

SVPWM 占空比计算

by 杨天锡

Simol BBS: hitbuyi

2011.10.11 初稿, 有错的地方请指正, 联系方式

hitbuyi@yahoo.com.cn

保留所有版权, all rights reserved

摘要: 在矢量控制中, 确定指令电压的扇区后, 自然想知道需要多大的占空比去控制各相, 知道占空比后, 才可根据 PWM 波的对齐方式设置 MCU/DSP 提供的比较器数值从而产生 SVPWM 波形。

一, 五段式 SVPWM

在五段式 SVPWM 中, 有一相的相电压为一个 PWM 周期内不发生翻转, 可以为恒零(占空比为 0%), 也可以恒 1(占空比为 100%)。五段式 SVPWM 在一个 PWM 周期中也有不同的波形方式如边缘对齐, 中心对齐等, 对齐方式不同, 五段式 SVPWM 的实现形式也不周。当 SVPWM 波开以为对称方式时, PWM 作用时间分为五段, 这也是五段式 PWM 的命名来源, 当对方方式为边缘时, PWM 波形只有三段。

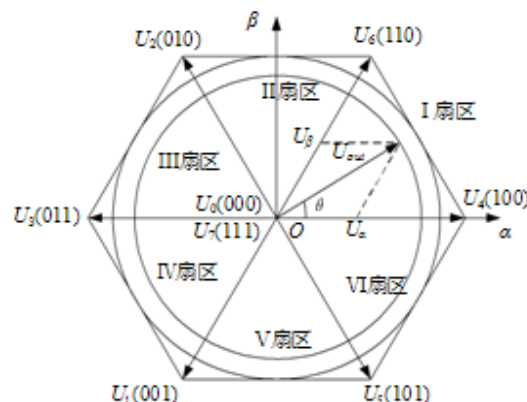


图 1-1a 空间矢量六扇区示意图

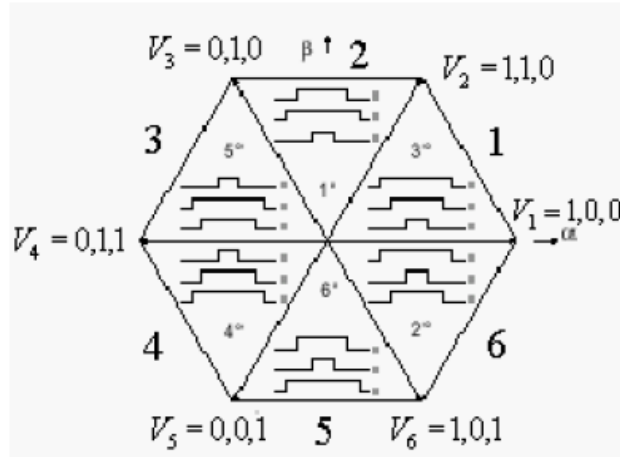


图 1-1b 空间矢量六扇区(令 $V_1 = 100$)

在图 1 中 当 U_{ref} 位置第一扇区时,可以使 A 相电压在一个 PWM 周期内恒为高 (占空比为 100%), 也可以使 C 相电压占空比在一个 PWM 周期内恒为低(占空比为 0%)。现假设 U_{ref} 位置第一扇区,如图 2 所示, U_{ref} 可以由 U_4 、 U_6 、 U_0 及 U_7 合成,用平均值等效可得:

$$U_{ref}T_S = U_4T_4 + U_6T_6 \quad (1-1)$$

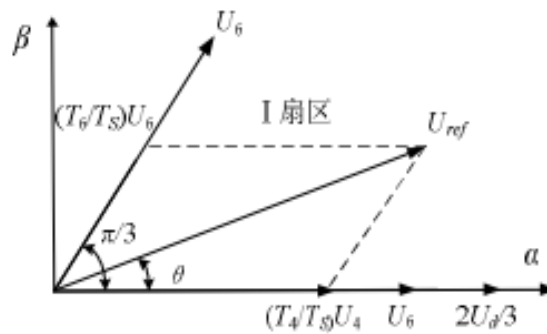


图 1-2 电压空间向量在第 I 区的合成与分解

在两相静止参考坐标系(α, β)中,令 U_{ref} 和 U_4 间的夹角是 θ , 由正弦定理可得:

$$\begin{cases} |U_{ref}| \cos \theta = \frac{T_4}{T_s} |U_4| + \frac{T_6}{T_s} |U_6| \cos \frac{\pi}{3} & \alpha \text{轴} \\ |U_{ref}| \sin \theta = \frac{T_6}{T_s} |U_6| \sin \frac{\pi}{3} & \beta \text{轴} \end{cases} \quad (1-2)$$

因为 $|U_4|=|U_6|=2U_{dc}/3$ ，所以可以得到各矢量的状态保持时间为：

$$\begin{cases} T_4 = mT_s \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) \\ T_6 = mT_s \sin \theta \end{cases} \quad (1-3)$$

式中 m 为 SVPWM 调制系数， $m = \sqrt{3}|U_{ref}|/U_{dc}$ 。(调制比=调制波基波峰值/载波基波峰值)

如果电压矢量标记如图 1-1b 所示，则可以总结归纳如下规律，

$$\begin{cases} T_k = mT_s \sin(\frac{k\pi}{3} - \theta) \\ T_{k+1} = mT_s \sin[\theta - \frac{(k-1)\pi}{3}] \end{cases} \quad (1-4)$$

K 表示第 K 个扇区， $K=1,2,3,4,5,6$ ，当 $K=6$ 时， $T_{k+1} = T_7 = T_1$ 。

当 U_{ref} 位于第一扇区时，采用五段式 SVPWM 的话，在一个 PWM 周期内，因为采用 $U_4(100)$ 和 $U_6(110)$ 这两个基本矢量，观察可以看出， $U_4(100)$ 和 $U_6(110)$ 第一位都是 1，第三位都是 0，只有中间位不同，这样就可以让 A 相电压为恒高，也可以让 C 相电压为恒低。当 U_{ref} 位于其它扇区时，相电压可以为恒高或恒低的情况总结如下表

表 1-1 五段式 SVPWM 各扇区不发生开关相总结

扇区	可为恒高相	可为恒低相
I 区 ($0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$)	A	C

Ⅱ区 ($60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$)	B	C
Ⅲ区 ($120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$)	B	A
Ⅳ区 ($180^\circ \leq \theta \leq 240^\circ$)	C	A
Ⅴ区 ($240^\circ \leq \theta \leq 300^\circ$)	C	B
Ⅵ区 ($300^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$)	A	B

1. U_{ref} 位置第一扇区

(1). 如果选 A 相电压在一个 PWM 周期内恒高, 并且 PWM 对齐方式为边缘方式, 则 PWM 开关情况如图 1-3a 所示, 如果 PWM 对齐方式为中心对称方式, 则 PWM 开关情况如图 1-3b 所示。

