

电机与拖动基础

南开大学

计算机与控制工程学院

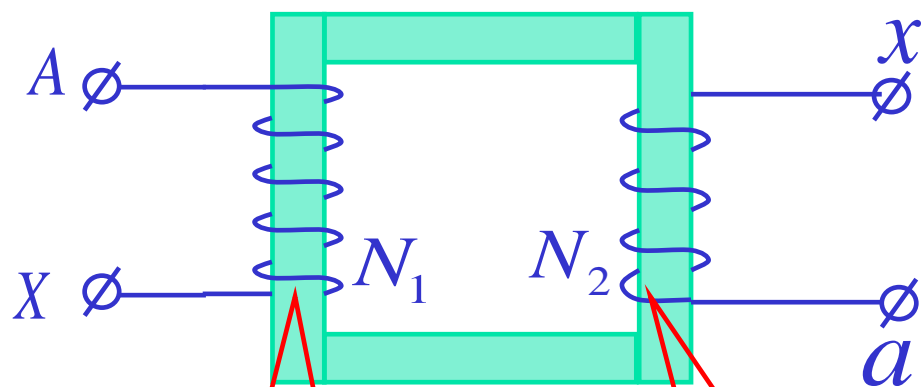
自动化与智能科学系

段 峰

教授 博导

变压器 第一节 概述

二、单相双绕组变压器



接电源端:

- 原绕组
- 原边线圈
- 初级线圈
- 一次线圈

接负载端:

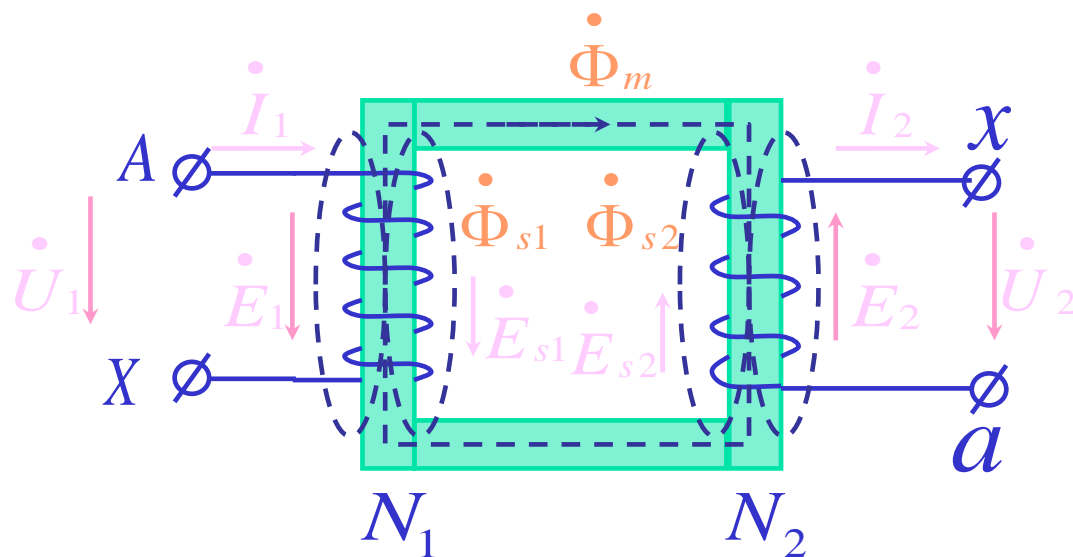
- 副绕组
- 副边线圈
- 次级线圈
- 二次线圈

1、主要结构

- 1) 铁心: 硅钢片
- 2) 绕组: 铜、铝线
- 3) 外部附件:
油箱、分接开关等

第一节 概述

2、变压器惯例



3、铭牌数据

S_N ——额定容量 输出端视在功率 单位: kVA 或 VA

U_{1N}/U_{2N} ——额定电压 线电压 单位: V 或 kV

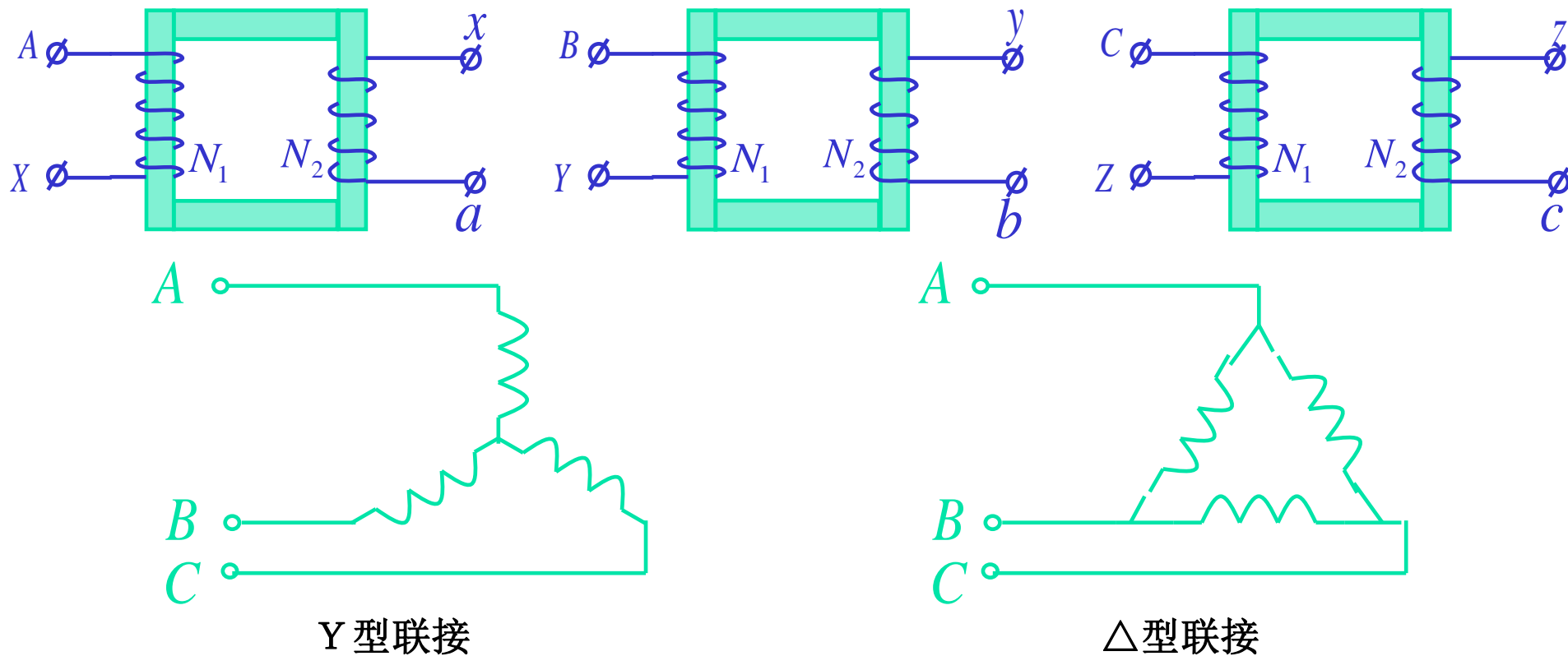
I_{1N}/I_{2N} ——额定电流 线电流计算值 单位: A

f_N ——额定频率 电源正弦电频率 单位: H_z

$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

三、三相双绕组变压器

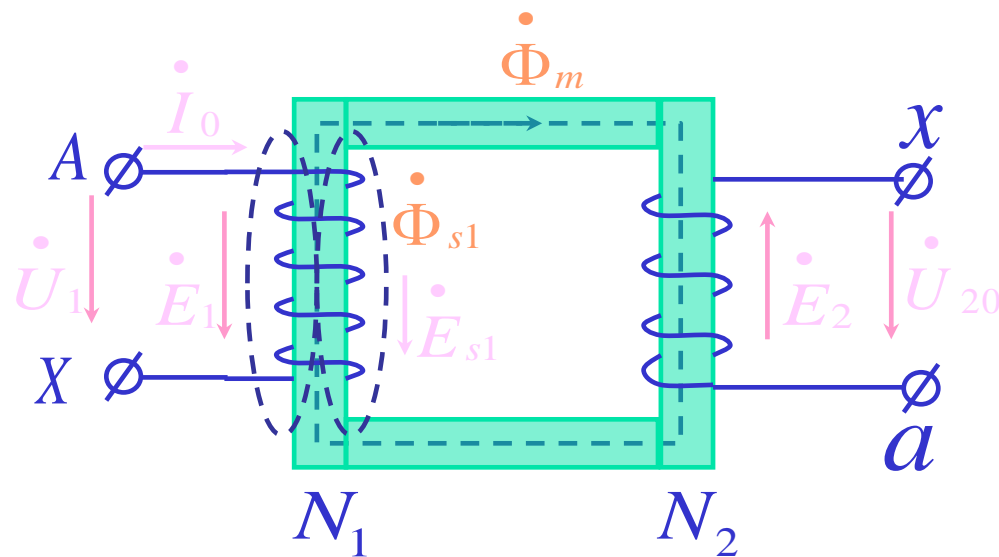
1、由三个单相双绕组变压器组成变压器组



Y / Y 联接、Y / Δ 联接、 Δ / Δ 联接、 Δ / Y 联接

第二节

变压器的空载运行



变压器惯例

空载运行：

原边接电源，副边开路

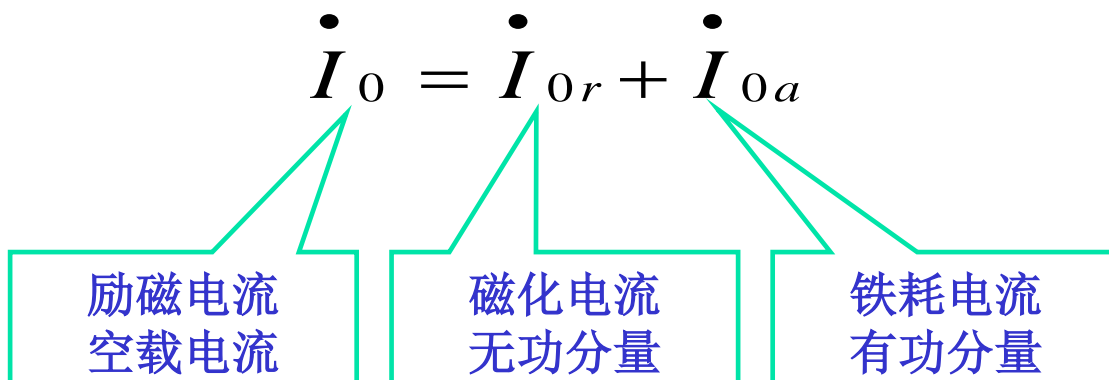
\dot{I}_0 —— 空载电流

（也叫励磁电流）

产生励磁磁势 $\dot{I}_0 N_1$

一、空载运行时的电磁关系

2、励磁电流分析



(1) 磁化电流分析

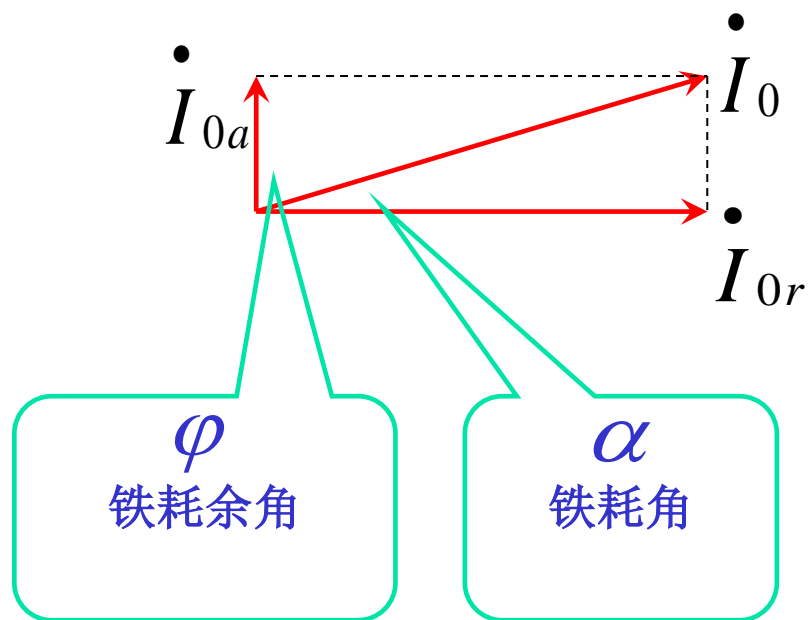
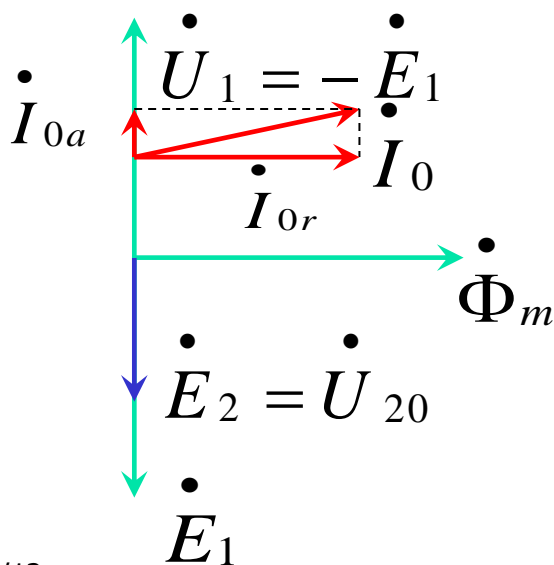
- 建立磁场，送入无功功率
- 与 $\dot{\Phi}_m$ 同相位 $\dot{I}_{0r} \perp \dot{U}_1$
- 可以认为是正弦量

一、空载运行时的电磁关系

(2) 铁耗电流分析

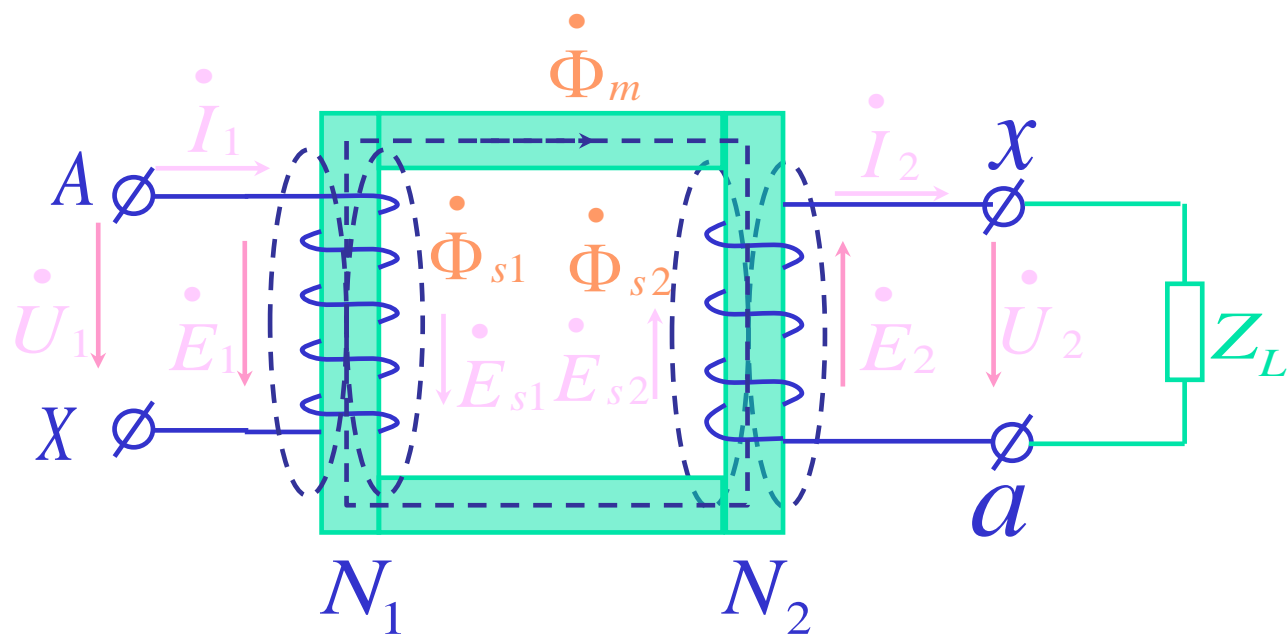
- 为铁耗提供有功功率
- 与 \dot{U}_1 同相位
- 应尽量减小该电流

(3) 向量图



第三节 变压器的负载运行

一、负载运行时的惯例



$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1$$

$$S_1 = U_1 I_1$$

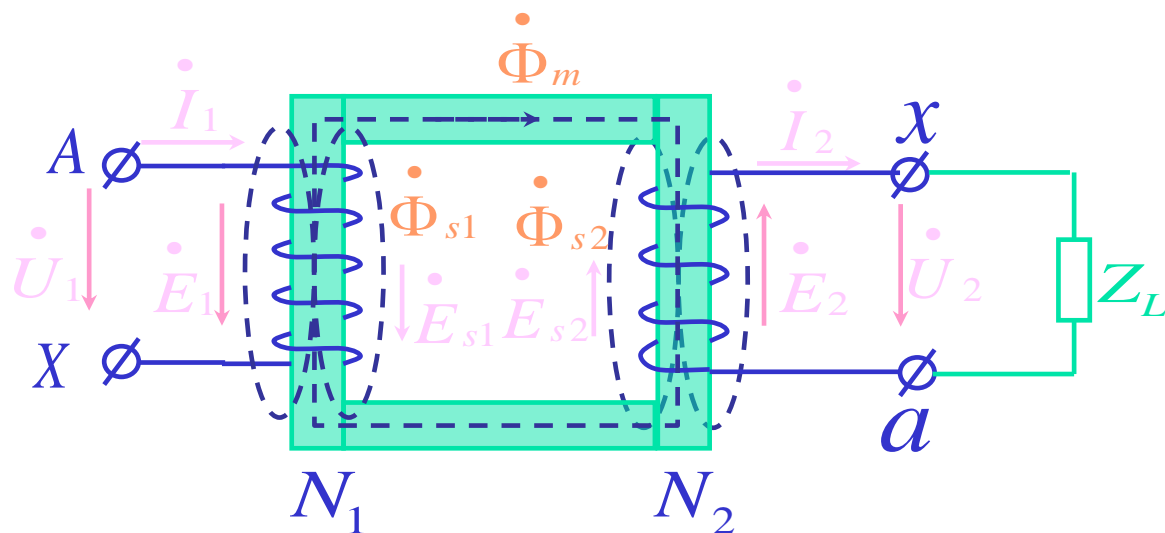
$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$Q_2 = U_2 I_2 \sin \varphi_2$$

$$S_2 = U_2 I_2$$

二、负载运行时的电磁关系 (了解)

2、原、副边电流关系



1、主磁通

(1) 负载运行时的励磁磁通势 \dot{F}_0

原绕组、副绕组磁势的合成

$$(2) \quad \dot{\Phi}_m = \dot{E}_1 / -j4.44 f N_1$$

(3) $\dot{\Phi}_m$ 可以看成仍是 \dot{I}_0 形成的

(1) 磁势平衡式

$$\begin{cases} \dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \\ \dot{I}_0 N_1 = \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 \end{cases}$$

