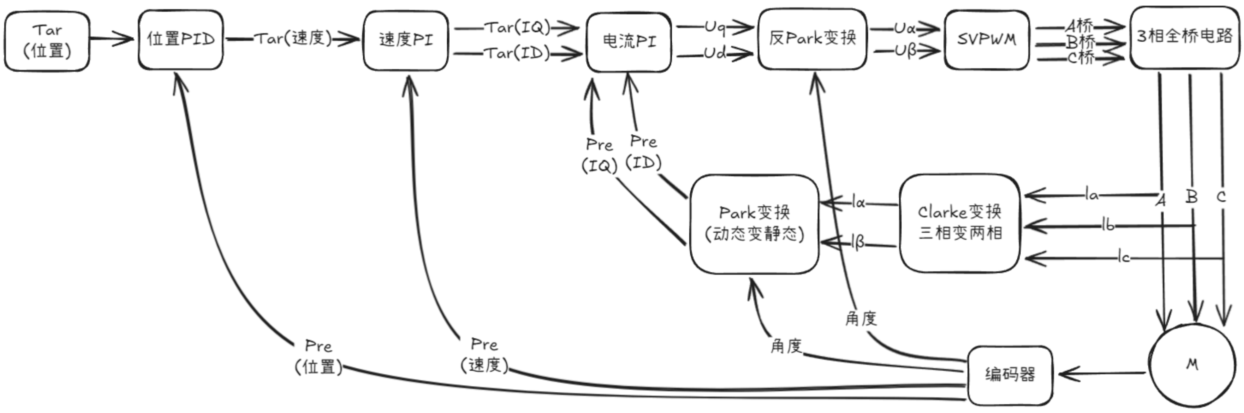
目标：三环嵌套（电流环、速度环、位置环）

FOC控制原理



有感FOC步骤框图

过程：

1.对电机三相电流进行采样得到I_a、I_b、I_c

2.将I_a、I_b、I_c经过Clark变换得到I_α、I_β

3.将I_α、I_β经过Park变换得到I_q、I_d

4.计算I_q、I_d和其设定值$I_{q-}ref$，$I_{d-}ref$的误差

5.将上述误差输入两个PID（只用到PI）控制器，得到输出的控制电压U_q，U_d

6.将U_q，U_d进行反Park变换得到U_α、U_β

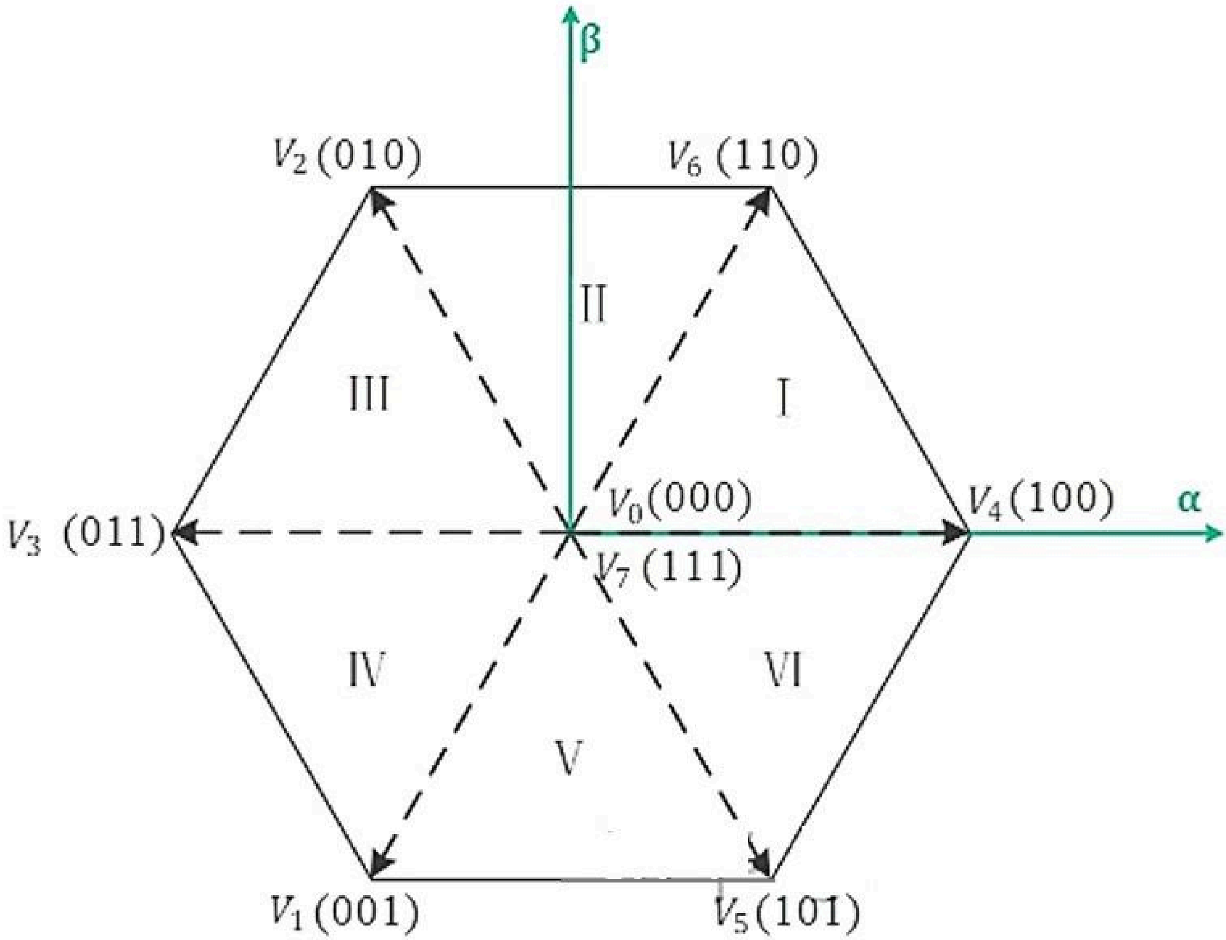
7.用U_α、U_β合成电压空间矢量，输入SVPWM模块进行调制，输出该时刻三个半桥的状态编码值

8.按照前面输出的编码值控制三相逆变器的MOS管开关，驱动电机

9。循环上述步骤

原理：（无刷直流电机可分为定子和转子）

1.六步换相



2.克拉克变换及其逆变换（降维解耦）

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

克拉克逆变换可得

$$\begin{cases} I_a = I_\alpha \\ I_b = \frac{\sqrt{3}I_\beta - I_\alpha}{2} \\ I_c = \frac{-\sqrt{3}I_\beta - I_\alpha}{2} \end{cases}$$

3.帕克变换（θ是电角度，由编码器实时提供的）

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta \\ -sin\theta & cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix}$$

