

## 相关知识点复习

---

1. 静止的  $\alpha$ 、 $\beta$  坐标系；
2. 旋转的  $\alpha$ 、 $\beta$  坐标系；
3. 同步旋转的  $d$ 、 $q$  坐标系；
4. 同步旋转的、磁场定向的  $m$ 、 $t$  坐标系；

## 6.6 异步电动机按转子磁链定向的矢量控制系统

---

- 由于变换的是矢量，所以这样的坐标变换也可称作矢量变换，相应的控制系统称为矢量控制（**Vector Control** 简称**VC**）系统或按转子磁链定向控制（**Flux Orientation Control** 简称**FOC**）系统。

## 6.6.1 按转子磁链定向的同步 旋转正交坐标系状态方程

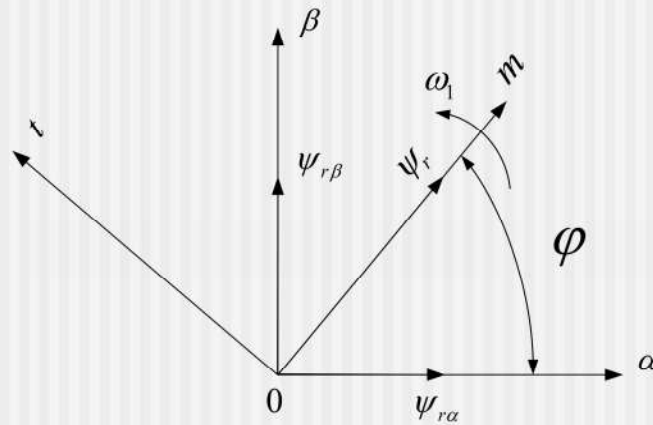


图6-17 静止正交坐标系与按转子磁链定向的同步旋转正交坐标系

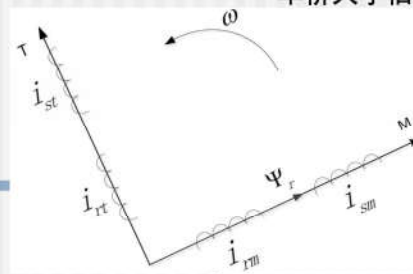
### M轴方程：

电压方程：

$$u_{rm} = R_r i_{rm} + \frac{d\psi_{rm}}{dt} \rightarrow 0 = R_r i_{rm} + \frac{d\psi_r}{dt} \rightarrow i_{rm} = -\frac{p\psi_r}{R_r}$$

磁链方程：

$$\begin{aligned} \psi_r &= L_m i_{sm} + L_r i_{rm} = L_m i_{sm} + L_r \left( -\frac{p\psi_r}{R_r} \right) \\ &= L_m i_{sm} - \frac{L_r}{R_r} p\psi_r = L_m i_{sm} - T_r p\psi_r \\ &\rightarrow \psi_r (1 + T_r p) = L_m i_{sm} \rightarrow \psi_r = \frac{L_m i_{sm}}{(1 + T_r p)} \end{aligned}$$



## T轴方程：

### 电压方程：

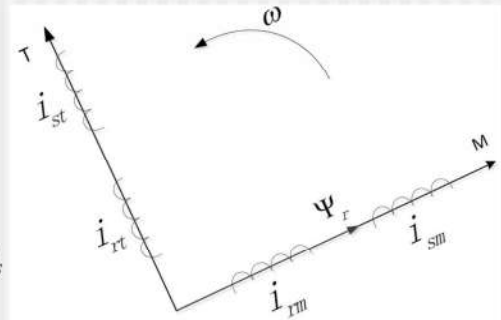
$$u_{rt} = R_r i_{rt} + \frac{d\psi_{rt}}{dt} + (\omega_l - \omega)\psi_{rm} \rightarrow 0 = R_r i_{rt} + 0 + \omega_s \psi_r$$

