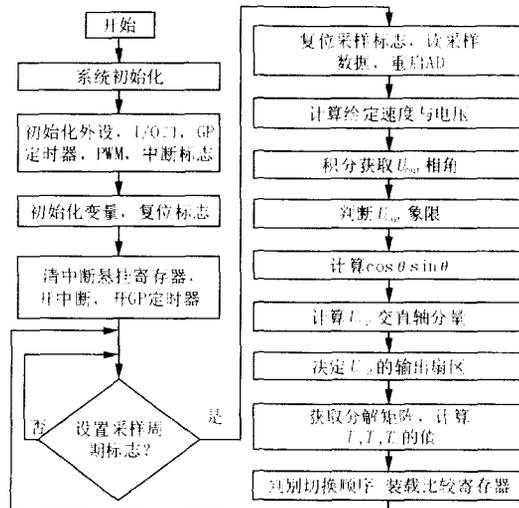


图 5 程序流程图

Fig 5 Flow chart of the program

准, GP 定时器 2 用于对采样周期进行定时, 它可以对 PWM 采样周期单独控制。一个 AD 通道被用于输入速度给定。

部分程序如下:

LT S\_W ; 通过 32 位积分获得 角

MPY T\_sample ;  $D - 9 * D11 = D(2 + 1)$

PAC ;

ADDS THETA1;

ADDH THETAH;

SACH THETAH;

SACL THETA1; 累加:  $D3 + D3 = D3$

SUBH theta\_360; 与  $2 * \pi$  比较:  $D3 - D3 = D3$

BLEZ Theta\_in\_limit; 判断 角是否在限定值范围内

SACH THETAH;

ZALH THETAH;

ADDS THETA1;

ADD one, 15;

SACH theta\_r;

## 3 试验结果

用一个四极三相交流感应电机做试验, 在信号频率为 25 Hz, 载波频率为 20 kHz 时我们得到了如图 6 所示的结果, 图中是电动机电流的波形图和频谱图。以 13 个周波的数据来分析, 从频谱图中可以看出, 电流基波的频谱泄漏很小, 3 次谐波几乎为零, 5、7 次谐波已经看不到了。由电流波形图还可看出与一般的 SPWM 调制波形相比, 该电流波形是比较光滑的。

## 4 结束语

本文介绍了 SVPWM 技术的基本理论, 并采用

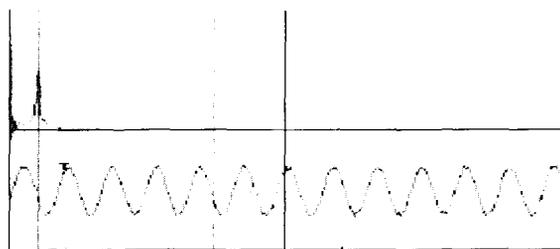


图 6 电流波形及频谱图

Fig 6 Current waveform and spectrum response

此技术使用 TMS320F2812 DSP对交流电机实现了全数字控制,同一般的 SPWM 调制技术相比减少了谐波。由于该调制技术的波形对称,可以减少电机的铜耗,从而提高了电机效率。并且本文的硬件系统成本较低,是一种比较理想的控制方法。

#### 参考文献:

- [1] Murray A, Kettle P. Towards a Single Chip DSP Based Motor Control Solution[J]. Proceeding PC96, Nurem-

berg, 1996, 5 (5) : 315-326

- [2] 杨贵杰,等. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (5): 79-83.

YANG Gui-jie, et al Study on Method of the Space Vector PWM [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (5): 79-83.

- [3] Texas,徐科军,等. TMS320LF/LC24系列 DSP的 CPU与外设[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

Texas, XU Ke-jun, et al CPU and Peripherals of TMS320LF/LC24 DSP Controllers [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

收稿日期: 2004-05-18; 修回日期: 2004-07-12

#### 作者简介:

任先文 (1954 - ),男,教授,研究方向为微机在电力系统的应用;

张吉 (1978 - ),男,硕士研究生,研究方向为微机在电力系统中的应用; E-mail: zhangji78@126.com

刘辉 (1979 - ),男,在读硕士研究生,研究方向为电力电子、无功补偿。

### Implementation of a control scheme for AC motor based on TMS320F2812

REN Xian-wen<sup>1</sup>, ZHANG Ji<sup>1</sup>, LU Hu<sup>1</sup>, SUN Yan<sup>2</sup>, XIE Dong-guang<sup>1</sup>, XIE Li-ting<sup>1</sup>, GU Yan-hui<sup>1</sup>

(1. Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China;

2. Jingneng Thermoelectricity Corporation, Beijing 100041, China)

**Abstract:** This paper presents the principle of space vector PWM of the three-phase AC motor, discusses the output capability of the three-phase bridge voltage source inverter. It introduces a method of generating waveform of SVPWM based on DSP, and provides implementation of the control scheme for SVPWM using the latest TMS320F2812. Finally, the experimental results in three-phase AC motor are provided.

**Key words:** DSP; SVPWM; TMS320F2812; vector control

(上接第 49 页 continued from page 49)

#### 作者简介:

卢 洵 (1980 - ),女,硕士研究生,主要研究方向为电力市场软件开发和电力调度; E-mail: xunfeelings@21cn.com

姚建刚 (1952 - ),男,教授,博士生导师,主要从事电力市场和配电自动化方向研究;

周乐青 (1978 - ),男,硕士研究生,主要研究方向为计算机网络。

### Application of MapX in short circuit calculation system

LU Xun<sup>1</sup>, YAO Jian-gang<sup>1</sup>, ZHOU Le-qing<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Software School, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** On the basis of brief introduction to the function and characteristic of MapX component, regarding to the complexity of power network structure and the difficulty of system data management, this paper puts forward the technology and method of designing short circuit calculation GIS application platform with MapX component, and frames the short circuit calculation system structural model based on MapX component. In the engineering applications of software development, this model shows many merits such as flexible framework, convenient use, and so on.

**Key words:** MapX component; short circuit calculation; electric power network