ST MC SDK 5.x 永磁同步电动机矢量控制理论基础

STM32电动机控制应用系列讲座之二

内容

- ❑永磁同步电动机转动原理
- ❑矢量变换
- ❑矢量控制
- ❑空间电压矢量PWM(SVPWM)
- ❑特别算法介绍
  - ➢ MTPA
  - ➢ 弱磁控制
  - ➢ 电流前馈控制

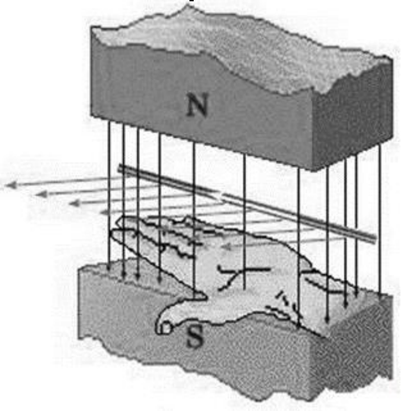
- ❑ 永磁同步电动机转动原理
- ❑ 矢量变换
- ❑ 矢量控制
- ❑ 空间电压矢量PWM(SVPWM)
- ❑ 特别算法介绍
  - ➢ MTPA
  - ➢ 弱磁控制
  - ➢ 电流前馈控制

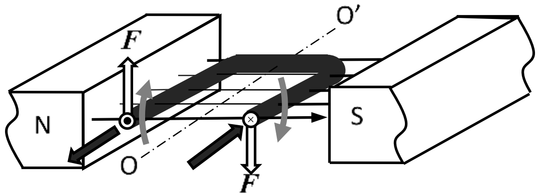
永磁同步电动机转动原理

永磁同步电机矢量控制原理(1/2)

永磁力矩
Permanent magnetic torque

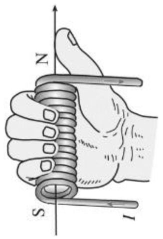
安培力方向左手判断



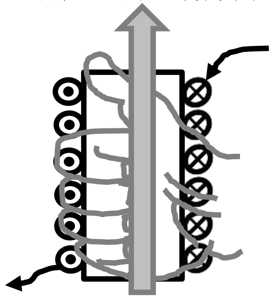


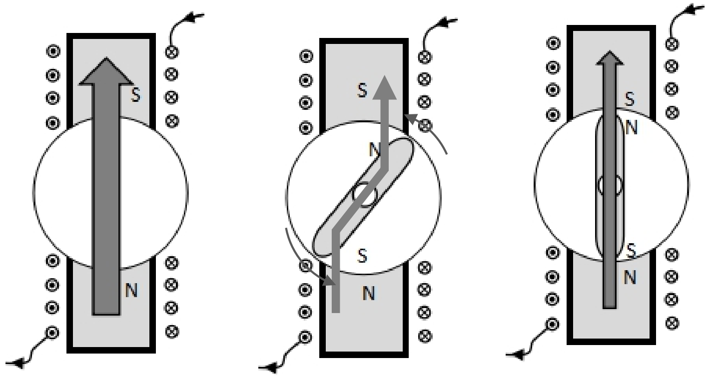
磁阻力矩
Reluctance torque

右手定则



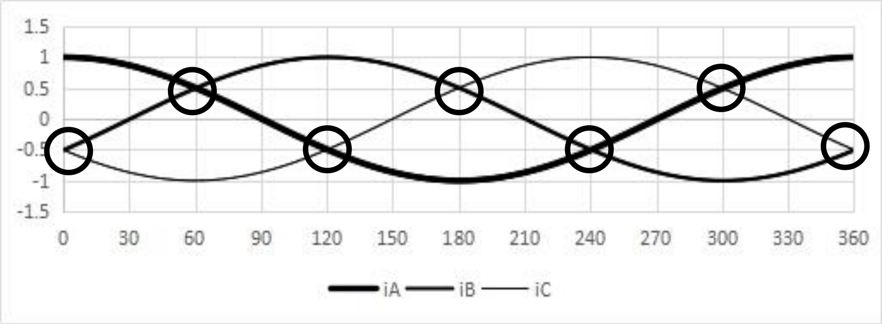
电流产生的磁场方向

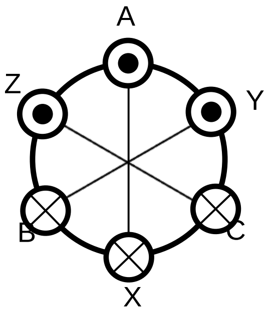


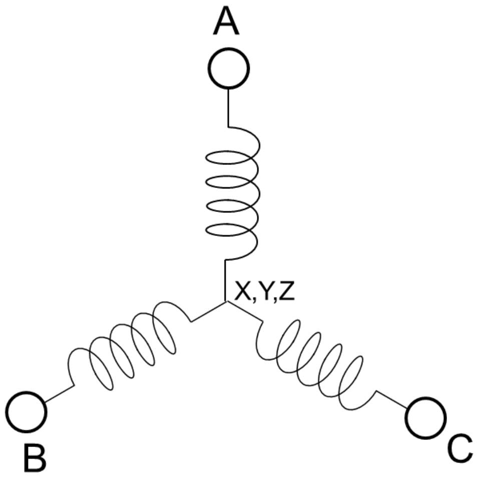


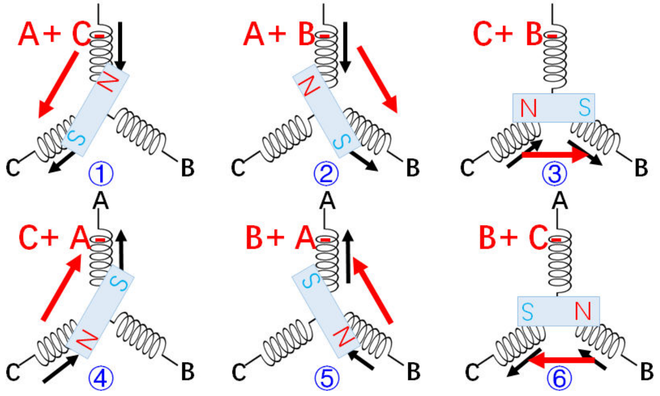
(a) (b) (c)

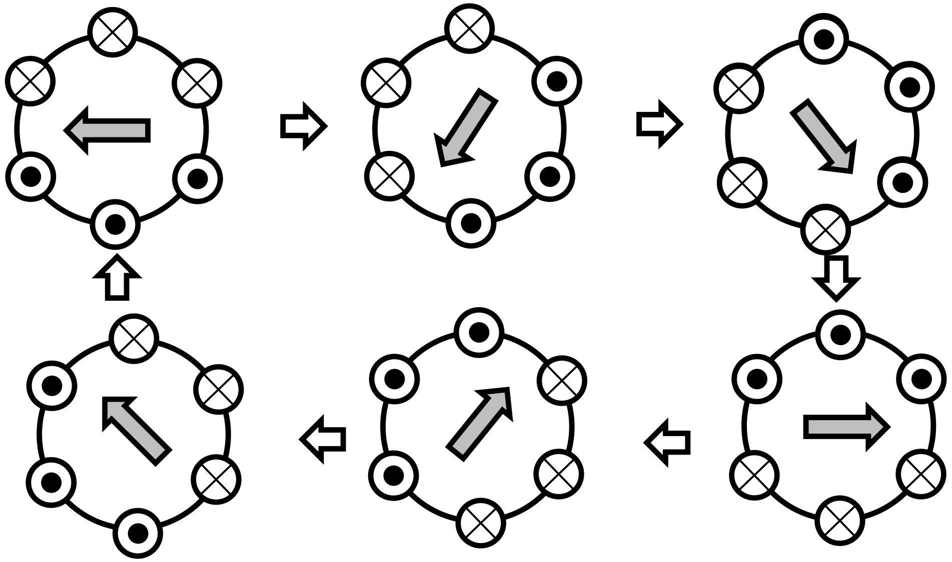
永磁同步电机矢量控制原理(2/2)

