



# 电力牵引传动与控制

## 第六章 牵引逆变器主电路及控制

西南交通大学

苟 斌

本科生讲稿





# 主要内容

- 5.1 两电平牵引逆变器主电路
- 5.2 两电平逆变器PWM技术
- 5.3 三电平牵引逆变器主电路
- 5.4 三电平逆变器PWM技术



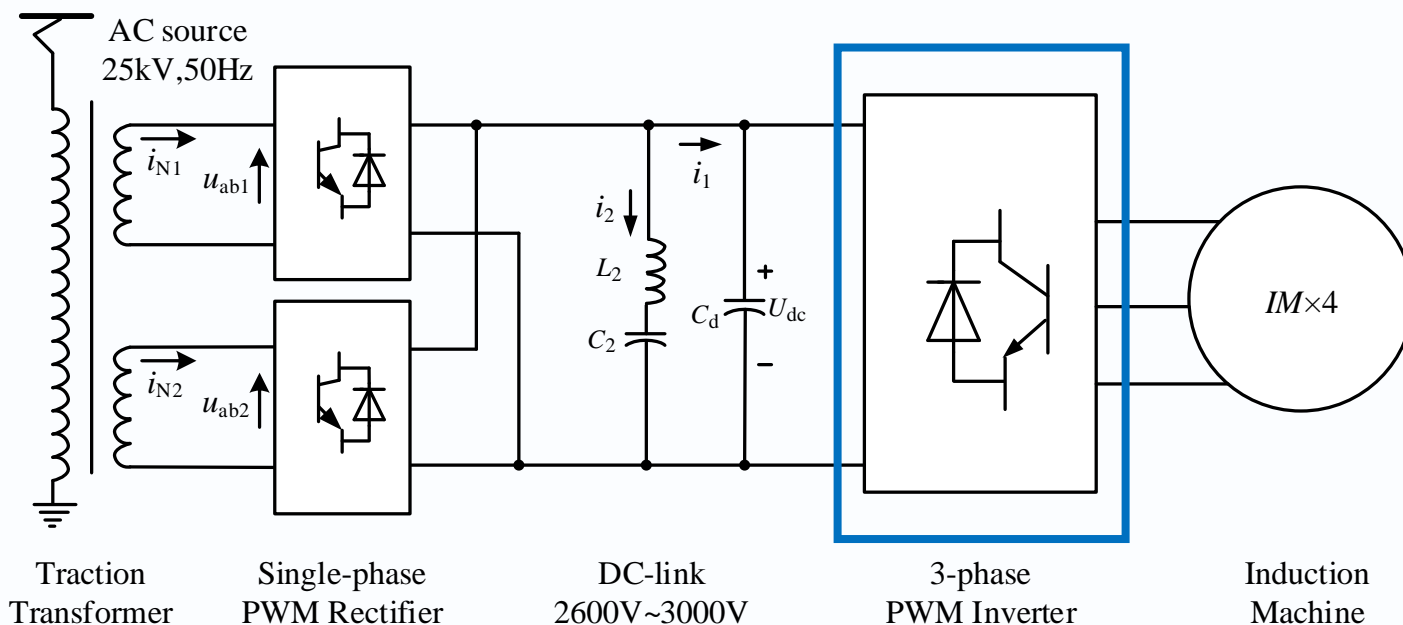
# 牵引逆变器

- 牵引逆变器可以分成**电压源型**和**电流源型**两种，为同步电机供电的大多采用**电流源型**逆变器，为异步电机供电的大多采用**电压源型**逆变器，我国高速列车全部采用**电压源型**逆变器。
- 根据输出电平数的不同，电压源型牵引逆变器又可分为**两电平**和**三电平**两种。



# 5.1 电压型三相逆变器

4

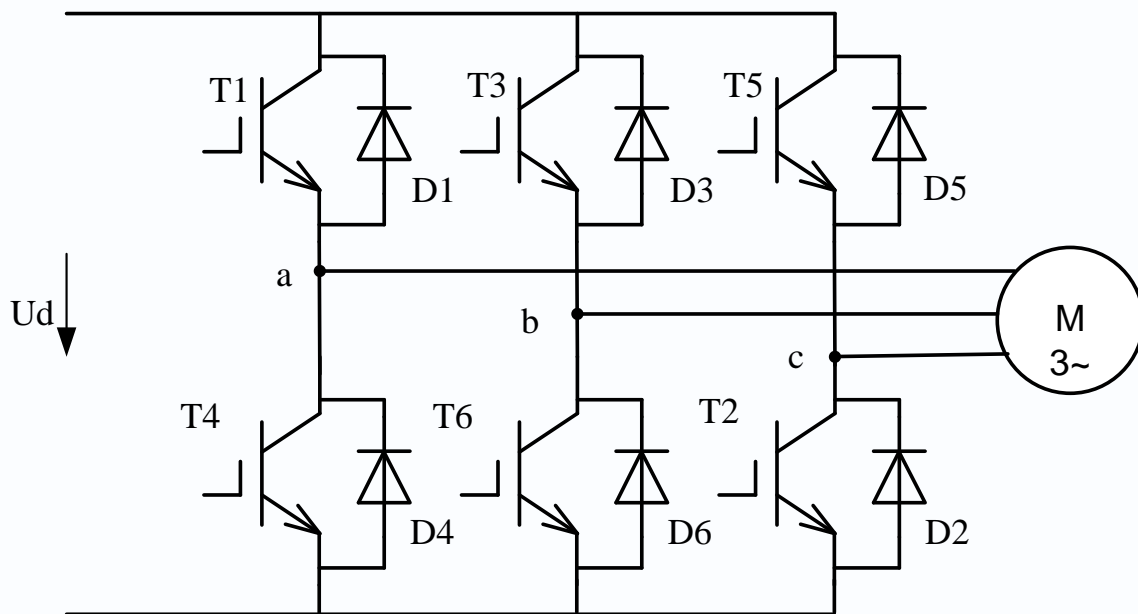


- 列车牵引时起**逆变作用**，将直流电转变成电压频率变化的三相交流电；
- 再生制动时起**整流作用**，将三相交流电转变成直流电，由整流器回馈电网。



# 5.1 两电平电压型三相逆变器

- 两电平式逆变器主电路如图所示，每时刻都有三个开关管导通，共有 $T_1T_2T_3$ ， $T_2T_3T_4$ ， $T_3T_4T_5$ ， $T_4T_5T_6$ ， $T_5T_6T_1$ ， $T_6T_1T_2$ ， $T_1T_3T_5$ 和 $T_2T_4T_6$ 导通8种工作状态，从而获得三相对称输出电压波形。



两电平逆变器主电路图



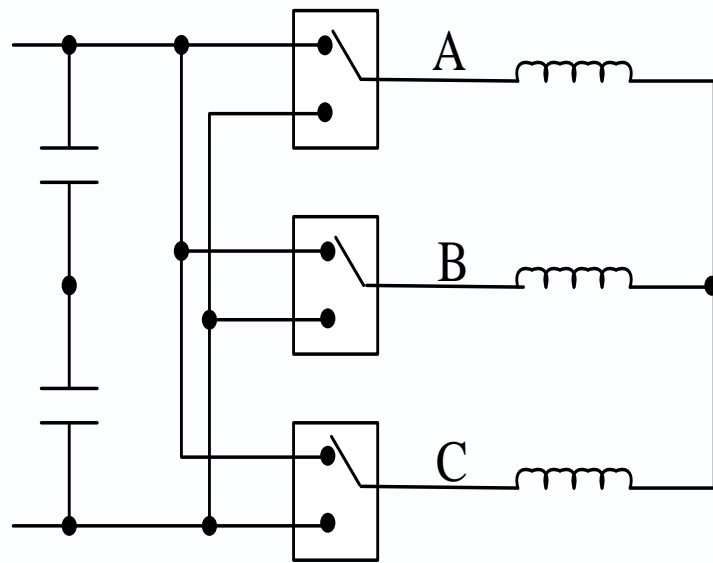
# 5.1 两电平电压型三相逆变器

- 为了便于分析，电力电子器件采用理想开关表示，定义开关函数为  $S_i$  ( $i$  为A, B, C) ,三相不同开关组合有  $2^3 = 8$  种工作状态

$$S_A = \begin{cases} 1 & T_1 \text{导通} \\ 0 & T_4 \text{导通} \end{cases}$$

$$S_B = \begin{cases} 1 & T_3 \text{导通} \\ 0 & T_6 \text{导通} \end{cases}$$

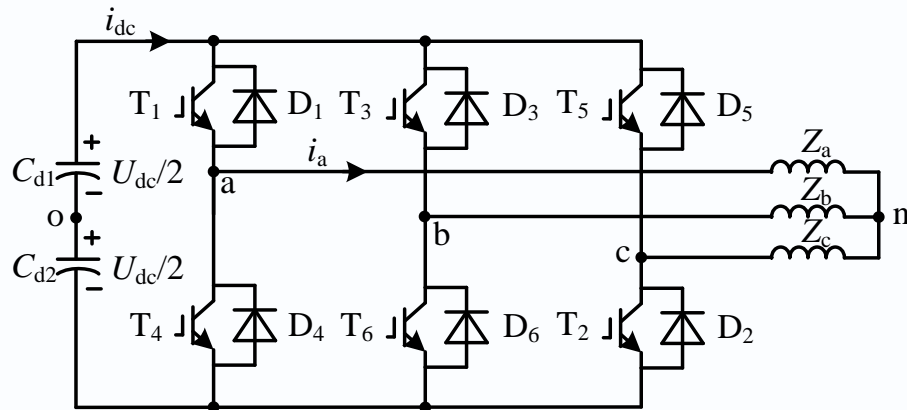
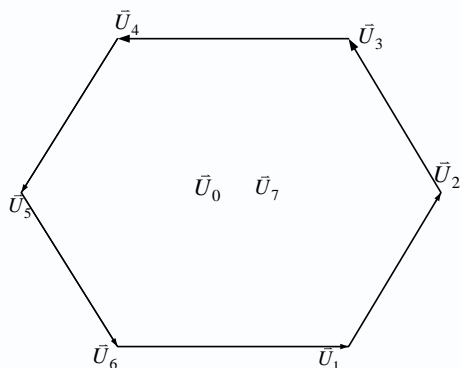
$$S_C = \begin{cases} 1 & T_5 \text{导通} \\ 0 & T_2 \text{导通} \end{cases}$$



简化等效开关电路

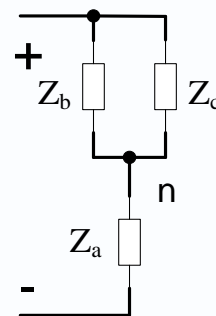
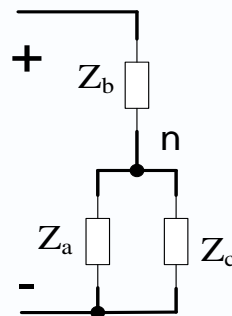
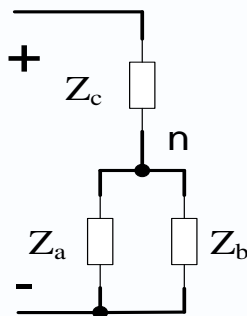
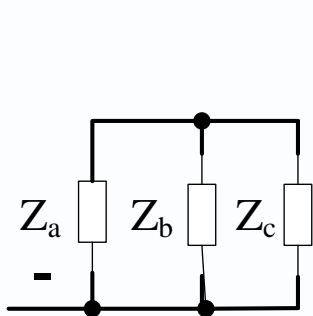


