



浙江大学电气工程学院

电机与拖动

主讲：卢琴芬

6

三相感应电动机转子转动时的运行分析

转子转动时的物理情况

1、转子转动时的转子频率

转子转速为 n ，且与 n_1 同向，气隙旋转磁场 B_m 切割转子绕组的速度

$$\Delta n = n_1 - n = Sn_1$$

感应电动势的频率 $f_2 = \frac{p\Delta n}{60} = \frac{pSn_1}{60} = Sf_1$

2、转子转动时的转子基波磁动势

$$\dot{E}_{2S} \Rightarrow \dot{I}_{2S} \Rightarrow F_{2S}$$

幅值： $F_{2S} = \frac{m_2}{2} 0.9 \frac{N_2 k_{w2}}{p} I_{2S}$

转速： $n_{2S} = \frac{60f_2}{p} = S \frac{60f_1}{p} = Sn_1$

方向：超前相电流绕组轴线到滞后相绕组轴线

$a-b-c$, 与 n_1 方向一致

- 转子磁动势对定子的转速 $n_{2s}' = n + n_{2s} = n + Sn_1 = n_1$

F_{2s} 与 F_1 仍然同步旋转，相对静止。

(无论转子速度为多少，两者始终静止)

磁动势平衡方程式

$$F_m = F_{2s} + F_1$$

- 由于定转子电流频率不相同，所以

$$\dot{I}_m \neq \frac{\dot{I}_{2s}}{k_i} + \dot{I}_1$$

3、定、转子回路的电动势平衡方程式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m$$

$$E_{2S} = 4.44 f_2 N_2 k_{w2} \Phi_m = S 4.44 f_1 N_2 k_{w2} \Phi_m = S E_2$$

不能写成相量，
频率不相同

$$\dot{E}_{2S} = \dot{I}_{2S} Z_{2S} = \dot{I}_{2S} (r_{2s} + jX_{2\sigma S}) \Rightarrow \dot{E}_{2S} = \dot{I}_{2S} Z_{2S} = \dot{I}_{2S} (r_2 + jSX_{2\sigma})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{2s} = r_2 \text{ 不计集肤效应} \\ X_{2\sigma S} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = S 2\pi f_1 L_{2\sigma} = SX_{2\sigma} \end{array} \right.$$

由于定转子电动势频率不相同

$$\dot{E}_{2s} \neq S \dot{E}_2 \neq S \frac{\dot{E}_1}{k_e}$$

频率折算

频率折算：把转子实际频率 f_2 用其定子频率 f_1 来替代。

折算原则：替代前后保持电机的电磁本质不变

实际上：用一个等效的静止转子来代替转速 n 的转子

$$F_2 = F_{2S}$$



转向、转速、大小及空间相位完全相同

自然满足

替代要求

大小 $I_2 = I_{2S}$ \Rightarrow
$$I_{2S} = \frac{E_{2S}}{\sqrt{r_2^2 + (SX_{2\sigma})^2}} = \frac{SE_2}{\sqrt{r_2^2 + (SX_{2\sigma})^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{X_{2\sigma}^2 + \left(\frac{r_2}{S}\right)^2}}$$

空间相位 $\varphi_2 = \varphi_{2S}$

$$\varphi_{2S} = \arctan \frac{X_{2\sigma S}}{r_2} = \arctan \frac{X_{2\sigma}}{\left(\frac{r_2}{S}\right)}$$

$$I_{2S} = \frac{E_{2S}}{\sqrt{r_2^2 + (SX_{2\sigma})^2}} = \frac{SE_2}{\sqrt{r_2^2 + (SX_{2\sigma})^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{X_{2\sigma}^2 + \left(\frac{r_2}{S}\right)^2}}$$

$$\varphi_{2S} = \arctan \frac{X_{2\sigma}S}{r_2} = \arctan \frac{X_{2\sigma}}{\left(\frac{r_2}{S}\right)}$$

若将转差率为S的转子堵住，同时在转子每相中串入一个附加电阻 $\frac{1-S}{S}r_2$

使转子电阻变为 $r_2 + \frac{1-S}{S}r_2 = \frac{r_2}{S}$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{X_{2\sigma}^2 + \left(\frac{r_2}{S}\right)^2}} \quad \varphi_2 = \arctan \frac{X_{2\sigma}}{\left(\frac{r_2}{S}\right)}$$

