

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

- 把逆变器和交流电动机视为一体，以圆形旋转磁场为目标来控制逆变器的工作，这种控制方法称作“磁链跟踪控制”，磁链轨迹的控制是通过交替使用不同的电压空间矢量实现的，所以又称“电压空间矢量PWM (SVPWM, Space Vector PWM) 控制”。

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

1、空间矢量的定义

●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，如果考虑到它们所在绕组的空间位置，可以定义为空间矢量。

●定义三相定子电压空间矢量

$$\mathbf{u}_{AO} = k u_{AO}$$

$$\mathbf{u}_{BO} = k u_{BO} e^{j\gamma}$$

$$\mathbf{u}_{CO} = k u_{CO} e^{j2\gamma} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{2\pi}{3}$$

k为待定系数

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

1、空间矢量的定义

●三相合成矢量

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_s &= \mathbf{u}_{AO} + \mathbf{u}_{BO} + \mathbf{u}_{CO} \\ &= k\mathbf{u}_{AO} + k\mathbf{u}_{BO}e^{j\gamma} + k\mathbf{u}_{CO}e^{j2\gamma} \quad (2)\end{aligned}$$

$$u_{AO} > 0$$

$$u_{BO} > 0$$

$$u_{CO} < 0$$

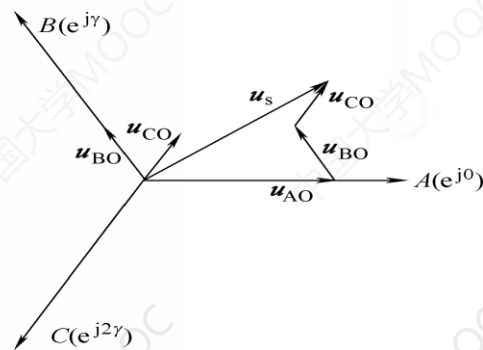


图5 电压空间矢量

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

1、空间矢量的定义

- 定子电流空间矢量

$$\begin{aligned}\mathbf{i}_s &= \mathbf{i}_{AO} + \mathbf{i}_{BO} + \mathbf{i}_{CO} \\ &= k\mathbf{i}_{AO} + k\mathbf{i}_{BO}e^{j\gamma} + k\mathbf{i}_{CO}e^{j2\gamma}\end{aligned}\quad (3)$$

- 定子磁链空间矢量

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\psi}_s &= \boldsymbol{\psi}_{AO} + \boldsymbol{\psi}_{BO} + \boldsymbol{\psi}_{CO} \\ &= k\boldsymbol{\psi}_{AO} + k\boldsymbol{\psi}_{BO}e^{j\gamma} + k\boldsymbol{\psi}_{CO}e^{j2\gamma}\end{aligned}\quad (4)$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

1、空间矢量的定义

●空间矢量功率表达式

$$\begin{aligned} p' &= \text{Re}(\mathbf{u}_s \mathbf{i}_s') \\ &= \text{Re}[k^2(u_{AO} + u_{BO}e^{j\gamma} + u_{CO}e^{j2\gamma})(i_{AO} + i_{BO}e^{-j\gamma} + i_{CO}e^{-j2\gamma})] \\ &= k^2(u_{AO}i_{AO} + u_{BO}i_{BO} + u_{CO}i_{CO}) \\ &\quad + k^2 \text{Re}[(u_{BO}i_{AO}e^{j\gamma} + u_{CO}i_{AO}e^{j2\gamma} + u_{AO}i_{BO}e^{-j\gamma} \\ &\quad + u_{CO}i_{BO}e^{j\gamma} + u_{AO}i_{CO}e^{-j2\gamma} + u_{BO}i_{CO}e^{-j\gamma})] \end{aligned} \quad (5)$$

共轭矢量 $\mathbf{i}_s$ 、 $\mathbf{i}_s'$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

1、空间矢量的定义

考虑到

$$i_{AO} + i_{BO} + i_{CO} = 0 \quad \gamma = \frac{2\pi}{3}$$

$$P' = \frac{3}{2} k^2 (u_{AO} i_{AO} + u_{BO} i_{BO} + u_{CO} i_{CO}) = \frac{3}{2} k^2 p \quad (6)$$