(2) 磁势平衡式含义

$$\begin{cases} \dot{F}_1 = \dot{F}_0 + \left(-\dot{F}_2 \right) \\ \dot{I}_1 N_1 = \dot{I}_0 N_1 + \left(-\dot{I}_2 N_2 \right) \end{cases}$$

励磁分量

负载分量

4、小结：稳态时变压器基本方程式_(了解)

(1) 原边电压、电势平衡式

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 - \dot{E}_{s1} \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1\end{aligned}$$

(3) 磁势平衡式

$$\begin{cases} \dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \\ \dot{I}_0 N_1 = \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 \end{cases}$$

(5) 电流平衡式

$$\dot{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 + \dot{I}_0$$

(2) 副边电压、电势平衡式

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 + \dot{E}_{s2} \\ &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + jx_2) \\ &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2\end{aligned}$$

(4) 变压器变比

$$k = -\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

(6) 负载式

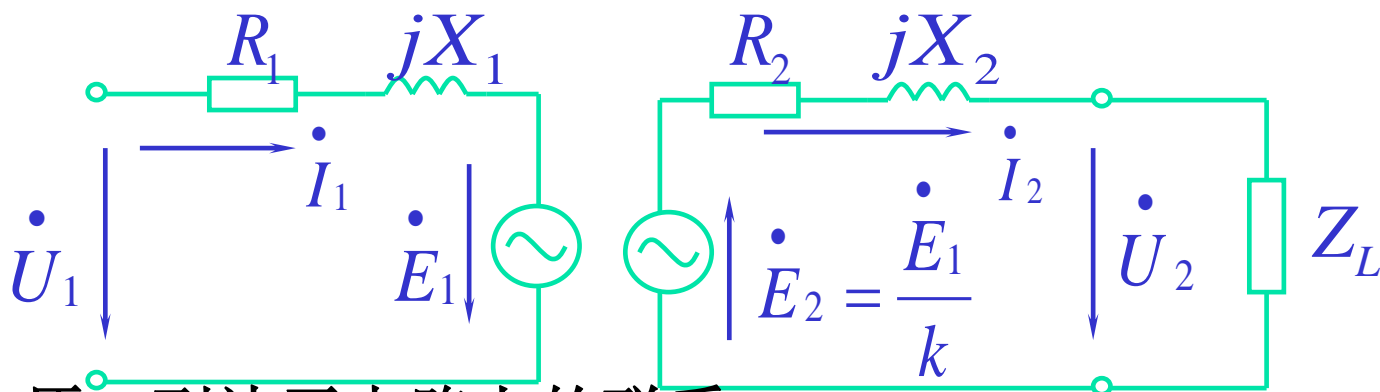
$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$

(7) 励磁电流式

$$\dot{I}_0 = -\frac{\dot{E}_1}{Z_m}$$

三、折算与等值电路

1、折算的原则 由平衡方程式得到的等值电路如下：



可见：原、副边无电路上的联系

副边负载通过 \dot{F}_2 与原边电源联系

\dot{F}_2 不变就不影响原边

折算的原则：1) 保持副边磁势不变

2) 保持功率传递关系不变

折算的思路：假设副边绕组的匝数也为 N_1 ，电流为 \dot{I}_2'

$$\text{且：} \dot{I}_2' N_1 = \dot{I}_2 N_2 = \dot{F}_2$$

2、各物理量的折算(了解)

(1) 电流($I_2 \rightarrow I_2'$): $I_2' = \frac{I_2}{k}$

(2) 电势 ($\dot{E}_2 \rightarrow \dot{E}_2'$): $\left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2' = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{E}_2' = k \dot{E}_2$

(3) 阻抗($Z_L \rightarrow Z_L'$, $z_2 \rightarrow z_2'$):

$$Z_L' + z_2' = \frac{\dot{E}_2'}{\dot{I}_2'} = \frac{k\dot{E}_2}{\dot{I}_2/k} = k^2 \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2} = k^2 (Z_L + z_2)$$

即: $\left\{ \begin{array}{ll} r_2' = k^2 r_2 & x_2' = k^2 x_2 \\ R_L' = k^2 R_L & x_L' = k^2 x_L \end{array} \right.$

(4) 电压($\dot{U}_2 \rightarrow \dot{U}_2'$):

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2' = k\dot{E}_2 - \frac{1}{k} \dot{I}_2 \cdot k^2 z_2 = k\dot{U}_2$$

三、折算与等值电路

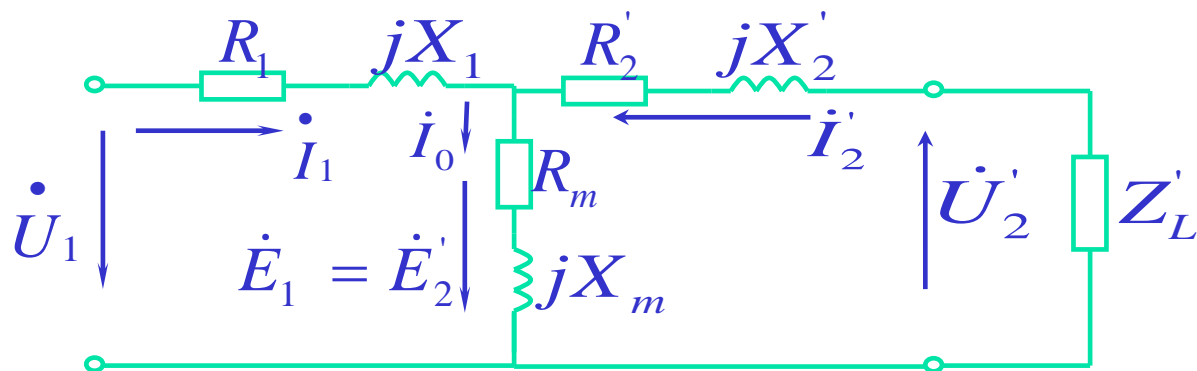
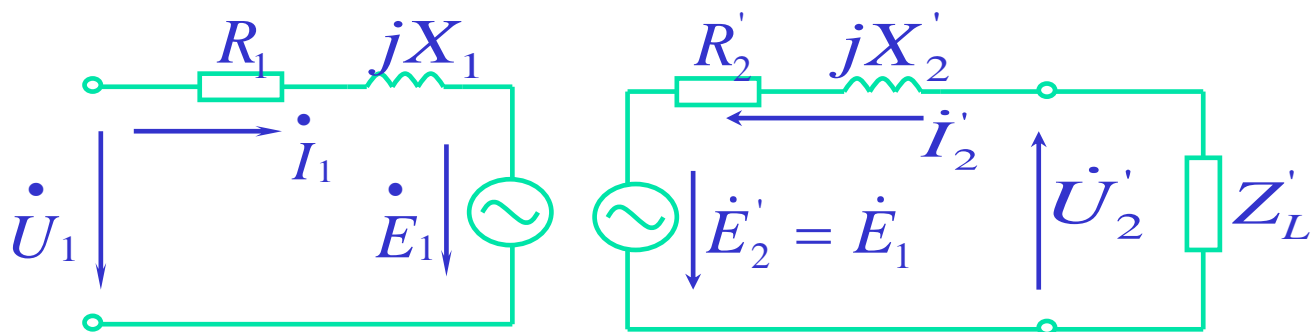
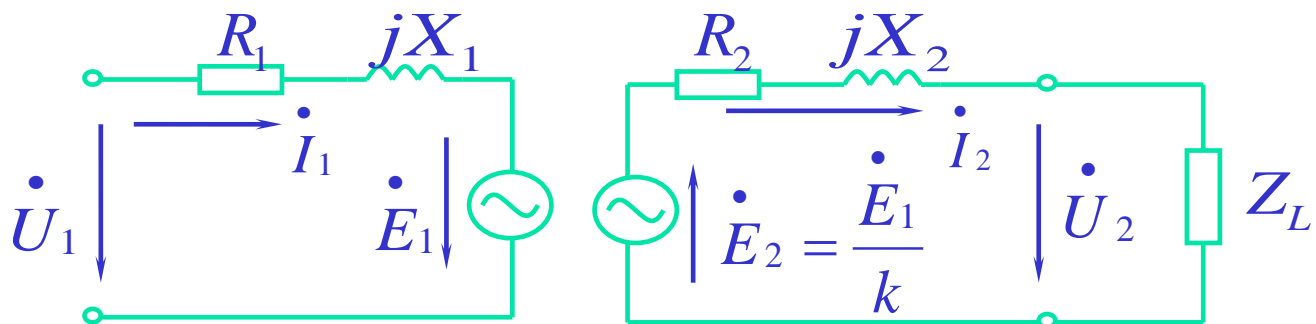
3、折算的特点

- 阻抗角不变
- 电压、电流、电动势的相位不变
- 功率传递关系不变

4、折算后的基本方程式

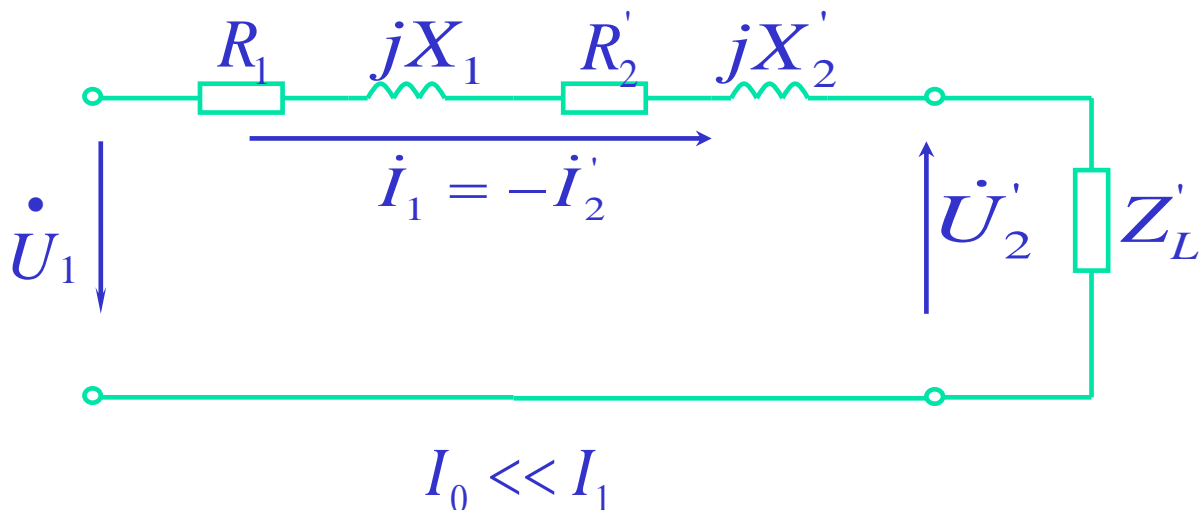
$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 & \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0 \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2' & \dot{I}_0 &= -\dot{E}_1 / z_m \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}_2' & \dot{U}_2' &= \dot{I}_2' Z_L'\end{aligned}$$

5、T型等值电路

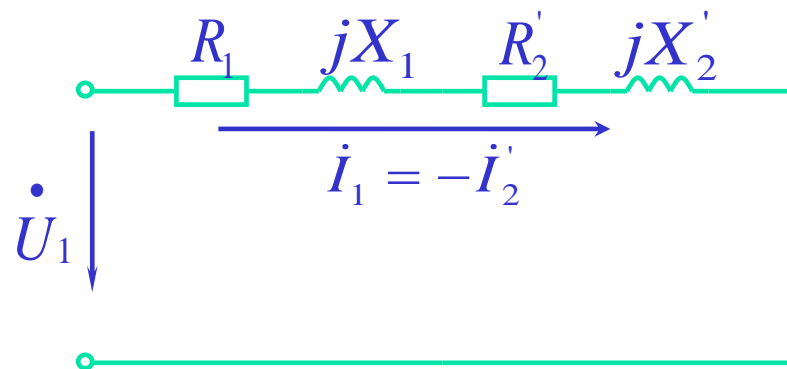
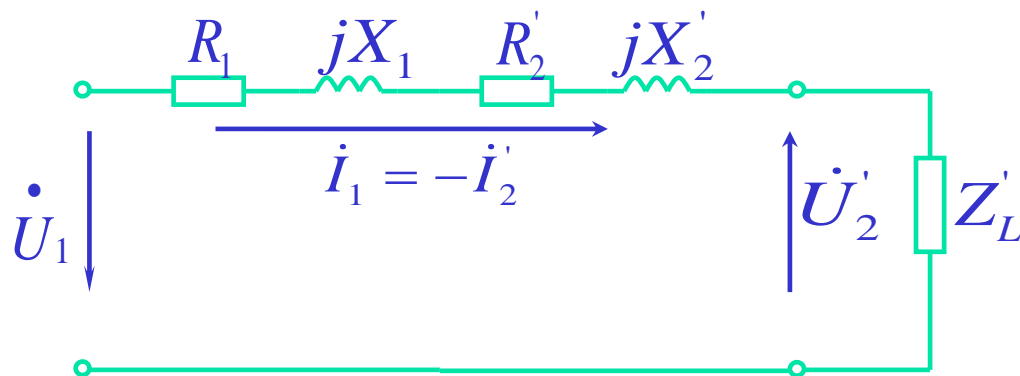


6、应用T型等值电路的注意事项

- 按等值电路计算出的是折算值，实际值需由折算值反折算获得
- 折算值均为一相的相值，单相变压器可直接计算，三相变压器需根据接法求出相值再折算
- T型等值电路可进一步简化，简化等值电路如下：



简化等值电路的使用



(1) 变压器空载运行时不能使用简化等值电路，

(2) 虽有误差，工程上已足够准确，计算简单。

令：

$$\begin{cases} Z_k = Z_1 + Z_2' = R_k + jX_k \\ R_k = R_1 + R_2' = R_1 + k^2 R_2 \\ X_k = X_1 + X_2' = X_1 + k^2 X_2 \end{cases}$$

