

空间电压矢量 PWM 的简单算法<sup>①</sup>

王长兵, 王明彦

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 提出一种用于电压型三相逆变器的简单的空间电压矢量 PWM 算法,对其原理进行了详细的分析和推导.该方法实现简单,计算量小,仿真结果表明,能够实现与常规空间电压矢量调制方法一致的调制效果.

**关键词:** 空间矢量; SVPWM 算法; 电压调制

**中图分类号:** TM422 **文献标识码:** A

## 0 引言

在数字化逆变技术中,空间电压矢量 PWM 方法(SVPWM)以“磁链跟踪控制”为目标,具有电压利用率高、电流谐波小等优点,得到了广泛的应用.但是,传统空间电压矢量 PWM 算法复杂,运算时间长,占用了大量的系统控制时间.

SVPWM 调制的原则是使逆变器瞬时输出三相脉冲电压合成的空间电压矢量与期望输出的三相正弦波电压所合成的空间电压矢量相等.文献[3],[4]描述了常用的实现方法:首先根据参考电压矢量  $\vec{V}^*$  的  $\alpha, \beta$  轴分量判断出目标电压矢量所处三角形,求出  $\vec{V}^*$  与该三角形一边的夹角  $\theta$ ,然后计算构成三角形顶点的三个电压矢量的作用时间.这种方法比较直观,但由于使用三角函数及其它非线性函数,实现时需要预先计算矢量作用时间并存储大量数据,计算复杂,难度也很大.本文提出了一种能简单实现 SVPWM 的方法,算法通过实时计算就能完成,其可行性也通过仿真得到了证实.

## 1 SVPWM 的新的实现方法

图1是在  $\alpha - \beta$  坐标系中描述的空间电压矢量图,电压矢量调制的控制指令是矢量控制系统给出的矢量信号  $\vec{V}^* = r \angle \theta$ .它以某一角频率在空间旋转,当它旋转到矢量图的某个  $60^\circ$  扇区中时,系统选中该区间的三个基本电压矢量中所需的矢量,并以此矢量所对应的状态去驱动功率开关元件动作.当控制矢量在空间旋转  $360^\circ$  后,逆变器就能输出一个周期的正弦波电压.在高性能的交流调速及三相逆变系统中,通常采用三相轴系到  $\alpha - \beta$  坐标系的变换.闭环控制系统中,参考电压矢量的  $\alpha - \beta$  分量  $V_\alpha$  和  $V_\beta$  通过闭环控制器的输出很容易获得,开环系统中,将期望输出的电压映射到  $\alpha - \beta$  坐标系中就可以获得这两个分量.这两个分量与参考电压矢量的关系如图2所示.获得这两个分量后,空间电压矢量调制就可以比较容易的实现了.

## 1.1 参考电压矢量所在区域的判断

空间矢量调制的第一步是判断由  $V_\alpha$  和  $V_\beta$  所决定的空间电压矢量所处的扇区.通常的判断方法是:根据  $V_\alpha$  和  $V_\beta$  计算出电压矢量的幅值,再结合  $V_\alpha$  和  $V_\beta$  的正负进行判断<sup>[1]</sup>,这种方法的缺点很明显,含有非线性函数,计算复杂,特别在实际系统中更不容易实现.以下将阐述一种简单有效的判断方法.

<sup>①</sup> 收稿日期:2002-05-03  
作者简介:王长兵(1976-),男,云南通海县人,哈尔滨工业大学在读硕士研究生.

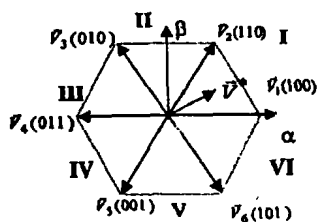


图 1 空间电压矢量及参考矢量图

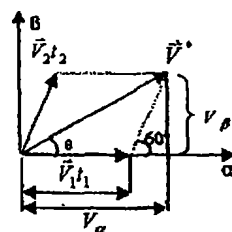


图 2 参考电压矢量的合成及分解

结合正六边形矢量图可以看出

$$\text{若} \begin{cases} V_\alpha > 0 \\ V_\beta > 0 \end{cases} \quad \text{且} \begin{cases} |V_\alpha| \geq \frac{1}{2} |\vec{V}^*| \\ |V_\beta| < \frac{\sqrt{3}}{2} |\vec{V}^*| \end{cases} \quad (1)$$