$$\rightarrow i_{rt} = -\frac{\psi_r}{R_r} \omega_s$$

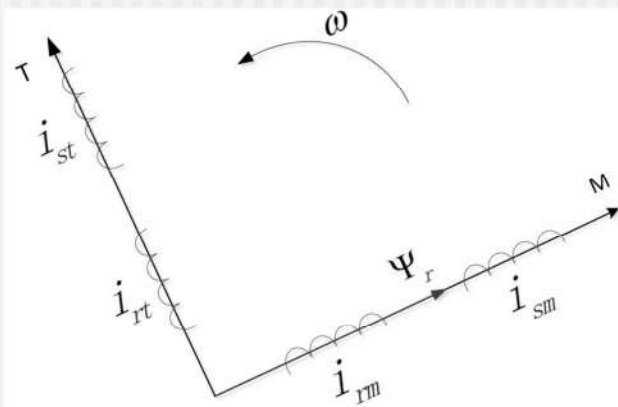
### 磁链方程：

$$\psi_{rt} = L_m i_{st} + L_r i_{rt}$$

$$i_{st} = -\frac{L_r}{L_m} i_{rt} = \frac{L_r}{L_m} \left( \frac{\psi_r}{R_r} \omega_s \right) = \frac{T_r}{L_m} \psi_r \omega_s$$



## 转矩方程



$$T = -n_p i_{rt} \psi_r = n_p \frac{L_m i_{st}}{L_r} \psi_r = n_p \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{st}$$

## 重要结论：

$$\psi_r = \frac{L_m i_{sm}}{(1 + T_r p)}$$

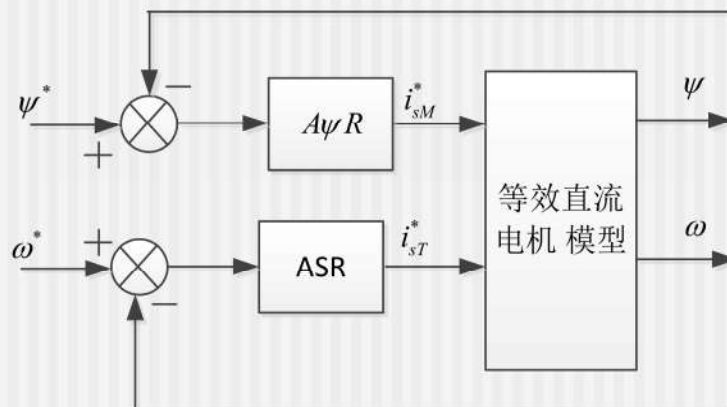
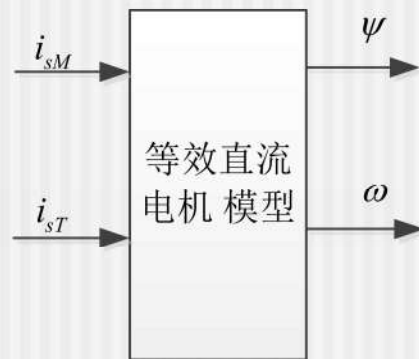
$$\psi_r = L_m i_{sm} \quad (\psi_r \text{ 为常量})$$

