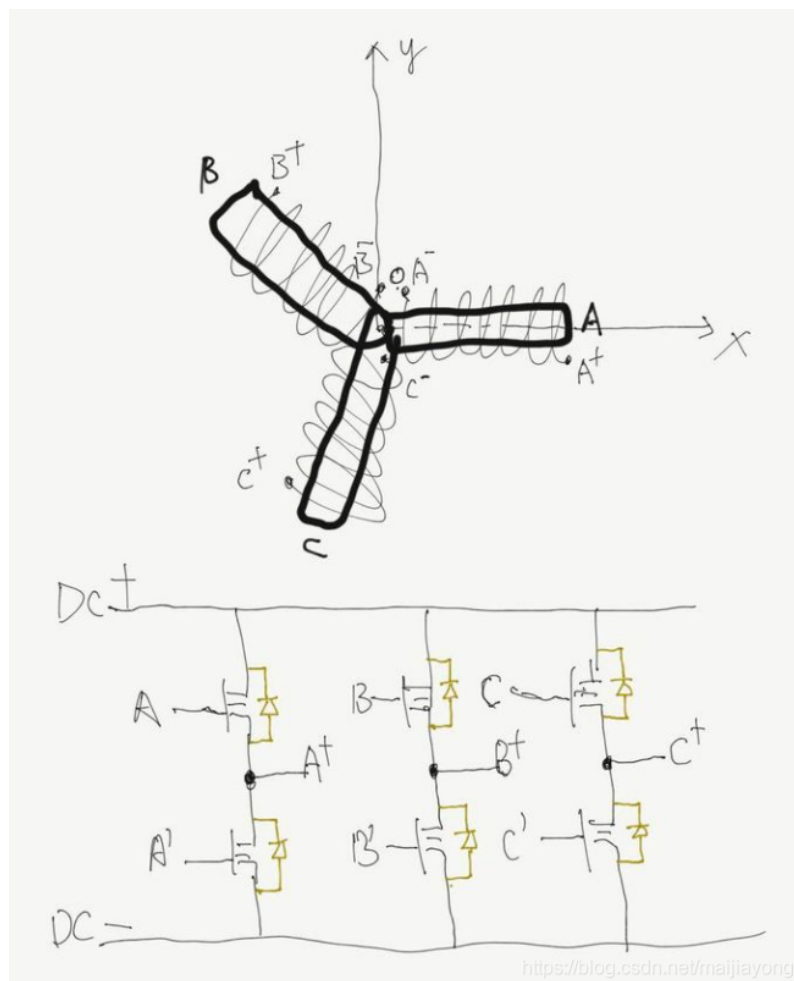
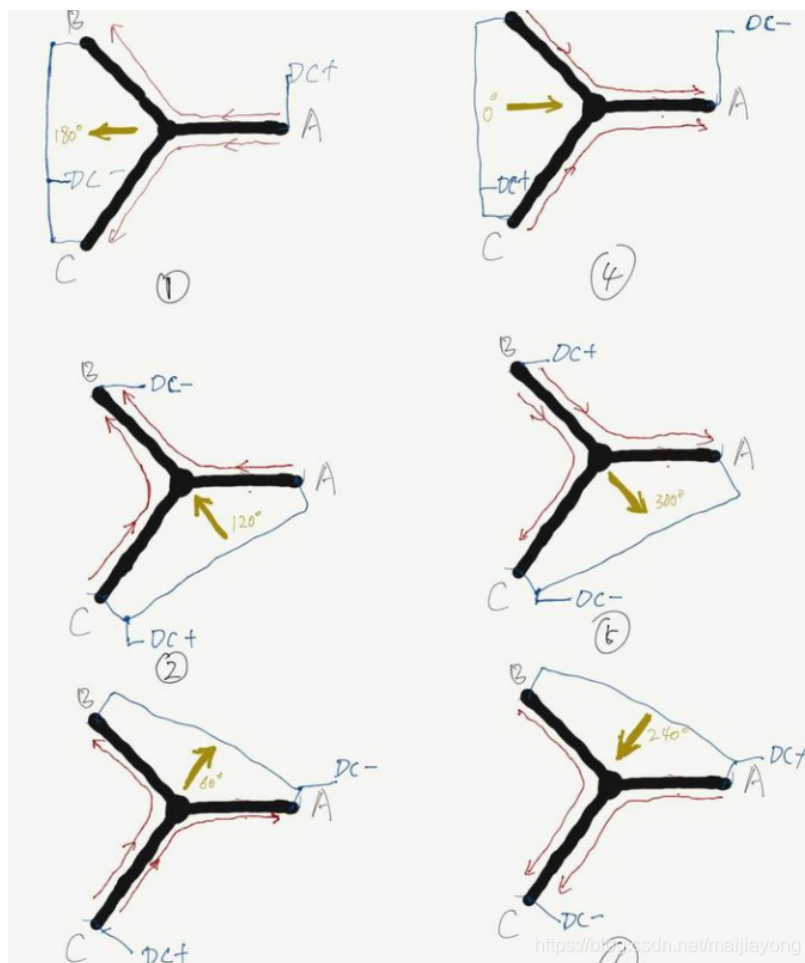