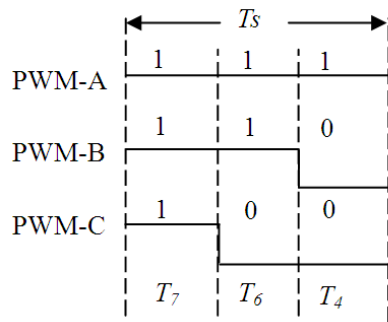


图 1-3a 边缘对齐(第一扇区)

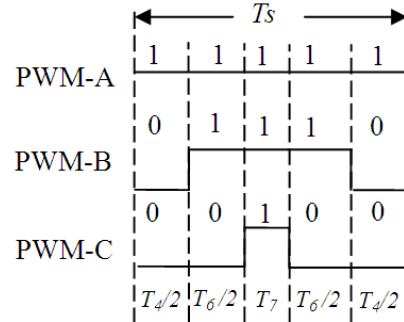


图 1-3b 中心对称对齐(第一扇区)

$$T_7 = (T_s - T_4 - T_6) \quad (1-5)$$

计算出 T_4 , T_6 , T_7 后, 可以计算 A 相, B 相, C 相的占空比, 在边缘对齐和中心对称对齐两种情况下三相占空比是一样的, 图 1-3 中,

$$\begin{cases} DC_A = 1 \\ DC_B = \frac{T_6 + T_7}{T_s} = 1 - m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ DC_C = \frac{T_7}{T_s} = 1 - m \cos(\frac{\pi}{6} - \theta) \end{cases} \quad (1-6)$$

(2). 如果选 **A** 相电压在一个 PWM 周期内恒低, 并且 PWM 对齐方式为边缘方式, 则 PWM 开关情况如图 1-4a 所示, 如果 PWM 对齐方式为中心对称方式, 则 PWM 开关情况如图 1-4b 所示。

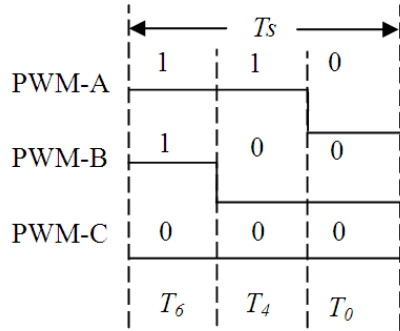


图 1-4a 边缘对齐(第一扇区)

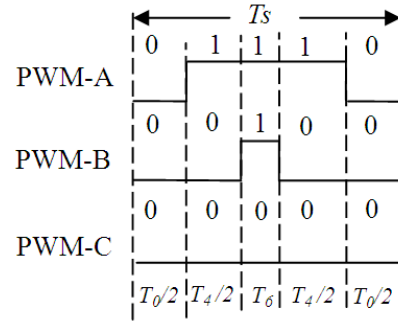


图 1-4b 中心对称对齐(第一扇区)

$$T_0 = (T_s - T_4 - T_6) \quad (1-7)$$

T_4, T_6 和式(1-3)相同, 于是得到各相占空比

$$\begin{cases} DC_A = \frac{T_4 + T_6}{T_s} = m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = \frac{T_6}{T_s} = m \sin(\theta) \\ DC_C = 0 \end{cases} \quad (1-8)$$

类似地, 可以得到第二扇区, 第三扇区, 第四扇区, 第五扇区, 第六扇区的情况

2. U_{ref} 位置第二扇区

根据式(1-4)有

$$\begin{cases} T_6 = mT_s \sin(\frac{2\pi}{3} - \theta) \\ T_2 = mT_s \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \end{cases} \quad (1-9)$$

(1) . 如果选 B 相电压在一个 PWM 周期内恒高, 边缘对齐情况见图 1-5a, 中心对齐情况见图 1-5b。

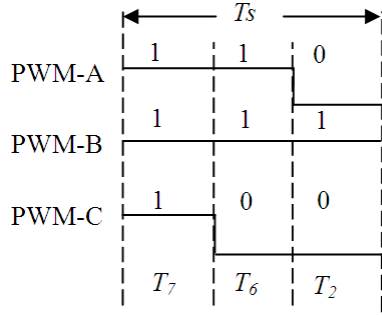


图 1-5a 边缘对齐(第二扇区,B 恒高)

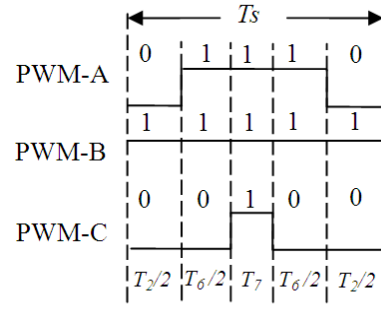


图 1-5b 对称对齐(第二扇区,B 恒高)

$$T_7 = (T_s - T_2 - T_6) \quad (1-10)$$

根据式 (1-9) 和式 (1-10) 得

$$\begin{cases} DC_A = \frac{T_6 + T_7}{T_s} = 1 - m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \\ DC_B = 1 \\ DC_C = \frac{T_7}{T_s} = 1 - m \sin(\theta) \end{cases} \quad (1-11)$$

(2) . 如果选 C 相电压在一个 PWM 周期内恒低, 边缘对齐情况见图 1-6a, 中心对齐情况见图 1-6b。

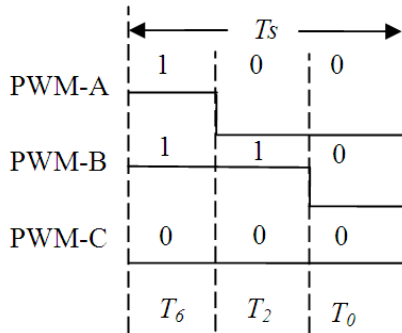


图 1-6a 边缘对齐(第二扇区,C 恒低)

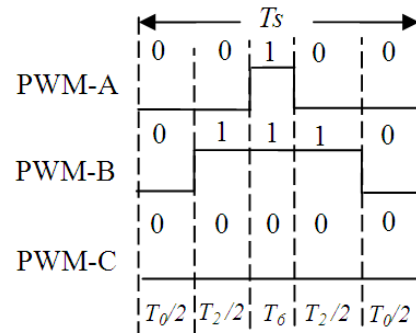


图 1-6b 对称对齐(第二扇区,C 恒低)

$$T_0 = (T_s - T_2 - T_6) \quad (1-12)$$

根据式 (1-9) 和式 (1-12) 得

$$\begin{cases} DC_A = \frac{T_6}{T_s} = m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = \frac{T_2 + T_6}{T_s} = m \sin(\theta) \\ DC_C = 0 \end{cases} \quad (1-13)$$

3. U_{ref} 位置第三扇区

根据式(1-4)有

$$\begin{cases} T_2 = mT_s \sin(\theta) \\ T_3 = mT_s \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (1-14)$$

