电力电子变压变频器

主讲人：巩 冰 讲师

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

5、期望电压空间矢量的合成

- 六边形旋转磁场带有较大的谐波分量，这将导致转矩与转速的脉动。
- 要获得更多边形或接近圆形的旋转磁场，就必须有更多的空间位置不同的电压空间矢量以供选择。
- PWM逆变器只有8个基本电压矢量，能否用这8个基本矢量合成出其他多种不同的矢量呢？

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

5、期望电压空间矢量的合成

●按空间矢量的平行四边形合成法则，用相邻的两个有效工作矢量合成期望的输出矢量，这就是电压空间矢量PWM（SVPWM）的基本思想。

●按6个有效工作矢量将电压矢量空间分为对称的六个扇区，当期望输出电压矢量落在某个扇区内时，就用与期望输出电压矢量相邻的2个有效工作矢量等效地合成期望输出矢量。

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

5、期望电压空间矢量的合成

●按6个有效工作矢量将电压矢量空间分为对称的六个扇区，每个扇区对应 $\frac{\pi}{3}$

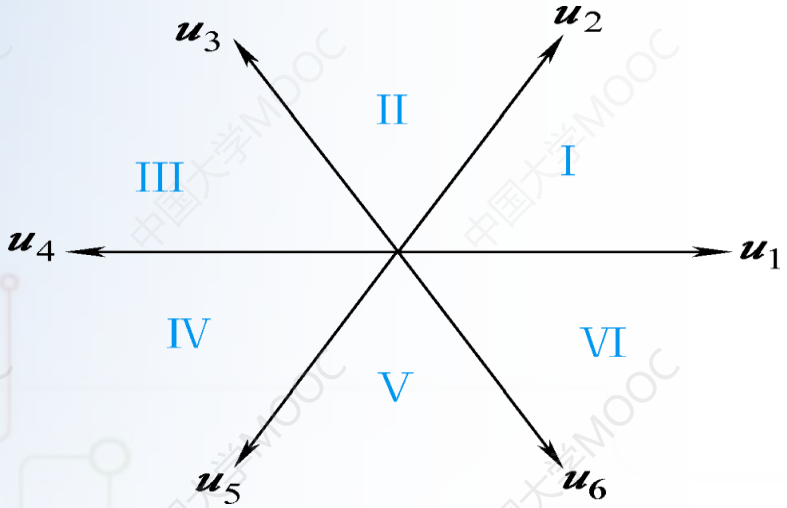

图11　电压空间矢量的6个扇区

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

5、期望电压空间矢量的合成

- 基本电压空间矢量 u_1 u_2 的线性组合构成期望的电压矢量 u_s
- 期望输出电压矢量与扇区起始边的夹角

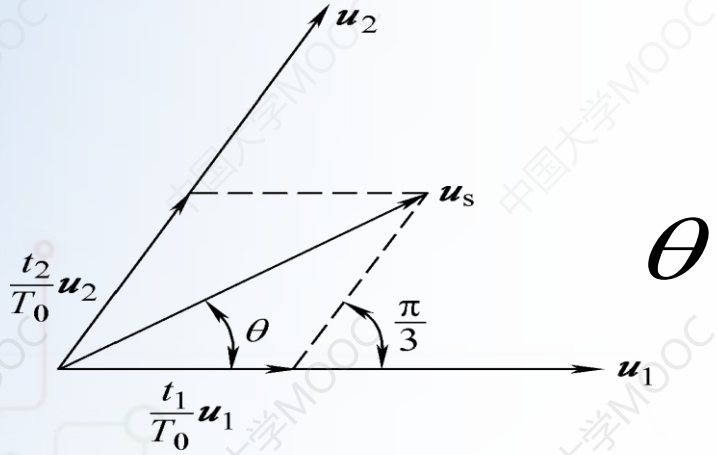

图12　期望输出电压矢量的合成

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

5、期望电压空间矢量的合成

- 在一个开关周期 T_0 $\boldsymbol{u}_1$ 的作用时间 t_1 $\boldsymbol{u}_2$ 的作用时间 t_2
- 合成电压矢量

$$\boldsymbol{u}_s = \frac{t_1}{T_0}\boldsymbol{u}_1 + \frac{t_2}{T_0}\boldsymbol{u}_2$$

$$= \frac{t_1}{T_0}\sqrt{\frac{2}{3}}U_d + \frac{t_2}{T_0}\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{\pi}{3}} \qquad (25)$$

