

自动控制实践 异步电机的主要特性

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 伊国兴



交流绕组的感应电势

❖ 正弦磁场下交流绕组的感应电动势

➤ 导体的感应电动势

电动势的波形

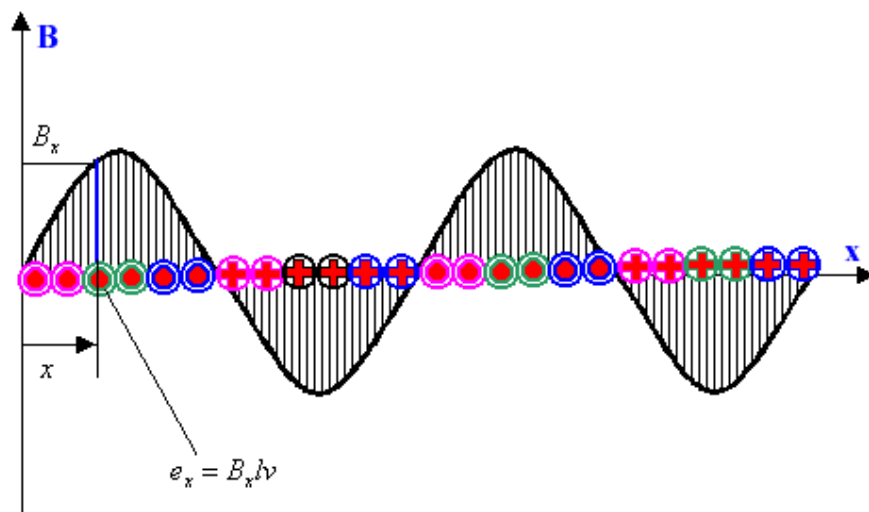
$$e = blv = B_1lv \sin \omega t = \sqrt{2}E_1 \sin \omega t$$

感应电动势的频率

$$f = \frac{pn_s}{60}$$

同步转速

$$n_s = \frac{60f}{p}$$



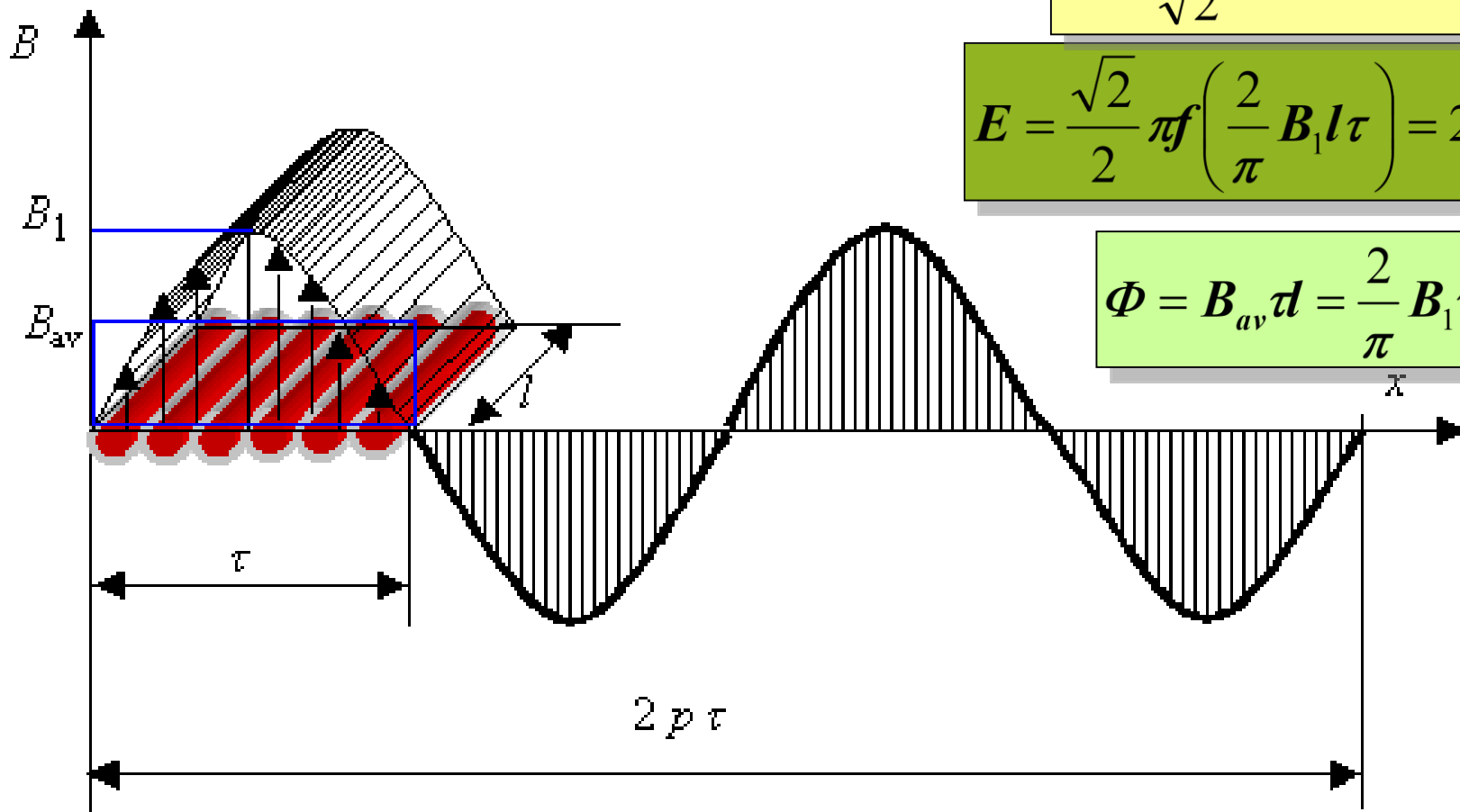
基本方程

❖ 导体电动势的有效值

$$E = \frac{B_1 l}{\sqrt{2}} 2\pi f = \sqrt{2} f B_1 \tau l$$

$$E = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi f \left(\frac{2}{\pi} B_1 l \tau \right) = 2.22 f \Phi_1$$

$$\Phi = B_{av} \tau l = \frac{2}{\pi} B_1 \tau l$$



基本方程

❖ 整距线圈的电动势

匝电势

$$\dot{E}_{c1} = \dot{E}'_1 - \dot{E}''_1 = 2\dot{E}'_1$$

单匝线圈电动势的有效值

$$E_{c1(N_c=1)} = 2E'_1 = 4.44 f \Phi_1$$

线圈有 N_c 匝，则线圈电动势为：

$$E_{c1} = 4.44 f N_c \Phi_1$$

基本方程

❖ 一个极相组的电动势为

$$E_{q1} = q \times 4.44 f N_c k_{p1} k_{d1} \Phi_1 = 4.44 f (q N_c) k_{w1} \Phi_1$$

- 以分布系数 k_{p1} 表征分布绕组矢量合成的感应电势；以短距系数 k_{d1} 表征短距绕组相对整距绕组感应电势的比值。
- qN_c 某相一个极下线圈总匝数；
- $k_{w1} = k_{p1} k_{d1}$ 绕组的基波绕组因数。
- k_{w1} 的意义：既考虑绕组短距、又考虑绕组分布时，整个绕组的合成电动势所须的总折扣。

基本方程

❖ 相电动势

$$E_{\phi 1} = 4.44 f N k_{w1} \Phi_1$$

N ：一相绕组总串联匝数

❖ 线电动势

$$E_{l1} = \sqrt{3} E_{\phi 1}$$

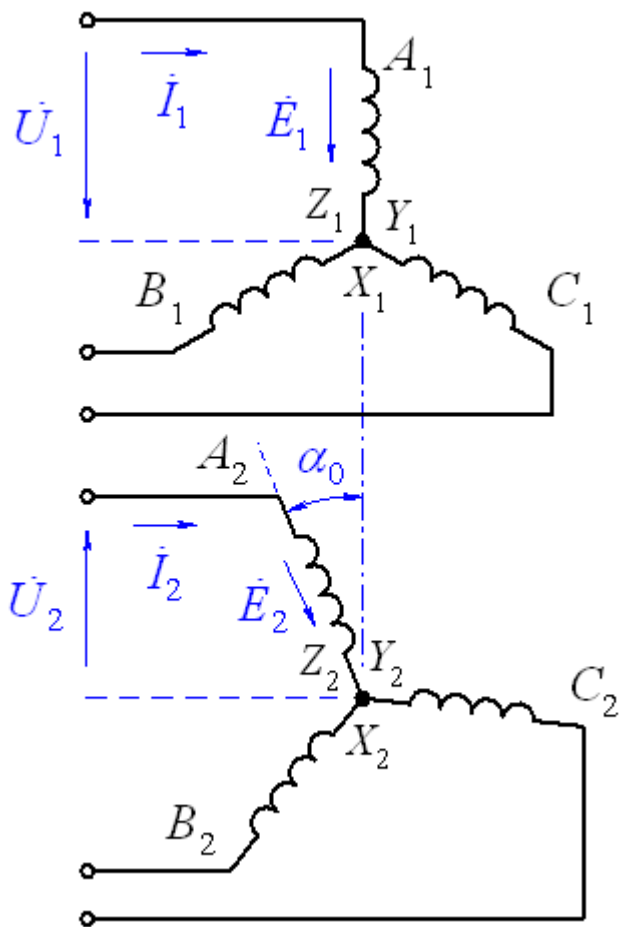
单个导体电动势 E_1	$2.22 f \Phi_1$
整距线圈电动势 E_{c1}	$4.44 f N_c \Phi_1$
短距线圈电动势 E_{c1}	$4.44 f N_c \Phi_1 k_{p1}$
分布线圈组电动势 E_{q1}	$4.44 f q N_c \Phi_1 k_{p1} k_{d1}$
相电动势 $E_{\phi 1} = 2p E_{q1} / a$	$4.44 f N k_{w1} \Phi_1$
线电动势	$E_{l1} = \sqrt{3} E_{\phi 1}$