# 5.1 两电平电压型三相逆变器



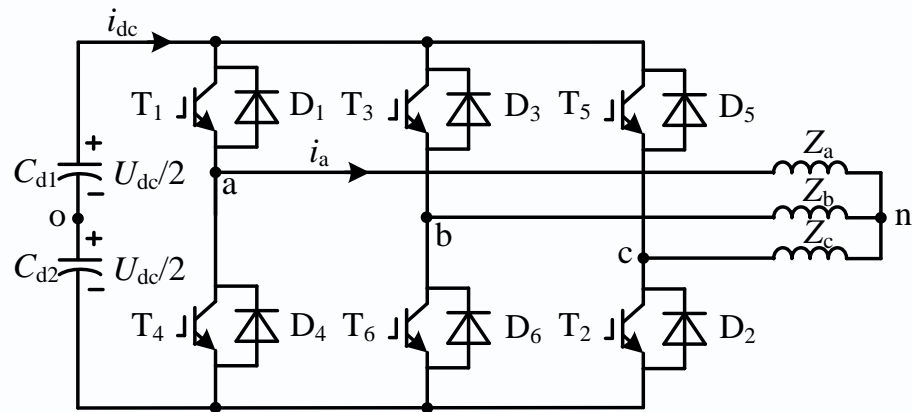
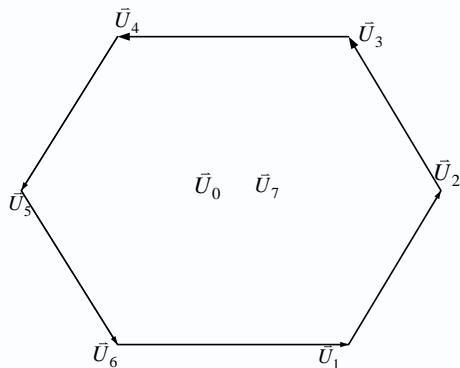
两电平牵引逆变器工作状态及相应的电压

Mode	$S_A$	$S_B$	$S_C$	$u_{an}$	$u_{bn}$	$u_{cn}$	$u_{ab}$	$u_{bc}$	$u_{ca}$	矢量
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\vec{U}_0$
1	0	0	1	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$	$2U_{dc}/3$	0	$-U_{dc}$	$U_{dc}$	$\vec{U}_5$
2	0	1	0	$-U_{dc}/3$	$2U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}$	$U_{dc}$	0	$\vec{U}_3$
3	0	1	1	$-2U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$	$-U_{dc}$	0	$U_{dc}$	$\vec{U}_4$



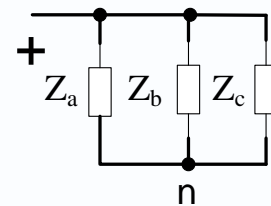
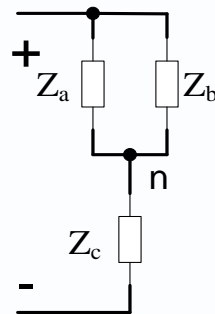
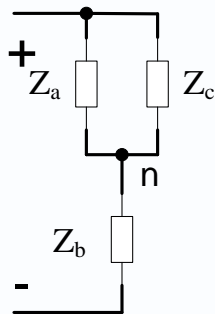
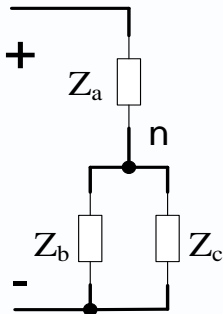


# 5.1 两电平电压型三相逆变器



两电平牵引逆变器工作状态及相应的电压

Mode	$S_A$	$S_B$	$S_C$	$u_{an}$	$u_{bn}$	$u_{cn}$	$u_{ab}$	$u_{bc}$	$u_{ca}$	矢量
4	1	0	0	$2U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$	$U_{dc}$	0	$-U_{dc}$	$\vec{U}_1$
5	1	0	1	$U_{dc}/3$	$-2U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$	$U_{dc}$	$-U_{dc}$	0	$\vec{U}_6$
6	1	1	0	$U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$	$-2U_{dc}/3$	0	$U_{dc}$	$-U_{dc}$	$\vec{U}_2$
7	1	1	1	0	0	0	0	0	0	$\vec{U}_7$

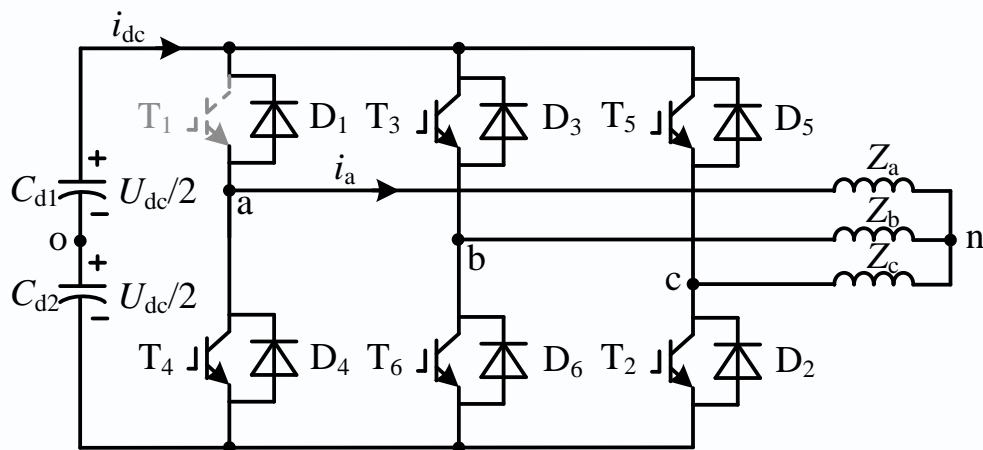




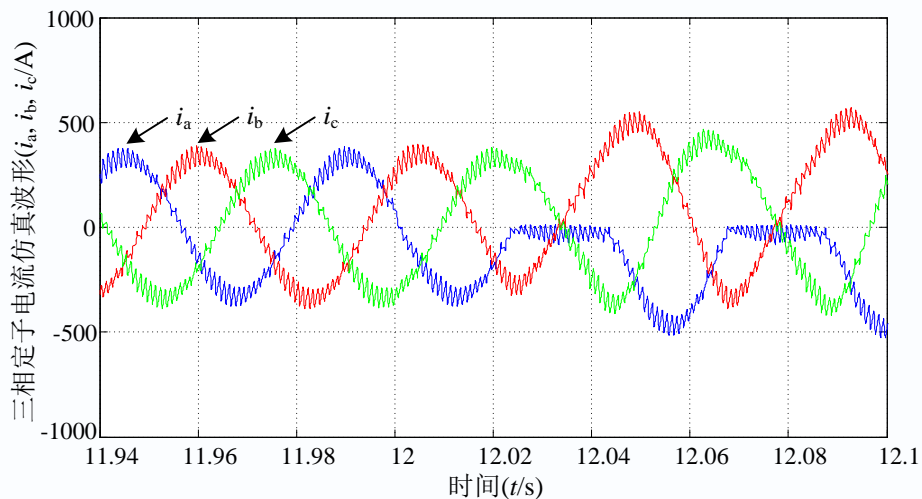


# 5.1 牵引逆变器故障分析

逆变器IGBT  $T_1$  开路故障示意图:



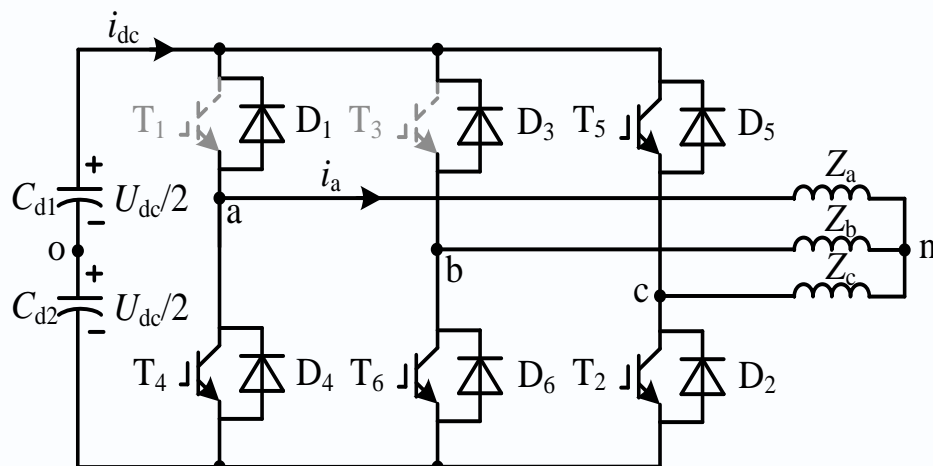
逆变器IGBT  $T_1$  开路故障波形:



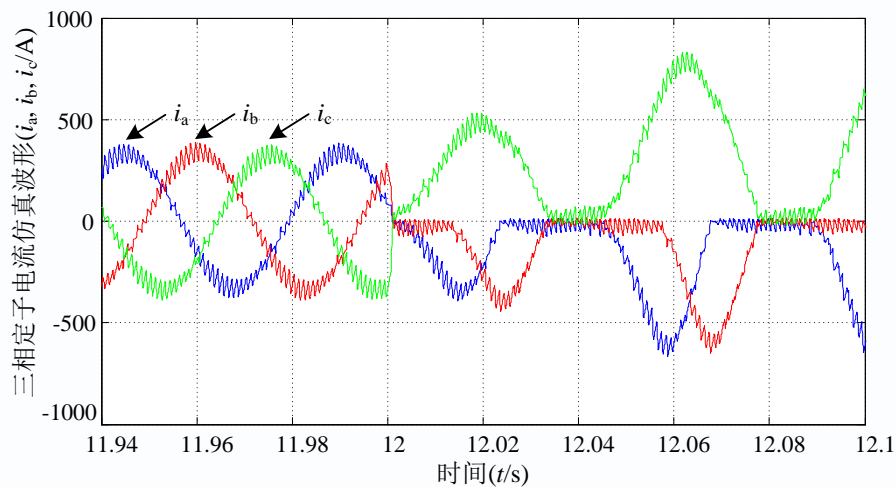


# 5.1 牵引逆变器故障分析

逆变器IGBT  $T_1$  &  $T_3$  开路故障示意图:



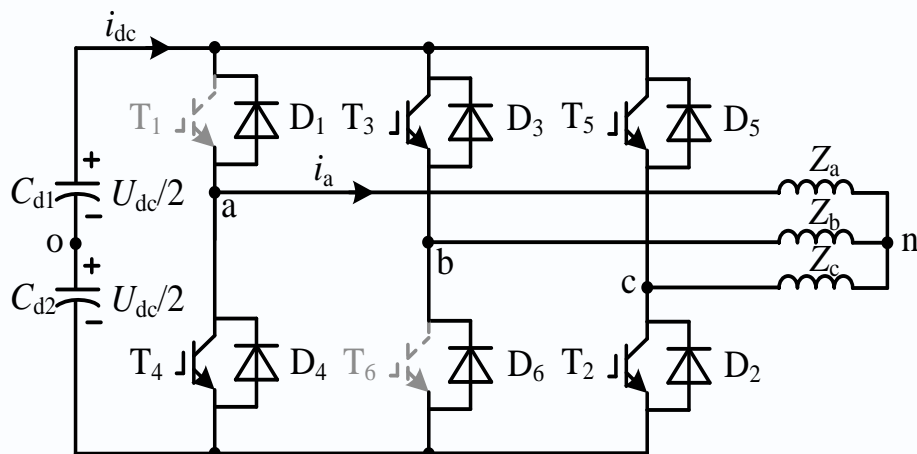
逆变器IGBT  $T_1$  &  $T_3$  开路故障波形:



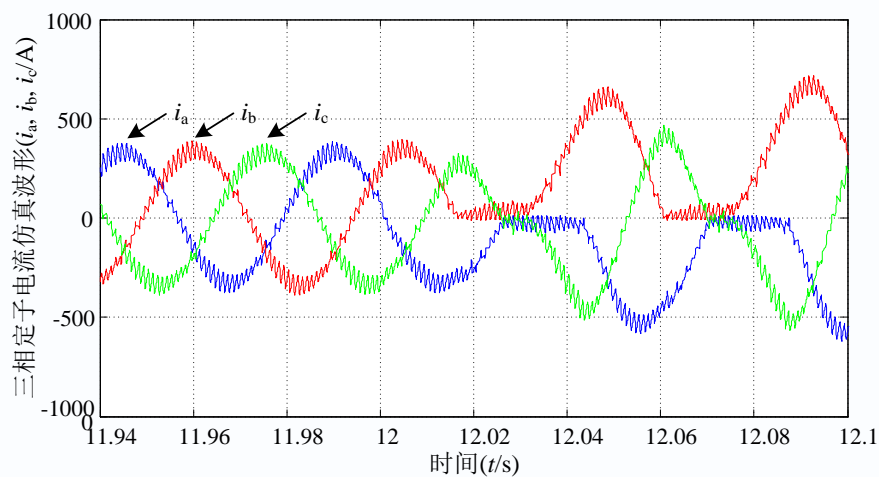


# 5.1 牵引逆变器故障分析

逆变器IGBT  $T_1$  &  $T_6$  开路故障示意图：



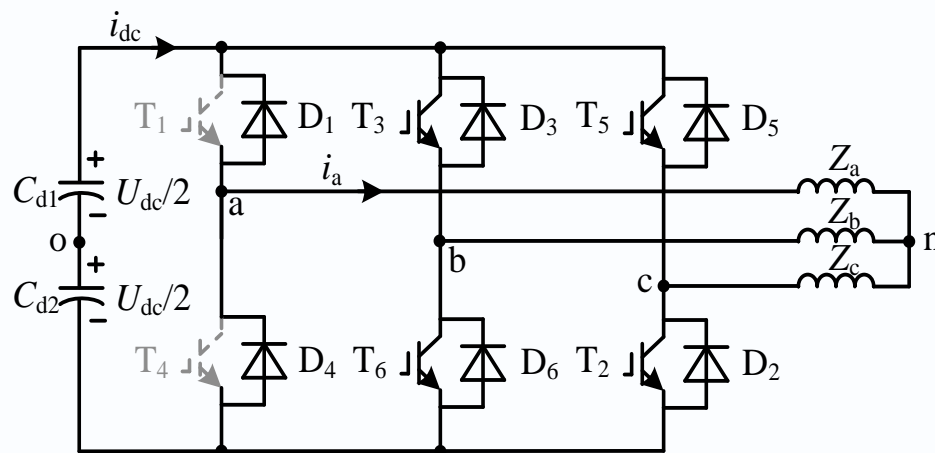
逆变器IGBT  $T_1$  &  $T_6$  开路故障波形：



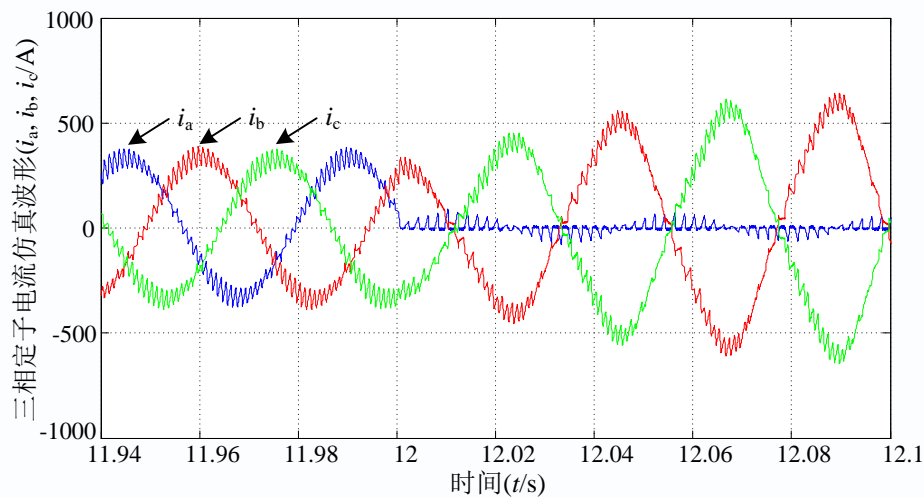


# 5.1 牵引逆变器故障分析

逆变器IGBT  $T_1$  &  $T_4$  开路故障示意图：



逆变器IGBT  $T_1$  &  $T_4$  开路故障波形：





## 5.2 两电平逆变器控制方式

目前通常采用PWM控制方式

- 正弦PWM
- 特定谐波消除PWM
- 滞环电流控制PWM
- 空间矢量PWM



## 5.2 电压空间矢量调制技术

### 本节提要

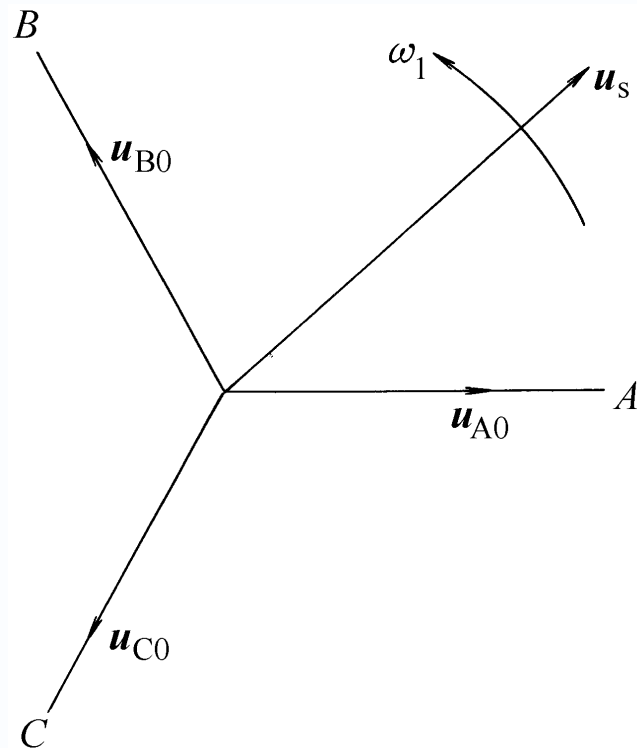
- 空间矢量的定义
- 电压与磁链空间矢量的关系
- 六拍阶梯波逆变器与正六边形空间旋转磁场
- 电压空间矢量的线性组合与SVPWM控制



# 空间矢量的定义

15

交流电动机绕组的电压、电流、磁链等物理量都是随时间变化的，分析时常用时间相量来表示，但如果考虑到它们所在绕组的空间位置，也可以如图所示，定义为空间矢量 $u_{AO}$ ， $u_{BO}$ ， $u_{CO}$ 。





当电源频率不变时，合成空间矢量  $\mathbf{u}_s$  以电源角频率  $\omega_1$  为电气角速度作恒速旋转。当某一相电压为最大值时，合成电压矢量  $\mathbf{u}_s$  就落在该相的轴线上。用公式表示，则有

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{u}_{AO} + \mathbf{u}_{BO} + \mathbf{u}_{CO}$$

与定子电压空间矢量相仿，可以定义定子电流和磁链的空间矢量  $\mathbf{I}_s$  和  $\boldsymbol{\Psi}_s$ 。





三相的电压平衡方程式相加，即得用合成空间矢量表示的定子电压方程式为

$$u_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt}$$

式中：

$u_s$ — 定子三相电压合成空间矢量；

$I_s$ — 定子三相电流合成空间矢量；

$\Psi_s$ — 定子三相磁链合成空间矢量。



# 电压与磁链的近似关系

18

当电动机转速不是很低时，定子电阻压降所占的成分很小，可忽略不计，则定子合成电压与合成磁链空间矢量的近似关系为

$$\mathbf{u}_s \approx \frac{d\boldsymbol{\Psi}_s}{dt}$$

或

$$\boldsymbol{\Psi}_s \approx \int \mathbf{u}_s dt$$



当电动机由三相平衡正弦电压供电时，磁链矢量顶端的运动轨迹呈圆形（一般称为磁链圆），这样的定子磁链旋转矢量可用下式表示

$$\Psi_s = \Psi_m e^{j\omega_1 t}$$

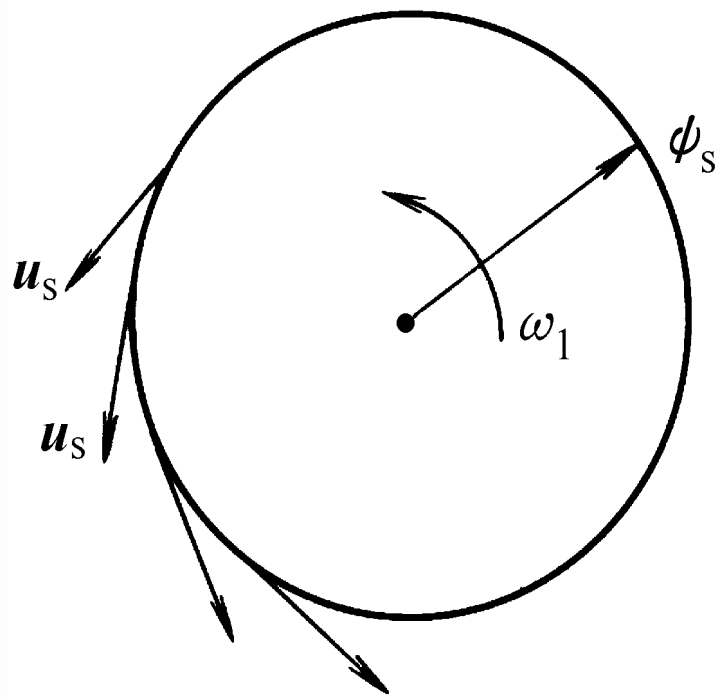
其中  $\Psi_m$  是磁链  $\Psi_s$  的幅值， $\omega_1$  为其旋转角速度。

$$u_s \approx \frac{d}{dt} (\Psi_m e^{j\omega_1 t}) = j\omega_1 \Psi_m e^{j\omega_1 t} = \omega_1 \Psi_m e^{j(\omega_1 t + \frac{\pi}{2})}$$

上式表明，当磁链幅值一定时， $u_s$  的大小与  $\omega_1$ （或供电电压频率）成正比，其方向则与磁链矢量正交，即磁链圆的切线方向。



磁链矢量在空间旋转一周时，  
电压矢量也连续地按磁链圆的  
切线方向运动  $2\pi$  弧度，其轨  
迹与磁链圆重合。





## 5.2 电压空间矢量调制技术 21

### 六拍阶梯波逆变器与正六边形空间旋转磁场

#### ■ 电压空间矢量运动轨迹

在常规的 PWM 变压变频调速系统中，异步电动机由六拍阶梯波逆变器供电，这时的电压空间矢量运动轨迹是怎样的呢？



## 5.2 电压空间矢量调制技术 22

### 开关状态表

序号	开 关 状 态	开关代码
1	$T_6 T_1 T_2$	100
2	$T_1 T_2 T_3$	110
3	$T_2 T_3 T_4$	010
4	$T_3 T_4 T_5$	011
5	$T_4 T_5 T_6$	001
6	$T_5 T_6 T_1$	101
7	$T_1 T_3 T_5$	111
8	$T_2 T_4 T_6$	000