# hxt--电机FOC算法控制

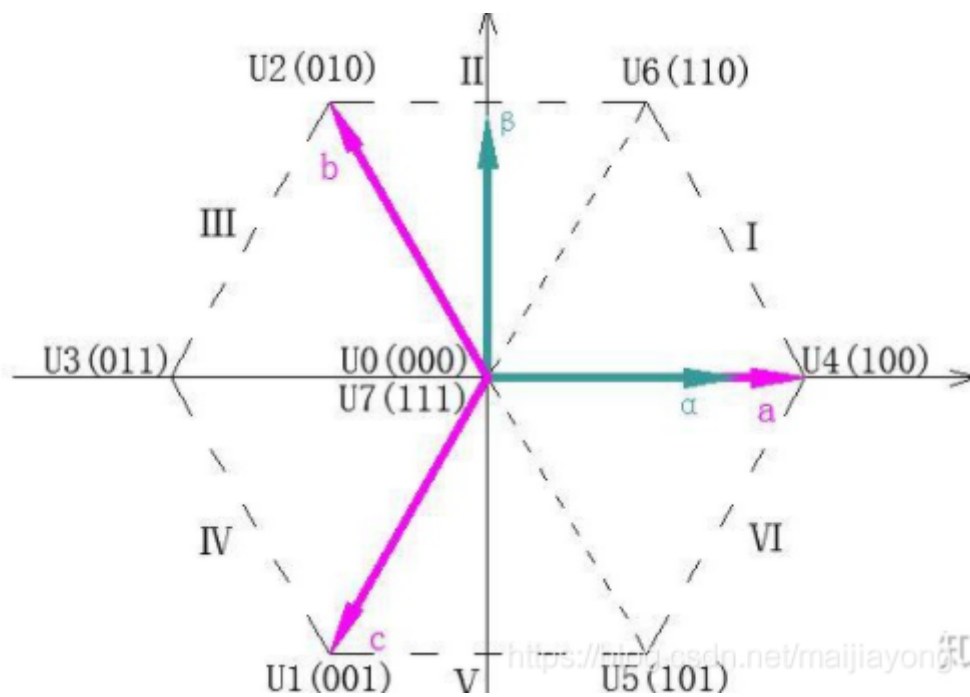
## 电路模型



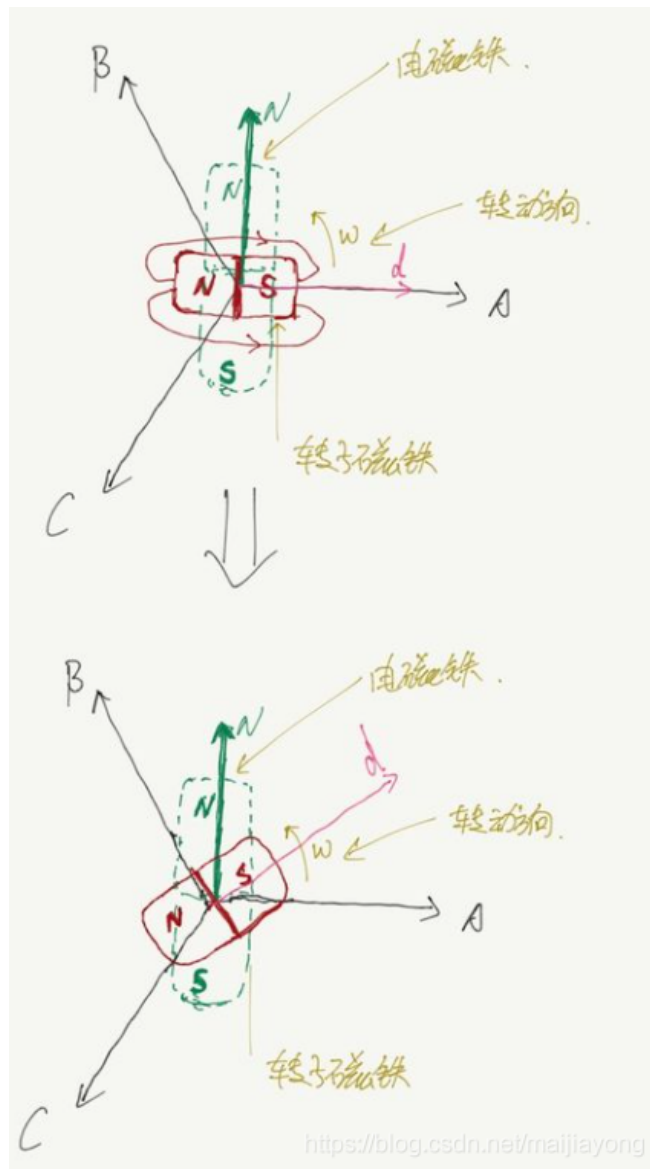
根据右手螺旋定则可知 三相线圈产生的磁场



产生的电压方向

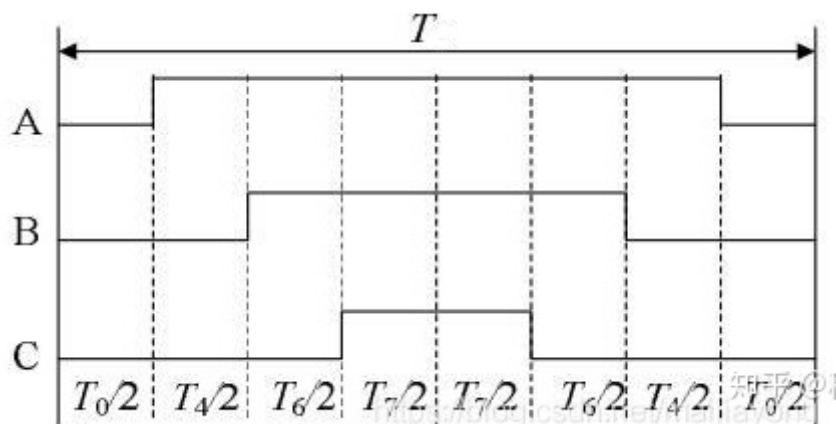


当电磁铁的方向和转子(永久磁铁)的方向呈90度的时候，力矩最大

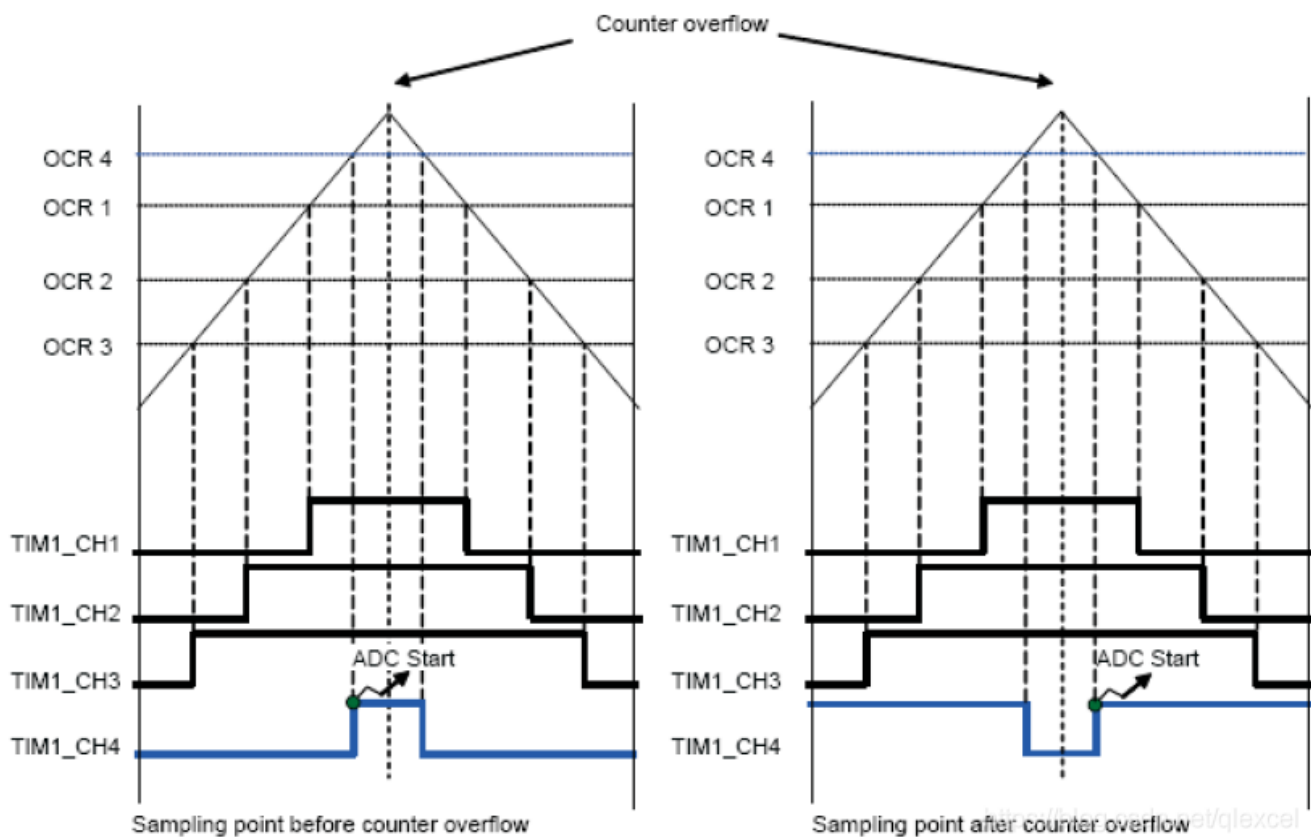


## 输出占空比

MOS管的频繁开断会影响MOS管的寿命，所以这里为了尽量减少MOS管的开关次数，因此目前设计出了7段式SVPWM的调制法，这也是普遍用的方法，如下：