三相异步电机的运行原理分析思路



- ❖ 先分析转子不转、转子绕组开路。
- ❖ 再分析转子绕组短路、转子堵转。
- ❖ 最后分析转子旋转。

三相异步电机转子不转时的电磁关系（绕组开路）



- ❖ 定子三相绕组接在交流三相对称电源上，定子绕组中流过三相对称电流 \dot{I}_0 。
- ❖ 三相电流产生基波旋转磁动势 F_0 。
 - 转子绕组开路，没有电流，所以此时磁路中只有定子磁动势 F_0 ，产生气隙磁场。
 - F_0 称为励磁磁动势, \dot{I}_0 称为励磁电流。

三相异步电机转子不转时的电磁关系（绕组开路）

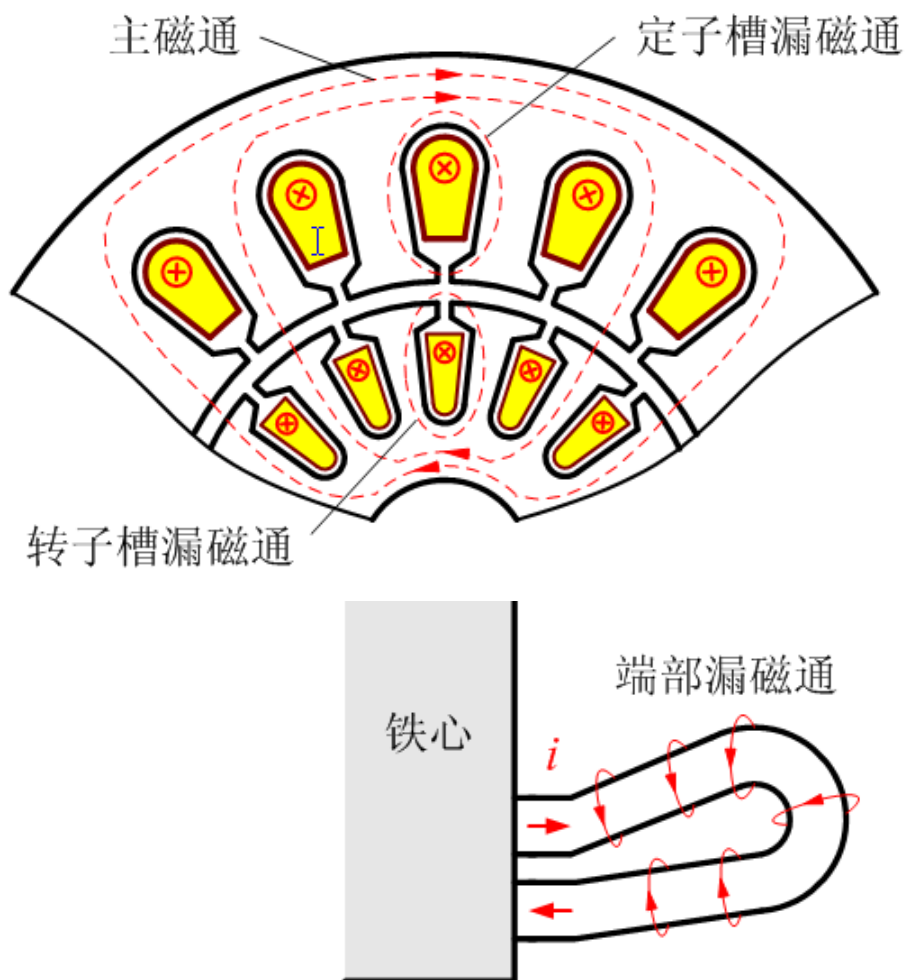


励磁磁动势产生的气隙磁场

- ◆ 励磁磁动势 F_0 作用在磁路中产生基波气隙磁场。
- ◆ 基波磁通密度在空间也按正弦分布，可用空间矢量 B_δ 表示，转速也为 ω_1 。
- ◆ 由于气隙均匀，当不计磁滞、涡流损耗时，基波气隙磁通密度与励磁磁动势波形相同，相位相同（ B_δ 与 F_0 同相）。
- ◆ 气隙中每极磁通量（主磁通）

$$\Phi_m = \frac{2}{\pi} B_\delta l_e \tau_p$$

三相异步电机转子不转时的电磁关系（绕组开路）



❖ 作用

- **主磁通**：同时交链定、转子绕组，起着定、转子间能量传递的媒介作用。
- **漏磁通**：只交链定子绕组自身，称定子漏磁通，包括槽漏磁通、端部漏磁通和谐波漏磁通。

三相异步电机转子不转时的电磁关系（绕组开路）

❖ 定子绕组的感应电动势（一相）

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = \omega_1 N_1 k_{w1} \Phi_m \sin(\omega_1 t - 90^\circ) = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega_1 t - 90^\circ)$$

❖ 转子绕组的感应电动势（一相）

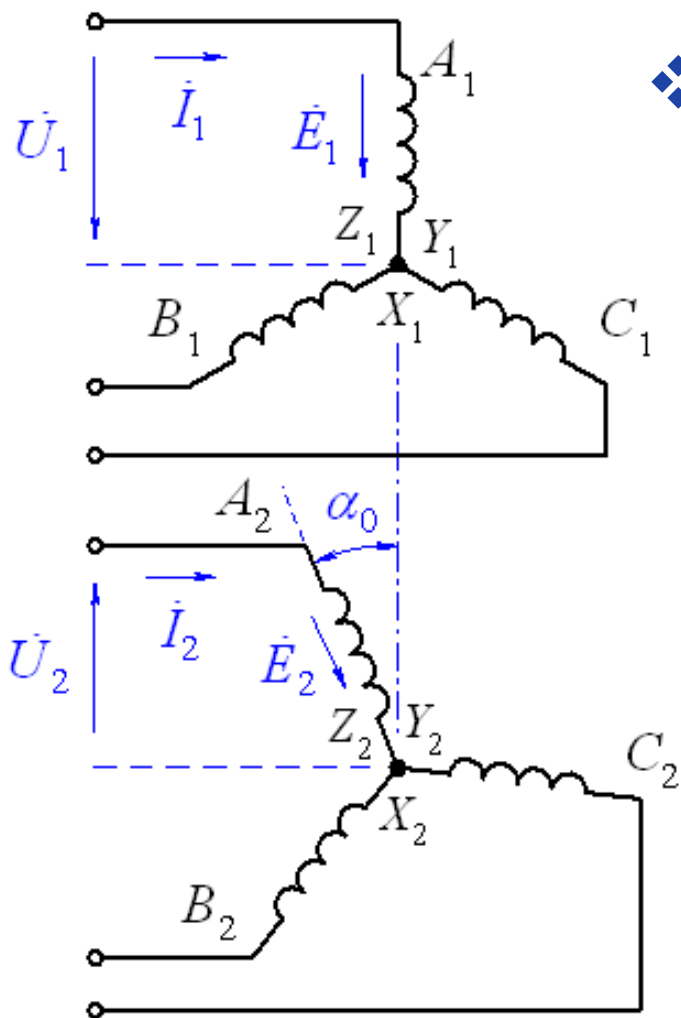
$$e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = \omega_1 N_2 k_{w2} \Phi_m \sin(\omega_1 t - \alpha_0 - 90^\circ) = \sqrt{2} E_2 \sin(\omega_1 t - \alpha_0 - 90^\circ)$$

