

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.03.017

SVPWM 在永磁同步电机系统中的应用与仿真

隋峻¹, 王晶¹, 樊键¹, 尹彦东¹, 仲丽萍²

(1. 中国兵器工业第 209 研究所 制导工程部, 成都 610041; 2. 中国兵器工业第 58 研究所 科研处, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了提高工作效率, 使电机工作状态更加平稳, 对 SVPWM 在永磁同步电机系统中的应用与仿真进行研究。分析了永磁同步电动机矢量控制系统结构及 SVPWM 技术原理, 在 Matlab/Simulink 环境中, 建立了永磁同步电动机电流、速度双闭环矢量控制系统仿真模型, 并进行了仿真比较试验。试验结果证明: 与传统的 SPWM 技术相比, 该控制方法具有较高的快速响应性, 转矩波动小。仿真波形符合理论分析, 系统运行平稳, 为永磁同步电机控制系统算法改进提供了仿真模型基础。

关键词: 矢量控制; 永磁同步电机 (PMSM); 空间矢量脉宽调制 (SVPWM)

中图分类号: TM351; N945.13 **文献标志码:** A

Application and Simulation of SVPWM in Permanent Magnet Synchronous Motor System

Sui Jun¹, Wang Jing¹, Fan Jian¹, Yin Yandong¹, Zhong Liping²

(1. Dept. of Guidance & engineering, No. 209 Research Institute of China Ordnance Industries, Chengdu 610041 China; 2. Management Office for Scientific Research, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000 China)

Abstract: In order to improve work efficiency and make the motor running more stable, the application of space vector pulse width modulation (SVPWM) in PMSM vector control system are researched and simulated. On the basis of vector control strategy and the theory of SVPWM, the simulation model of PMSM vector control system with electric current loop and speed loop based on space vector pulse width modulation (SVPWM) was established by using Matlab/Simulink. The simulation results prove that PMSM control system runs with faster response and smaller torque pulse than the traditional sinusoidal pulse width modulation (SPWM). The simulation wave accords with the theory research and PMSM system runs stable. It provides algorithm of PMSM vector control system improving with theoretical basis.

Keywords: vector control; permanent magnetic synchronous motor (PMSM); space vector pulse width modulation (SVPWM)

0 引言

随着计算机技术、电力电子技术、高性能稀土材料的迅速发展, 交流伺服系统的全数字化、大功率、微型化、高性能化和智能化已成为交流伺服系统发展的必然趋势^[1]。由于永磁同步电机具有结构简单、体积小、效率高、功率因数高、转矩电流比高、转动惯量低、易于散热及维护保养等优点, 在中小功率、高精度、高可靠性、宽调速范围的伺服系统中获得广泛应用^[2]。

电机控制系统中的脉宽调制 (PWM) 环节是控制系统的最后一个环节, 对控制系统的性能好坏起着至关重要的作用。PWM 技术中在电机控制系统中应用最为普遍的是正弦脉宽调制 (SPWM) 和电压空间矢量脉宽调制 (SVPWM)^[3]。理论分析和实验表明, SVPWM 调制具有转矩脉动小、噪音低, 直流电压利用率高 (比普通的 SPWM 调制约高 15%) 的优点。因此, 电机工作状态更加平稳, 工

作效率提高, 由于其控制算法简单, 数字化实现非常方便, 将替代传统 SPWM 法广泛应用于数字化电机控制系统中。因此, 笔者对 VPWM 在永磁同步电机系统中的应用与仿真进行研究。

1 空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 原理

空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 也称为磁链轨迹法, 其基本原理是利用逆变器电路功率开关状态的组合以及开关时间的调整, 产生圆形运动轨迹的电压空间矢量, 从而使交流电动机中产生圆形旋转磁场^[4]。定义一个由三相定子绕组轴线组成的三相静止平面坐标系, 如图 1。

三相定子电压 U_A 、 U_B 、 U_C 分别施加在三相绕组上形成了三个电压空间矢量, 并且由这三个电压空间矢量合成一个空间电压合成矢量 U_s , 表示为:

$$U_s = \frac{2}{3}(U_A + U_B \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + U_C \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \quad (1)$$

