

文章编号: 1008-0171(2002)04-0022-05

# 基于 DSP 的永磁无刷同步电机的控制系统

斯燕跃<sup>1</sup>, 胥布工<sup>1</sup>, 秦 忆<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 自动控制工程系, 广州 510640; 2 佛山科技学院 校长办公室, 佛山 528000)

**摘要:** 讨论了采用新一代 DSP (TM S320LF2407) 设计三相永磁无刷同步电机控制系统的方案及电机位置信号的确定方法, 给出了控制系统结构原理图, 分别用软件和硬件实现, 探讨了磁场定向控制。

**关键词:** 永磁无刷同步电机; 磁场定向控制; 空间电压矢量 PWM; Clarke; Park

**中图分类号:** TM 351 **文献标识码:** A

永磁无刷电机由于其无刷、高性能、小转动惯量、小体积、低噪声、免维护等优点, 在高性能位置伺服领域里应用非常广泛。永磁无刷电机由具有三相对称绕组的定子和材料为永磁体的转子组成。根据其反电势波形的不同, 可以分为矩形波永磁无刷直流电机(BLDC)和正弦波永磁无刷同步电机(PMSM)两种<sup>[1]</sup>。本文主要讨论永磁无刷同步电机的基于 DSP 的控制系统设计。控制策略采用磁场定向控制, 正弦波的产生则采用空间电压矢量 PWM 波。

## 1 永磁无刷同步电机的控制策略

永磁无刷同步电机采用磁场定向控制的控制策略: 把检测到的相电流转化到与转子旋转磁场同步的坐标系中, 并使电机转矩与励磁磁场正交, 实现转矩和励磁磁场的充分解耦<sup>[2]</sup>, 且使与电机励磁磁场方向相同的  $d$  轴电流  $i_d$  为 0。磁场定向控制是矢量控制的一种特殊形式, 由于电机转矩与励磁磁场正交, 此时, 每安培定子电流产生的转矩值最大, 可以获得最高的转矩电流比。

为了实现交流电机转矩控制和磁场控制的充分解耦, 需要将相电流经过 Clarke 和 Park 变换, 转换成与电机转矩方向相同的转矩电流  $i_{sq}$  和与电机励磁磁场方向相同的励磁电流  $i_{sd}$ , 如图 1 所示。其中,  $dq$  轴随转子以电角速度旋转, 它相对  $a$  参考轴的角度用  $\theta$  表示。

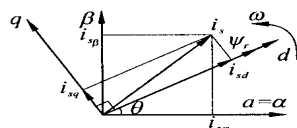


图 1 Park 变换

收稿日期: 2002-05-27

基金项目: 广东省高教基金资助项目(9937)

作者简介: 斯燕跃(1978-), 女, 浙江诸暨人, 华南理工大学硕士研究生, 主要从事控制理论与控制工程方面的研究工作。

Clark 变换将三相电流变换为两相电流, 即三相到两相静态坐标的变换, 因为三相永磁无刷同步电机定子绕组为三相对称接法, 所以  $i_a + i_b + i_c = 0$ , 有

$$i_{s\alpha} = i_a, \quad i_{s\beta} = i_a / \sqrt{3} + 2i_b / \sqrt{3}, \quad (1)$$

Park 变换的思想是从两相静态坐标到转子旋转坐标的转换, 则

$$i_{sd} = i_{s\alpha} \cos \theta + i_{s\beta} \sin \theta, \quad i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin \theta + i_{s\beta} \cos \theta. \quad (2)$$

为实现上述 Clarke 和 Park 变换, 需要随时得到电机的电位位置信号  $\theta$ , 而

$$\theta = p \times \varphi \quad (3)$$

为了实现磁场定向控制, 需要随时得到电机的转子机械位置信号, 即  $dq$  轴系相对于  $a$  轴的角度。通常由固定于转子轴上的增量式光电编码器得到该机械位置信号。

虽然 Clarke 变换和 Park 变换需要大量的计算, 但 TM S320LF2407 每条指令 33 ns 的运算能力, 使系统的实时计算成为可能, 而无需采用传统的查表方式, 从而使控制精度更高。