(1). 如果选 B 相电压在一个 PWM 周期内恒高, 边缘对齐情况见图 1-7a, 中心对齐情况见图 1-7b。

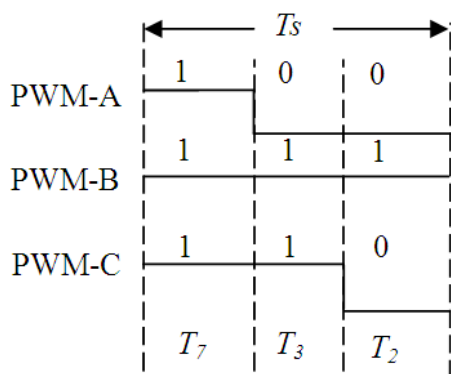


图 1-7a 边缘对齐(第三扇区,B 恒高)

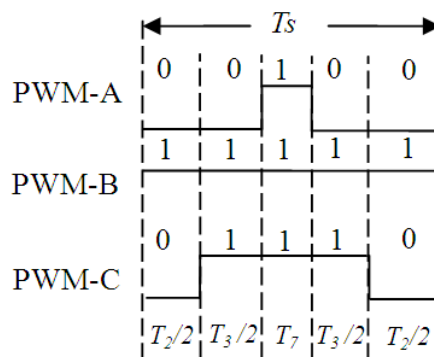


图 1-7b 对称对齐(第三扇区, B 恒高)

$$T_7 = (T_s - T_2 - T_3) \quad (1-15)$$

根据式 (1-14) 和式 (1-15) 得

$$\begin{cases} DC_A = \frac{T_7}{T_s} = 1 - m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \\ DC_B = 1 \\ DC_C = \frac{T_3 + T_7}{T_s} = 1 - m \sin(\theta) \end{cases} \quad (1-16)$$

(2). 如果选 A 相电压在一个 PWM 周期内恒低, 边缘对齐情况见图 1-8a, 中心对齐情况见图 1-8b。

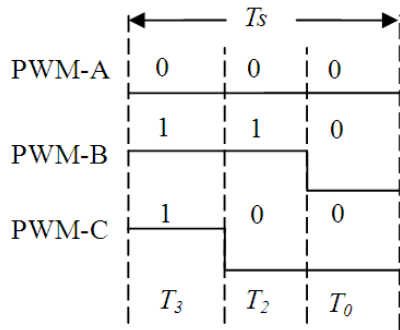


图 1-8a 边缘对齐(第三扇区,A 恒低)

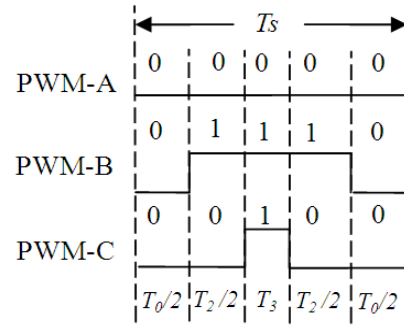


图 1-8b 对称对齐(第三扇区,A 恒低)

$$T_0 = (T_s - T_2 - T_3) \quad (1-17)$$

根据式 (1-14) 和式 (1-17) 得

$$\begin{cases} DC_A = 0 \\ DC_B = \frac{T_3 + T_2}{T_s} = m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \\ DC_C = \frac{T_3}{T_s} = m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (1-18)$$

4. U_{ref} 位置第四扇区

根据式(1-4)有

$$\begin{cases} T_3 = mT_s \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \\ T_1 = mT_s \sin(\theta - \pi) \end{cases} \quad (1-19)$$

(1) . 如果选 C 相电压在一个 PWM 周期内恒高, 边缘对齐情况见图 1-9a, 中心对齐情况见图 1-9b。

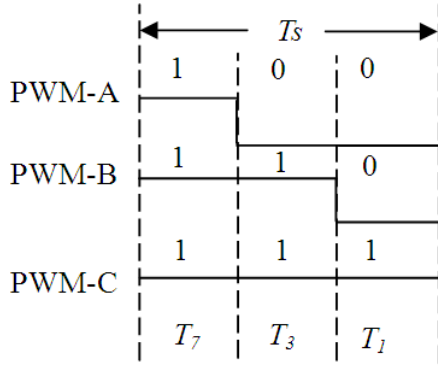


图 1-9a 边缘对齐(第四扇区,C 恒高)

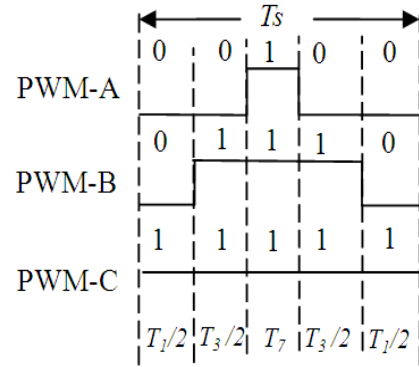


图 1-9b 对称对齐(第四扇区,C 恒高)

$$T_7 = (T_s - T_1 - T_3) \quad (1-20)$$

根据式 (1-19) 和式 (1-20) 得

$$\begin{cases} DC_A = \frac{T_7}{T_s} = 1 + m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = \frac{T_3 + T_7}{T_s} = 1 + m \sin(\theta) \\ DC_C = 1 \end{cases} \quad (1-21)$$

(2) . 如果选 A 相电压在一个 PWM 周期内恒低, 边缘对齐情况见图 1-10a, 中心对齐情况见图 1-10b。

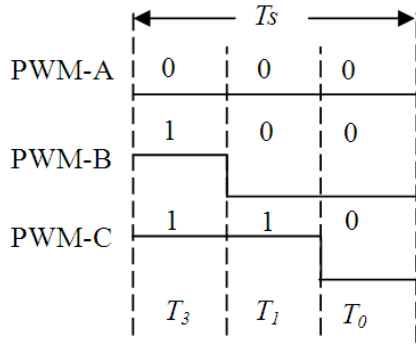


图 1-10a 边缘对齐(第四扇区,A 恒低)

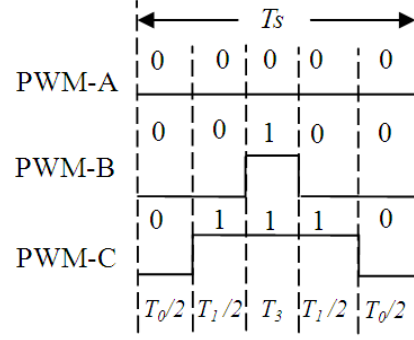


图 1-10b 对称对齐(第四扇区,A 恒低)

$$T_0 = (T_s - T_1 - T_3) \quad (1-22)$$

根据式 (1-19) 和式 (1-22) 得

$$\begin{cases} DC_A = 0 \\ DC_B = \frac{T_3}{T_s} = m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \\ DC_C = \frac{T_1 + T_3}{T_s} = -m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \end{cases} \quad (1-23)$$

5. U_{ref} 位置第五扇区

根据式(1-4)有

$$\begin{cases} T_1 = mT_s \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ T_5 = mT_s \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) \end{cases} \quad (1-19)$$