收稿日期: 2010-10-31; 修回日期: 2010-12-09

作者简介: 隋峻 (1986—), 男, 四川人, 研究生, 从事伺服控制技术方向研究。

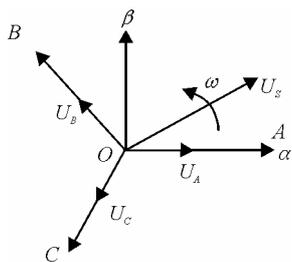


图 1 电压空间合成矢量

电压型 PWM 逆变器的 6 个桥臂只有“1”和“0”2 种状态，当上桥臂状态为“开”时，开关状态为“1”，对应的下桥臂状态必为“关”，开关状态为“0”，因此构成 8 种开关模式。8 种开关模式对应于 8 个空间电压矢量，空间电压基本矢量及扇区如图 2。

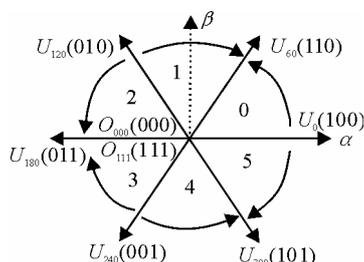


图 2 基本电压空间矢量及扇区

为全部获得在圆形范围内的电压空间矢量，利用 6 个非零的基本电压空间矢量的线性时间组合来得到更多的开关状态，如图 3。

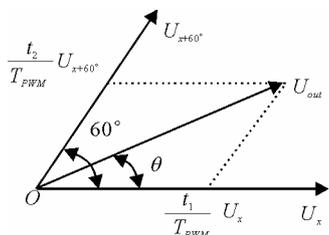


图 3 电压空间矢量的线性组合

图 3 中， U_x 和 $U_{x\pm 60^\circ}$ 代表相邻的 2 个基本电压空间矢量； U_{out} 为输出的参考相电压空间矢量，其幅值代表相电压的幅值，其旋转角速度就是输出正弦电压的角频率。 U_{out} 由 U_x 和 $U_{x\pm 60^\circ}$ 线性组合，表示为：

$$U_{out} = \frac{t_1}{T_{pwm}} U_x + \frac{t_2}{T_{pwm}} U_{x\pm 60^\circ} \quad (2)$$

圆形旋转磁场划分为 6 个区域，只有确定了 U_{out} 在某一个确定的扇区 (P 值对应)，才能用相应的一对相邻基本电压空间矢量来合成，将 U_{out} 在 $\alpha\beta$ 坐标系下分解为 $U_{out\alpha}$ 和 $U_{out\beta}$ ，并以下式计算 A 、 B 、 C 、 P 值：

$$A = U_{out\beta} \quad B = \frac{(\sqrt{3}U_{out\alpha} - U_{out\beta})}{2} \quad C = \frac{(-\sqrt{3}U_{out\alpha} - U_{out\beta})}{2} \quad (3)$$

$$P = 4\text{sign}(C) + 2\text{sign}(B) + \text{sign}(A)$$

据扇区与 P 值的对应关系表确定扇区号，如表 1。

表 1 P 值与扇区号的对应关系

P	1	2	3	4	5	6
扇区号	1	5	0	3	2	4

2 空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 仿真

根据 SVPWM 原理分析，在 Matlab/Simulink 环境下可通过用户自定义的内嵌式函数 (Embedded MATLAB Function) 来构造仿真模型，步骤如下：

1) 扇区判断模块

在 PWM 波形生成前，需要确定输出的合成电压矢量 U_{out} 所在的扇区，根据式 (3) 计算出 U_{out} 所在扇区对应的 P 值，由于程序较少，可用内嵌式函数模块直接编写。

2) 矢量作用时间模块

用 t_1 、 t_2 来表示合成电压矢量相邻两电压矢量的作用时间，根据不同的扇区值， t_1 、 t_2 计算如下：

$$X = \frac{\sqrt{3}U_{\beta}T}{U_{dc}} \quad Y = \frac{(\sqrt{3}U_{\beta} + 3U_{\alpha})T}{2U_{dc}} \quad Z = \frac{(\sqrt{3}U_{\beta} - 3U_{\alpha})T}{2U_{dc}} \quad (4)$$

对于不同的扇区， t_1 、 t_2 与 X 、 Y 、 Z 的对应关系如表 2。

表 2 电压矢量作用时间

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

3) 饱和判断模块

由于相邻电压矢量作用时间 t_1 、 t_2 需要满足 $t_1 + t_2 \leq T$ ，对于求得的 t_1 、 t_2 还需要进行饱和判断^[5]。当 $t_1 + t_2 > T$ 时，经过下式计算饱和判断后的 t_1 、 t_2 ：

$$t_{11} = \frac{t_1 \times T}{t_1 + t_2} \quad t_{22} = \frac{t_2 \times T}{t_1 + t_2} \quad (5)$$