帕克逆变换

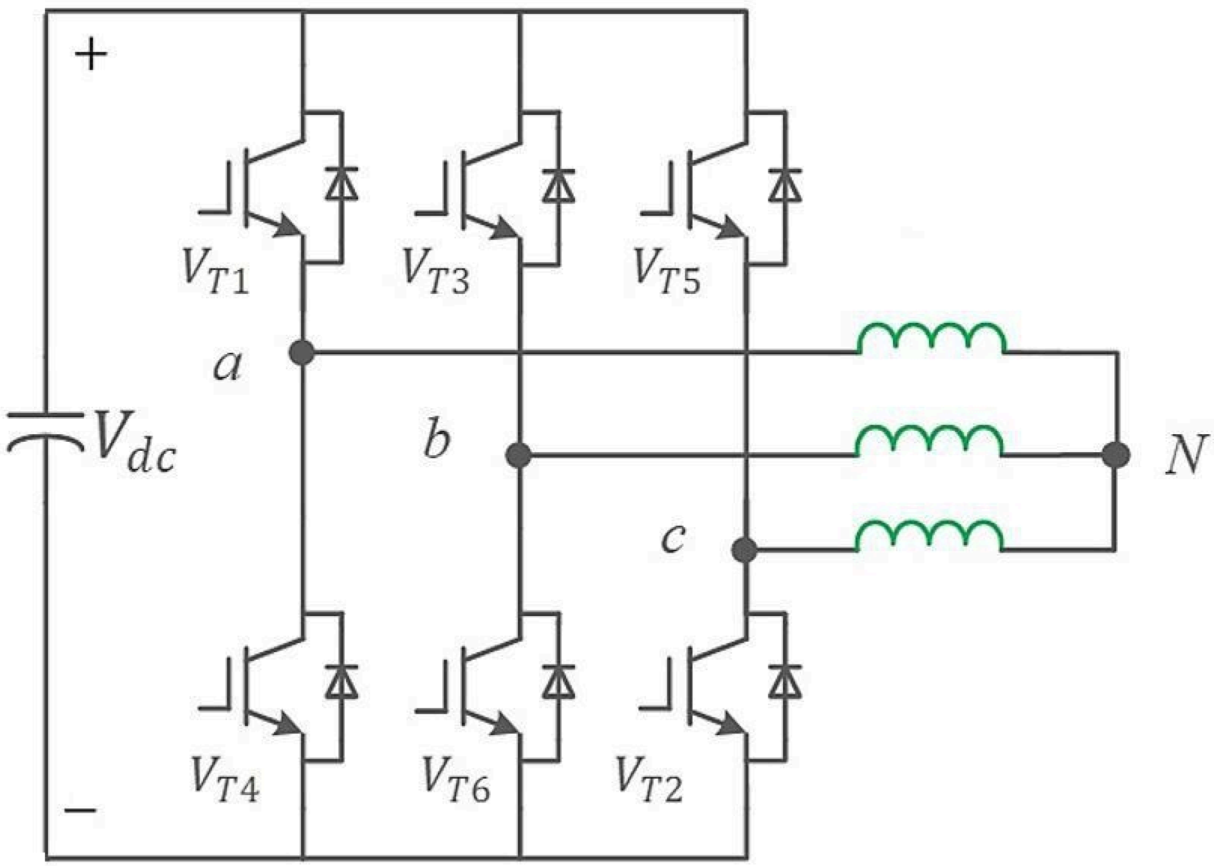
$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta \\ -sin\theta & cos\theta \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & -sin\theta \\ sin\theta & cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}$$

4.电角度 = 机械角度 * 极对数

则三相电压空间矢量相加的合成空间矢量$U(t)$就可以表示为

$U(t)=K[U_A(t)+U_B(t)e^{\frac{j2\pi}{3}}+U_C(t)e^{\frac{j4\pi}{3}}]=K\frac{3\sqrt{2}}{2}U_m e^{j2\pi ft}$