(1) . 如果选 C 相电压在一个 PWM 周期内恒高, 边缘对齐情况见图 1-11a, 中心对齐情况见图 1-11b。

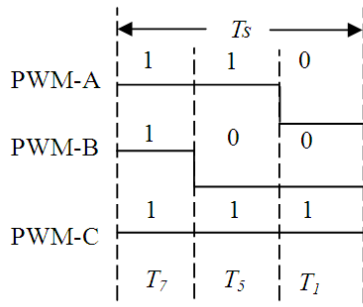


图 1-11a 边缘对齐(第五扇区,C 恒高)

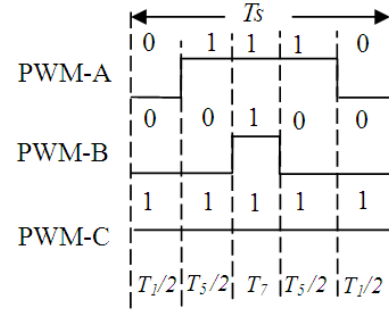


图 1-11b 对称对齐(第五扇区,C 恒高)

$$T_7 = (T_s - T_l - T_5) \quad (1-20)$$

根据式 (1-19) 和式 (1-20) 得

$$\begin{cases} DC_A = \frac{T_7 + T_5}{T_s} = 1 + m \sin(\theta + \frac{\pi}{3}) \\ DC_B = \frac{T_7}{T_s} = 1 + m \sin(\theta) \\ DC_C = 1 \end{cases} \quad (1-21)$$

(2) . 如果选 B 相电压在一个 PWM 周期内恒低, 边缘对齐情况见图 1-12a, 中心对齐情况见图 1-12b。

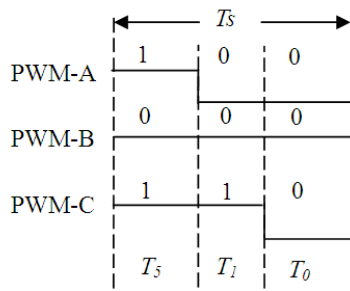


图 1-12a 边缘对齐(第五扇区,B 恒低)

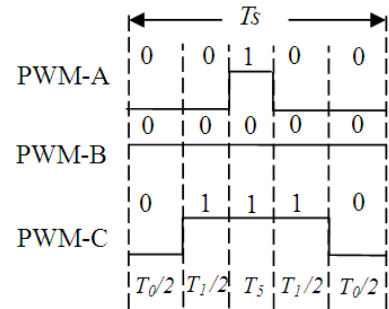


图 1-12b 对称对齐(第五扇区,B 恒低)

$$T_0 = (T_s - T_l - T_5) \quad (1-22)$$

根据式 (1-19) 和式 (1-22) 得

$$\begin{cases} DC_A = \frac{T_5}{T_s} = m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = 0 \\ DC_C = \frac{T_1 + T_5}{T_s} = -m \sin(\theta) \end{cases} \quad (1-23)$$

6. U_{ref} 位置第六扇区

根据式(1-4)有

$$\begin{cases} T_5 = -mT_s \sin(\theta) \\ T_4 = mT_s \sin(\theta + \frac{\pi}{3}) \end{cases} \quad (1-24)$$

(1). 如果选 A 相电压在一个 PWM 周期内恒高, 边缘对齐情况见图 1-13a, 中心对齐情况见图 1-13b。

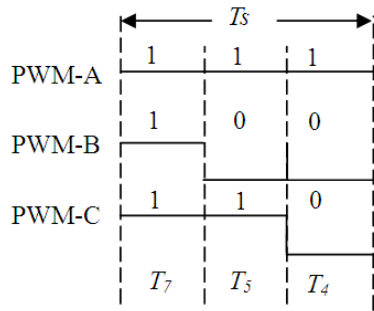


图 1-13a 边缘对齐(第六扇区,A 恒高)

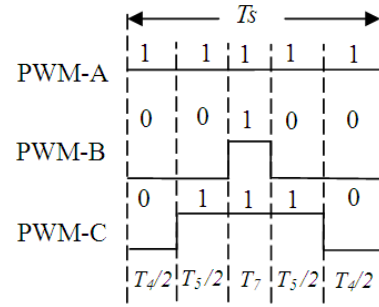


图 1-13b 对称对齐(第六扇区,A 恒高)

$$T_7 = (T_s - T_4 - T_5) \quad (1-25)$$

根据式 (1-24) 和式 (1-25) 得

$$\begin{cases} DC_A = 1 \\ DC_B = \frac{T_7}{T_s} = 1 - m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ DC_C = \frac{T_7 + T_5}{T_s} = 1 - m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \end{cases} \quad (1-26)$$

(2) . 如果选 B 相电压在一个 PWM 周期内恒低, 边缘对齐情况见图 1-14a, 中心对齐情况见图 1-14b。

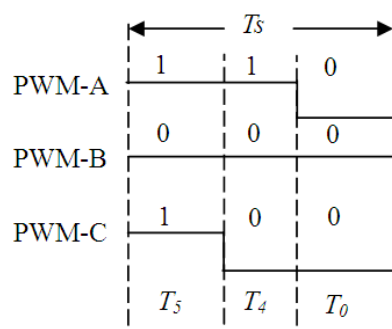


图 1-14a 边缘对齐(第六扇区,B 恒低)

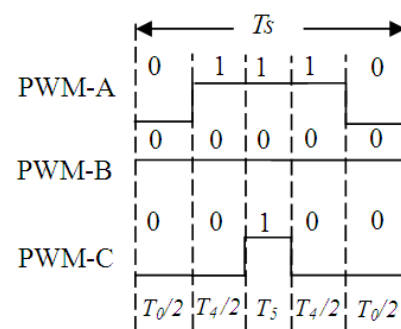


图 1-14b 对称对齐(第六扇区,B 恒低)

$$T_0 = (T_s - T_4 - T_5) \quad (1-27)$$

根据式 (1-19) 和式 (1-22) 得

$$\begin{cases} DC_A = \frac{T_4 + T_5}{T_s} = m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = 0 \\ DC_C = \frac{T_5}{T_s} = -m \sin(\theta) \end{cases} \quad (1-28)$$

