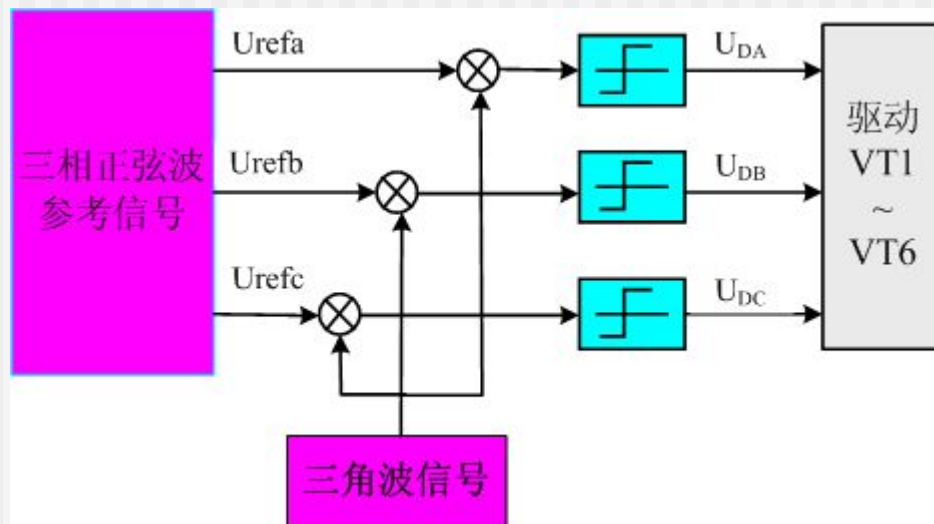
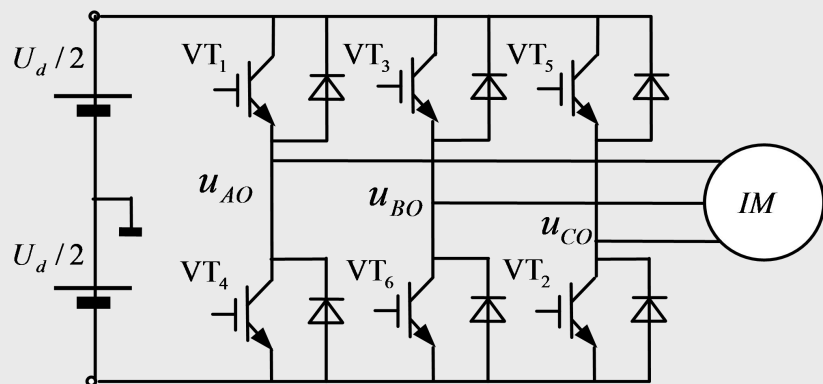


# SPWM工作原理：

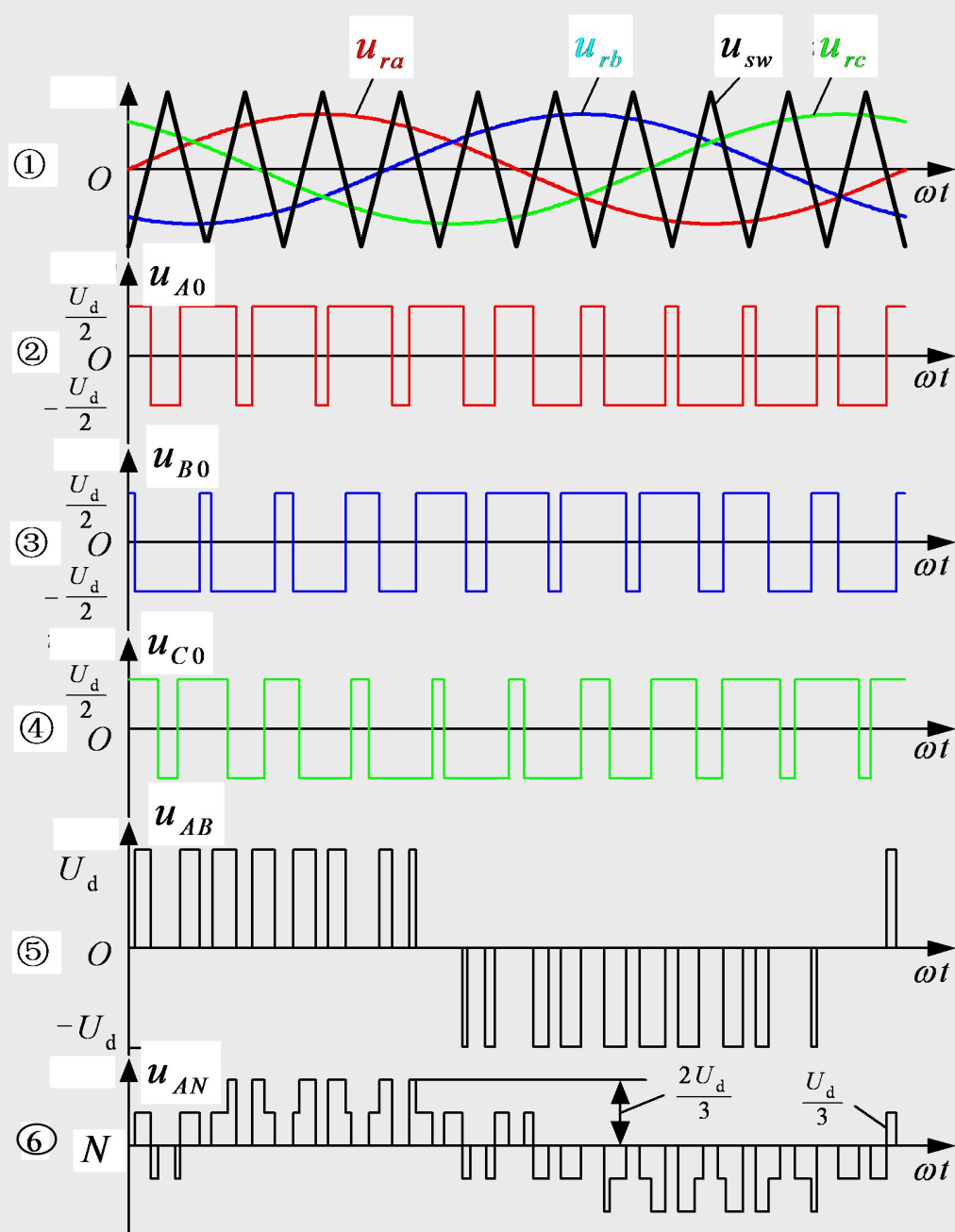
$$\begin{cases} U_A = U_m \sin(\omega t) \\ U_B = U_m \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ U_C = U_m \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{cases}$$