## 2 空间电压矢量 PWM

SV PWM 是一种优化的 PWM, 它从电机的角度出发, 主要着眼于使电机获得幅值恒定的圆形磁场即正弦磁通。用逆变器不同的开关模式近似产生 3 个独立的互差 120 的正弦电流信号, 由之产生的实际磁通去逼近由三相对称正弦波供电时产生的基准磁通圆, 从而达到较高的控制性能<sup>[2]</sup>, 使三相交流电机绕组电流的谐波成分及电机的弦波损耗最小, 电源电压利用率更大。

通过 1 个  $d-q$  变换, 可以把对应于逆变器八种开关组合模式的相电压映射到 1 个  $d-q$  平面上, 这样就产生了 6 个非零向量和两个零向量(其中 000 和 111 位于原点, 不向电机提供电压), 如图 2 所示。

SV PWM 控制的目标就是通过控制这些基本空间矢量的组合, 使空间电压矢量  $U_s$  按设定的参数圆形旋转。由图 2 可以看到, 任意时刻投影的电压矢量都落在 6 个区 ( $U_x \sim U_{x+60}$ ) 中, 可以根据这个投影的电压矢量确定相邻的两组功率逆变器开关模式, 并分别调整这两组功率逆变器的开通时间。为了补偿  $U_x$  的旋转频率, 插入零矢量, 作用时间为  $T_{00}$ , 即  $U_x$  由两个非零矢量和一个零矢量同时作用产生<sup>[1]</sup>。

如图 3 所示, 假设这个投影的电压向量落在  $U_0 \sim U_{60}$  区, 也即 1 区, 则

$$T = T_0 + T_{60} + T_{00}, \quad U_s = \frac{T_0}{T} U_0 + \frac{T_{60}}{T} U_{60}, \quad (4)$$

$$v_{s\alpha} = \frac{T_0}{T} U_0 + \frac{v_{s\beta}}{\tan 60^\circ}, \quad v_{s\beta} = \frac{T_{60}}{T} U_{60} + \cos 30^\circ \quad (5)$$

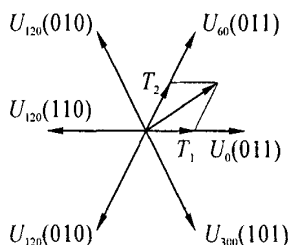


图2 功率逆变器开关状态和相电压图

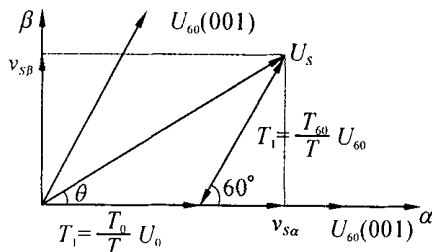


图3 电压矢量作用时间分解原理图

根据式(5),可以得到两组功率逆变器的开通时间分别为

$$T_0 = \frac{T}{2V_{DC}} (3v_{s\alpha} - \sqrt{3}v_{s\beta}), T_{60} = \sqrt{3} \frac{T}{2V_{DC}} v_{s\beta} \quad (6)$$

当投影的电压向量落在其他 5 个区的时候,可以通过类似的分析得到两组功率逆变器的导通关断状态,并计算出这两组功率逆变器的开通时间。

TM S320LF2407 的事件管理器有带死区控制单元的 PWM 波发生器,所以空间电压矢量 PWM 波的产生完全依靠软件实现,而无需添加其他硬件,使系统的硬件电路更加简练。

### 3 永磁无刷同步电机控制系统的硬件设计

由于 TM S320LF2407 的两个事件管理器完全相同,所以只分析其中一个事件管理器所带的控制系统就能说明问题。由于 TM S320LF2407 片内集成了大量用于电机控制的外围电路,所以由 TM S320LF2407 组成的系统外围电路相对比较简单,主要由以下几个部分组成,如图 4 所示。

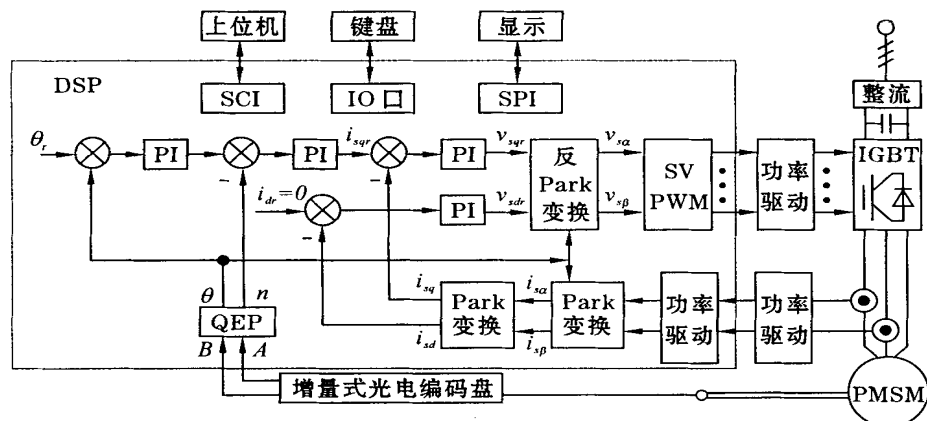


图 4 永磁无刷同步电机控制系统原理框图

电流检测采用磁平衡式霍尔元件。速度和位置检测采用增量式光电编码器。DSP 自带的 QEP 单元能对脉冲前后沿进行计数,即在无需添加任何硬件的情况下,使转速和位置的检测精度大大提高,并可根据两路脉冲的先后次序判别电机转向。从 SV PWM 出来的信号经隔离放大后驱动六个功率逆变器的导通和关断,使流过电机的电流波形为正弦波。系统用 SCI 接口完成与上位机的通讯功能。为增加系统的通用性,还设计了键盘和数码管显示,分别用 D 口及 SPI 完成与控制系统的通讯。为保证系统安全可靠的工作,利用 TM S320LF2407 每个事件管理器提供的 PDPNT 引脚实现伺服系统的各种保护功能。

### 4 永磁无刷同步电机控制系统的软件设计

永磁无刷同步电机控制系统的软件设计主要为图 4 中虚线内部分:采用三环控制结构,控制空间电压矢量 PWM 波的产生,使流过电机的电流信号为正弦波。

系统软件主要分为两个部分:主程序模块和中断服务处理程序模块。如图 5 和 6 所示。

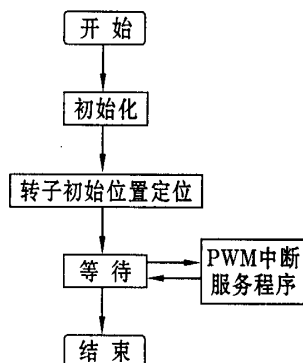


图5 主程序流程图

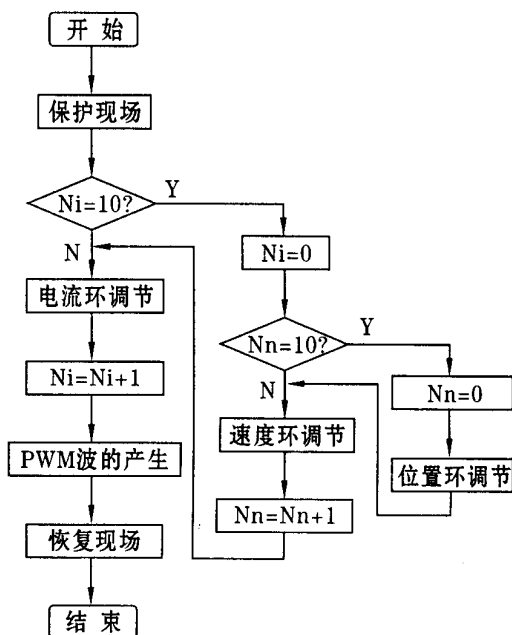


图6 PWM 中断服务程序

PWM 波的输出一般在 20~ 100 kHz 之间, 所以通常令 PWM 波的周期为 50  $\mu\text{s}$ 。由于 TM S320LF2407 执行每条指令 33 ns 的这种高速运算能力, 因此完全可以使电流环频率为 PWM 周期即 50  $\mu\text{s}$ ; 由于速度响应时间远小于电流响应时间, 所以速度环频率应小于电流环频率, 通常采用 10 倍的电流环频率; 同理, 位置响应时间又小于速度响应时间, 因此使位置环频率为 10 倍的速度环频率。

#### 4.1 永磁无刷同步电机速度的确定

电机初始位置确定方法是: 在正式启动电机前先把电机停在一个确定的位置。它的一般做法是给电机提供一个固定的电压矢量, 由该电压产生一个固定的电枢磁场, 将转子停在与该电枢磁场相平行的一个固定的位置。假设这个位置为电机的初始位置即零点, 以后控制过程中用到的转子位置信号都是相对于该初始位置而言的。

初始位置确定以后, 就要控制电机从该初始位置开始旋转, 并具有良好的动态和稳态性能。因此启动时, 先使电机的电角度信号在该初始机械位置信号的基础上增加 90°; 由于电流响应时间非常短, 所以电枢磁场立即从初始位置旋转 90°; 到达一个新的位置; 而机械响应时间相对电流来说很长, 所以在一个较短时间之内, 电机的转子还停在原初始位置, 这样的结果是使电枢磁场和转子励磁磁场之间相差了 90 的电角度。在这个角度的作用下, 转子开始跟踪电枢磁场旋转, 当电机开始从该初始位置正式旋转时, 编码器的输出才作为电机的位置和速度反馈信号。

此时 QEP 单元开始对两个正交脉冲信号进行计数。转子的当前位置信号由下式给出

$$\theta(t) = \theta(t - T_{\text{PWM}}) + \frac{\text{encode}(t) - \text{encode}(t - T_{\text{PWM}})}{\text{ENCODE}} \times 360^\circ; \quad (10)$$

其中,  $T_{\text{PWM}}$  为 PWM 的周期,  $[\text{encode}(t) - \text{encode}(t - T_{\text{PWM}})]$  为两次采样期间的脉冲增量, ENCODE 为电机每转一圈所输出的脉冲个数。

## 5 结论

采用 TI 公司新一代 DSP (TM S320LF2407) 设计的永磁无刷同步电机的控制系统跟采用 TM S320F240 设计的永磁无刷同步电机的控制系统相比较, 在大部分功能都相同的基础上, 有几个突出的优点: 运算速度更快, TM S320LF2407 的指令周期为 33 ns, 而 TM S420F240 为 50 ns; TM S320LF2407 的供电电压为 3.3 V, 而 TM S320F240 的供电电压为 5 V; AD 转换时间更短, TM S320LF2407 为 500 ns, 而 TM S420F240 为 6.6  $\mu$ s; TM S320LF2407 可以同时驱动两组电机运行, 而 TM S420F240 只能驱动一组电机; TM S320LF2407 有两个事件管理器, 功能更加强大, 而 TM S420F240 只有一个事件管理器, 功能相对比较狭隘。

永磁无刷同步电机采用磁场定向控制能实现转矩控制和磁场控制的充分解耦, 同时由于 DSP 的高速运算能力, 使这种具有复杂运算的控制成为可能。

## 参考文献

- [1] 张维娜, 孙 强. 基于 DSP 的高性能矢量控制系统[J]. 电力电子技术, 2001, (2): 39-41.
- [2] 王 妍, 杜军红, 陶伟宜, 等. 基于 DSP 的空间电压矢量法 PWM 的研究[J]. 电机与控制学报, 2000, 4(2): 98-105.

# A control system of permanent magnet synchronous motor based on DSP

SI Yan-yue<sup>1</sup>, XU Bu-gong<sup>1</sup>, QING Yi<sup>2</sup>

(1. Automation Department, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. President's Office, Foshan University, Foshan 528000, China)

**Abstract:** This paper presents in detail a control system of a 3-phase permanent magnet synchronous motor using TM S320LF2407 DSP, and shows a basic figure of the control system. An introduction about a hardware and software solution to the motor control using DSP is given. A solution to the accurate rotor position of the motor is also discussed. Field oriented control is chosen to be the strategy to control the motor. The space vector PWM is used to generate pseudo sinusoidal currents in the stator phases.

**Key words:** DSP; permanent magnet synchronous motor; field oriented control; space vector PWM; Clarke; Park