4) 开关作用时间模块

根据相邻电压矢量作用时间 t_1 、 t_2 和对应不同扇区的逆变桥开关顺序，开关作用时间可以通过以下式来计算：

$$t_a = \frac{(T - t_{11} - t_{22})}{4} \quad t_b = t_a + \frac{t_{11}}{2} \quad t_c = t_b + \frac{t_{22}}{2} \quad (6)$$

5) 相应扇区开关作用时间模块

根据扇区号对相应的开关作用时间进行计算，如表 3。

表 3 对应扇区开关作用时间

P	3	1	5	4	6	2
t_{on1}	t_a	t_b	t_c	t_c	t_b	t_a
t_{on2}	t_b	t_a	t_a	t_b	t_c	t_c
t_{on3}	t_c	t_c	t_b	t_a	t_a	t_b

6) PWM 波形发生模块

t_{on1} 、 t_{on2} 、 t_{on3} 与三角波比较分别得到 PWM1、PWM3、PWM5 在周期 T 之内的占空比例, 而 PWM2、PWM4、PWM6 则与 PWM1、PWM3、PWM5 互反, 建立仿真模型如图 4。

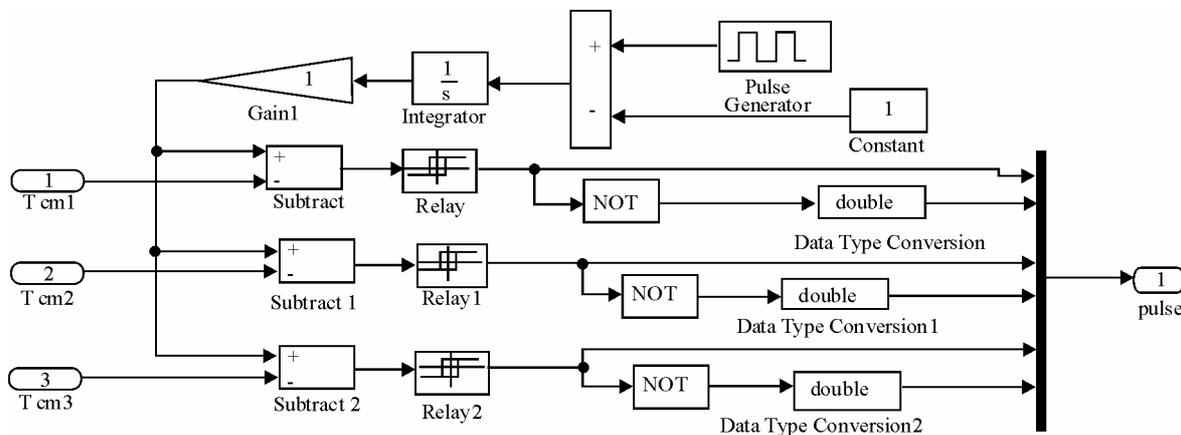


图 4 PWM 波形发生模块

将所有模块组合相连接, 构成 SVPWM 仿真模块, 如图 5。