为了得到SPWM波形，  
采用正弦波作为基准波信号  
与载波信号比较的方法。

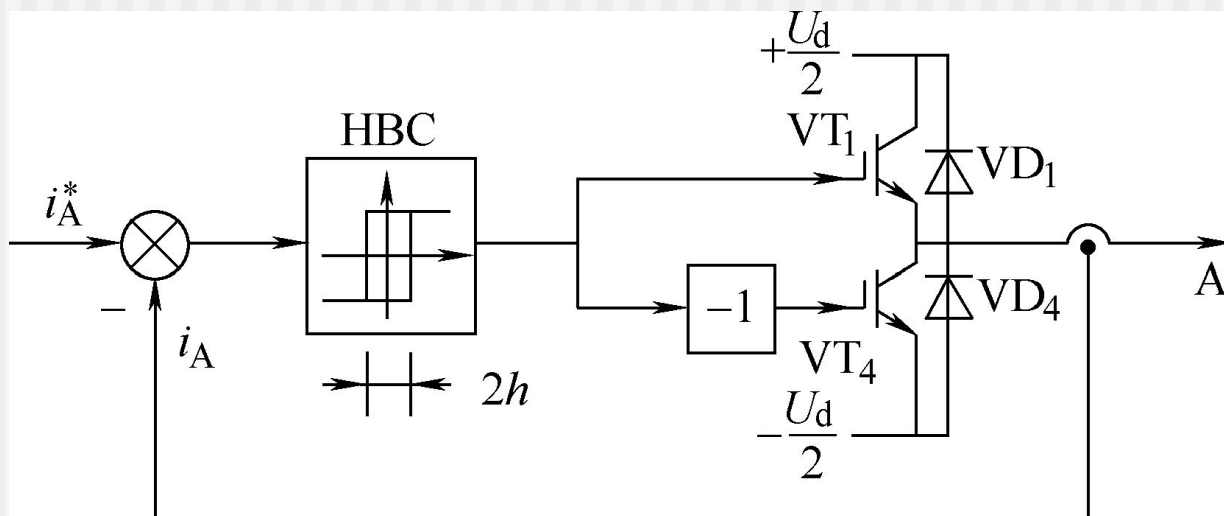


(a)主电路示意图



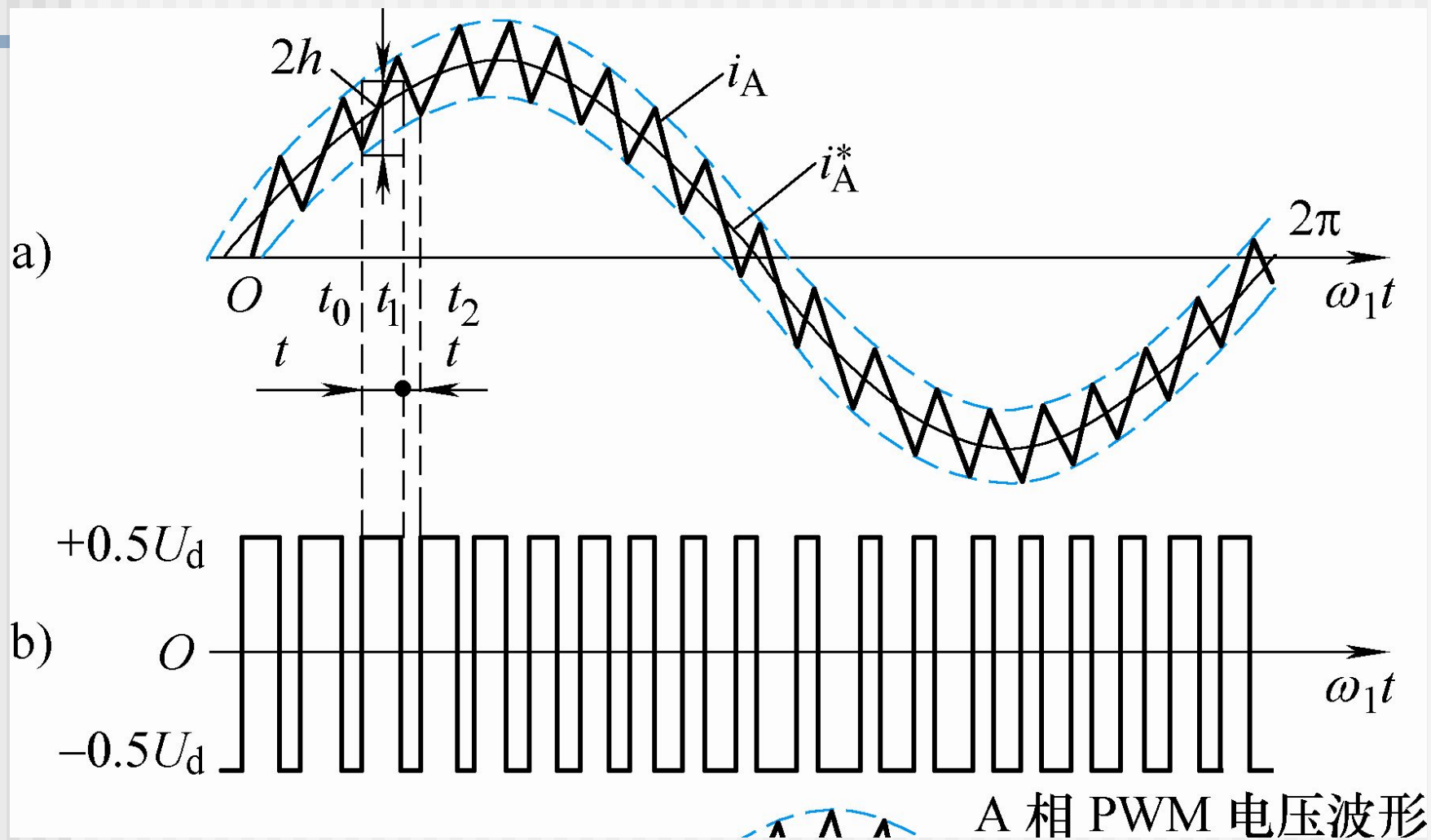
三相逆变电路及SPWM控制下的输出波形

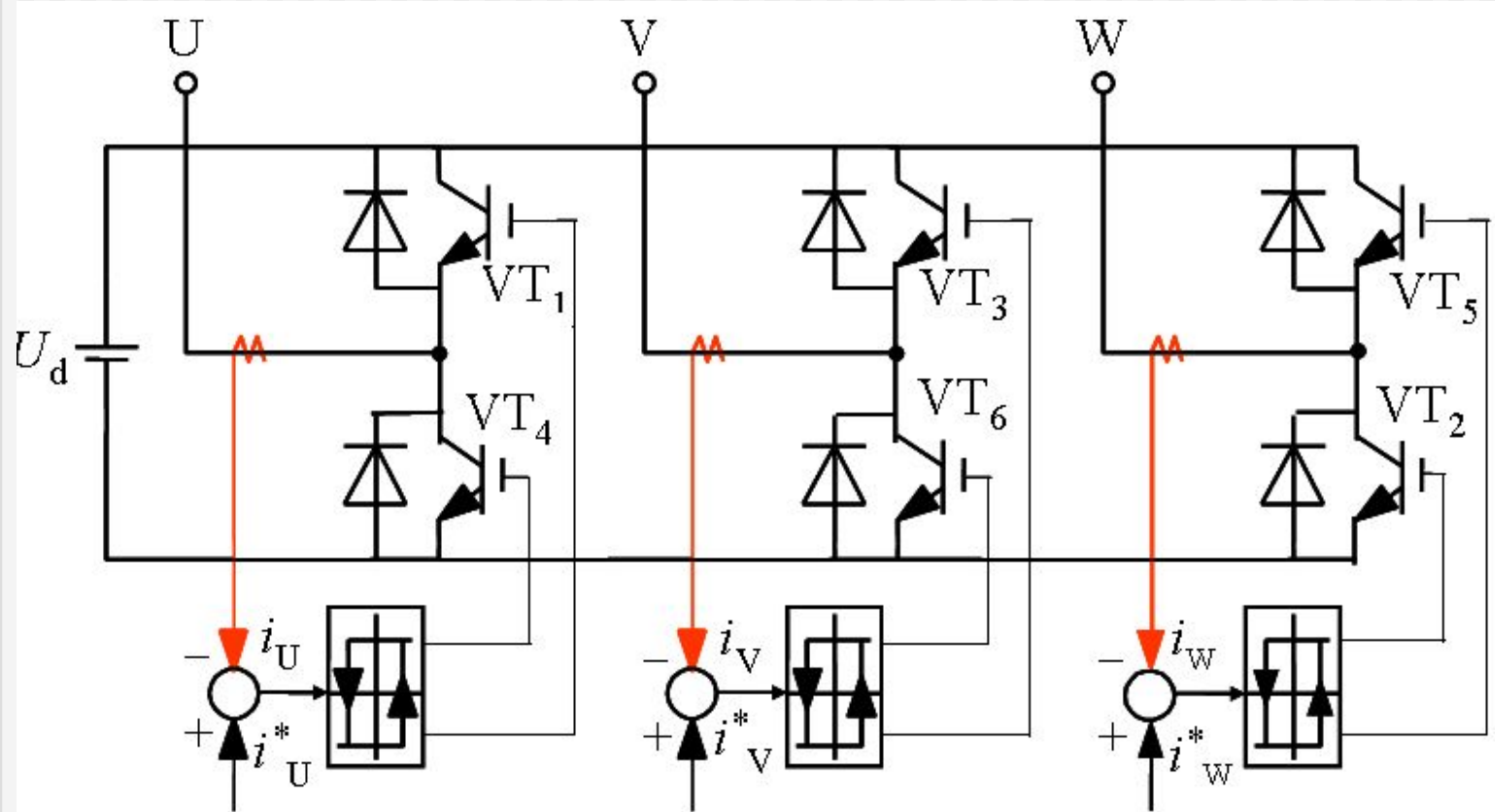
## 5.4.4 电流跟踪PWM (CFPWM) 控制技术



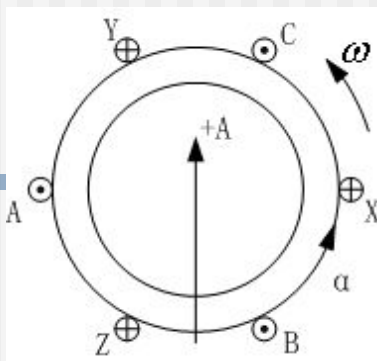