短路阻抗

短路电阻

短路电抗

第四节 变压器参数的测定

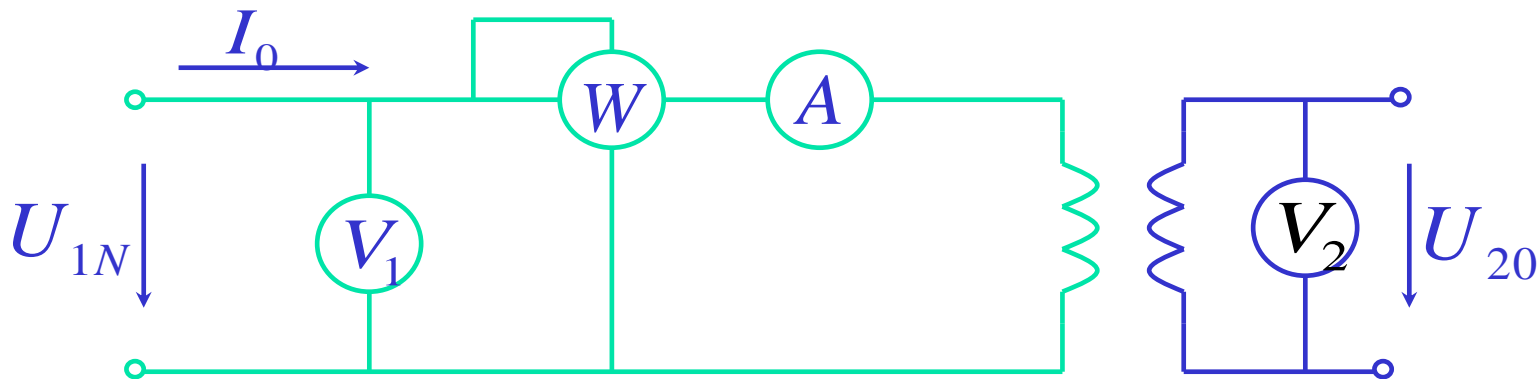
变压器等值电路的参数可以通过空载试验和短路试验测量

一、变压器空载试验

1、**试验目标**：通过变压器空载试验期望得到：

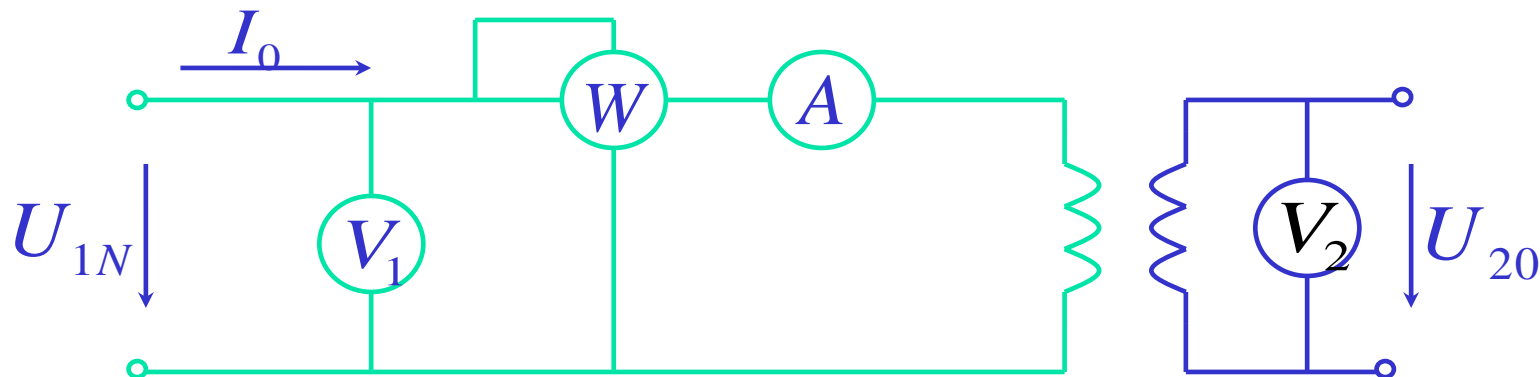
变比 k 、空载损耗 P_0 、励磁阻抗 Z_m 。

2、试验接线图：



一、变压器空载试验

3、试验方法：



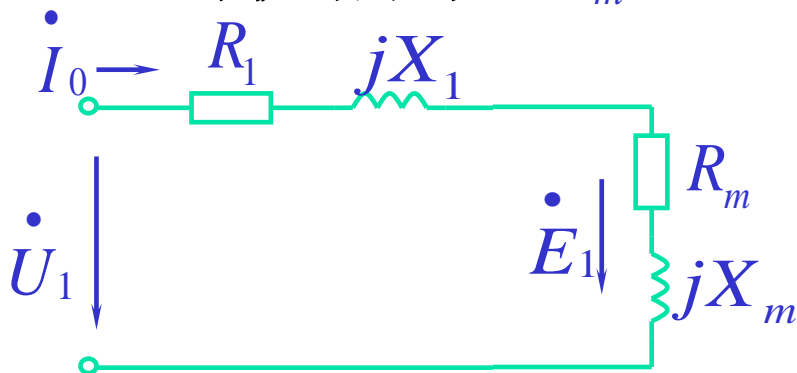
(1) 原边加额定电压，副边开路

(2) 读取各表参数。

4、假设：励磁电流 I_0 很小，它所引起的铜耗可忽略，

即输入功率 P_0 全部供给铁耗。 $Z_m \gg Z_1$

使用串联等值电路



一、变压器空载试验

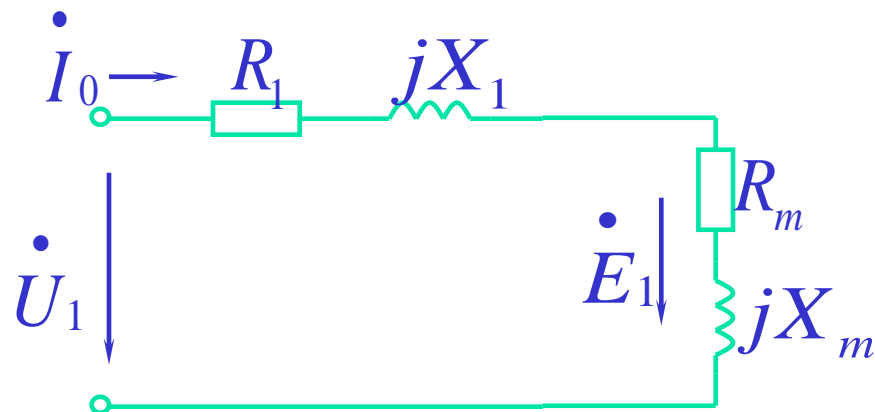
5、计算：

1) 励磁阻抗: $Z_m \approx U_{1N} / I_0$

2) 励磁电阻: $R_m \approx p_0 / I_0^2$

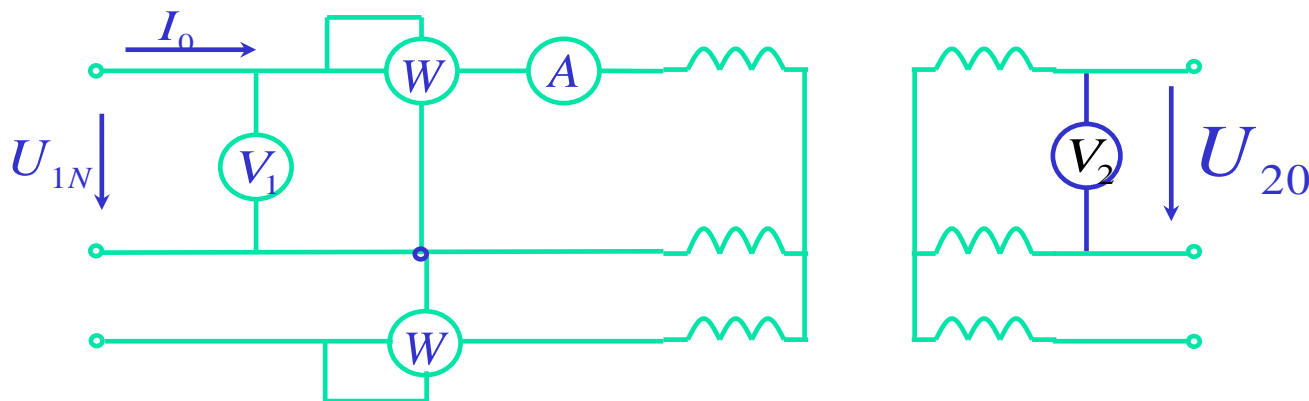
3) 励磁电抗: $X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$

4) 变比: $k \approx U_{1N} / U_{20}$



6、注意事项：从安全和仪表方面考虑，**低压边加电压**。得到的是**低压边折算值**，折算到高压边需乘变比的平方。

7、三相变压器的空载试验：



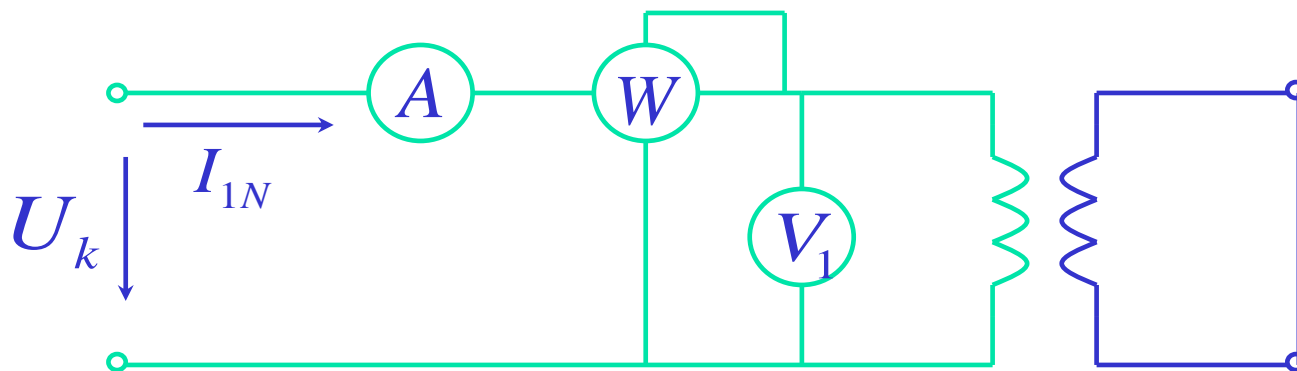
二、变压器短路试验

1、**试验目标**：通过变压器短路试验期望得到：

变压器短路电阻 R_k 和短路电抗 X_k 。

即线圈电阻 R_1 、 R_2 和漏电抗 X_1 、 X_2 。

2、试验接线图：



3、试验方法：

(1) **原边加较低电压，电流达到额定值，副边短路，**

(2) 读取各表参数。

二、变压器短路试验

4、依据：

若原边绕组的电流达到额定值，副边绕组的电流也同时达到额定值；

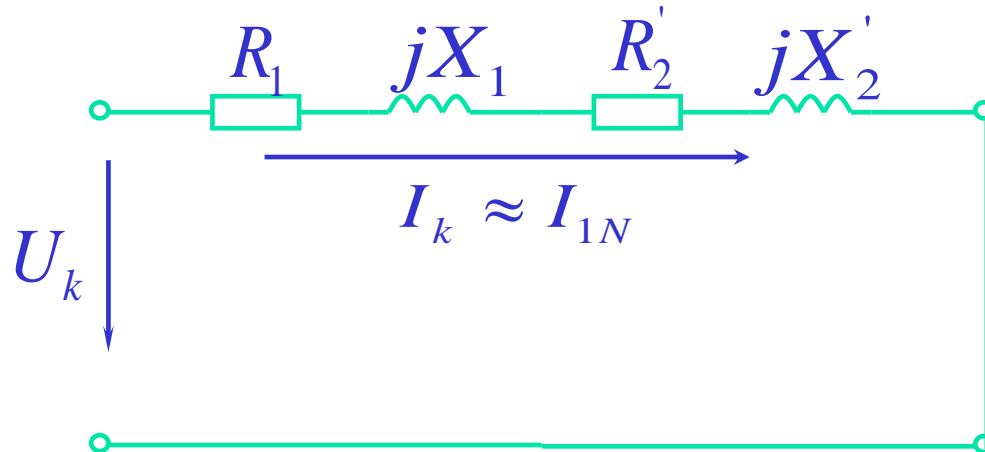
此时线圈的铜耗相当于额定负载时的铜耗值。

5、假设：

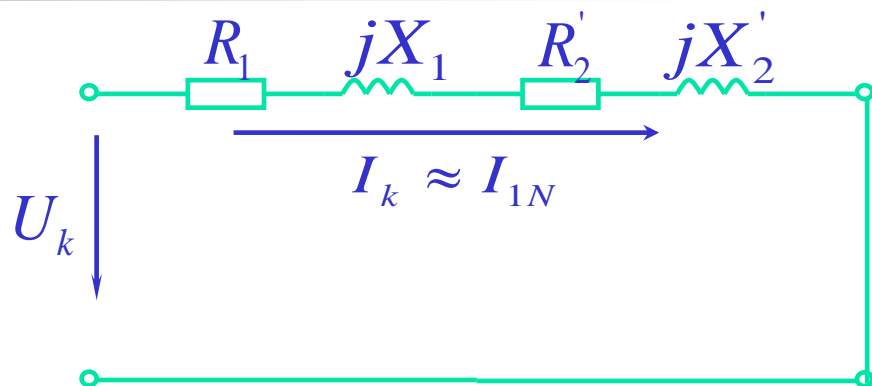
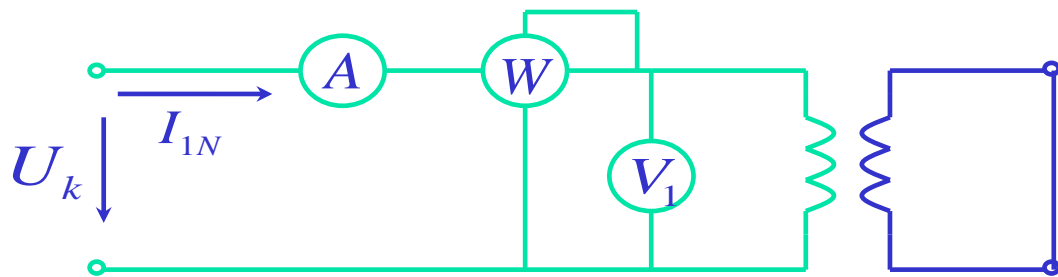
原边电流达到额定值时原边电压一般只有额定值的（5-10）%；

励磁电流和铁耗均忽略不计，输入功率全部供给铜耗。

使用简化等值电路：



二、变压器短路试验



6、计算与结果:

漏阻抗:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}$$

短路电阻:

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2}$$

短路电抗:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

换算为标准温度: (铜线)

$$R_{k75^\circ\text{C}} = R_k \frac{235 + 75}{235 + \theta}$$

$$Z_{k75^\circ\text{C}} = \sqrt{R_{k75^\circ\text{C}}^2 + X_k^2}$$

$$P_{kN} = P_k \frac{235 + 75}{235 + \theta}$$

7、注意事项:

两边做试验均可, 常在高压边做。

得到的是测量侧折算值。 $R_1 \approx R_2'$ $X_1 \approx X_2'$ $Z_1 \approx Z_2'$

实验室
室温

第五节 标么值

标么值是一个相对值，无量纲。

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值(任意单位)}}{\text{基值(与实际值同单位)}}$$

一般选择额定值作为基值，标么值即为将基值标定为一（么）时实际值的相对大小。

优点：

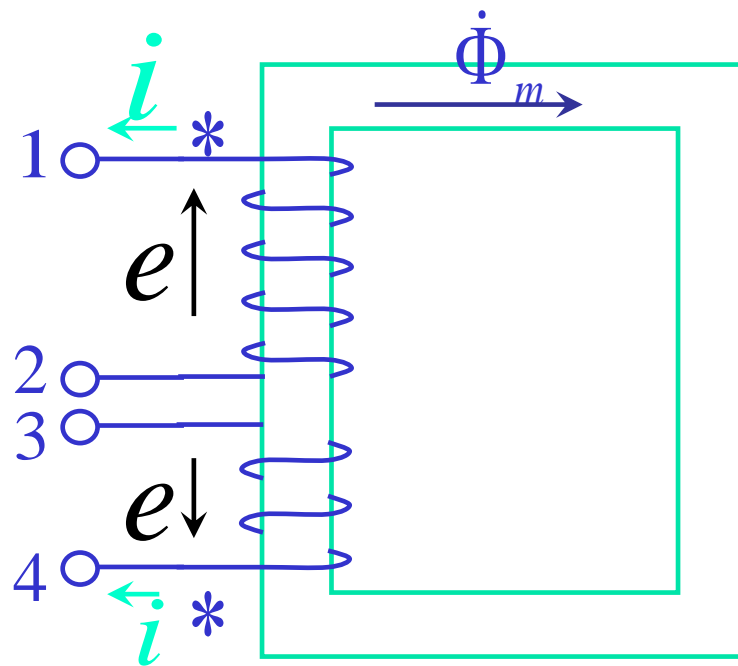
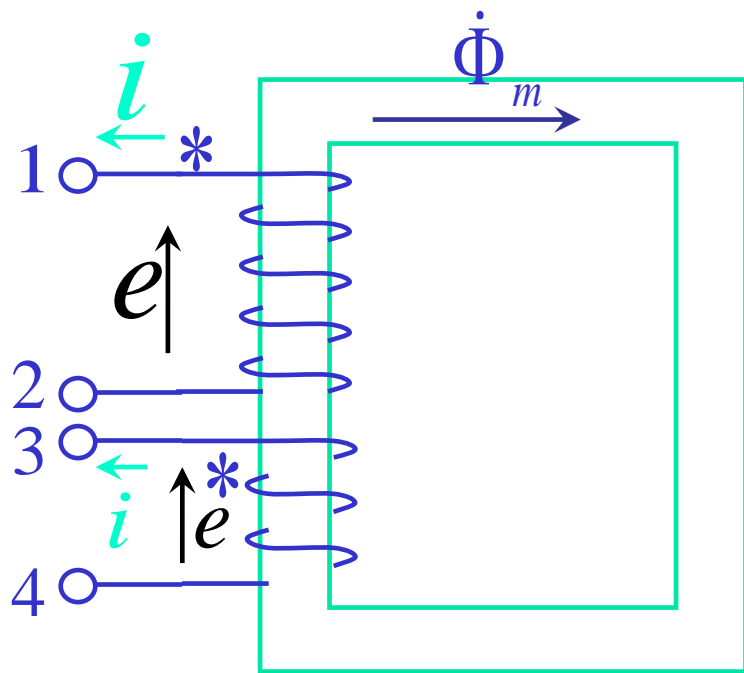
- 不论变压器的容量多大，用标么值表示的参数和性能数据，一般总在特定的范围内，便于分析比较。
- 采用标么值计算时，不必进行折算。
- 在对称的三相系统中，线值和相值的标么值相等。
- 正弦交变量的有效值和最大值的标么值相等。



第六节 变压器的联接组别

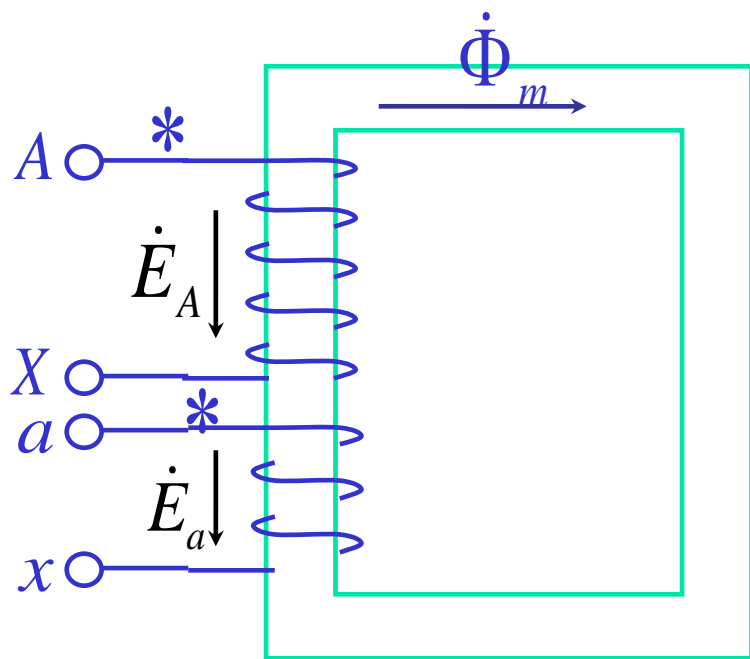
- 本节讨论变压器的变相位作用；
- 主要有变压器同名端的标注；
三相线圈的连接；
变压器联接组别的标注等。

一、单相变压器绕组的标志方式

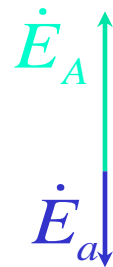
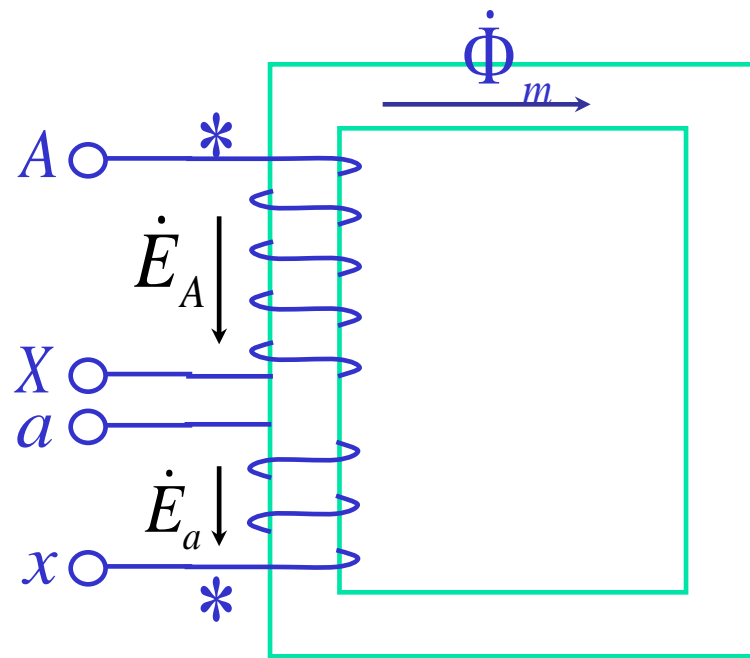
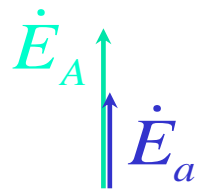


$\dot{\Phi}_m \uparrow$ 时

变压器联接组别的时钟表示法



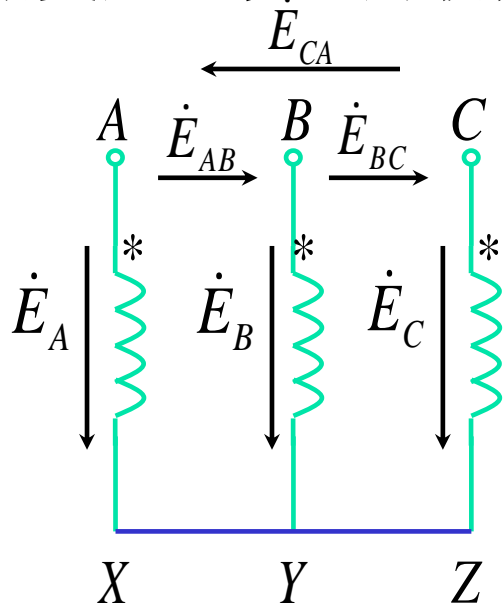
I, IO



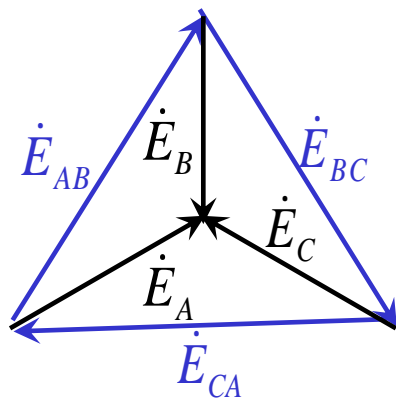
$I, I6$

二、三相变压器绕组的联接组别 (了解)