五段式 SVPWM 总结如下表

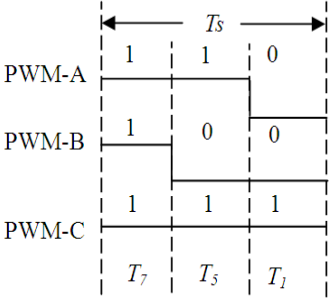
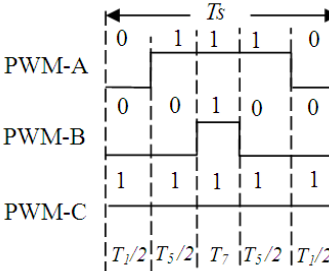
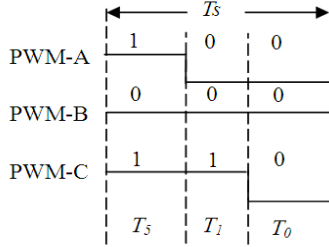
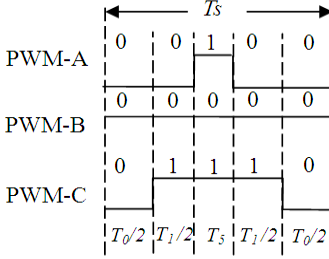
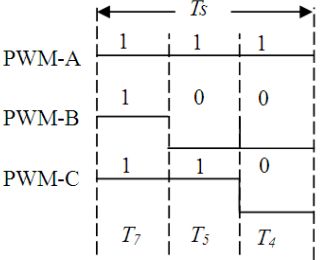
表 1-2 U_{REF} 所在的位置和开关切换顺序对照序

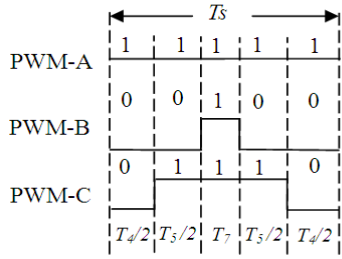
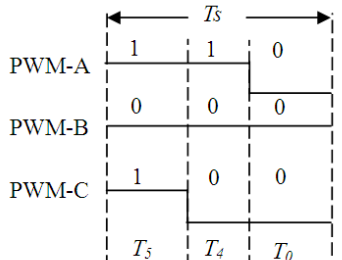
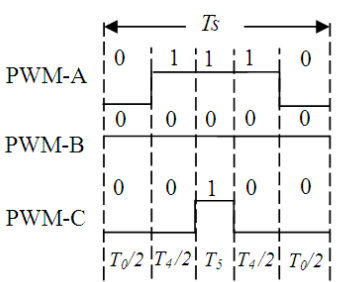
U_{REF} 所在的扇区	恒高或恒低相	对齐方式	三相 PWM 波形图	三相占空比
-----------------	--------	------	------------	-------

I 区	A 相 恒高	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = 1 \\ DC_B = \frac{T_6 + T_7}{T_s} = 1 - m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ DC_C = \frac{T_7}{T_s} = 1 - m \cos(\frac{\pi}{6} - \theta) \end{cases}$ $(0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ)$
		中心 对称		
	C 相 恒低	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = \frac{T_4 + T_6}{T_s} = m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = \frac{T_6}{T_s} = m \sin(\theta) \\ DC_C = 0 \end{cases}$ $(0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ)$
		中心 对称		
II 区	B 相 恒高	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = \frac{T_6 + T_7}{T_s} = 1 - m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \\ DC_B = 1 \\ DC_C = \frac{T_7}{T_s} = 1 - m \sin(\theta) \end{cases}$ $(60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ)$
		中心 对称		

Ⅲ区	C相 恒低	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = \frac{T_6}{T_s} = m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = \frac{T_2 + T_6}{T_s} = m \sin(\theta) \\ DC_C = 0 \end{cases}$ $(60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ)$
		中心 对称		
	B相 恒高	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = \frac{T_7}{T_s} = 1 - m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \\ DC_B = 1 \\ DC_C = \frac{T_3 + T_7}{T_s} = 1 - m \sin(\theta) \end{cases}$ $(120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ)$
		中心 对称		
	A相 恒低	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = 0 \\ DC_B = \frac{T_3 + T_2}{T_s} = m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \\ DC_C = \frac{T_3}{T_s} = -m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \end{cases}$ $(120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ)$
		中心 对称		

		中心 对称		
IV 区	C 相 恒高	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = \frac{T_7}{T_s} = 1 + m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = \frac{T_3 + T_7}{T_s} = 1 + m \sin(\theta) \\ DC_C = 1 \end{cases}$ $(180^\circ \leq \theta \leq 240^\circ)$
		中心 对称		
	A 相 恒低	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = 0 \\ DC_B = \frac{T_3}{T_s} = m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \\ DC_C = \frac{T_1 + T_3}{T_s} = -m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \end{cases}$ $(180^\circ \leq \theta \leq 240^\circ)$
		中心 对称		

V 区	C 相 恒高	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = \frac{T_7 + T_5}{T_s} = 1 + m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = \frac{T_7}{T_s} = 1 + m \sin(\theta) \\ DC_C = 1 \end{cases}$
		中心 对称		$\begin{cases} DC_A = \frac{T_7 + T_5}{T_s} = 1 + m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = \frac{T_7}{T_s} = 1 + m \sin(\theta) \\ DC_C = 1 \end{cases}$ <p>($240^\circ \leq \theta \leq 300^\circ$)</p>
	B 相 恒低	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = \frac{T_5}{T_s} = m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = 0 \\ DC_C = \frac{T_1 + T_5}{T_s} = -m \sin(\theta) \end{cases}$
		中心 对称		$\begin{cases} DC_A = \frac{T_5}{T_s} = m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = 0 \\ DC_C = \frac{T_1 + T_5}{T_s} = -m \sin(\theta) \end{cases}$ <p>($240^\circ \leq \theta \leq 300^\circ$)</p>
VI 区	A 相 恒高	边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = 1 \\ DC_B = \frac{T_7}{T_s} = 1 - m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ DC_C = \frac{T_7 + T_5}{T_s} = 1 - m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) \end{cases}$ <p>($300^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$)</p>

		中心 对称		
		边缘 对齐		$\begin{cases} DC_A = \frac{T_4 + T_5}{T_s} = m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ DC_B = 0 \\ DC_C = \frac{T_5}{T_s} = -m \sin(\theta) \end{cases}$ $(300^\circ \leq \theta \leq 360^\circ)$
		中心 对称		
		恒低		

总结各相 PWM 占空比如下

1. 某相恒高

$$DC_A = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ 1 - m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) & \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ 1 - m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ 1 + m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ 1 + m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ 1 + m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (1-29)$$

$$DC_B = \begin{cases} 1 - m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ 1 & \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ 1 & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ 1 + m \sin(\theta) & \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ 1 + m \sin(\theta) & \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ 1 - m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (1-30)$$

$$DC_C = \begin{cases} 1 - m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ 1 - m \sin(\theta) & \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ 1 - m \sin(\theta) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ 1 & \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ 1 & \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ 1 - m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (1-31)$$