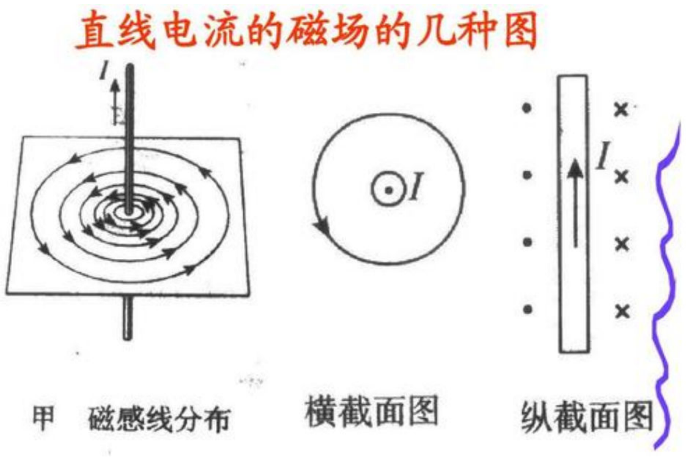






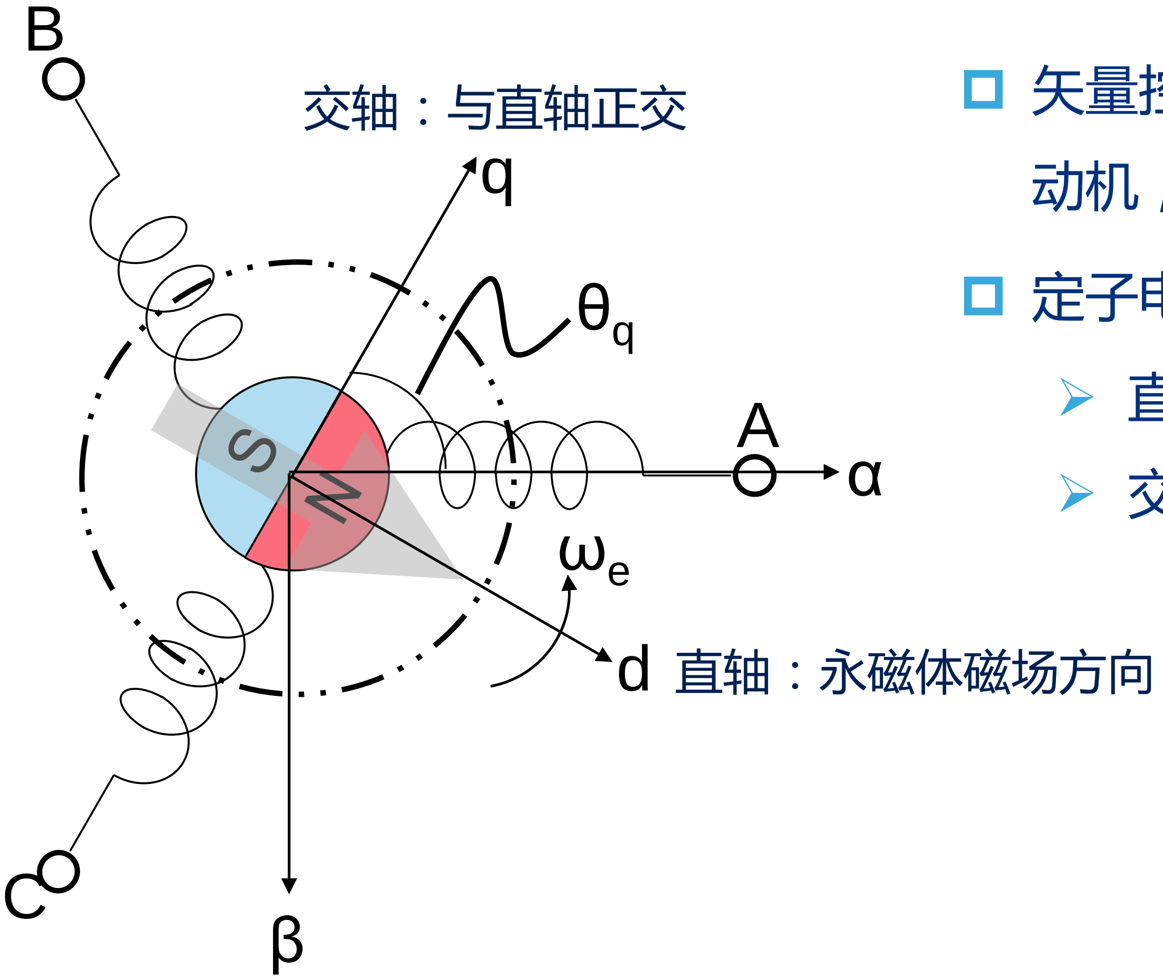




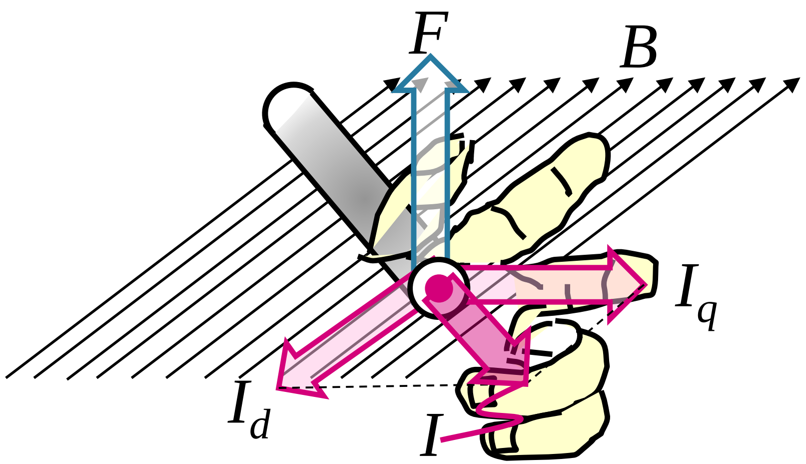


life.augmented

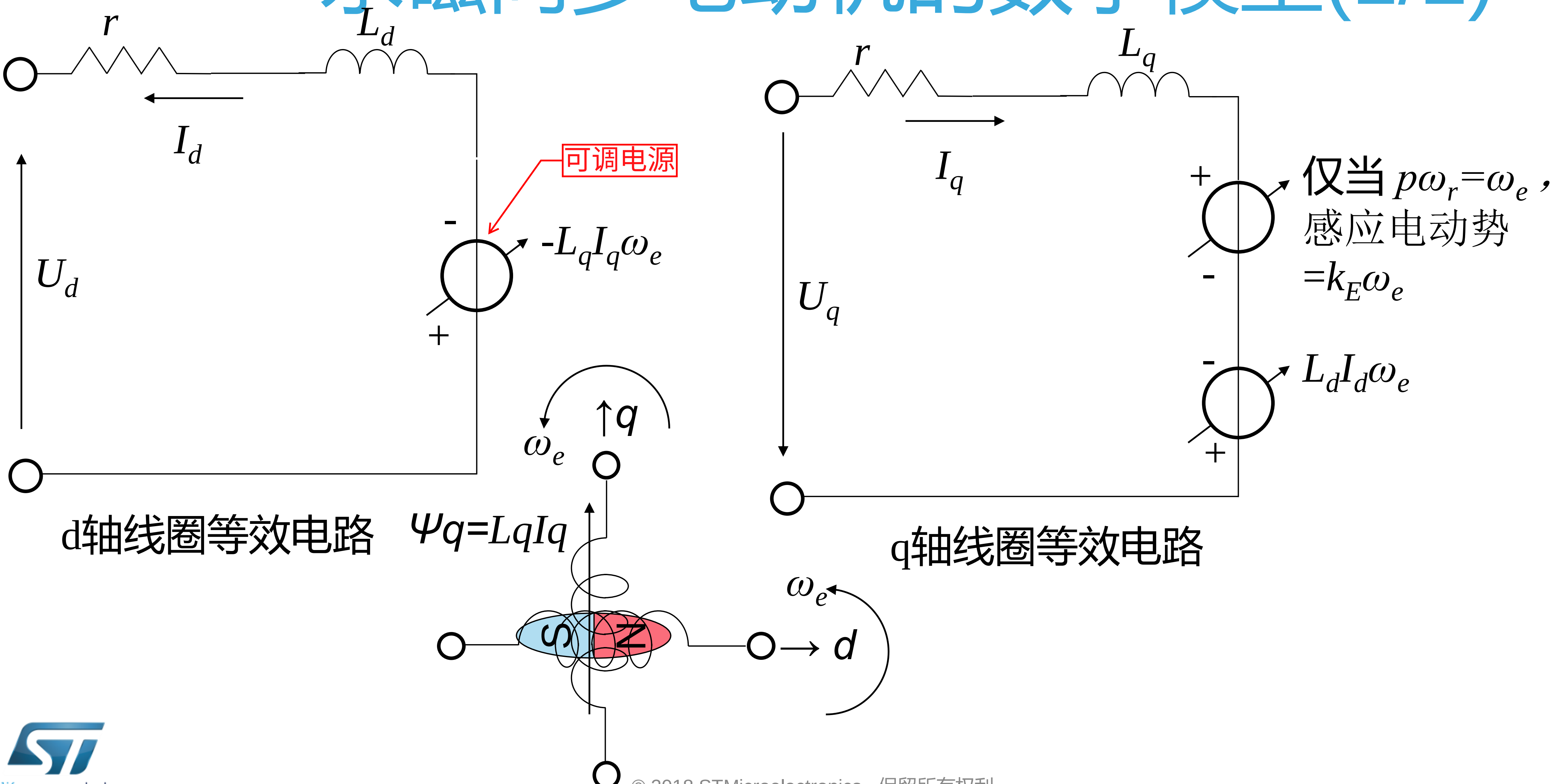
永磁同步电机矢量控制原理



- 矢量控制的基本思想是将交流电动机等效为他励直流电动机，转矩和励磁分别做独立的控制。
- 定子电流被分解成：
  - 直轴电流Id：励磁电流
  - 交轴电流Iq：转矩电流



永磁同步电动机的数学模型(1/2)

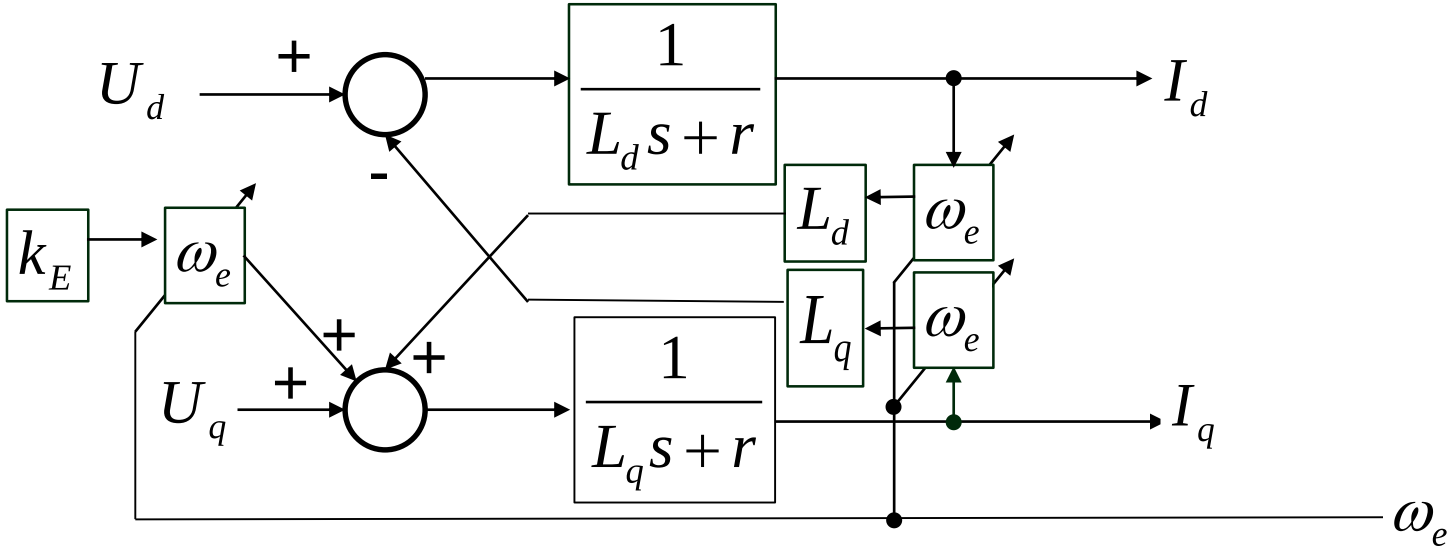


永磁同步电动机的数学模型(2/2)

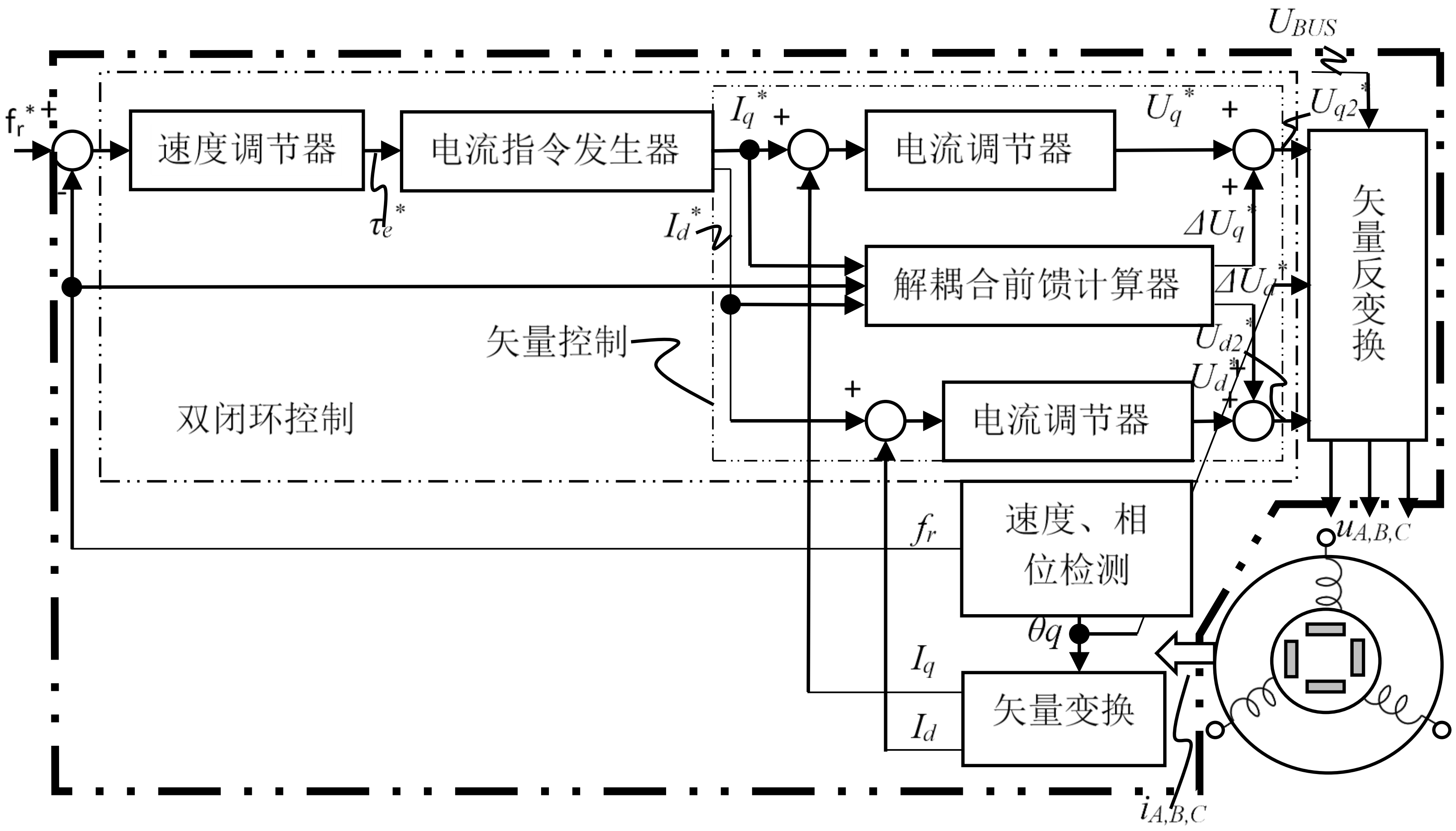
永磁同步电动机的电压方程

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + \frac{d}{dt} L_d & -L_q \omega_e \\ L_d \omega_e & r + \frac{d}{dt} L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_E \omega_e \end{bmatrix}$$