1、三相变压器绕组的联接 Y接



向量图



相电动势

$$\dot{E}_A = E \angle 0^\circ$$

$$\dot{E}_B = E \angle -120^\circ$$

$$\dot{E}_C = E \angle -240^\circ$$

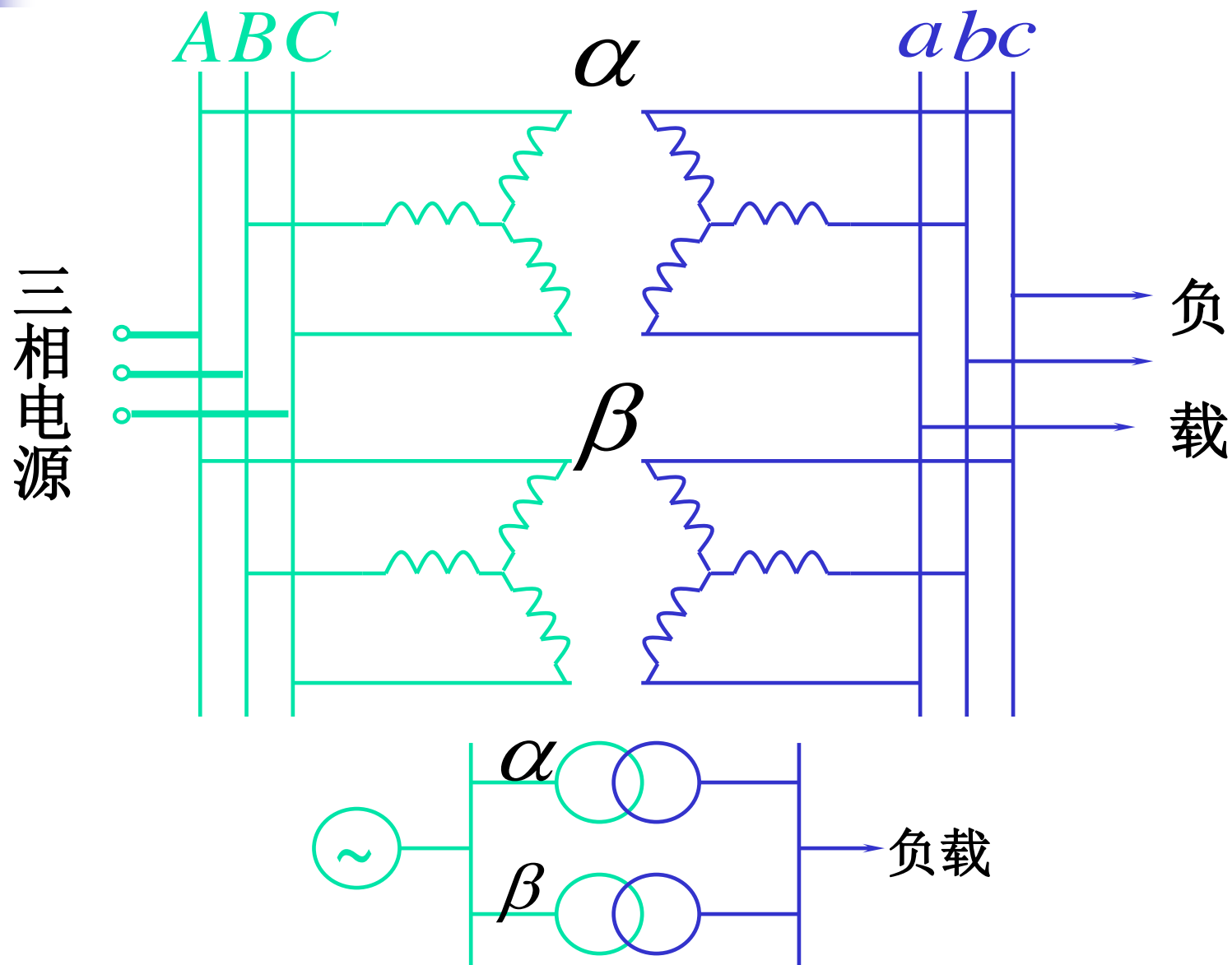
线电动势

$$\dot{E}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B$$

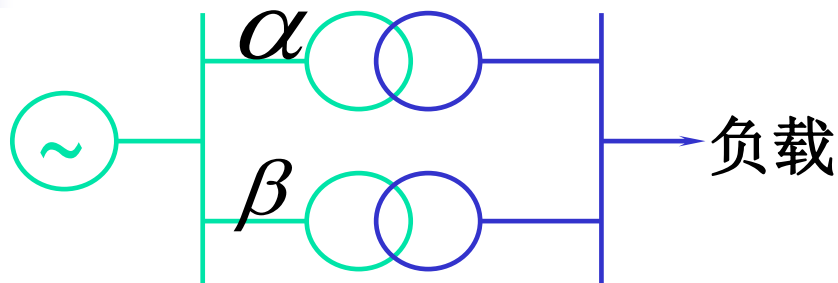
$$\dot{E}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C$$

$$\dot{E}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A$$

第七节 变压器的并联运行



第七节 变压器的并联运行



并联运行的理想情况：

- (1) 空载时每台变压器副边电流都为零，各变压器间无环流。
- (2) 负载运行时每台变压器分担的负载电流与它们的容量成正比。

并联运行的变压器应满足的条件：

- (1) 原、副边额定电压相同。
- (2) 属同一联接组别。
- (3) 短路阻抗标么值相等。



交流电机基本概念

1、同步电机和异步电机

$$n = \frac{60f_1}{p} \rightarrow \text{同步电机}$$

$$n \neq \frac{60f_1}{p} \rightarrow \text{异步电机}$$

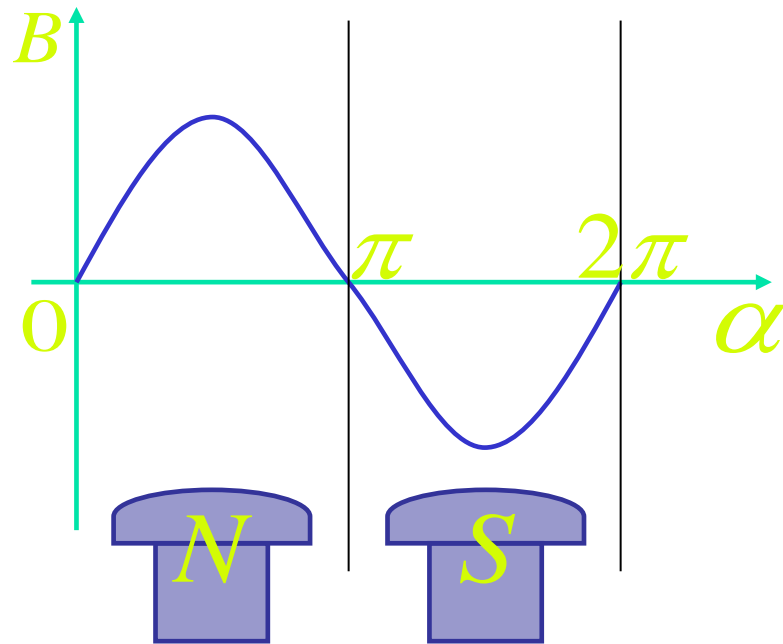
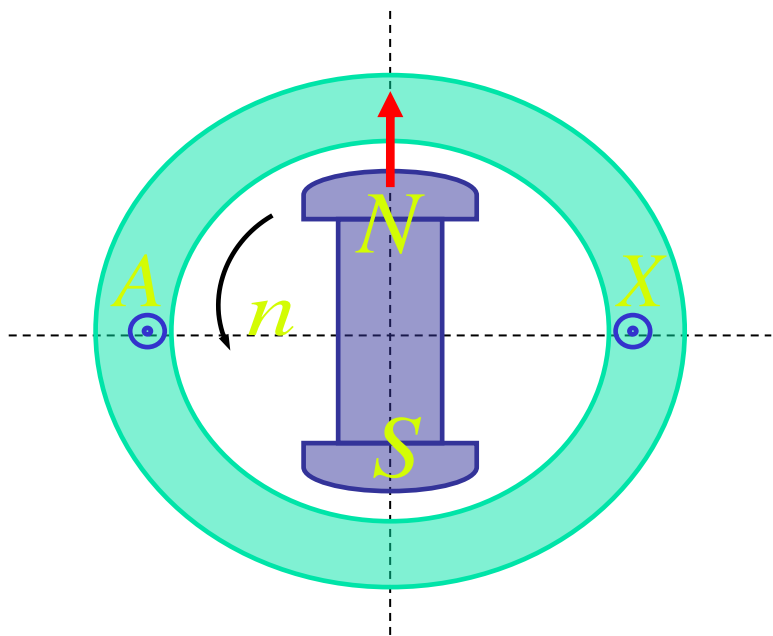
n —— 电机转速