 $F_2 = F_{2S}$

一个实际在转动的感应电机，可以当作静止不动的情况分析，只须在转子回路中每相增加一个附加电阻

转子转动后的的基本方程组:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{E}_2 &= \dot{I}_2 \left(\frac{r_2}{S} + jX_{2\sigma} \right) = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_2 \left(\frac{1-S}{S} r_2 \right) \\ \dot{I}_m &= \dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k_i} \\ \dot{E}_1 &= k_e \dot{E}_2 = -\dot{I}_m Z_m = -j4.44 f_1 N_1 k_{w1} \dot{\Phi}_m \end{aligned} \right.$$

附加电阻的物理意义:

实际转动时: 铜耗 $m_2 I_{2S}^2 r_2 + P_\Omega (P_2 + p_\Omega + p_\Delta)$

等效后: 铜耗 $m_2 I_{2S}^2 r_2 + m_2 I_2^2 \left(\frac{1-S}{S} r_2 \right)$

实质表征转动转子的总机械功率

是转差率的函数,
反映机械负载的大小
及感应电机的运行状态

转子绕组的折算

定子多相绕组 m_1, N_1, k_{w1}, p_1
转子多相绕组 m_2, N_2, k_{w2}, p_2 } $\Rightarrow m_1 \neq m_2, N_1 \neq N_2, k_{w1} \neq k_{w2},$

$\Rightarrow k_i \neq 1, k_e \neq 1$ 计算与绘图不方便, 不能导出等效电路

\Rightarrow 转子绕组折算: 保持电磁本质不变, 把转子绕组折算成定子绕组

1. 转子电流的折算值

$$F_2' = F_2 \Rightarrow \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_2' = \frac{m_2}{2} 0.9 \frac{N_2 k_{w2}}{p} I_2$$

$$\Rightarrow I_2' = I_2 / k_i$$

2. 转子电动势的折算值

$$\frac{\dot{E}_2'}{\dot{E}_2} = \frac{-j4.44 f_1 N_1 k_{w1} \dot{\Phi}_m}{-j4.44 f_2 N_2 k_{w2} \dot{\Phi}_m} = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} = k_e \quad \Rightarrow \quad \dot{E}_2' = k_e \dot{E}_2 = \dot{E}_1$$

3. 转子阻抗的折算值

$$m_1 I_2'^2 \left(\frac{r_2'}{S} \right) = m_2 I_2^2 \left(\frac{r_2}{S} \right) \quad \Rightarrow$$

电阻 $\frac{r_2'}{S} = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 \left(\frac{r_2}{S} \right) = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}} \right)^2 \left(\frac{r_2}{S} \right) = k_e k_i \left(\frac{r_2}{S} \right)$

$$\Rightarrow r_2' = k_e k_i r_2 \quad \frac{1-S}{S} r_2' = k_e k_i \left(\frac{1-S}{S} r_2 \right)$$

电抗 $m_1 I_2'^2 X_{2\sigma}' = m_2 I_2^2 X_{2\sigma} \quad \Rightarrow \quad X_{2\sigma}' = k_e k_i X_{2\sigma}$

阻抗 $Z_2' = r_2' + jX_{2\sigma}' = k_e k_i Z_2$

阻抗角 $\varphi_{2S}' = \arctan \left(X_{2\sigma}' / \left(\frac{r_2'}{S} \right) \right) = \arctan \left(X_{2\sigma} / \left(\frac{r_2}{S} \right) \right) = \varphi_{2S}$