●三相瞬时功率

$$P = u_{AO} i_{AO} + u_{BO} i_{BO} + u_{CO} i_{CO}$$

●按空间矢量功率与三相瞬时功率相等的原则

$$k = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

1、空间矢量的定义

$$\mathbf{u}_s = \sqrt{\frac{2}{3}}(u_{AO} + u_{BO}e^{j\gamma} + u_{CO}e^{j2\gamma}) \quad (7)$$

$$\mathbf{i}_s = \sqrt{\frac{2}{3}}(i_{AO} + i_{BO}e^{j\gamma} + i_{CO}e^{j2\gamma}) \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = \sqrt{\frac{2}{3}}(\psi_{AO} + \psi_{BO}e^{j\gamma} + \psi_{CO}e^{j2\gamma}) \quad (9)$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

1、空间矢量的定义

- 当定子相电压为三相平衡正弦电压时，三相合成矢量

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_s &= \mathbf{u}_{AO} + \mathbf{u}_{BO} + \mathbf{u}_{CO} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left[U_m \cos(\omega_1 t) + U_m \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) e^{j\gamma} + U_m \cos\left(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) e^{j2\gamma} \right] \\ &= \sqrt{\frac{3}{2}} U_m e^{j\omega_1 t} = U_s e^{j\omega_1 t} \end{aligned} \quad (10)$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

1、空间矢量的定义

● u_s 以电源角频率 ω_1 为角速度作恒速旋转的空间矢

量，幅值 $U_s = \sqrt{\frac{3}{2}} U_m$

● 在三相平衡正弦电压供电时，若电动机转速已稳定，则定子电流和磁链的空间矢量的幅值恒定，以电源角频率为电气角速度在空间作恒速旋转。

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

2、电压与磁链空间矢量的关系

- 合成空间矢量表示的定子电压方程式

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \quad (11)$$

- 忽略定子电阻压降，定子合成电压与合成磁链空间矢量的近似关系为

$$\mathbf{u}_s \approx \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \quad \text{或} \quad \boldsymbol{\psi}_s \approx \int \mathbf{u}_s dt \quad (12)$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

2、电压与磁链空间矢量的关系

●当电动机由三相平衡正弦电压供电时，电动机定子磁链幅值恒定，其空间矢量以恒速旋转，磁链矢量顶端的运动轨迹呈圆形（简称为磁链圆）。

●定子磁链矢量

$$\psi_s = \psi_s e^{j(\omega_1 t + \varphi)} \quad (13)$$

●定子电压矢量

$$\begin{aligned} u_s &\approx \frac{d}{dt} (\psi_s e^{j(\omega_1 t + \varphi)}) \\ &= j\omega_1 \psi_s e^{j(\omega_1 t + \varphi)} = \omega_1 \psi_s e^{j(\omega_1 t + \frac{\pi}{2} + \varphi)} \end{aligned} \quad (14)$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