f_1 —— 绕组感应电势基波频率

p —— 电机极对数

交流电机基本概念

2、交流电机电枢：定子绕组为电枢绕组，定子为电枢



3、机械角度 β ：电机定子内圆两点间对应的圆心角。

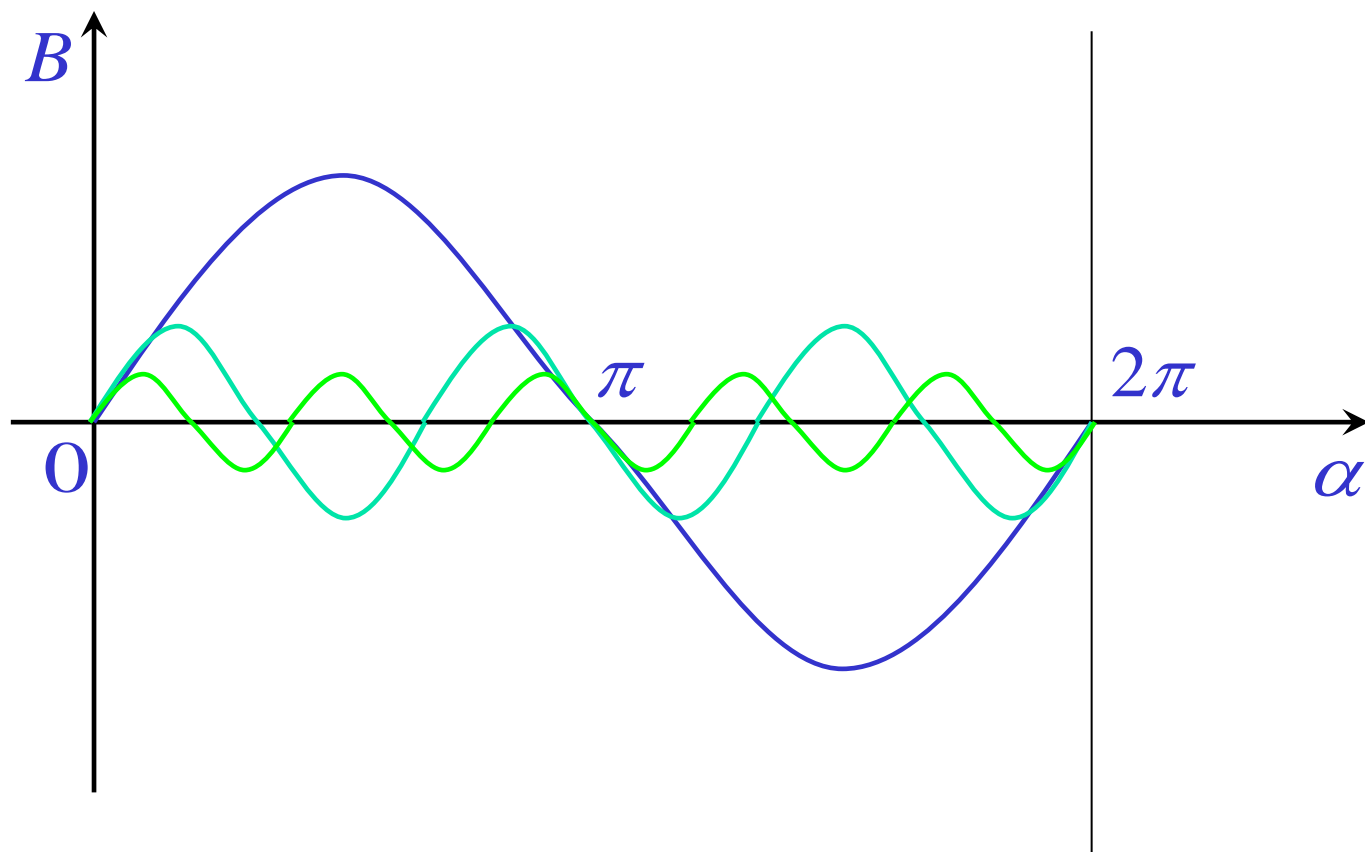
4、空间电角度 α ：一对主磁极 p 对应的磁场为一个周期

$$\alpha = p\beta$$

两点间对应这个周期的角度。

交流电机基本概念

5、基波磁密与谐波磁密：1次、3次、5次……谐波





第一节 交流电机电枢绕组电动势

- 导体电动势
- 整距线匝电动势
- 整距线圈电动势
- 短距线圈电动势
- 整距分布线圈组电动势
- 短距分布绕组电动势
- 谐波电动势

六、短距分布线圈组的电动势

$$E_q = 4.44 f q N_y k_d k_p \Phi$$
$$= 4.44 f q N_y k_{dp} \Phi$$

$$k_{dp} = k_d k_p$$

基波绕组系数

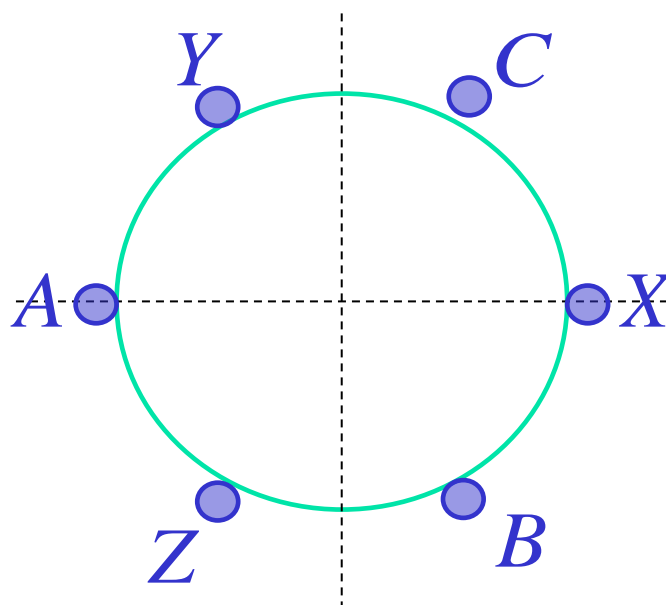
分布系数

抑制谐波 保留基波 交直流不一样的地方

短距系数

第二节 交流电机电枢绕组的电动势

- 一、三相单层绕组
- 1、三相单层集中整距绕组



- 感应电动势波形不理想，电枢表面空间利用不好

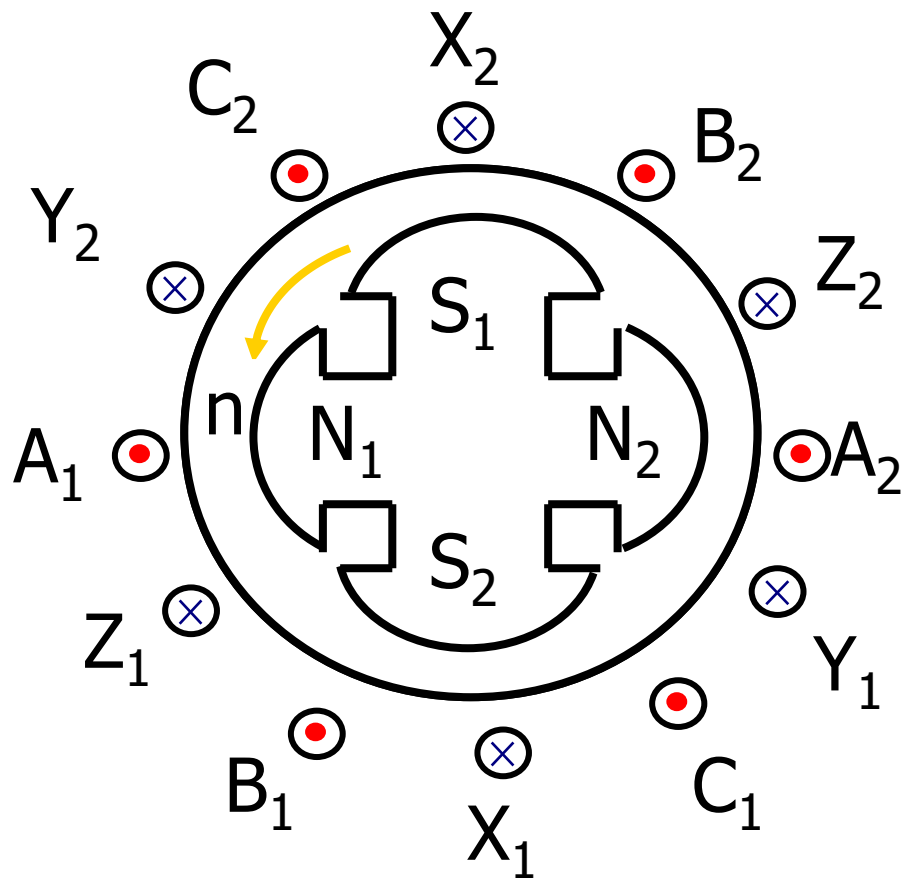
1、三相单层集中整距绕组

$P=2$ 时，绕组的排列

每对磁极下，都应有一个ABC三相绕组，其排列顺序在一对磁极下应对称。

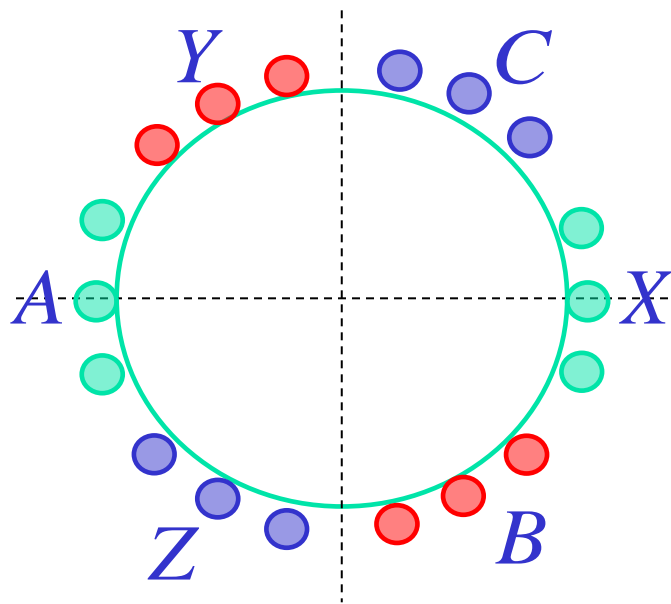
结论：

三相绕组排列顺序为：每对磁极下，六个绕组端在空间沿转子转向排列顺序为：A、Z、B、X、C、Y；且互差 60° 电角度。



2、三相单层分布绕组

每相绕组不可能放在一个槽中，应均匀放在相邻的几个槽中，串联在一起。



2、三相单层分布绕组

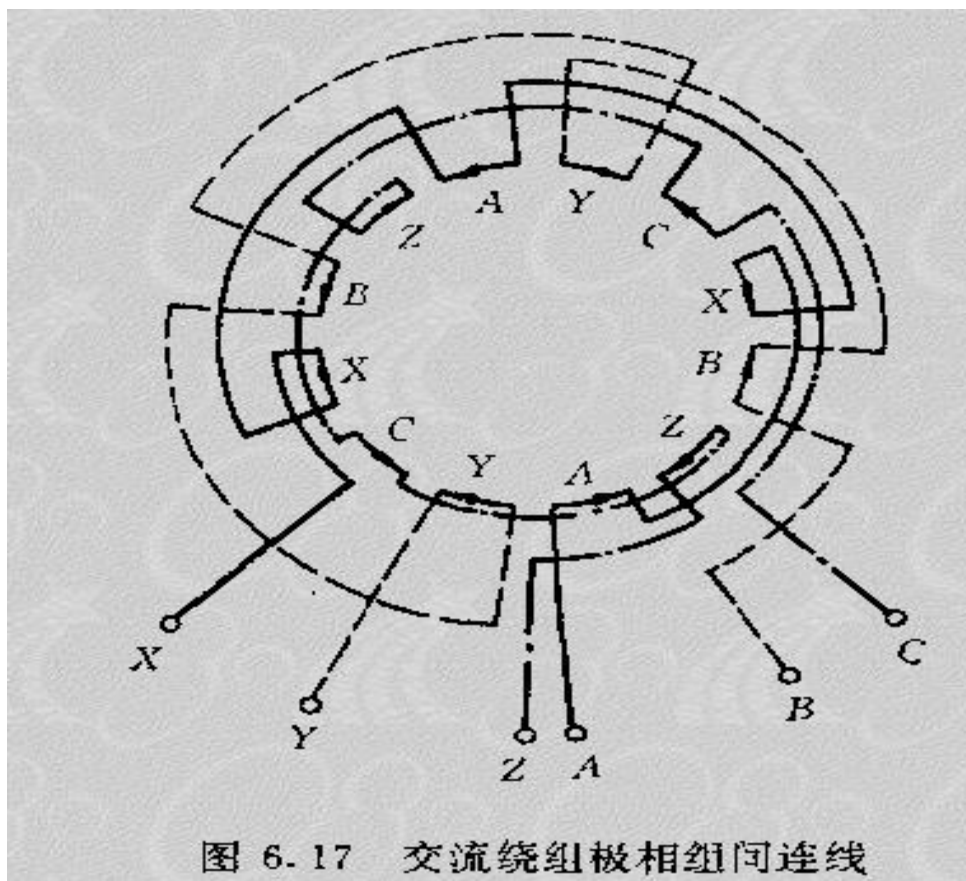
- 每相基波电动势：

$$\begin{aligned} E_{\phi} &= 4.44 f q N_y k_d p \frac{1}{a} \Phi \\ &= 4.44 f \frac{pq N_y}{a} k_d \Phi \\ &= 4.44 f N k_d \Phi \\ N &= \frac{pq N_y}{a} \quad \text{一相绕组串联的总匝数} \end{aligned}$$

并联支路数

二、三相双层绕组

- 1、每个槽分上下两层；
- 2、线圈的一个边在上层，另一个边在下层；
- 3、最大 $a=2p$ ；



二、三相双层绕组的电动势

显然有：

$$E_{\phi} = 4.44 f N k_{dp} \Phi$$

$$N = \frac{2pqN_y}{a} \quad \text{每相绕组串联的总匝数}$$

注： 1 . 单层绕组嵌线方便，无需层间绝缘。10Kw以下用单层绕组。

缺点：不能灵活采用短距线圈以抑制谐波电动势，漏电抗比较大。

2 . 双层绕组可改变短距系数，可改善电动势波形。

三、绕组的谐波电动势

- 绕组电动势：基波、谐波
- 基波 + 3 次，5 次，7 次. . .
- 谐波短距系数： $k_{pv} = \sin v y \frac{\pi}{2}$

$$\text{谐波分布系数：} k_{dv} = \frac{\sin q \frac{v \alpha}{2}}{q \sin \frac{v \alpha}{2}}$$

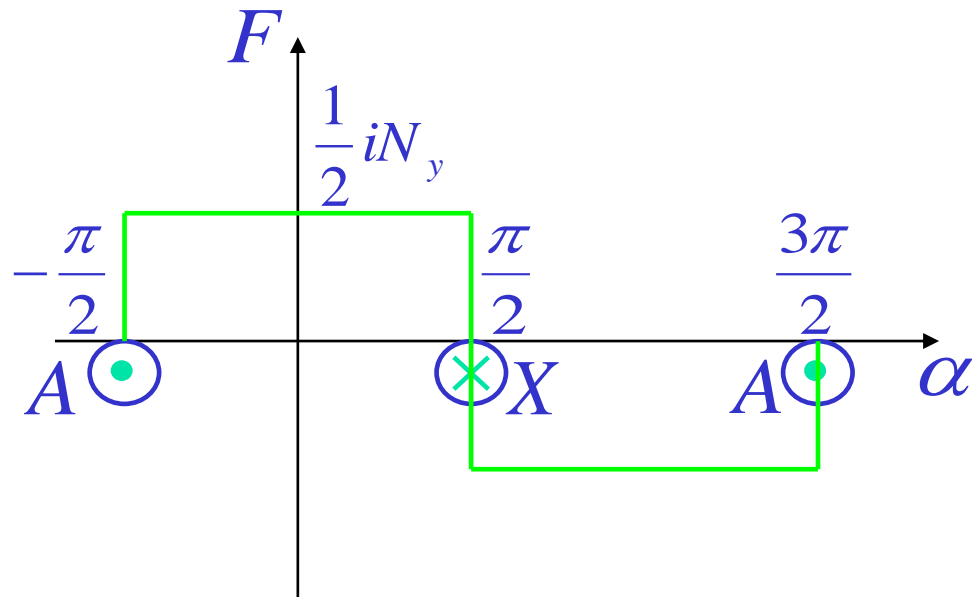
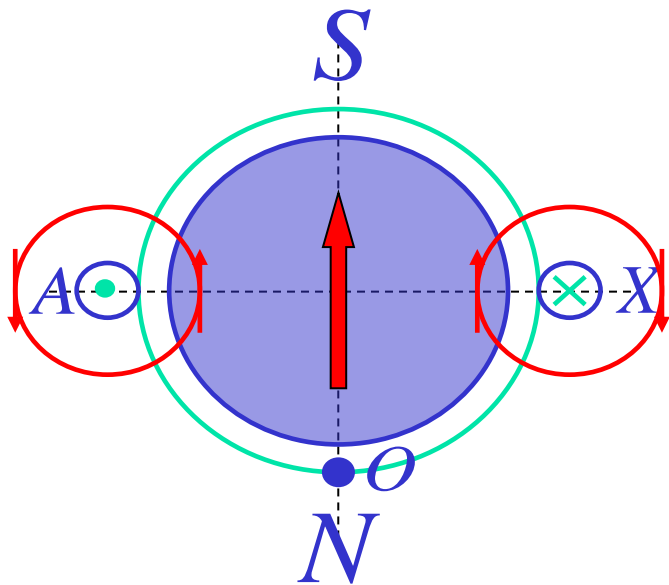
$$\text{谐波绕组系数：} k_{dpv} = k_{dv} \cdot k_{pv}$$

谐波电动势很小，可以忽略。

第三节 交流电机电枢绕组的磁势

- 本节讲述旋转磁场产生的基本原理；
- 通俗地讲：对称的三相绕组通以三相对称电流，产生圆形旋转磁势，从而在气隙中形成旋转磁场；
- 推而广之：对称的 m 相绕组通以 m 相对称电流，产生圆形旋转磁势，在气隙中形成旋转磁场；
- 旋转磁场的产生可以从物理上分析，也可进行数学分析，二者结论一致，我们从物理概念上对其进行分析。

一、整距线圈的磁势



$$i = \sqrt{2}I \cos \omega t$$

$$\Rightarrow f_{\Phi} = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t & \left(-\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \frac{\pi}{2} \right) \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t & \left(\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \frac{3\pi}{2} \right) \end{cases}$$

一、整距线圈的磁势

前式用傅氏级数展开，基波磁势为

$$f_y = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t \cos \alpha - \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \frac{1}{3} \cos \omega t \cos 3\alpha + \dots$$

$$f_{y1} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t \cos \alpha \quad \text{空间电角度}$$

基波与各谐波磁势的特点：

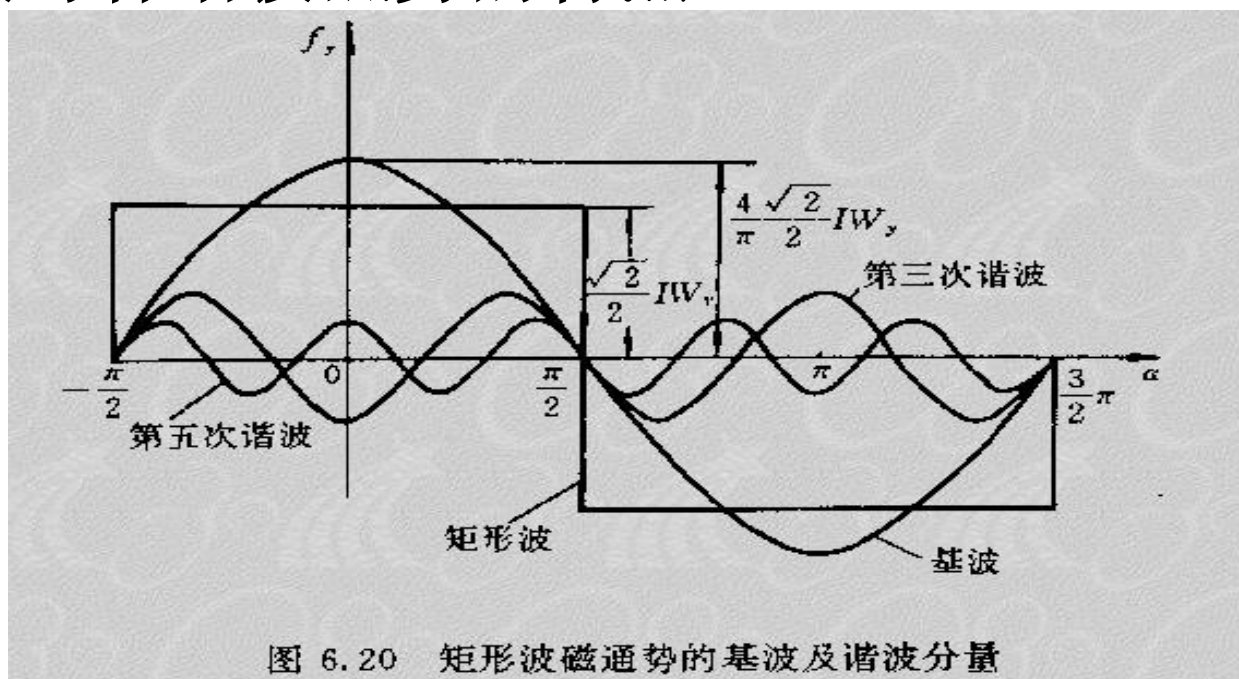


图 6.20 矩形波磁通势的基波及谐波分量

短距分布绕组的基波磁势

$$f_{y1} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_1 k_{p1}}{p} \cdot I \cos \omega t \cos \alpha$$

$$= F_{y1} \cos \omega t \cos \alpha$$

脉振磁势

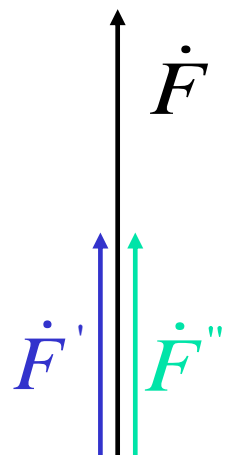
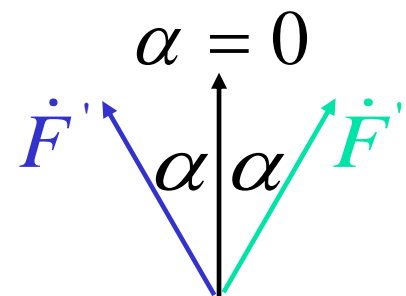
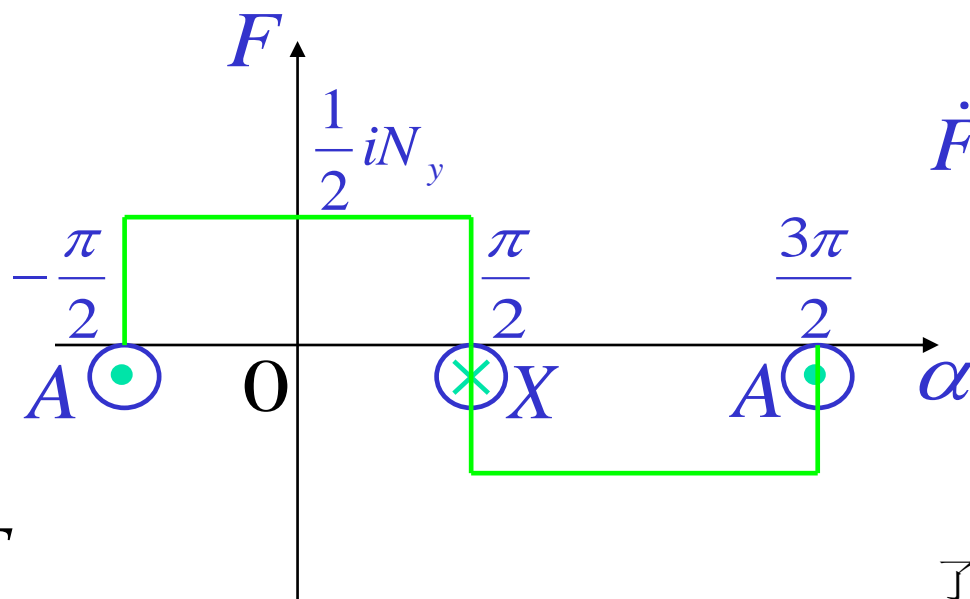
其中： $N_1 = \frac{2pqN_y}{a}$ —— 每相串联总匝数

k_{p1} —— 基波绕组系数

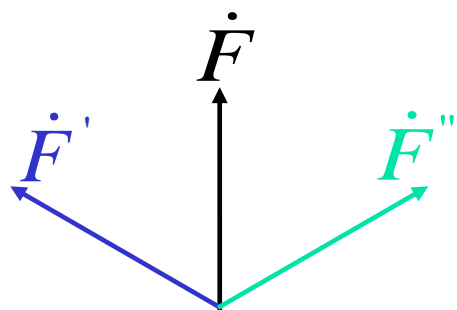
$$f_{y1} = F_{y1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$= \frac{1}{2} F_{y1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{y1} \cos(\alpha + \omega t)$$

$$= f'_{y1} + f''_{y1}$$



$\omega t = 0$



$\omega t = \pi/3$



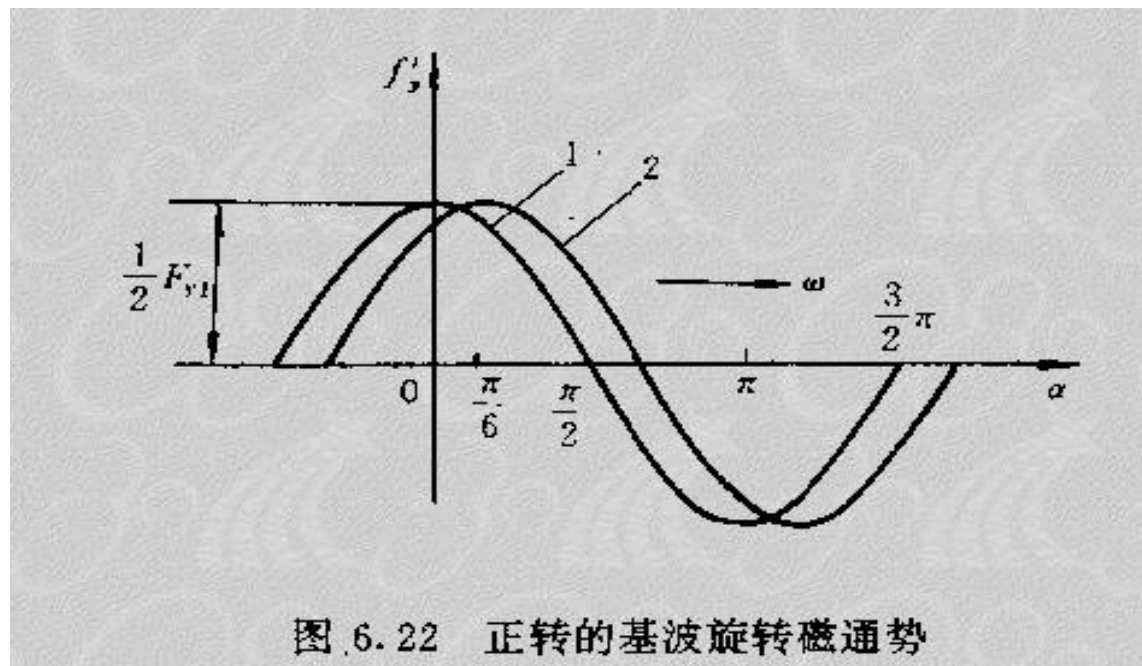
$\omega t = \pi/2$

了解，公式太多了

[动画联接1](#)

[动画联接2](#)

$$\begin{aligned}
 f_{y1} &= F_{y1} \cos \omega t \cos \alpha \\
 &= \frac{1}{2} F_{y1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{y1} \cos(\alpha + \omega t) \\
 &= f'_{y1} + f''_{y1}
 \end{aligned}$$





二、三相交流电机的旋转磁场

$$i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t, i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 120^\circ), i_C = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 240^\circ)$$

$$f_{A1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t)$$

$$f_{B1} = F_{\phi 1} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ)$$

$$= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t - 240^\circ)$$

$$f_{C1} = F_{\phi 1} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\alpha - 240^\circ)$$

$$= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t - 120^\circ)$$

$$\text{其中 } F_{\phi 1} = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{Nk_{dp1}}{p} I$$

二、三相交流电机的旋转磁场

$$\begin{aligned} f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} &= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t) \\ &+ \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t - 240^\circ) \\ &+ \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t - 120^\circ) \\ &= \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) \\ &= F_1 \cos(\alpha - \omega t) \end{aligned}$$

$$\text{其中 } F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N k_{dp1}}{p} I$$