## 5.2 电压空间矢量调制技术 23

### □ 开关控制模式

对于六拍阶梯波的逆变器，在其输出的每个周期中 6 种有效的工作状态各出现一次。逆变器每隔  $\pi/3$  时刻就切换一次工作状态（即换相），而在这  $\pi/3$  时刻内则保持不变。



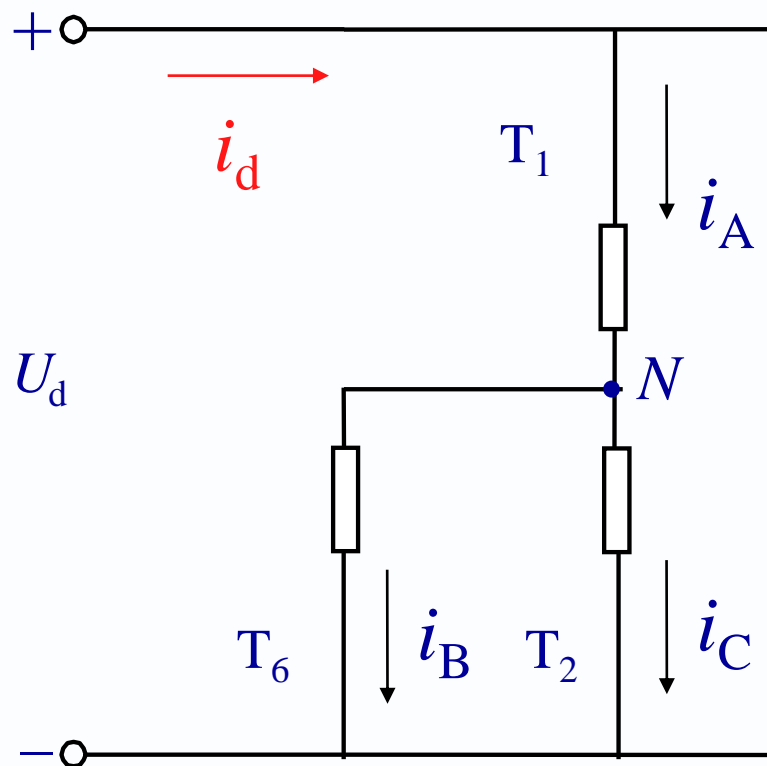
## 5.2 电压空间矢量调制技术 24

### □ 开关模式分析

设工作周期从100状态开始，这时 $T_6$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 导通，其等效电路如图所示。各相对直流电源中点的电压都是幅值为

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

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



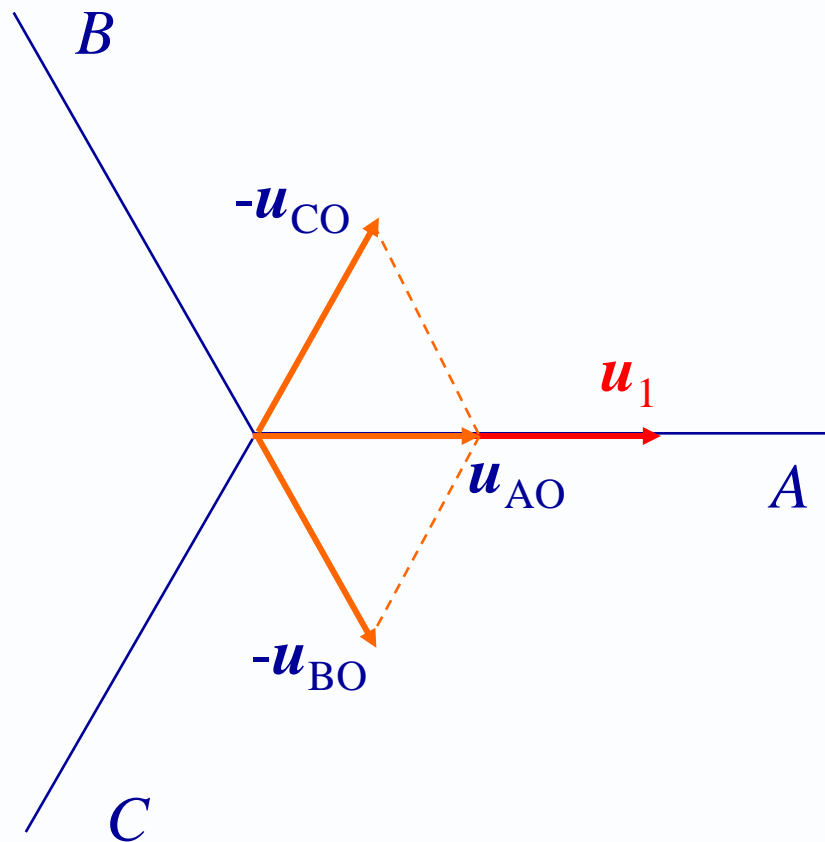




## 5.2 电压空间矢量调制技术 25

### □ 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）。

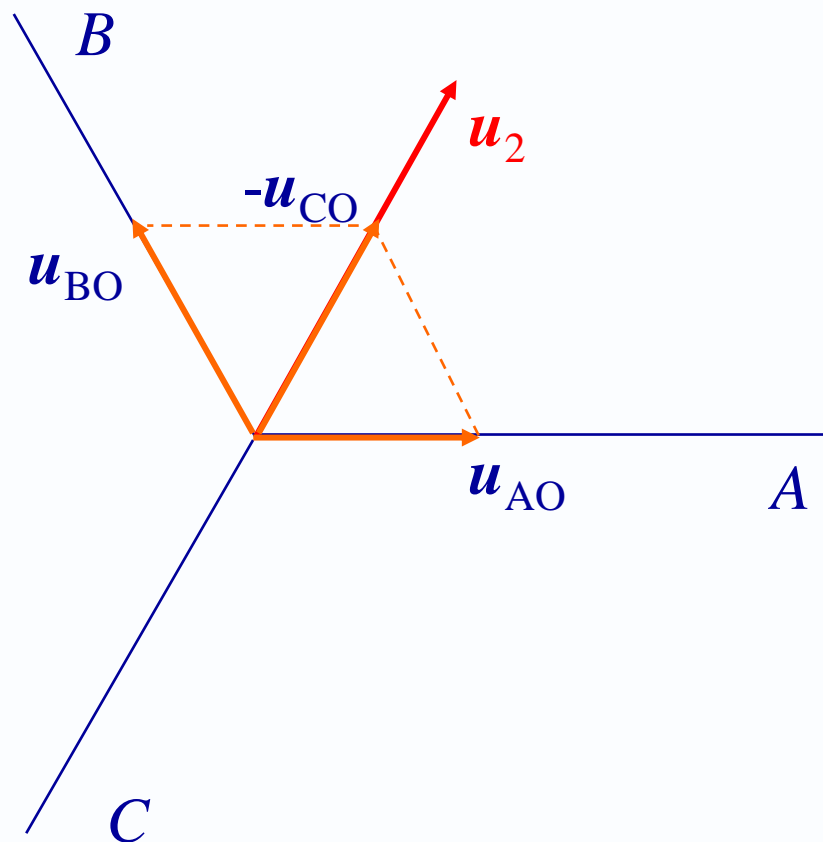




## 5.2 电压空间矢量调制技术 26

### □ 工作状态 110 的合成电压空间矢量

$u_1$  存在的时间为  $\pi/3$ ，在这段时间以后，工作状态转为 110，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  $\pi/3$ 。