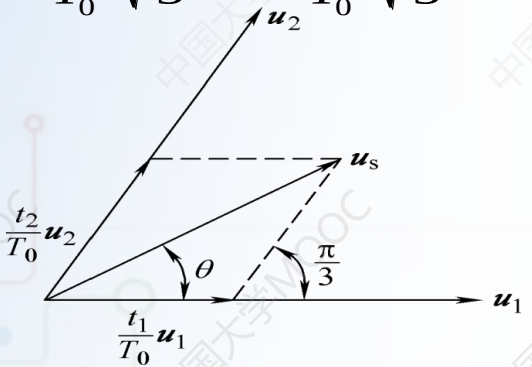

图12　期望输出电压矢量的合成

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

5、期望电压空间矢量的合成

●由正弦定理可得

$$\frac{\frac{t_1}{T_0}\sqrt{\frac{2}{3}}U_d}{\sin(\frac{\pi}{3}-\theta)}=\frac{\frac{t_2}{T_0}\sqrt{\frac{2}{3}}U_d}{\sin\theta}=\frac{u_s}{\sin\frac{2\pi}{3}} \tag{26}$$

解得

$$t_1=\frac{\sqrt{2}u_sT_0}{U_d}\sin(\frac{\pi}{3}-\theta) \tag{27}$$

$$t_2=\frac{\sqrt{2}\mathrm{u}_sT_0}{U_d}\sin\theta \tag{28}$$

●零矢量的作用时间

$$t_0=T_0-t_1-t_2 \tag{29}$$

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

5、期望电压空间矢量的合成

●两个基本矢量作用时间之和应满足

$$\frac{t_1+t_2}{T_0}=\frac{\sqrt{2}u_s}{U_d}[\sin(\frac{\pi}{3}-\theta)+\sin\theta]=\frac{\sqrt{2}u_s}{U_d}\cos(\frac{\pi}{6}-\theta)\le 1 \quad \textbf{(30)}$$

当 $\theta=\frac{\pi}{6}$ $t_1+t_2=T_0$

●输出电压矢量最大幅值

$$u_{smax}=\frac{U_d}{\sqrt{2}} \quad \textbf{(31)}$$

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

5、期望电压空间矢量的合成

- 当定子相电压为三相平衡正弦电压时，三相合成矢量幅值

$$U_s = \sqrt{\frac{3}{2}} U_m$$

- 基波相电压最大幅值

$$U_{m\max} = \sqrt{\frac{2}{3}} u_{s\max} = \frac{U_d}{\sqrt{3}} \quad (32)$$

- 基波线电压最大幅值

$$U_{lm\max} = \sqrt{3} U_{m\max} = U_d \quad (33)$$

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

5、期望电压空间矢量的合成

- SPWM的基波线电压最大幅值为

$$U'_{lm\max}=\frac{\sqrt{3}U_d}{2}$$

两者之比

$$\frac{U_{lm\max}}{U'_{lm\max}}=\frac{2}{\sqrt{3}}\approx 1.15 \tag{34}$$

- SVPWM方式的逆变器输出线电压基波最大值为直流侧电压，比SPWM逆变器输出电压最多提高了约15%。

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

6、SVPWM的实现方法

- 通常以开关损耗和谐波分量都较小为原则，来安排基本矢量和零矢量的作用顺序，一般在减少开关次数的同时，尽量使PWM输出波型对称，以减少谐波分量。

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

6、SVPWM的实现方法

- 按照对称原则，将两个基本电压矢量的作用时间平分为二后，安放在开关周期的首端和末端。
- 零矢量的作用时间放在开关周期的中间，并按开关次数最少的原则选择零矢量。
- 在一个开关周期内，有一相的状态保持不变，从一个矢量切换到另一个矢量时，只有一相状态发生变化，因而开关次数少，开关损耗小。