如图所示为某相恒高在 360 度电角度内的占空比

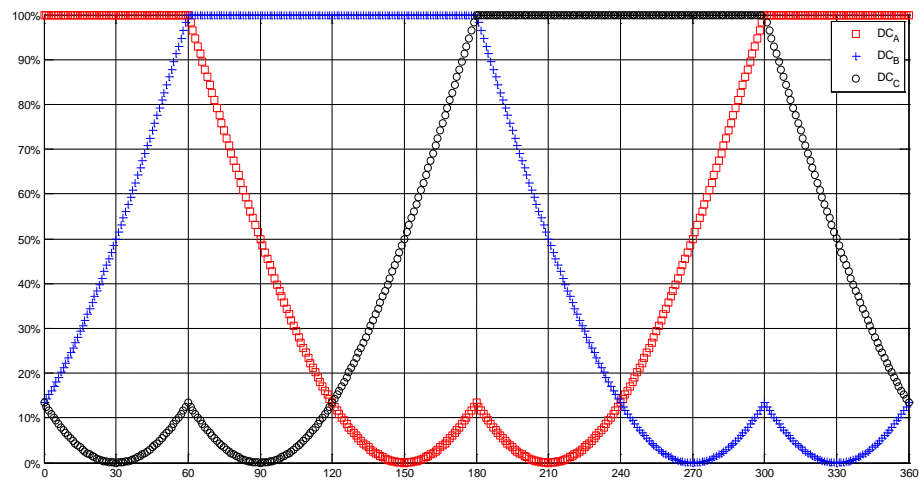


图 1-15, 某相恒高占空比(m = 1)

其中 MATLAB 源代码见附件 1

1. 某相恒低

$$DC_A = \begin{cases} m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ 0 & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ 0 & \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) & \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ m \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (1-32)$$

$$DC_B = \begin{cases} m \sin(\theta) & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ m \sin(\theta) & \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ m \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) & \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ 0 & \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ 0 & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (1-33)$$

$$DC_C = \begin{cases} 0 & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ 0 & \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ -m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ -m \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ -m \sin(\theta) & \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ -m \sin(\theta) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (1-34)$$

如图所示为某相恒高在 360 度电角度内的占空比

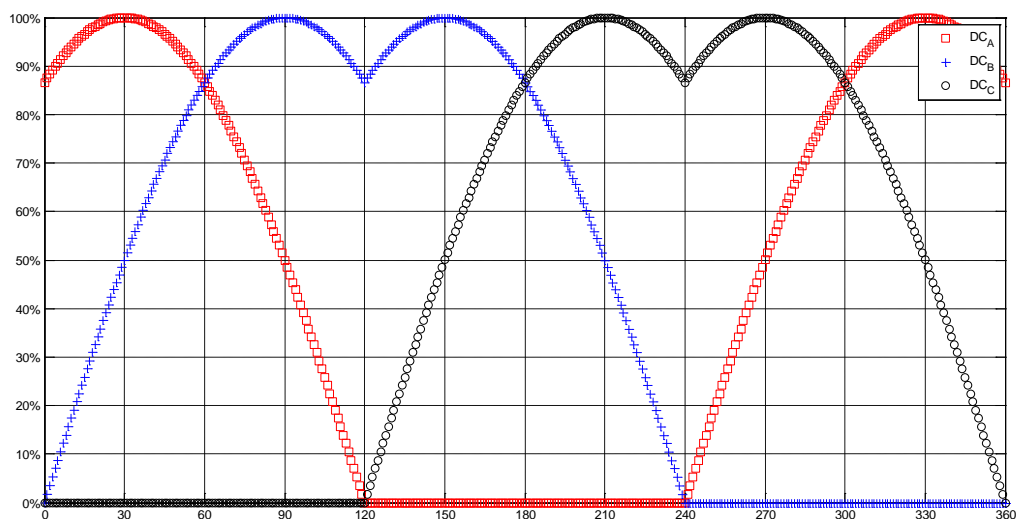


图 1-16，某相低高占空比($m = 1$)

其中 MATLAB 源代码见附件 2

第二 七段式 SVPWM 占空比计算

在七段式 SVPWM 中，三相 PWM 波通常以对称方式发出，零电压向量（000）和（111）的作用时间可以自由分配，通常让这两个电压矢量

$$T_7 = T_0 = (T_S - T_k - T_{k+1})/2 \quad (1-11)$$

如图所示（ U_{REF} 在第一扇区， $K=1$ ）

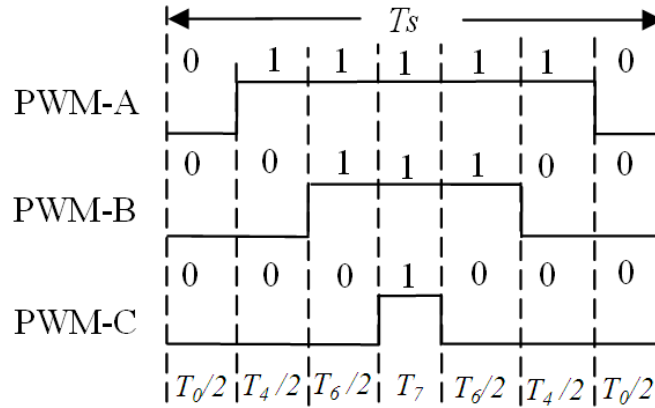


图 1-17 七段式 SVPWM 波形示意图(第一扇区， $K=1$ ， $T_K=T_4$ ， $T_{K+1}=T_6$)

七段式 SVPWM 的作用时间可以分为七部分， T_0 ， $T_K/2$ ， $T_{K+1}/2$ ， T_7 ， $T_{K+1}/2$ ， T_K ， T_0 ，像计算五段式 PWM 占空比那样，可以计算得出三相 PWM 占空比如下式所示

$$DC_A = \begin{cases} \frac{1}{2}[1+m\cos(\theta-\frac{\pi}{6})] & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ m\sin(\theta+\frac{\pi}{3})+\frac{1}{2}[1-m\sin(\theta)] & \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ \frac{1}{2}[1-m\sin(\theta-\frac{\pi}{3})] & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ \frac{1}{2}[1+m\cos(\theta-\frac{\pi}{6})] & \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ m\sin(\frac{\pi}{3}-\theta)+\frac{1}{2}[1+m\sin(\theta)] & \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ \frac{1}{2}[1+m\cos(\theta+\frac{\pi}{6})] & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases}$$

$$DC_B = \begin{cases} m\sin(\theta)+\frac{1}{2}[1-m\cos(\theta-\frac{\pi}{6})] & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ \frac{1}{2}[1+m\sin(\theta)] & \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ \frac{1}{2}[1+m\sin(\theta-\frac{\pi}{3})] & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ m\sin(\theta-\frac{\pi}{3})+\frac{1}{2}[1+m\cos(\theta-\frac{\pi}{6})] & \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ \frac{1}{2}[1+m\sin(\theta)] & \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ \frac{1}{2}[1-m\cos(\theta+\frac{\pi}{6})] & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases}$$

$$DC_c = \begin{cases} \frac{1}{2}[1 - m\cos(\theta - \frac{\pi}{6})] & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ \frac{1}{2}[1 - m\sin(\theta)] & \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ -m\sin(\theta + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{2}[1 - m\sin(\theta - \frac{\pi}{3})] & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ \frac{1}{2}[1 - m\cos(\theta - \frac{\pi}{6})] & \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ \frac{1}{2}[1 - m\sin(\theta)] & \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ -m\sin(\theta) + \frac{1}{2}[1 - m\cos(\theta + \frac{\pi}{6})] & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases}$$

