

# 基于 SVPWM 的异步电动机变频调速系统的研究

贾华 李俊彪 崔军辉

(内蒙古科技大学信息工程学院)

**摘要:** 阐述了电压空间矢量脉宽调制 SVPWM 的基本原理及其算法实现, 建立了基于 SVPWM 的异步电动机矢量控制系统, 并使用 Simulink 对该系统进行了仿真。试验结果表明该调制算法正确, 系统方案切实可行, 控制系统具有较好的动态和静态性能。

**关键词:** SVPWM; 矢量控制; 变频调速; Simulink

## 1 引言

电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术是目前比较理想的调制方式, 它从电机的角度出发, 以三相对称正弦波电源供电时交流电机产生理想的磁链圆为基准, 通过选择逆变器的不同开关模式, 使电机的实际磁链尽可能逼近理想磁链圆来产生。SVPWM 控制方法与经典 SPWM 控制方法相比, 具有直流电压利用率高、控制简单、损耗较小、便于数字化方案实现等优点。

## 2 电压空间矢量控制原理

图 1 为普通三相逆变器结构, 因为逆变桥的上下桥臂开关状态互补, 所以  $Q_1 \sim Q_6$  这六个器件可以形成八种开关状态 000~111 (规定上桥臂导通为 1, 下桥臂导通为 0), 逆变器开关状态与输出相、线电压及八个基本电压空间矢量关系见表 1。

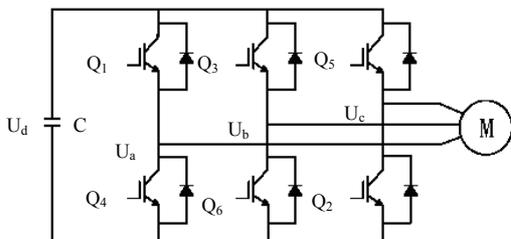


图 1 三相逆变器桥结构

在对称的三相电压输入下, 电压空间矢量表示为:  $U = 2(u_{an} + \alpha u_{bn} + \alpha^2 u_{cn}) / 3$ , (其中  $\alpha = e^{j2\pi/3}$ ) (1)

八种开关状态分别对应复平面上 8 个基本的电压空间矢量, 其中 U 0 及 U 7 为零向量, 其他六个为非零向量<sup>[1]</sup>。

六个非零向量构成了图 2 所示的六边形的轴线, 并将六边形分为 6 个扇区。空间电压矢量法就是通过选取同一扇区中相邻的两个非零矢量和适当的零矢

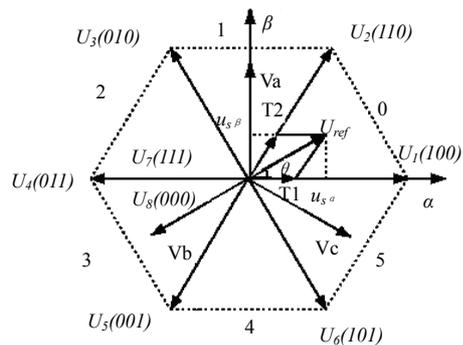


图 2 电压空间矢量图

量来合成一个等效的空间旋转电压矢量  $u_{ref}$ , 即通常称为参考电压矢量,  $u_{ref}$  通常用两相静止坐标系统中的两个分量  $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$  给定, 即:  $u_{ref} = u_{s\alpha} + ju_{s\beta}$  (2)

电压空间矢量组合是依据伏秒平衡原则与时间总和恒定原则, 即:

$$\left. \begin{aligned} U_i T_1 + U_j T_2 + U_0 T_0 + U_7 T_7 &= u_{ref} T \\ T_1 + T_2 + T_0 + T_7 &= T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $U_i$ 、 $U_j$  是包含  $u_{ref}$  的两个电压空间矢量,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_0$ 、 $T_7$  和  $T$  分别为  $U_i$ 、 $U_j$ 、 $U_0$ 、 $U_7$  和  $u_{ref}$  在半个 PWM 周内的作用时间。

将(2)式代入到(3)式的第一个伏秒平衡方程, 得:

$$\frac{2}{3} U_d T_1 + \frac{2}{3} U_d e^{j\pi/3} T_2 = (u_{s\alpha} + ju_{s\beta}) e^{-j\theta} T \quad (4)$$

令上式两边实部、虚部分别相等, 可求出电压空间矢量作用时间  $T_1$  和  $T_2$ 。

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\sqrt{3}T}{U_d} (u_{sa} \sin \frac{(k+1)\pi}{3} - u_{s\beta} \cos \frac{(k+1)\pi}{3}) \\ T_2 = \frac{\sqrt{3}T}{U_d} (-u_{sa} \sin \frac{k\pi}{3} + u_{s\beta} \cos \frac{k\pi}{3}) \end{cases} \quad (5)$$