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

6、SVPWM的实现方法

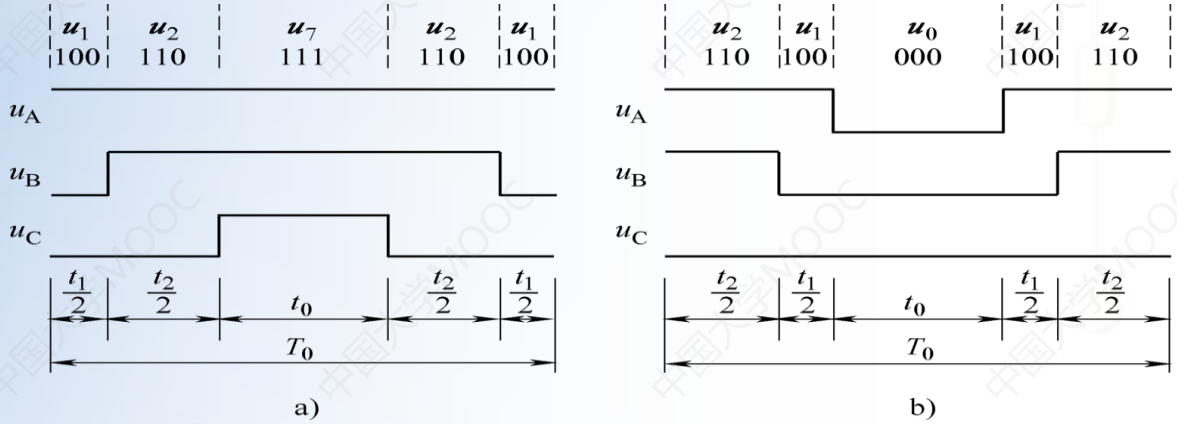

图13　零矢量集中的SVPWM实现

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

6、SVPWM的实现方法

- 将零矢量平均分为4份，在开关周期的首、尾各放1份，在中间放两份。
- 将两个基本电压矢量的作用时间平分为二后，插在零矢量间。
- 按开关次数最少的原则选择矢量。

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

6、SVPWM的实现方法

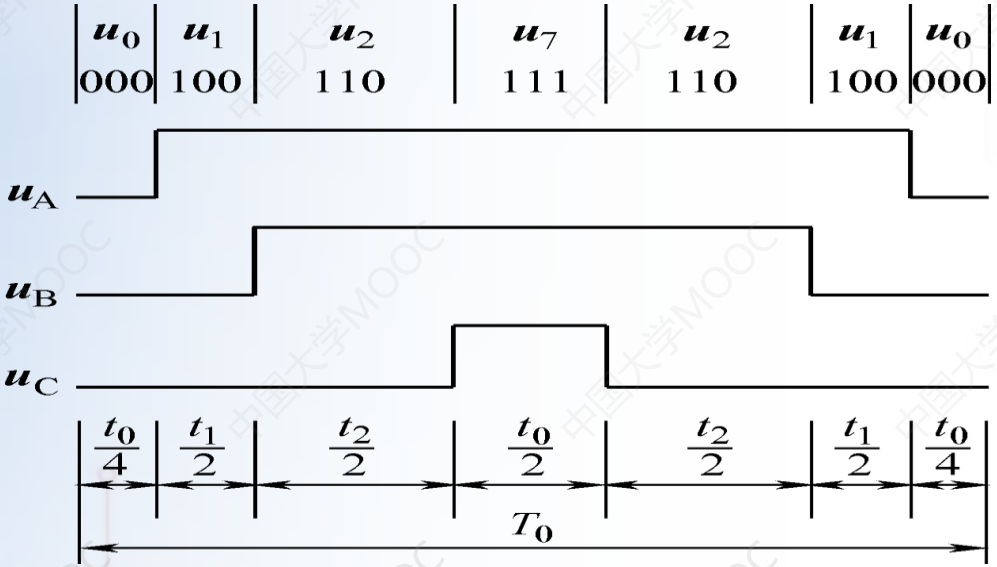

图14　零矢量分布的SVPWM实现

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

6、SVPWM的实现方法

- 每个周期均以零矢量开始，并以零矢量结束。
- 从一个矢量切换到另一个矢量时，只有一相状态发生变化。
- 在一个开关周期内，三相状态均各变化一次，开关损耗略大于零矢量集中的方法。