电流滞环跟踪控制的A相原理图

# 电流跟踪PWM (CFPWM) 控制技术

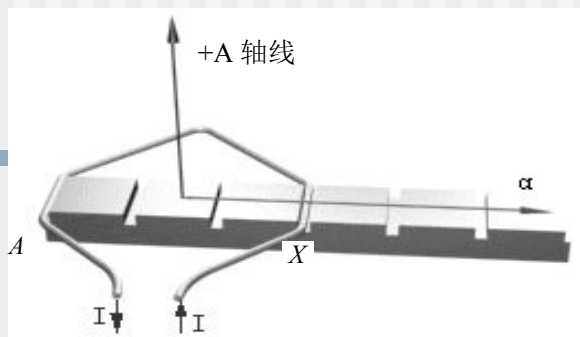




# 1 现代电机控制理论所使用的电机模型



(a) 以发电机为例的电机模型



(b) 圆弧坐标

假定产生磁动势的电流与之同空间方向

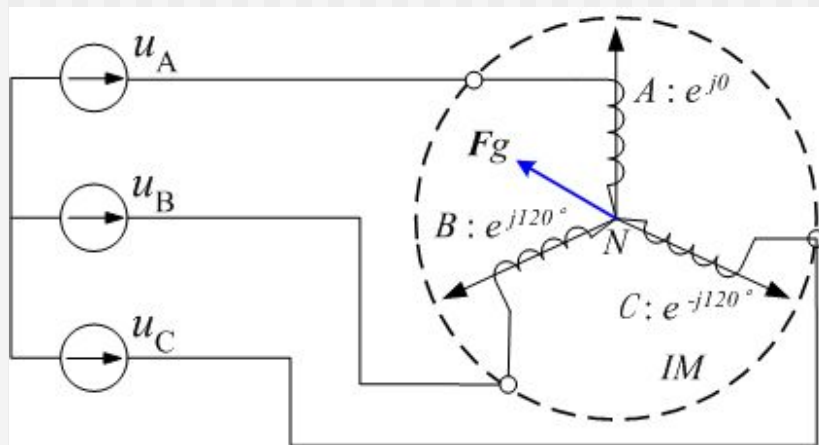
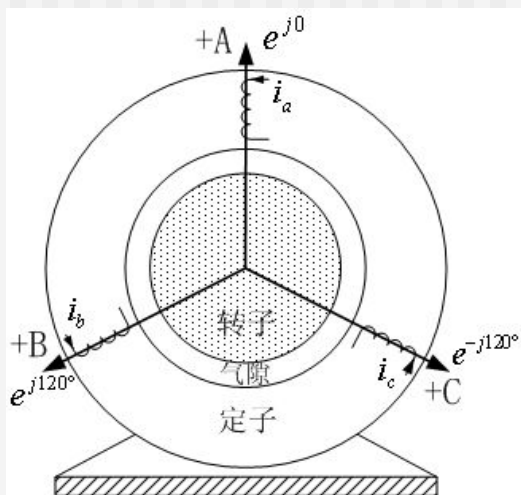