(k = 0...5)

假设零矢量作用时间相等, 再根据总时间恒定原则既得零矢量作用时间, 即

$$T_0 = T_7 = (T - T_1 - T_2) / 2 \quad (6)$$

由于(5)、(6)式适用于任意扇区, 所以可根据  $u_{ref}$  的两个静止两相坐标分量和所在的扇区求取任一基本矢量的作用时间<sup>[2]</sup>。通过调控  $u_{ref}$  的频率、幅值和相位, 即可实现逆变器输出电压频率、幅值和相位的控制, 一个周期里的合成矢量越多, 说明采样频率越高, 实际磁链就越逼近于圆。

表1 逆变器开关状态与输出相、线电压及基本电压空间矢量关系表(其中  $U_d$  为直流侧电压)

定子电压 空间矢量	开关状 态abc	相电压			线电压			矢量 表达式
		$U_{an}$	$U_{bn}$	$U_{cn}$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	
$U_0$	000	0	0	0	0	0	0	0
$U_1$	100	$2U_d/3$	$-U_d/3$	$-U_d/3$	$U_d$	0	$-U_d$	$2U_d/3$
$U_2$	110	$U_d/3$	$U_d/3$	$-2U_d/3$	0	$U_d$	$-U_d$	$2U_d e^{j1\pi/3}/3$
$U_3$	010	$-U_d/3$	$2U_d/3$	$-U_d/3$	$-U_d$	$U_d$	0	$2U_d e^{j2\pi/3}/3$
$U_4$	011	$-2U_d/3$	$U_d/3$	$U_d/3$	$-U_d$	0	$U_d$	$2U_d e^{j\pi}/3$
$U_5$	001	$-U_d/3$	$-U_d/3$	$2U_d/3$	0	$-U_d$	$U_d$	$2U_d e^{j4\pi/3}/3$
$U_6$	101	$U_d/3$	$-2U_d/3$	$U_d/3$	$U_d$	$-U_d$	0	$2U_d e^{j5\pi/3}/3$
$U_7$	111	0	0	0	0	0	0	0

### 3 SVPWM 算法实现及其仿真

由以上分析可知, SVPWM 算法的实现主要是确定合成  $u_{ref}$  的两个基本电压空间矢量及零矢量, 以及各个矢量的作用时间和组合顺序, 具体由三步实现。

#### 3.1 计算 $u_{ref}$ 所在的扇区

首先, 规定六个空间矢量所在的三条直线的法线, 方向分别为绕组轴线方向逆时针旋转 90 电角度, 如图 2 中  $V_a$ 、 $V_b$  和  $V_c$  所示。根据给定电压空间矢量在这三个法矢量上投影正负可判断该电压空间矢量位于哪一个扇区, 为此我们引入判断扇区标号的三个标量  $v_a$ 、 $v_b$  和  $v_c$ , 它们分别表示给定电压空间矢量  $U_{ref}$  在法矢量上的投影。

$$v_a = u_{s\beta}$$

$$\begin{aligned} v_b &= \frac{1}{2} (-\sqrt{3}u_{sa} - u_{s\beta}) \\ v_c &= \frac{1}{2} (\sqrt{3}u_{sa} - u_{s\beta}) \end{aligned} \quad (7)$$

则可由  $N = \text{sign}(v_a) + 2\text{sign}(v_b) + 4\text{sign}(v_c)$  的值确定  $u_{ref}$  所在的扇区, 其对应关系如表 2。

表 2 扇区对应关系

扇区号	0	1	2	3	4	5
N	5	1	3	2	6	4

#### 3.2 确定两个非零矢量作用时间

式(5)两边都除以 T, 即得到两个相邻电压空间矢量作用时间的占空比, 式中的正余弦的绝对值随扇区的变化只可能有两种取值方式, 为此引入三个通用变量 X、Y 和 Z 和两个占空比变量  $T_1$  和  $T_2$ , 用来表示一个周期中所有 6 个扇区内的电压矢量合成所需要的基本电压矢量的占空比, 并考虑基本电压空间矢量都用  $\sqrt{3}U_d/3$  进行标么化<sup>[3]</sup>。

其中  $T_1$  代表主矢量作用时间的占空比,  $T_2$  代表辅矢量作用时间的占空比, 其对应关系如表 3。

$$\begin{cases} X = u_{s\beta} \\ Y = (u_{s\beta} + \sqrt{3}u_{sa}) / 2 \\ Z = (u_{s\beta} - \sqrt{3}u_{sa}) / 2 \end{cases} \quad (8)$$