2、电压与磁链空间矢量的关系

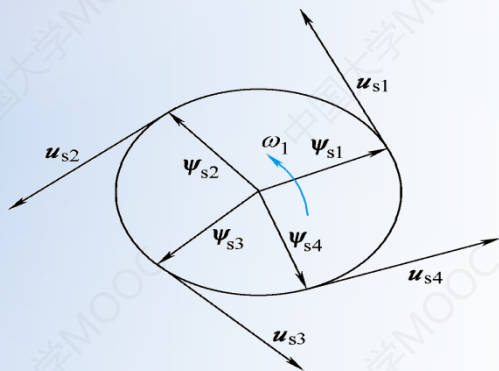


图6 旋转磁场与电压空间矢量的运动轨迹

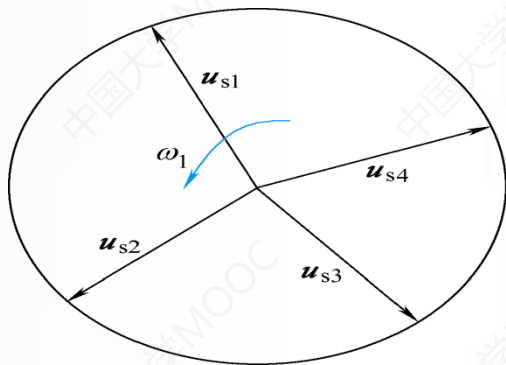


图7 电压矢量圆轨迹

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

3、PWM逆变器基本输出电压矢量

- 直流电源中点 O' 和交流电动机中点 O 的电位不等, 但合成电压矢量的表达式相等。
- 因此, 三相合成电压空间矢量与参考点无关。

$$\begin{aligned} u_s &= u_{AO} + u_{BO} + u_{CO} = \sqrt{\frac{2}{3}}(u_{AO} + u_{BO}e^{j\gamma} + u_{CO}e^{j2\gamma}) \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}}[(u_A - u_{OO'}) + (u_B - u_{OO'})e^{j\gamma} + (u_C - u_{OO'})e^{j2\gamma}] \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}}[u_A + u_B e^{j\gamma} + u_C e^{j2\gamma} - u_{OO'}(1 + e^{j\gamma} + e^{j2\gamma})] = \sqrt{\frac{2}{3}}(u_A + u_B e^{j\gamma} + u_C e^{j2\gamma}) \quad (15) \end{aligned}$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

3、PWM逆变器基本输出电压矢量

●PWM逆变器共有8种工作状态

当 $(S_A \ S_B \ S_C) = (1 \ 0 \ 0)$

$$(u_A \ u_B \ u_C) = \left(\frac{U_d}{2} \quad -\frac{U_d}{2} \quad -\frac{U_d}{2} \right)$$

$$\begin{aligned} u_1 &= \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2} (1 - e^{j\gamma} - e^{j2\gamma}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2} (1 - e^{j\frac{2\pi}{3}} - e^{j\frac{4\pi}{3}}) \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2} \left[(1 - \cos \frac{2\pi}{3} - \cos \frac{4\pi}{3}) - j(\sin \frac{2\pi}{3} + \sin \frac{4\pi}{3}) \right] = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d \quad (16) \end{aligned}$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

3、PWM逆变器基本输出电压矢量

$$\text{当 } (S_A \ S_B \ S_C) = (1 \ 1 \ 0)$$

$$(u_A \ u_B \ u_C) = \left(\frac{U_d}{2} \quad \frac{U_d}{2} \quad -\frac{U_d}{2} \right)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_2 &= \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2} (1 + e^{j\gamma} - e^{j2\gamma}) = \frac{U_d}{2} (1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} - e^{j\frac{4\pi}{3}}) \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2} \left[(1 + \cos \frac{2\pi}{3} - \cos \frac{4\pi}{3}) + j(\sin \frac{2\pi}{3} - \sin \frac{4\pi}{3}) \right] \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2} (1 + j\sqrt{3}) = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d e^{j\frac{\pi}{3}} \end{aligned} \quad (17)$$

依此类推，可得8个基本空间矢量。

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

3、PWM逆变器基本输出电压矢量

表1 基本空间电压矢量

	S_A	S_B	S_C	u_A	u_B	u_C	u_s
u_0	0	0	0	$-\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	0
u_1	1	0	0	$\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d$
u_2	1	1	0	$\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{\pi}{3}}$
u_3	0	1	0	$-\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{2\pi}{3}}$
u_4	0	1	1	$-\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\pi}$
u_5	0	0	1	$-\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{4\pi}{3}}$
u_6	1	0	1	$\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{5\pi}{3}}$
u_7	1	1	1	$\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	0