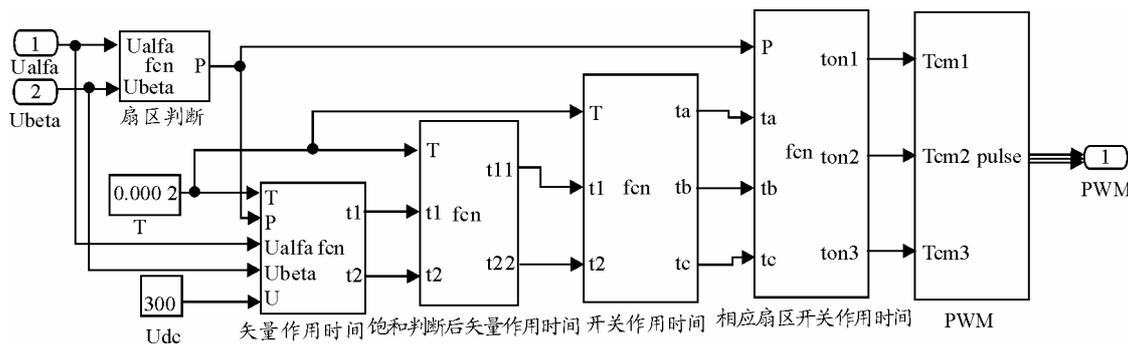


图 5 SVPWM 模块

3 系统仿真模型

永磁同步电机矢量控制系统结构框图如图 6, 系统模型采用速度环、电流环构成的双环结构, 同时, 系统还包括解耦控制所需要的坐标系变化模块

(Clark 变换、Park 变换、Park 逆变换), 由于电机输出的转角为机械角度, 故在坐标变换时要将机械角度乘以极对数再与参考角度相加以得到电角度。

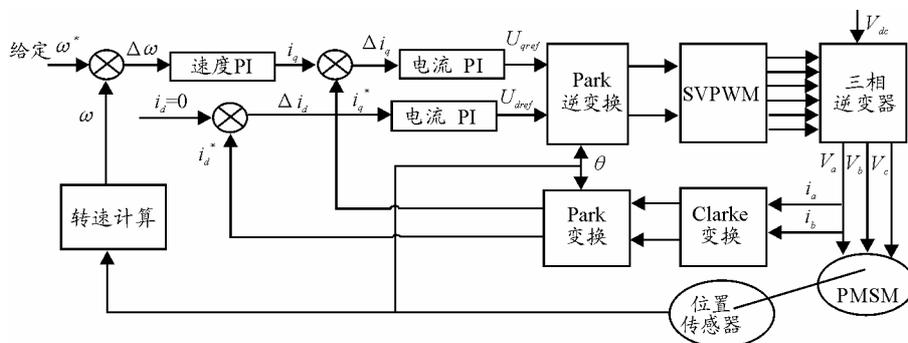


图 6 矢量控制系统结构框图

根据永磁同步电机矢量控制系统结构, 将各模块相连接, 并加入速度环、电流环闭环反馈 PI 调节

器及坐标系变换模块构成了在 $i_d=0$ 控制策略下空间矢量脉宽调制电机控制系统仿真模型, 如图 7。

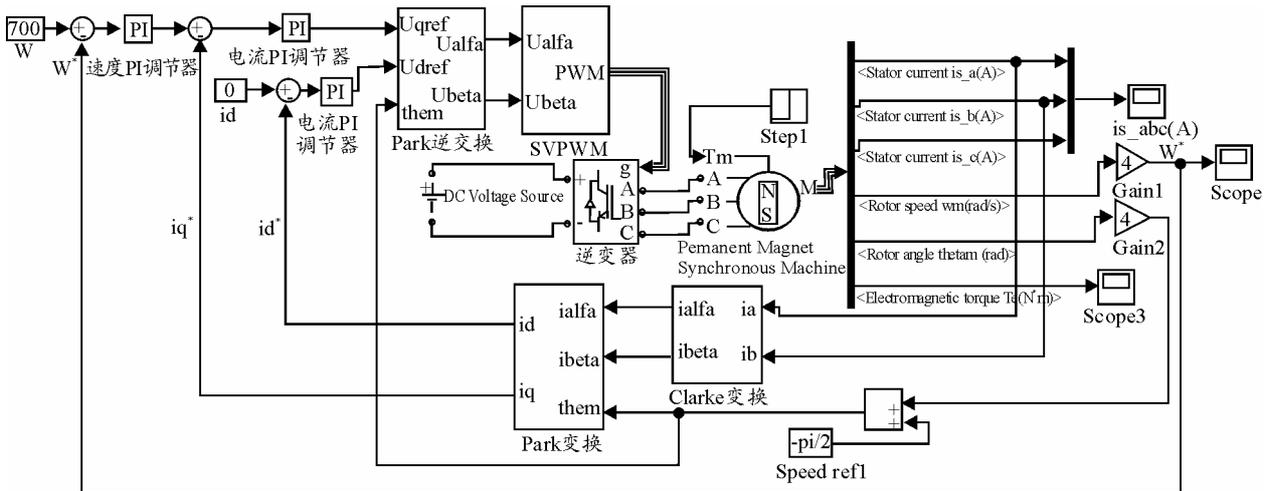


图 7 永磁同步电机仿真模型

4 仿真结果

仿真系统设定参数为：直流母线电压 $U_{dc} = 300\text{ V}$ ，PWM 载波频率为 5 kHz ，系统给定转速为 700 r/min ，在 0.04 s 时系统施加负载转矩 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ ，系统稳定