二、三相交流电机的旋转磁场

$$i_A = I_m \cos \omega t$$

$$i_B = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

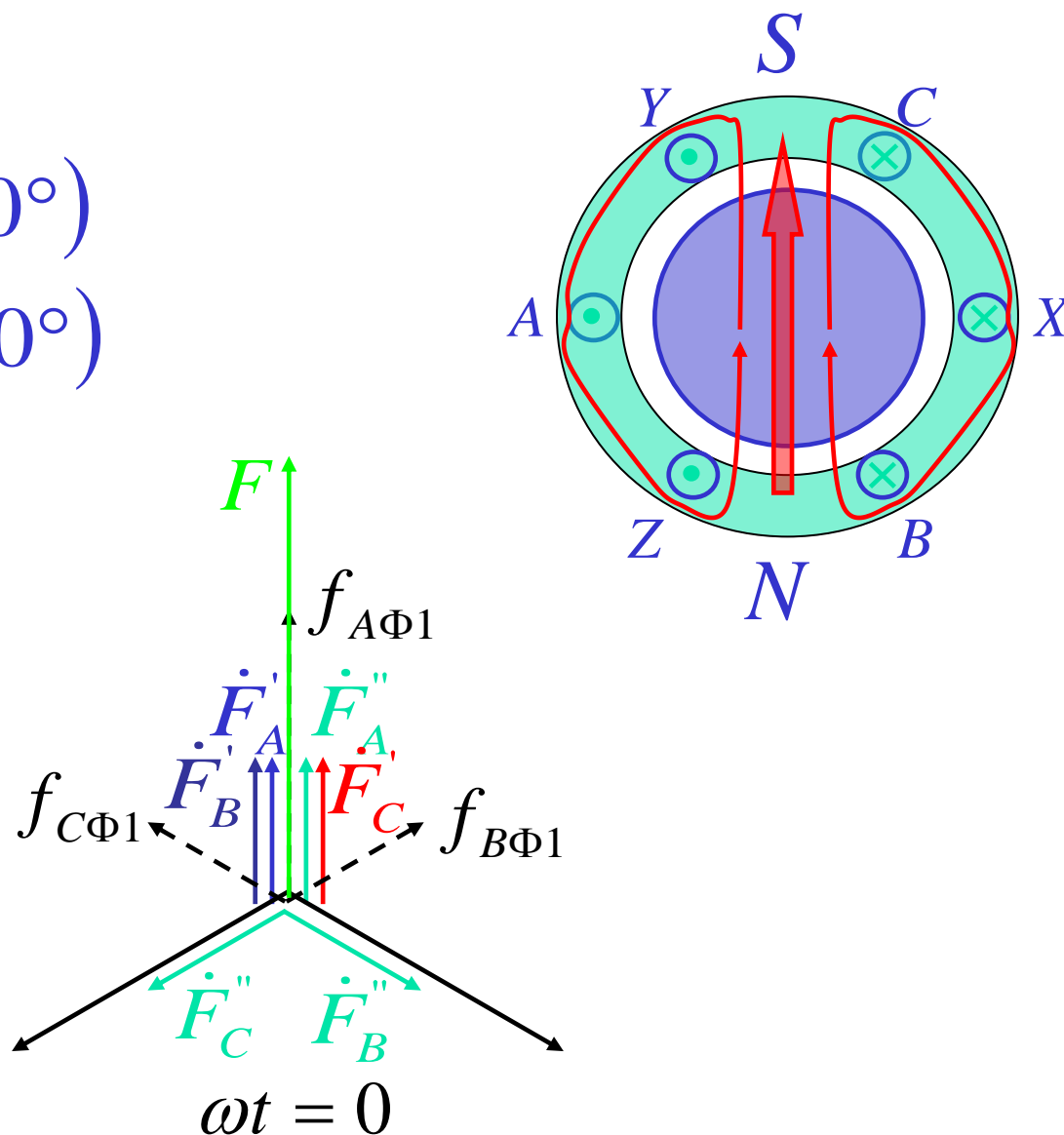
$$i_C = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$

(1) 当 $\omega t = 0$ 时

$$i_A = I_m$$

$$i_B = -\frac{1}{2} I_m$$

$$i_C = -\frac{1}{2} I_m$$



(2) 当 $\omega t = \pi/3$ 时

$$i_A = \frac{1}{2} I_m$$

$$i_B = \frac{1}{2} I_m$$

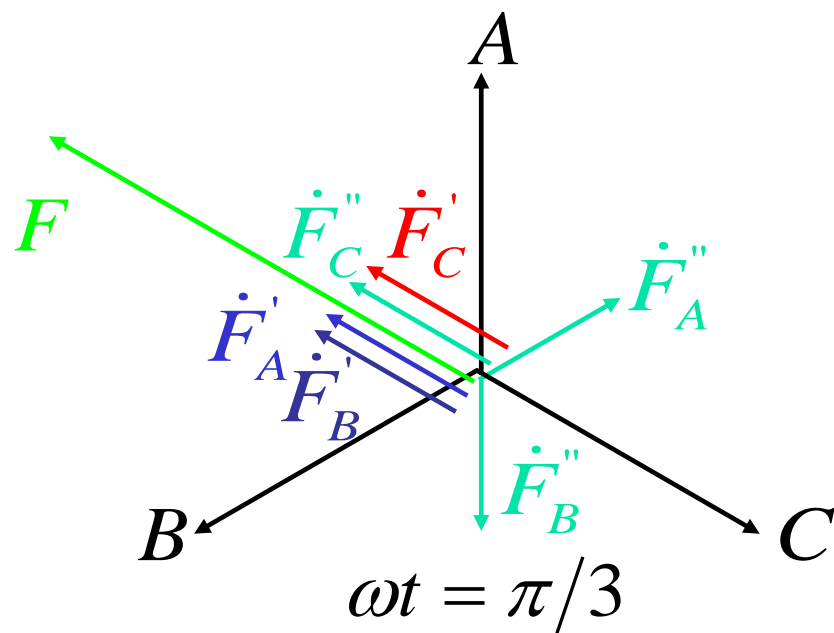
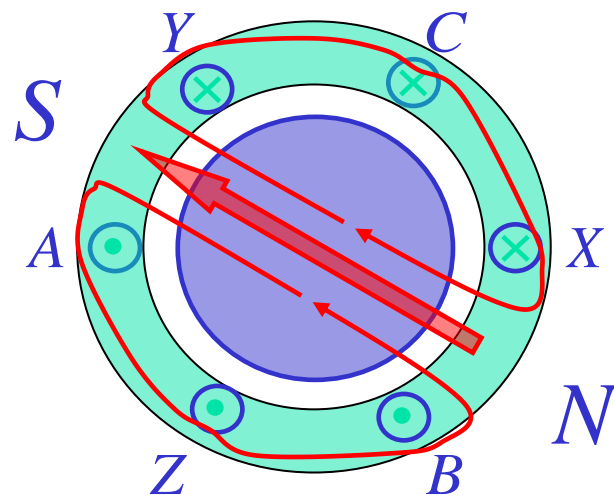
$$i_C = -I_m$$

(3) 当 $\omega t = 2\pi/3$ 时

⋮

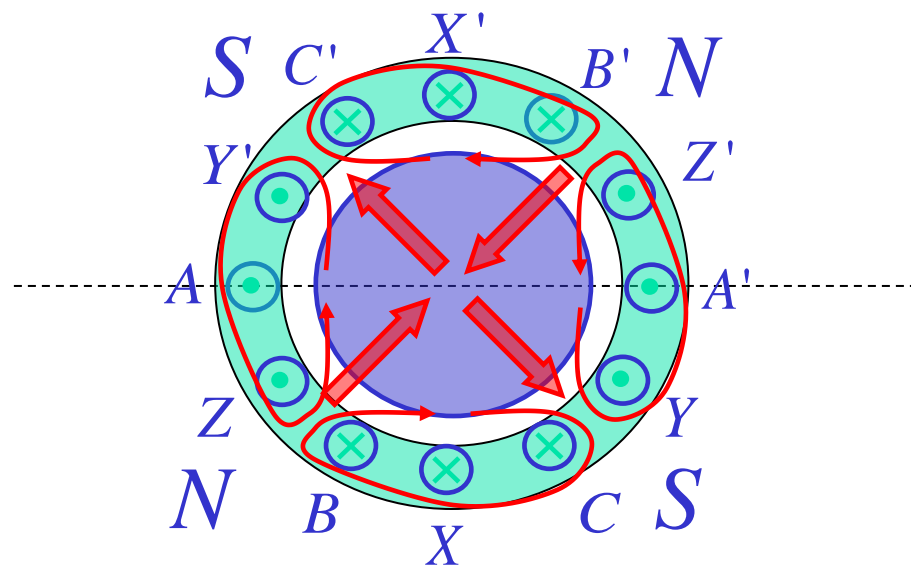
连接动画3

连接动画4



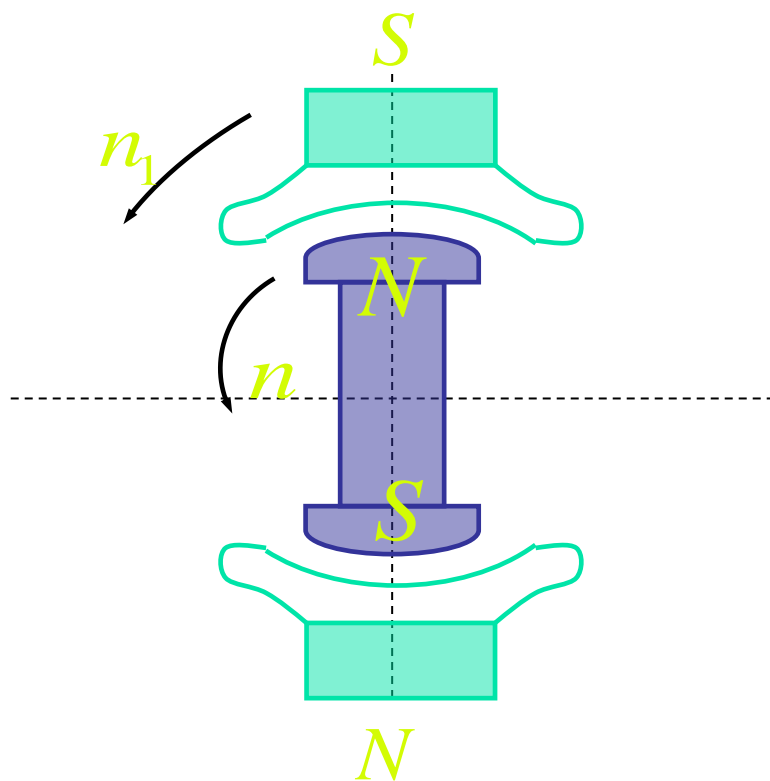
小结

- 三相电流的时间相位变化了多大角度，其合成磁势也在空间上旋转了多大电角度，合成磁势的幅值不变；
- 电流变化一个周期——合成磁势旋转一周；
- 磁场转速 $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ ，旋转方向由相序确定；
- $p = 2$ 时



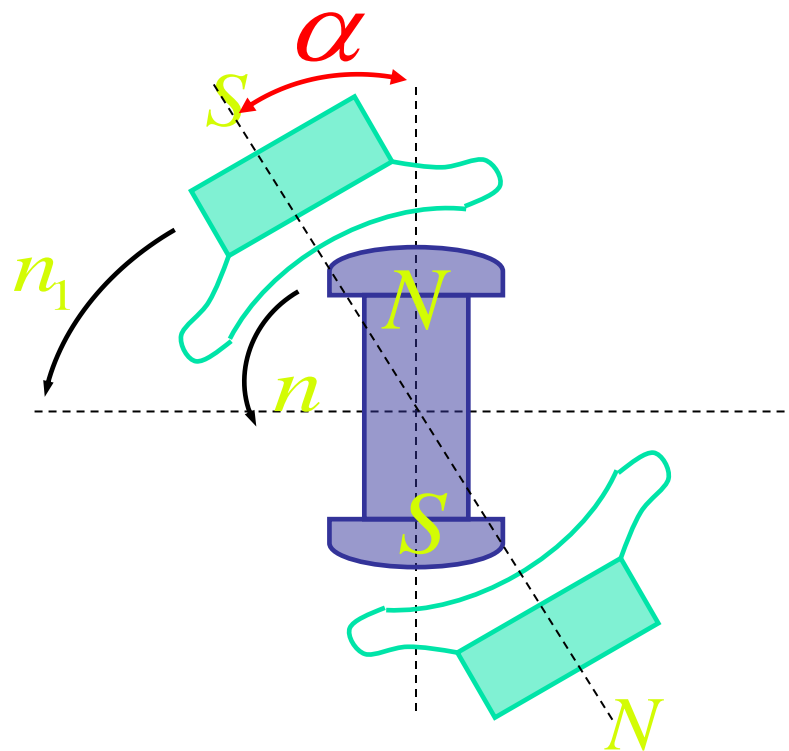
[连接动画](#)5

三、交流同步电动机的工作原理



$$n = n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

[连接动画6](#)




[连接动画7](#)

以上 概念性理解



第七章 三相异步电动机

- 三相异步电动机的结构、工作原理、铭牌数据
- 三相异步电动机的电磁关系
- 三相异步电动机的转矩



三相异步电动机概述

一、特点、分类

1、特点：

结构简单、价格低廉、运行可靠、坚固耐用、
运行效率较高、具有较好的工作特性；

功率因数较差、调速性能相对直流机较差。所以一般用直流电机。

2、分类：

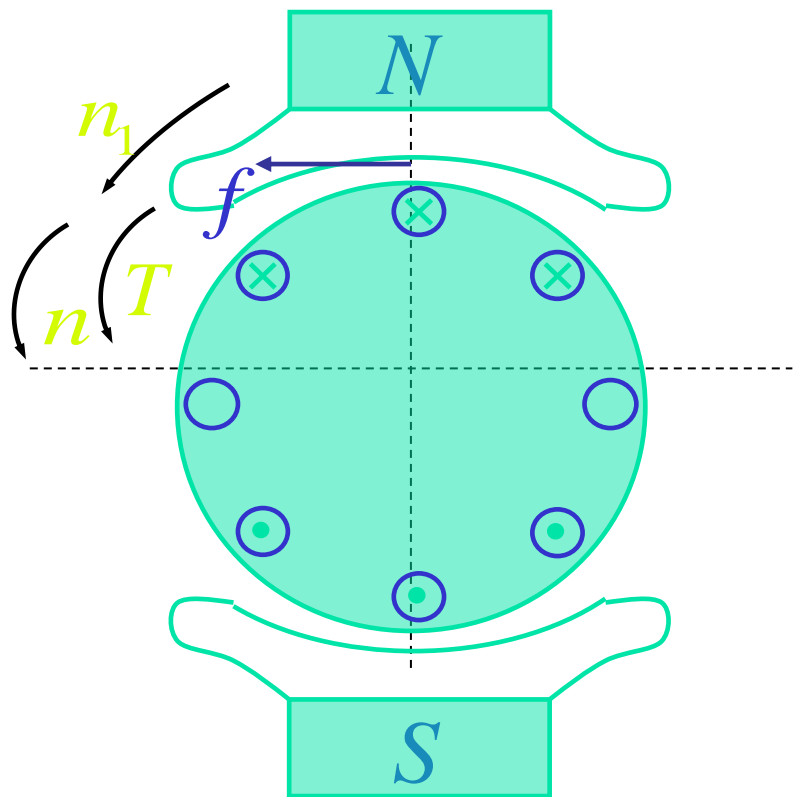
(1) 按定子相数分类：二相、三相

(2) 按转子结构分类：绕线式、鼠笼式

(3) 绕线式按结构分类：有换向器、无换向器

另外：高压、低压、高启动转矩等。

三、工作原理（以绕线式电机为例）



1、三相定子绕组接三相交流电，气隙中产生**旋转磁场**。

逆时针同步转速；

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

2、相对转子，有旋转的磁极；

3、转子导体中将产生**感应电势**和**感生电流**；

4、导体中的电流受力，产生转矩，使**转子按旋转磁场的方向旋转**；

5、转子转速能否达到同步转速？

6、**转差率**：

同步转速 n_1 ，转子转速 n ，

转差 $\Delta n = n_1 - n$ ，转差率 $s = \Delta n / n_1$ 。

三、工作原理（以绕线式电机为例）

7、转差率的含义：

$$S=(n_1-n)/n$$

当同步转速 n_1 是确定的时候， s 与 n 一一对应。

当 $0 < s < 1$ 即 $0 < n < n_1$ 时，电动状态 异步状态

当 $s < 0$ 即 $n > n_1$ 时，发电状态

当 $s > 1$ 即 $n < 0$ 时，电磁制动状态

正常电动运行时 $s = 0.01 \sim 0.05$

四、额定数据

$P_N (kW)$, $U_N (V)$, $I_N (A)$, $f_N (Hz, 50Hz)$,
 $n_N (r/min)$, $\cos \varphi_N$, η_N 等

例题:

三相异步电动机, $P_N = 55\text{kW}$, $U_N = 380\text{V}$, $I_N = 119\text{A}$

$n_N = 570\text{ r/min}$, $\cos \varphi_N = 0.89$ 。

求: 同步转速 n_1 , 极对数 p , 额定负载时的效率 η_N 和转差率 s_N 。

解:

$$(1) \left. \begin{array}{l} n_N = 570\text{ r/min} \\ n_1 = 60 f_1 / p \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} n_1 = 600\text{ r/min} \\ p = 5 \end{array} \right.$$

$$(2) \eta_N = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N} = 0.79$$

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = 0.05$$

再看一下书上230页例题7-4, 7-5

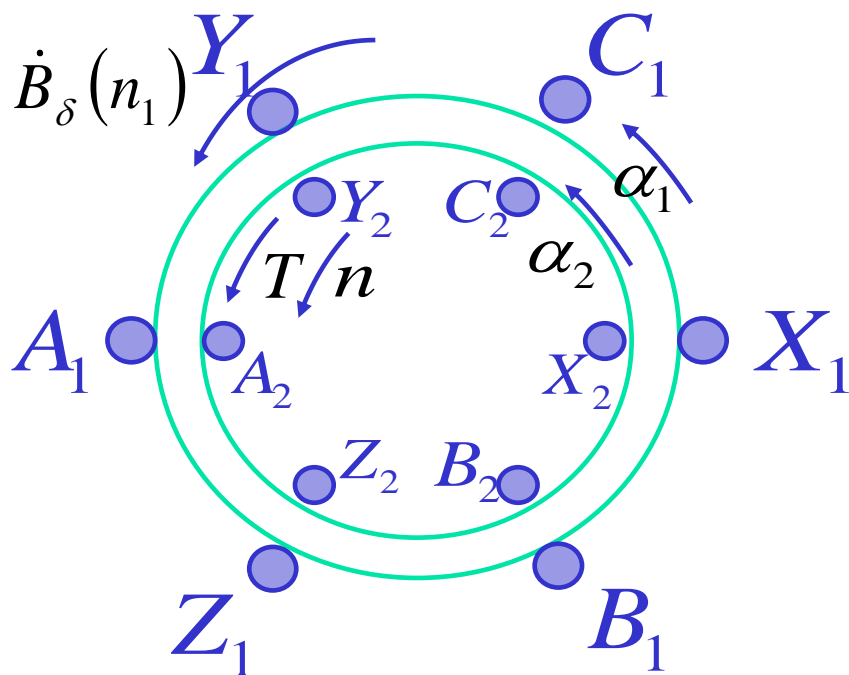


第二节 三相异步电动机的电磁关系

- 以绕线式异步电机为例
- 分析步骤：
 - (1) 转子不转，且转子绕组开路；
 - (2) 转子堵转，且转子绕组短路；
 - (3) 转子旋转，正常运行。
- 分析内容：
 - (1) 惯例；
 - (2) 电磁平衡关系式；
 - (3) 折算与等值电路；
 - (4) 向量图。