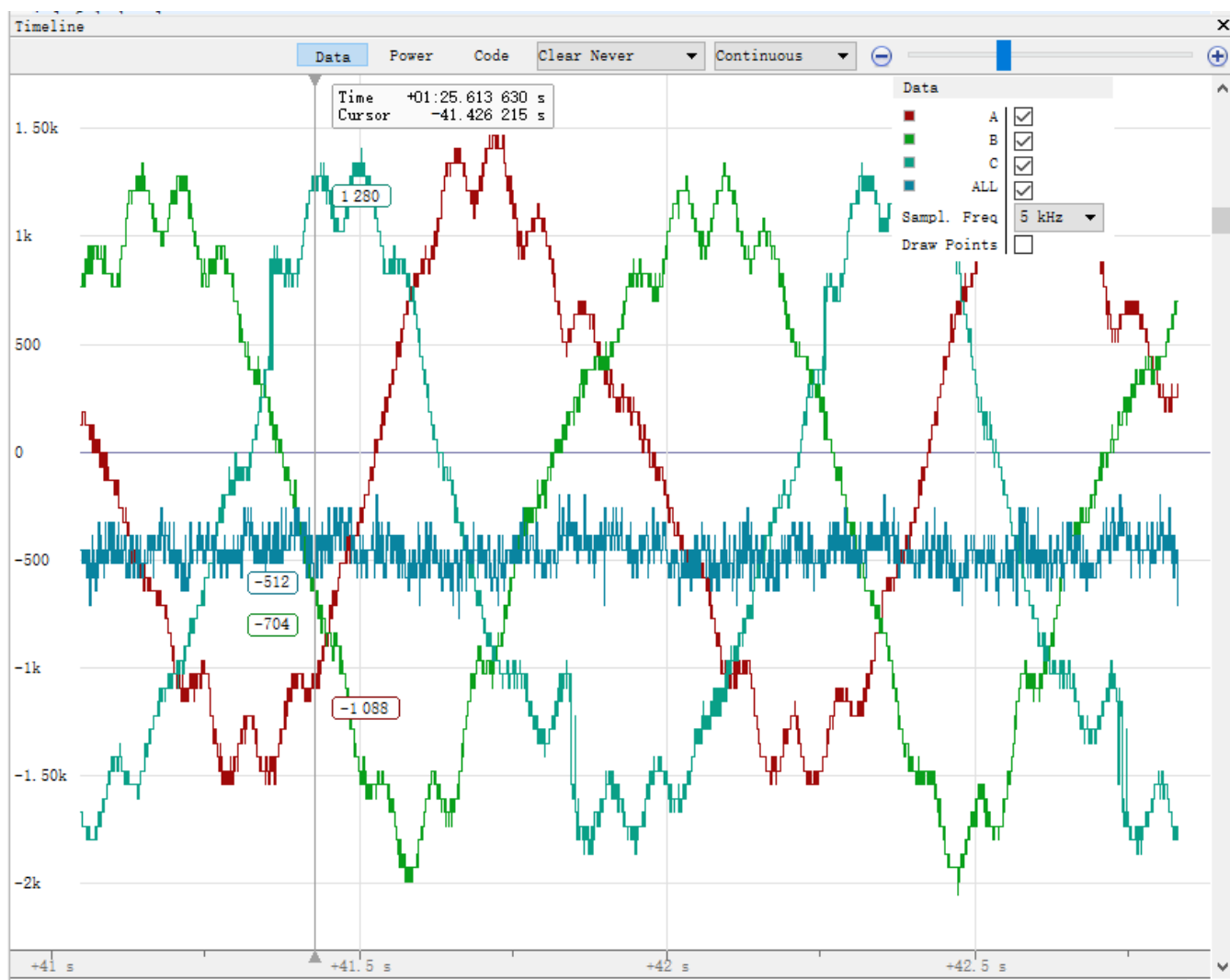


## 电流采集

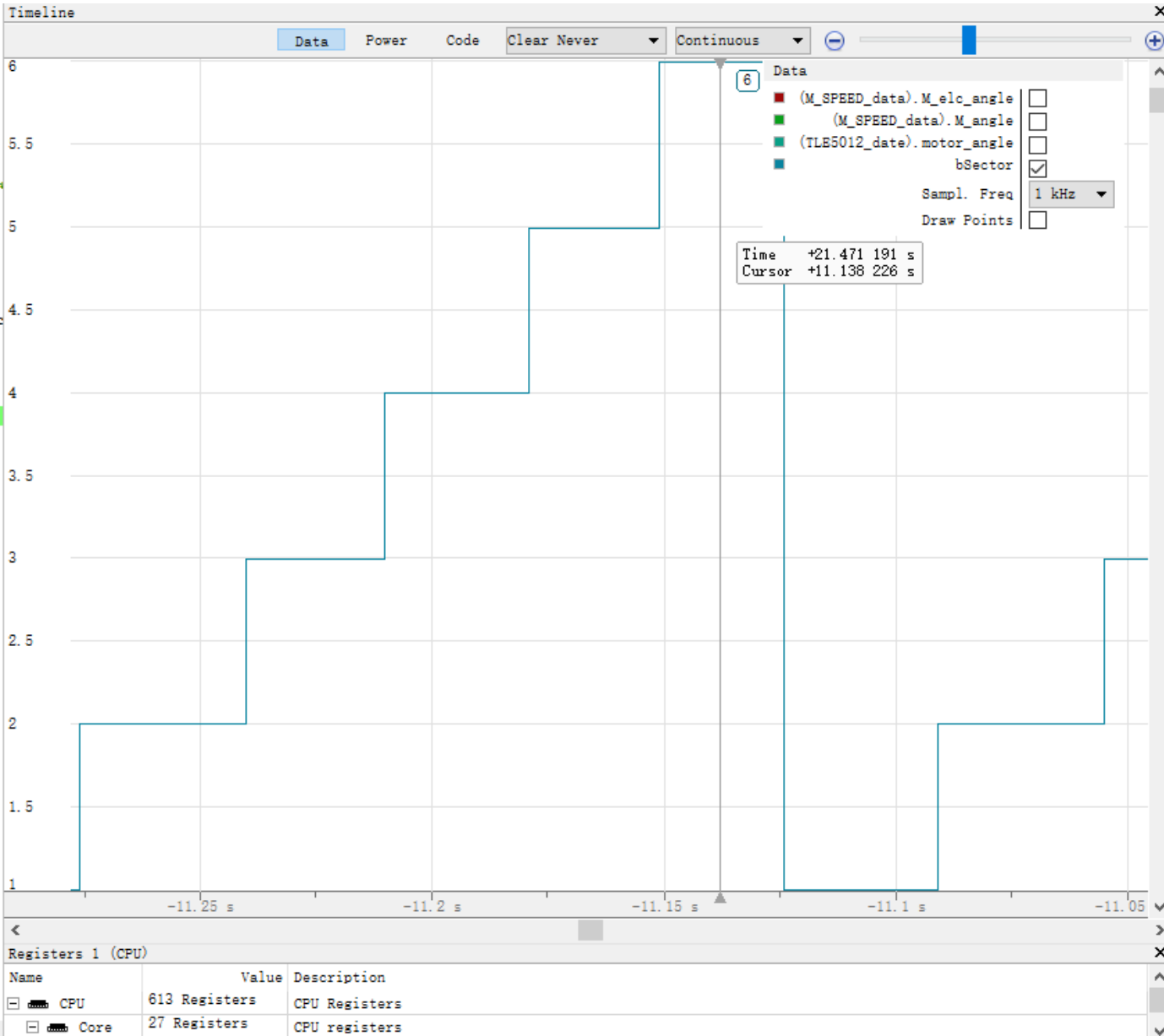


## 实验结果

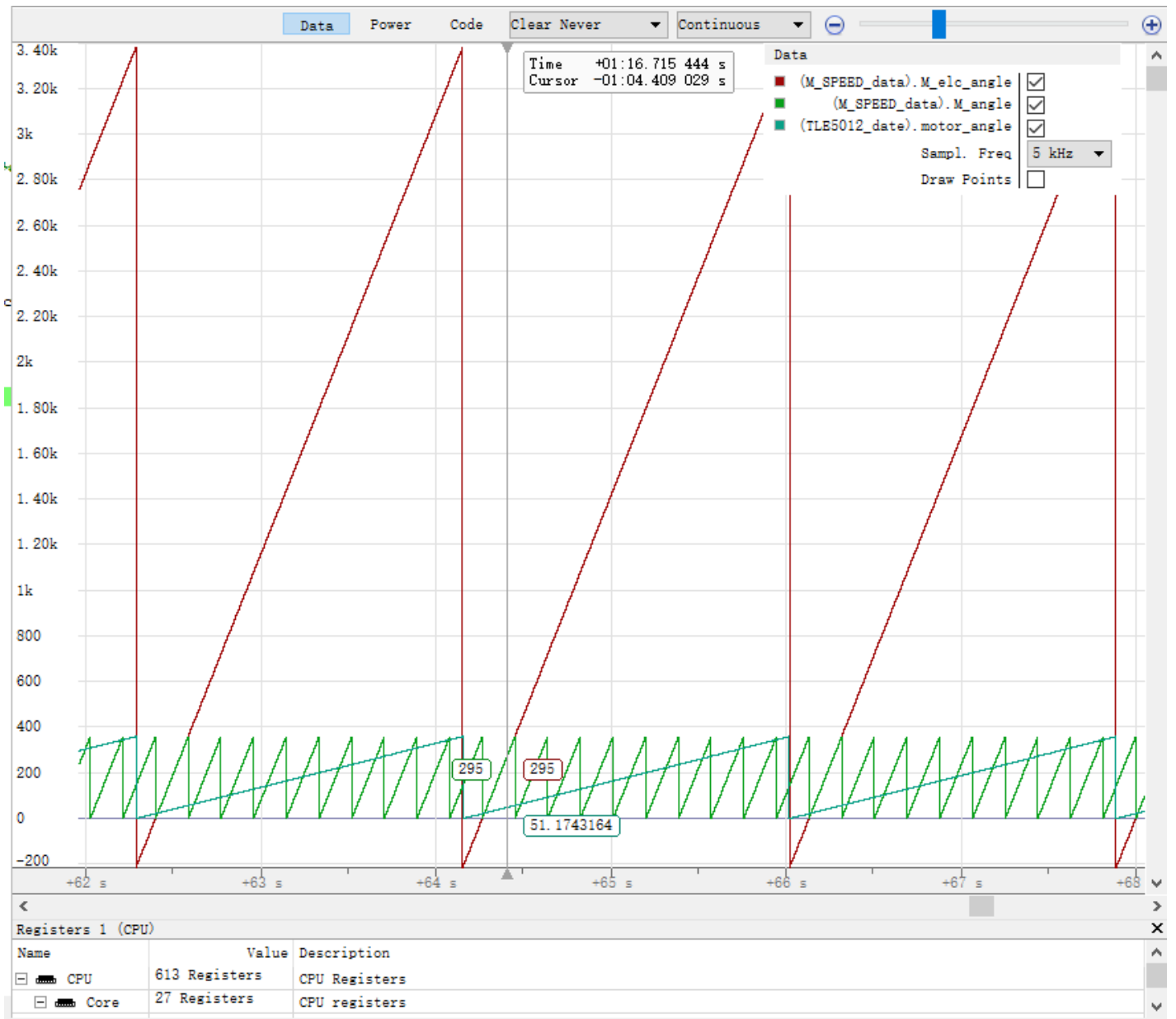
三相电路和总电源电流，根据霍尔定理： $ALL = A + B + C$ ，以下波形正确



电角度相位



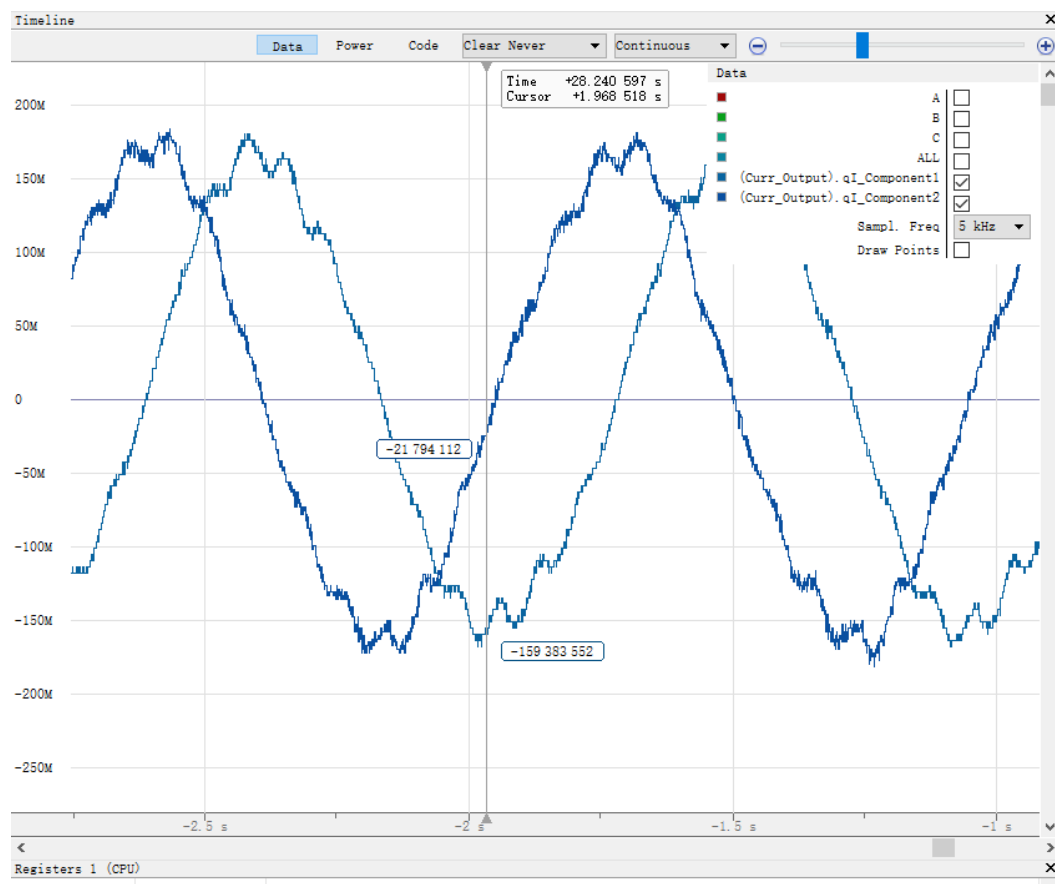
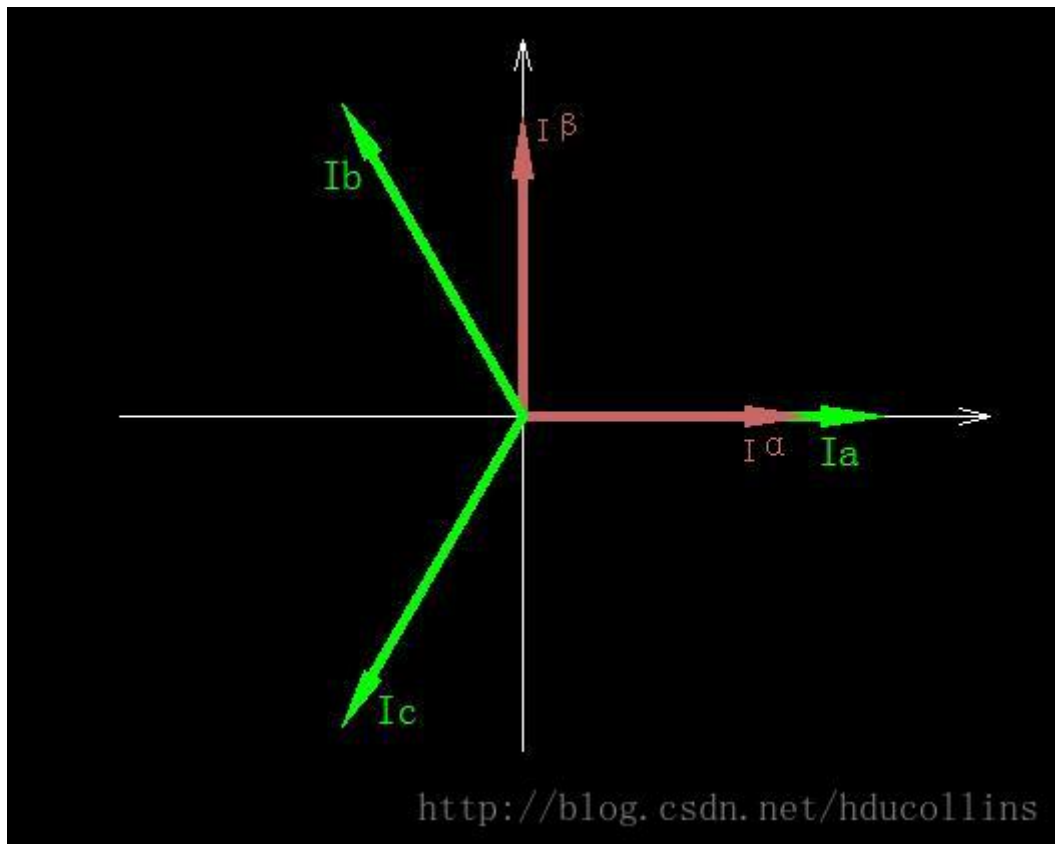
电角度和机械角度