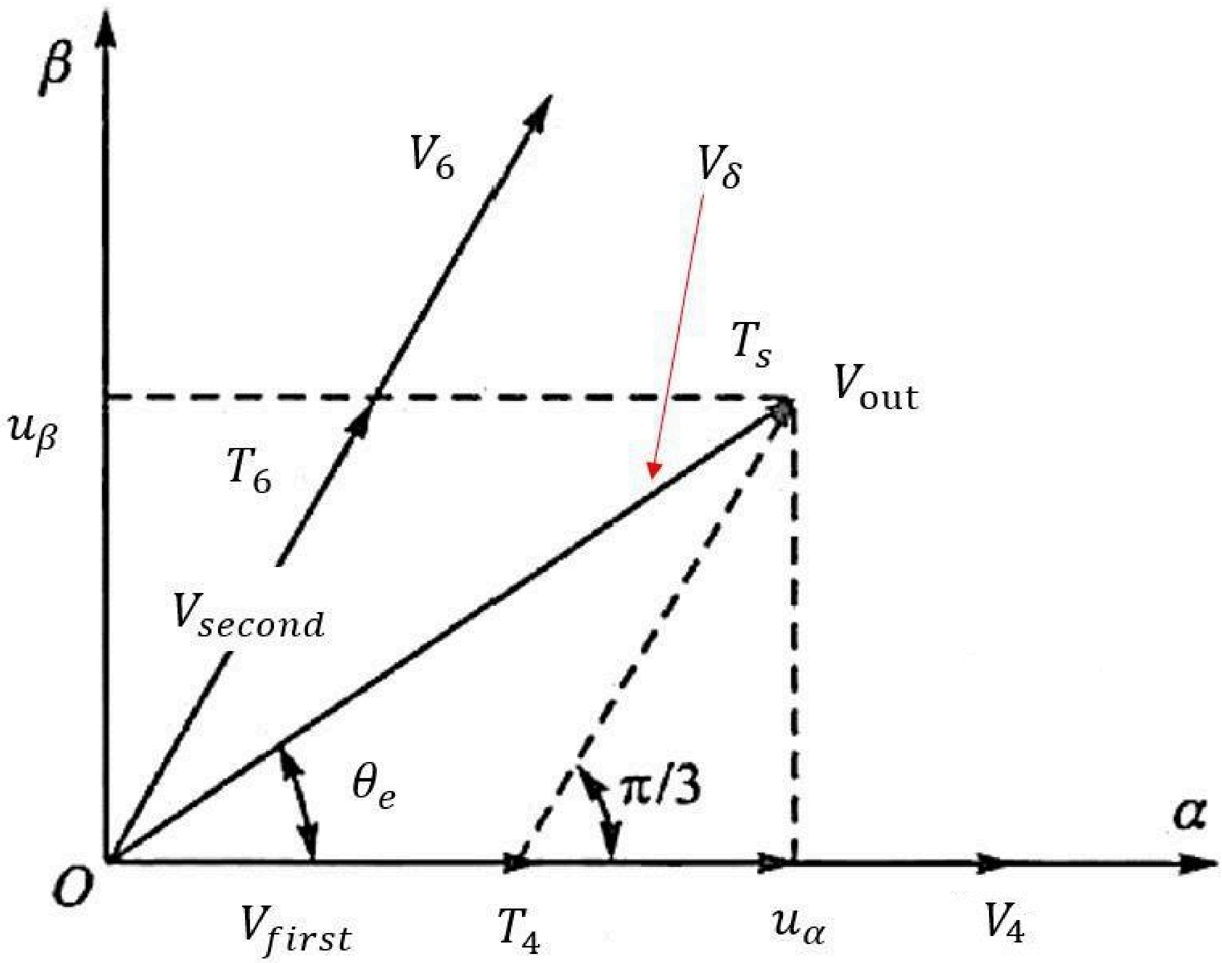
可见$U(t)$是一个旋转空间矢量，其幅值不变，为相电压峰值的1.5倍。



S_a	S_b	S_c	**状态V**	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}
0	0	0	V_0	0	0	0
0	0	1	V_1	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$
0	1	0	V_2	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$
0	1	1	V_3	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$
1	0	0	V_4	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$
1	0	1	V_5	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$
1	1	0	V_6	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$
1	1	1	V_7	0	0	0