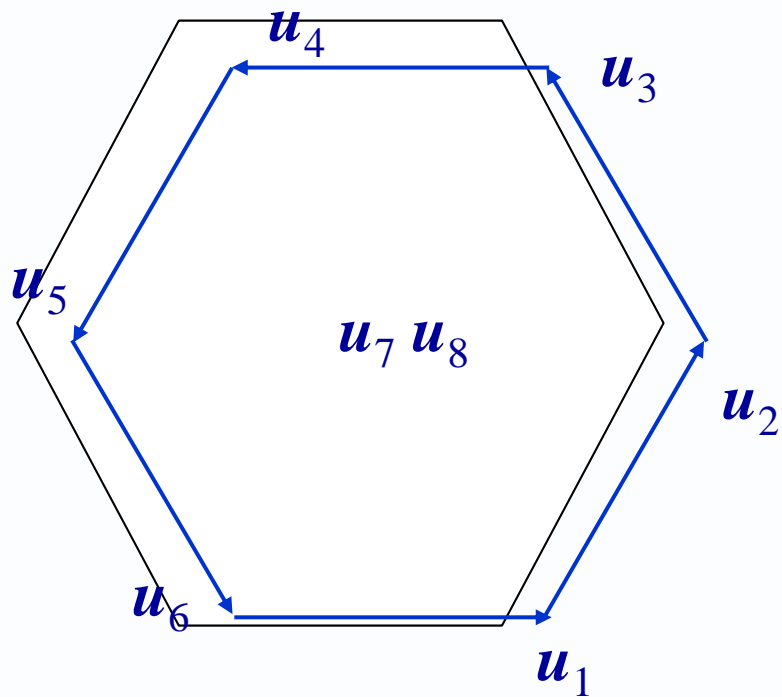


## 5.2 电压空间矢量调制技术 27

### □ 每个周期的六边形合成电压空间矢量

依此类推，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。

这样，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。



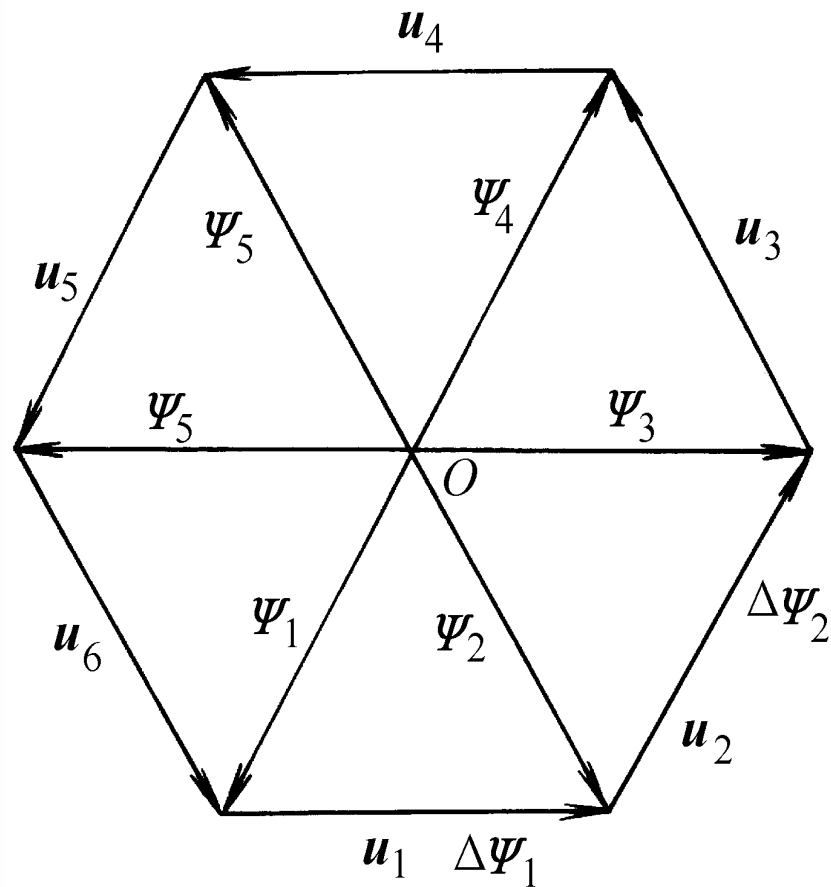


## 5.2 电压空间矢量调制技术 28

### 电压空间矢量与磁链矢量的关系

一个由电压空间矢量运动所形成的正六边形轨迹也可以看作是异步电动机定子磁链矢量端点的运动轨迹。

设在逆变器工作开始时定子磁链空间矢量为  $\psi_1$ ，在第一个  $\pi/3$  期间，电动机上施加的电压空间矢量为  $u_1$ 。



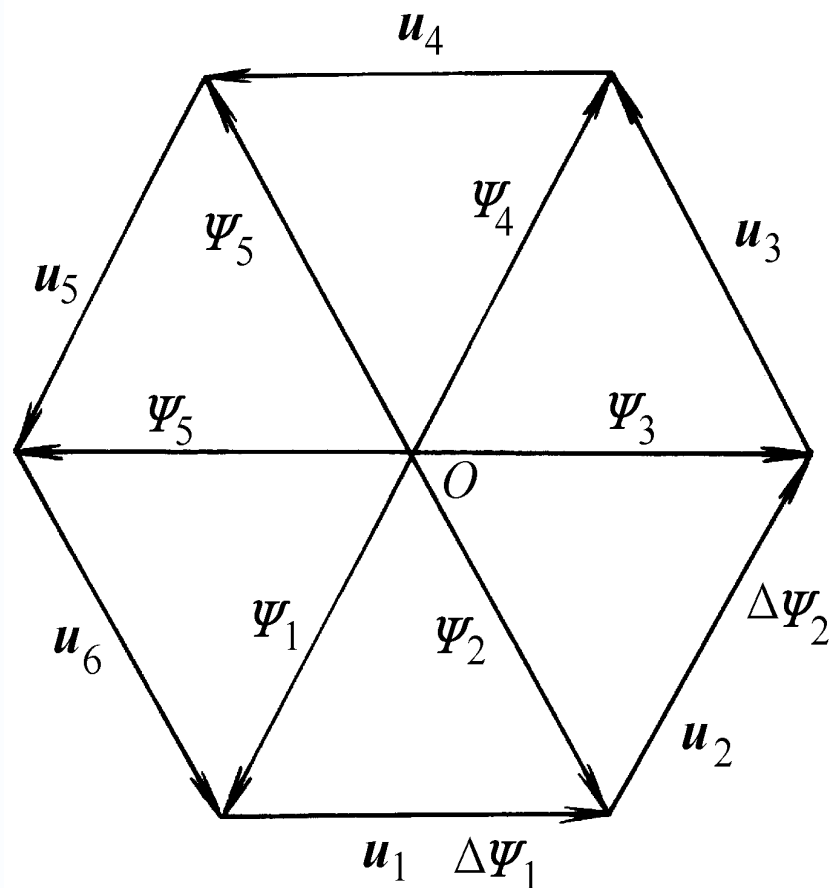


## 5.2 电压空间矢量调制技术 29

由图可得  $u_1 \Delta t = \Delta \Psi_1$

也就是说，在  $\pi/3$  所对应的时间  $\Delta t$  内，施加  $u_1$  的结果是使定子磁链  $\psi_1$  产生一个增量  $\Delta \psi$ ，方向与  $u_1$  一致，最后得到新的磁链  $\psi_2$ ，而

$$\psi_2 = \psi_1 + \Delta \psi_1$$





## 5.2 电压空间矢量调制技术 30

依此类推，可以写成  $\Delta\psi$  的通式

$$\mathbf{u}_i \Delta t = \Delta \Psi_i \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

$$\psi_{i+1} = \psi_i + \Delta \psi_i$$

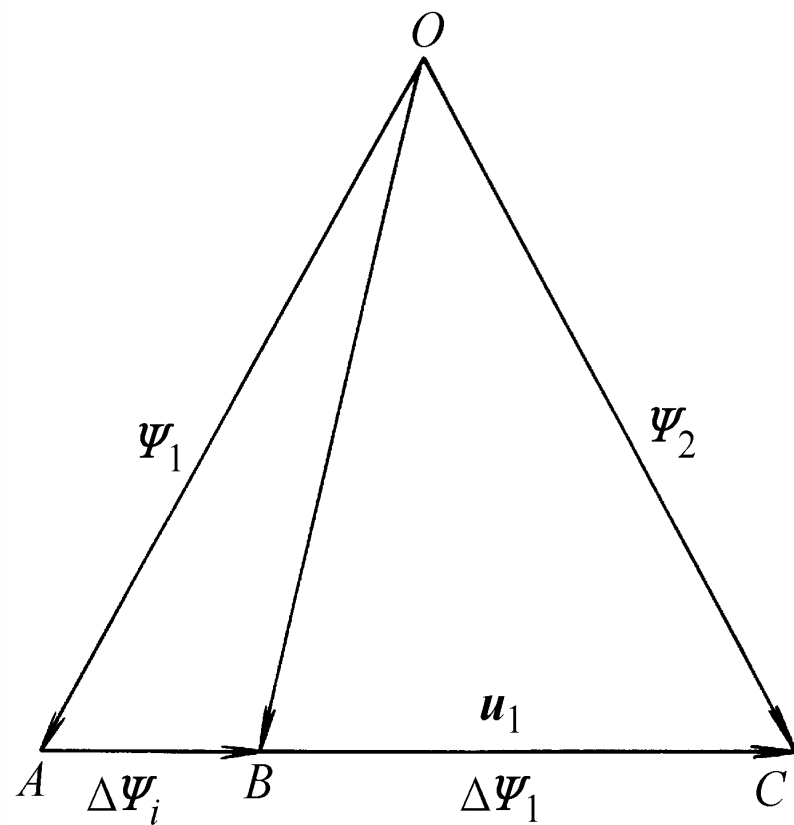
总之，在一个周期内，6个磁链空间矢量呈放射状，矢量的尾部都在O点，其顶端的运动轨迹也就是6个电压空间矢量所围成的正六边形。



## 5.2 电压空间矢量调制技术 31

### □ 磁链矢量增量与电压矢量、时间增量的关系

- 如果  $u_1$  的作用时间  $\Delta t$  小于  $\pi/3$ , 则  $\Delta\psi_i$  的幅值也按比例地减小, 如图中的矢量  $\overrightarrow{AB}$ 。
- 在任何时刻, 所产生的磁链增量的方向决定于所施加的电压, 其幅值则正比于施加电压的时间。





## 5.2 电压空间矢量调制技术 32

### □ 电压空间矢量的线性组合与SVPWM控制

如前分析，我们可以得到的结论是：

- ◆ 如果交流电动机仅由常规的六拍阶梯波逆变器供电，磁链轨迹便是六边形的旋转磁场，这显然不象在正弦波供电时所产生的圆形旋转磁场那样能使电动机获得匀速运行。
- ◆ 如果想获得更多边形或逼近圆形的旋转磁场，就必须在每一个期间内出现多个工作状态，以形成更多的相位不同的电压空间矢量。为此，必须对逆变器的控制模式进行改造。



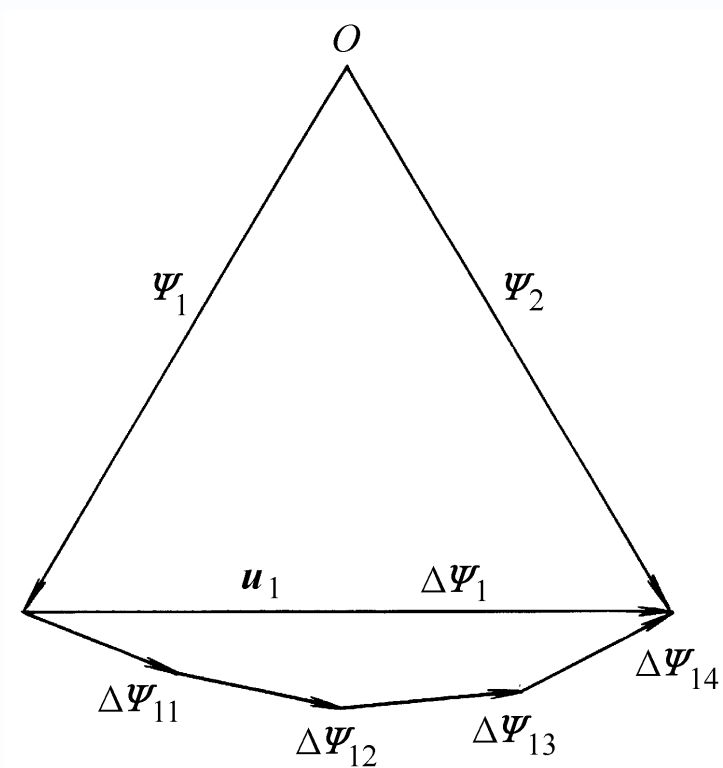


## 5.2 电压空间矢量调制技术 33

### □ 圆形旋转磁场逼近方法

怎样控制PWM的开关时间才能逼近圆形旋转磁场？

——线性组合法



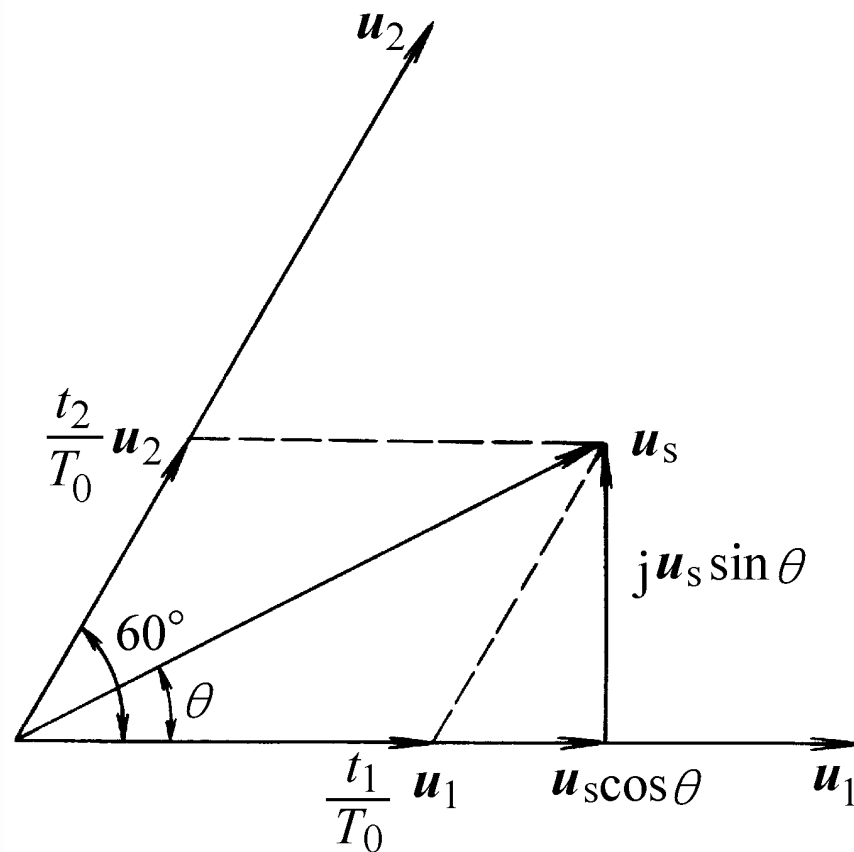
逼近圆形时的磁链增量轨迹



## 5.2 电压空间矢量调制技术 34

### □ 圆形旋转磁场逼近方法

设在一段换相周期时间  $T_0$  中，可以用两个矢量之和表示由两个矢量线性组合后的电压矢量  $u_s$ ，新矢量的相位为  $\theta$ 。



电压空间矢量的线性组合



## 5.2 电压空间矢量调制技术 35

### □ 圆形旋转磁场逼近方法

可根据各段磁链增量的相位求出所需的作用时间  $t_1$  和  $t_2$ 。

可以看出

$$\mathbf{u}_s = \frac{t_1}{T_0} \mathbf{u}_1 + \frac{t_2}{T_0} \mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_s \cos \theta + j \mathbf{u}_s \sin \theta$$