图 6.2.9 理想电源和电机磁动势的空间矢量表示

旋转磁场演示程序 ([链接动画](#))

定义定子各相空间电压矢量为：

$$\mathbf{u}_A = u_A e^{j0}, \mathbf{u}_B = u_B e^{j120}, \mathbf{u}_C = u_C e^{-j120}$$

各个矢量的方向始终处于各相绕组的轴线上，而大小则随时间按正弦规律脉动，时间相位互相错开的角度也是  $120^\circ$ 。

定义三相定子电压空间矢量相加的合成矢量  $\mathbf{u}_1$  为：

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &\triangleq \sqrt{2/3}(\mathbf{u}_A + \mathbf{u}_B + \mathbf{u}_C) \\ &= \sqrt{2/3}(u_A e^{j0^\circ} + u_B e^{j120^\circ} + u_C e^{-j120^\circ}) \end{aligned} \quad (6.2-8)$$

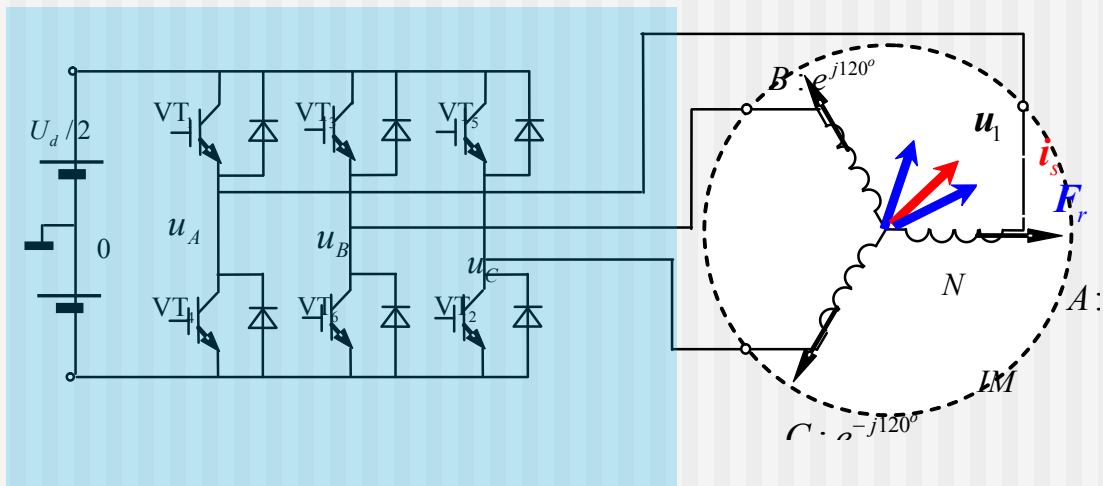
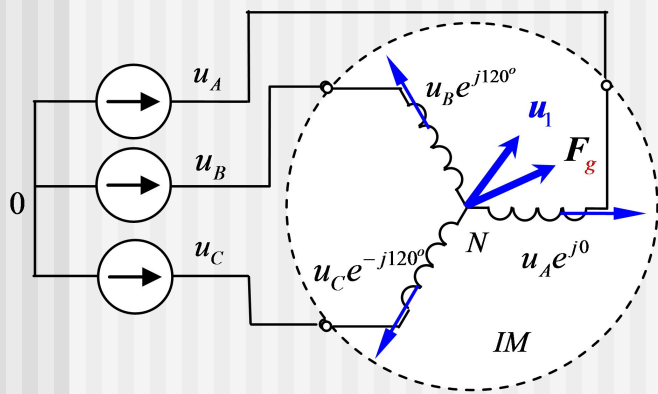
电压矢量  $\mathbf{u}_1(t)$  还可用于极坐标表示为

$$\mathbf{u}_1(t) = u_1(t) e^{j\theta} \quad (6.2-9)$$

由上式可知， $\mathbf{u}_1$  是一个旋转的空间矢量，它以电源角频率  $\omega_1$  作旋转。当某一相电压为最大值时，合成电压矢量  $\mathbf{u}_1$  就落在该相的轴线上。

旋转的空间电压矢量 ([链接动画](#))

# 基于空间电压矢量 (SVPWM) 的调制的基本想法





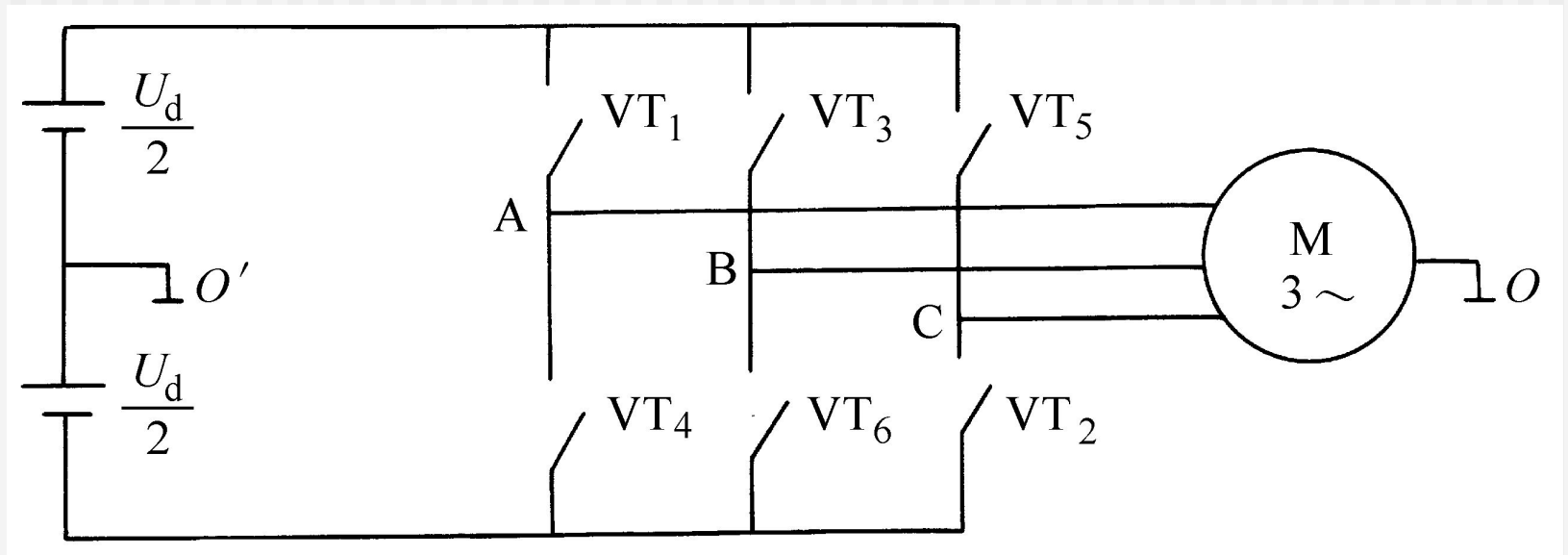
# 开关函数与开关模式

定义开关函数：

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{当上桥臂器件导通时} \\ 0 & \text{当下桥臂器件导通时} \end{cases}$$