$$
\begin{cases}
V_0 = V_7 = 0 \\
V_1 = \frac{2}{3}(-\frac{1}{3}V_{dc} - \frac{1}{3}V_{dc}e^{\frac{j2\pi}{3}} + \frac{2}{3}V_{dc}e^{\frac{j4\pi}{3}}) = \frac{2}{3}V_{dc}e^{\frac{j4\pi}{3}} \\
V_2 = \frac{2}{3}(-\frac{1}{3}V_{dc} + \frac{2}{3}V_{dc}e^{\frac{j2\pi}{3}} - \frac{1}{3}V_{dc}e^{\frac{j4\pi}{3}}) = \frac{2}{3}V_{dc}e^{\frac{j2\pi}{3}} \\
V_3 = \frac{2}{3}(-\frac{2}{3}V_{dc} + \frac{1}{3}V_{dc}e^{\frac{j2\pi}{3}} + \frac{1}{3}V_{dc}e^{\frac{j4\pi}{3}}) = -\frac{2}{3}V_{dc} \\
V_4 = \frac{2}{3}(\frac{2}{3}V_{dc} - \frac{1}{3}V_{dc}e^{\frac{j2\pi}{3}} - \frac{1}{3}V_{dc}e^{\frac{j4\pi}{3}}) = \frac{2}{3}V_{dc} \\
V_5 = \frac{2}{3}(\frac{1}{3}V_{dc} - \frac{2}{3}V_{dc}e^{\frac{j2\pi}{3}} + \frac{1}{3}V_{dc}e^{\frac{j4\pi}{3}}) = \frac{2}{3}V_{dc}e^{\frac{j5\pi}{3}} \\
V_6 = \frac{2}{3}(\frac{1}{3}V_{dc} + \frac{1}{3}V_{dc}e^{\frac{j2\pi}{3}} - \frac{2}{3}V_{dc}e^{\frac{j4\pi}{3}}) = \frac{2}{3}V_{dc}e^{\frac{j\pi}{3}}
\end{cases}
$$

可以分成一组零向量V_0、V_7和一组非零向量V_1、V_2、V_3、V_4、V_5、V_6，将这六个非零向量的顶点连接起来，可以分成6个扇形区域。
在T_s周期内，可以分成多个T_i，即$T_s = \sum_{i=1}^{n} T_i$，其中T_s是无穷小项



在扇形分区1：

$$
\begin{cases}
T_sV_{out} = T_4V_4 + T_6V_6 + T_0V_0 \\
T_s = T_0 + T_4 + T_6 \\
V_{first} = \frac{T_4}{T_s}V_4 \\
V_{second} = \frac{T_6}{T_s}V_6 \\
\frac{|V_{out}|}{sin(\frac{\pi}{3})} = \frac{|V_{first}|}{sin(\frac{\pi}{3}-\theta)} = \frac{|V_{second}|}{sin(\theta)} \\
V_4 = \frac{2}{3}V_{dc} \\
V_6 = \frac{2}{3}V_{dc}e^{\frac{j\pi}{3}}
\end{cases}
$$

可以得到

$$\begin{cases} |V_4| = |V_6| = \frac{2}{3}V_{dc} \\ |V_{out}| = u_m \\ T_4 = \sqrt{3}\frac{u_m}{V_{dc}}T_s sin(\frac{\pi}{3} - \theta) \\ T_6 = \sqrt{3}\frac{u_m}{V_{dc}}T_s sin(\theta) \\ T_0 = T_7 = \frac{1}{2}(T_s - T_4 - T_6) \end{cases}$$

已经在一个开关周期T_s是不够的，还需要知道这个T_i是怎么分配的，可以按照一个原则来分配：在合成一次参考电压时（一个开关周期T_s内），开关动作次数最少。这样逆变器上开关的损耗最小。

扇形位置	**开关顺序**	
$I(0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ)$	0→4→6→7→7→6→4→0	
$II(60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ)$	0→2→6→7→7→6→2→0	
$III(120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ)$	0→2→3→7→7→3→2→0	
$IV(180^\circ \leq \theta \leq 240^\circ)$	0→1→3→7→7→3→1→0	
$V(240^\circ \leq \theta \leq 300^\circ)$	0→1→5→7→7→5→1→0	
$VI(300^\circ \leq \theta \leq 360^\circ)$	0→4→5→7→7→5→4→0	