后得到转速、三相电流、转矩仿真曲线，与 Matlab/Simulink 中自带的基于 SPWM（正弦波脉宽调制）的永磁同步电机模型仿真曲线相比较，如图 8。

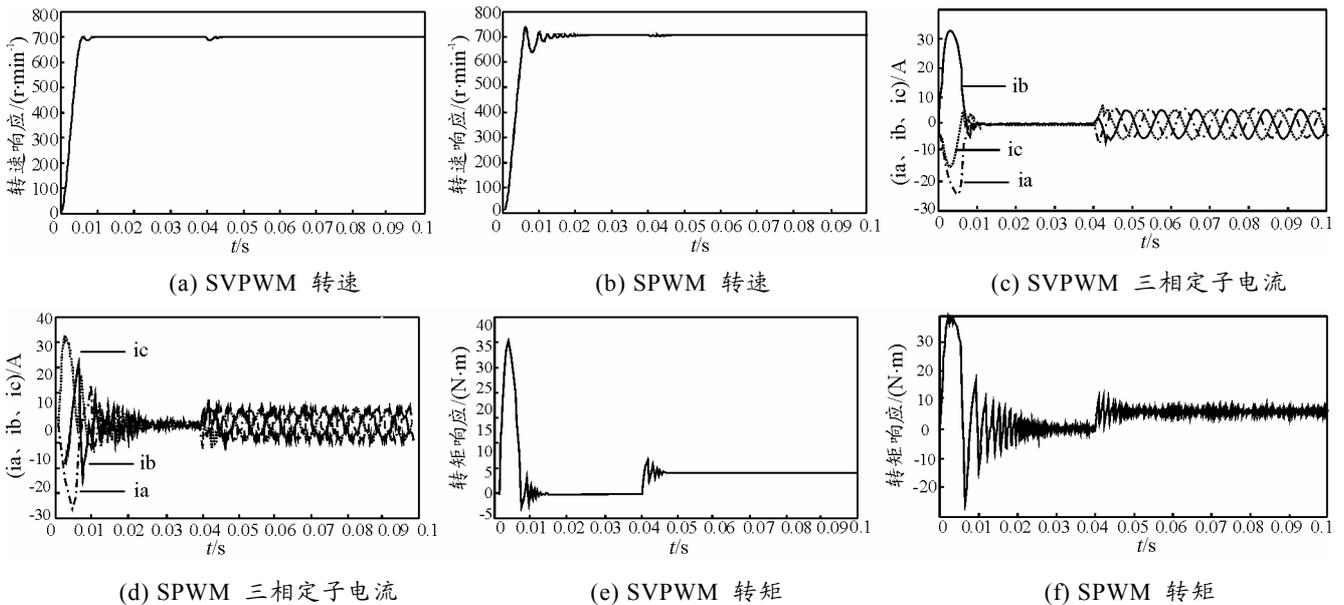


图 8 SVPWM 与 SPWM 对比

由仿真波形图可看出，SVPWM 技术相对于传统 SPWM 技术转速响应提高，转速在负载施加后迅速稳定于 700 r/min ，转矩波动明显减小，三相电流更加平稳，更加适合应用于响应快速，转动平稳的高精度伺服系统中。

5 结束语

与传统的 SPWM 技术相比，该控制方法具有较高的快速响应性，转矩波动小，数字式的计算方式更有利于应用于数字化电机控制系统中。仿真波形符合理论分析，系统运行平稳，为永磁同步电机控

制系统算法改进提供了仿真模型基础。

参考文献：

- [1] 陈志锦, 易健, 张博. 基于 DSP 的全数字交流伺服系统的设计[J]. 兵工自动化, 2006, 25(2): 68-75.
- [2] 郭宏, 郭庆吉. 永磁同步电机伺服系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1996, 28(3): 82-89.
- [3] 王欢. 基于 DSP 的永磁同步电机矢量控制系统的设计[D]. 大连: 大连理工大学电子科学与技术学院, 2008.
- [4] 孙立志. PWM 与数字化电动机控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 17.
- [5] 何杰, 王家军. 基于 SVPWM 的永磁同步电动机系统建模与仿真[J]. 机电工程, 2009, 26(7): 77-82.