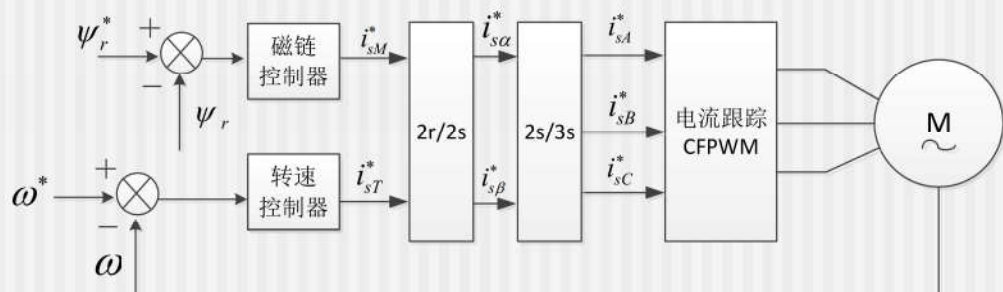
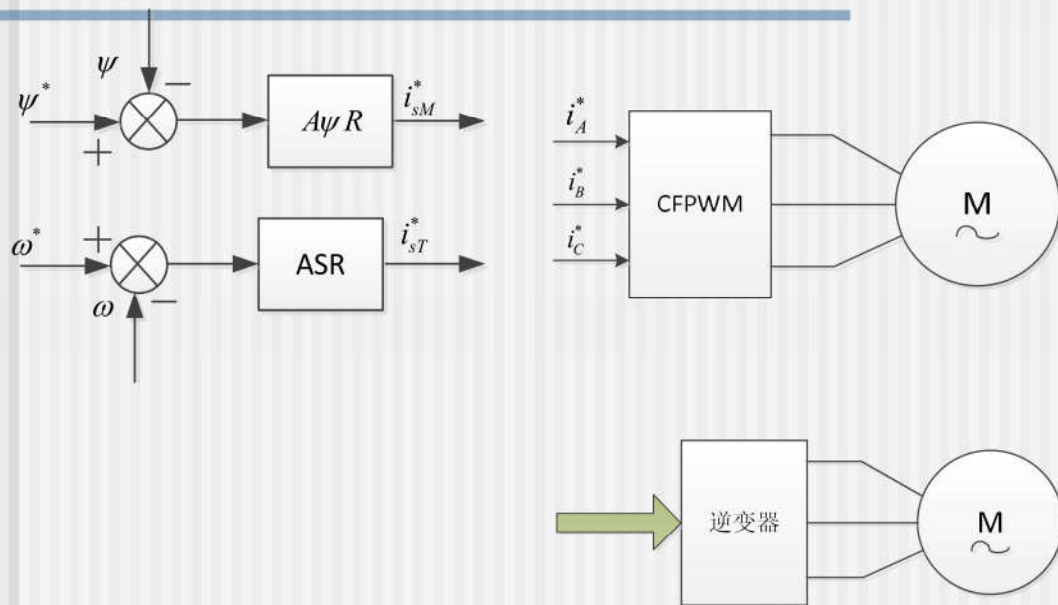
$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sT} = K_t i_{sT}$$

$$T_e = K_t i_{sT}$$

## 6.6.1 按转子磁链定向的同步 旋转正交坐标系状态方程

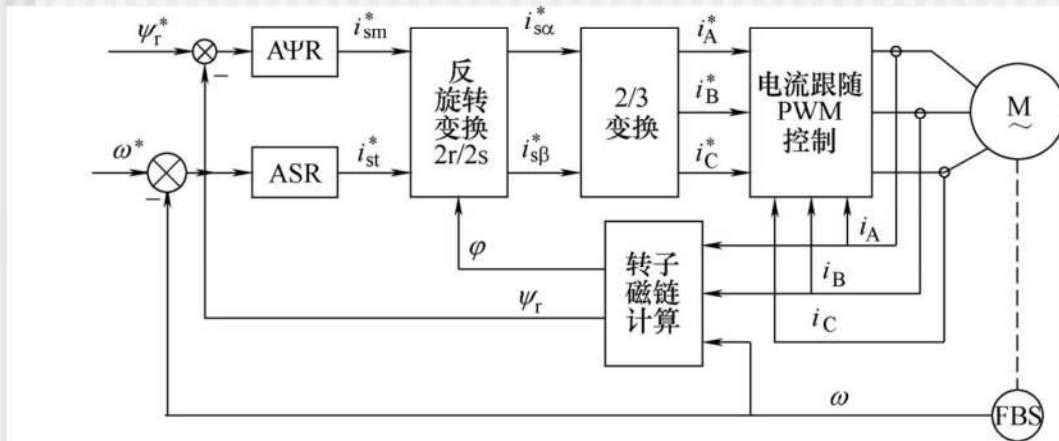
- 通过按**转子磁链定向**，将定子电流分解为励磁分量和转矩分量，转子磁链仅由定子电流励磁分量产生，电磁转矩正比于转子磁链和定子电流转矩分量的乘积，**实现了定子电流两个分量的解耦**。
- 在按转子磁链定向同步旋转正交坐标系中的异步电动机数学模型与直流电动机动态模型相当。