## Clarke 变换

$$I_{\alpha} = I_a$$

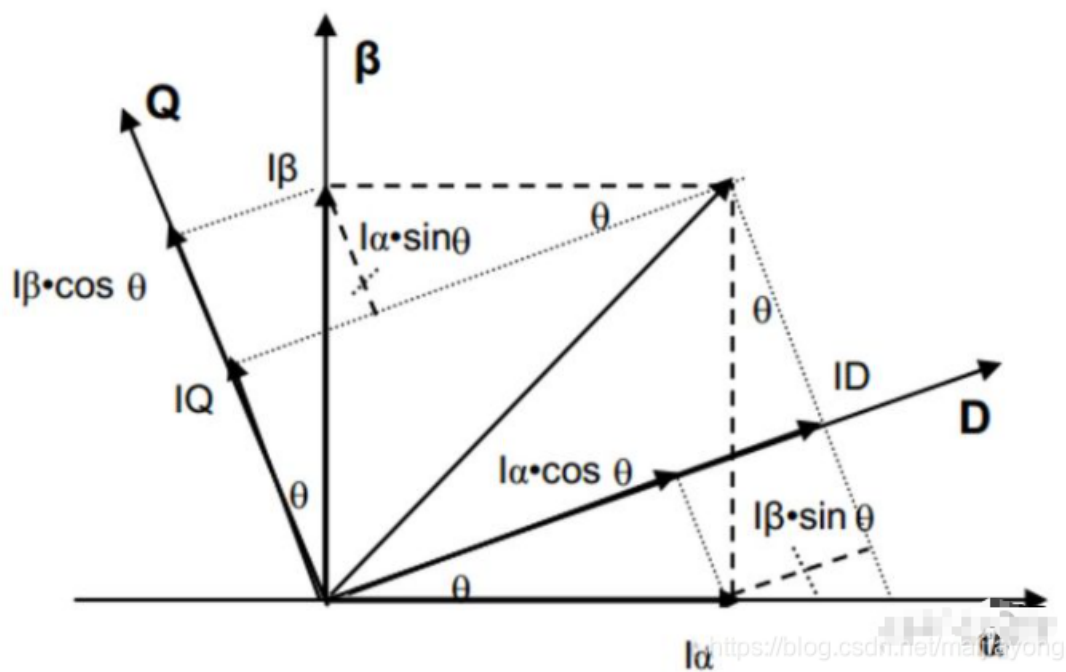
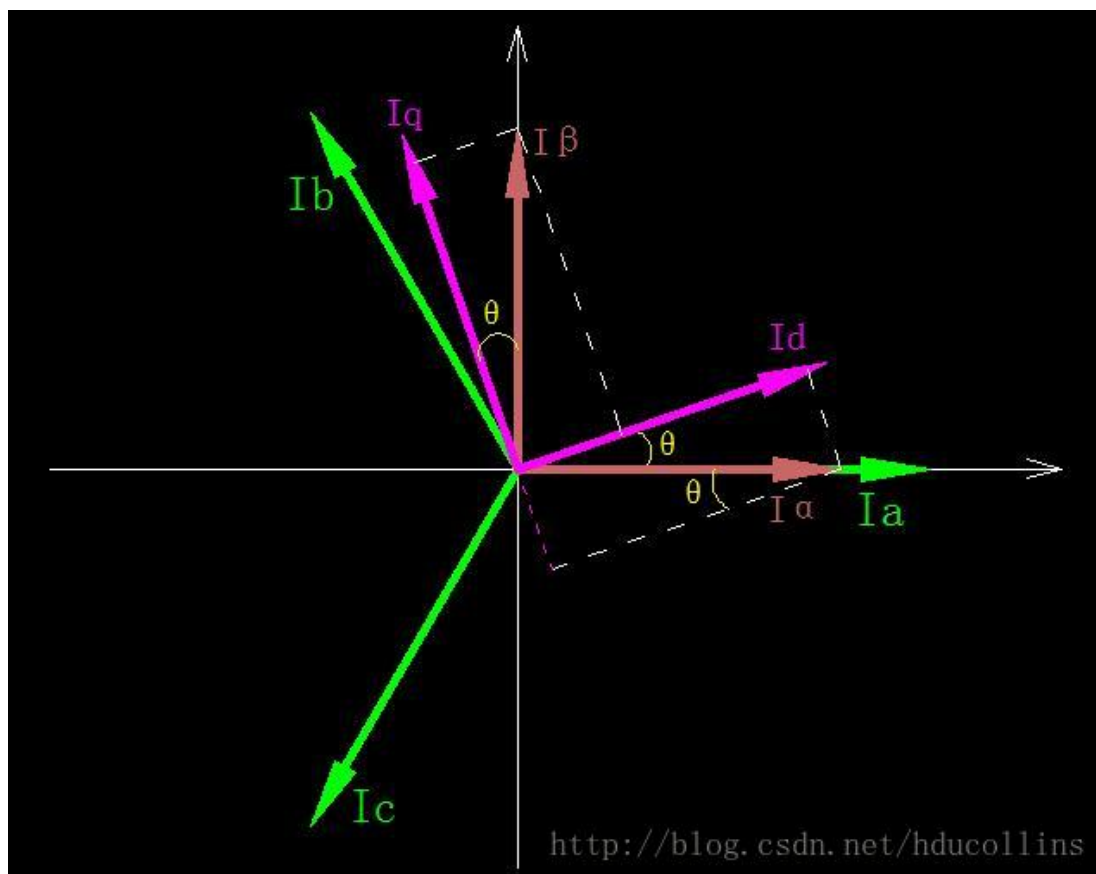
$$I_{\beta} = -\frac{1}{\sqrt{3}}I_a - \frac{2}{\sqrt{3}}I_b$$



## Park 变换

$$I_q = I_\alpha \cos(\theta) - I_\beta \sin(\theta)$$

$$I_d = I_\alpha \sin(\theta) + I_\beta \cos(\theta)$$



## PI 控制器

使用 PI 控制器对转矩和磁链进行调节，分别对  $I_q$  和  $I_d$  进行闭环控制。

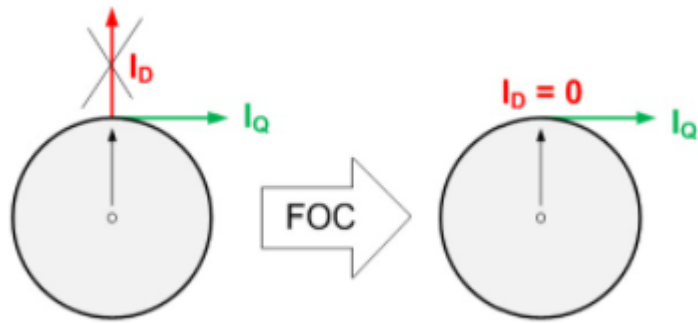
控制目标包括转矩参考  $P_{REF}$  和磁链参考  $D_{REF} = 0$ 。