永磁同步电动机的电气模型



永磁同步电动机矢量控制框图



矢量变换

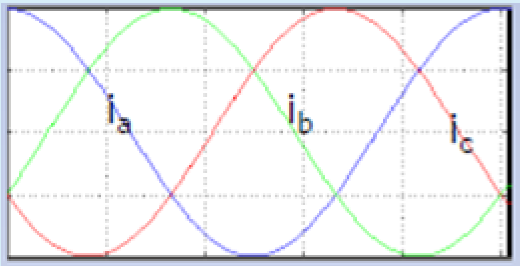
life.augmented

永磁同步电机等效为他励直流电流需要两步数学变换

1、三相绕组等效为正交的两相绕组 α - β
2、Clarke得到的两相正弦波电流转变成旋转坐标系d、q下的直流电流

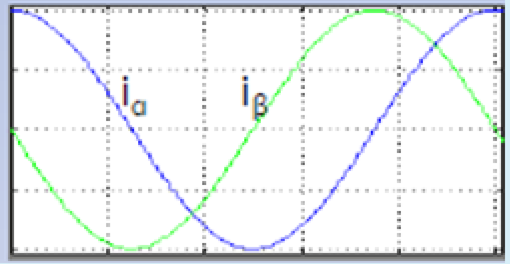
矢量变换公式以及示意图

相位差120 °

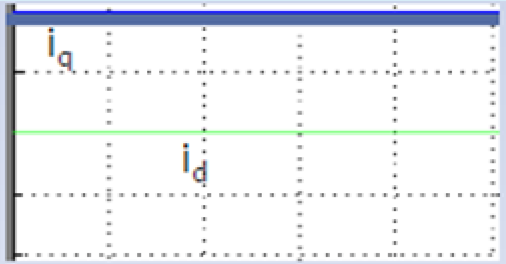


Clarke

相位差90 °

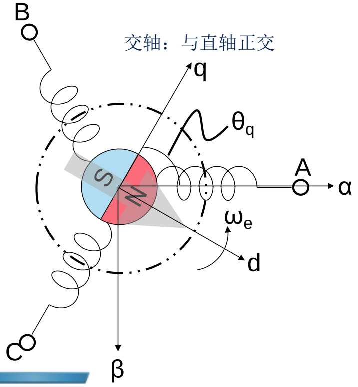


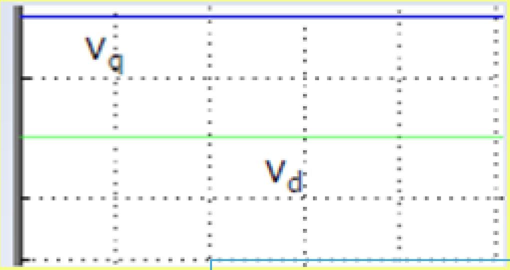
Park



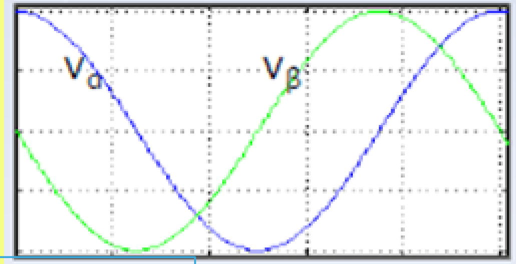
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\beta \\ i_\alpha \end{bmatrix}$$





Rev Park



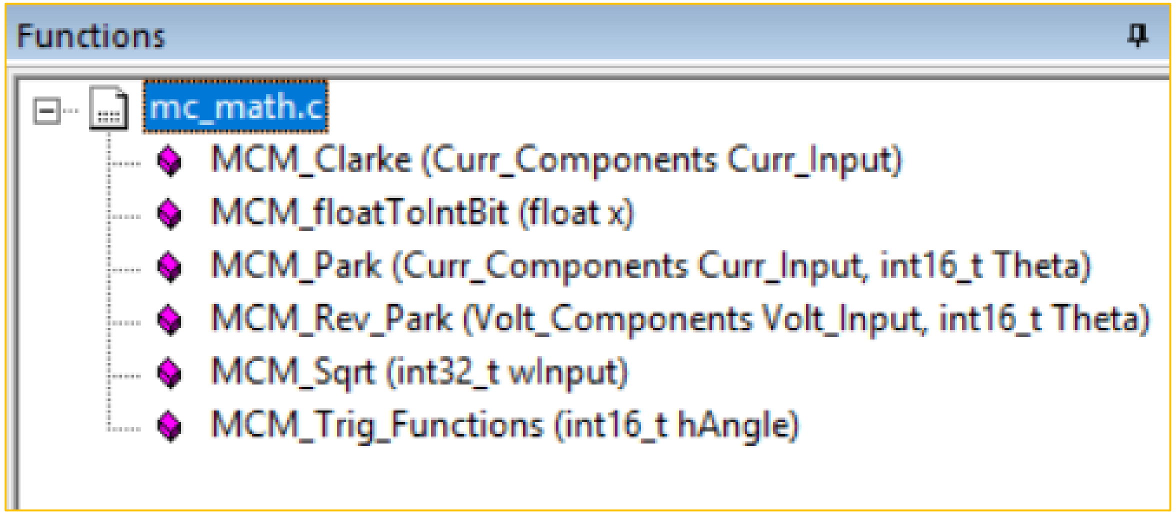
$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_q \\ U_d \end{bmatrix}$$

$$p_3 = \frac{3}{2} p_2$$

life.augmented

ST MC SDK5.x实现矢量变换的固件源程序

- 具体文件夹如下：
  - ✓ xxx\MCSDK_v5.2.0\MotorControl\MCSDK\MCLib\Any\Src
- 文件名如下：
  - ✓ mc_math.c
- 函数名：
  - ✓ MCM_Clarke
  - ✓ MCM_Park
  - ✓ MCM_Rev_Park

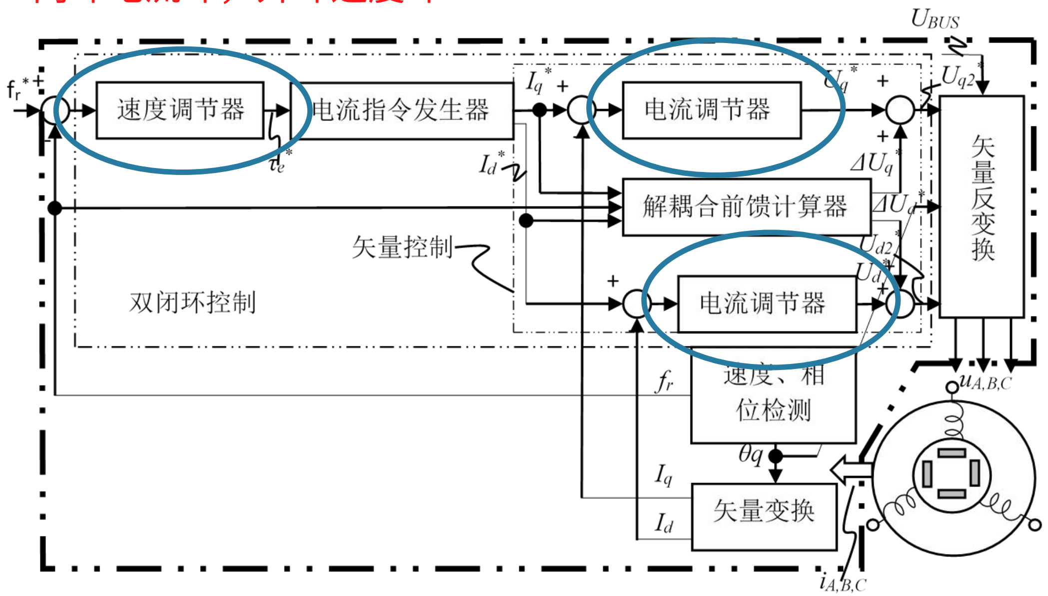


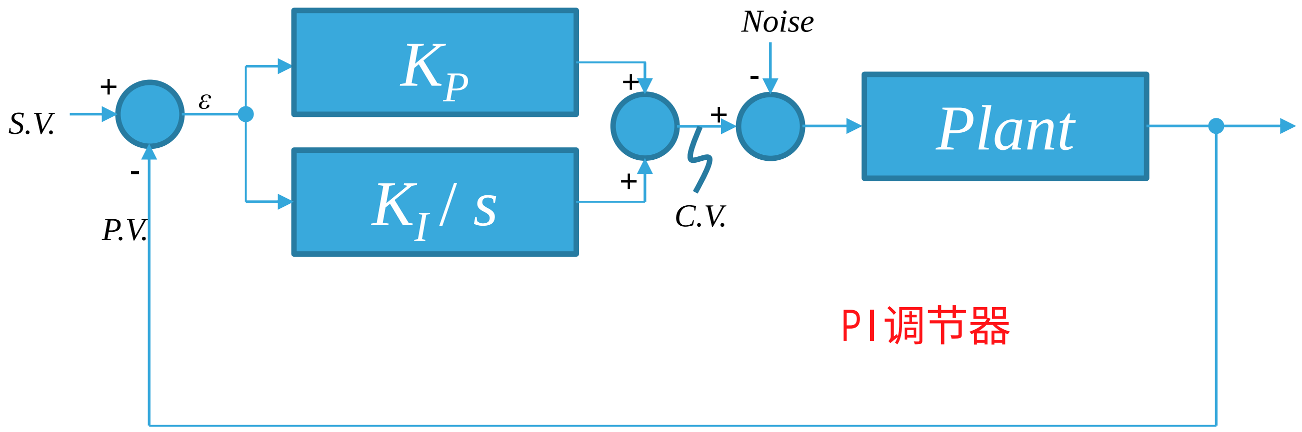
- 永磁同步电动机转动原理
- 矢量变换
- 矢量控制
- 空间电压矢量PWM(SVPWM)
- 特别算法介绍
  - MTPA
  - 弱磁控制
  - 电流前馈控制