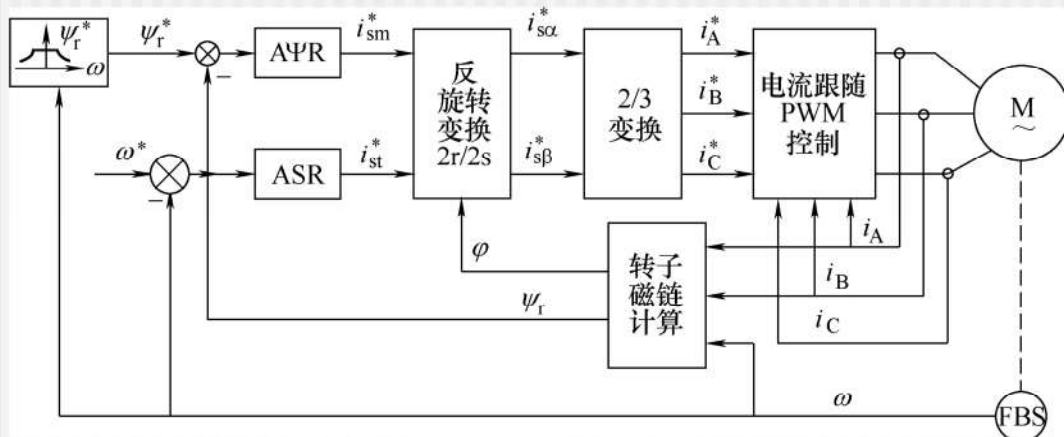




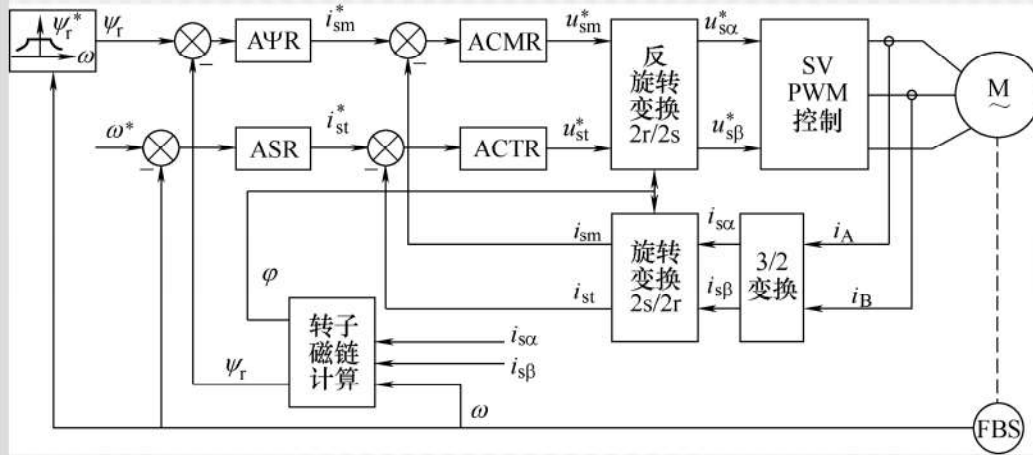
## 闭环矢量控制-CFPWM



## 闭环矢量控制-CFPWM



## 闭环矢量控制-SVPWM



## 转子磁链的求取

思路:

方法一、测量方法

1. 在电机槽内埋设探测线圈;
2. 贴在定子内表面通过霍尔元件检测;

缺点:

无法克服齿槽的影响, 脉动大。



## 转子磁链的计算

方法二、通过计算求取

- 一、直接定向
  - 1、 $\alpha$ 、 $\beta$  坐标轴电流模型
  - 2、 $m$ 、 $t$  坐标轴电流模型
  - 3、电压模型

二、间接定向

转差频率法

## $\alpha$ 、 $\beta$ 坐标轴上的电流模型

$$u_{r_s} + e = 0$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega\psi_{r\beta} + u_{r_s} = 0$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega\psi_{r\beta} + R_r i_{r\alpha} = 0$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega\psi_{r\beta} + R_r \frac{\psi_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}}{L_r} = 0$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega\psi_{r\beta} + \frac{\psi_{r\alpha}}{R_r} - \frac{L_m i_{s\alpha}}{R_r} = \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega\psi_{r\beta} + \frac{\psi_{r\alpha}}{T_r} - \frac{L_m i_{s\alpha}}{T_r} = 0$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -\omega\psi_{r\beta} - \frac{\psi_{r\alpha}}{T_r} + \frac{L_m i_{s\alpha}}{T_r}$$