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_{dp1}}{N_2 k_{dp2}}$$

❖ 比值 k_e 称为电压变比，是定、转子相电动势之比。

❖ k_e 等于定、转子绕组有效匝数之比。

三相异步电机转子不转时的电磁关系（绕组开路）



❖ 定、转子绕组一相电压方程式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2$$

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -jX_{\sigma 1} \dot{I}_0$$

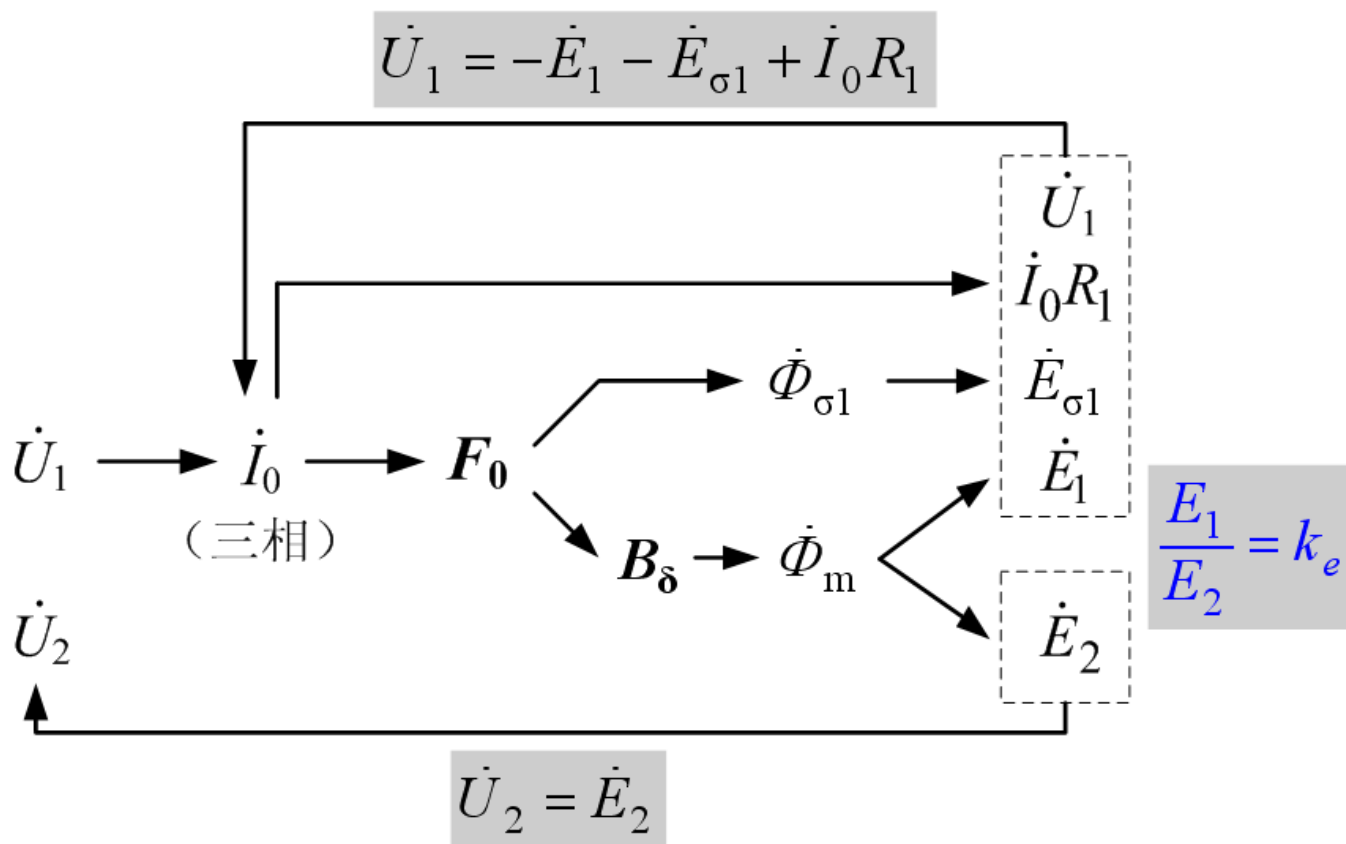


$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_{\sigma 1}) \dot{I}_0 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_0$$

$Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$ ，称为定子绕组每相漏阻抗。

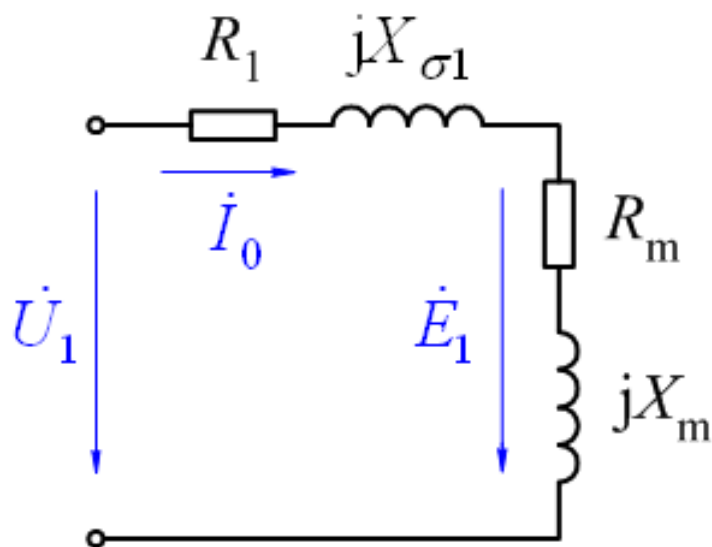
三相异步电机转子不转时的电磁关系（绕组开路）

❖ 转子绕组开路时的电磁关系



三相异步电机转子不转时的电磁关系（绕组开路）

❖ 等效电路

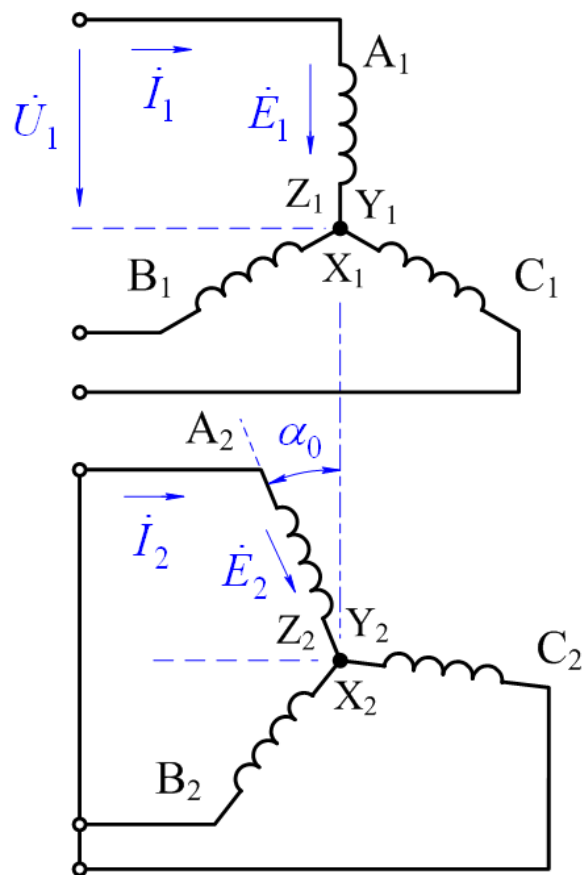


$$\dot{E}_1 = -Z_m \dot{I}_0 = -(R_m + jX_m) \dot{I}_0$$

- Z_m 称为励磁阻抗；
- X_m 称为励磁电抗，反映铁心磁路的磁化特性；
- R_m 称为励磁电阻，对应于铁耗 p_{Fe} 的等效电阻。

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 (Z_m + Z_1)$$

三相异步电机转子不转时的电磁关系（转子堵转）

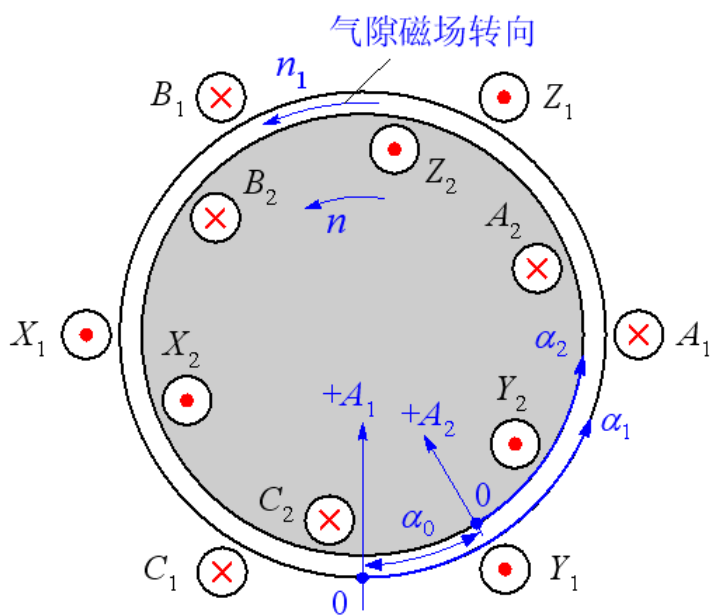


- 堵转：转子三相绕组短路（即绕组出线端短接），且转子堵住不转，定子接交流电源。

$$\dot{U}_2 = 0$$

转子中就会流过电流，产生转子磁动势，与定子磁动势共同起作用。

三相异步电机转子不转时的电磁关系（转子堵转）



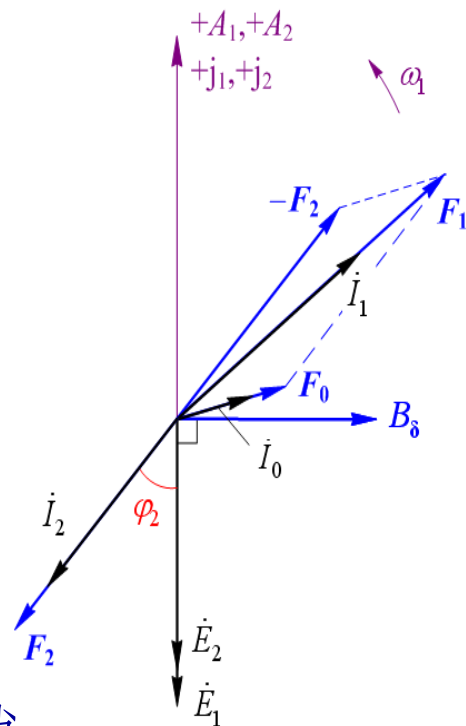
- ❖ 转子静止，气隙磁通密度波相对转子的转速为 n_1 ，方向为逆时针。
- ❖ 转子感应电动势的相序为 $A_2-B_2-C_2$ （正序）。
- ❖ 转子电流相序也为正序。
- ❖ 转子磁动势 F_2 由 $+A_2$ 轴转向 $+B_2$ 轴，再转向 $+C_2$ 轴（逆时针旋转）。

三相异步电机转子不转时的电磁关系（转子堵转）

- ❖ 定子磁动势 F_1 与转子磁动势 F_2 的转速、转向都相同，两者在空间保持相对静止。
- ❖ 作用在磁路中的磁动势是定、转子磁动势的合成，由合成磁动势产生气隙磁通密度波。
- ❖ 合成磁动势仍用 F_0 表示， F_0 是励磁磁动势。

$$F_0 = F_1 + F_2$$
$$F_1 = F_0 + (-F_2)$$

- ❖ 定子磁动势 F_1 可看作由两部分组成：
 - F_0 ：产生气隙磁通密度 B_δ 的磁动势分量。
 - $-F_2$ ：与转子磁动势 F_2 相反，抵消 F_2 对气隙磁通密度的影响。



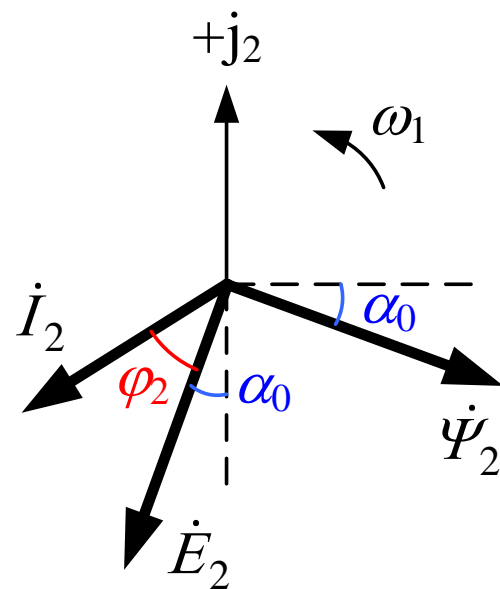
三相异步电机转子不转时的电磁关系（转子堵转）

❖ 转子一相电压方程式

转子感应电动势、电流的频率均为 f_1 。

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = 0$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{R_2 + jX_{\sigma 2}} = \frac{\dot{E}_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{\sigma 2}^2}} e^{-j\varphi_2}$$



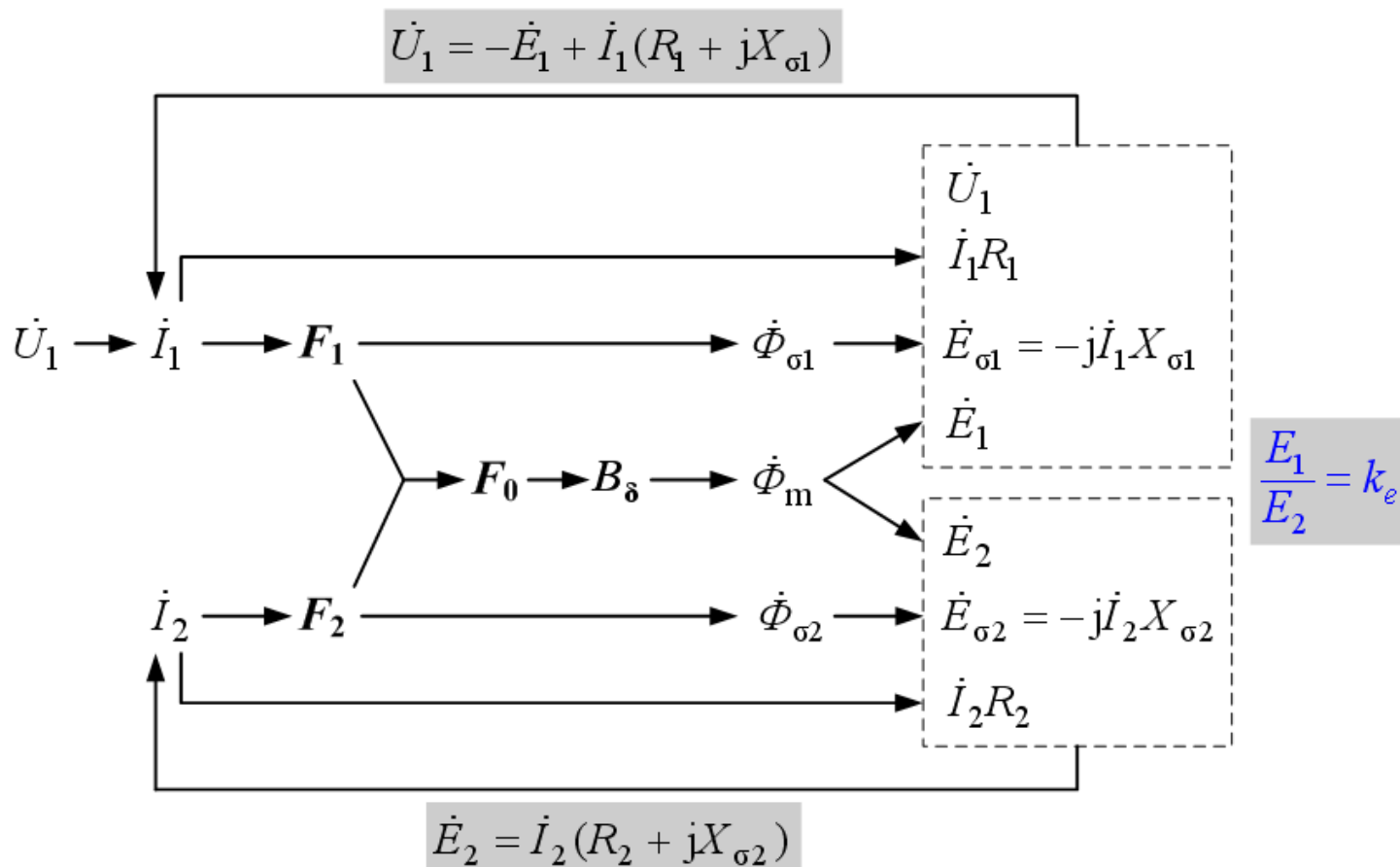
❖ 定子一相电压方程式

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

$$\varphi_2 = \arctan \frac{X_{\sigma 2}}{R_2}$$

三相异步电机转子不转时的电磁关系（转子堵转）

❖ 堵转时的电磁关系



三相异步电机转子不转时的电磁关系（转子堵转）

❖ 转子绕组的折合

- 为得到等效电路，需像分析变压器时一样，对绕组进行折合。
- 通常将转子绕组折合为与定子绕组一样。
- 转子只通过转子磁动势 F_2 对定子起作用，因此折合时需要保证 F_2 的大小和空间相位不变
- 折合后的转子绕组相数、每相串联匝数、绕组因数都和定子绕组的一样。

$$F_2 = \frac{m_2}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_2 I_2}{p} k_{w2} = \frac{m_1}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 I'_2}{p} k_{w1} = F'_2$$