表 3 主辅矢量作用时间占空比分配表

扇区号	0	1	2	3	4	5
主矢量	$U_1$	$U_3$	$U_3$	$U_5$	$U_5$	$U_1$
辅矢量	$U_2$	$U_2$	$U_4$	$U_4$	$U_6$	$U_6$
$T_1$	-Z	Z	X	-X	-Y	Y
$T_2$	X	Y	-Y	Z	-Z	-X

#### 3.3 计算电压矢量的切换点

根据主辅矢量的占空比和时间总和恒定规律, 可得到三相系统中各相电压作用时刻:

$$\begin{cases} T_a = (1 - T_1 - T_2) / 2 \\ T_b = T_a + T_1 \\ T_c = T_b + T_2 \end{cases} \quad (9)$$

不同扇区各相的切换时刻如表 4。

表 4 矢量切换时刻

扇区号	0	1	2	3	4	5
$T_{coma}$	$T_a$	$T_b$	$T_c$	$T_c$	$T_b$	$T_a$
$T_{comb}$	$T_b$	$T_a$	$T_a$	$T_b$	$T_c$	$T_c$
$T_{comc}$	$T_c$	$T_c$	$T_b$	$T_a$	$T_a$	$T_b$

### 3.4 SVPWM 的仿真模型

根据表 4 所示的切换时刻和幅值为 1 的三角载波比较即得到 SVPWM 波形, 考虑到上下桥臂互补, 既得到如图 3 所示仿真模型, 其输出为 6 路 SVPWM 触发脉冲。

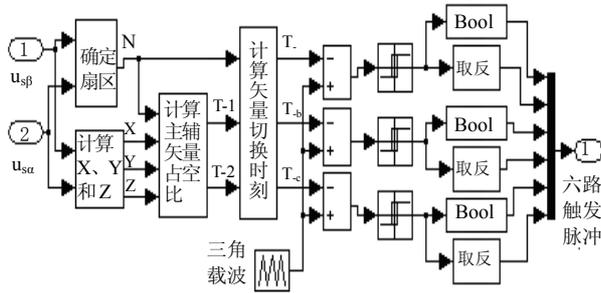


图3 SVPWM仿真模块图

### 4 SVPWM 应用于矢量控制系统

根据以上调制方式设计变频调速系统如图 4, 可

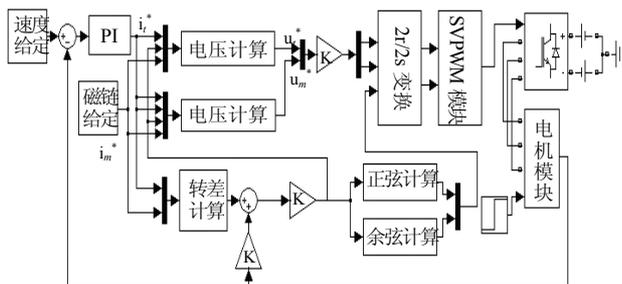
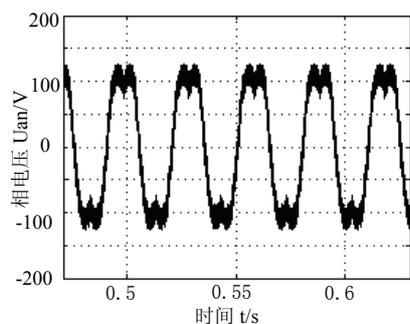
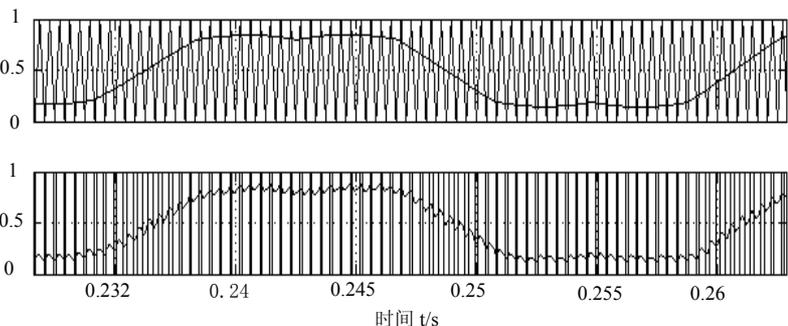


图 4 基于 SVPWM 调制的变频调速系统

见该系统为转差型矢量控制系统, 采用速度闭环, 磁链开环控制。速度偏差经过调节器输出为转矩参考电



B 定子 A 相电压



C SVPWM 调制波形图

图 5 仿真结果

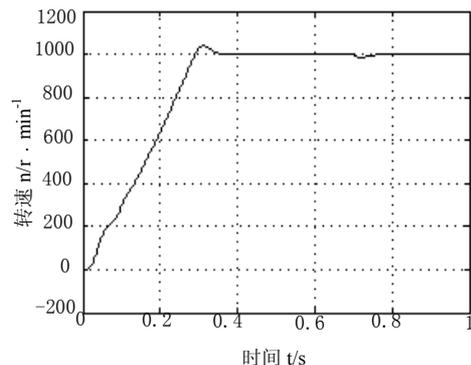
在 0.36s 达到稳定, 在 0.7s 突加负载转速下降, 随后转速在调节器的作用下转速上升达到稳定状态, 显示