(  $i=A,B,C$  )

则每一时刻的 $u_s$ 将由此时的三个开关函数值唯一确定，记作 $u_s(S_A, S_B, S_C)$ ，并称 $(S_A, S_B, S_C)$ 在不同数值下的组合为变频器的开关模式（开关代码）。



## 开关开关状态表

序号	开 关 状 态	开关代码
1	$VT_6 VT_1 VT_2$	100
2	$VT_1 VT_2 VT_3$	110
2	$VT_2 VT_3 VT_4$	010
4	$VT_3 VT_4 VT_5$	011
5	$VT_4 VT_5 VT_6$	001
6	$VT_5 VT_6 VT_1$	101
7	$VT_1 VT_3 VT_5$	111
8	$VT_2 VT_4 VT_6$	000

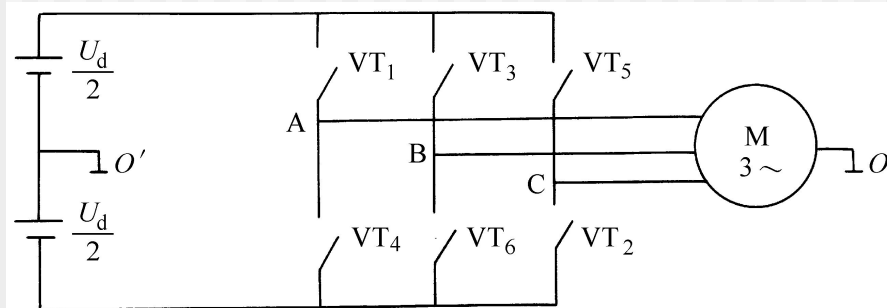
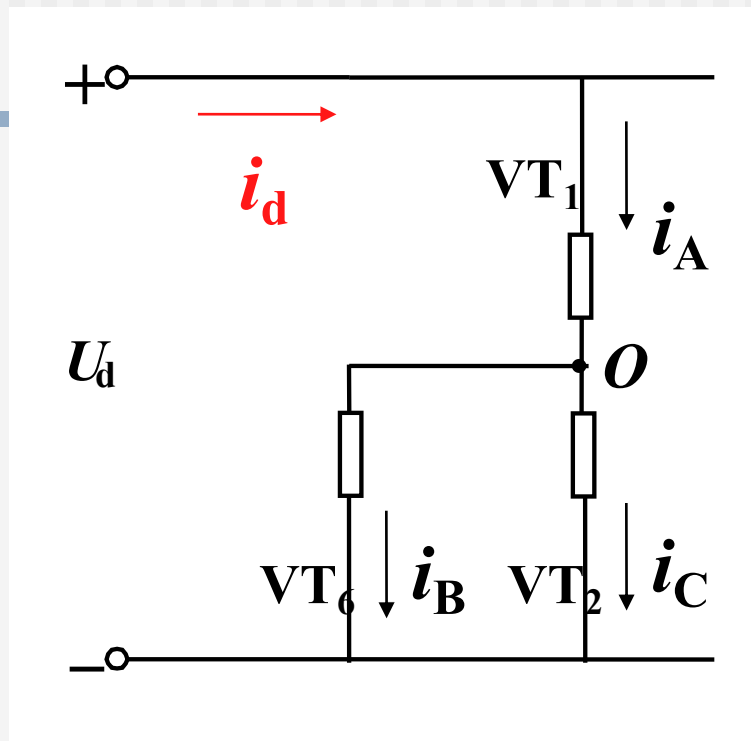
# • 开关控制模式