感应电机的等值电路

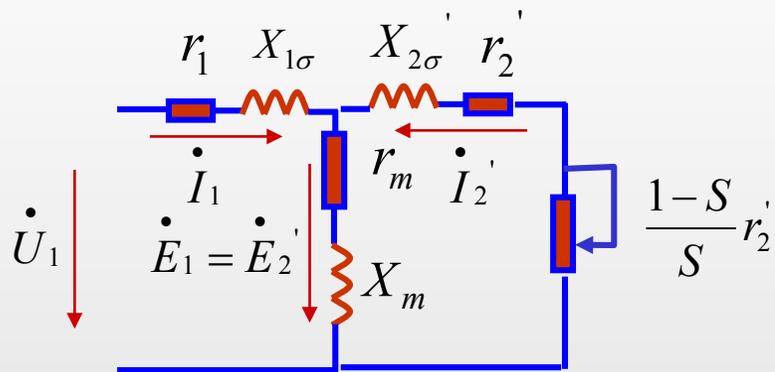
感应电机的基本方程组：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' \left(\frac{r_2'}{S} + jX_{2\sigma}' \right) = \dot{I}_2' Z_2' + \dot{I}_2' \left(\frac{1-S}{S} r_2' \right)$$

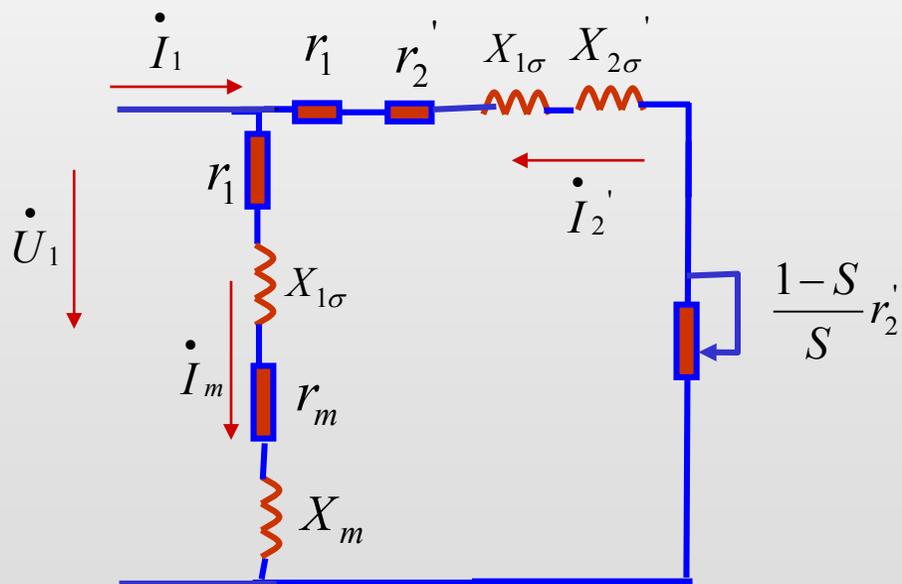
$$\dot{I}_m = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2' = -\dot{I}_m Z_m = -j4.44 f_1 N_1 k_{w1} \dot{\Phi}_m$$



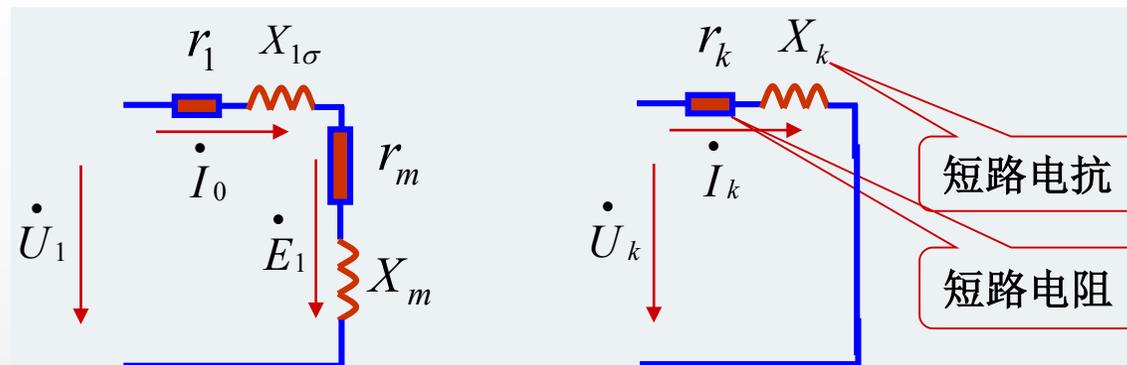
“T”形等效电路

Z_1 小，空载到额定负载，
 $Z_1 I_1$ 压降不大，
 $E_1 \approx U_1 \Rightarrow \Phi_m$ 不变，
 $I_m \approx I_0$ 基本不变