流  $i_t^*$ ,  $i_r^*$  和磁链电流给定  $i_m^*$  经电流电压转换模块变换得到  $u_m^*$  和  $u_t^*$ ,  $u_m^*$  和  $u_t^*$  经  $2r/2s$  变换得到  $u_{sa}$  和  $u_{sp}$  即 SVPWM 模块的输入信号, 因为该调制模块经标么化的, 所以其前面加入标么系数 G1, U tran 为电压测量模块。SVPWM 产生六路触发脉冲送给逆变模块, 进而逆变输出送给电机模型<sup>[4, 5]</sup>。

### 5 实验结果

仿真采用的电机参数为: 功率  $P_n=7.5kW$ ; 极对数  $P=2$ ; 定子电阻  $R_s=0.435 \Omega$ ; 转子电阻  $R_r=0.816 \Omega$ ; 定转子互感  $L_m=0.069mH$ ; 定子绕组自感  $L_s=0.071mH$ ; 转子绕组自感  $L_r=0.071mH$ ; 转动惯量  $J=0.20$ 。转速给定 1000 转/秒, 三角波频率 2400Hz, 直流电压 410V, 磁链电流给定 5A, 在 0.7s 加载  $30N \cdot M$  的负载, 测得转速、相电压和 SVPWM 调制波形如图 5。

由仿真结果可知, 如图 5-A, 空载启动时, 转速



A 转速响应

# Measurement and Control System of Industry Boiler Based on ARM9

Yin Dongmei<sup>1</sup> Li Xiaofeng<sup>2</sup>

(1.Department of Computer Science and Information Technology, Guangzhou Maritime College 2.Troop 76321)

**Abstract:** This paper introduces a design of measurement and control system of industry boiler, based on ARM9 microprocessor. It takes the smallest system of the AT91RM9200 processor as a core, and integrates some hardware module, and uses Linux as the platform. The system has the functions of LCD, touch screen, automatic alarm, communication, A/D, D/A, and I/O extension. The system is real time, steady, credible and expandable.

**Key words:** Embedded System; AT91RM9200; Human Machine Interaction; Linux

## 作者简介:

尹冬梅, 女, 1979 年生, 助教, 硕士研究生, 研究方向: 智能控制、嵌入式系统。

\*\*\*\*\*

(上接第 6 页)

其鞍形波相当于正弦波与三次零序分量的叠加, 具有直流电压利用率高的特点。图 C 为 SVPWM 调制波形图, 为该系统仿真中截取的一段, 图中上半部分为三角波和切换时刻  $T_{coma}$ , 下半部分为经  $T_{coma}$  和三角波调制出来的 SVPWM 脉冲波形和经滤波后得到基波, 从图中可以看出该波形符合实际, 证明了 SVPWM 脉冲发生器的正确性。实验表明该调制方式算法简单合理, 标么化模型易于微处理器运算, 该变频调速系统的动态和静态性能较好, 具有广阔的发展前景。

## 参考文献

- [1] 张琦,等.SVPWM 在变频调速系统中的应用及其 DSP 实现. 电气技术,2007,27(2):76~77
- [2] 谢宝昌,等.电机的 DSP 控制技术及其应用.北京:北京航空航天大学出版社,2005:197~198
- [3] 冬雷,等. DSP 原理及电机控制系统应用.北京:北京航空航天大学出版社,2007:296~297
- [4] 洪乃刚,等.电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真.北京:机械工业出版社,2006:206~207
- [5] 李华德,等.交流调速控制系统.北京:电子工业出版社,2003:146~148

# Variable Frequency Control of AC Induction-Motor Based on SVPWM

Jia Hua Li Junbiao Cui Junhui

(College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology)

**Abstract:** The theory and algorithm realization of space vector pulse width modulation(SVPWM) is discussed and a vector control system of AC induction-motor based on SVPWM is established. The system is simulated by Simulink. The results of experiment indicate that the algorithm of the modulation is right, the proposed method is feasible and the control system has excellent dynamic and static performances.

**Key words:** SVPWM; Vector Control; Frequency Converter; Simulink

## 作者简介:

贾华, 男, 1962 年生, 副教授, 硕士, 研究方向: 主要从事电力电子及电气传动方面的教学和研究。

李俊彪, 男, 1982 年生, 硕士研究生, 研究方向为电气传动。

崔军辉, 女, 1982 年生, 硕士研究生, 研究方向为电气传动。