矢量控制

矢量控制 —控制器

内环电流环，外环速度环



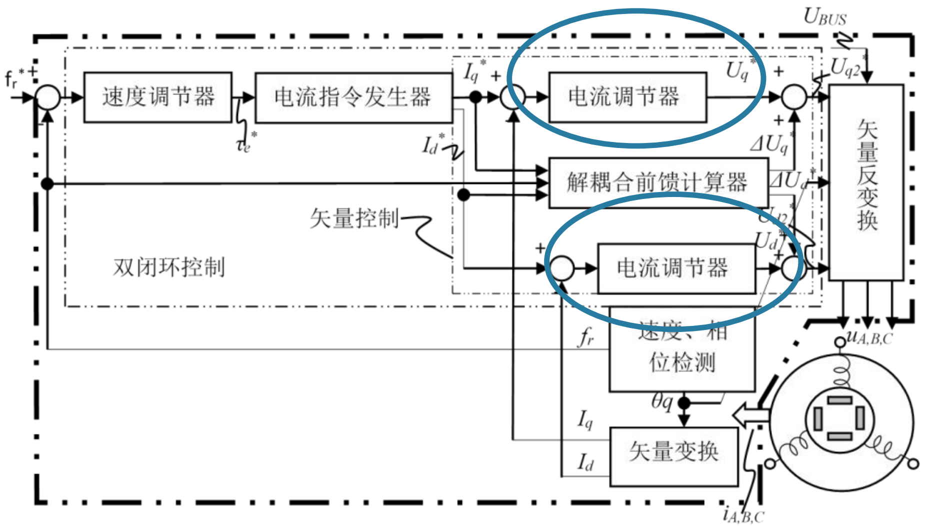


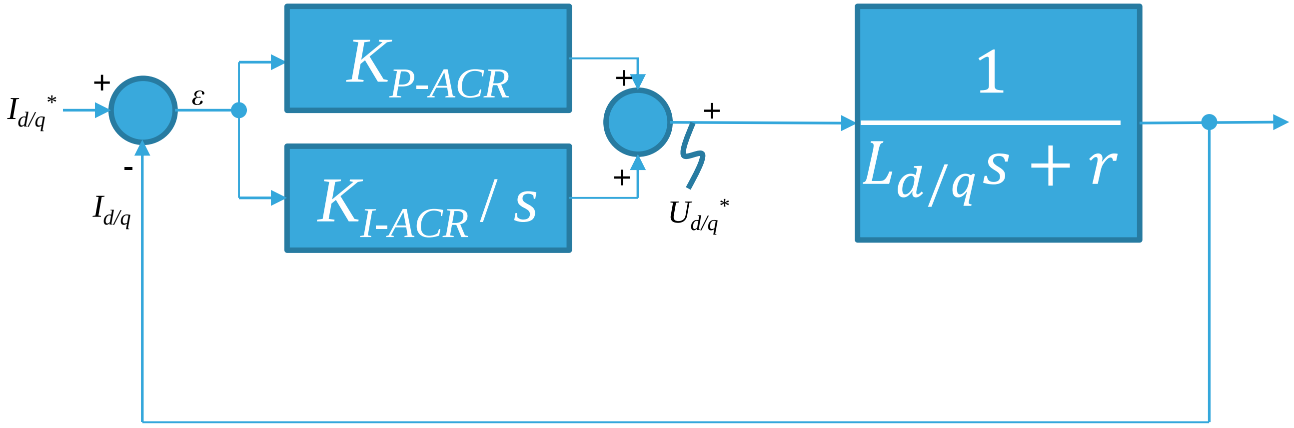
PI调节器

控制器	设定值S.V.	实际值 P.V.	控制值C.V.	对象传递函数
速度控制器	$f_{r\text{-}ref}(f_r^*)$	$f_{r\text{-}fb}(f_r)$	$\tau_{ref}(\tau^*)$ or $I_{q\text{-}ref}(I_q^*)$	$\frac{1}{Js+F}$
电流控制器（忽略dq之间的耦合）	$I_{d/q\text{-}ref}(I_{d/q}^*)$	$I_{d/q\text{-}fb}(I_{d/q})$	$U_{d/q\text{-}ref}(U_{d/q}^*)$	$\frac{1}{L_{d/q}s+r}$

life.augmented

电流调节器
--拉普拉斯域设定





$$K_{P-ACR-d} = L_d \omega_{B-ACR}$$

$$K_{P-ACR-q} = L_q \omega_{B-ACR}$$

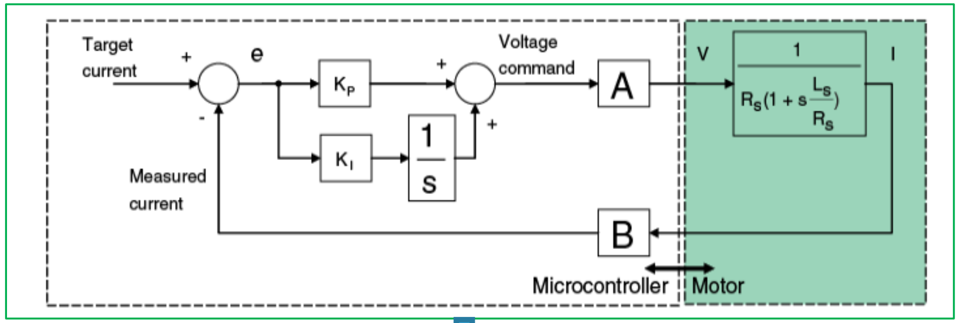
$$K_{I-ACR} = r \omega_{B-ACR}$$

- 电流调节器的开环增益为

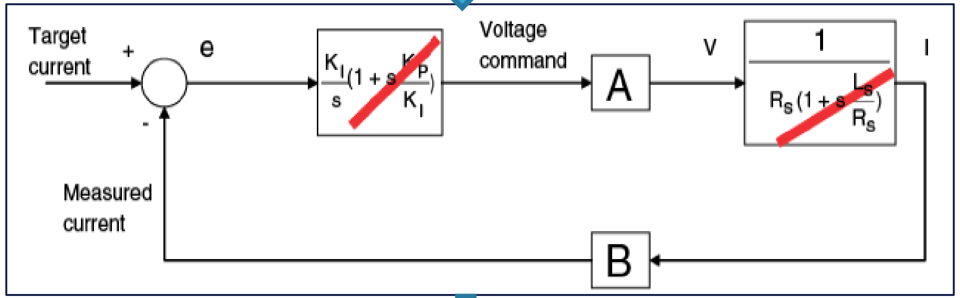
$$G_{ACR-Openloop}(s) = \left(K_{P-ACR-d/q} + \frac{K_{I-ACR}}{s}\right)\frac{1}{L_{d/q}s + r} = \frac{\omega_{B-ACR}}{s}$$

life.augmented

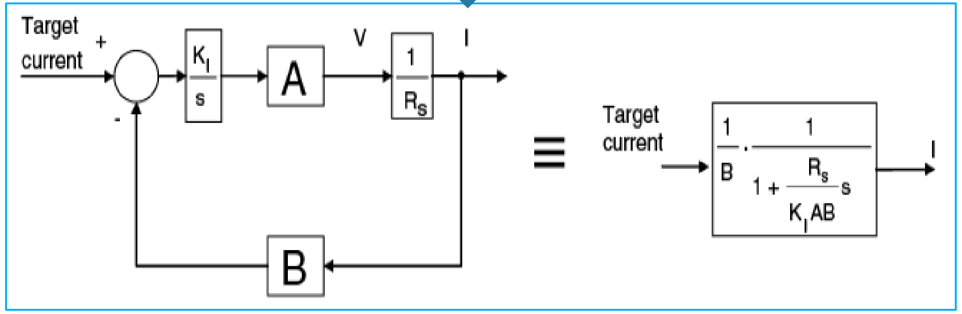
电流调节器
--ST MC SDK5.x WB 设定



令KP/KI = LS/RS



变为一阶系统



$$K_P = L_S \frac{\omega_C}{AB}$$

$$K_i = \frac{R_S \cdot \omega_C \quad T}{AB}$$

$$AB = \frac{V_{Bus}DC \cdot R_{shunt} \cdot A_{op}}{3.3}$$

$$A = \frac{V_{Bus}DC}{2^{16}}$$

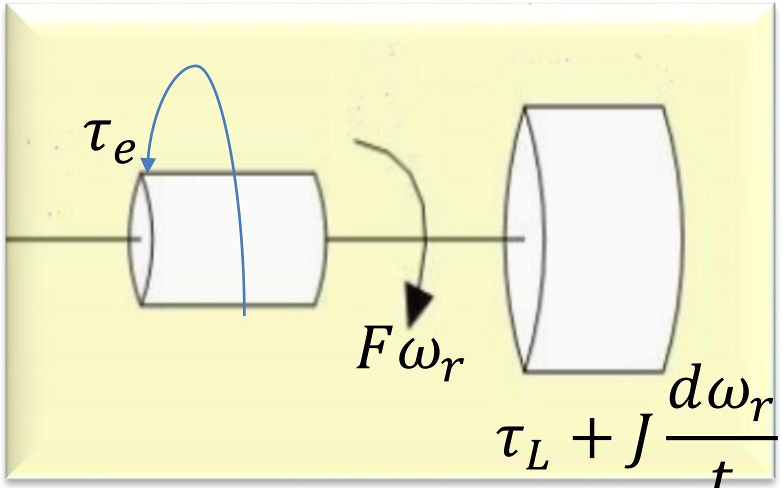
$$B = \frac{R_{shunt} A_{op} 2^{16}}{3.3}$$

拉普拉斯域PI系数设定方法

$$K_{P-ASR} = J\omega_{B-ASR}$$

$$K_{I-ASR} = F\omega_{B-ASR}$$

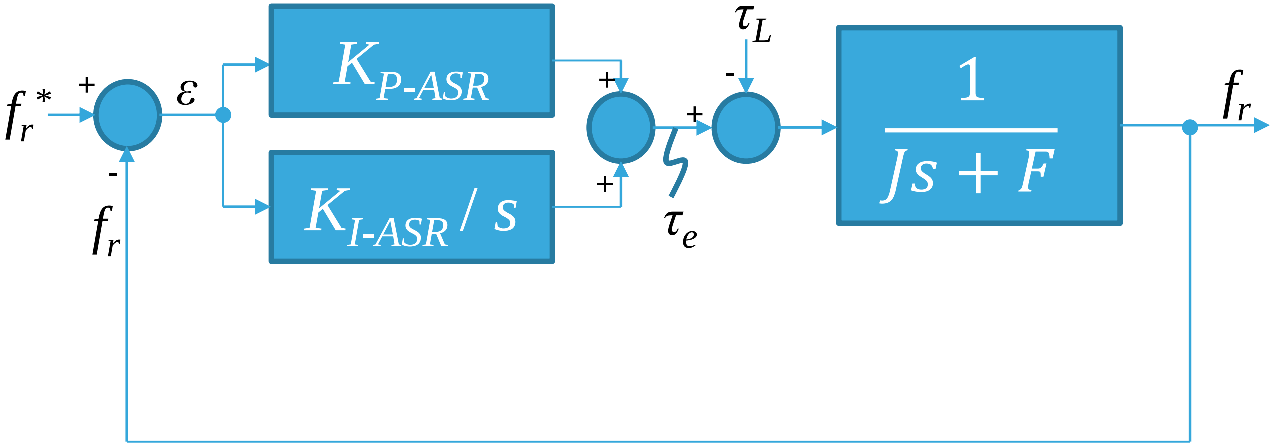
J: 转动惯量 [kg/m²];
F: 阻力系数 [Nm/[rad/s]];
$\omega_{B\text{-}ASR}$: 速度调节器通带宽度 [rad/s];
$K_{P\text{-}ASR}$: 速度调节器比例系数;
$K_{I\text{-}ASR}$: 速度调节器积分系数。