简化等效电路

工程上较实用，
 参数可以试验测出

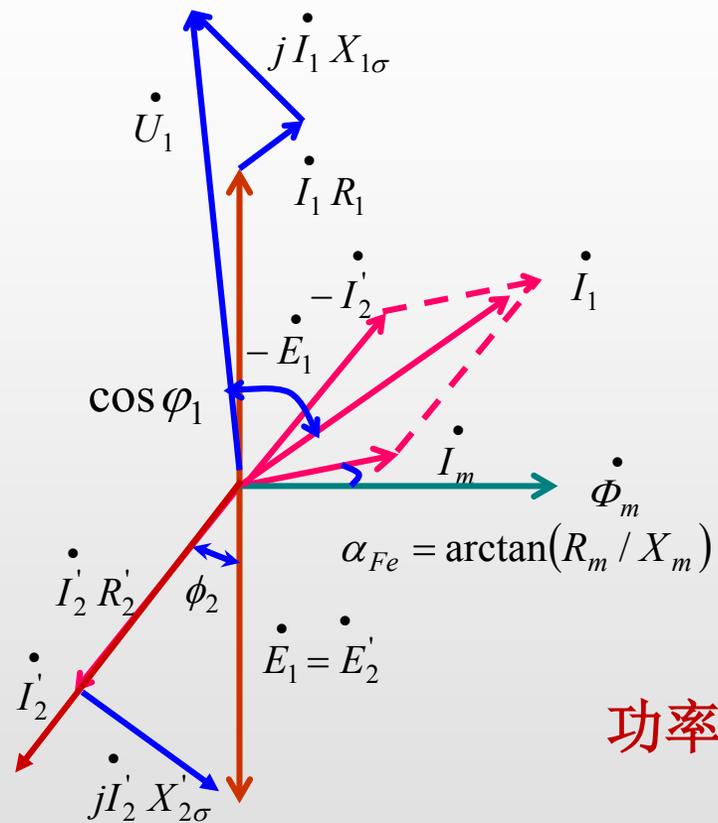


① 空载: $n \approx n_1, S \approx 0, \frac{1-S}{S} r_2' \rightarrow \infty,$
转子开路, $\cos\varphi_0$ 很低

② 堵住(起动) : $n = 0, S = 1, \frac{1-S}{S} r_2' = 0,$
视励磁支路断开

③ 运行于额定状态, $S_N < 5\%, \frac{r_2'}{S} > 20r_2',$ 转子支路呈电阻性,
提高定子边的 $\cos\varphi_1,$ 可达80% ~ 85%.