其中  $|\vec{V}^*| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2}$

则  $|\vec{V}^*|$  处于扇区 I 中

实际上,若进一步结合矢量图几何关系分析,条件(1)可表述为:

$$V_\beta > 0, \text{ 且 } V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta > 0 \quad (2)$$

使用(2)式判断扇区与(1)式等效,且与  $|\vec{V}^*|$  无关,完全避免了计算非线性函数,实现起来就容易多了.以下再分析其它扇区的情况.

$$\text{若 } V_\beta > 0 \text{ 且 } \frac{\sqrt{3}}{2} |\vec{V}^*| \leq |V_\beta| \leq |\vec{V}^*| \quad (3)$$

则  $\vec{V}^*$  位于扇区 II

进一步分析条件(3),可表述为:  $V_\beta > 0$  且  $|V_\alpha| - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta < 0$

同理当  $V_\beta > 0$  且  $-V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta > 0$  时  $\vec{V}^*$  位于扇区 III

当  $V_\beta < 0$  且  $V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta < 0$  时  $\vec{V}^*$  位于扇区 IV

当  $V_\beta < 0$  且  $-|V_\alpha| - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta > 0$  时  $\vec{V}^*$  位于扇 V

当  $V_\beta < 0$  且  $-V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta < 0$  时  $\vec{V}^*$  位于扇 VI

采用以上条件,只需经过简单的加减及逻辑运算即可确定所在扇区,避免了计算复杂的非线性函数,对于简化运算和提高系统的响应速度是很有实际意义的.

但这还不是最简练的表述,若对以上条件作进一步分析,判断方法可进一步简化.由所推导出的条件可以看出,  $\vec{V}^*$  所在扇区完全由  $V_\beta, V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta, -V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta$  三式与 0 的关系决定,由此,可定义以下变量:

$$V_{r1} = V_\beta$$

$$V_{r2} = V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta$$

$$V_{r3} = -V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta$$

再定义,若  $V_{r1} > 0$ , 则  $A = 1$ , 否则  $A = 0$

若  $V_{r2} > 0$ , 则  $B = 1$ , 否则  $B = 0$

若  $V_{r3} > 0$ , 则  $C = 1$ , 否则  $C = 0$

其组合共有八种, 但由判断扇区的公式可以知道  $A, B, C$  不会同时为 1 或同时为 0, 所以实际的组合是六种,  $A, B, C$  组合取不同的值对应着不同的扇区, 并且是一一对应的, 因此完全可以由  $A, B, C$  的组合判断所在扇区。

为区别六种状态, 令  $S = A + 2B + 4C$  (4)

则  $S$  可为 1 至 6 六个整数值, 正好与六个扇区一一对应, 只是在具体数值顺序上与实际顺序有所差别, 若参考电压矢量在扇区 I,  $S$  为 3, 在扇区 II,  $S$  为 1... 用式(4)判断出的数值与实际扇区的对应关系如图 3 所示, 图中棱形区域内的 1 至 6 六个数为式(4)计算出的数值。采用这种方法判断极其简单, 只要在具体分配作用矢量时注意将计算出的  $S$  值与实际扇区号对应即可。

## 1.2 开关持续时间的计算

文献[4]使用的方法用到了空间角度及三角函数, 数字实现时需预先计算并存储大量数据。实际上若充分利用  $V_\alpha$  和  $V_\beta$ , 则可以使计算大为简化。

分析扇区 I 矢量关系, 如图 2 所示, 设逆变系统主电路直流母线电压为  $E_d$ , 矢量  $\vec{V}_1, \vec{V}_2$  和  $\vec{V}_0$  的作用时间  $t_1, t_2$  和  $t_0$  可通过下式计算:

$$\begin{cases} \vec{V}_0 t_0 + \vec{V}_1 t_1 + \vec{V}_2 t_2 = \vec{V}^* T \\ t_0 + t_1 + t_2 = T \end{cases}$$

用  $\alpha - \beta$  坐标系描述, 则有:

$$E_d t_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + E_d t_2 \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{且} \quad t_0 + t_1 + t_2 = T \quad (6)$$

$$t_1 = \frac{T}{E_d} (V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta)$$