WB中PI系数的设定

$$K_{P-ASR-WB} = \frac{\frac{J_{WB}}{1000000}k(2\pi f_{B-ASR})p}{10}$$

$$K_{I-ASR-WB} = \frac{K_{P-ASR-WB}}{\tau_{mech}}\frac{T_{s-ASR-WB}}{1000}$$



$$k_\tau = 1.5\sqrt{\frac{2}{3}}\frac{60}{1000\cdot 2\pi}, k = \frac{65536\cdot R_{shunt}\cdot G_{OPAMP}}{3.3k_\tau}, \tau_{mech} = \frac{J_{WB}}{F_{WB}}, f_{B-ASR} = \frac{0.5}{\tau_{mech}}\times 30$$

life.augmented

PID在ST MC SDK5.x 固件中的实现

- 具体文件夹如下：
  - ✓ xxx\MCSDK_v5.2.0\MotorControl\MCSDK\MCLib\Any\Src
- 文件名如下：
  - ✓ pid_regulator.c
- 函数名：
  - ✓ PI_Controller(库中只使用了PI)

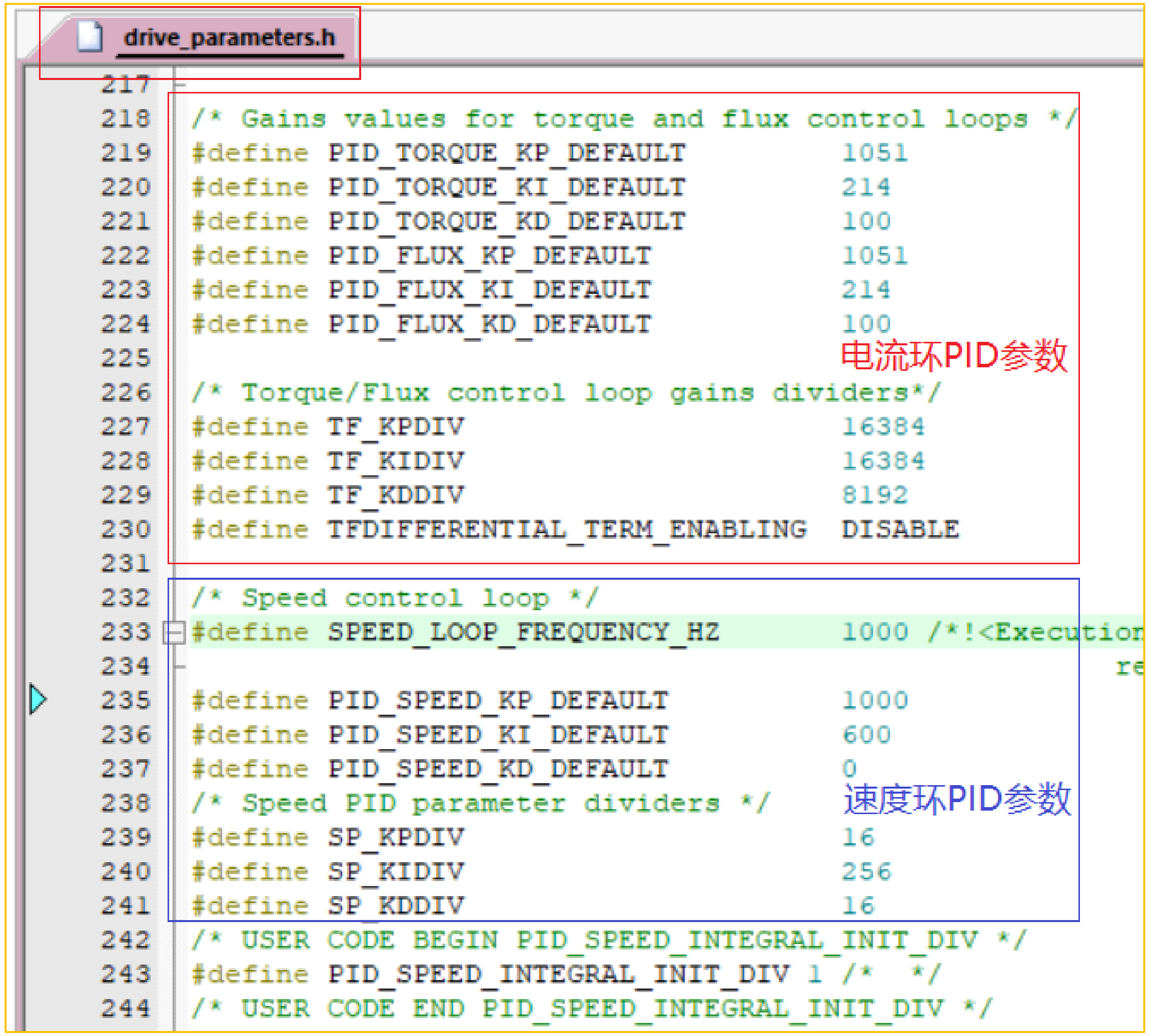
pid_regulator.c

```c
#endif
/**
  * @brief  This function compute the output of a PI regulator sum of its
  *         proportional and integral terms
  * @param  pHandle: handler of the current instance of the PID component
  * @param  wProcessVarError: current process variable error, intended as the reference
  *         value minus the present process variable value
  * @retval computed PI output
  */
int16_t PI_Controller( PID_Handle_t * pHandle, int32_t wProcessVarError )
{
  int32_t wProportional_Term, wIntegral_Term, wOutput_32, wIntegral_sum_temp;
  int32_t wDischarge = 0;
  int16_t hUpperOutputLimit = pHandle->hUpperOutputLimit;
  int16_t hLowerOutputLimit = pHandle->hLowerOutputLimit;

  /* Proportional term computation*/
  wProportional_Term = pHandle->hKpGain * wProcessVarError;

  /* Integral term computation */
  if ( pHandle->hKiGain == 0 )
  {
    pHandle->wIntegralTerm = 0;
  }
  else
  {
```


life.augmented

PID参数在ST MC SDK5.x固件中的位置

- 具体文件夹如下：
  - ✓ xxx\Inc
- 文件名如下：
  - ✓ drive_parameters.h
- 参数见右图所示



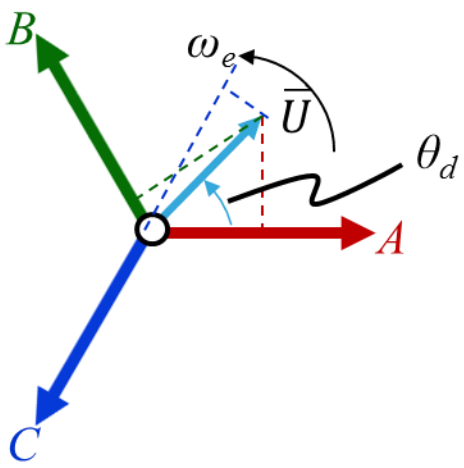
```
drive_parameters.h

/* Gains values for torque and flux control loops */
#define PID_TORQUE_KP_DEFAULT         1051
#define PID_TORQUE_KI_DEFAULT         214
#define PID_TORQUE_KD_DEFAULT         100
#define PID_FLUX_KP_DEFAULT           1051
#define PID_FLUX_KI_DEFAULT           214
#define PID_FLUX_KD_DEFAULT           100

/* Torque/Flux control loop gains dividers*/
#define TF_KPDIV                      16384
#define TF_KIDIV                      16384
#define TF_KDDIV                      8192
#define TFDIFFERENTIAL_TERM_ENABLING  DISABLE

/* Speed control loop */
#define SPEED_LOOP_FREQUENCY_HZ       1000 /*!<Execution
                                                    re

#define PID_SPEED_KP_DEFAULT          1000
#define PID_SPEED_KI_DEFAULT          600
#define PID_SPEED_KD_DEFAULT          0
/* Speed PID parameter dividers */
#define SP_KPDIV                      16
#define SP_KIDIV                      256
#define SP_KDDIV                      16
/* USER CODE BEGIN PID_SPEED_INTEGRAL_INIT_DIV */
#define PID_SPEED_INTEGRAL_INIT_DIV 1 /*  */
/* USER CODE END PID_SPEED_INTEGRAL_INIT_DIV */
```

- 永磁同步电动机转动原理
- 矢量变换
- 矢量控制
- 空间电压矢量PWM(SVPWM)
- 特别算法介绍
  - MTPA
  - 弱磁控制
  - 电流前馈控制

空间电压矢量PWM(SVPWM)

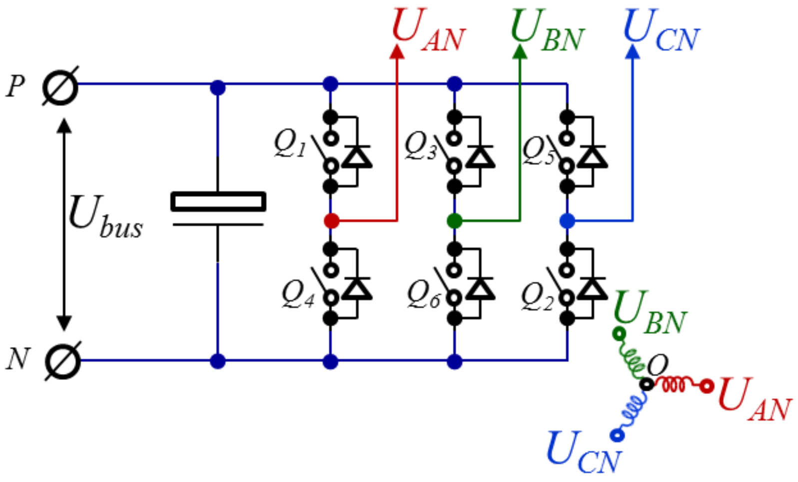
life.augmented

空间电压矢量PWM(SVPWM)(1/3)



$$U_{AO} = U_m\cos(\theta_d) = U_m\cos(\omega_e t)$$
$$U_{BO} = U_m\cos(\theta_d - 120^\circ) = U_m\cos(\omega_e t - 120^\circ)$$
$$U_{CO} = U_m\cos(\theta_d + 120^\circ) = U_m\cos(\omega_e t + 120^\circ)$$