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

3、PWM逆变器基本输出电压矢量

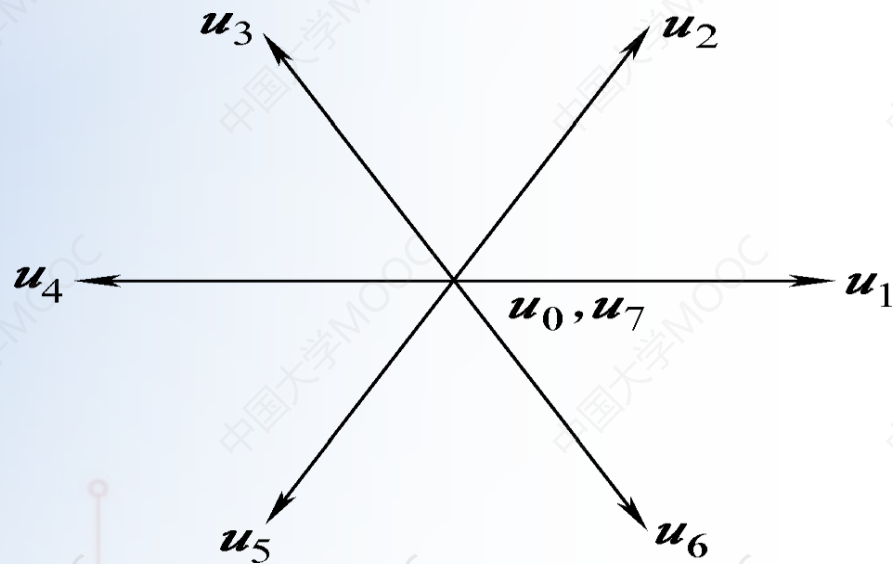


图8 基本电压空间矢量图

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

$u_1 \sim u_6$

4、正六边形空间旋转磁场

- 6个有效工作矢量

顺序分别作用 Δt 时间，并使

$$\Delta t = \frac{\pi}{3\omega_1} \quad (18)$$

每个有效工作矢量作用 $\frac{\pi}{3}$

- 6个有效工作矢量完成一个周期，输出基波电压角频率

$$\omega_1 = \frac{\pi}{3\Delta t}$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

4、正六边形空间旋转磁场

- 定子磁链矢量的增量

$$\Delta \psi_s = \mathbf{u}_s \Delta t \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Delta \psi_s(k) &= \mathbf{u}_s(k) \Delta t \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} U_d \Delta t \cdot e^{j \frac{(k-1)\pi}{3}} \end{aligned} \quad (20)$$

$k=1,2,3,4,5,6$

- 定子磁链矢量运动方向与电压矢量相同，增量的幅值等于 $\sqrt{\frac{2}{3}} U_d \Delta t$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

4、正六边形空间旋转磁场

- 定子磁链矢量的运动轨迹为

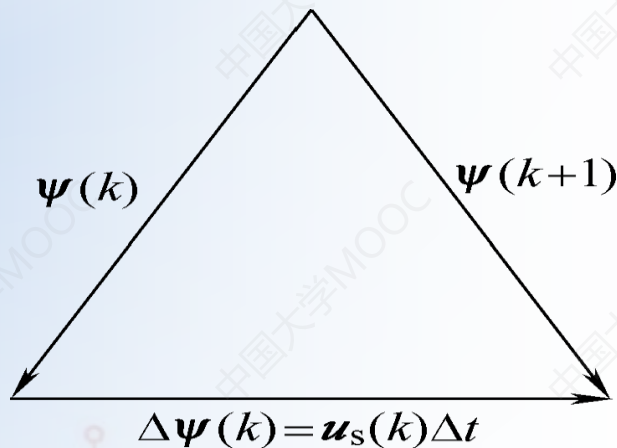


图9 定子磁链矢量增量

$$\begin{aligned}\psi_s(k+1) &= \psi_s(k) + \Delta\psi_s(k) \\ &= \psi_s(k) + u_s(k)\Delta t\end{aligned}\quad (21)$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