$$I'_2 = \frac{m_2 N_2 k_{w2}}{m_1 N_1 k_{w1}} I_2 = \frac{1}{k_i} I_2$$

$$k_i = \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}} = \frac{m_1}{m_2} k_e$$

k_i — 电流变比

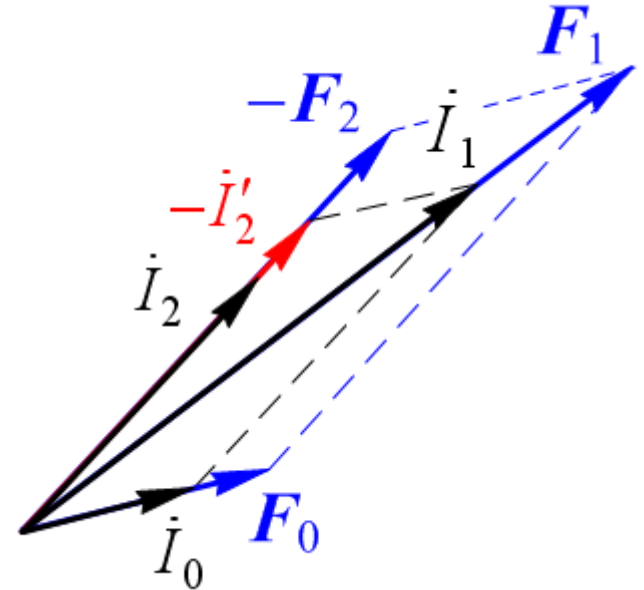
三相异步电机转子不转时的电磁关系（转子堵转）

$$F_0 = F_1 + F_2$$

$$F_1 = KI_1, \quad F_2 = KI'_2, \quad F_0 = KI_0$$

$$K = \frac{m_1}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p}$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$$



定、转子磁动势关系转变为定、转子电流关系，好像定、转子之间存在电路联系，为建立等效电路奠定了基础。

三相异步电机转子不转时的电磁关系（转子堵转）



❖ 转子相电动势的折合值

$$\dot{E}'_2 = k_e \dot{E}_2 = \dot{E}_1$$

◆ 转子相电流的折合值

$$I'_2 = \frac{1}{k_i} I_2$$

◆ 转子每相阻抗的折合值

$$R'_2 = k_e k_i R_2$$

$$X'_{\sigma 2} = k_e k_i X_{\sigma 2}$$

$$\varphi'_2 = \varphi_2$$

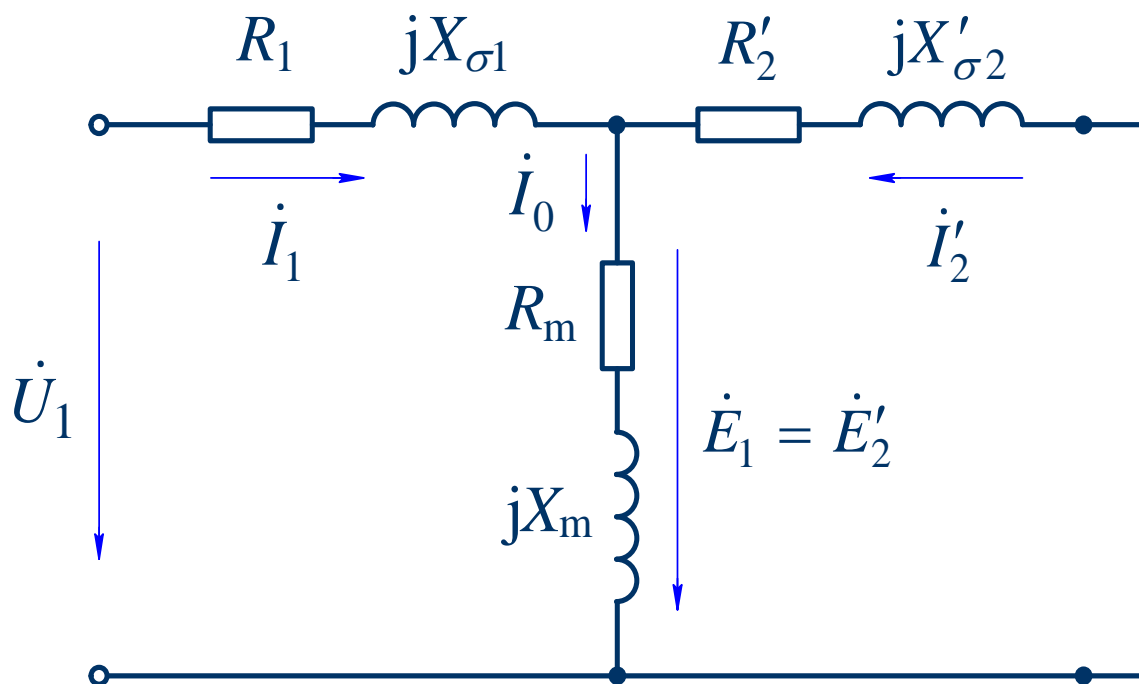
折合后，转子绕组电阻铜耗和电抗上的无功功率都不变。

三相异步电机转子不转时的电磁关系（转子堵转）

基本方程式

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{E}_1 &= -\dot{I}_0 Z_m \\ \dot{E}'_2 &= \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}'_2 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_0\end{aligned}$$

等效电路



三相异步电机转子旋转时的电磁关系



- ❖ 三相异步电机转子绕组通常是短路的。笼型绕组本身是短路的；绕线型绕组通过集电环、电刷及附加电阻（如果有）短路。
- ❖ 分析三相异步电机定子绕组接至三相对称电源，转子绕组短路（直接短路或经过附加电阻短路）且转子旋转时的电磁关系。

