

基于MATLAB/SIMULINK 的电压空间 矢量控制的三相鼠笼异步电动机的仿真

曹大鹏

安徽理工大学电气工程系 安徽淮南 232001

摘 要 介绍了空间电压矢量脉宽调制(SVPWM)的基本原理。分析了三相SVPWM 逆变器和异步电动机的仿真模型,最后用MATLAB 仿真软件建立仿真模型,并给出了仿真结果。

关键词 空间电压矢量;异步电机;MATLAB

Abstract This paper introduces the basic principles of the space — vector pulse width modulation (SVPWM). This paper analysis the three — phases converter feed by SVPWM and the emulation model of induction motor. In the end, the simulation results are given.

Keywords SVPWM; introduction motor; MATLAB

1 引言

交流电动机,特别是三相鼠笼异步电动机,具有结构简单,制造容易,价格低廉,坚固耐用,转动惯量小,运行可靠,故障率低,使用环境及结构发展不受限制等特点,被广泛应用于国民生活的各个方面,但长期以来,由于技术等方面的原因将交流电动机作为调速电动机使用的困难没有得到完善地解决,为了满足发展生产和节约能源的需要,近几十年来,交流变频调速系统发展迅速,已成为调速系统的主要研究和发展对象,出于对设备、成本以及对系统研究的便捷性的考虑,我们常用数字仿真技术对交流变频调速系统进行分析研究。在对系统进行仿真之前,我们首先应该建立系统的数学模型。

三相鼠笼异步电动机是一个高阶、强耦合、多变量、非线性的系统,要推导出其数学模型,工作量很大,而且仿真比较困难。MATHWORK 公司推出的MATLAB 是一种面向科学与工程计算的高级仿真语言其中包含的SIMULINK 模块是目前在动态系统建模和仿真等方面应用最广泛的工具之一。使用SIMULINK,建模方便快捷,可分层次的对系统进行研究,而且仿真性能优越。

2 SVPWM 的原理与特点

SVPWM 是一种依据空间电压矢量切换来控制逆变器的控制策略。主要控制思路是采用逆变器空间电压矢量的切换来获得准圆形的旋转磁场,使交流电动机获得了较好的动态响应性能,提高了电压利用率,还减小了电动机的转矩脉动。SVPWM 将电机与逆变器视为一个整体,其数学模型是建立于电机统一理论和坐标轴系变换理论基础之上的,其物理意义直观,数学模型简单,便于微机实现。

(1)逆变器的输出电压模式

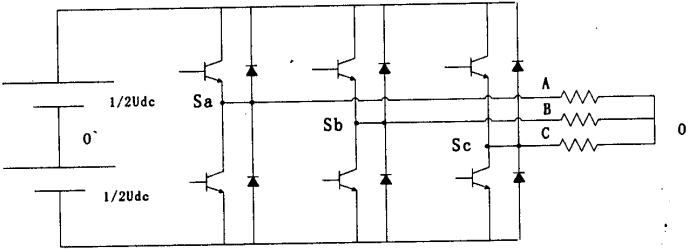


图1 三相电压型逆变器

假设交流电动机由理想三相对称正弦电压供电

$$\begin{bmatrix} U_{SA} \\ U_{SB} \\ U_{SC} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2} U_L}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 U_L ——电源电压

$U_L/\sqrt{3}$ ——每相相电压的有效值

ω ——电源电压角频率

采用电压空间矢量的概念,则有:

$$U_s = \frac{2}{3} (U_{SA} + U_{SB}e^{j\frac{2}{3}\pi} + U_{SC}e^{j\frac{4}{3}\pi}) \quad (2)$$

图1为三相电压型逆变器的示意图,对于180°导电型逆变器,其三个桥臂的开关器件总共可以形成八种开关模式,用 S_A, S_B, S_C 分别标记三个桥臂的状态,规定当上桥臂器件导通时状态为1,下桥臂器件导通时状态为0,则逆变器的八种开关状态模式对应于八个电压空间矢量,如表1所示:

表1 逆变器的空间电压矢量

定子电压 空间矢量	开关状态 S_A, S_B, S_C	相电压			矢量表达式
		A 相	B 相	C 相	
U_0	0 0 0	0	0	0	0
U_1	0 1 1	$-\frac{2}{3}U_{dc}$	$\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{2}{3}U_{dc}e^{j\pi}$
U_2	0 0 1	$-\frac{1}{3}U_{dc}$	$-\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{2}{3}U_{dc}$	$\frac{2}{3}U_{dc}e^{j\frac{4}{3}\pi}$
U_3	1 0 1	$\frac{1}{3}U_{dc}$	$-\frac{2}{3}U_{dc}$	$\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{2}{3}U_{dc}e^{j\frac{2}{3}\pi}$
U_4	1 0 0	$\frac{2}{3}U_{dc}$	$-\frac{1}{3}U_{dc}$	$-\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{2}{3}U_{dc}e^{j0}$
U_5	1 1 0	$\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{1}{3}U_{dc}$	$-\frac{2}{3}U_{dc}$	$\frac{2}{3}U_{dc}e^{j\frac{1}{3}\pi}$
U_6	0 1 0	$-\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{2}{3}U_{dc}$	$-\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{2}{3}U_{dc}e^{j\frac{2}{3}\pi}$
U_7	1 1 1	0	0	0	0

$$\begin{aligned} U_{SA} &= U_A - U_{OO'} \\ U_{SB} &= U_B - U_{OO'} \\ U_{SC} &= U_C - U_{OO'} \end{aligned} \quad (3)$$

电机定子空间电压矢量 U_s 为:

$$\begin{aligned} U_s &= \frac{2}{3} (U_{SA} + U_{SB} e^{j\frac{2}{3}\pi} + U_{SC} e^{j\frac{4}{3}\pi}) \\ &= \frac{2}{3} (U_A + U_B e^{j\frac{2}{3}\pi} + U_C e^{j\frac{4}{3}\pi}) - U_{OO'} (1 + e^{j\frac{2}{3}\pi} + e^{j\frac{4}{3}\pi}) \end{aligned} \quad (4)$$

由于 $1 + e^{j\frac{2}{3}\pi} + e^{j\frac{4}{3}\pi} = 0$

所以逆变器输出的电压空间矢量为

$$U_s = \frac{2}{3} (U_A + U_B e^{j\frac{2}{3}\pi} + U_C e^{j\frac{4}{3}\pi}) \quad (5)$$

由上式可知,在此系统中,对典籍定子侧电压空间矢量的分析,可以转化为对逆变器输出电压空间矢量的分析。

当逆变器输出某一电压空间矢量 $U_i (i=1 \sim 8)$ 时,电机的磁链空间矢量可表示为:

$$\psi_s = \psi_{s0} + u_i \Delta t \quad (6)$$

ψ_{s0} : 初始磁链空间矢量

$\Delta t; u_i$: 的作用时间

当 u_i 为非零电压空间矢量时, ψ_s 从 ψ_{s0} 出发,沿对应的电压空间矢量方向,以理想磁链圆半径 ($\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_L}{\omega}$) 为半径进行旋转运动;当 u_i 为零电压空间矢量时, $\psi_s = \psi_{s0}$,磁链空间矢量的运动受到限制。因此,合理地选择六个非零电压空间矢量的作用次序与作用时间,可使磁链空间矢量端顺时针或逆时针旋转,形成一定形状的磁链轨迹。一般要求磁链轨迹尽可能接近圆形。

3 SVPWM 的控制算法

既然我们已经了解了 SVPWM 的原理与特点,如何实现 SVPWM 便十分重要了,以下介绍 SVPWM 的控制算法。SVPWM 的算法步骤为:

- * 判断 U_s 所在的扇区
- * 计算空间矢量作用时间
- * 合成空间矢量

下面分别介绍每一步的执行过程

(1) 判断 U_s 所在的扇区

在对异步电动机进行分析和控制时,均需对三相进行分析和控制,为了研究方便,我们进行坐标变换,将三维坐标系(a-b-c)投影到二维坐标系(α - β)上。

如图2所示,将 α - β 坐标系与定子三相坐标系重叠画在一起,以便描述电压空间矢量在两个坐标轴上的相对位置。由图2可知

$$\begin{aligned} u_{\alpha\beta} &= u_{s\beta} \\ u_{\alpha\beta} &= u_{sa} \cos 30^\circ - u_{sb} \cos 60^\circ \\ u_{\alpha\beta} &= u_{sa} \cos 30^\circ - u_{sb} \cos 60^\circ \end{aligned} \quad (7)$$

令 $N_1 = \text{Sign}(u_{\alpha\beta})$

$$N_2 = \text{Sign}(u_{ab})$$

$$N_3 = \text{Sign}(u_{ac})$$

$$\text{扇区 } S = 4 N_3 + 2 N_2 + N_1$$

(8)

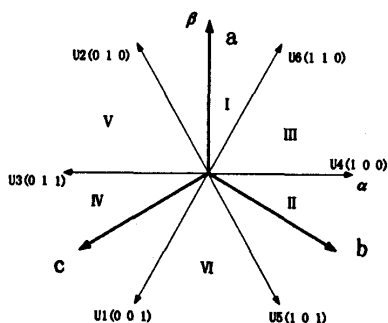


图2 空间电压矢量的坐标变换及扇区投影

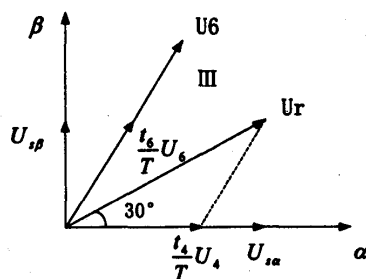


图3

(2) 计算空间电压矢量的作用时间

 假设 U_r 位于 III 区, 且与 α 轴夹角为 30° , 则由图 3 可知:

$$\begin{cases} U_4 = U_6 = \frac{2}{3} U_{dc} \\ U_m = \frac{t_4}{T} \left(\frac{2}{3} U_{dc} \right) + \frac{U_{\beta}}{\tan 60^\circ} \\ U_{\beta} = \frac{t_6}{T} \left(\frac{2}{3} U_{dc} \cdot \sin 60^\circ \right) \end{cases} \quad (9)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} t_4 = \frac{T}{2U_{dc}} (3U_m - \sqrt{3} U_{\beta}) \\ t_6 = \frac{\sqrt{3} T}{U_{dc}} U_{\beta} \end{cases} \quad (10)$$

同理可以算出 I 扇区:

$$\begin{cases} t_2 = \left(-\frac{3}{2} U_m + \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\beta} \right) \frac{T}{U_{dc}} \\ t_5 = \left(\frac{3}{2} U_m + \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\beta} \right) \frac{T}{U_{dc}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{令 } X = \frac{\sqrt{3} T}{U_{dc}}$$

$$Y = \left(\frac{3}{2} U_m + \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\beta} \right) \frac{T}{U_{dc}} \quad (12)$$

$$Z = \left(-\frac{3}{2} U_m + \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\beta} \right) \frac{T}{U_{dc}}$$

则可以通过 U_r 所处的扇区建立一个二维时间函数表:

表2 t_x, t_y 赋值表

	I	II	III	IV	V	VI
t_x	Z	Y	-Z	-X	X	-Y
t_y	Y	-X	X	Z	-Y	-Z

t_x, t_y 赋值之后,还要对其进行饱和判断。若 $t_x + t_y > T$, 则

$$\begin{cases} t_x = \frac{t_x}{t_x + t_y} \\ t_y = \frac{t_y}{t_x + t_y} \end{cases} \quad (13)$$