## $\alpha$ 、 $\beta$ 坐标轴上的电流模型

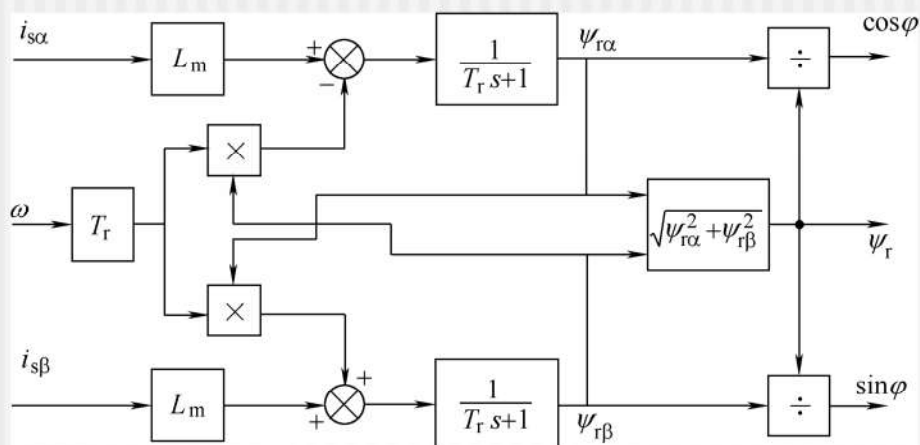
$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -\omega\psi_{r\beta} - \frac{\psi_{r\alpha}}{T_r} + \frac{L_m i_{s\alpha}}{T_r}$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = -\omega\psi_{r\alpha} - \frac{\psi_{r\beta}}{T_r} + \frac{L_m i_{s\beta}}{T_r}$$

$$\psi_{r\alpha} = \frac{1}{T_r s + 1} (L_m i_{s\alpha} - \omega T_r \psi_{r\beta})$$

$$\psi_{r\beta} = \frac{1}{T_r s + 1} (L_m i_{s\beta} - \omega T_r \psi_{r\alpha})$$

## $\alpha$ 、 $\beta$ 坐标轴上的电流模型



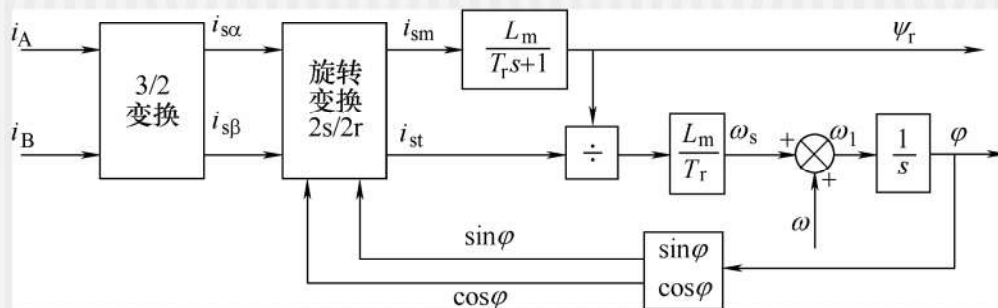
## $m$ 、 $t$ 坐标轴上的电流模型

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -\omega\psi_{r\beta} - \frac{\psi_{r\alpha}}{T_r} + \frac{L_m i_{s\alpha}}{T_r} \quad \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = -\omega\psi_{r\alpha} - \frac{\psi_{r\beta}}{T_r} + \frac{L_m i_{s\beta}}{T_r}$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} = -\frac{1}{T_r}\psi_r + \frac{L_m}{T_r}i_{sm} \rightarrow (1 + \frac{1}{T_r})\psi_r = \frac{L_m}{T_r}i_{sm} \rightarrow \psi_r = \frac{\frac{L_m}{T_r}i_{sm}}{(1 + \frac{1}{T_r})}$$

$$\psi_r = \frac{L_m i_{sm}}{(T_r + 1)}$$

$$\omega_1 = \omega + \frac{L_m}{T_r \psi_r} i_{st} \quad (\Delta\omega = \omega_1 - \omega = \frac{L_m}{T_r \psi_r} i_{st} \rightarrow \omega_1 = \omega + \frac{L_m}{T_r \psi_r} i_{st})$$