一、转子不转、转子绕组开路 (理解 没有大题)

1、惯例 (1)



$\dot{B}_\delta(n_1)$ — 气隙磁密 (同步转速)

T — 电磁转矩

n — 转速

α_1 — 沿定子内表面的角度

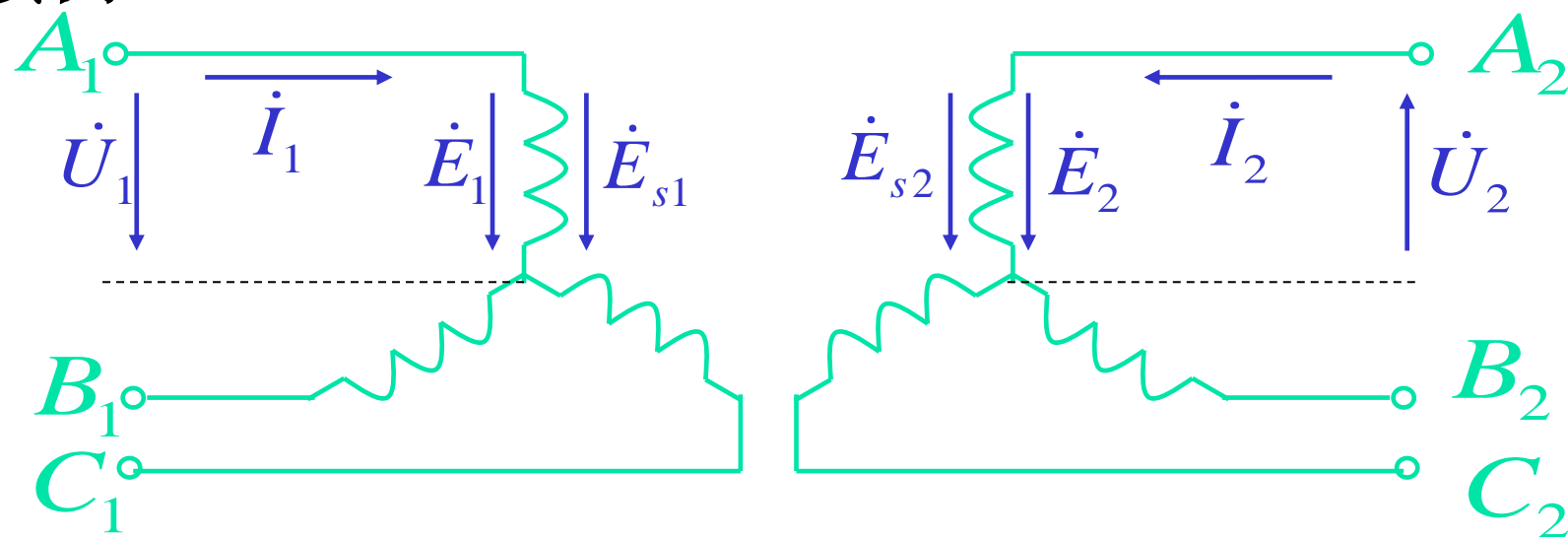
α_2 — 沿转子外表面的角度

磁密 \dot{B} 、磁通 $\dot{\Phi}$ 、磁势 \dot{F}

均以进入转子方向为正方向

一、转子不转、转子绕组开路

惯例 (2)



\dot{U}_1 —— 电枢绕组相电压

\dot{E}_1 —— 电枢绕组相电势

\dot{I}_1 —— 电枢绕组相电流

\dot{E}_{s1} —— 电枢绕组相漏电势

\dot{U}_2 —— 转子绕组相电压

\dot{E}_2 —— 转子绕组相电势

\dot{I}_2 —— 转子绕组相电流

\dot{E}_{s2} —— 转子绕组相漏电势

2、电磁关系（类似变压器空载运行）

(1) 磁通 $\dot{\Phi}$ 、磁势 \dot{F}_0

定子通以三相对称电流 \dot{I}_{0A} 、 \dot{I}_{0B} 、 \dot{I}_{0C}

\Rightarrow 空间合成磁势为 \dot{F}_0

a、幅值：
$$F_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_1 k_{dp1}}{p} \cdot I_0$$

b、转向：电流相序决定， $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 时，逆时针

c、转速：
$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} (r/min), \quad \omega = 2\pi f_1 (rad/s)$$

d、
$$\left. \begin{array}{l} \text{定子磁势 } \dot{F}_1 \\ \text{转子磁势 } \dot{F}_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$$

2、电磁关系（类似变压器空载运行）

(2) 感应电势

a、大小： $E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{dp1} \Phi_1$, $E_2 = 4.44 f_1 N_2 k_{dp2} \Phi_1$

b、变压比： $k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_{dp1}}{N_2 k_{dp2}}$

c、相位： \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 滞后于 $\dot{\Phi}_1$ 90° , \dot{B}_δ 与 $\dot{\Phi}_1$ 同相位

d、 $\dot{E}_1 = k \dot{E}_2 = \dot{E}'_2$

(3) 励磁电流 $\dot{I}_0 = \dot{I}_{0r} + \dot{I}_{0a}$

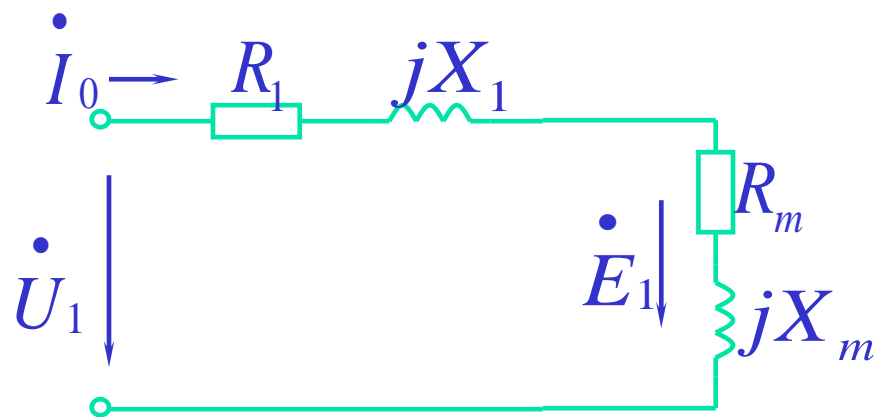
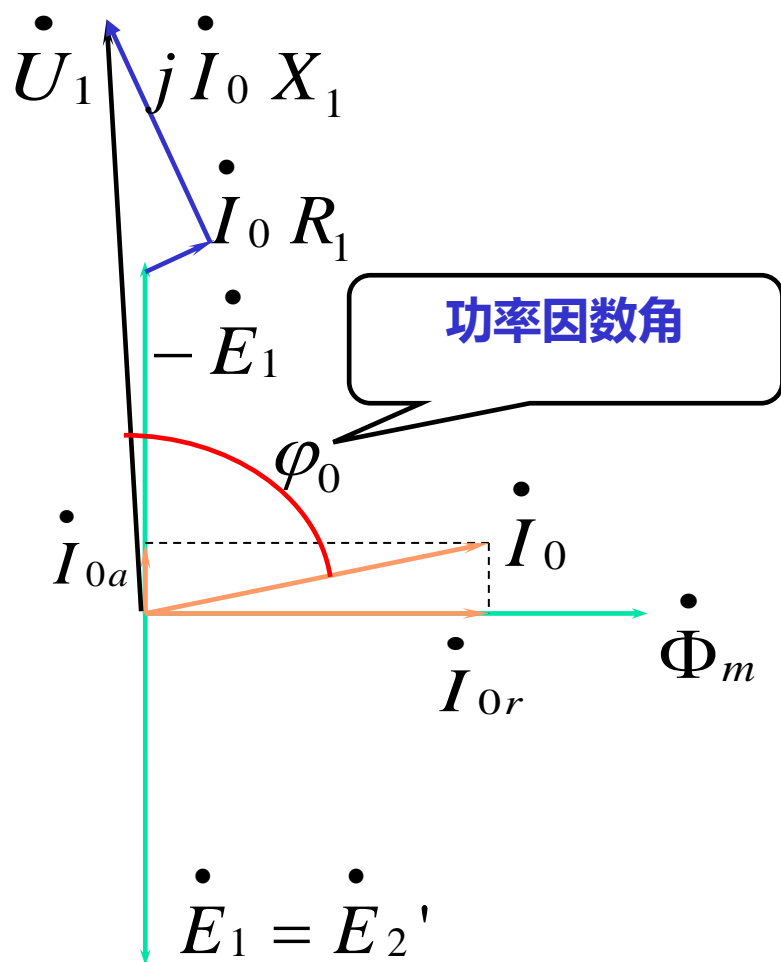
(4) 电压、电势平衡方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 - \dot{E}_{s1} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

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

3、向量图与等值电路

(与变压器空载运行相似)

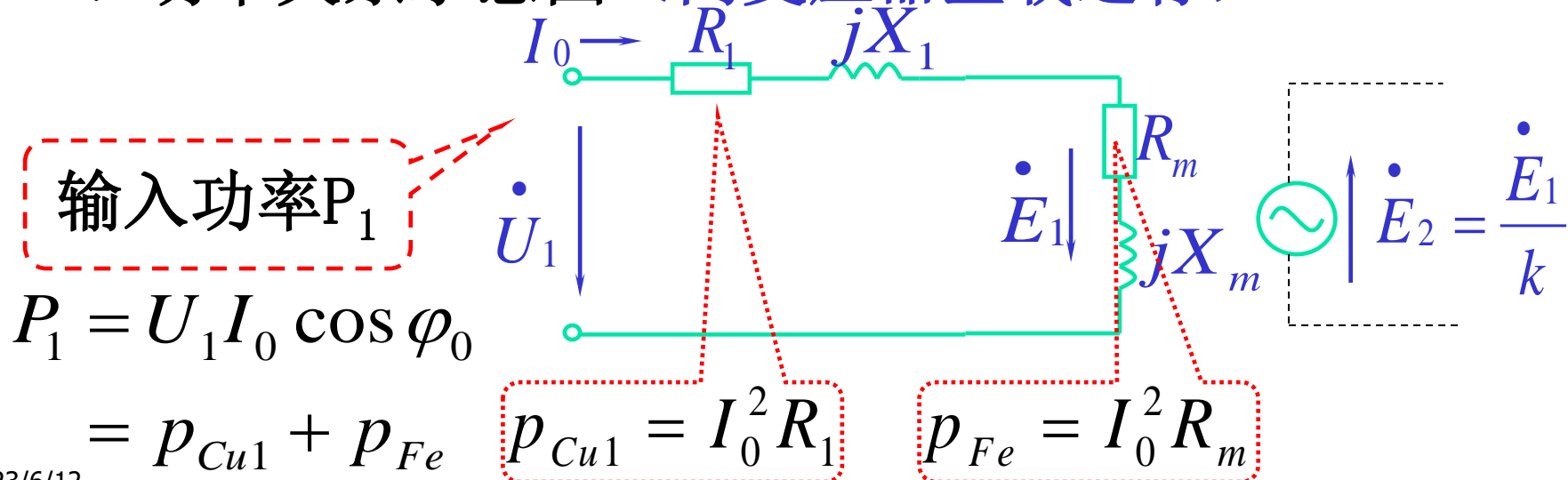


一、转子不转、转子绕组开路

4、电磁关系示意图（同变压器空载运行）

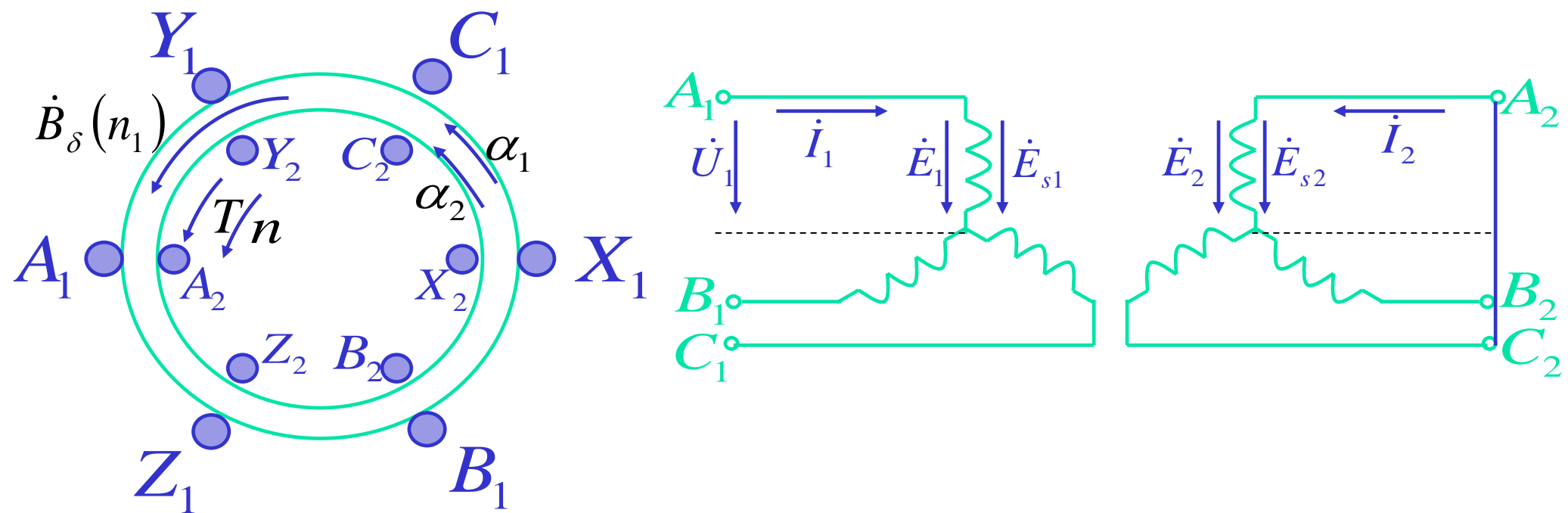
$$\dot{U}_1 \rightarrow \dot{I}_0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{\Phi}_{s1} \rightarrow \dot{E}_{s1} = -j\dot{I}_0 X_1 \\ \dot{\Phi}_1 \rightarrow \begin{cases} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \end{cases} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(R_1 + jX_1) \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 \end{cases}$$

5、功率关系示意图（同变压器空载运行）



二、转子堵转、转子绕组短路

1、惯例



2、磁势、磁通

(1)定子磁势

a、幅值：
$$F_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_1 k_{dp_1}}{p} \cdot I_1$$

b、转向：电流相序决定， $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 时，逆时针

c、转速：
$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} (r/min), \quad \omega = 2\pi f_1 (rad/s)$$

(2)转子磁势

a、幅值：
$$F_2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_2 k_{dp_2}}{p} \cdot I_2$$

b、转向：电流相序决定， $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 时，逆时针

c、转速：
$$n_2 = \frac{60 f_2}{p} = \frac{60 f_1}{p} (r/min) = n_1$$

2、磁势、磁通

(3)合成磁势

$$\left. \begin{array}{l} \text{定子磁势 } \dot{F}_1 \\ \text{转子磁势 } \dot{F}_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$$

(4)主磁通

$$\dot{F}_0 \rightarrow \dot{\Phi}_1 \rightarrow \dot{E}_1 \text{ 和 } \dot{E}_2$$

(5)漏磁通

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I}_1 \rightarrow \dot{\Phi}_{s1} \text{ 表现为 } jX_1 \\ \dot{I}_2 \rightarrow \dot{\Phi}_{s2} \text{ 表现为 } jX_2 \end{array} \right\} \text{ 均不饱和}$$

3、定、转子回路方程

$$\text{定子: } \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1)$$

$$\begin{aligned}\text{转子: } \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2) \\ &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ &= 0\end{aligned}$$

$$\text{转子相电流: } \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{R_2 + jX_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} e^{-j\varphi_2}$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{X_2}{R_2}$$

例题7-2

4、转子绕组的折合（类似变压器）

(1) 原则与思路

通常异步电机转子的相数 m_2 与定子的相数 m_1 并不相同。

原则：保持折算前后**转子**绕组的**磁势不变**。

思路：用假想的转子 m_1 、 N_1 、 k_{dp1} 代替实际的 m_2 、 N_2 、 k_{dp2}

(2) 结论：

$$k_i = \frac{I_2}{I_2'} = \frac{m_1 N_1 k_{dp1}}{m_2 N_2 k_{dp2}} \text{ —— 电流变比}$$

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_{dp1}}{N_2 k_{dp2}} \text{ —— 电压变比}$$