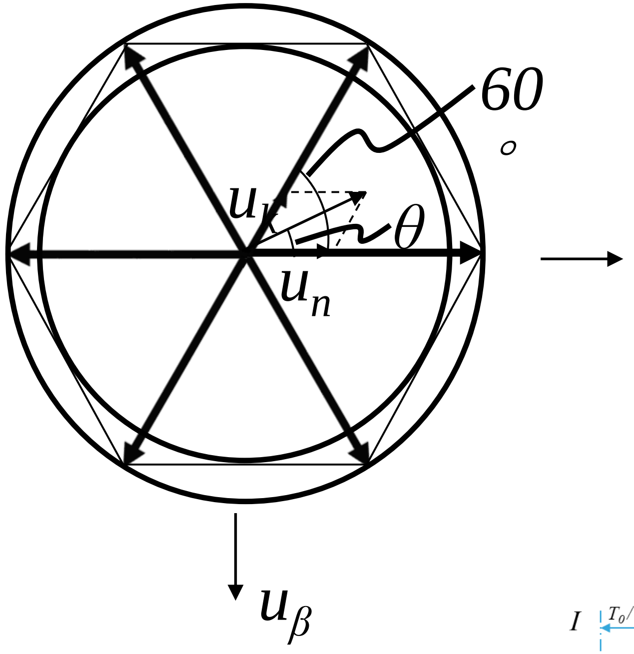
$$|\vec{U}| = U_m$$



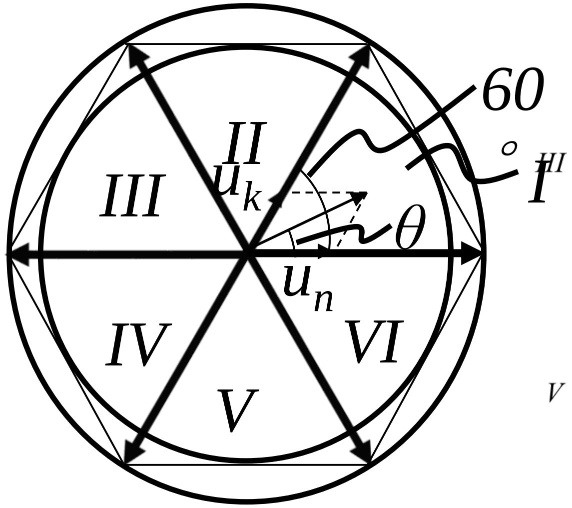
uector	$Q_1(Q_4)$	$Q_3(Q_6)$	$Q_5(Q_2)$	U_{AN} [u]	U_{BN}[u]	U_{CN}[u]	U_{AO} [u]	U_{BO}[u]	U_{CO}[u]
$\vec{U}_0$	OFF(ON)	OFF(ON)	OFF(ON)	0	0	0	0	0	0
$\vec{U}_1$	ON(OFF)	OFF(ON)	OFF(ON)	U_{bus}	0	0	$2U_{bus}/3$	$-U_{bus}/3$	$-U_{bus}/3$
$\vec{U}_2$	ON(OFF)	ON(OFF)	OFF(ON)	U_{bus}	U_{bus}	0	$U_{bus}/3$	$U_{bus}/3$	$-2U_{bus}/3$
$\vec{U}_3$	OFF(ON)	ON(OFF)	OFF(ON)	0	U_{bus}	0	$-U_{bus}/3$	$2U_{bus}/3$	$-U_{bus}/3$
$\vec{U}_4$	OFF(ON)	ON(OFF)	ON(OFF)	0	U_{bus}	U_{bus}	$-2U_{bus}/3$	$U_{bus}/3$	$U_{bus}/3$
$\vec{U}_5$	OFF(ON)	OFF(ON)	ON(OFF)	0	0	U_{bus}	$-U_{bus}/3$	$-U_{bus}/3$	$2U_{bus}/3$
$\vec{U}_6$	ON(OFF)	OFF(ON)	ON(OFF)	U_{bus}	0	U_{bus}	$U_{bus}/3$	$-2U_{bus}/3$	$-U_{bus}/3$
$\vec{U}_7$	ON(OFF)	ON(OFF)	ON(OFF)	U_{bus}	U_{bus}	U_{bus}	0	0	0

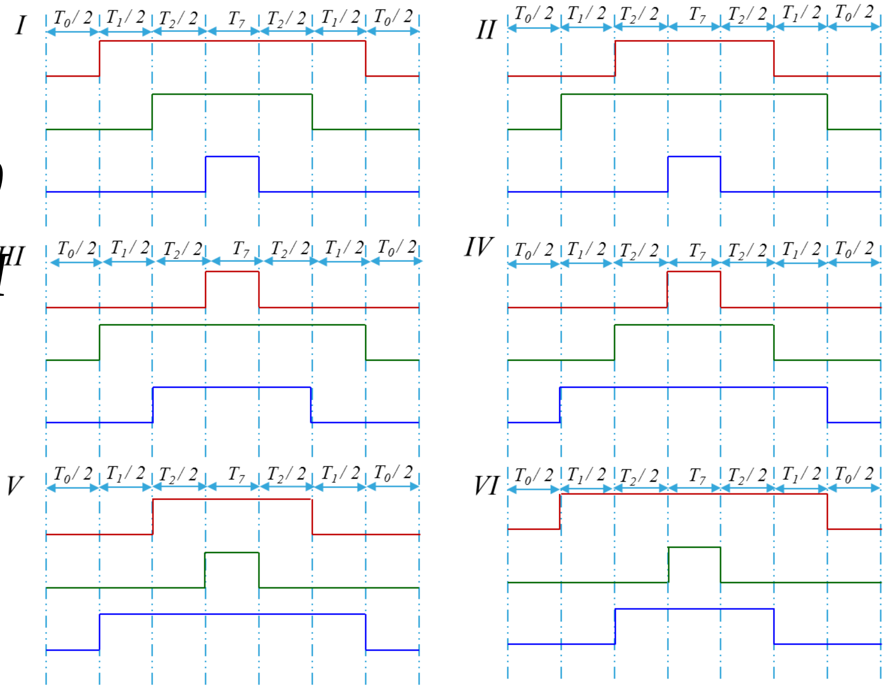
life.augmented

空间电压矢量PWM(SVPWM)(2/3)



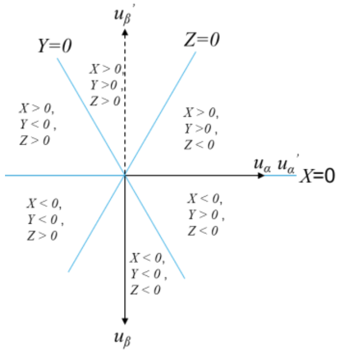
Sector	*I*	*II*	*III*	*IV*	*V*	*VI*
n	1	3	3	5	5	1
k	2	2	4	4	6	6





life.augmented

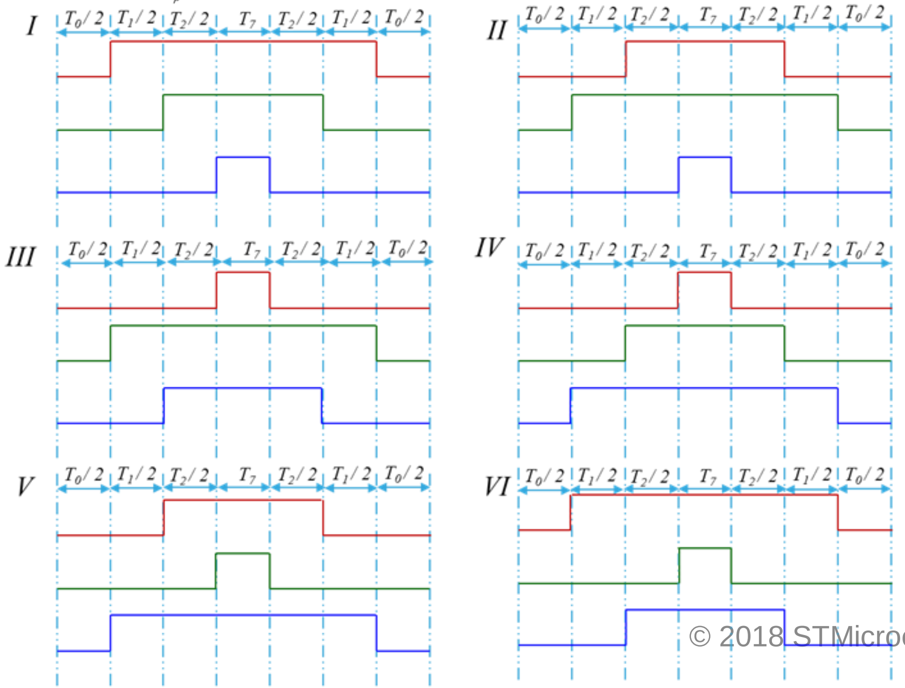
空间电压矢量PWM(SVPWM)(3/3)



$$\begin{cases} u_\alpha' = \sqrt{3}u_\alpha T \\ u_\beta' = -u_\beta T \end{cases}$$

$$\begin{cases} X = u_\beta' \\ Y = \dfrac{u_\alpha' + u_\beta'}{2} \\ Z = \dfrac{u_\beta' - u_\alpha'}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} tmax = T_1 + T_2 + \dfrac{T_0 + T_7}{2} \\ tmid = T_2 + \dfrac{T_0 + T_7}{2} = tmax - T_1 \\ tmin = tmid - T_2 \end{cases}$$



sector	T1	T2	T0+T7
I	*-Z*	*X*	$T+Z-X$
II	*Z*	*Y*	$T-Y-Z$
III	*X*	*-Y*	$T-X+Y$
IV	*-X*	*Z*	$T+X-Z$
V	*-Y*	*-Z*	$T+Y+Z$
VI	*Y*	*-X*	$T+X-Y$

sector	tA	tB	tC
I	*T/2 + (X – Z)/2*	*tA + Z*	*tB – X*
II	*T/2 + (Y – Z)/2*	*tA + Z*	*tA – Y*
III	*T/2 + (Y – X)/2*	*tC + X*	*tA – Y*
IV	*T/2 + (X – Z)/2*	*tA + Z*	*tB – X*
V	*T/2 + (Y – Z)/2*	*tA + Z*	*tA – Y*
VI	*T/2 + (Y – X)/2*	*tC + X*	*tA – Y*

SVPWM在ST MC SDK5.x固件中的实现

- 具体文件夹如下：
  - ✓ xxx\MCSDK_v5.2.0\MotorControl\MCSDK\MCLib\Any\Src
- 文件名如下：
  - ✓ pwm_curr_fdbk.c
- 函数名：
  - ✓ PWMC_SetPhaseVoltage

pwm_curr_fdbk.c

```c
  *
  * @retval Returns #MC_NO_ERROR if no error occurred or #MC_FOC_DURATION if the duty cycles were
  *         set too late for being taken into account in the next PWM cycle.
  */
uint16_t PWMC_SetPhaseVoltage( PWMC_Handle_t * pHandle, Volt_Components Valfa_beta )
{
  int32_t wX, wY, wZ, wUAlpha, wUBeta, wTimePhA, wTimePhB, wTimePhC;
  PWMC_SetSampPointSectX_Cb_t pSetADCSamplingPoint;

  wUAlpha = Valfa_beta.qV_Component1 * ( int32_t )pHandle->hT_Sqrt3;
  wUBeta = -( Valfa_beta.qV_Component2 * ( int32_t )( pHandle->hPWMperiod ) ) * 2;

  wX = wUBeta;
  wY = ( wUBeta + wUAlpha ) / 2;
  wZ = ( wUBeta - wUAlpha ) / 2;

  /* Sector calculation from wX, wY, wZ */
  if ( wY < 0 )
  {
    if ( wZ < 0 )
    {
      pHandle->hSector = SECTOR_5;
      wTimePhA = ( int32_t )( pHandle->hPWMperiod ) / 4 + ( ( wY - wZ ) / ( int32_t )262144 );
      wTimePhB = wTimePhA + wZ / 131072;
      wTimePhC = wTimePhA - wY / 131072;
      pSetADCSamplingPoint = pHandle->pFctSetADCSampPointSect5;
    }
```

life.augmented

特别算法介绍

- 永磁同步电动机转动原理
- 矢量变换
- 矢量控制
- 空间电压矢量PWM(SVPWM)
- 特别算法介绍
  - MTPA
  - 弱磁控制
  - 电流前馈控制

每安培最大转矩—MTPA（1/8）

- 电磁转矩方程如下：

$$\boxed{\tau_e = \frac{3}{2} p\left[k_E I_q + (L_d - L_q) I_d I_q\right]}$$

- 如果L_d=L_q ,那么

$$\boxed{\tau_e = \frac{3}{2} p k_E I_q}$$

每安培最大转矩—MTPA（2/8）

- 电动机的电压方程：

$$\begin{cases} U_d = rI_d - L_q I_q \omega_e \\ U_q = rI_q + k_E \omega_e + L_d I_d \omega_e \end{cases}$$