从上式得到的占空比如图所示

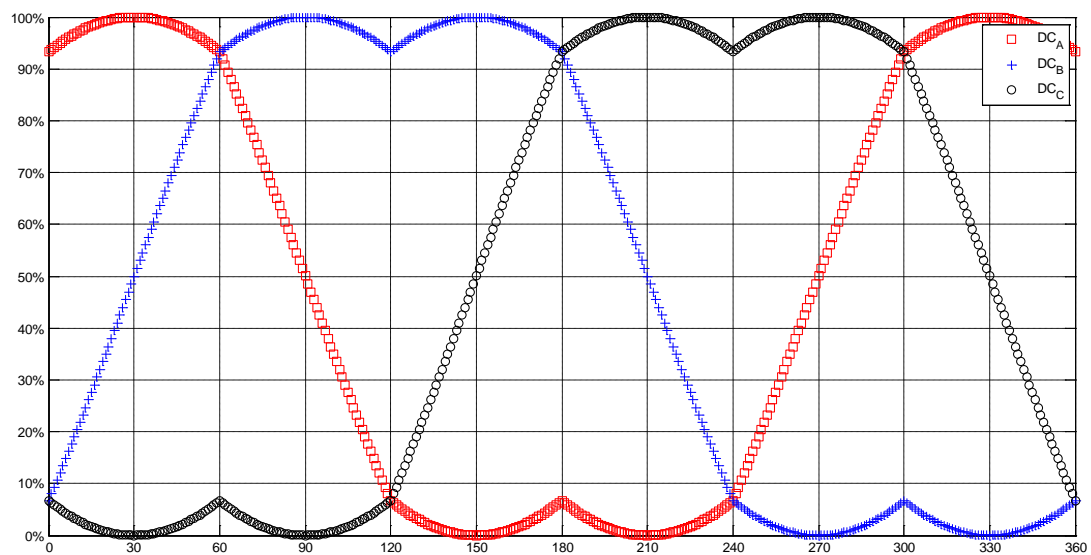


图 1-18，七段式 SVPWM 占空比(m = 1)

其中 MATLAB 源代码见附件 3

附件 1: 五段式 SVPWM 占空比计算 MATLAB 源代码(一相恒高)

```
% File Name: DutyCycle_5_Segment_SVPWM_OnePhaseToUdc.m
% Author: Yang Tianxi
% Description:
% 1. calculation of 5 segments SVPWM , one phase is high(connected to
% Ud) during one PWM period
% Date: 2011,10,11
% note: if any error is found,plz contact to hitbuyi@yahoo.com.cn
% all rights reserved

clear all;
format long;

m = 1;
theta = 0:1:360;

DC_U_1 = zeros(size(theta));
DC_U_2 = zeros(size(theta));
DC_U_3 = zeros(size(theta));
DC_U_4 = zeros(size(theta));
DC_U_5 = zeros(size(theta));
DC_U_6 = zeros(size(theta));

DC_V_1 = zeros(size(theta));
DC_V_2 = zeros(size(theta));
DC_V_3 = zeros(size(theta));
DC_V_4 = zeros(size(theta));
DC_V_5 = zeros(size(theta));
DC_V_6 = zeros(size(theta));

DC_W_1 = zeros(size(theta));
DC_W_2 = zeros(size(theta));
DC_W_3 = zeros(size(theta));
DC_W_4 = zeros(size(theta));
DC_W_5 = zeros(size(theta));
DC_W_6 = zeros(size(theta));

N = length(theta);

for i=1:N;

temp = mod(theta(i), 360);
if ((temp >= 0) & (temp < 60))
    DC_U_1(i) = 1;
```



```

        DC_V_1(i) = 1-m* cos(temp/180*pi + pi/6);
        DC_W_1(i) = 1-m* cos(temp/180*pi - pi/6);
elseif ((temp >= 60) & (temp < 120))
    DC_U_2(i) = 1 - m*sin(temp/180*pi -pi/3);
    DC_V_2(i) = 1;
    DC_W_2(i) = 1 - m* sin(temp/180*pi);
elseif ((temp >= 120) & (temp < 180))
    DC_U_3(i) = 1 - m*sin(temp/180*pi -pi/3);
    DC_V_3(i) = 1;
    DC_W_3(i) = 1 - m* sin(temp/180*pi);
elseif ((temp >= 180) & (temp < 240))
    DC_U_4(i) = 1 + m*cos(temp/180*pi -pi/6);
    DC_V_4(i) = 1+ m* sin(temp/180*pi);
    DC_W_4(i) = 1;
elseif ((temp >= 240) & (temp < 300))
    DC_U_5(i) = 1 + m*cos(temp/180*pi -pi/6);
    DC_V_5(i) = 1+ m* sin(temp/180*pi);
    DC_W_5(i) = 1;
else ((temp >= 300) & (temp <= 360))
    DC_U_6(i) = 1;
    DC_V_6(i) = 1-m* cos(temp/180*pi + pi/6);
    DC_W_6(i) = 1-m* cos(temp/180*pi - pi/6);
end

end

DC_U = DC_U_1 + DC_U_2 + DC_U_3 + DC_U_4 + DC_U_5 + DC_U_6;
DC_V = DC_V_1 + DC_V_2 + DC_V_3 + DC_V_4 + DC_V_5 + DC_V_6;
DC_W = DC_W_1 + DC_W_2 + DC_W_3 + DC_W_4 + DC_W_5 + DC_W_6;

plot(theta,DC_U,'rs',theta,DC_V,'b+',theta,DC_W,'ko');
legend('DC_A','DC_B','DC_C');
axis([0,360,0,1]);

set(gca,'Xtick',[0:30:360]);
set(gca,'yticklabel',{'0%','10%', '20%', '30%',
'40%', '50%', '60%', '70%', '80%', '90%', '100%'});
grid on;