(3) 空间矢量的合成

在一个控制周期内,设 U_a 的作用时间为 t_a , U_b 的作用时间为 t_b , U_c 的作用时间为 t_c ,

$$T = t_a + t_b + t_c$$

$$\text{则, } \int_0^T u_r dt = \int_0^{t_a} u_a dt + \int_{t_a}^{t_a+t_b} u_b dt + \int_{t_a+t_b}^T u_c dt \quad (14)$$

4 SVPWM 的调制

SVPWM 的调制载波为等腰三角波,为了使输出的 PWM 波对称,则在一个载波周期内把三个矢量的作用周期一分为二,并且保证在矢量切换时只有一个开关器件动作,降低开关损耗,减小输出电压谐波。具体调制方法如图 4 所示:

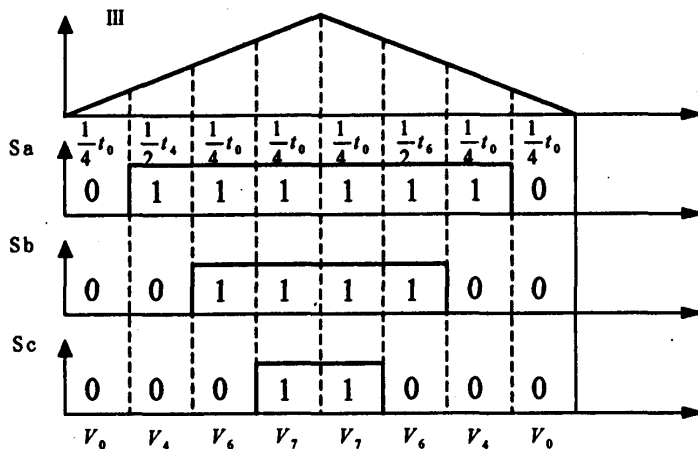


图4

在扇区 III 内,开关切换顺序如图 4 所示: $V_0 \rightarrow V_4 \rightarrow V_6 \rightarrow V_7 \rightarrow V_7 \rightarrow V_6 \rightarrow V_4 \rightarrow V_0$, 改变作用时间大小,便能够得到不同相位的合成矢量。用计算机实现开关函数,只需加入预定的开通时间即可。

$$\begin{cases} t_{1on} = \frac{1}{4}T - t_x - t_y = \frac{1}{4}t_0 \\ t_{2on} = \frac{1}{4}t_0 + \frac{1}{2}t_x \\ t_{3on} = \frac{1}{4}t_0 + \frac{1}{2}t_x + \frac{1}{2}t_y \end{cases} \quad (15)$$

其中 t_{1on} 为最宽脉冲

t_{2on} 为次宽脉冲

$t_{30\mu}$ 为最窄脉冲

由此可建立三相脉冲前沿时间查询表:

表 3

	I	I	II	IV	V	VI
Tcma	T_{on2}	t_{on1}	t_{on1}	t_{on3}	t_{on3}	T_{on2}
Tcmb	t_{on1}	t_{on3}	T_{on2}	T_{on2}	t_{on1}	t_{on3}
Tcmc	t_{on3}	T_{on2}	t_{on3}	t_{on1}	T_{on2}	t_{on1}

5 建立仿真模型

(1) SVPWM 的调制流程图

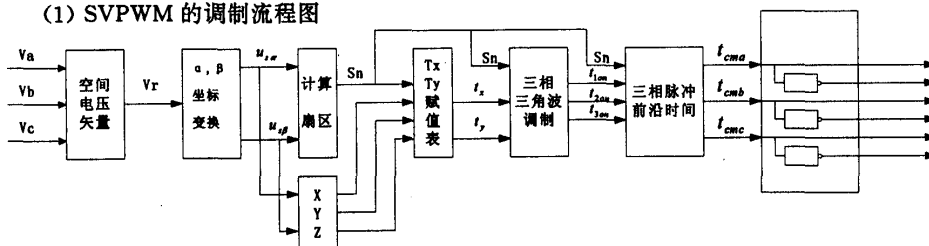


图5 SVPWM 调制流程图

(2) 建立基于 MATLAB/SIMULINK 的仿真模型

本次仿真使用的软件为 MATLAB6. 5。主要使用 MATLAB6/SIMULINK 中的 SimPowerSystems 模块。系统的原理图如下:

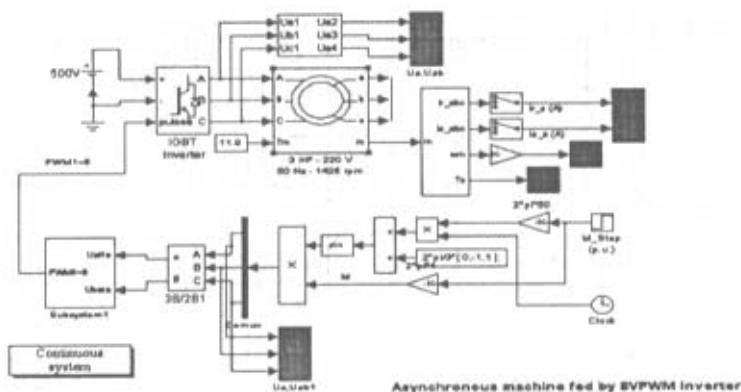


图 6 系统原理图

参数说明:

电机选用的是三相鼠笼式异步电动机, $P=3 \times 746\text{w}$, $U_{L-L}=220\text{v}$, $f=50\text{Hz}$, $R_s=0.345\Omega$, $L_{ls}=2.2 \times 10^{-3}\Omega$, $R_r=0.816\Omega$, $L_{lr}=2 \times 10^{-3}$, $J=0.089\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 负载 $T_m=11.9\text{N} \cdot \text{M}$ 。采用速度开环的控制方式。逆变器采用的是IGBT 三相电压源逆变器。仿真结果如下:

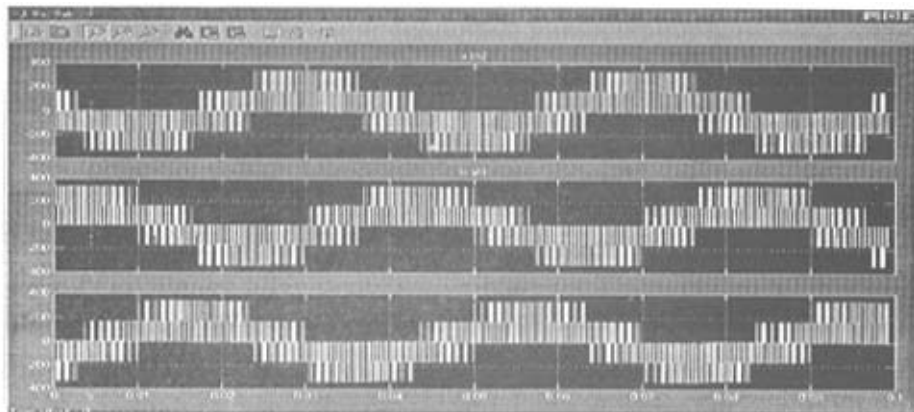


图5 三相电压PWM 波形

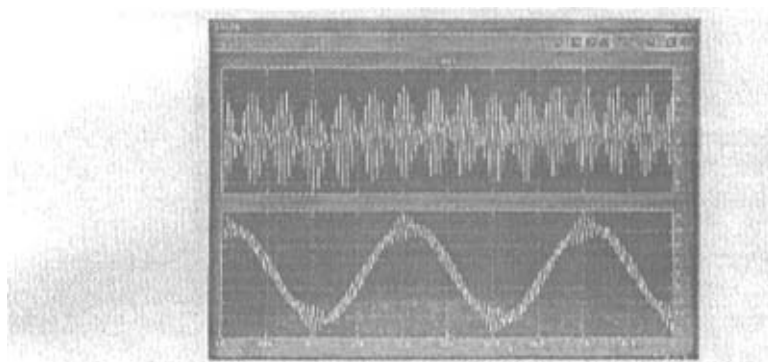


图6 转子、定子侧相电流波形

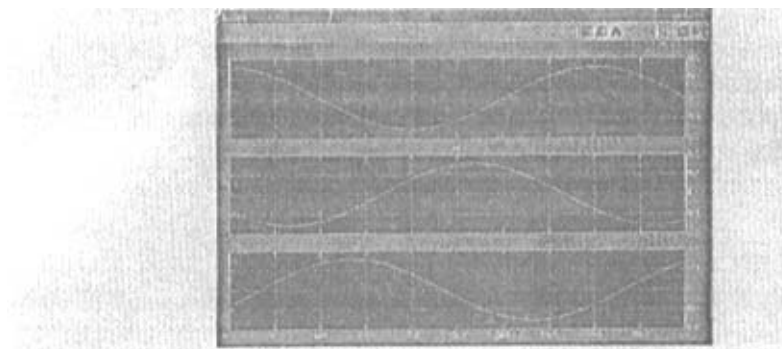


图7 三相线电压

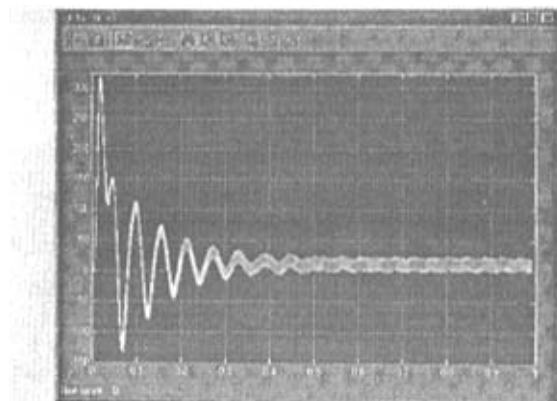


图8 转矩波形

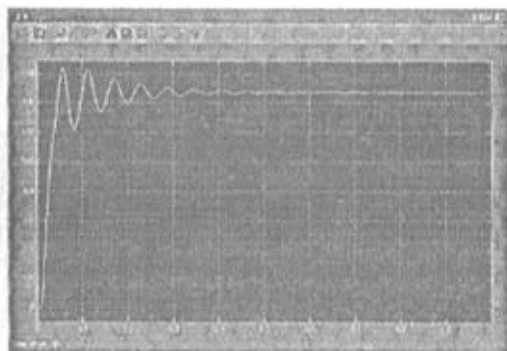


图9 转速波形

从仿真结果来看,系统的启动速度快,启动过程中的转矩脉动明显减小,由于采用的开环控制方式,转速在上升过程中有波动,采用闭环控制方式可以消除波动。

运用MATLAB/SIMULINK中的电气子系统元件库,可以快速的完成对交流异步电动机控制系统的建模、仿真和分析。仿真结果能由示波器及时反映,可以观测变量的变化趋势。从仿真曲线上看,采用SVPWM方式供电的异步电动机交流调速系统与其他变频器供电的变频调速系统相比,电流谐波减少,转矩脉动减少,能够满足系统动、静性能的指标。

使用MATLAB/SIMULINK建立仿真模型,可以免除建立烦琐数学模型的过程,而且使仿真结果更加准确,有助于系统方案的快速确定。

参考文献:

[1] 祝龙记. 直接转矩控制在胶带输送机电气传动中的应用研究. 煤炭学报, 2004(3)

[2] 张森, 张正亮等. MATLAB 仿真技术与实例应用教程. 北京: 机械工业出版社. 2004(1)

作者简介: 曹大鹏(1980~), 男, 安徽理工大学电气工程系教师, 在读硕士研究生。主要研究方向为电力电子与电力传动。