三相异步电机转子旋转时的电磁关系

❖ 转子转速 n 与转差率 s

起动时: $n = 0$, $\Delta n = n_s$, 转子电磁感应最强

$\rightarrow n \uparrow \rightarrow \Delta n \downarrow \rightarrow$ 转子电磁感应减弱

$\rightarrow n \uparrow \rightarrow n = n_s \rightarrow$ 转子电磁感应消失

\rightarrow 电磁转矩 $T = 0 \rightarrow n \downarrow$

$$n < n_s$$

转差率:
$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$n = n_s (1 - s)$$

$$\omega = (1 - s)\omega_s$$

三相异步电机转子旋转时的电磁关系

❖ 异步电机的运行状态

(1) 电动机运行状态

- T_{em} 与 n 同方向，为驱动性质。
- $0 < n < n_s, 1 > s > 0$,
- $s_N = 0.02 \sim 0.05$ 。

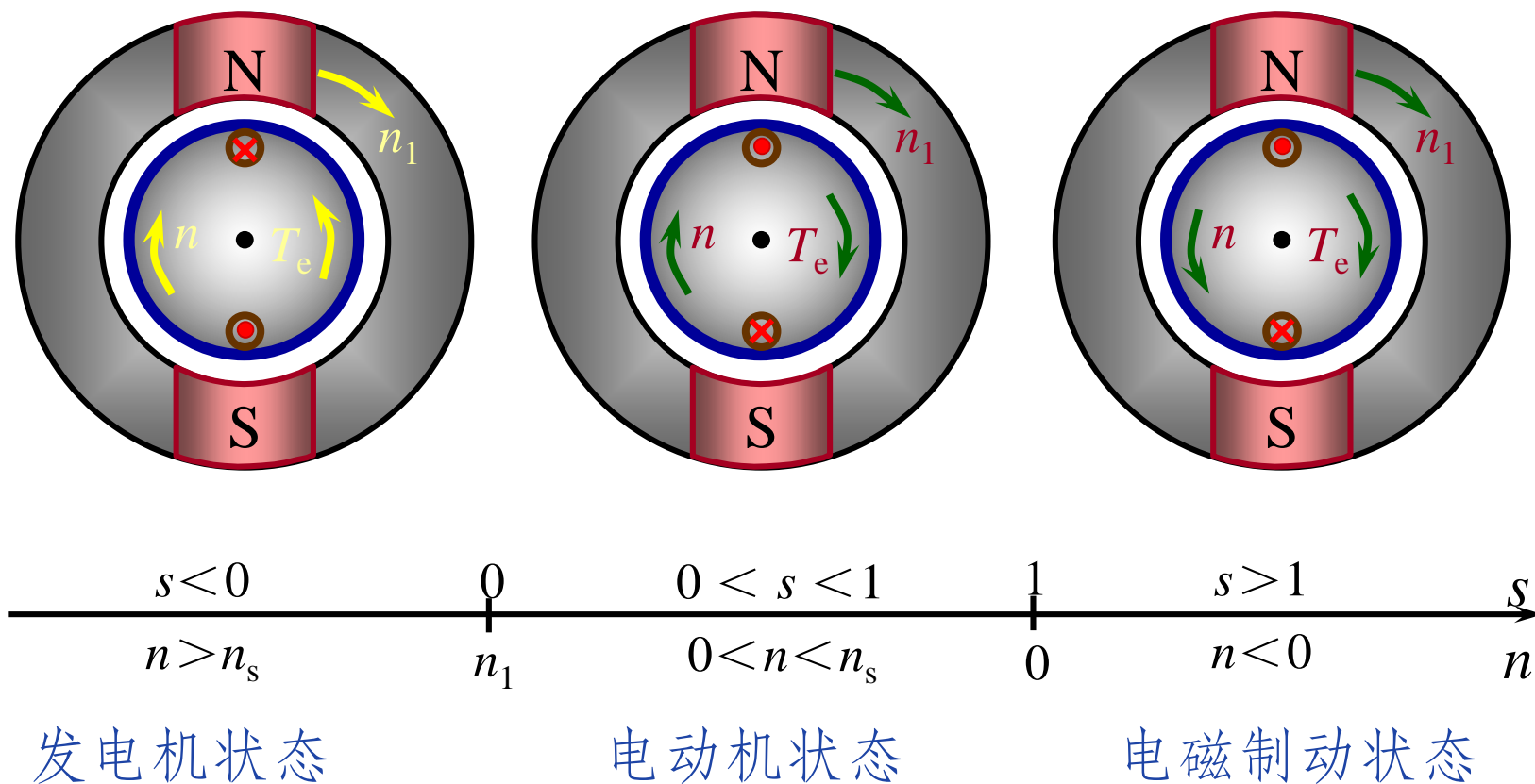
(2) 发电机运行状态

- $n > n_s, s < 0$ 。
- T_{em} 与 n 反方向，为制动性质。

(3) 电磁制动运行状态

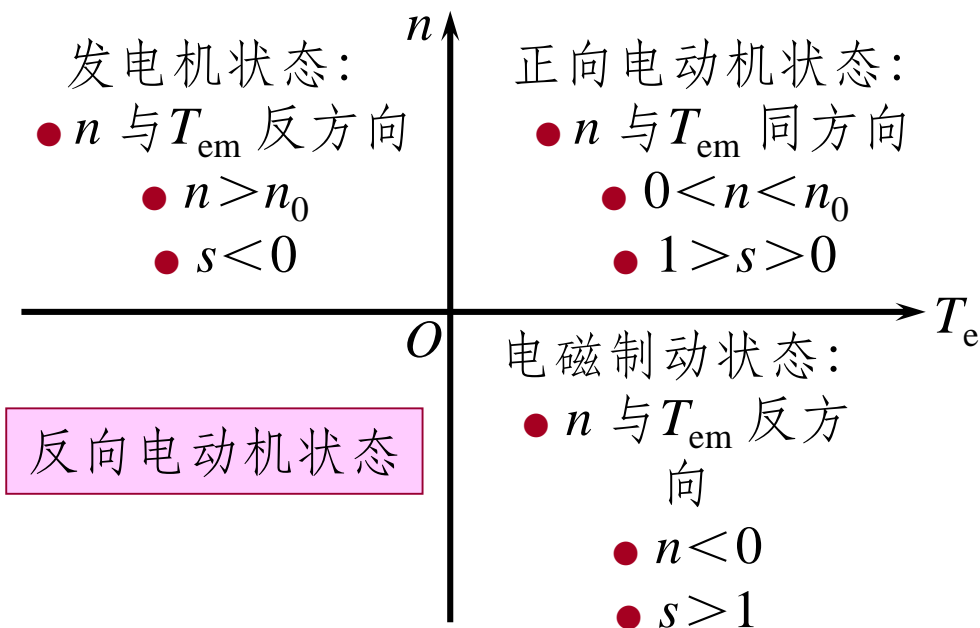
- $n < 0, s > 1$ 。
- T_{em} 与 n 反方向，为制动性质。

三相异步电机转子旋转时的电磁关系



三相异步电机转子旋转时的电磁关系

❖ 异步电机的四象限运行



状态	制动状态	堵转状态	电动机状态	理想空载状态	发电机状态
转子转速	$n < 0$	$n = 0$	$0 < n < n_s$	$n = n_s$	$n > n_s$
转差率	$s > 1$	$s = 1$	$1 > s > 0$	$s = 0$	$s < 0$

三相异步电机转子旋转时的电磁关系

- 转子感应电动势、电流的频率

气隙磁通密度 B_δ 相对转子的转速为 $(n_1 - n)$ ；

转子感应电动势、电流的频率为

$$f_2 = \frac{pn_2}{60} = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{(n_1 - n)}{n_1} \frac{pn_1}{60} = sf_1$$

f_2 称为转差频率。

- ◆ 异步电机正常运行时，转差率 s 很小。
- ◆ 通常 $s=0.01 \sim 0.05$ ，则 $f_2=0.5\text{Hz} \sim 2.5\text{Hz}$ 。

三相异步电机转子旋转时的电磁关系

❖ 感应电势的频率

转子转速为 n

定子旋转磁场转速为 n_s

定子旋转磁场切割转子的速度为 $\Delta n = n_s - n = sn_s$

转子感应电动势和电流的频率 f_2

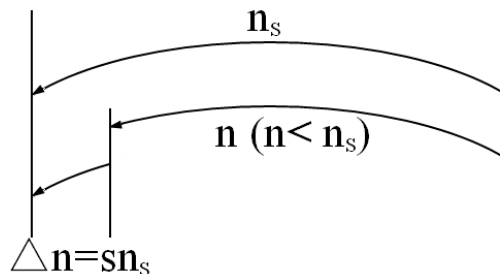
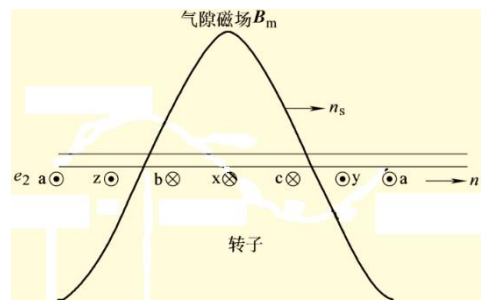
$$f_2 = \frac{p(n_s - n)}{60} = \frac{pn_s}{60} \frac{n_s - n}{n_s} = sf_1$$

转子电流产生的旋转磁动势 F_2

F_2 相对于转子的转速为 n_2 (参照物为转子)

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60sf_1}{p} = sn_s = \Delta n$$

以定子为参照物磁动势 F_2 的转速
 $\Delta n + n = n_s$



- 无论转子的实际转速是多少，转子磁动势 F_2 在空间的转速总是等于同步转速，并与定子磁动势 F_1 保持相对静止。
- 定转子磁动势保持相对静止是产生恒定电磁转矩的必要条件。

三相异步电机转子旋转时的电磁关系

- 转子回路电压方程式

$$\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s}(R_2 + jX_{\sigma 2s})$$

$$\begin{aligned} E_{2s} &= 4.44 f_2 N_2 k_{w2} \Phi_m = 4.44 s f_1 N_2 k_{w2} \Phi_m \\ &= s E_2 \end{aligned}$$

E_2 是转子不转时转子绕组的感应电动势。

三相异步电机转子旋转时的电磁关系

- 转子回路电压方程式

$$\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s}(R_2 + jX_{\sigma 2s})$$

$$X_{\sigma 2s} = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = 2\pi s f_1 L_{\sigma 2} = s X_{\sigma 2}$$

- ◆ $X_{\sigma 2s}$ 是转子频率为 f_2 时的转子漏电抗， $X_{\sigma 2}$ 是转子不转时 ($f_2 = f_1$) 的转子漏电抗。
- ◆ 正常运行时， $X_{\sigma 2s} \ll X_{\sigma 2}$ 。