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

7、SVPWM控制的定子磁链

●将占据π/3的定子磁链矢量轨迹等分为N个小区间，每个小区间所占的时间

$$T_0 = \frac{\pi}{3\omega_1 N}$$

●定子磁链矢量轨迹为正6N边形，轨迹更接近于圆，谐波分量小，能有效减小转矩脉动。

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

7、SVPWM控制的定子磁链

●在每个小区间内，定子磁链矢量的增量为

$$\Delta\boldsymbol{\psi}_s(k) = \boldsymbol{u}_s(k)T_0$$

$\mathbf{u}_s(k)$非基本电压矢量，必须用两个基本矢量合成。

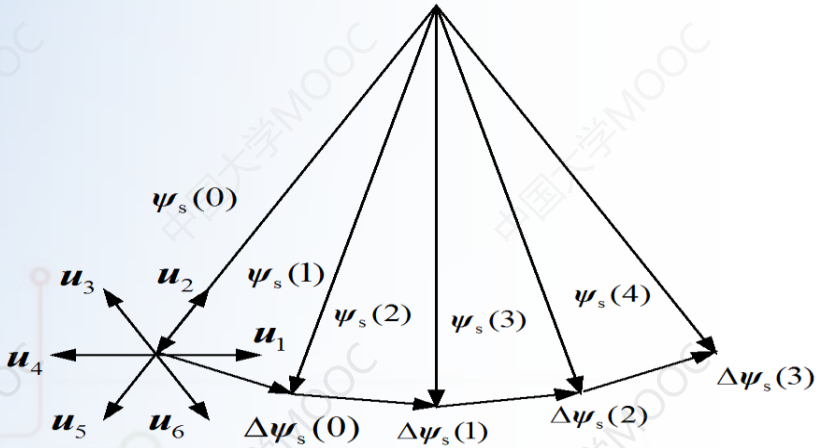

图15 N=4时期望的定子磁链矢量轨迹

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

7、SVPWM控制的定子磁链

- 为了产生$\Delta\boldsymbol{\psi}_s(0)$

$$\boldsymbol{u}_s(0)=\frac{t_1}{T_0}\boldsymbol{u}_6+\frac{t_2}{T_0}\boldsymbol{u}_1=\frac{t_1}{T_0}\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{5\pi}{3}}+\frac{t_2}{T_0}\sqrt{\frac{2}{3}}U_d \quad \textbf{(35)}$$

- 定子磁链矢量的增量为

$$\Delta\boldsymbol{\psi}_s(0)=\mathbf{u}_s(0)T_0=t_1\boldsymbol{u}_6+t_2\boldsymbol{u}_1=t_1\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{5\pi}{3}}+t_2\sqrt{\frac{2}{3}}U_d \quad \textbf{(36)}$$