## (a) 开关模式分析

- 设工作周期从100状态开始，这时 $VT_6$ 、 $VT_1$ 、 $VT_2$ 导通，其等效电路如图所示。各相对直流电源中点的电压幅值为

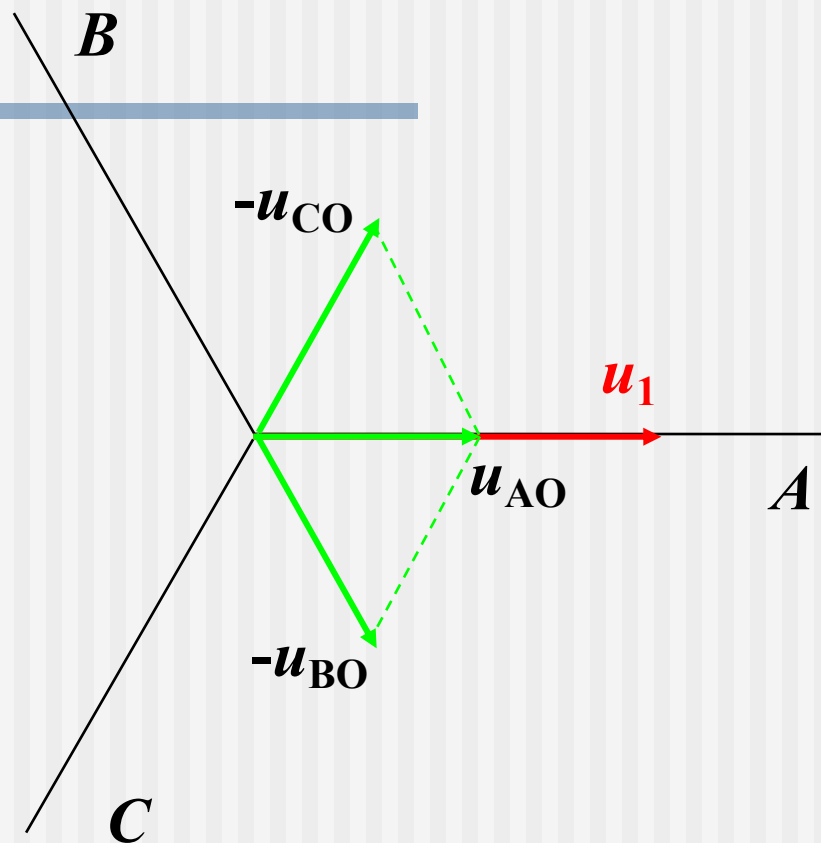
$$U_{AO'} = U_d / 2$$

$$U_{BO'} = U_{CO'} = - U_d / 2$$



## (b) 工作状态100的合成电压空间矢量

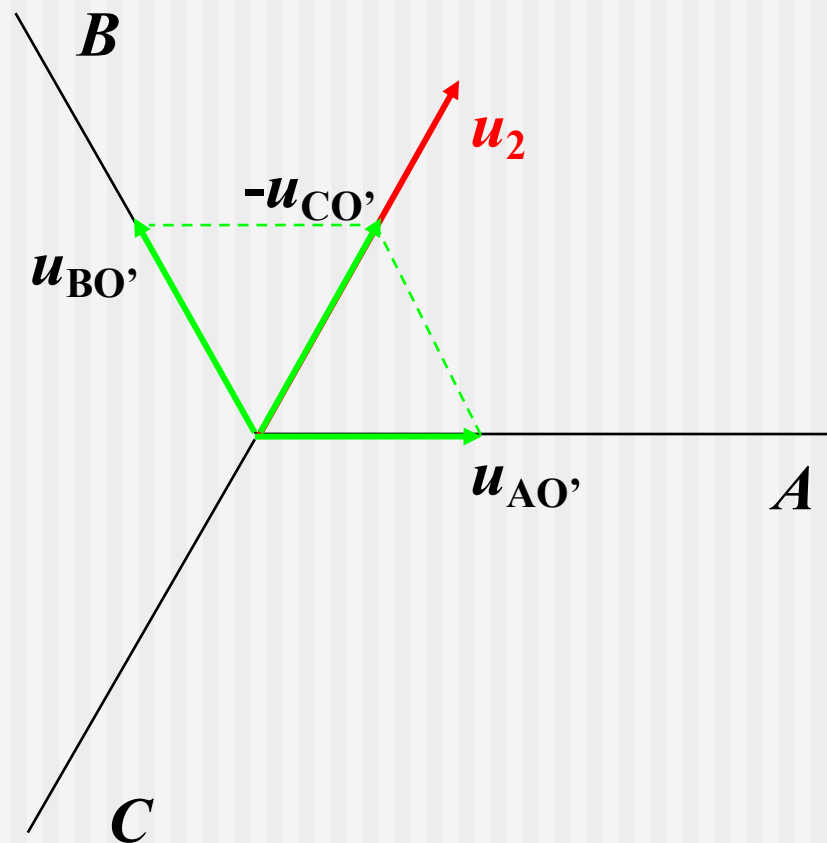
- 由图可知，三相的合成空间矢量为  $u_1$ ，其幅值等于  $U_d$ ，方向沿  $A$  轴（即  $X$  轴）。
- $u_1$  存在的时间为  $\pi/3$ ，之后，工作状态转为 110。



$$u_1 = U_{AO} + U_{BO}e^{j120^\circ} + U_{CO}e^{j240^\circ}$$

## (c) 工作状态110的合成电压空间矢量

- 和上面的分析相似，合成空间矢量变成图中的  $u_2$ ，它在空间上滞后于  $u_1$  的相位为  $\pi/3$  弧度，存在的时间也是  $\pi/3$ 。

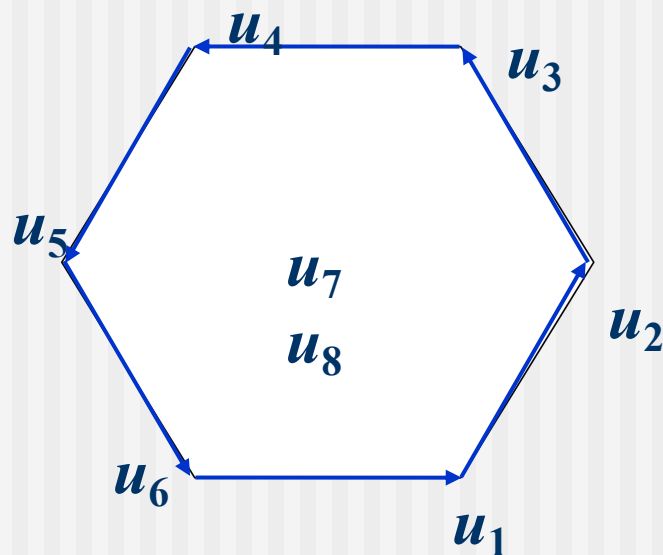
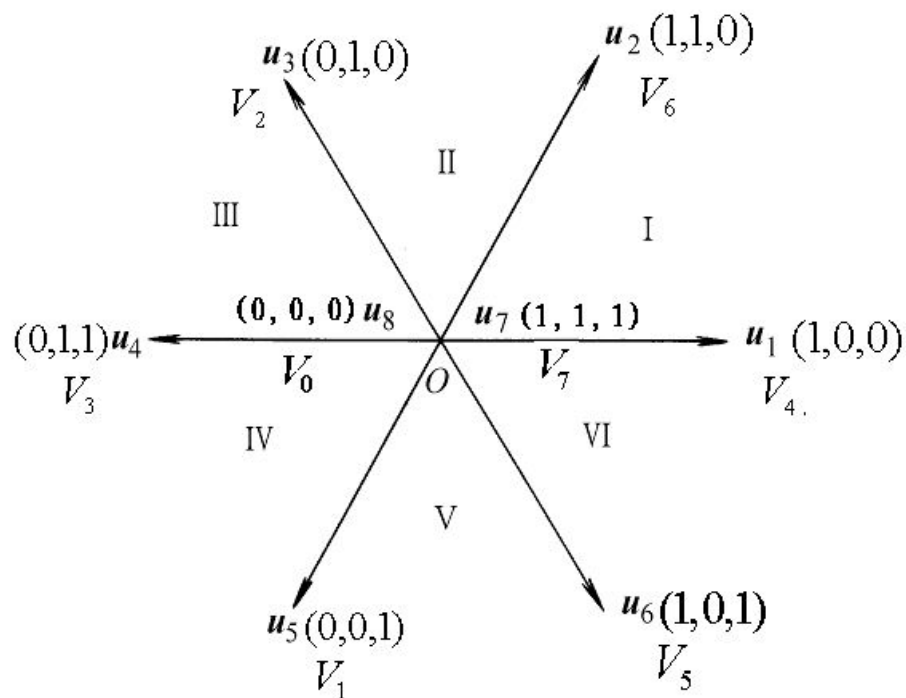