三相异步电机转子旋转时的电磁关系

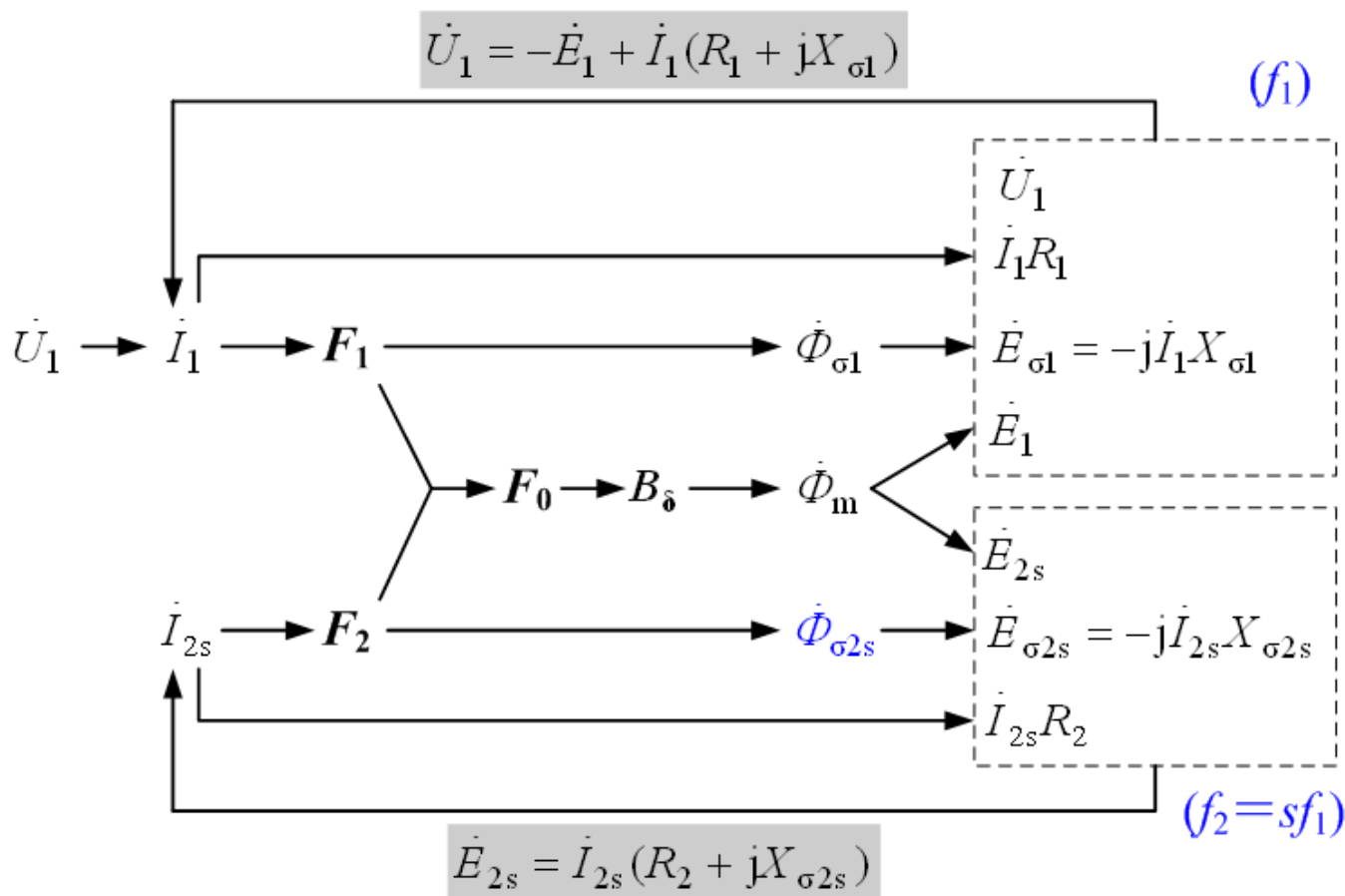


❖ 定、转子磁动势关系

- 转子以转差率 s 旋转时，定、转子磁动势 F_1 与 F_2 始终保持相对静止，二者共同产生气隙磁场。
- 可对 F_1 与 F_2 进行矢量合成，得到合成磁动势 F_0 ，即 $F_1 + F_2 = F_0$ ， F_0 是励磁磁动势。
- 转子旋转时的合成磁动势即励磁磁动势与堵转时相比，定、转子磁动势的作用关系并未改变，但各磁动势的幅值及其相位会有不同。

三相异步电机转子旋转时的电磁关系

❖ 转子旋转时的电磁关系



等效电路

❖ 频率折算

$$U_1 = -E_1 + I_1(R_1 + jX_{\sigma 1}) \quad E_{2s} = I_{2s}R_2 + jI_{2s}X_{\sigma 2s}$$

- 电机旋转时定子、转子的反电动势不是同频率的，难以直接求解。
- 频率折算即将定子、转子有相对转动的情况折算为二者相对静止的状态，使得两个反电动势同频率，问题转化为静态的“变压器”问题。
- 绕组折算的准则：折算后，转子电流大小与相位不变，则由电流平衡方程知，折算后对定子电流无影响。

等效电路

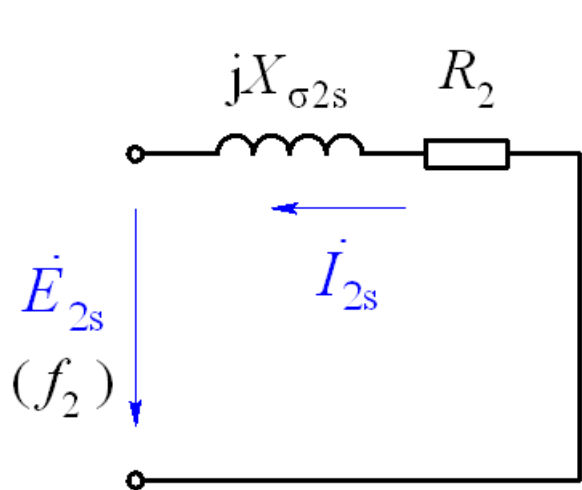
❖ 频率折算

- 转子通过其磁动势 F_2 对定子起作用。
- 不论转子频率 f_2 为多少， F_2 相对定子的转速始终为 n_1 。
- 因此，只要保证 F_2 的大小和空间相位不变，转子电流的频率是多少，对定子侧的关系并无影响。

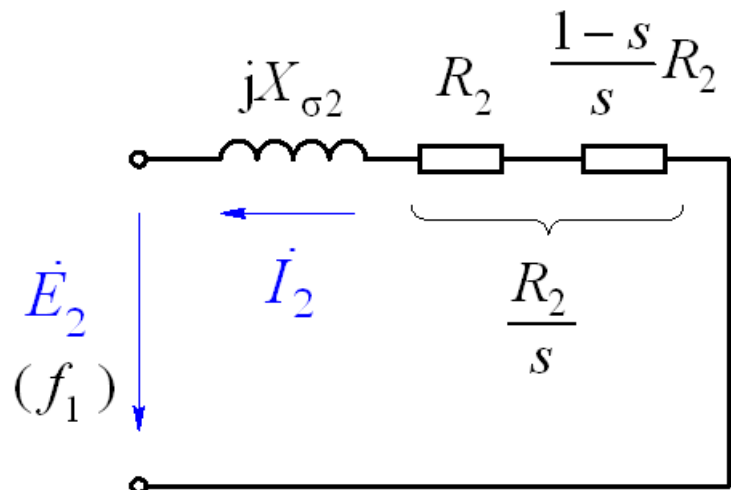
$$\dot{I}_{2s} = \frac{\dot{E}_{2s}}{R_2 + jX_{\sigma 2s}} \xrightarrow{E_{2s} = sE_2, X_{\sigma 2s} = sX_{\sigma 2}} \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\frac{R_2}{s} + jX_{\sigma 2}}$$

- 转子电动势、电流的频率已由 f_2 变为 f_1 ，用转子不转时的量来表示。
- 转子电流的有效值和相位都未变化。

等效电路



转子旋转时的实际电路



等效电路（转子不转时）

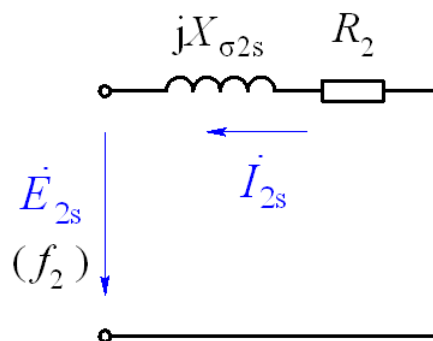
$$I_2 = I_{2s}, \quad \varphi_2 \text{ 不变} \quad \Rightarrow \quad F_2 \text{ 不变 (幅值和相位)}$$

保持转子磁动势 F_2 的幅值和相位不变，使转子频率由实际的 f_2 变为 f_1 ——转子绕组的频率折合。

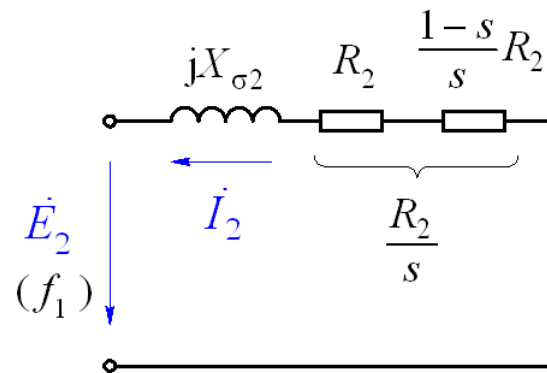
等效电路

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_{\sigma 2}} = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_{\sigma 2}} = \frac{E_2}{(R_2 + \frac{1-s}{s}R_2) + jX_{\sigma 2}}$$

- 结论：一台以转差率 s 旋转的异步电机的转子电路，可以用一台静止电机的转子电路表示，只需在原电路中串接一个虚拟电阻。
- 虚拟电阻上消耗的电功率，等于实际电机转动时输出的机械功率。