扇区判定

扇区	$-\frac{\sqrt{3}}{2}\alpha - \frac{1}{2}\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{2}\alpha - \frac{1}{2}\beta$	u_β	N
I	0	1	1	3
II	0	0	1	1
III	1	0	1	5
IV	1	0	0	4
V	1	1	0	6
VI	0	1	0	2

根据上图可以得到以U_α、U_β为自变量：

$$\begin{cases} u_\alpha = \frac{T_4}{T_s}|V_4| + \frac{T_6}{T_s}|V_6|cos(\frac{\pi}{3}) \\ u_\beta = \frac{T_6}{T_s}|V_6|sin(\frac{\pi}{3}) \end{cases}$$

可以推导到

$$\begin{cases} T_4 = \frac{\sqrt{3}T_s}{2V_{dc}}(\sqrt{3}u_\alpha - u_\beta) \\ T_6 = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}}u_\beta \end{cases}$$

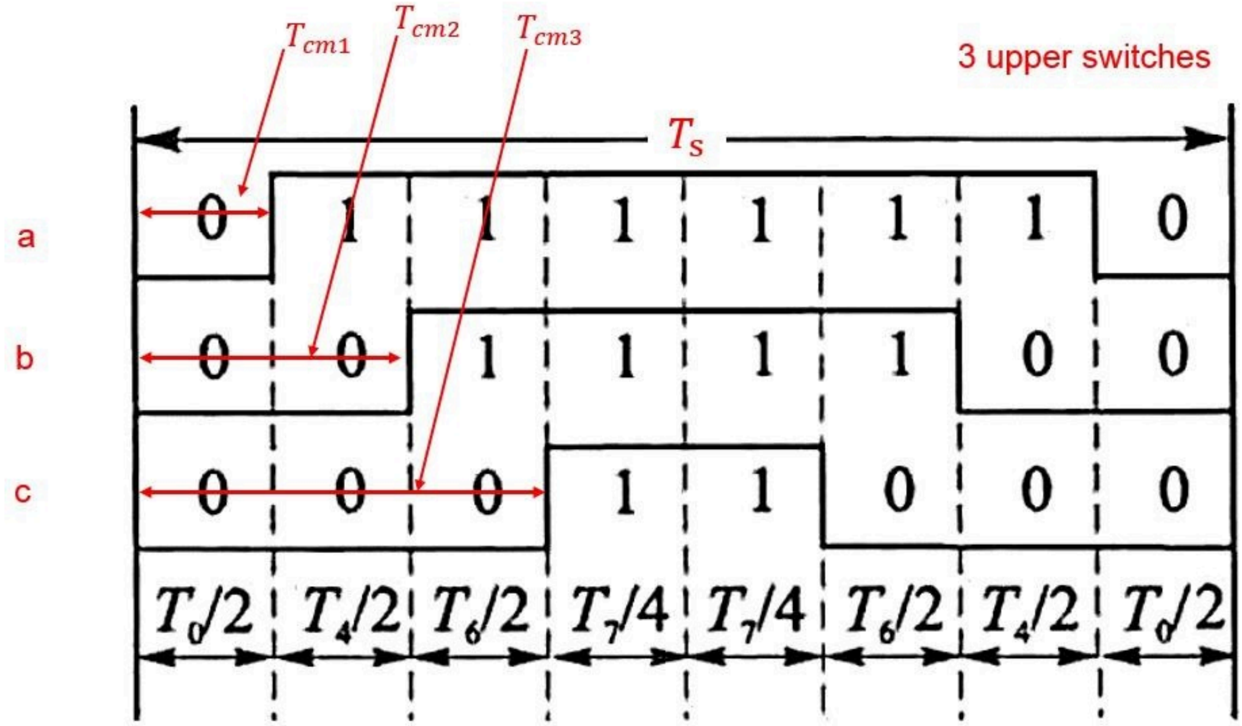
为了在其他扇区中重复利用在第一个扇区得到的上述结论并简化表达式，定义了三个变量

$$\begin{cases} X = \frac{\sqrt{3}T_s u_\beta}{V_{dc}} \\ Y = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}}(\frac{\sqrt{3}}{2}u_\alpha + \frac{1}{2}u_\beta) \\ Z = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}}(-\frac{\sqrt{3}}{2}u_\alpha + \frac{1}{2}u_\beta) \end{cases}$$