公式（简单的 PI 控制器）：

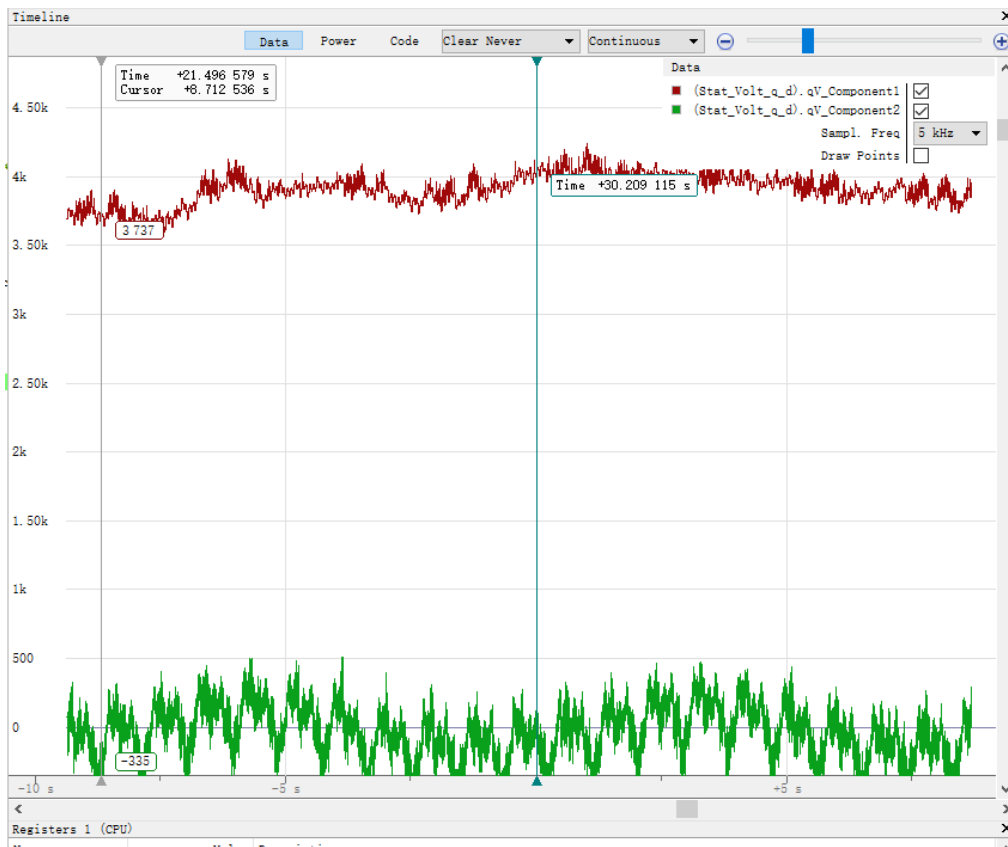
$$V_q = PID_q(Q_{REF} - I_q)$$

$$V_d = PID_d(D_{REF} - I_d)$$





FOC的控制目标 [sdn.net/majijayong](http://www.cnblogs.com/majijayong)



## 逆 Park 变换

将 dq 坐标系下的电压  $V_d$  和  $V_q$  逆变换回  $\alpha$ - $\beta$  坐标系，以便用于 SVPWM 信号生成。

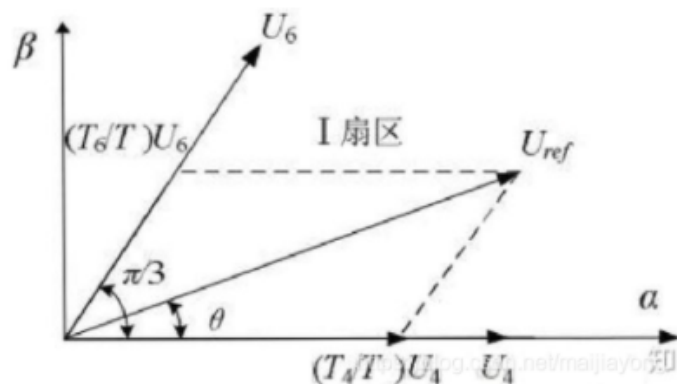
公式：

$$V_\alpha = V_q \cos(\theta) + V_d \sin(\theta)$$

$$V_\beta = -V_q \sin(\theta) + V_d \cos(\theta)$$

## SVPWM（空间矢量脉宽调制）

SVPWM 基于  $\alpha$ - $\beta$  坐标系的电压  $V_\alpha$  和  $V_\beta$  生成 PWM 信号来控制逆变器的开关。



由上图可以看出，通过U4和U6显然是能够合成Uref的，将要生成的Uref向量分别投影到U6和U4上，由正弦定理(\*\*各边和它所对角的正弦值的比相等\*\*)可以得出如下恒等式：

$$\frac{|U_{ref}|}{\sin \frac{2\pi}{3}} = \frac{|\frac{T_6}{T} \cdot U_6|}{\sin \theta} = \frac{|\frac{T_4}{T} \cdot U_4|}{\sin(\frac{\pi}{3} - \theta)}$$

$(T_6/T) \cdot U_6$ ：可以理解为要产生Uref这个电压，U6要产生多少电压

因为 $|U_6|=|U_4|=2U_{dc}/3$ ( $U_{dc}$ 是供给电压，由欧姆定律计算得出)，因此可以得出如下 $T_4$ 和 $T_6$ 的时间：

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

其中参数m表示为SVPWM的调制系数(调制比)：

$$m = \sqrt{3} \cdot \frac{|U_{ref}|}{U_{dc}}$$

上面已经描述过，因为我们需要根据需要控制幅值，因此需要零矢量的参与，因此零矢量的时间为

总时间T减去 $T_4$ 和 $T_6$ 的作用时间：

$$T_0 = T_7 = \frac{1}{2}(T - T_4 - T_6)$$

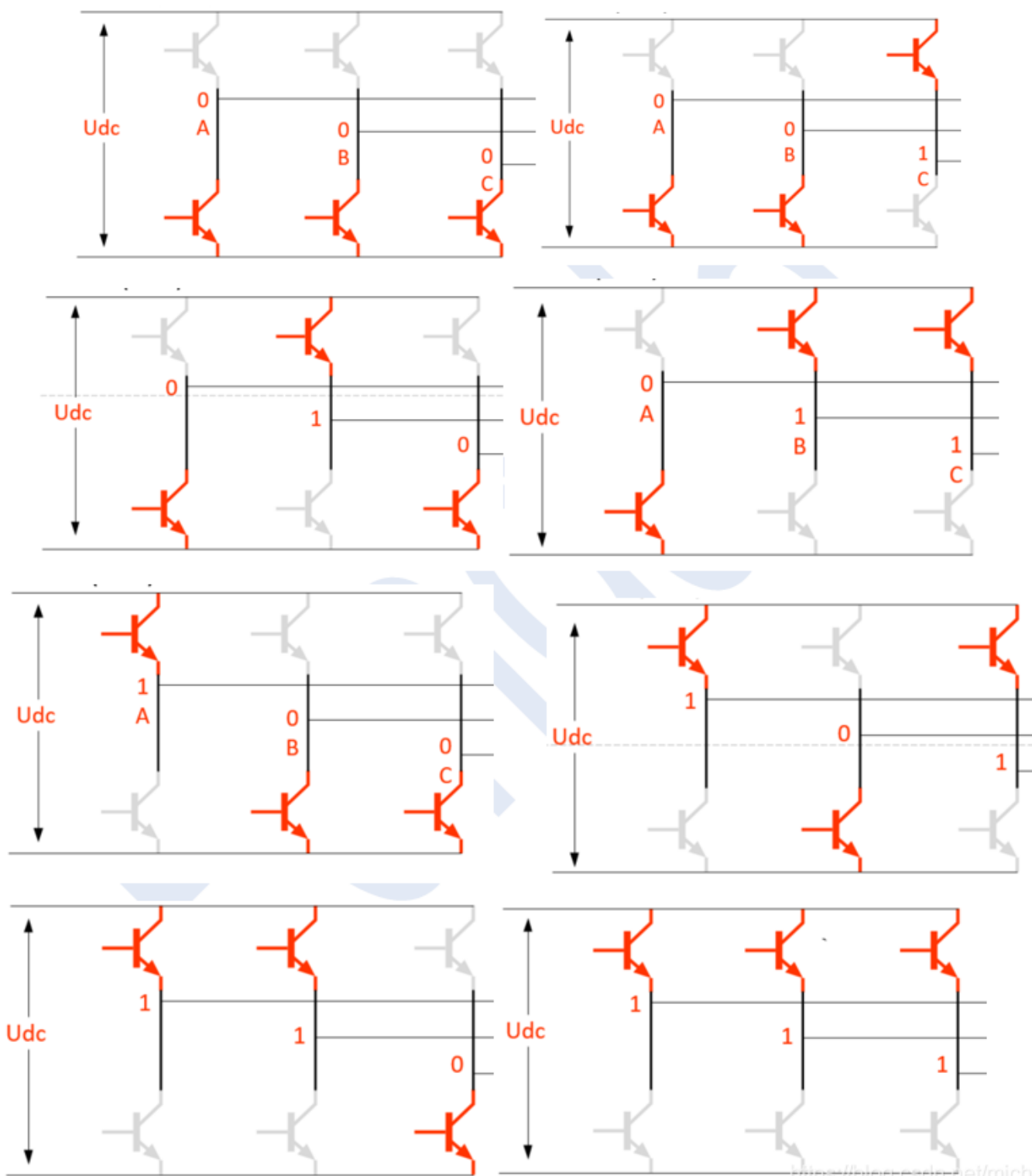
这里为什么是1/2，是因为我们要插入两个零矢量，所以时间要平分给两个零矢量，那么为什么要插入两个零矢量呢？只用一个零矢量可以吗？