4、正六边形空间旋转磁场

- 在一个周期内，6个有效工作矢量顺序作用一次，定子磁链矢量是一个封闭的正六边形。

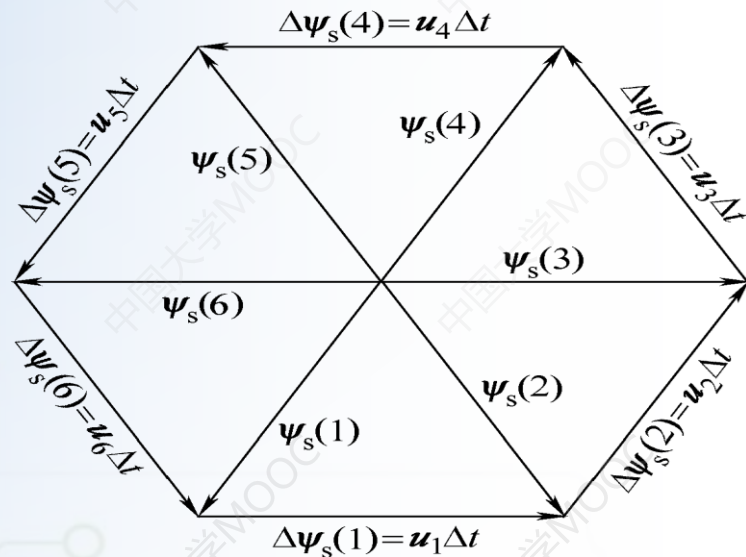


图10 正六边形定子磁链轨迹

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

4、正六边形空间旋转磁场

- 正六边形定子磁链的大小与直流侧电压成正比，而与电源角频率成反比。

$$\begin{aligned} |\boldsymbol{\psi}_s(k)| &= |\Delta\boldsymbol{\psi}_s(k)| = |\mathbf{u}(k)| \Delta t \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} U_d \Delta t = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\pi U_d}{3\omega_1} \end{aligned} \quad (22)$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

4、正六边形空间旋转磁场

- 在基频以下调速时，应保持正六边形定子磁链的最大值恒定。
- 若直流侧电压恒定，则 ω_1 越小时， Δt 越大，势必导致 $|\Psi_s(k)|$ 增大。

$$|\Psi_s(k)| = |\Delta\Psi_s(k)| = |\mathbf{u}(k)| \Delta t = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d \Delta t = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\pi U_d}{3\omega_1} \quad (22)$$

- 要保持正六边形定子磁链不变，必须使 $\frac{U_d}{\omega_1} = \text{常数}$
- 在变频的同时必须调节直流电压，造成了控制的复杂性。

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

4、正六边形空间旋转磁场

- 有效的方法是插入零矢量
- 当零矢量作用时，定子磁链矢量的增量

$$\Delta\psi_s = 0$$

表明定子磁链矢量停留不动。

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

4、正六边形空间旋转磁场

- 有效工作矢量作用时间 $\Delta t_1 < \Delta t$

- 零矢量作用时间 $\Delta t_0 = \Delta t - \Delta t_1$

当 $\omega_1 \Delta t = \omega_1 (\Delta t_1 + \Delta t_0) = \frac{\pi}{3}$

- 定子磁链矢量的增量为

$$\Delta \psi_s(k) = \mathbf{u}_s(k) \Delta t_1 + \mathbf{0} \Delta t_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d \Delta t_1 \cdot e^{j \frac{(k-1)\pi}{3}}$$

(23)

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

4、正六边形空间旋转磁场

- 在时间 Δt_1 段内，定子磁链矢量轨迹沿着有效工作电压矢量方向运行。
- 在时间 Δt_0 段内，零矢量起作用，定子磁链矢量轨迹停留在原地，等待下一个有效工作矢量的到来。
- 正六边形定子磁链的最大值

$$|\Psi_s(k)| = |\Delta\Psi_s(k)| = |\mathbf{u}_s(k)| \Delta t_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d \Delta t_1 \quad (24)$$

三、电压空间矢量PWM (SVPWM) 控制技术

4、正六边形空间旋转磁场

- 在直流电压不变的条件下，要保持

$$|\psi_s(k)|$$

恒定，只要使 Δt_1 为常数即可。

- 输出频率越低， Δt 越大，零矢量作用时间 Δt_0 也越大，定子磁链矢量轨迹停留的时间越长。
- 由此可知，零矢量的插入有效地解决了定子磁链矢量幅值与旋转速度的矛盾。