转子旋转时的实际电路



等效电路（转子不转时）

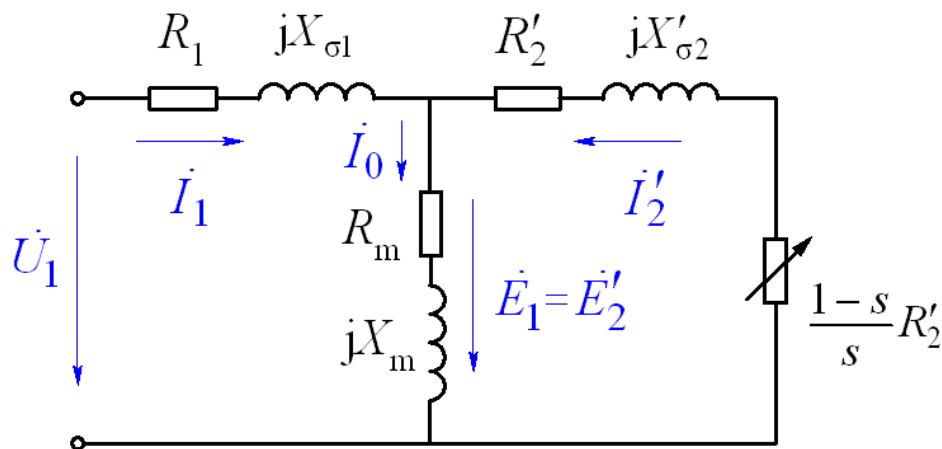
等效电路

- 为得到等效电路，还需进行绕组折算，即将绕组物理量折算到定子上，得到等效电路。

$$\left. \begin{aligned} I_2' &= \frac{1}{k_i} I_2 \\ E_2' &= k_e E_2 \\ r_2' &= k_e k_i r_2 \\ x_2' &= k_e k_i x_2 \end{aligned} \right\}$$

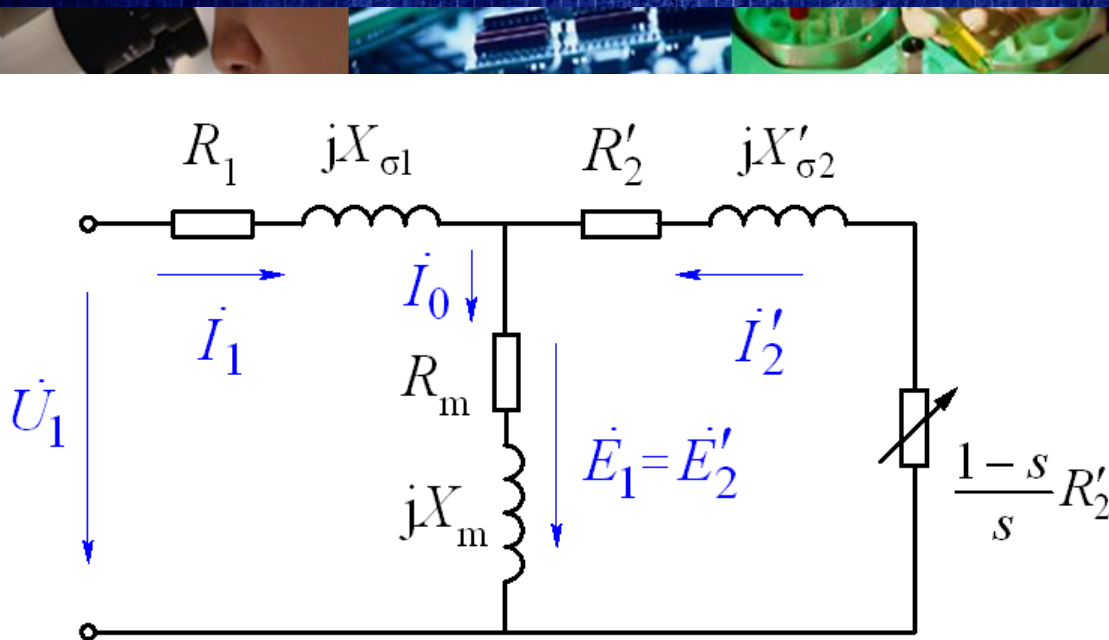
$$k_e = \frac{W_1 k_{w1}}{W_2 k_{w2}}$$

$$k_i = \frac{m_1 W_1 k_{w1}}{m_2 W_2 k_{w2}}$$



- 参数对应定子一相绕组。电阻 R_1 吸收的电能为定子铜耗。 R_m 吸收的电代表铁心损耗。 R_2' 吸收的电称为转子铜耗。电阻 $\frac{1-s}{s} R_2'$ 吸收的电功率表示一相定子绕组产生的机械功率。

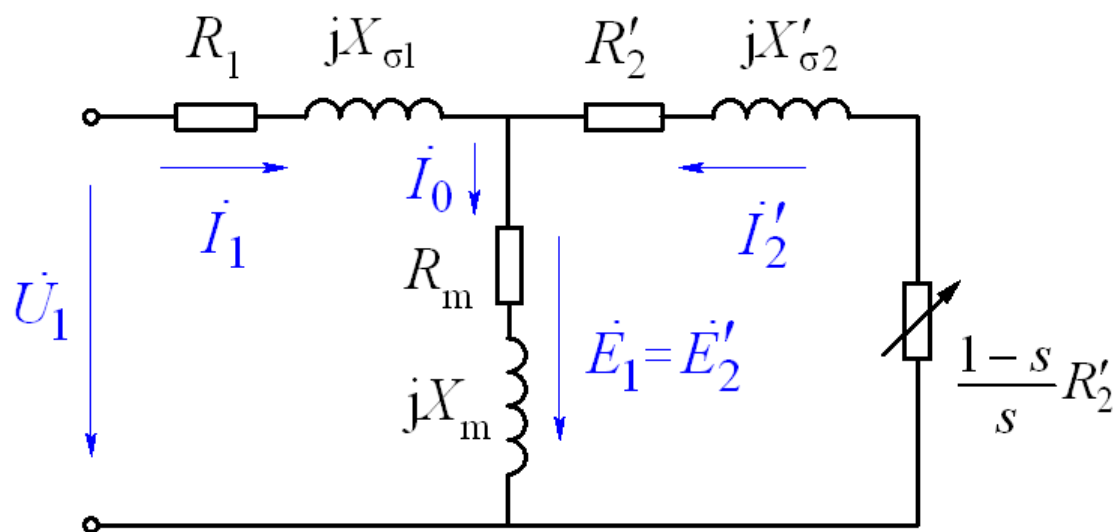
三相异步电机转子旋转时的电磁关系



❖ 空载时，转差率 s 很小， $\frac{R'_2}{s} \rightarrow \infty$ ，转子电流很小，空载电流约等于励磁电流，定子功率因数很低。

◆ 额定负载运行时，通常转差率 $s_N \leq 0.05$ ，转子等效电路为电阻性，定、转子侧功率因数都较高，可达 0.8 以上。

三相异步电机转子旋转时的电磁关系



- ◆ 起动或堵转时，主磁通 Φ_m 与额定负载时相比变化很大，约为空载时的一半。

- ❖ 定子漏阻抗 $|Z_1|$ 不大，从空载到额定负载时， $I_1|Z_1|$ 与电压 U_1 相比都较小，定子电动势 $E_1 \approx U_1$ 。
- ❖ 主磁通 Φ_m 与电动势 E_1 成正比。
- ❖ 只要电压 U_1 不变，从空载到额定负载， Φ_m 基本不变，励磁电流 I_0 也基本不变。

电磁转矩表达式

❖ 电磁转矩

- 计算电磁转矩有两种方法。1) $F = BIl$ 叠加。2) 等效电路求机械功率，再求转矩。
- 转矩的物理表达式 $T = C_1 \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$
- 电磁转矩的参数表达式

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}$$

式中 U_1 ——加在定子绕组上的相电压；
 m_1 ——定子相数； f_1 ——电源频率；
 r_1 、 x_1 ——定子一相的电阻和漏抗；
 r'_2 ——转子一相的折算电阻；
 x'_2 ——转子不动时转子一相绕组的折算漏抗；
 p ——极对数；
 s ——转差率。

电磁转矩表达式

- 由电磁转矩的参数表达式可以看出：
 - 当转差率不变时，电磁转矩与电机外加电压的平方成正比；
 - 电压、频率不变时，电磁转矩仅与转差率有关；
 - 转矩-转差率函数关系曲线表征异步电动机的机械特性。

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}$$



鼠笼转子

m_2 根鼠笼条

相数为 m_2

每相绕组匝数为 $\frac{1}{2}$

每相绕组系数为 1

Thank You !

伊国兴

ygx@hit.edu.cn



哈爾濱工業大學

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY