

# 基于 SVPWM 的永磁同步电机的舵机控制系统设计

## PMSM Steering Engine Control System Based on SVPWM

张翥阳 林 辉 李兵强

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710129)

**摘 要:** 为实现永磁交流同步电机的位置控制, 提出一种基于 DSPF2812 为控制器核心的位置控制方案。以 PMSM 矢量控制理论为基础, 采用空间电压矢量脉宽调制(SVPWM)算法, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建了永磁同步电机速度和电流双闭环仿真模型; 通过对电机的仿真, 给出了仿真波形。仿真结果达到了预期效果, 证明了该模型的有效性。

**关键词:** 永磁同步电机 空间矢量脉宽调制 矢量控制 Matlab 仿真模型

**DOI:** 10.3969/j.issn.1007-080x.2012.04.014

**Abstract:** In order to realize the position control of permanent magnet AC synchronous motor, the author put forwards a position control program based on the DSPF2812. On the basis of PMSM vector control theory and realizing method of SVPWM. Bulids the simulation model of the whole system with Matlab/Simulink. Two control loops are used, including inner current-loop and the outer speed-loop. By simulating the specific motor, the waveforms are presented. And the reasonability and validity has been proved.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor SVPWM vector control Matlab modeling and simulation

### 0 引 言

在相当长的时间内, 永磁同步电机没能在舵机领域得到广泛的应用, 其主要原因是电机的体积大, 质量大, 效率低, 机械传动机构较笨重, 齿轮传动间隙不可忽视, 系统的动态特性远远低于液压和气压舵机系统, 难以满足系统的性能要求。随着稀土永磁材料和新型大功率电子元器件的出现和发展, 电动舵机的应用越来越广泛, 因此建立永磁同步电机控制系统的仿真模型, 对优化整个控制系统具有十分重要的意义。本文在分析 PMSM 数学模型的基础上, 借助 Matlab/

Simulink 强大的仿真建模能力, 将整个 PMSM 控制系统分成几个独立的功能模块——PMSM 本体模块及测量模块、SVPWM 矢量控制模块、坐标变换模块、转速和电流 PI 调节模块, 并对这些模块进行有机整合, 搭建出 PMSM 控制系统的仿真模型。通过对实例电机的仿真, 分析了各种波形, 为 PMSM 舵机控制系统的分析和设计提供了有效的手段<sup>[1,2]</sup>。

### 1 PMSM 的数学模型

永磁同步电机在下述情况——忽略空间谐波, 设三相绕组对称, 所产生的磁动势沿气隙按正弦分布; 忽

**作者简介:** 张翥阳 1988 年生, 硕士研究生。研究方向为电力电子与电力传动技术。

林 辉 1957 年生, 教授, 博士生导师。主要研究方向为运动控制技术、智能检测技术等。

李兵强 1982 年生, 博士。主要研究方向为电力电子与电力传动技术。

略磁路饱和,各绕组的自感和互感都是恒定的;不考虑频率和温度变化对绕组电阻的影响;忽略铁心损耗——下<sup>[3]</sup>,运用坐标变换原理,可以得到 PMSM 在同步旋转两相坐标系下的数学模型,如式(1)、(2)所示。

$$u_d = L_d p i_d + p \psi_f - \omega_r L_q i_q + R_s i_d; \quad (1)$$

$$u_q = L_q p i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f + R_s i_q. \quad (2)$$

式中,  $u_d$ 、 $u_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$ 、 $L_d$ 、 $L_q$  为  $d$  轴和  $q$  轴的电压、电流、电感(V,A,H);  $R_s$  为定子绕组每相电阻( $\Omega$ );  $\omega_r$  为转子旋转的电角速度(rad/s);  $p$  为电机极对数。

## 2 PMSM 的矢量控制原理

永磁同步电机矢量控制的基本思想是设法模拟直流电动机转矩的控制规律,借助坐标变换,在磁场定向坐标上将电流矢量分解成产生磁通的励磁电流分量  $i_d$  和产生转矩的转矩电流分量  $i_q$ ,并使两分量相互垂直,彼此独立,然后分别进行调节以实现转矩控制,获得良好的去耦特性,从而实现对直流电动机的严格模拟。本文采用  $i_d = 0$  控制,根据永磁同步电机电磁转矩公式

$$T_e = p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

可知,在  $i_d = 0$  的情况下,电磁转矩  $T_e$  只与定子电流的转矩分量  $i_q$  成正比关系,即电磁转矩只受转矩分量的  $i_q$  影响;那么只要控制定子电流幅值就能控制电磁转矩  $T_e$ 。

## 3 基于 Matlab 的 PMSM 系统仿真

在 Matlab 的 Simulink 环境下,搭建了采用  $i_d = 0$  的双闭环系统仿真,其中双闭环的外环为转速环,内环为电流环,均由 PI 调节器构成。根据模块化建模的思想,将控制系统分割为各个功能独立的子模块。其中主要包括 PMSM 本体模块及测量模块、SVPWM 矢量控制模块、坐标变换模块、转速和电流 PI 调节模块。

### 3.1 坐标变换环节

坐标变换模块的目的,是从两相旋转坐标系  $d-q$  下的两相相电压  $u_d$ 、 $u_q$  向两相静止坐标系  $\alpha-\beta$  两相相电压  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$  的变换。矢量控制中用到的坐标变换有 Clark 变换、Park 变换、Park 逆变换。其变换矩阵如下:

$$\text{Clark 变换: } \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\text{Park 变换: } \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\text{Park 逆变换: } \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}. \quad (6)$$

根据以上变换矩阵所搭建的坐标变换模块如图 1 所示。

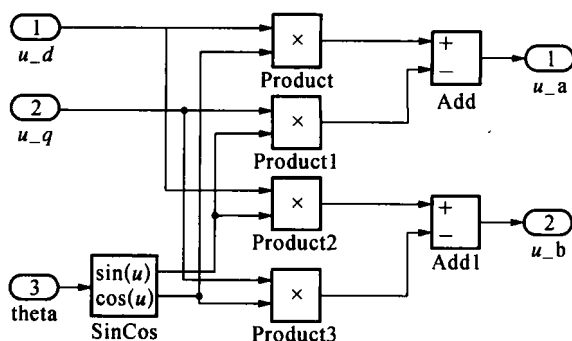


图1 坐标变换模块

### 3.2 SVPWM 模块

空间电压矢量脉宽调制技术(SVPWM),以三相正弦波电压供电时交流电机的理想磁通轨迹为基准,用逆变器的 8 种开关模式产生的实际磁通去逼近基准磁通圆,使电机获得幅值恒定的圆形磁场(正弦磁通),从而达到较高的控制性能。通过 8 个基本空间矢量中两个相邻的有效矢量及零矢量,并根据各自作用时间不同来等效电机所需的电压空间矢量  $u_{out}$ ,其原理如图 2 所示<sup>[4]</sup>。

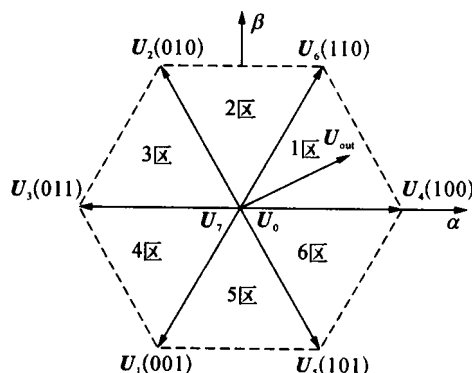


图2 电压空间矢量分布图

#### 3.2.1 扇区判断模块

确定电压矢量所属的扇区是非常重要的。8 个电压矢量把空间分为 6 个扇区,为了确定采样时刻电压

合成矢量位于哪一个扇区, 假设有中间变量  $u_{ref1}$ 、 $u_{ref2}$  和  $u_{ref3}$ , 按照坐标变换公式, 可得

$$\begin{aligned} u_{ref1} &= U_{\beta}; \\ u_{ref2} &= \frac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha} - U_{\beta}); \\ u_{ref3} &= -\frac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha} + U_{\beta}). \end{aligned} \quad (7)$$

如果  $u_{ref1} > 0$ , 则  $A = 1$ , 否则  $A = 0$ ; 如果  $u_{ref2} > 0$ , 则  $B = 1$ , 否则  $B = 0$ ; 如果  $u_{ref3} > 0$ , 则  $C = 1$ , 否则  $C = 0$ 。根据  $Sector = 4C + 2B + A$ , 可以确定扇区号。Sector 值与扇区号的对应关系为输入 [1 2 3 4 5 6], 对应值为 [2 6 1 4 3 5]。扇区判断模块结构见图 3。

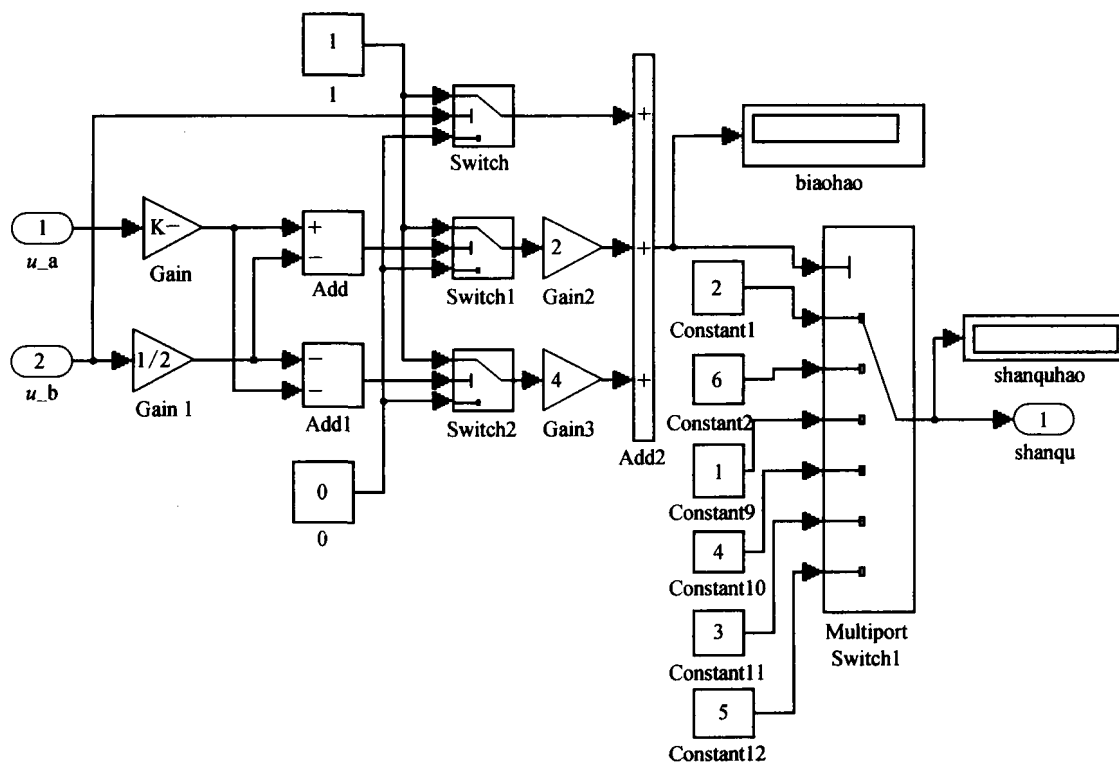


图 3 扇区判断模块

### 3.2.2 X、Y、Z 计算模块

X、Y、Z 可以根据以下公式得到:

$$\left. \begin{aligned} X &= T_s U_{\beta} \\ Y &= \frac{1}{2}T_s U_{\beta} + \frac{\sqrt{3}}{2}T_s U_{\alpha} \\ Z &= \frac{1}{2}T_s U_{\beta} - \frac{\sqrt{3}}{2}T_s U_{\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中,  $T_s$  是  $u_{out}$  的作用时间。X、Y、Z 计算模块结构见图 4。

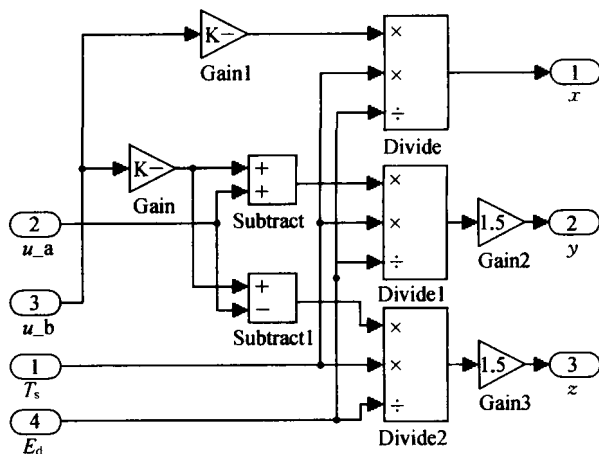


图 4 X、Y、Z 计算模块

3.2.3 基本矢量作用时间  $t_1$  和  $t_2$  计算模块

在 6 个扇区中  $t_1$ 、 $t_2$  与 3 个基本公式中  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的关系如表 1 所示<sup>[5]</sup>。

表 1 相邻电压矢量作用时间

Sector	1	2	3	4	5	6
$t_1$	$-Z$	$Z$	$X$	$-X$	$-Y$	$Y$
$t_2$	$X$	$Y$	$-Y$	$Z$	$-Z$	$-X$

由表 1 可知,只要知道了合成电压矢量当前所在的扇区,就可以通过表中的对应关系得到  $t_1$ 、 $t_2$  的值。 $t_1$ 、 $t_2$  的计算模块见图 5。

3.2.4 时间切换点  $T_{cm}$  模块

由公式(9)可以确定矢量的切换点  $T_{cm1}$ 、 $T_{cm2}$ 、 $T_{cm3}$ 。

$$\begin{cases} T_a = 0.25(T - T_1 - T_2); \\ T_b = T_a + 0.5T_1; \\ T_c = T_b + 0.5T_2. \end{cases} \quad (9)$$

和等腰三角波进行比较,就可以生成对称空间矢量 PWM 波形,将 PWM1、PWM3、PWM5 进行与非运算

就可以生成 PWM2、PWM4、PWM6。

3.3 PI 控制器模块

仿真中的电流环和速度环的调节器均采用 PI 调节,同时对控制器输出进行了饱和限制处理<sup>[7]</sup>,如图 6 所示。

4 参数选择及仿真结果

通过实测及计算,电机参数选取为:定子相绕组  $R = 0.15 \Omega$ ;定子  $d$  相绕组电感  $L_d = 2.7e - 5H$ ; $q$  相绕组电感  $L_q = 3.6e - 5H$ ;反电动势系数  $K_v = 5 V/1000 r/min$ (为线电压有效值;峰值为  $5\sqrt{2} = 7.07 V/1000 r/min$ );转动惯量  $J = 0.0007 kg \cdot m^2$ ;摩擦转矩系数  $T = 0.001$ ;极对数  $P = 2$ 。

速度控制采用分段 PID 控制,当速度误差绝对值大于等于  $100 r/min$  时,  $K_p = 1, K_i = 0$ ;速度误差小于  $100 r/min$  时,  $K_p = 1, K_i = 40$ 。电流控制参数选取:  $K_p = 10, K_i = 0.1$ ,并对控制器输出进行了饱和控制。