感应电机的相量图

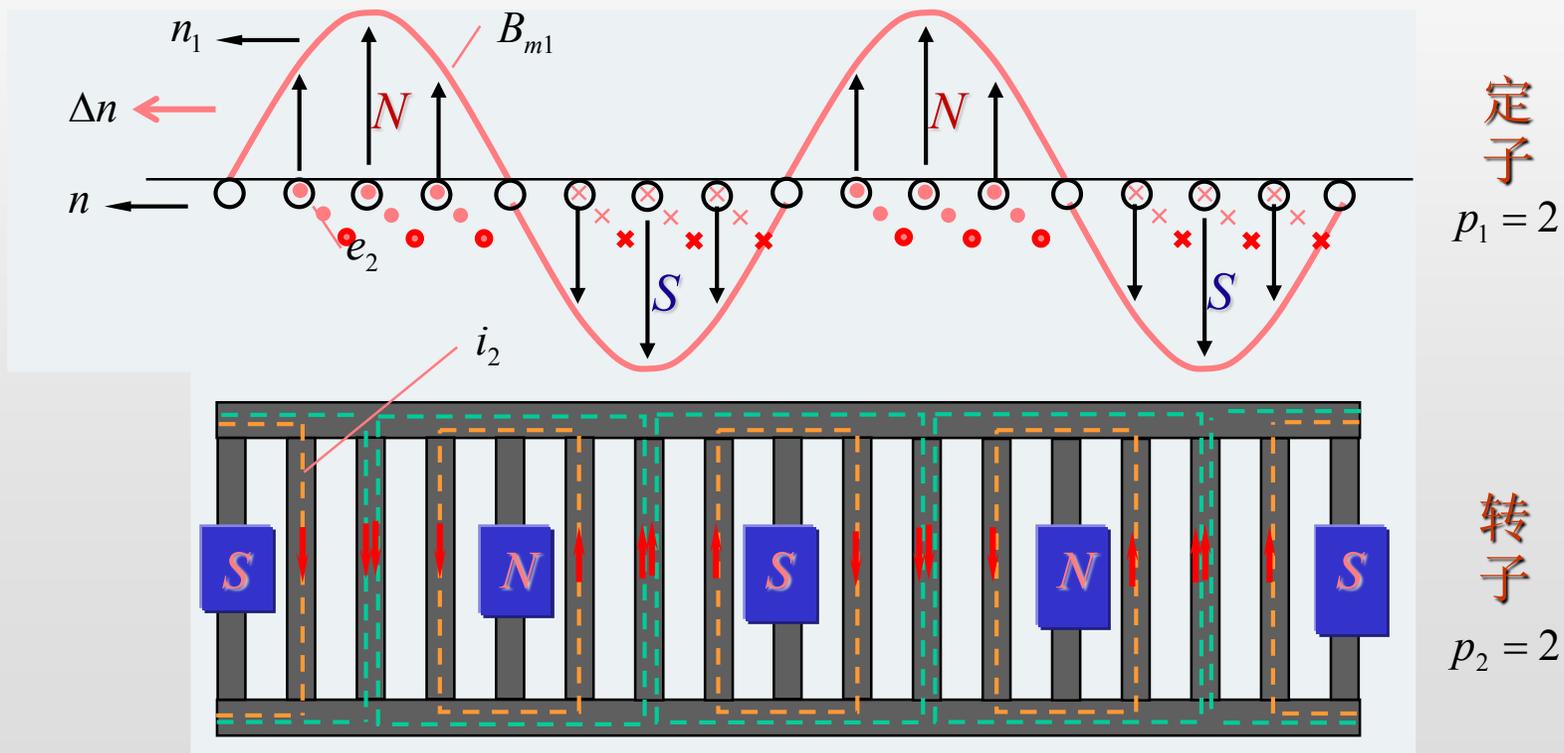


功率因数是滞后的

笼型转子的绕组数据

1. 笼型转子的极数

笼型绕组没有固定的极数，它的极数自动保持与定子绕组极数相等，与转子导条数无关，即 $p_1 = p_2$



定子

$$p_1 = 2$$

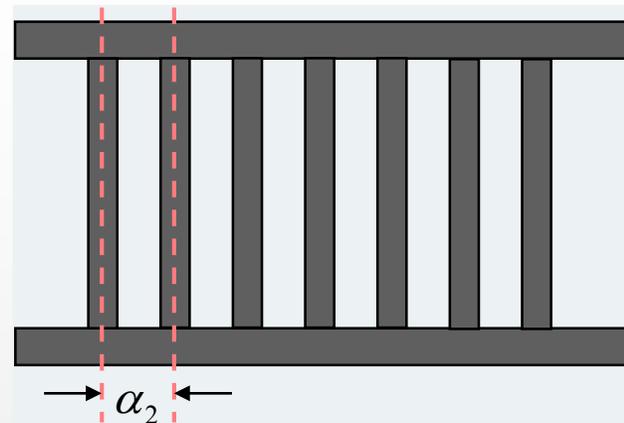
转子

$$p_2 = 2$$

2. 笼型转子的相数、匝数和绕组系数

每槽一根导体，转子导条数=槽数 z_2 ,

$$\alpha_2 = \frac{p \cdot 360^\circ}{z_2}$$



感应电动势大小相等，频率相同，存在一个相位差 α_2

⇒ z_2 相对称 ⇒ $m_2 = z_2$

每相一根导体， $N_2=1/2$

每相并联支路数 $a_2=1$

绕组系数 $k_{w2} = 1$



浙江大学电气工程学院

T H A N K S

主讲：浙江大学卢琴芬