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

7、SVPWM控制的定子磁链

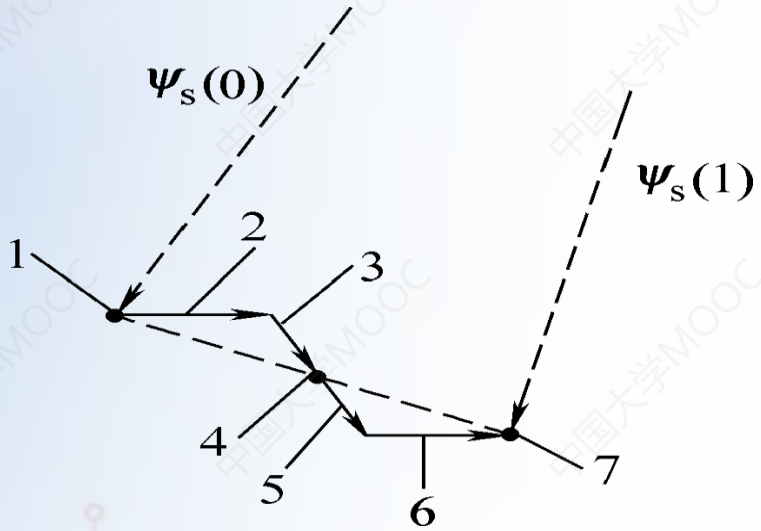

图16　定子磁链矢量的运动的7步轨迹

$$\Delta\psi_s(0,*)=\begin{cases}1.\ \Delta\psi_s(0,1)=0\\ 2.\ \Delta\psi_s(0,2)=\dfrac{t_2}{2}\boldsymbol{u}_1\\ 3.\ \Delta\psi_s(0,3)=\dfrac{t_1}{2}\boldsymbol{u}_6\\ 4.\ \Delta\psi_s(0,4)=0\\ 5.\ \Delta\psi_s(0,5)=\dfrac{t_1}{2}\boldsymbol{u}_6\\ 6.\ \Delta\psi_s(0,6)=\dfrac{t_2}{2}\boldsymbol{u}_1\\ 7.\ \Delta\psi_s(0,7)=0\end{cases}\tag{37}$$

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

7、SVPWM控制的定子磁链

- 定子磁链矢量轨迹

  $\frac{\pi}{3}$ 弧度内实际的定子磁链矢量轨迹

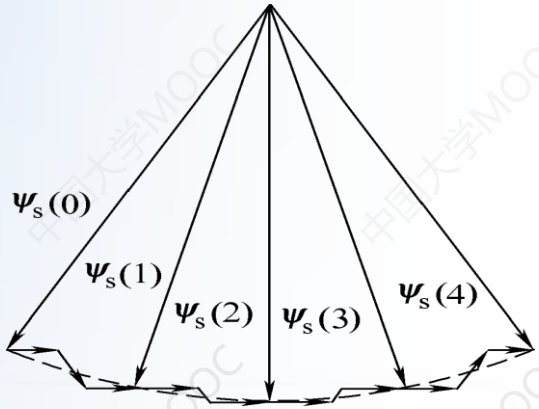

图17　N=4时，实际的定子磁链矢量轨迹

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

7、SVPWM控制的定子磁链

- 定子磁链矢量轨迹

0~2π弧度的定子磁链矢量轨迹

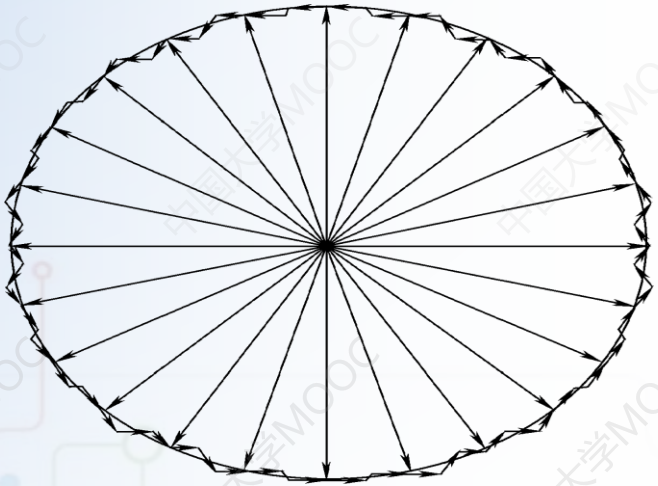

图18　定子旋转磁链矢量轨迹

三、电压空间矢量PWM（SVPWM）控制技术

7、SVPWM控制的定子磁链

- 实际的定子磁链矢量轨迹在期望的磁链圆周围波动。N越大，磁链轨迹越接近于圆，但开关频率随之增大。

- 由于N是有限的，所以磁链轨迹只能接近于圆，而不可能等于圆。

SVPWM控制的特点

- 8个基本输出矢量，6个有效工作矢量和2个零矢量，在一个旋转周期内，每个有效工作矢量只作用1次的方式，生成正6边形的旋转磁链，谐波分量大，导致转矩脉动。

- 用相邻的2个有效工作矢量，合成任意的期望输出电压矢量，使磁链轨迹接近于圆。开关周期越小，旋转磁场越接近于圆，但功率器件的开关频率将提高。

SVPWM控制的特点

- 用电压空间矢量直接生成三相PWM波，计算简便。

- 与一般的SPWM相比较，SVPWM控制方式的输出电压最多可提高15%。