## (d) 每个周期的六边形

### 合成电压空间矢量

随着逆变器工作状态的切换，电压空间矢量的幅值不变，而相位每次旋转  $\pi/3$ ，直到一个周期结束。

在一个周期中 6 个电压空间矢量共转过  $2\pi$  弧度，形成一个封闭的正六边形，如图所示。



## • 电压空间矢量的扇区 (Sector) 划分

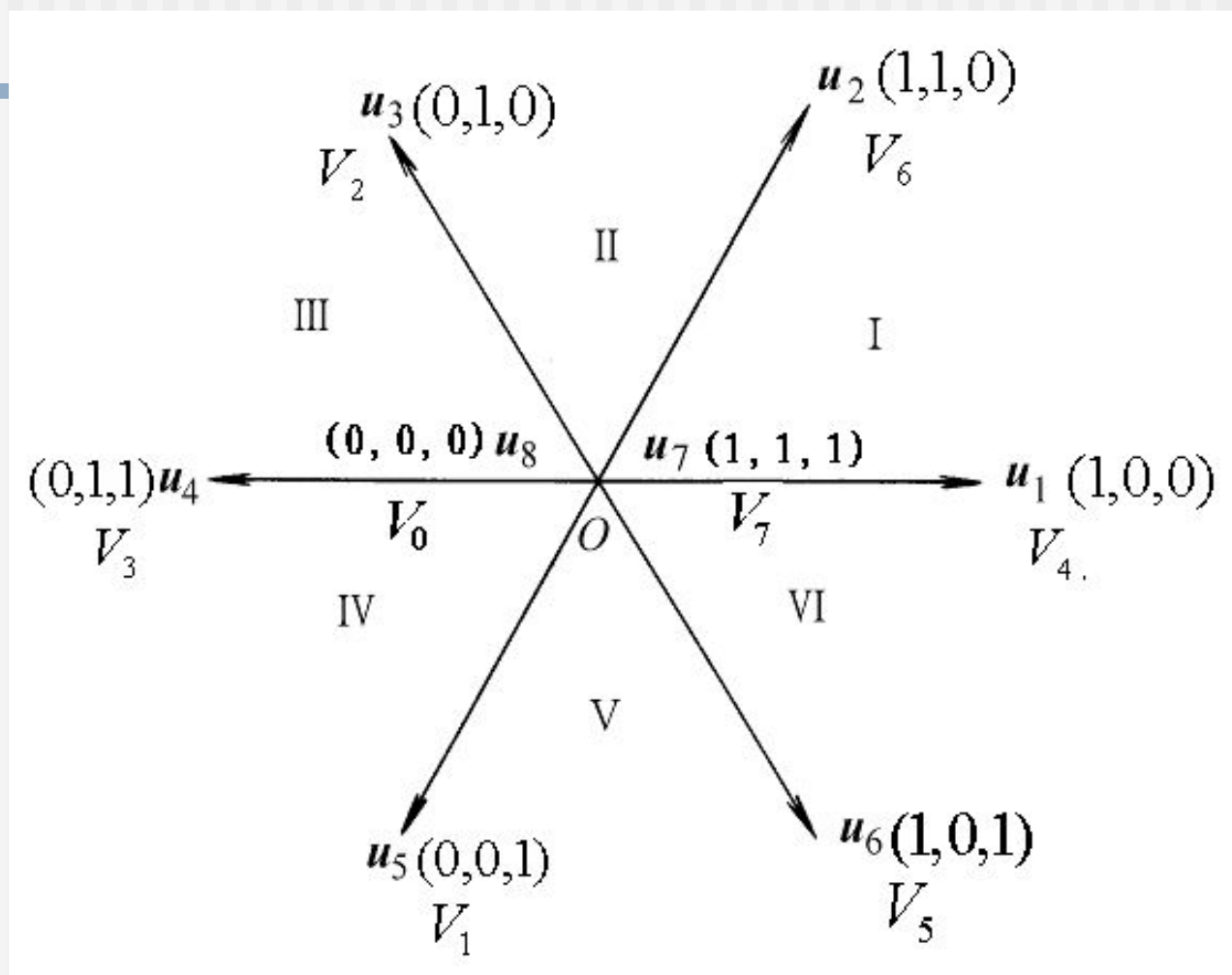


图7 电压空间矢量的放射形式和6个扇区



## • 线性组合方法（以在区域I为例说明）

设在一个换相周期时间 $T_0$ 内，可用两个矢量之和表示由两个矢量线性组合后的新电压矢量 $u_s$ ，其相位为 $\theta$ 。

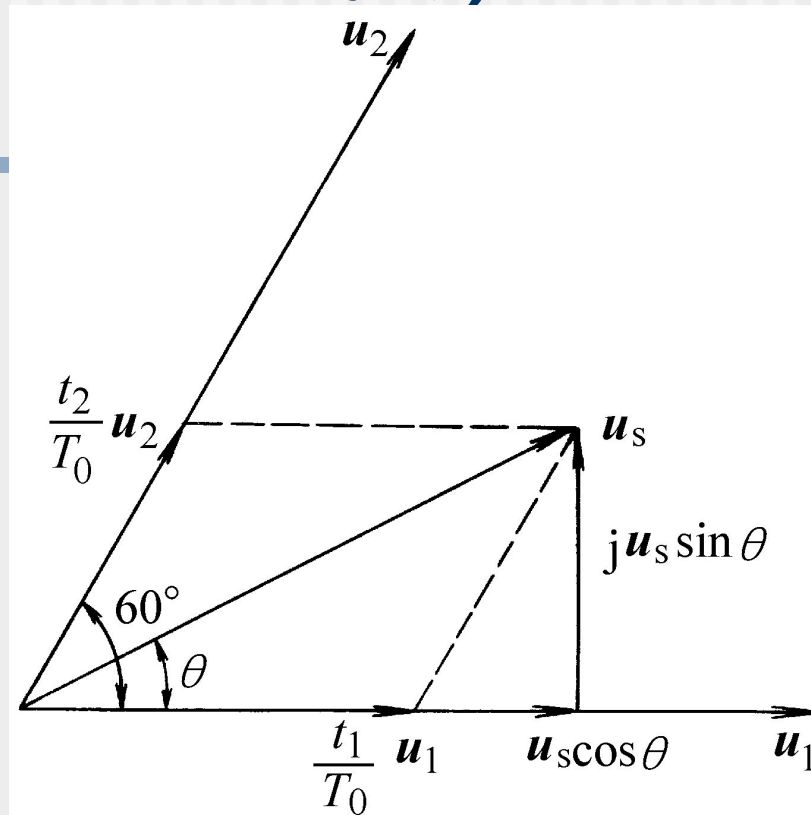


图6 电压空间矢量的线性组合

$$u_s = \frac{t_1}{T_0} u_1 + \frac{t_2}{T_0} u_2 = u_s \cos \theta + j u_s \sin \theta \quad (10)$$