由以上两式可解出:

$$t_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_\beta T}{E_d}$$

$$t_0 = T - t_1 - t_2$$

当  $\vec{V}^*$  位于扇区 I 中, 三个基本矢量作用时间由式(6)求解:

$$\begin{cases} \vec{V}_0 t_0 + \vec{V}_2 t_2 + \vec{V}_3 t_3 = \vec{V}^* T \\ t_0 + t_2 + t_3 = T \end{cases} \quad (7)$$

当  $\vec{V}^*$  位于其它扇区中时, 同理可求得各矢量作用时间, 解各方程后将结果列于表 1 中, 就是采用新的方法实现空间电压矢量 PWM 的算法。

表 1 各扇区空间电压矢量作用时间

扇区 I	$t_1 = \frac{T}{E_d} (V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta)$	扇区 II	$t_2 = \frac{T}{E_d} (V_\alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta)$
	$t_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_\beta T}{E_d}$		$t_3 = \frac{T}{E_d} (\frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta - V_\alpha)$
	$T_0 = T - t_1 - t_2$		$T_0 = T - t_2 - t_3$

<p>扇区 I</p> $t_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{T}{E_d} V_\beta$ $t_4 = -\frac{T}{E_d} (V_\alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta)$ $T_0 = T - t_3 - t_4$ <p>扇区 V</p> $t_5 = -\frac{T}{E_d} (V_\alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta)$ $t_6 = \frac{T}{E_d} (\frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta - V_\alpha)$ $T_0 = T - t_5 - t_6$	<p>扇区 II</p> $t_1 = \frac{T}{E_d} (\frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta - V_\alpha)$ $t_5 = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{T}{E_d} V_\beta$ $T_0 = T - t_1 - t_5$ <p>扇区 VI</p> $t_6 = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{T}{E_d} V_\beta$ $t_1 = \frac{T}{E_d} (V_\alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta)$ $T_0 = T - t_6 - t_1$
---	--

以上公式不涉及非线性函数,无需预先计算及存表,实时计算完全可以实现.计算出各矢量作用时间后,下一步是确定 A, B, C 三相相应的开关时间.以第 I 扇区的 PWM 输出波形为例,如图 4 所示,图中包括三角载波和三相输出电压波形及该扇区内的电压空间矢量序列,  $t_{aon}, t_{bon}, t_{con}$  分别为与三角波进行比较以产生 PWM 波形的三个比较值.先假定三角载波幅值和周期相等,要保证各矢量持续的时间,应如下计算比较值:

$$t_{aon} = \frac{T - t_A - t_B}{2}$$

$$t_{bon} = t_{aon} + t_A$$

$$t_{con} = t_{bon} + t_B$$

其中  $t_A, t_B$  为两个非零矢量的作用时间,  $t_A, t_B$  在不同扇区中对应不同矢量的作用时间,具体对应哪一个矢量可由各扇区矢量顺序确定,无论在哪一个扇区  $t_A$  都对应最先作用的非零矢量时间(如扇区 I 中  $t_A$  等于  $t_1$ ),  $t_B$  则为另外一个非零矢量的作用时间.在一个载波周期中,三个比较值具体分配给哪一相可由各扇区 PWM 波形确定,  $t_{aon}$  应分配给输出占空比最大的相,  $t_{con}$  分配给占空比最小的相.

## 2 仿真分析

为验证本文提出的这种 SVPWM 实现方法的正确性,采用 SIMULINK 完成了开环系统的仿真分析.开关频率 5kHz,基频 50Hz,所采用的电机模型为 SIMULINK 电气系统模块库中提供的异步电机模型.电机参数如下:2.2kW,220V,50Hz,极对数  $P = 2$ ,定子电阻  $R_s = 0.435\Omega$ ,转子电阻  $R_r = 0.816\Omega$ ,定子漏感  $L_{\sigma 1}$ ,转子漏感  $L_{\sigma 2}$  均为 2mH,定转子互感  $L_m = 69.3\text{mH}$ ,机械转动惯量  $J = 0.035\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