## 电压模型计算转子磁链

$$\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = -R_s i_{s\alpha} + u_{s\alpha}$$

$$\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = -R_s i_{s\beta} + u_{s\beta}$$

$$\psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}$$

$$\psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}$$

$$\psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha}$$

$$\psi_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta}$$

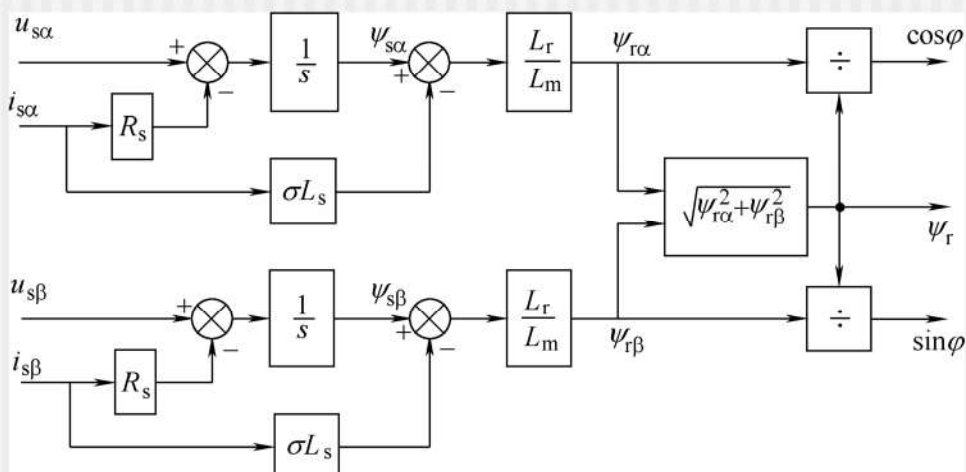
$$\psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m} \left[ \int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt - \sigma L_s i_{s\alpha} \right]$$

$$\psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m} (\psi_{s\alpha} - \sigma L_s i_{s\alpha})$$

$$\psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m} \left[ \int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt - \sigma L_s i_{s\beta} \right]$$

$$\psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m} (\psi_{s\beta} - \sigma L_s i_{s\beta})$$

## 电压模型计算转子磁链



## 转子磁链的计算

方法二、通过计算求取

- 一、直接定向
  - 1、 $\alpha$ 、 $\beta$  坐标轴电流模型
  - 2、 $m$ 、 $t$  坐标轴电流模型
  - 3、电压模型

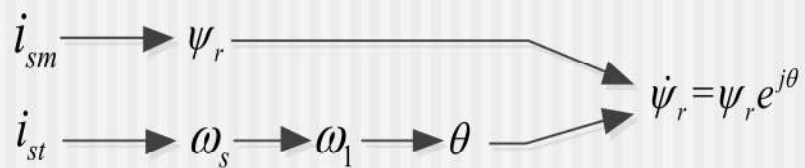
二、间接定向

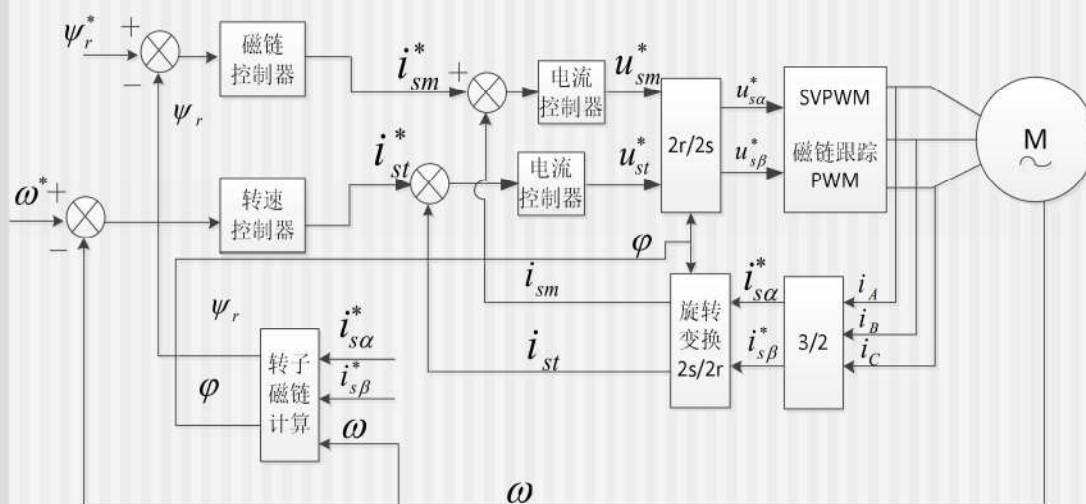
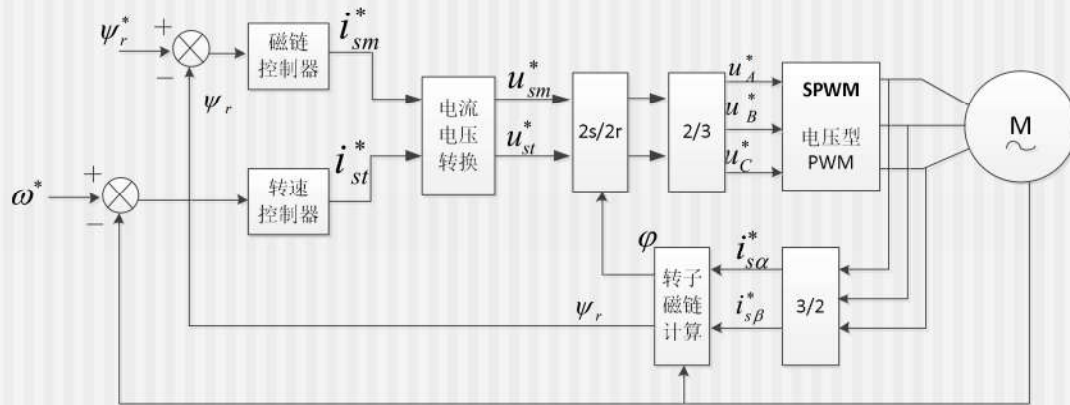
转差频率法