- 那么，电动机消耗的有功功率为

$$P = \frac{3}{2}\left(U_d I_d + U_q I_q\right)$$

- 将电动机的方程代入功率方程，得

$$P = \frac{3}{2} r\left(I_d^{\ 2} + I_q^{\ 2}\right) + \left[k_E I_q + \left(L_d - L_q\right) I_d I_q\right]\omega_e$$

每安培最大转矩—MTPA（3/8）

- 电动机的有功功率一部分消耗在绕组电阻上发热了，另一部分则用于输出机械功率

$$P = \underbrace{\frac{3}{2} r\left(I_d^{\ 2} + I_q^{\ 2}\right)}_{\text{绕组电阻发热}} + \underbrace{\frac{3}{2}\left[k_E I_q + \left(L_d - L_q\right) I_d I_q\right]\omega_e}_{\text{用于输出机械功率}}$$

- 电动机的机械功率为

$$P_{mech} = \tau_e \omega_{mech}$$

每安培最大转矩—MTPA（4/8）

- 机械转速与电频率之间的关系为：

$$\boxed{\omega_e = p\omega_{mech}}$$

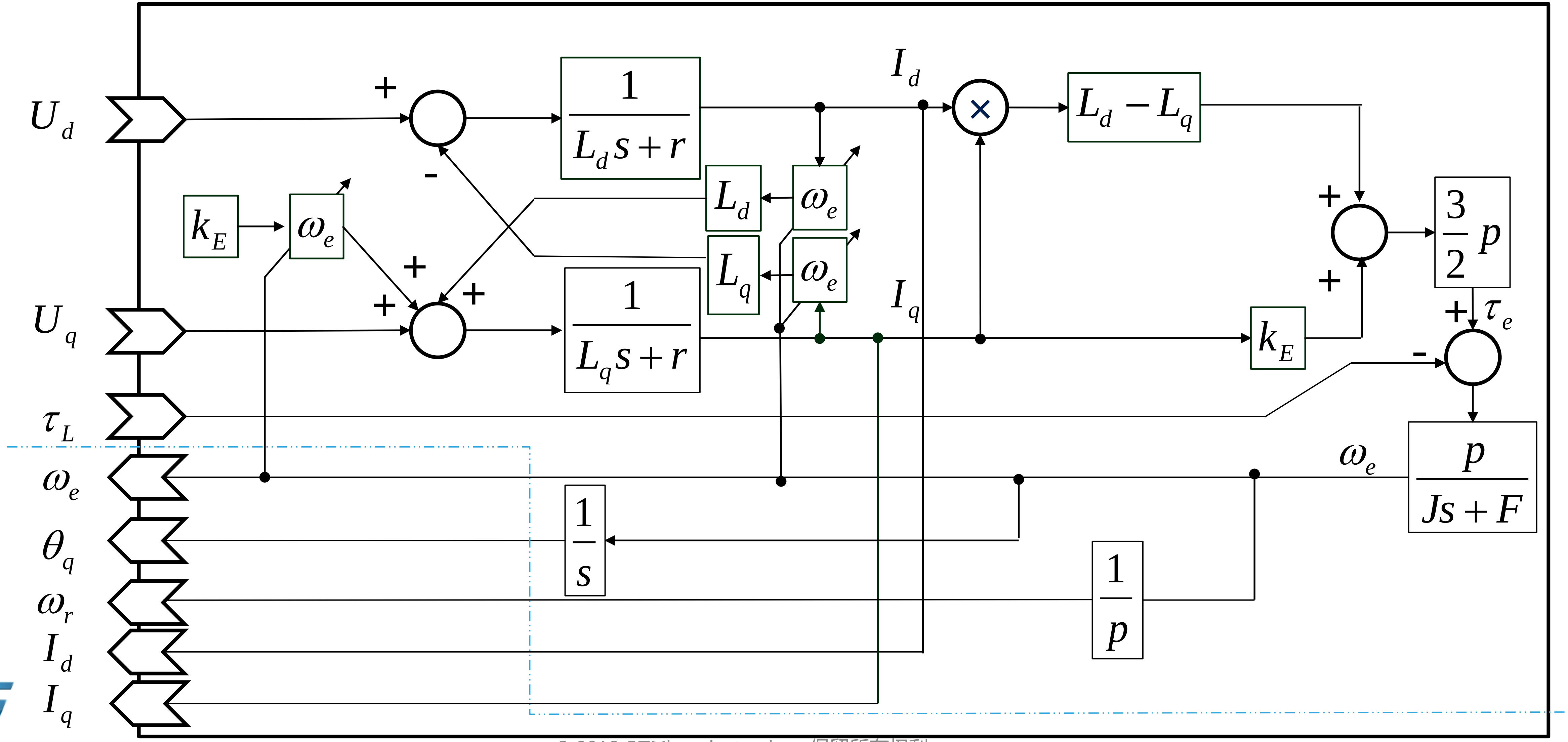
- 所以

$$\boxed{\tau_e \omega_{mech} = \frac{3}{2}\left[k_E I_q + \left(L_d - L_q\right) I_d I_q\right] p\omega_{mech}}$$

- 得到了电磁转矩的公式为，

$$\boxed{\tau_e = \frac{3}{2} p\left[k_E I_q + \left(L_d - L_q\right) I_d I_q\right]}$$

一种永磁同步电动机的同步状态工作模型



每安培最大转矩—MTPA（5/8）

- 如果绕组中的电流峰值是I_s

$$\boxed{I_s^{\ 2} = I_d^{\ 2} + I_q^{\ 2}} \qquad (1)$$

- 当输出电磁转矩一定时，

$$\boxed{I_q = \frac{\tau_e}{\frac{3}{2}p\left[k_E + \left(L_d - L_q\right)I_d\right]}} \qquad (2)$$

每安培最大转矩—MTPA（6/8）

- 将(2)代入(1)

$$\boxed{I_s^{\,2} = I_d^{\,2} + \left(\frac{\tau_e}{\frac{3}{2} p\left[k_E + \left(L_d - L_q\right) I_d\right]} \right)^2} \qquad (3)$$

每安培最大转矩—MTPA（7/8）

- (3)式可以看作是一个关于I_d的函数，经过分析，它有最小值，也就是说，当输出电磁转矩一定时，有一个最小的峰值电流I_s。当取得电流峰值I_s最小时，

$$\begin{aligned}\frac{\partial I_s^{\,2}}{\partial I_d} &= 2I_d + 2I_q \frac{\tau_e}{\frac{3}{2}p} \frac{-\left(L_d - L_q\right)}{\left[k_E + \left(L_d - L_q\right)I_d\right]^2} \\ &= 2I_d + 2I_q \frac{\tau_e}{\frac{3}{2}p\left[k_E + \left(L_d - L_q\right)I_d\right]} \frac{-\left(L_d - L_q\right)}{\left[k_E + \left(L_d - L_q\right)I_d\right]} \\ &= 2I_d + 2I_q^{\,2} \frac{-\left(L_d - L_q\right)}{\left[k_E + \left(L_d - L_q\right)I_d\right]} = 0\end{aligned} \tag{4}$$

整理(4)，

$$\boxed{(L_d - L_q)I_d^{\,2} + k_E I_d - (L_d - L_q)I_q^{\,2} = 0} \tag{4'}$$

每安培最大转矩—MTPA（8/8）

- 在(4)中，以I_d为未知数，求解方程，得

$$I_d = -\frac{k_E}{2(L_d - L_q)} \pm \sqrt{\left(\frac{k_E}{2(L_d - L_q)}\right)^2 + I_q{}^2} \quad (5)$$

- 如果$L_d<L_q$，那么当I_d满足(6)的时候，当电磁转矩一定时，电流峰值I_s最小

$$I_d = -\frac{k_E}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\left(\frac{k_E}{2(L_d - L_q)}\right)^2 + I_q{}^2} \quad (6)$$

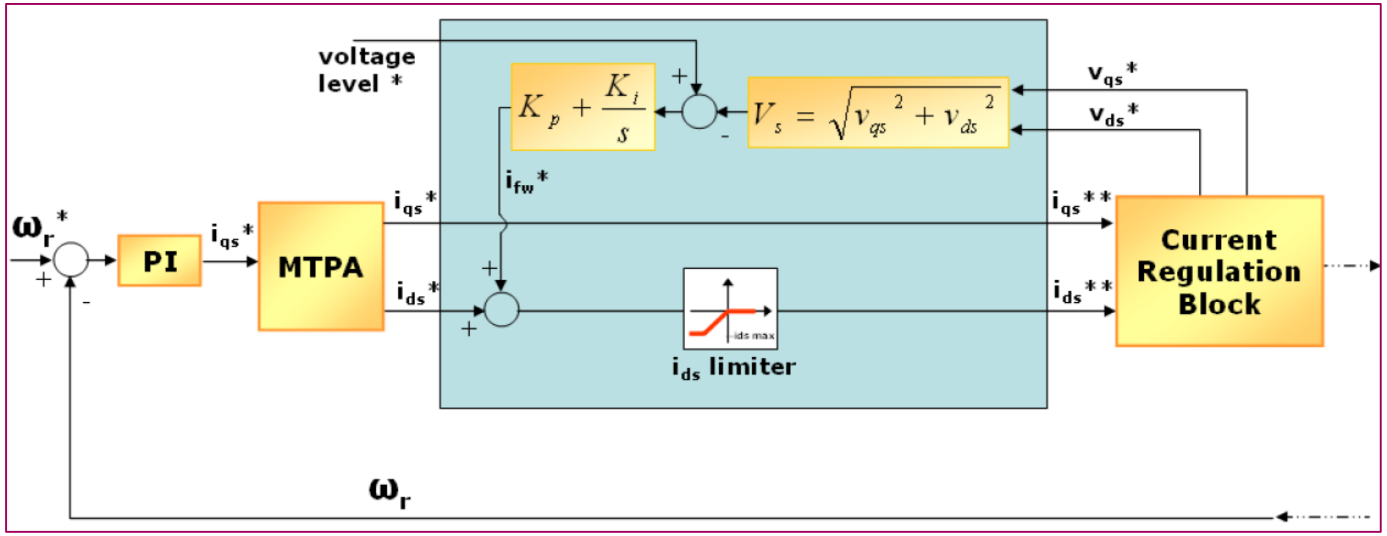
弱磁控制

- 很多应用需要马达工作在高于额定速度的范围内，这里就需要弱磁控制来实现
- 电流的电压约束条件

$$\left(L_q I_q\right)^2 + \left(k_E + L_d I_d\right)^2 \le \frac{{U_{1-limit}}^2}{{\omega_e}^2}$$