理论上是可行的，但是会对MOS管的开断会产生较大的影响，影响MOS管的寿命，所以我们希望尽量减少MOS管的开关次数，因此只插入两个零矢量。

扇区 I	$T_4 = \frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}(\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{U_\beta}{2}) = KU_2$ $T_6 = \frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}U_\beta = KU_1$ $T_7 = T_0 = (T_s - T_4 - T_6)/2$	扇区 II	$T_6 = \frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}(\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha + \frac{U_\beta}{2}) = -KU_3$ $T_2 = -\frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}(\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{U_\beta}{2}) = -KU_2$ $T_7 = T_0 = (T_s - T_2 - T_6)/2$
扇区 III	$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}U_\beta = KU_1$ $T_3 = \frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}(-\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{U_\beta}{2}) = KU_3$ $T_7 = T_0 = (T_s - T_2 - T_3)/2$	扇区 IV	$T_3 = \frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}(-\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha + \frac{U_\beta}{2}) = -KU_2$ $T_1 = -\frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}U_\beta = -KU_1$ $T_7 = T_0 = (T_s - T_1 - T_3)/2$
扇区 V	$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}(-\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{U_\beta}{2}) = KU_3$ $T_5 = \frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}(\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{U_\beta}{2}) = KU_2$ $T_7 = T_0 = (T_s - T_1 - T_5)/2$	扇区 VI	$T_5 = -\frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}U_\beta = -KU_1$ $T_4 = \frac{\sqrt{3}T_s}{U_{dc}}(\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha + \frac{U_\beta}{2}) = -KU_3$ $T_7 = T_0 = (T_s - T_4 - T_5)/2$

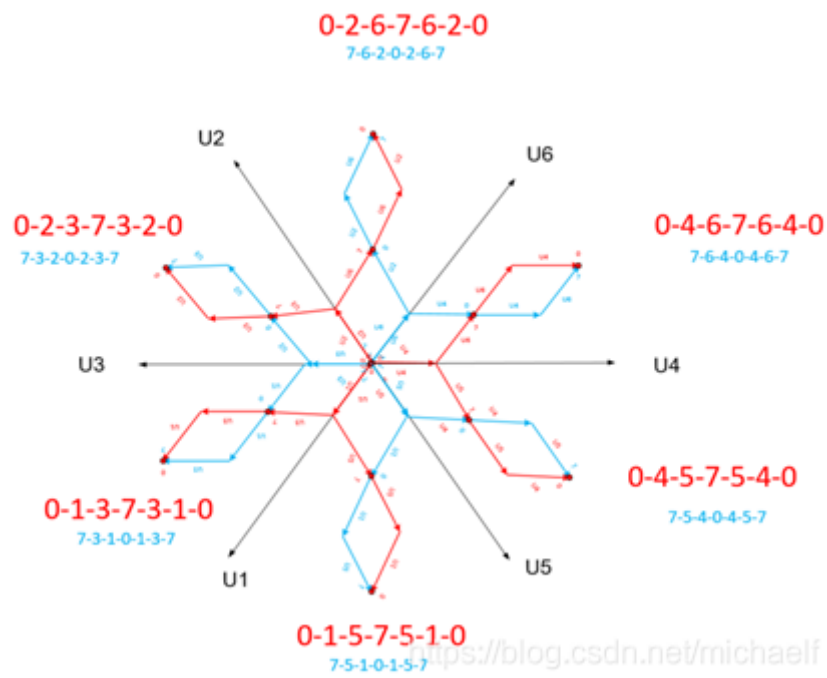
表 2-2  $U_{REF}$  所在的位置和开关切换顺序对照序

$U_{REF}$ 所在的位置	开关切换顺序
I 区 ( $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ )	...0-4-6-7-7-6-4-0...
II 区 ( $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ )	...0-2-6-7-7-6-2-0...
III 区 ( $120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ )	...0-2-3-7-7-3-2-0...
IV 区 ( $180^\circ \leq \theta \leq 240^\circ$ )	...0-1-3-7-7-3-1-0...
V 区 ( $240^\circ \leq \theta \leq 300^\circ$ )	...0-1-5-7-7-5-1-0...
VI 区 ( $300^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ )	...0-4-5-7-7-5-4-0...