```

附件 2: 五段式 SVPWM 占空比计算 MATLAB 源代码(一相恒低)

```
% File Name: DutyCycle_5_Segment_SVPWM_OnePhaseToGND.m
% Author: Yang Tianxi
% Description:
%   1. calculation of 5 segments SVPWM , one phase is low(connected to
%       GND) during one PWM period
% Date: 2011,10,11
% note: if any error is found,plz contact to hitbuyi@yahoo.com.cn
% all rights reserved

clear all;
format long;

m = 1;
theta = 0:1:360;

DC_U_1 = zeros(size(theta));
DC_U_2 = zeros(size(theta));
DC_U_3 = zeros(size(theta));
DC_U_4 = zeros(size(theta));
DC_U_5 = zeros(size(theta));
DC_U_6 = zeros(size(theta));

DC_V_1 = zeros(size(theta));
DC_V_2 = zeros(size(theta));
DC_V_3 = zeros(size(theta));
DC_V_4 = zeros(size(theta));
DC_V_5 = zeros(size(theta));
DC_V_6 = zeros(size(theta));

DC_W_1 = zeros(size(theta));
DC_W_2 = zeros(size(theta));
DC_W_3 = zeros(size(theta));
DC_W_4 = zeros(size(theta));
DC_W_5 = zeros(size(theta));
DC_W_6 = zeros(size(theta));

N = length(theta);

for i=1:N

temp = mod(theta(i), 360);
if ((temp >= 0) & (temp < 60))
    DC_U_1(i) = m* cos(temp/180*pi - pi/6.0);
```

```

        DC_V_1(i) = m* sin(temp/180*pi);
        DC_W_1(i) = 0;
elseif ((temp >= 60) & (temp < 120))
    DC_U_2(i) = m* cos(temp/180*pi - pi/6.0);;
    DC_V_2(i) = m* sin(temp/180*pi);
    DC_W_2(i) = 0;
elseif ((temp >= 120) & (temp < 180))
    DC_U_3(i) = 0;
    DC_V_3(i) = m* sin(temp/180*pi-pi/3);
    DC_W_3(i) = -m*cos(temp/180*pi- pi/6);
elseif ((temp >= 180) & (temp < 240))
    DC_U_4(i) = 0;
    DC_V_4(i) = m* sin(temp/180*pi - pi/3);
    DC_W_4(i) = - m*cos(temp/180*pi - pi/6);
elseif ((temp >= 240) & (temp < 300))
    DC_U_5(i) = m* cos(temp/180*pi + pi/6.0);
    DC_V_5(i) = 0;
    DC_W_5(i) = -m* sin(temp/180*pi);
else ((temp >= 300) & (temp <= 360))
    DC_U_6(i) = m* cos(temp/180*pi + pi/6.0);
    DC_V_6(i) = 0;
    DC_W_6(i) = -m* sin(temp/180*pi);
end

end

DC_U = DC_U_1 + DC_U_2 + DC_U_3 + DC_U_4 + DC_U_5 + DC_U_6;
DC_V = DC_V_1 + DC_V_2 + DC_V_3 + DC_V_4 + DC_V_5 + DC_V_6;
DC_W = DC_W_1 + DC_W_2 + DC_W_3 + DC_W_4 + DC_W_5 + DC_W_6;

plot(theta,DC_U,'rs',theta,DC_V,'b+',theta,DC_W,'ko');
legend('DC_A','DC_B','DC_C');
axis([0,360,0,1])
set(gca,'Xtick',[0:30:360]);
set(gca,'yticklabel',{'0%','10%', '20%', '30%',
'40%', '50%', '60%', '70%', '80%', '90%', '100%'});
grid on;

```

附件 3：七段式 SVPWM 占空比计算 MATLAB 源代码

```
% File Name: DutyCycle_7_Segment_SVPWM_HalfT0_HalfT7.m
% Author: Yang Tianxi
% Description:
% 1. calculation of 7 segments SVPWM , null vector T0 = T7
% Date: 2011,10,11
% note: if any error is found,plz contact to hitbuyi@yahoo.com.cn
% all rights reserved

clear all;
format long;

m = 1;
theta = 0:1:360;

DC_U_1 = zeros(size(theta));
DC_U_2 = zeros(size(theta));
DC_U_3 = zeros(size(theta));
DC_U_4 = zeros(size(theta));
DC_U_5 = zeros(size(theta));
DC_U_6 = zeros(size(theta));

DC_V_1 = zeros(size(theta));
DC_V_2 = zeros(size(theta));
DC_V_3 = zeros(size(theta));
DC_V_4 = zeros(size(theta));
DC_V_5 = zeros(size(theta));
DC_V_6 = zeros(size(theta));

DC_W_1 = zeros(size(theta));
DC_W_2 = zeros(size(theta));
DC_W_3 = zeros(size(theta));
DC_W_4 = zeros(size(theta));
DC_W_5 = zeros(size(theta));
DC_W_6 = zeros(size(theta));

N = length(theta);

for i=1:N

temp = mod(theta(i), 360);
if ((temp >= 0) & (temp < 60))
```

```

    DC_U_1(i) = (1 + m* cos(temp/180*pi - pi/6.0))/2;
    DC_V_1(i) = m* sin(temp/180*pi) + (1 - m* cos(temp/180*pi -
pi/6.0))/2;
    DC_W_1(i) = (1 - m* cos(temp/180*pi - pi/6.0))/2;
elseif ((temp >= 60) & (temp < 120))
    DC_U_2(i) = m*sin(temp/180*pi + pi/3) + (1 - m* sin(temp/180*pi))/2;
    DC_V_2(i) = (1+ m* sin(temp/180*pi))/2;
    DC_W_2(i) = (1 - m* sin(temp/180*pi))/2;
elseif ((temp >= 120) & (temp < 180))
    DC_U_3(i) = (1 - m* sin(temp/180*pi - pi/3.0))/2;;
    DC_V_3(i) = (1 + m* sin(temp/180*pi-pi/3))/2;
    DC_W_3(i) = -m*sin(temp/180*pi + pi/3) + (1 - m* sin(temp/180*pi -
pi/3))/2;
elseif ((temp >= 180) & (temp < 240))
    DC_U_4(i) = (1 + m* cos(temp/180*pi - pi/6.0))/2;
    DC_V_4(i) = m*sin(temp/180*pi - pi/3) + (1 + m* cos(temp/180*pi -
pi/6))/2;
    DC_W_4(i) = (1 - m* cos(temp/180*pi - pi/6.0))/2;
elseif ((temp >= 240) & (temp < 300))
    DC_U_5(i) = m*sin( pi/3 -temp/180*pi) + (1 + m* sin(temp/180*pi))/2;
    DC_V_5(i) = (1+ m* sin(temp/180*pi))/2;
    DC_W_5(i) = (1- m* sin(temp/180*pi))/2;
else ((temp >= 300) & (temp <= 360))
    DC_U_6(i) = (1 + m* cos(temp/180*pi + pi/6.0))/2;
    DC_V_6(i) = (1 - m* cos(temp/180*pi + pi/6.0))/2;
    DC_W_6(i) = -m* sin(temp/180*pi) + (1 - m* cos(temp/180*pi +
pi/6.0))/2;
end

end

DC_U = DC_U_1 + DC_U_2 + DC_U_3 + DC_U_4 + DC_U_5 + DC_U_6;
DC_V = DC_V_1 + DC_V_2 + DC_V_3 + DC_V_4 + DC_V_5 + DC_V_6;
DC_W = DC_W_1 + DC_W_2 + DC_W_3 + DC_W_4 + DC_W_5 + DC_W_6;

plot(theta,DC_U,'rs',theta,DC_V,'b+',theta,DC_W,'ko');
legend('DC_A','DC_B','DC_C');

axis([0,360,0,1])
set(gca,'Xtick',[0:30:360]);
set(gca,'yticklabel',{'0%','10%', '20%', '30%',
'40%', '50%', '60%', '70%', '80%', '90%', '100%'});
grid on;

```