- 电流幅值约束条件

$${I_d}^2 + {I_q}^2 \le {I_{s-limit}}^2$$

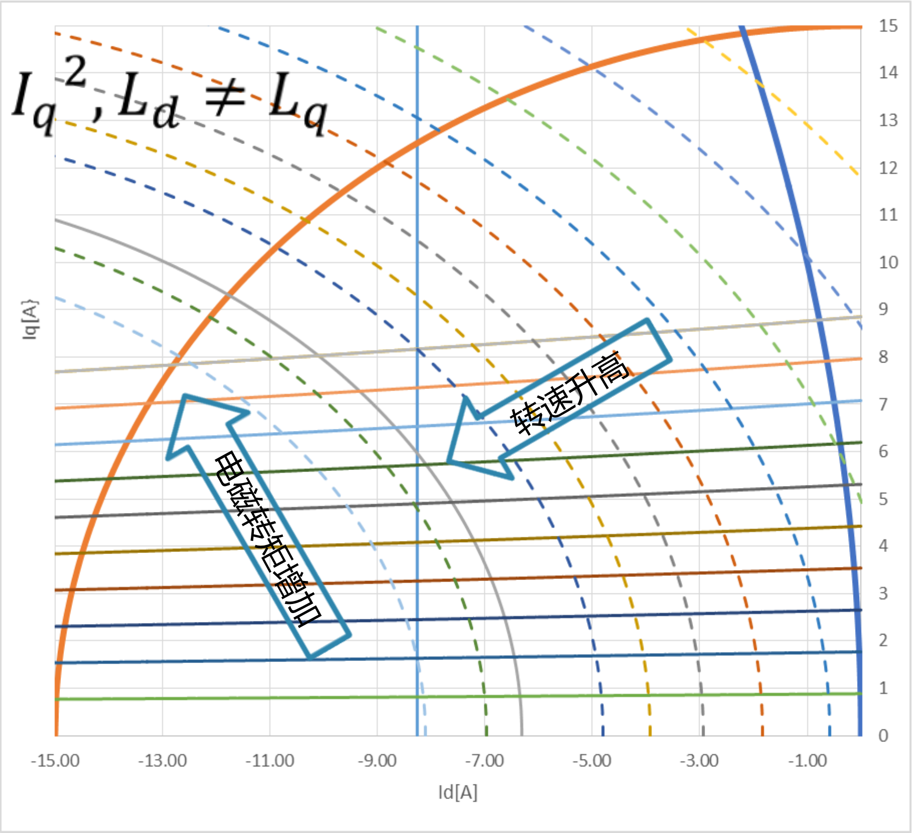


MTPA与弱磁控制

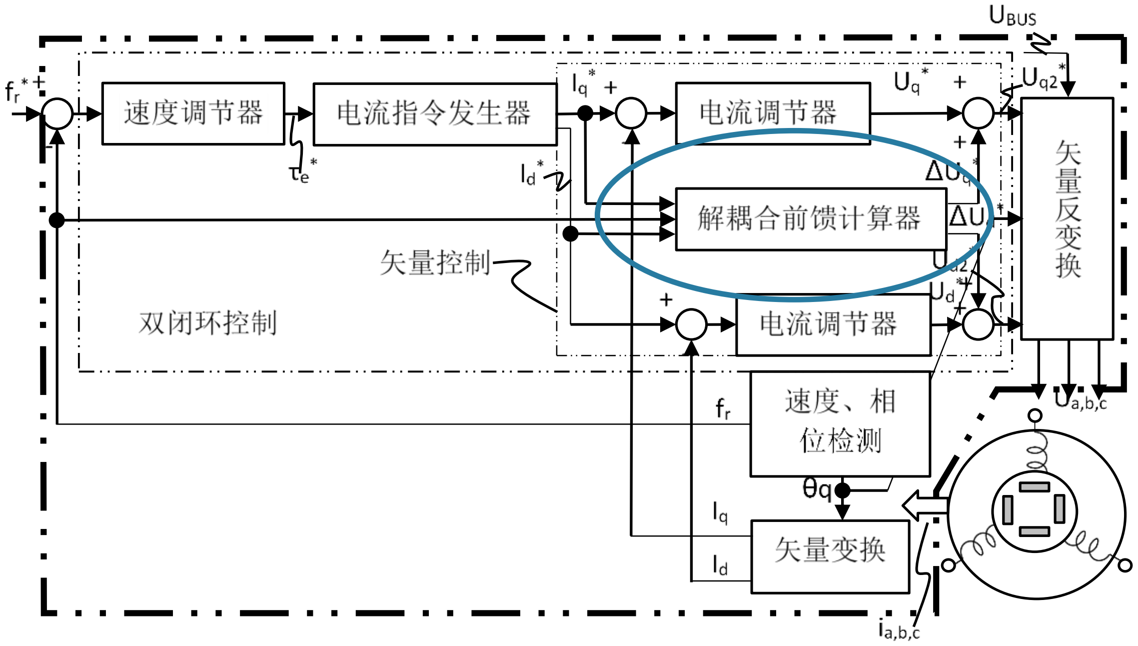
$$\text{MTPA:}I_d=\begin{cases}-\frac{k_E}{2(L_d-L_q)}+sign(L_d-L_q)\sqrt{\left(\frac{k_E}{2(L_d-L_q)}\right)^2+{I_q}^2}, L_d\neq L_q\\ 0, L_d=L_q\end{cases}$$

$$sign(x)=\begin{cases}1, x>0\\ 0, x=0\\ -1, x<0\end{cases}$$

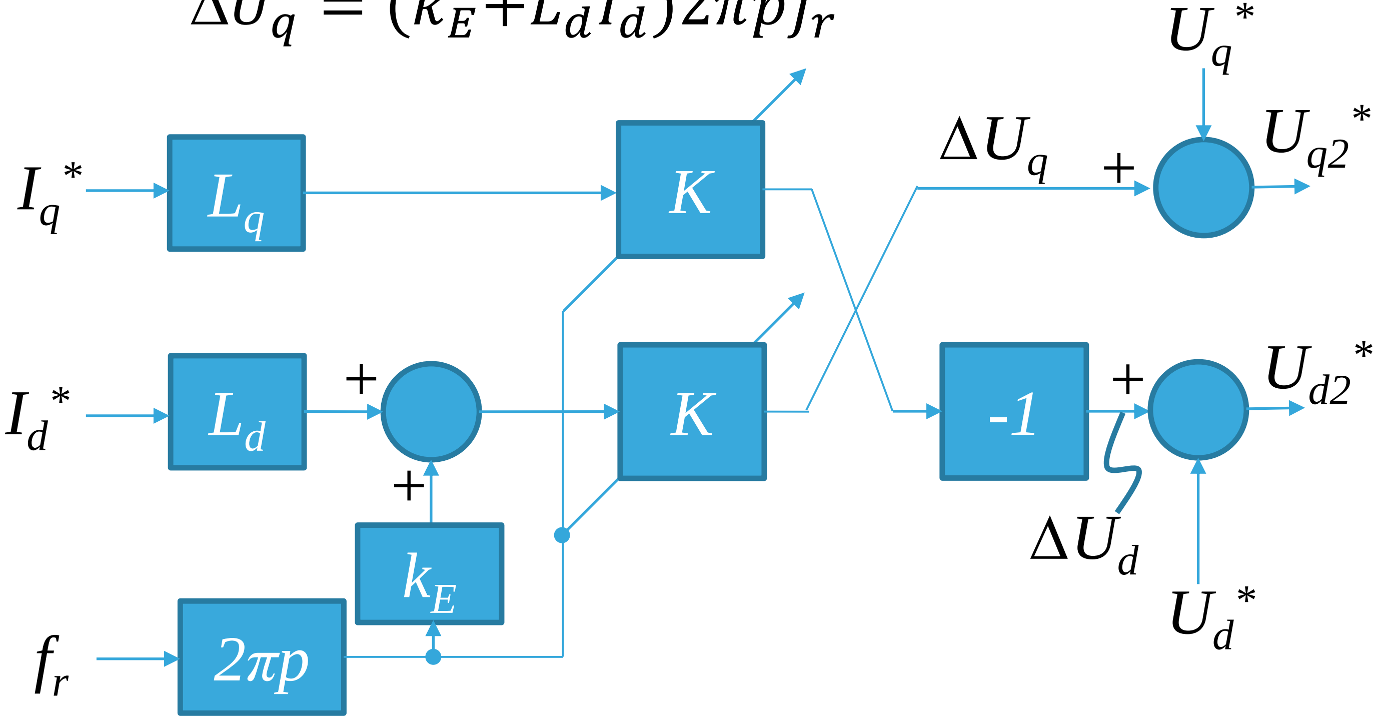
$$\text{弱磁: }I_d=\begin{cases}-\frac{k_E}{L_d}+\frac{\sqrt{\left(\frac{U_{1-limit}}{\omega_e}\right)^2-(L_qI_q)^2}}{L_d}, \frac{U_{1-limit}}{\omega_e}\geq L_qI_d\\ n/a, \frac{U_{1-limit}}{\omega_e}<L_qI_d\end{cases}$$



电流前馈



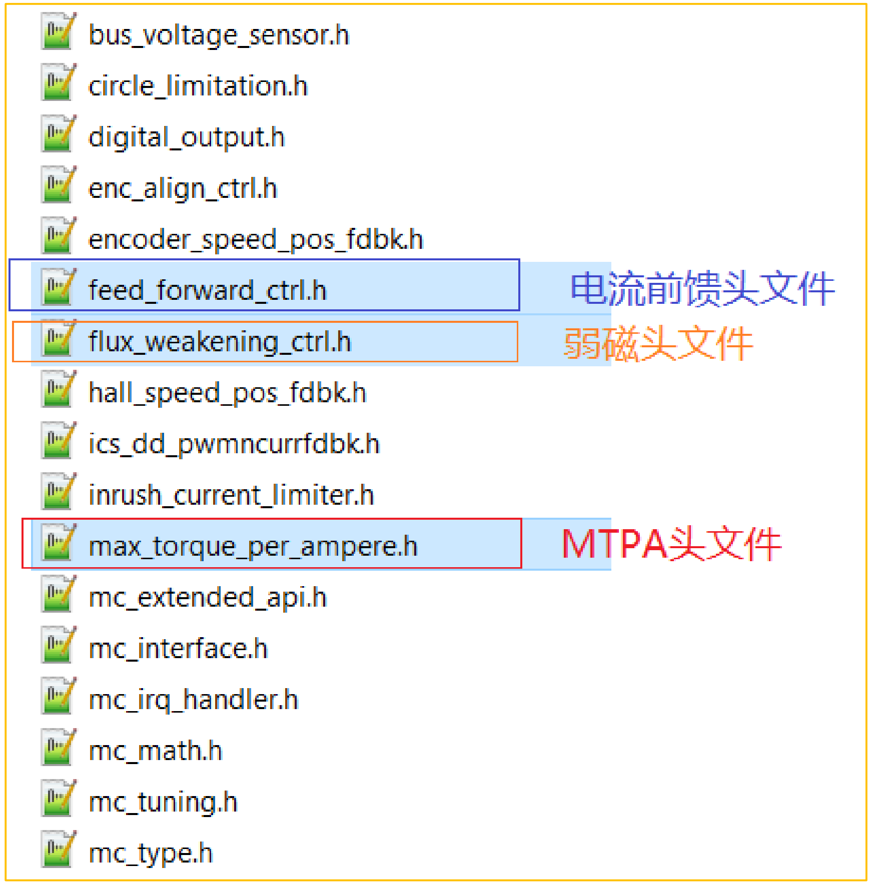
$$\Delta U_d = -L_q I_q 2\pi p f_r$$
$$\Delta U_q = (k_E + L_d I_d) 2\pi p f_r$$



ST MC SDK5.x对特别算法的实现

- 库里面的特别算法以库函数方式存在，文件夹如下：
  - ✓ xxx\MCSDK_v5.2.0\MotorControl\lib

- 头文件名如下：
  - ✓ max_torque_per_ampere.h
  - ✓ flux_weakening_ctrl.h
  - ✓ feed_forward_ctrl.h



life.augmented

Releasing your creativity

- Thank you -

重要通知 – 请仔细阅读

意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对ST 产品和/ 或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关ST 销售条款。

买方自行负责对ST 产品的选择和使用， ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和ST 徽标是ST 的商标。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。

版权声明

life.augmented