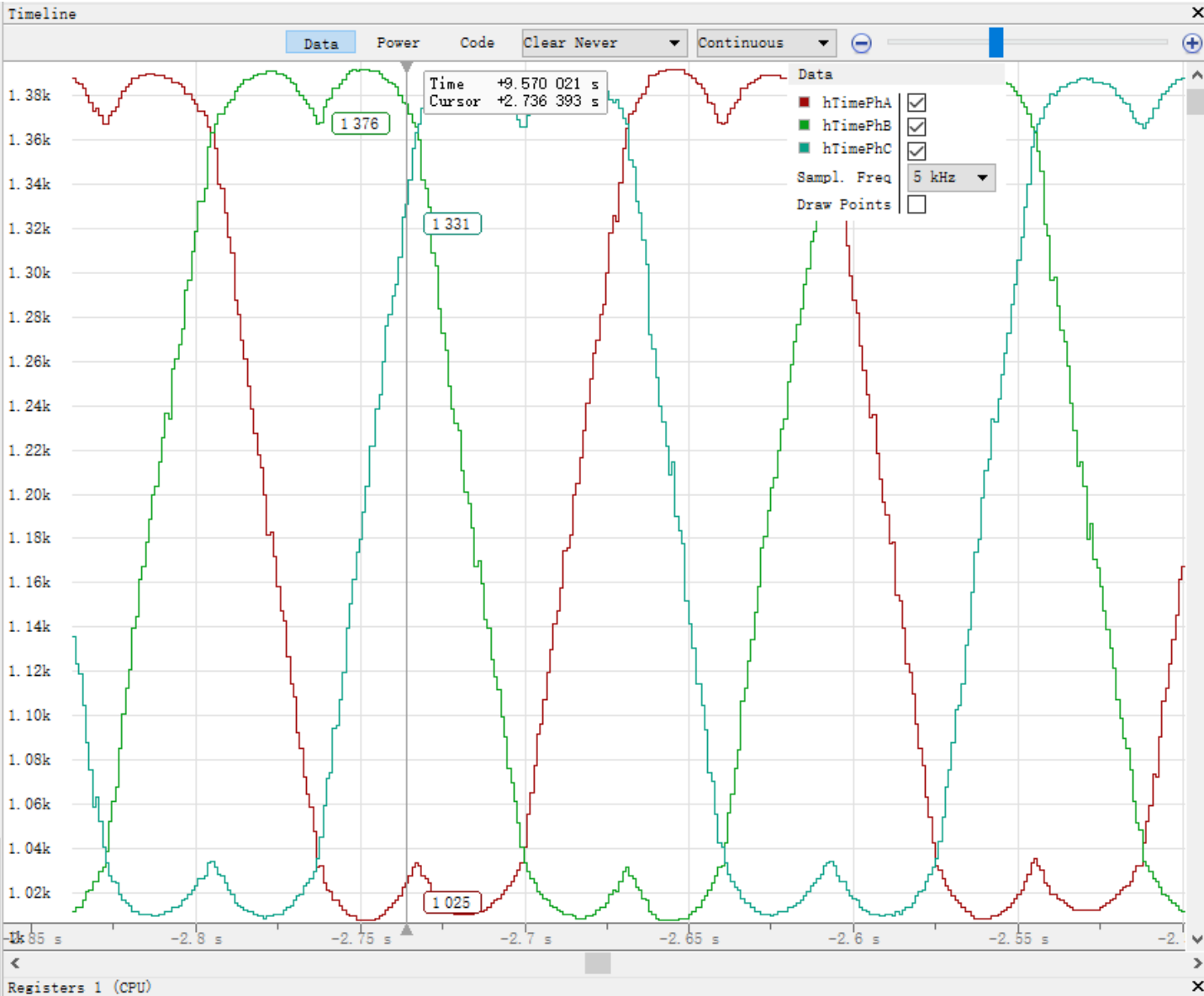


<https://blog.csdn.net/michaelf>

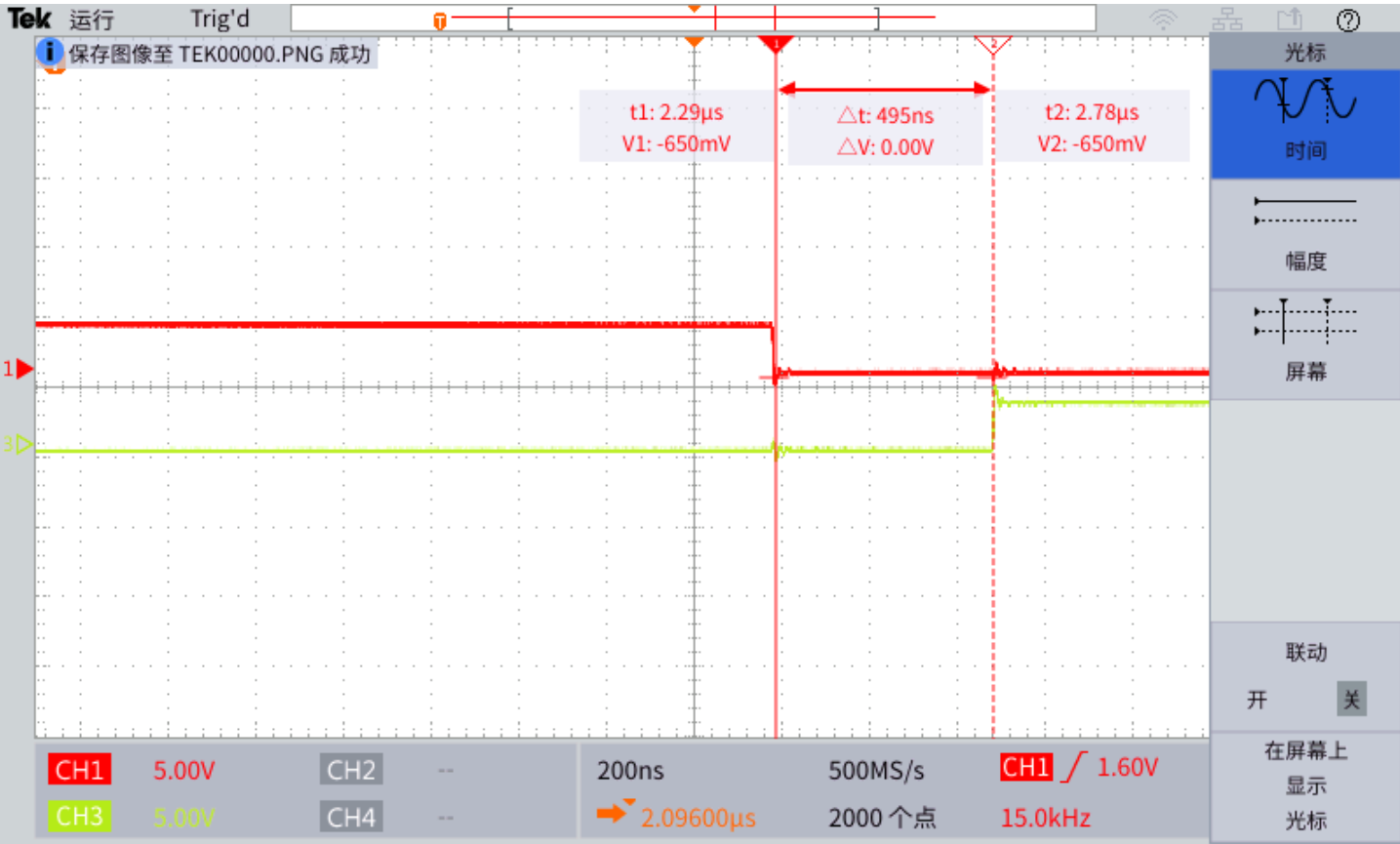
mos开关



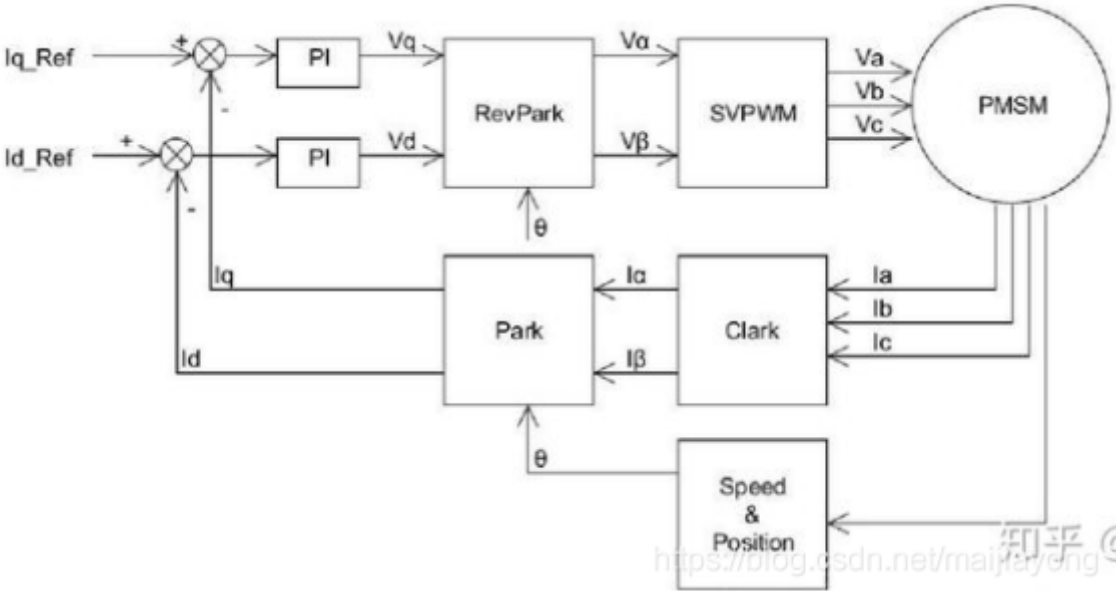
# 占空比输出马鞍波



mos死区



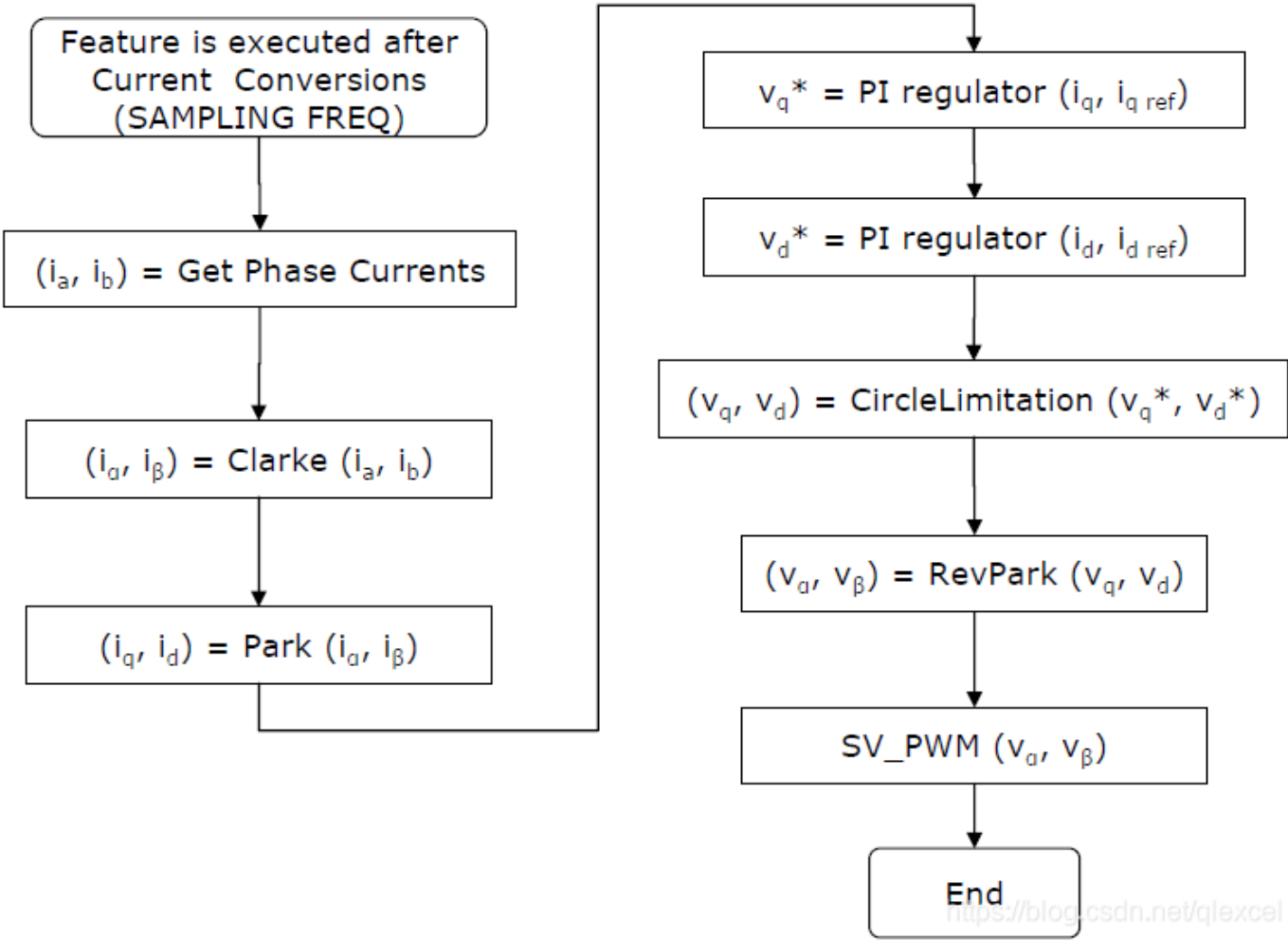
控制框图



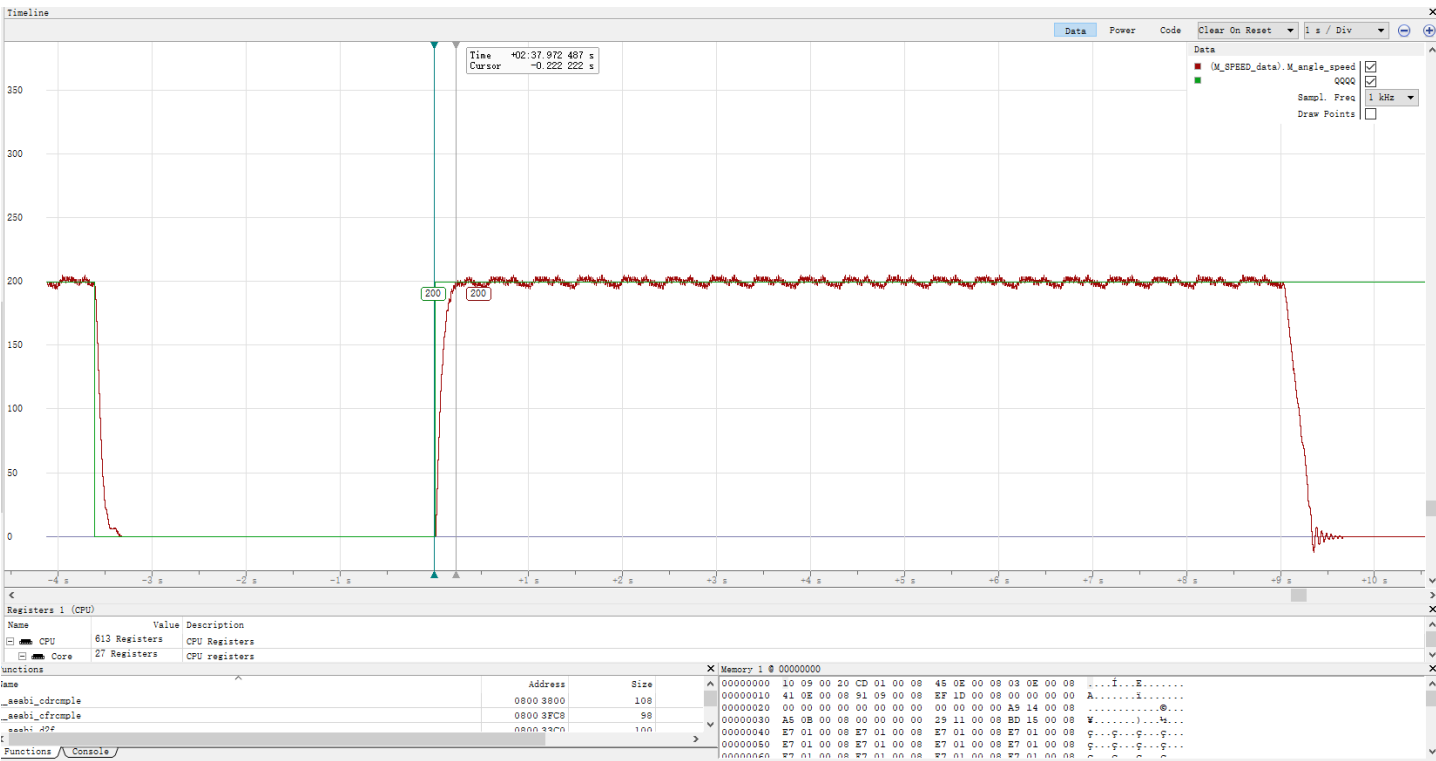
测功机测试

	A	B	C	D
1	Performance Curve Report 性能曲线报告			
2	Project no. 项目编号		Report no. 报告编号	
3	Motor model 马达型号	M153	SOR no. 样板要求单编号	
4	Test motor no. 测试马达编号		Report date. 报告日期	2022/3/4 10:14
5				
6				
7	Test Result 测试结果			
8				
9	V <sub>pow</sub> (V)	C <sub>pow</sub> (A)	P <sub>pow</sub> (W)	Speed (rpm)
10	26.0	42.0	930.0	260
11	23.4	37.8	837.0	234
12	20.8	33.6	744.0	208
13	18.2	29.4	651.0	182
14	15.6	25.2	558.0	156
15	13.0	21.0	465.0	130
16	10.4	16.8	372.0	104
17	7.8	12.6	279.0	78
18	5.2	8.4	186.0	52
19	2.6	4.2	93.0	26
20	0.0	0.0	0.0	0
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28				
29				
30				
31				
32				
33	Tested by 测试人 :黄锡标	Date 日期 :2022/3/4 10:14:54		
34				
35	Signature 签署 :			
36				
37	Approved by 批准人 :	Date 日期 :		
38				
39	Signature 签署 :			
40				

FOC\_Model (MC\_FOC\_DRIVE.c)

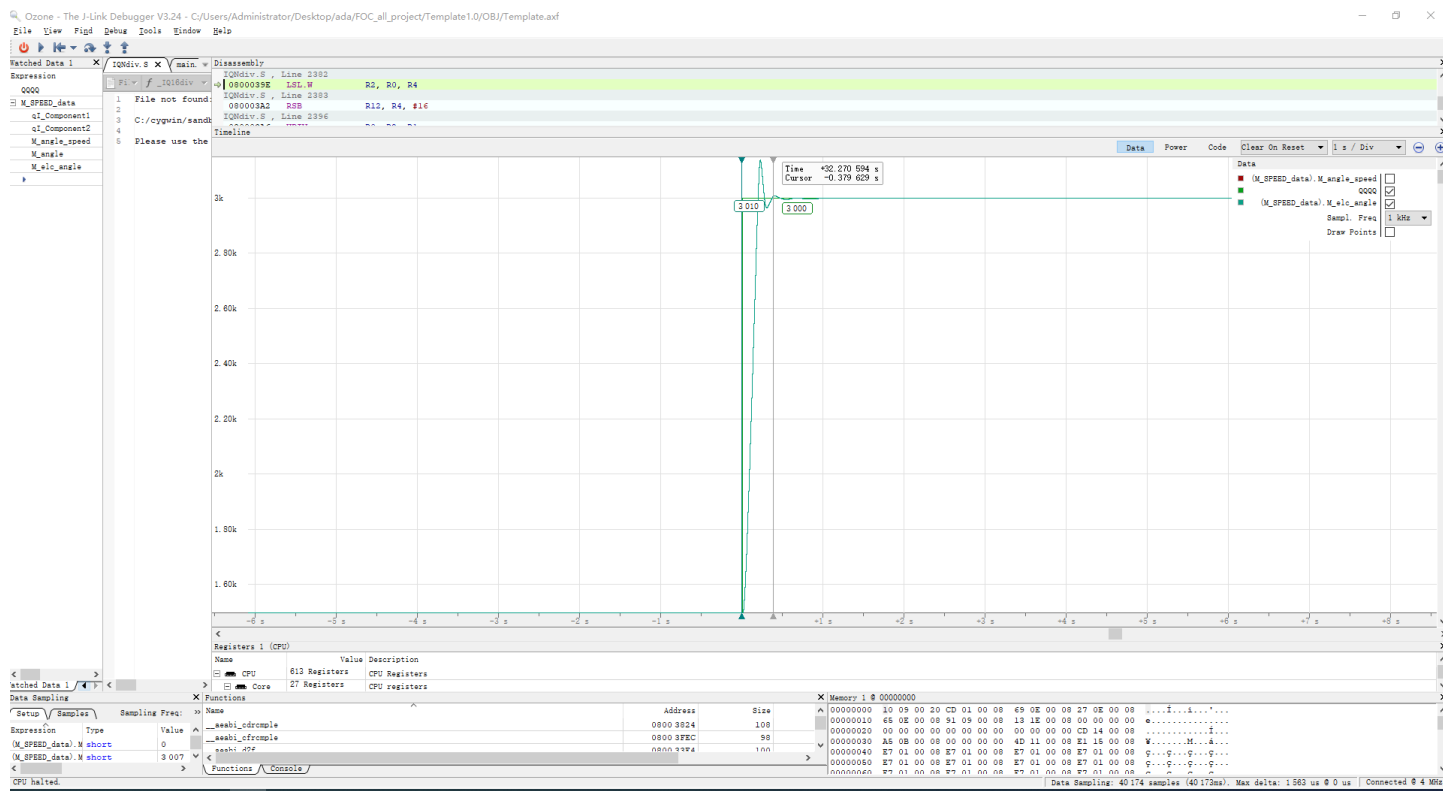


速度环