## • 作用时间的确定

根据各个开关状态的线电压表达式可以推出

$$\begin{aligned} u_s &= \frac{t_1}{T_0} U_d + \frac{t_2}{T_0} U_d e^{j\pi/3} = U_d \left( \frac{t_1}{T_0} + \frac{t_2}{T_0} e^{j\pi/3} \right) \\ &= U_d \left[ \frac{t_1}{T_0} + \frac{t_2}{T_0} \left( \cos \frac{\pi}{3} + j \sin \frac{\pi}{3} \right) \right] = U_d \left[ \frac{t_1}{T_0} + \frac{t_2}{T_0} \left( \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] \\ &= U_d \left[ \left( \frac{t_1}{T_0} + \frac{t_2}{2T_0} \right) + j \frac{\sqrt{3}t_2}{2T_0} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

比较式（10）和式（11），令实数项和虚数项分别相等，则

$$u_s \cos \theta = \left( \frac{t_1}{T_0} + \frac{t_2}{2T_0} \right) U_d$$

$$u_s \sin \theta = \frac{\sqrt{3}t_2}{2T_0} U_d$$

■ 解  $t_1$  和  $t_2$  , 得

$$\frac{t_1}{T_0} = \frac{2U_r}{\sqrt{3}U_d} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$$

$$\frac{t_2}{T_0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{u_s \sin \theta}{U_d}$$

- 零矢量的使用

换相周期  $T_0$  应由旋转磁场所需的频率决定，设零矢量  $u_7$  和  $u_8$  的作用时间为  $t_7$  和  $t_8$ 。为了减少功率器件的开关次数，一般使  $u_7$  和  $u_8$  各占一半时间，因此

$$t_7 = t_8 = \frac{1}{2}(T_0 - t_1 - t_2) \geq 0 \quad (16)$$

## • 开关状态顺序原则

---

在实际系统中，应该尽量减少开关状态变化时引起的开关损耗，因此**不同开关状态的顺序必须遵守下述原则**：每次切换开关状态时，只切换一个功率开关器件，以使开关损耗最小。

## • $T_0$ 区间的电压波形

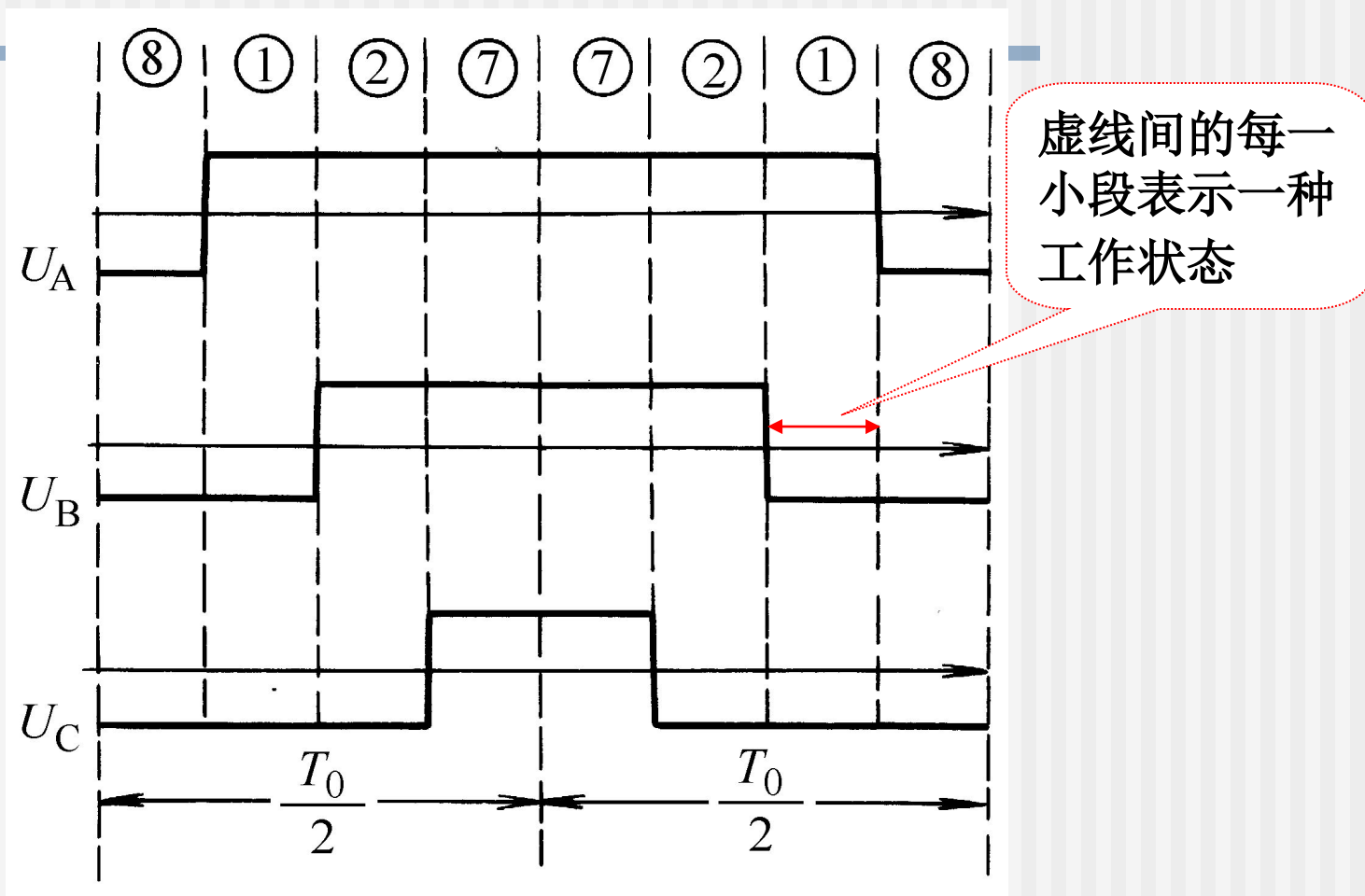


图8 第 I 扇区内一段  $T_0$  区间的开关序列与逆变器三相电压波形