可以归到下列表中

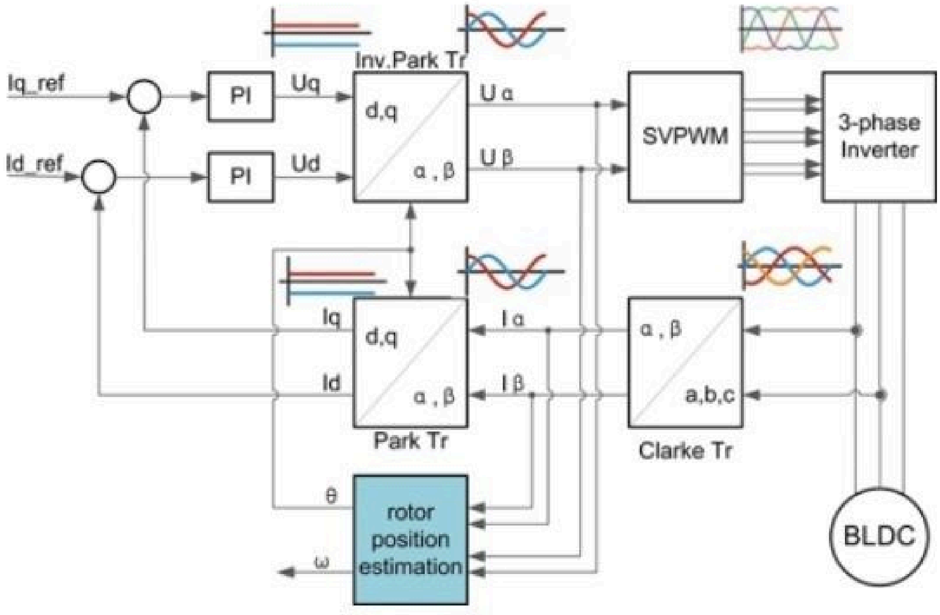
N	$1(II)$	$2(VI)$	$3(I)$	$4(IV)$	$5(III)$	$6(V)$
T_{first}	Z	Y	$-Z$	$-X$	X	$-Y$
T_{second}	Y	$-X$	X	Z	$-Y$	$-Z$

$T_0(T_7)$ $T_0(T_7) = \frac{1}{2}(T_s - T_{first} - T_{second})$



可求得T_{cm1}、T_{cm2}、T_{cm3}如下表所示

N	$1(II)$	$2(VI)$	$3(I)$	$4(IV)$	$5(III)$	$6(V)$
T_{cm1}	$\frac{T_0+T_{first}}{2}$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0+T_{first}+T_{second}}{2}$	$\frac{T_0+T_{first}+T_{second}}{2}$	$\frac{T_0+T_{first}}{2}$
T_{cm2}	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0+T_{first}+T_{second}}{2}$	$\frac{T_0+T_{first}}{2}$	$\frac{T_0+T_{first}}{2}$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0+T_{first}+T_s}{2}$
T_{cm3}	$\frac{T_0+T_{first}+T_{second}}{2}$	$\frac{T_0+T_{first}}{2}$	$\frac{T_0+T_{first}+T_{second}}{2}$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0+T_{first}}{2}$	$\frac{T_0}{2}$



速度环

U_d	**d相电压**	R_s	**电阻**
U_q	q相电压	ω_e	反电动势
L_d	d相电感	Ψ_f	磁链
L_q	q相电感		

$$
\text{影响因子}\begin{cases} U_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_e L_q I_q \\ U_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega_e (L_d I_d + \Psi_f) \\ \text{电源电压} \\ \text{负载} \\ \text{电机参数} \end{cases}
$$