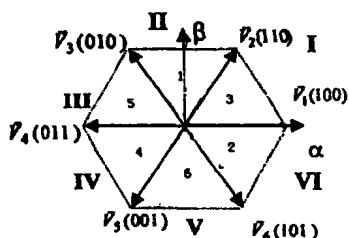


图 3 参考电压矢量所在扇区的判断

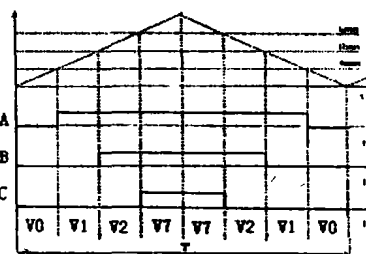


图 4 扇区 I 的 PWM 波形示意图

图 5 ~ 图 10 分别是参考电压扇区号判断波形,速度曲线, AB 相线电压波形,定子电流波形,电磁转矩波形和稳态时的定子磁链轨迹波形.电机空载启动,在 0.4s 时突加负载  $3\text{N} \cdot \text{m}$ .系统动静态性能良好.仿

真结果证实该方法确实能够实现与常规空间电压矢量调制方法完全一致的调制效果。

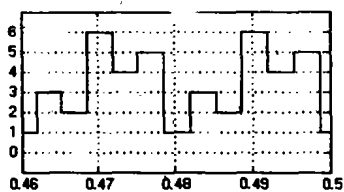


图5 参考电压所在扇区的判断

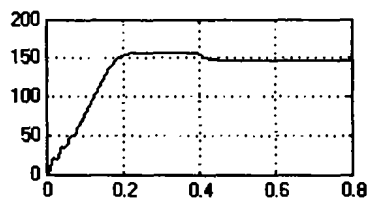


图6 速度响应曲线

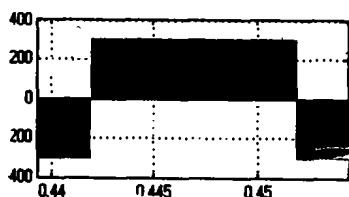


图7 AB相线电压波形

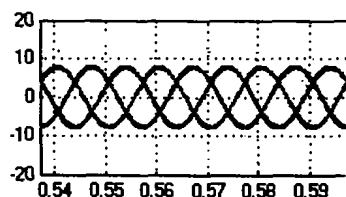


图8 定子线电流波形

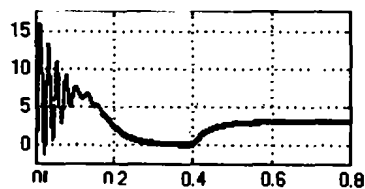


图9 电磁转矩波形

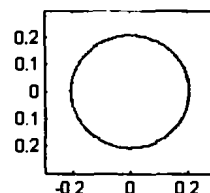


图10 定子磁链轨迹波形

### 3 结 论

本文描述了一种简单新颖的 SVPWM,对其进行了详细推导,并给出了仿真结果.这种方法可用于开环或闭环控制系统,经过简单的运算即可实现,与传统算法相比,无需计算非线性函数及存储大量表格,特别适用于数字控制系统,算法极其简单,完全可以通过软件实时实现,很有实际意义.

#### 参考文献:

- [1] Xiaowei Zhang, Yongdong Li and Wensen Wang. A Novel Implementation of SVPWM Algorithm and Its Application to Three-Phase Power Converter. PIEMC 2000[C]. The Third International, Volume, 3, 2000, 1104-1107.
- [2] Profumo F, Boglietti A, Griva G, Pastorelli M. Space Vector and Sinusoidal PWM Techniques Comparison Keeping in Account The Secondary Effects[C]. AFRICON '92 Proceedings, 3rd AFRICON Conference, 1992, 394-399.
- [3] H. W. Vander Broeck and H. C. Skudenlmy. Analysis and Realization of A Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vector[J]. IEEE Trans. 1988, IA-34, PP 142-150.
- [4] 李玲玲. 采用空间电压矢量法的专用逆变器微机控制系统[J]. 上海铁道大学学报, 1996, (3)

## A SIMPLE ALGORITHM FOR SPATIAL VOLTAGE VECTOR PWM

WANG Chang-bing, WANG Ming-yan

(College of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**ABSTRACT:** A simple algorithm for spatial voltage vector PWM of three-phase inverter is proposed. Particular analysis and deduction are made for the principle. The method is very simple to be carried out and easy to be operated. The computer simulation results show that the modulation effect is the same as that of the traditional methods.

**KEY WORDS:** space vector; SVPWM algorithm; voltage modulation