现分别给出电机跟踪阶跃、正弦波信号的电机速度、定子电流、电磁转矩曲线。负载恒定为  $1.8 N \cdot m$ ,母线电压  $115 V$ ,开关频率  $10 kHz$ (见图 7 ~ 图 10)。

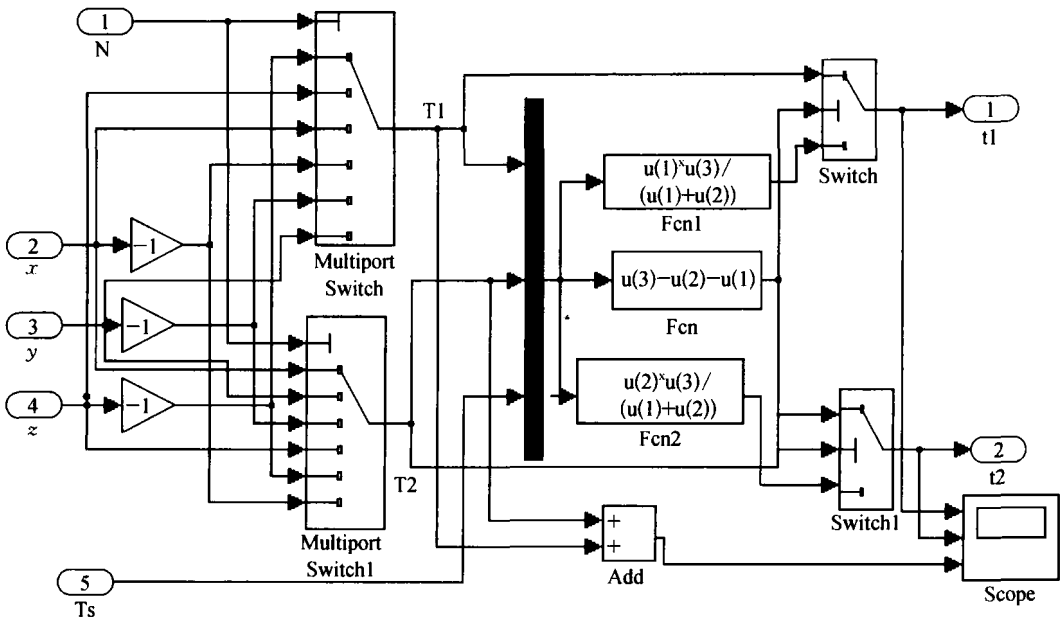


图 5 基本矢量作用时间  $t_1$  和  $t_2$  计算模块

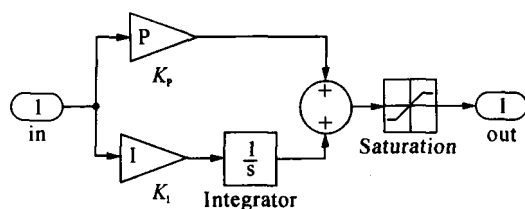


图6 PI控制器模块模型

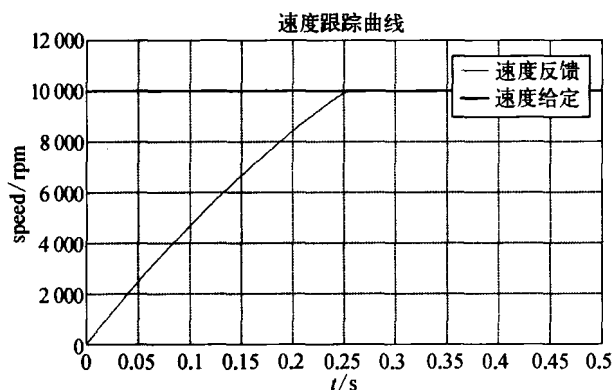


图7 跟踪幅值 10 000 r/min 阶跃信号速度响应

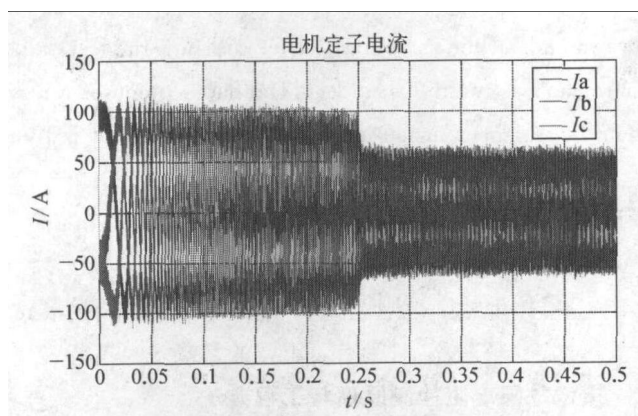


图8 跟踪幅值 10 000 r/min 阶跃信号定子电流

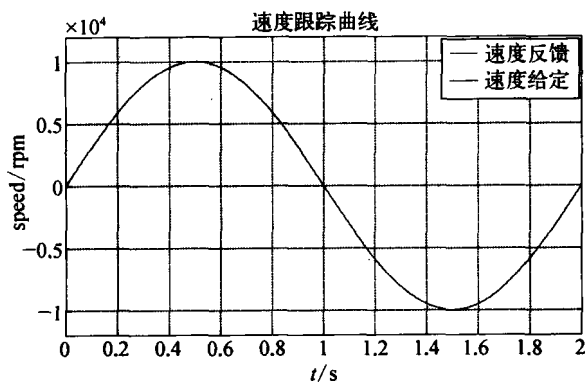


图9 跟踪幅值 10 000 r/min 正弦波信号速度响应

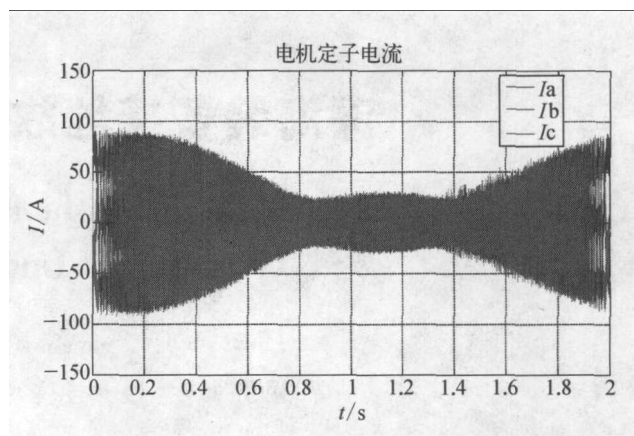


图10 跟踪幅值 10 000 r/min 正弦波信号定子电流

从电机转速仿真波形可以看出：电机能够快速启动并跟踪上给定速度，在给定值的小范围内的震荡，速度的超调可以控制在 1% 以内。从电机定子电流仿真波形可以看出，系统响应快速且平稳，相电流波形较为理想，且电流值稳定在设计额定值。

## 5 结束语

本文在分析了永磁同步电机矢量控制的基础上，利用 Simulink 工具箱建立了 PMSM 控制系统的仿真模型。通过仿真结果可以看出，系统能平稳运行，为实际的 PMSM 舵机系统的设计和调试提供了思路。目前以该仿真模型为基础的舵机系统已经过测试，测试结果波形与仿真波形基本一致，也从侧面反映了该仿真模型的正确性。

## 参考文献

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 李永东. 交流电机数字控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 牛洪海. 永磁同步电动机控制系统及控制方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [4] 陈俊峰. 永磁电机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [5] 李崇坚. 交流同步电机调速系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 郭庆鼎, 孙宜标, 王丽梅. 现代永磁电动机交流伺服系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] 张金利. 永磁同步电机空间矢量控制系统研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2008.