## 转差频率转子磁链定向（间接定向）

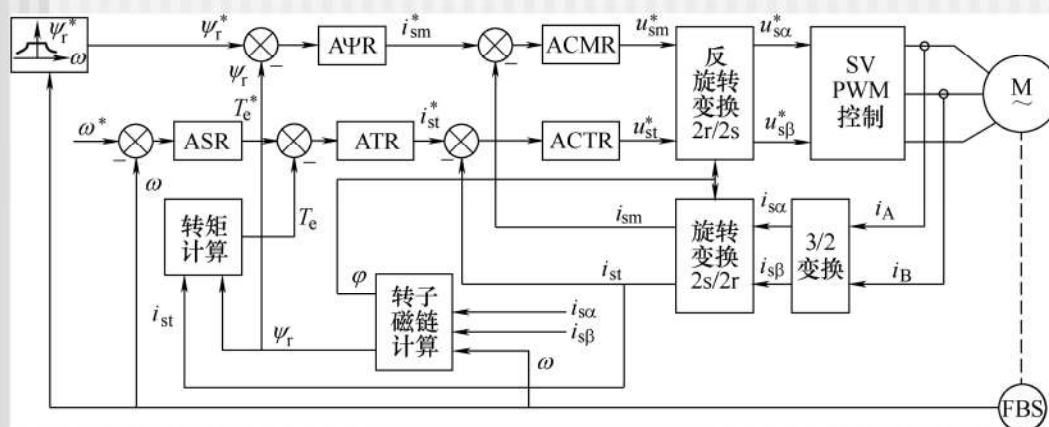
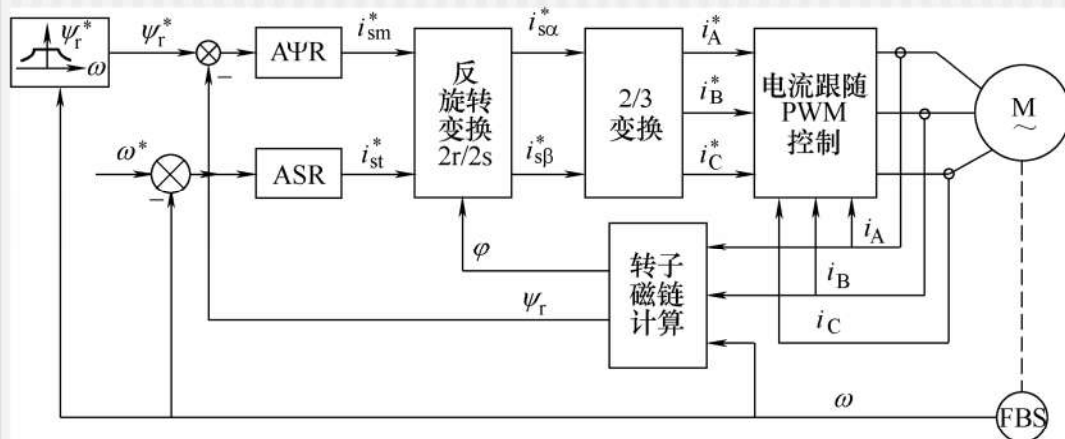
$$\psi_r = L_m i_{sm}$$