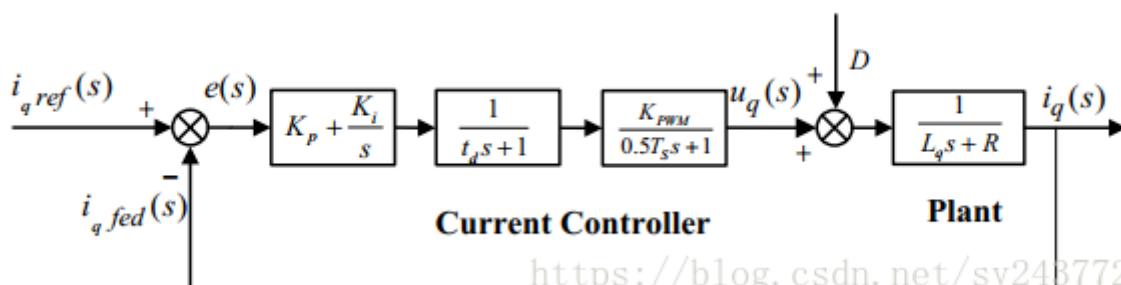
角度环





## PID参数整定

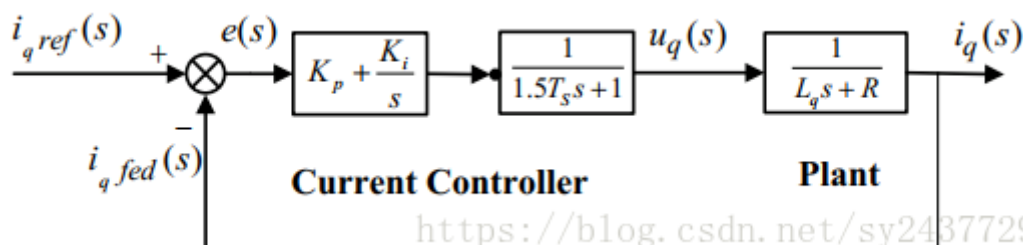
电流内环流程图，电流内环的输入为电流信号的误差值，输出为参考电压，控制电动机转矩。第一个环节是PI调节器，第二个环节是延迟环节，第三个环节是PWM环节。



其中电机传递函数可通过近似处理为

$$G(s) = \frac{i_q}{u_q} = \frac{1}{L_q s + R}$$

在开关频率为15KHZ时，由于开关频率较高，就可以把延迟环节和PWM环节合并处理，记  $t_d = T_s$ ，并将  $K_{pwm}$  看成 1 来处理，可得以下流程图：



$$G(S)_{pi} = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p(\tau_i s + 1)}{\tau_i s}$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i}$$

$$G_{open} = \frac{K_p(\tau_i s + 1)}{\tau_i s} \frac{1}{R(\frac{L_q}{R} + 1)} \frac{1}{1.5T_s + 1} = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

与典型一型环节对比，（实际典型一型环节是一个二阶系统）

$$G_s = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

把两个公式位置对应，算出来典型一型环节的参数，即对K和T进行求解，

$$K = \frac{K_p}{R\tau_i} = \frac{K_p}{R\frac{L_q}{R}} = \frac{K_P}{L_q} \quad (\tau_i = \frac{L_q}{R})$$

$$T = 1.5T_s$$

一阶系统按 **KT = 0.5**

最终可以得到[电流环PI调节器](#)参数：

$$K_{pq} = \frac{L_q}{3T_s}$$

$$K_{iq} = \frac{K_{pq}}{\tau_i} = \frac{L_q}{3T_s} \frac{R}{L_q} = \frac{R}{3T_s}$$

将其拓展到d轴

$$K_{pd} = \frac{L_d}{3T_s}$$

$$K_{id} = \frac{K_{pd}}{\tau_i} = \frac{L_d}{3T_s} \frac{R}{L_d} = \frac{R}{3T_s}$$