## 5.2 电压空间矢量调制技术 36

### □ 圆形旋转磁场逼近方法

解  $t_1$  和  $t_2$  得

$$\frac{t_1}{T_0} = \frac{u_s \cos \theta}{U_d} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u_s \sin \theta}{U_d}$$

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



## 5.2 电压空间矢量调制技术 37

### □ 零矢量的使用

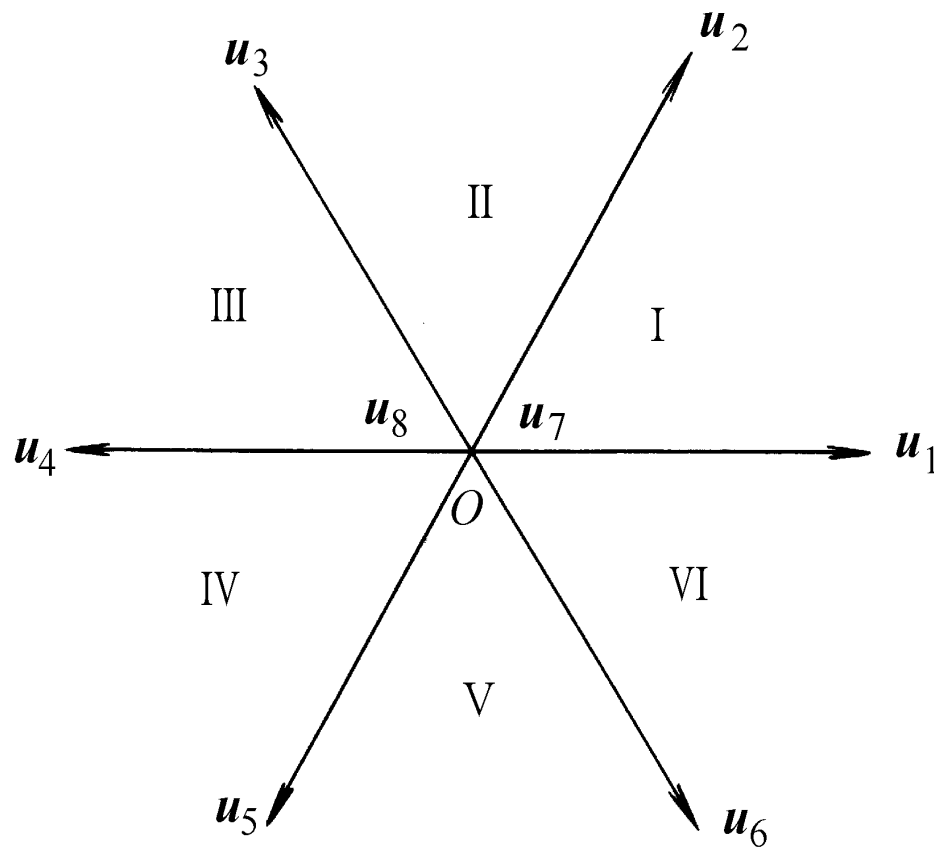
换相周期  $T_0$  应由旋转磁场所需的频率决定,  $T_0$  与  $t_1 + t_2$  未必相等, 其间隙时间可用零矢量  $u_7$  或  $u_8$  来填补。为了减少功率器件的开关次数, 一般使  $u_7$  和  $u_8$  各占一半时间, 因此

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



## 5.2 电压空间矢量调制技术 38

### □ 电压空间矢量的扇区划分





## 5.2 电压空间矢量调制技术 39

### □ 圆形旋转磁场逼近方法基本思想

- 在常规六拍逆变器中一个扇区仅包含两个开关工作状态。
- 实现SVPWM控制就是要将每一扇区再分成若干个对应于时间  $T_0$  的小区间。按照上述方法插入若干个线性组合的新电压空间矢量  $u_s$ ，以获得优于正六边形的多边形（逼近圆形）旋转磁场。



## 5.2 电压空间矢量调制技术 40

### □ 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，以满足最小开关损耗。





## 5.2 电压空间矢量调制技术 41

### □ 插值举例

- 每一个  $T_0$  相当于 PWM 电压波形中的一个脉冲波
- 例如：

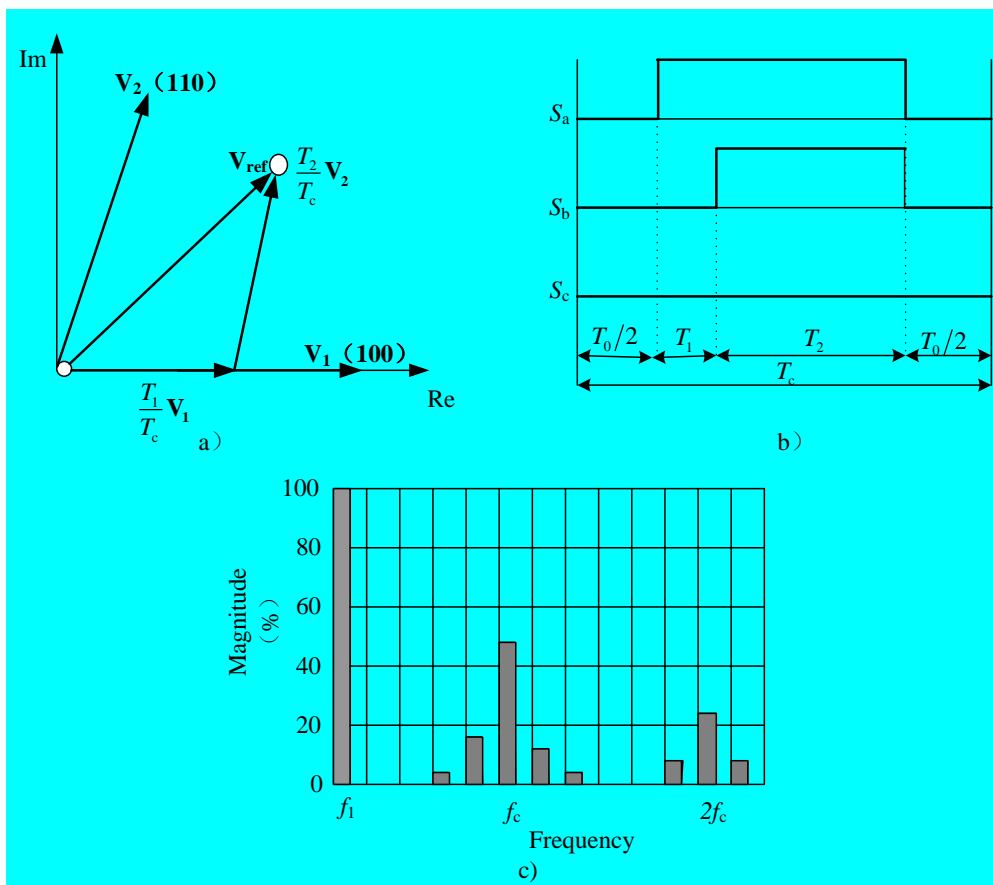
上图所示扇区I内的区间包含  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_7$  和  $t_8$  共4段, 相应的电压空间矢量为  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_7$  和  $u_8$ , 即 100, 110, 111 和 000 共 4 种开关状态。



# 5.2 电压空间矢量调制技术 42

## □ 矢量顺序模式 1

- ❖ 矢量序列  $V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_0$
- ❖  $T_0 = T_0, T_7 = 0$ .

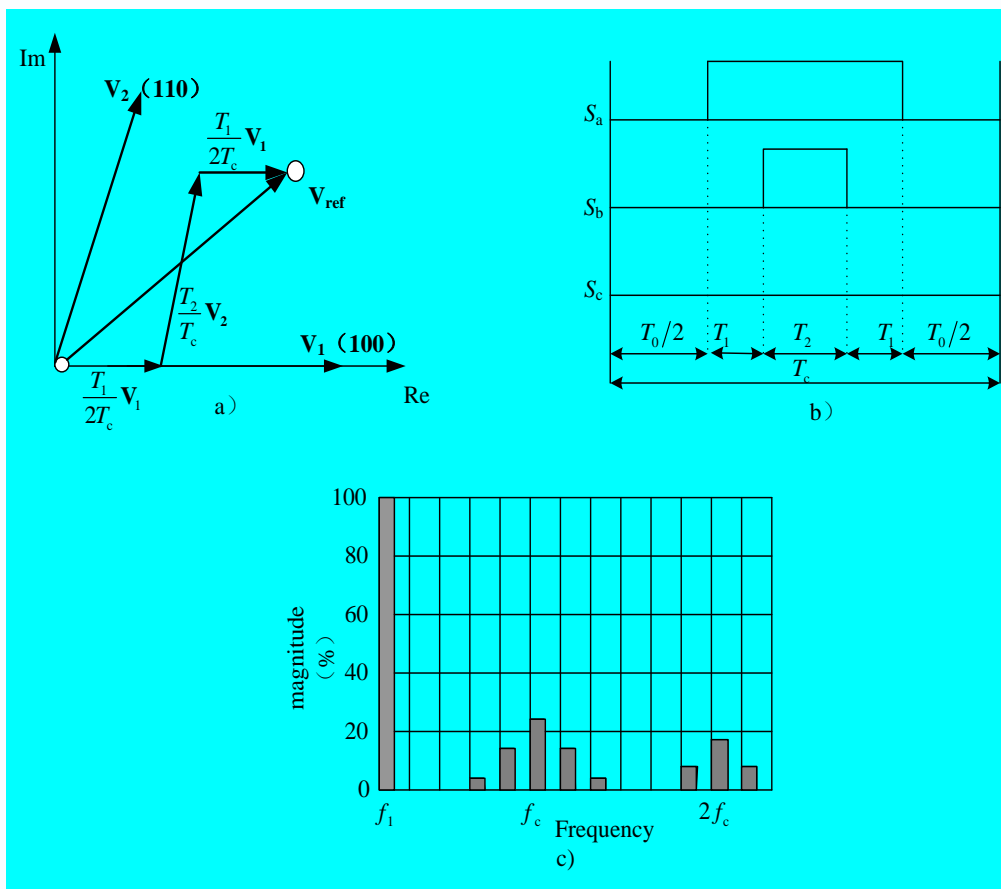




# 5.2 电压空间矢量调制技术 43

## □ 矢量顺序模式 2

- ❖ 矢量序列  $V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_1 \rightarrow V_0$
- ❖  $T_0 = T_0, T_7 = 0$ .