$$\omega_s = \omega_1 - \omega = \frac{L_m}{T_r \psi_r} i_{st}$$









**图6-23** 三相电流闭环控制的矢量控制系统结构图

# 电流闭环控制

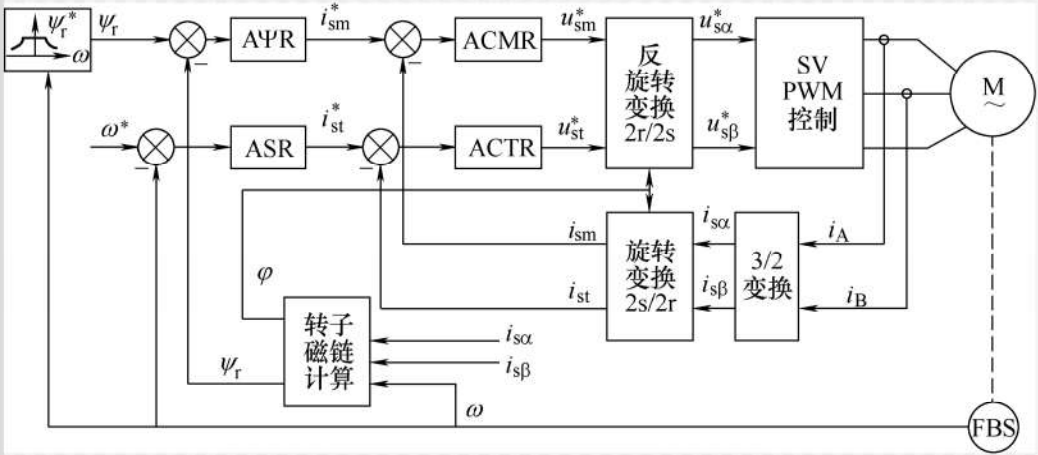


图6-24 定子电流励磁分量和转矩分量闭环控制的矢量控制系统结构图

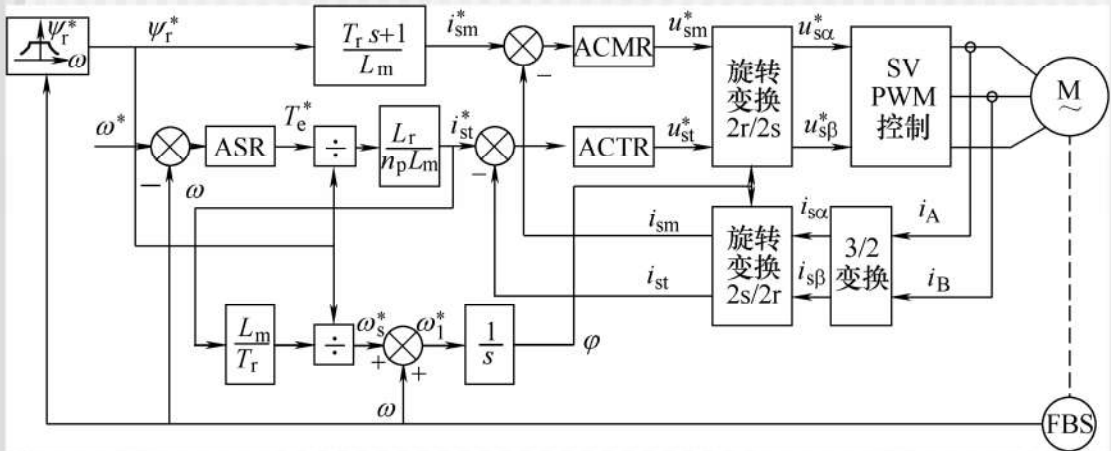


图6-32 磁链开环转差型矢量控制系统