## 5.2 电压空间矢量调制技术 44

### □ 插值举例

为了使电压波形对称，把每种状态的作用时间都一分为二，因而形成电压空间矢量的作用序列为：12788721，其中 1 表示作用  $u_1$ ，2 表示作用  $u_2$ ，.....。

这样，在这一个时间内，逆变器三相的开关状态序列为100，110，111，000，000，111，110，100。



## 5.2 电压空间矢量调制技术 45

### □ 插值举例

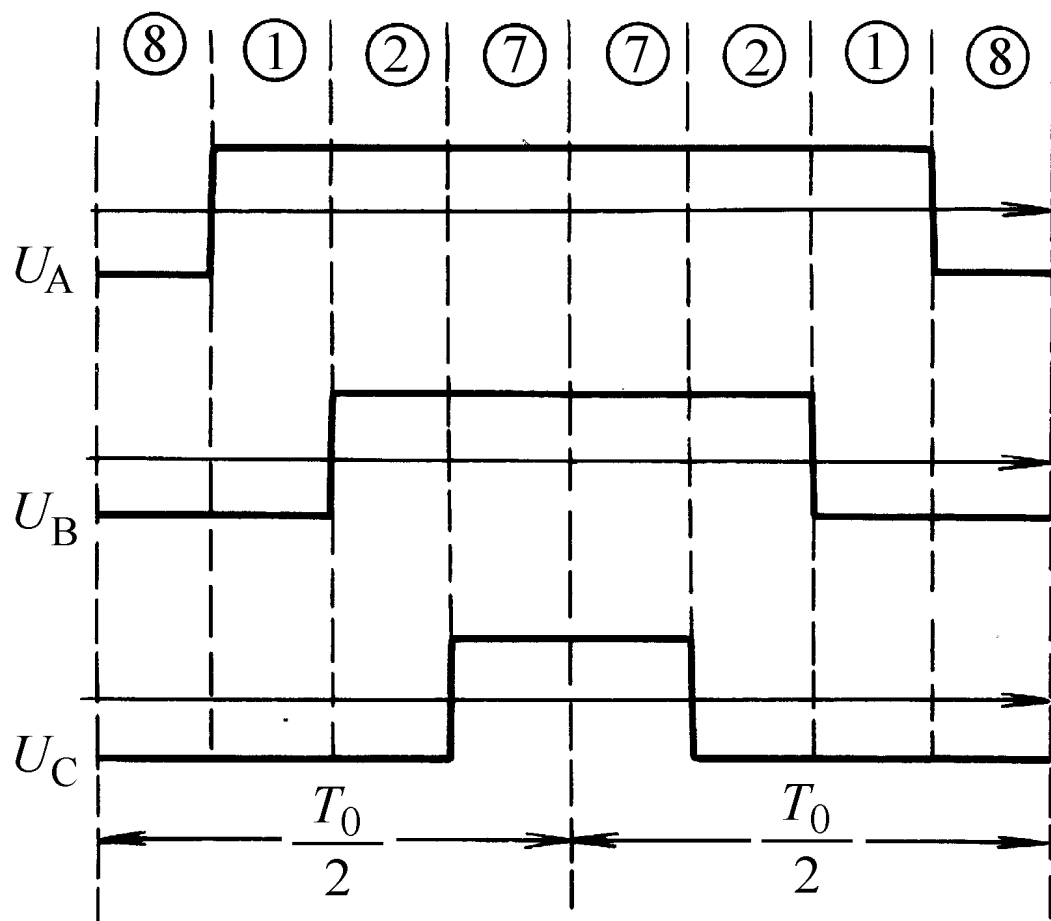
按照最小开关损耗原则进行检查，发现上述1278的顺序是不合适的。

为此，应该把切换顺序改为81277218，即开关状态序列为000，100，110，111，111，110，100，000，这样就能满足每次只切换一个开关的要求了。



## 5.2 电压空间矢量调制技术 46

### □ $T_0$ 区间的电压波形



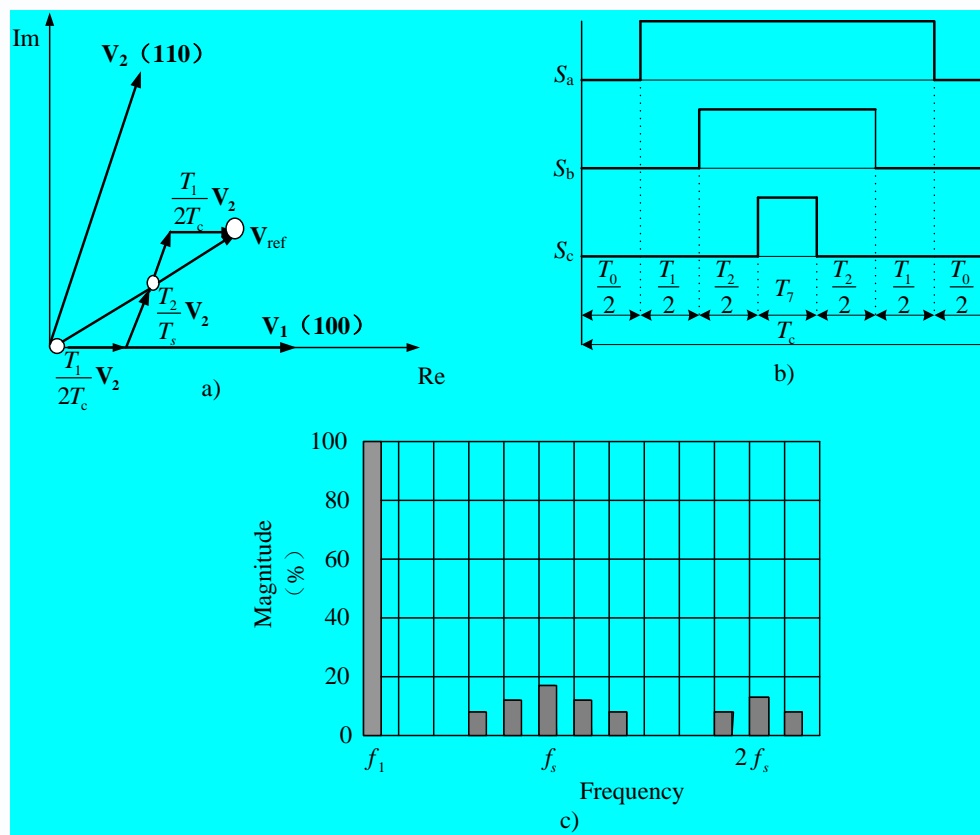
第I扇区内一段区间的开关序列与逆变器三相电压波形



# 5.2 电压空间矢量调制技术 47

## □ 矢量顺序模式 3

- ❖ 矢量序列  $V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_7 \rightarrow V_2 \rightarrow V_1 \rightarrow V_0$
- ❖  $T_0 = T_7 = T_{0,7}/2$ .





## 5.2 电压空间矢量调制技术 48

### □ 小结

归纳起来，SVPWM控制模式有以下特点：

- 逆变器的一个工作周期分成6个扇区，每个扇区相当于常规六拍逆变器的一拍。为了使电动机旋转磁场逼近圆形，每个扇区再区分成若干个小区间  $T_0$ ， $T_0$  越短，旋转磁场越接近圆形，但  $T_0$  的缩短受到功率开关器件允许开关频率的制约。





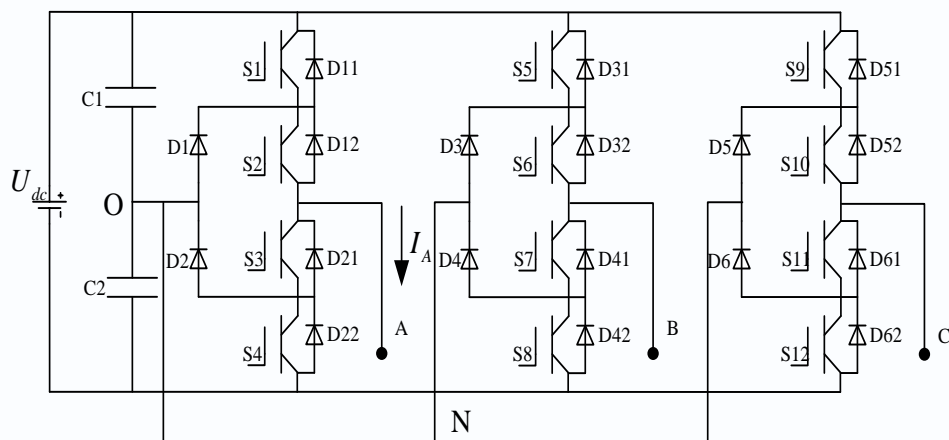
## 5.2 电压空间矢量调制技术 49

### □ 小结

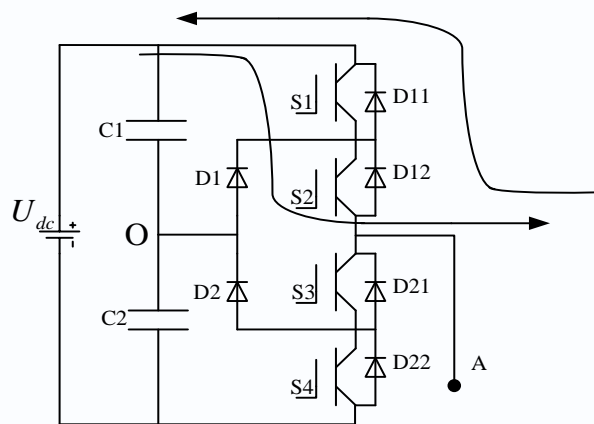
- 在每个小区间内虽有多次开关状态的切换，但每次切换都只涉及一个功率开关器件，因而开关损耗较小。
- 每个小区间均以零电压矢量开始，又以零矢量结束。
- 利用电压空间矢量直接生成三相PWM波，计算简便。
- 采用SVPWM控制时，逆变器输出线电压基波最大值为直流侧电压，这比一般的SPWM逆变器输出电压提高了15%。



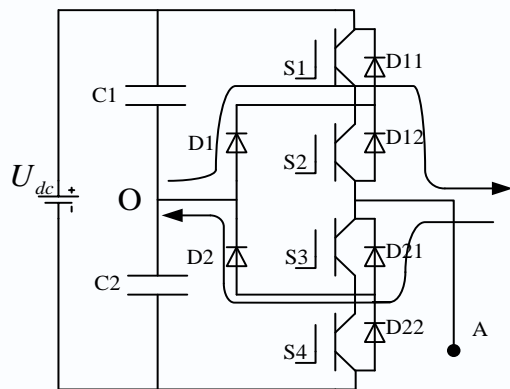
# 5.3 三电平电压型三相逆变器<sup>50</sup>



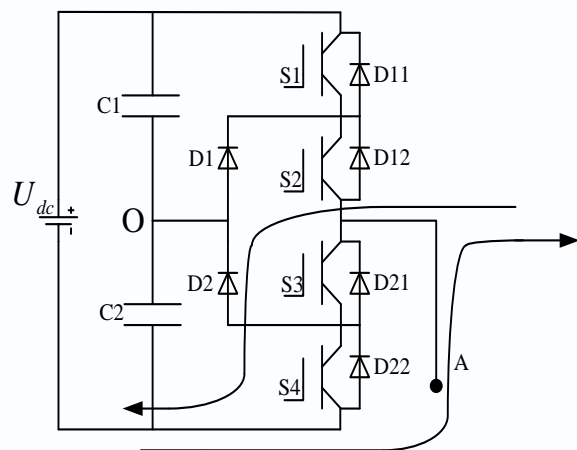
三电平电压源型逆变器拓扑结构



(a)



(b)



(c)

三电平逆变器相电压三种输出状态



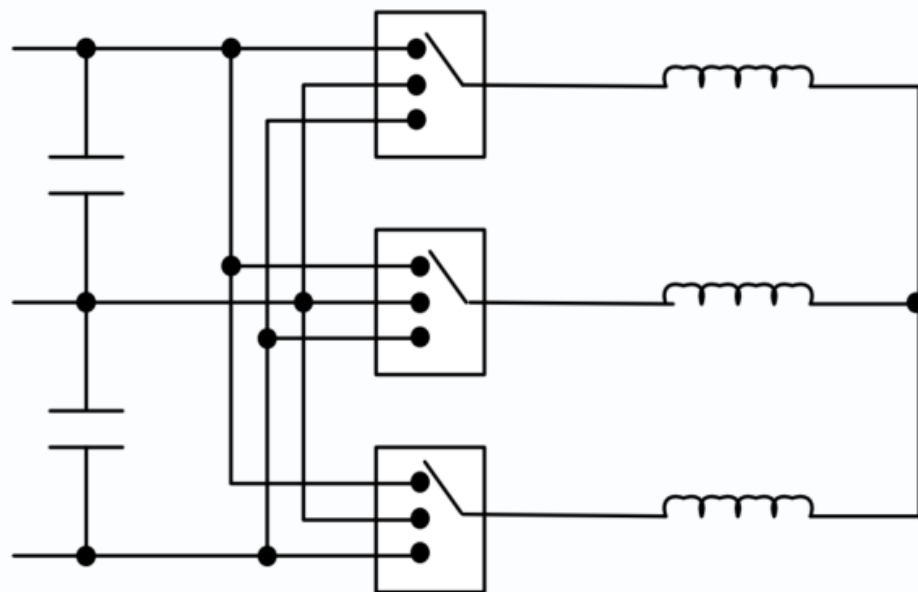
# 三电平逆变器等效电路

51

$$S_A = \begin{cases} P & T_{11}T_{12} \text{导通} \\ O & T_{12}T_{13} \text{导通} \\ N & T_{14}T_{13} \text{导通} \end{cases}$$

$$S_B = \begin{cases} P & T_{21}T_{22} \text{导通} \\ O & T_{22}T_{23} \text{导通} \\ N & T_{24}T_{23} \text{导通} \end{cases}$$

$$S_C = \begin{cases} P & T_{31}T_{32} \text{导通} \\ O & T_{32}T_{33} \text{导通} \\ N & T_{34}T_{33} \text{导通} \end{cases}$$



等效开关电路



# 三电平逆变器等效电路

52

- 忽略中点电位的偏移，每一个开关器件所承受的电压均为 $0.5U_d$ 。
- 当上桥臂开关器件导通时，即状态P，下桥臂的开关 $T_{13}$ 、 $T_{14}$ 各承受 $0.5U_d$ 电压；
- 当下桥臂开关器件导通时，即状态N，上桥臂的开关 $T_{11}$ 、 $T_{12}$ 各承受 $0.5U_d$ 的电压；
- 当辅助开关器件导通时，即状态0，主电路中的开关 $T_{11}$ 、 $T_{14}$ 各承受 $0.5U_d$ 的电压。



# 三电平逆变器特点

53

- 元件耐压只有两电平式的一半
- 加入零电压，使电机电压接近于正弦波
- 每相3个取值，共 $3^3=27$ 个状态



## 5.4 三电平逆变器调制方式 54

- 从一相的输出波形看，由多个不同脉宽的脉冲波组成，在调制度较小时（如 $m < 0.5$ ），为了减小谐波影响，应采用PWM方法来调节输出的基波电压。
- 目前常采用SPWM和SVPWM技术

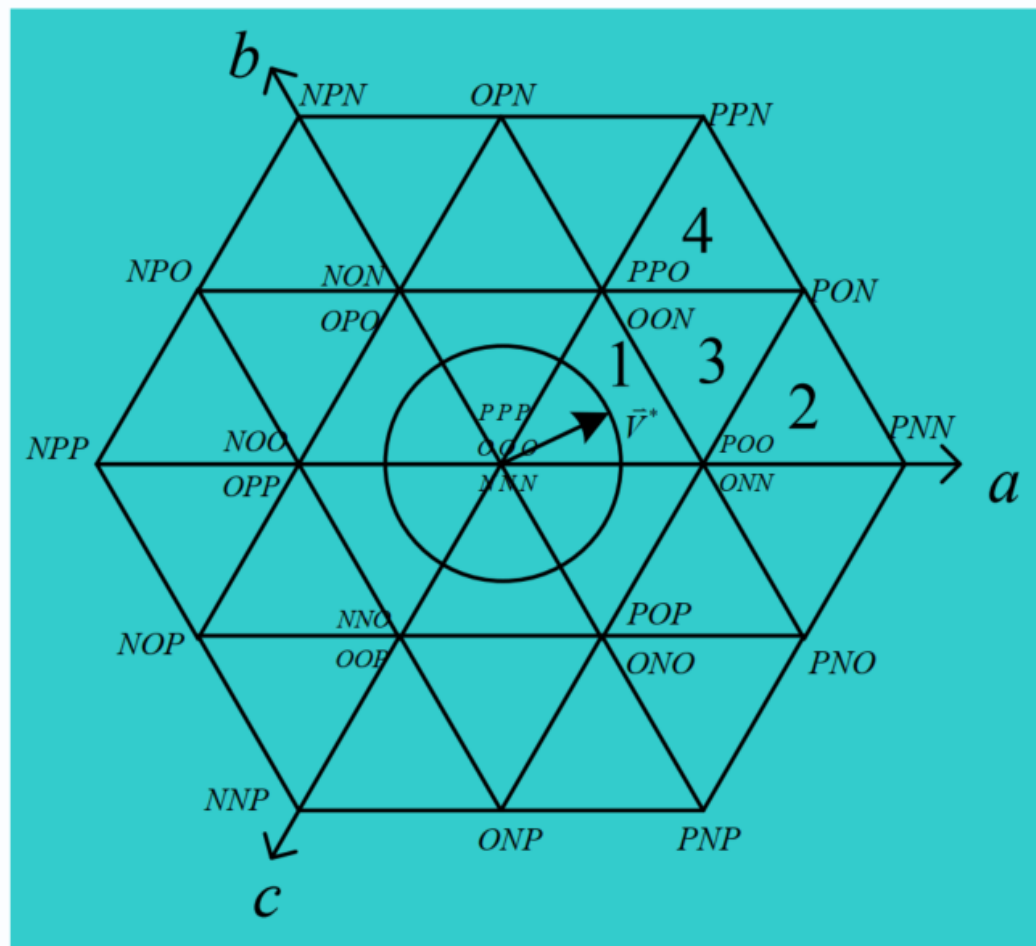


# 三电平逆变器SVPWM

55

$$U_s = \frac{2}{3}(u_a + u_b e^{j\frac{2}{3}\pi} + u_c e^{j\frac{4}{3}\pi})$$

- 三相三电平逆变器具有 $3^3=27$ 个开关状态。右图给出了对应所有开关状态的三电平逆变器空间矢量图







- 27个开关状态分为四类矢量：
  - 大六边形的顶角状态（PNN、PPN、NPN、NPP、NNP和PNP）对应为大开关矢量；
  - 外六边形各边的中点对应六个空间矢量为中开关矢量；
  - 内六边形的每一个空间矢量对应着两种可能的开关状态，称为小开关矢量。
  - 还有三种可能的零状态（000、PPP、NNN），分别对应于辅助器件的全导通，上臂器件的全导通，以及下臂器件的全导通，称为零开关矢量。

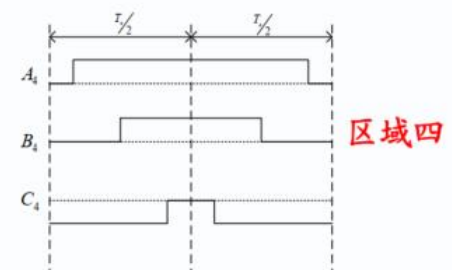
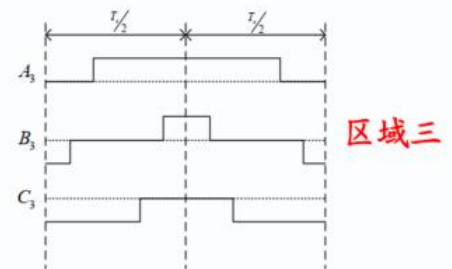
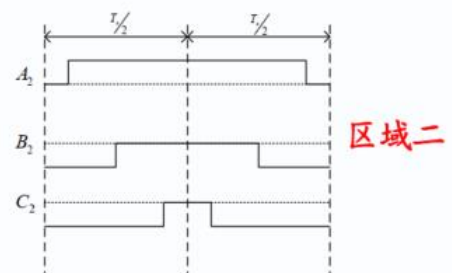
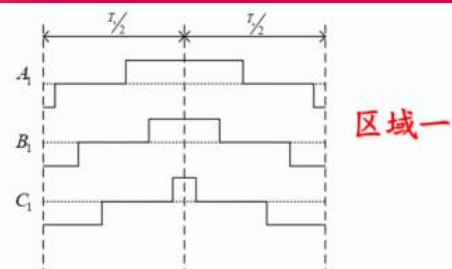
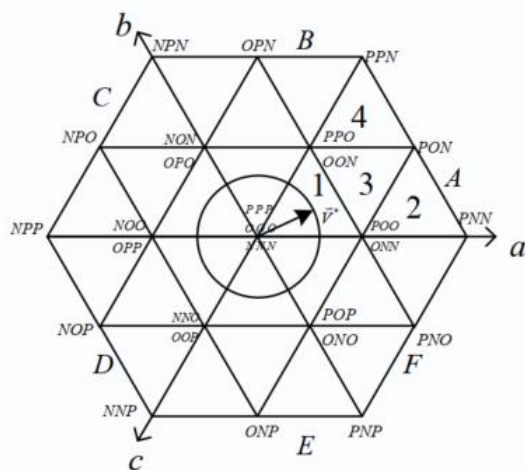
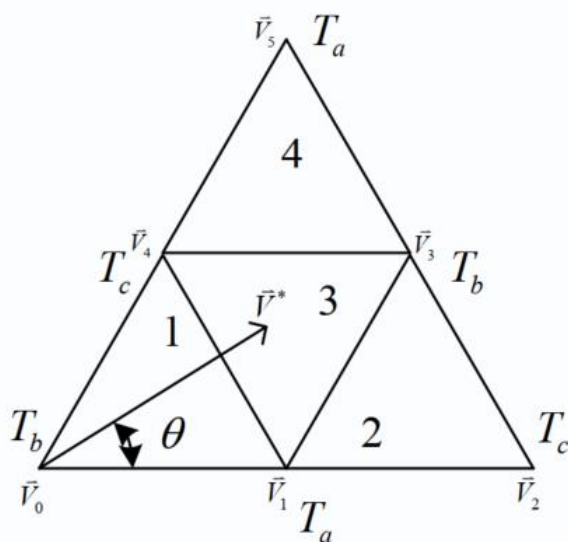




## 实现三电平逆变器空间矢量调制的步骤:

- 判断参考矢量所在区域;
- 根据最近三角矢量原则确定输出矢量;
- 计算各个矢量作用的时间;
- 确定开关状态顺序。

# 三电平NPC空间矢量调制





- 在扇区A的区域1中，设定采样周期为  $T_s$ ，

$$m = \frac{\sqrt{3}|\vec{U}_{ref}|}{\sqrt{2}U_d}$$

$$\begin{cases} T_{a0} = \frac{4}{\sqrt{3}} m T_s \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) \\ T_{c0} = \frac{4}{\sqrt{3}} m T_s \sin \theta \\ T_0 = \left[ 1 - \frac{4}{\sqrt{3}} m \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right] T_s \end{cases}$$

- 同理可得其它三个区域及五个扇区的电压矢量作用时间



**本章结束！**