(3) 折合前后 功率关系不变

$$\dot{I}_2' = \dot{I}_2 / k_i \quad \dot{E}_2' = k_e \dot{E}_2 = \dot{E}_1$$

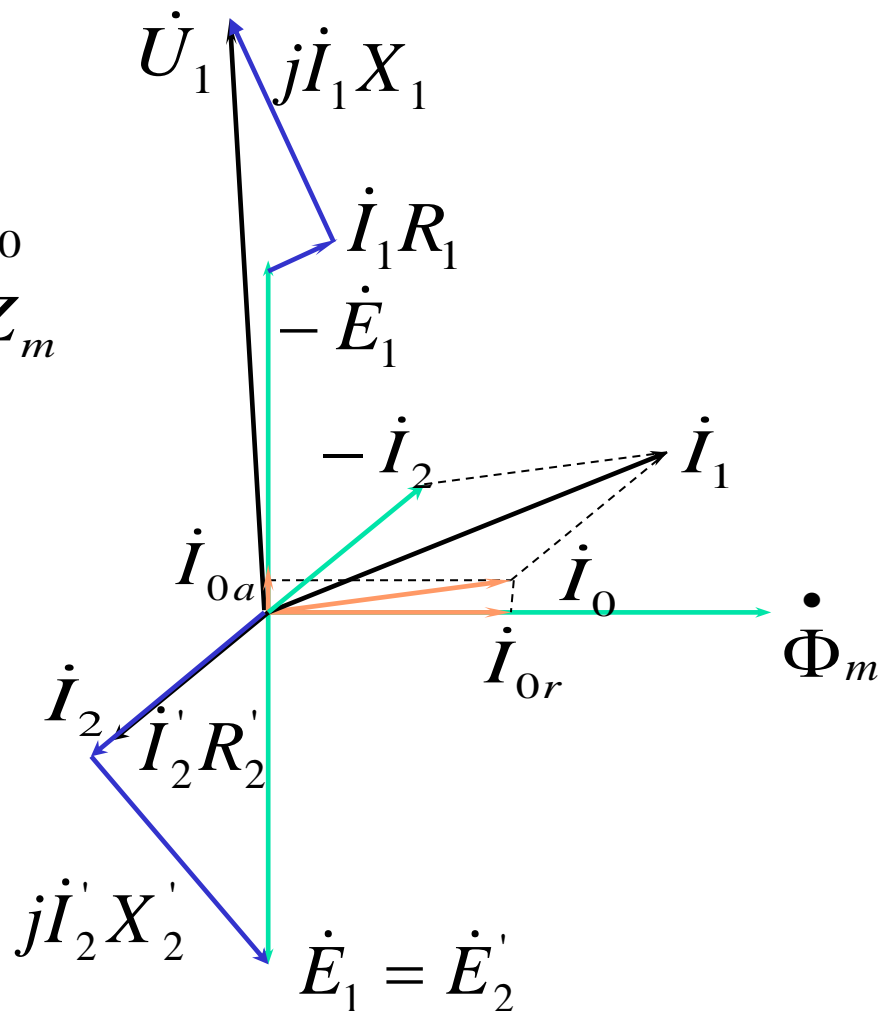
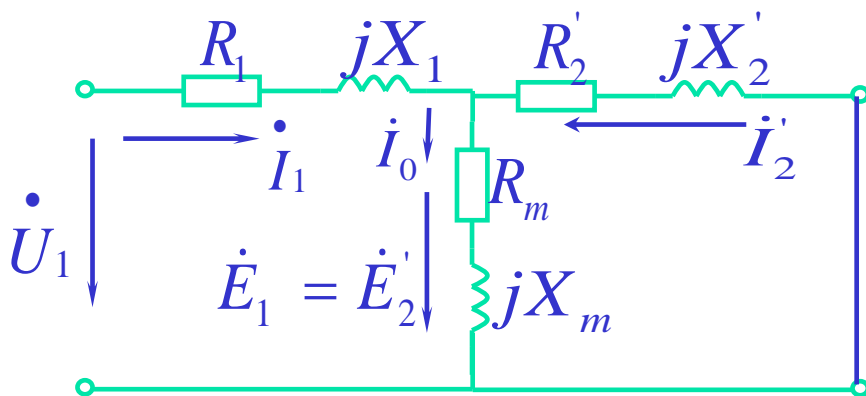
$$Z_2' = \frac{\dot{E}_2'}{\dot{I}_2'} = \frac{k_e \dot{E}_2}{\dot{I}_2 / k_i} = k_e k_i Z_2$$

$$\varphi_2' = \varphi_2$$

5、基本方程、等值电路、向量图

(类似变压器副边短路)

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 & \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0 \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' & \dot{I}_0 &= -\dot{E}_1 / Z_m \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}_2'\end{aligned}$$



三、转子正常运行时的电磁关系

$$\text{转差率: } s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

1、转子电势 $\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s} (R_2 + jX_{2s})$

转速 n 时的
相电动势

转速 n 时的
相电流

转速 n 时的
相漏电抗

\dot{B}_δ 与 n 的相对速度为 n_2 ，此时转子绕组电势频率 f_2

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

$$\dot{E}_{2s} = 4.44 f_2 N_2 k_{dp_2} \dot{\Phi}_1 = 4.44 s f_1 N_2 k_{dp_2} \dot{\Phi}_1 = s \dot{E}_2$$

$$X_{2s} = s X_2$$

2、定、转子磁势

(1) 定子磁势 \dot{F}_1 (由 \dot{I}_1 产生) 不再讨论

(2) 转子磁势 \dot{F}_2 (由 \dot{I}_{2s} 产生)

a、幅值:
$$F_2 = \frac{m_2}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_2 k_{dp_2}}{p} \cdot I_{2s}$$

b、转向: 电流相序决定, $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 时, 逆时针

c、转速: $n_2 = \frac{60f_2}{p} (r/min)$ —— 相对于转子外表面

$n_2 = n_1$ —— 相对于定子内表面

(3) 合成磁势

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$$

3、转子绕组的折合

(1) 频率折合

目的：转子和定子绕组中的电流频率不同，计算不方便

原则：保持转子磁势相对于定子的位置、大小、转速不变

思路：以频率为 f_1 的假想的转子电势、电流、漏抗、电阻

替换频率为 f_2 的实际的转子电势、电流、漏抗、电阻

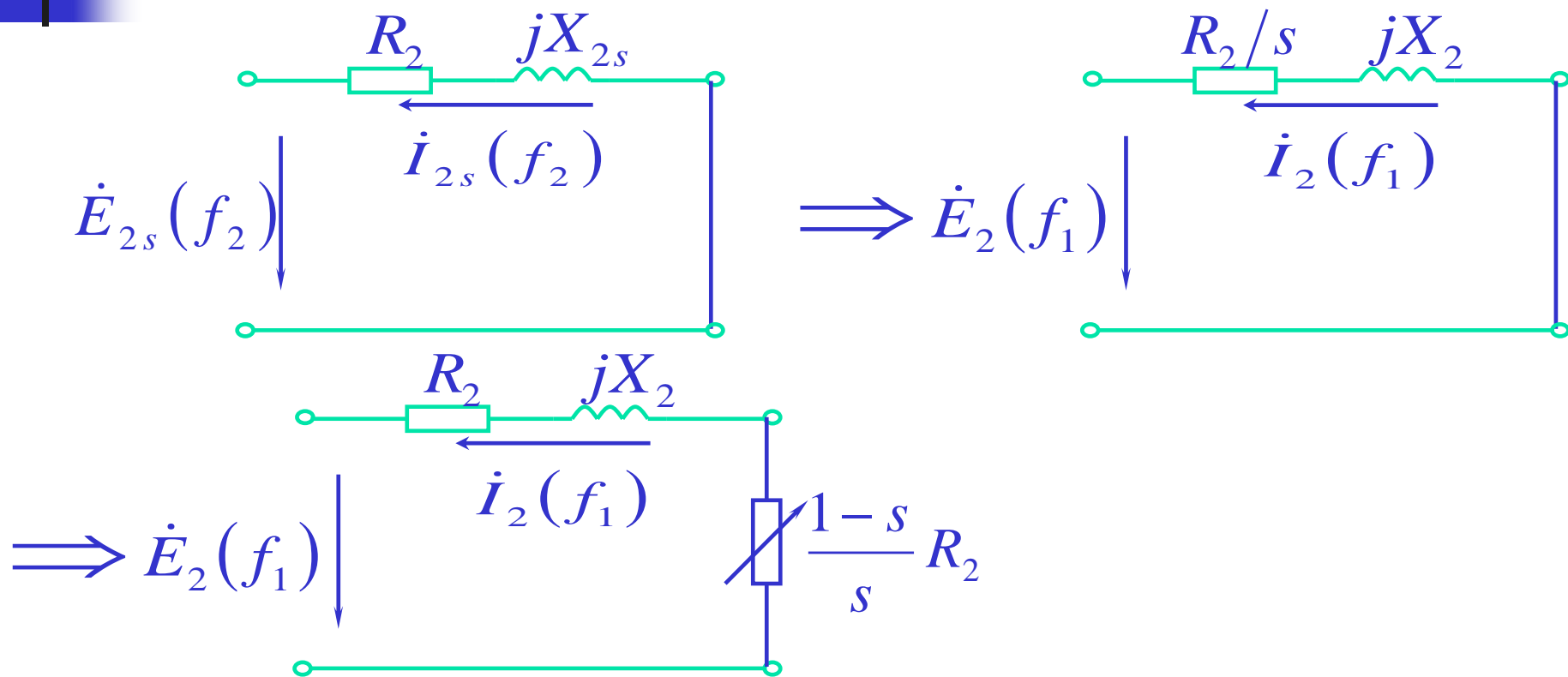
即用静止的等效转子代替旋转的实际转子。

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

$$\dot{I}_{2s} \overset{\text{转子旋转}}{\frac{\dot{E}_{2s}}{R_2 + jX_{2s}}} = \frac{s\dot{E}_2}{R_2 + jsX_2} \overset{\text{转子静止}}{\frac{\dot{E}_2}{R_2/s + jX_2}} = \dot{I}_2$$

$$\varphi_{2s} = \varphi_2$$

3、转子绕组的折合



$\frac{1-s}{s}R_2$ 的含义分析

在转子堵转时转子绕组中传入一个电阻 $(1-s)R_2/s$ 后, 可以等效旋转的转子

电阻上的功率 $I_2^2 \cdot \frac{1-s}{s}R_2$ 为有功功率, 转子旋转的总机械功率

(2) 绕组折算

a、电流折算： $\dot{I}_2 \rightarrow \dot{I}_2'$

$$\dot{F}_2' = \dot{F}_2 \Rightarrow \frac{m_1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_1 k_{dp1}}{p} \cdot \dot{I}_2' = \frac{m_2}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_2 k_{dp2}}{p} \cdot \dot{I}_2$$

$$\Rightarrow \dot{I}_2' = \dot{I}_2 / k_i \text{ 电流比}$$

b、电势折算： $\dot{E}_2 \rightarrow \dot{E}_2'$

$$m_1 E_2' I_2' = m_2 E_2 I_2 \Rightarrow \dot{E}_2' \rightarrow k_e \dot{E}_2 \text{ 电压比}$$

c、阻抗折算： $Z_2 \rightarrow Z_2'$

$$Z_2' = k_e k_i Z_2$$

$$R_2' = k_e k_i R_2$$

$$X_2' = k_e k_i X_2$$

(2) 绕组折算

4、基本方程和等值电路

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1)$$

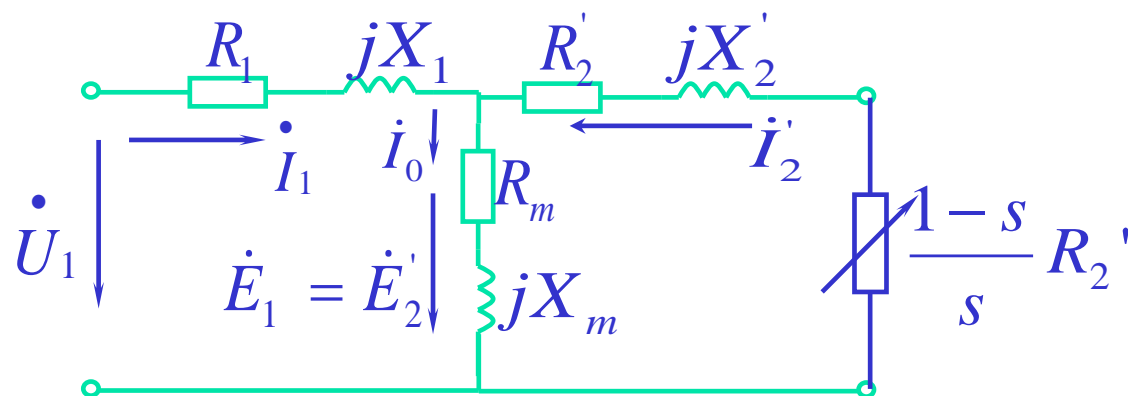
$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0(R_m + jX_m)$$

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

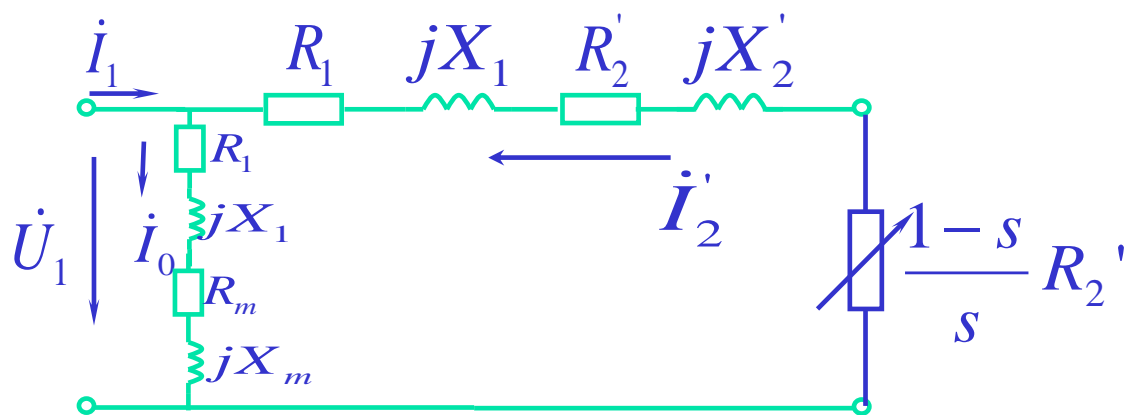
$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0$$

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2'(R_2'/s + jX_2')$$

$$= \dot{I}_2'Z_2' + \dot{I}_2' \cdot \frac{1-s}{s} R_2'$$



T型等值电路

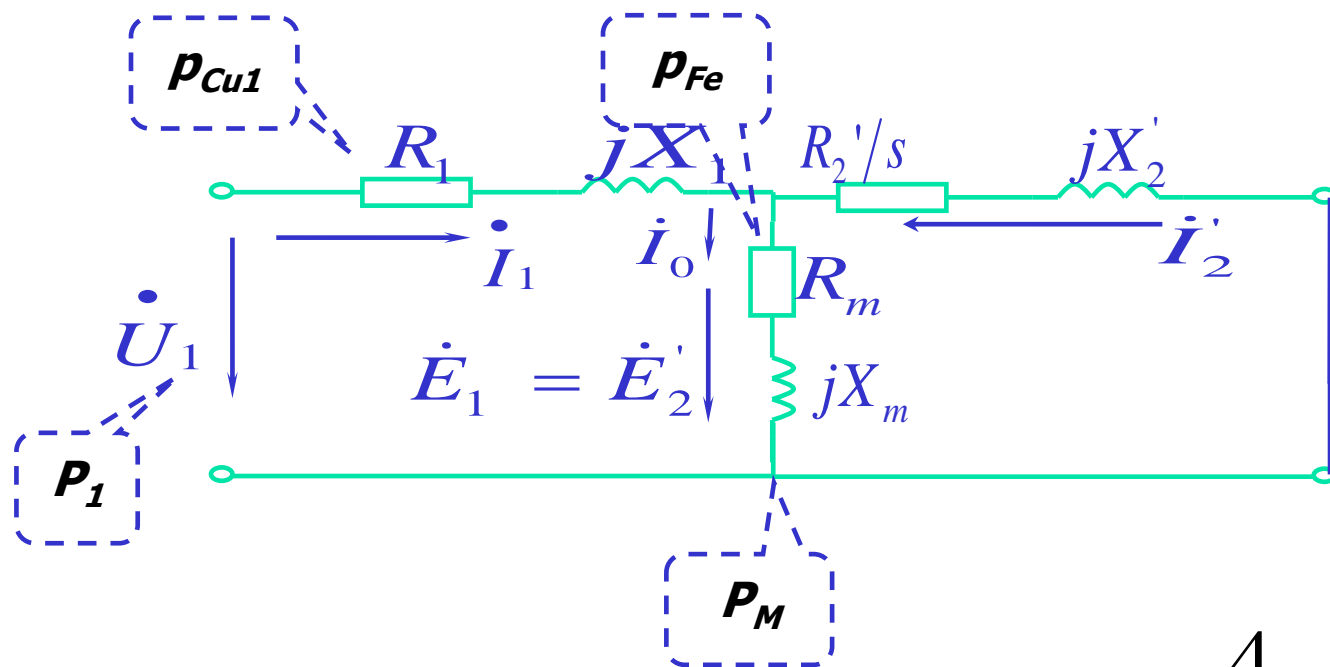


简化等值电路

5、向量图（略）

第三节三相异步电动机的功率与转矩

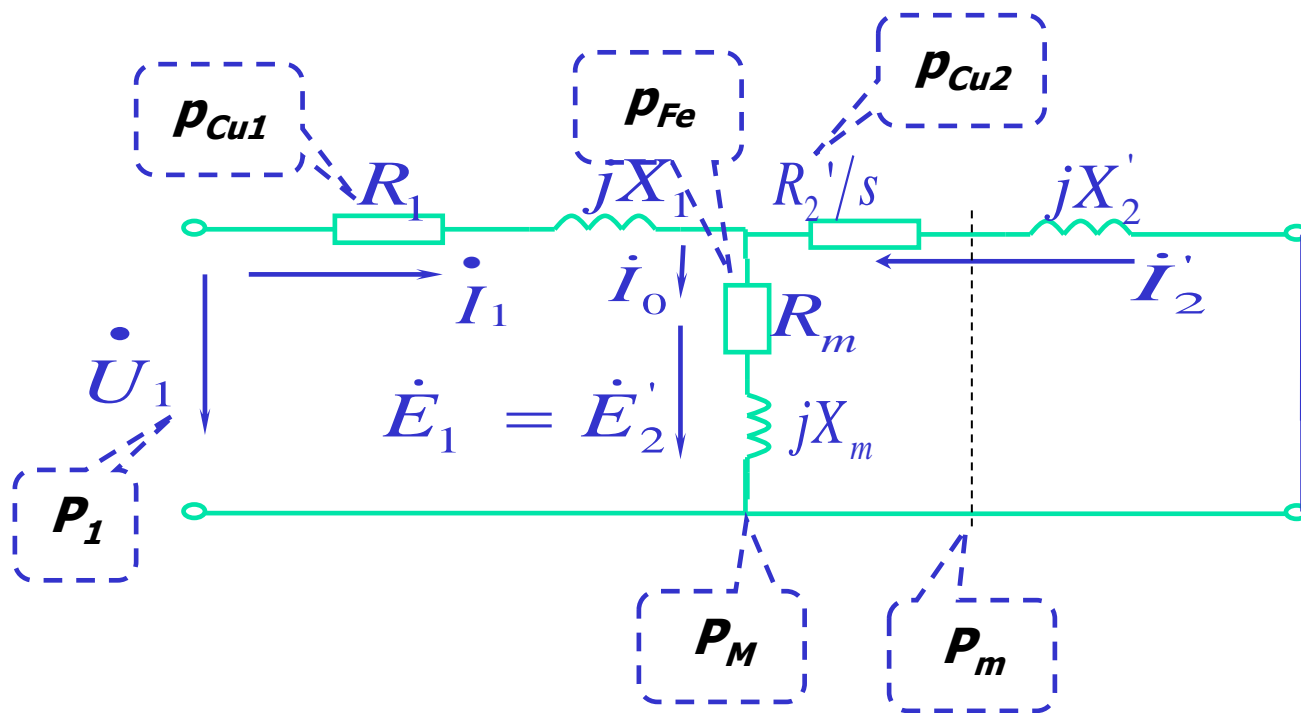
一、功率关系



4、电磁功率：

- 1、输入功率： $P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$ $P_M = P_1 - p_{Cu_1} - p_{Fe}$
- 2、定子铜耗： $p_{Cu_1} = 3I_1^2 R_1$ $= 3I_2'^2 \cdot R_2'/s$
- 3、铁耗功率： $p_{Fe} = 3I_0^2 R_m$ $= 3E_2' I_2' \cos \varphi_2$

第三节三相异步电动机的功率与转矩

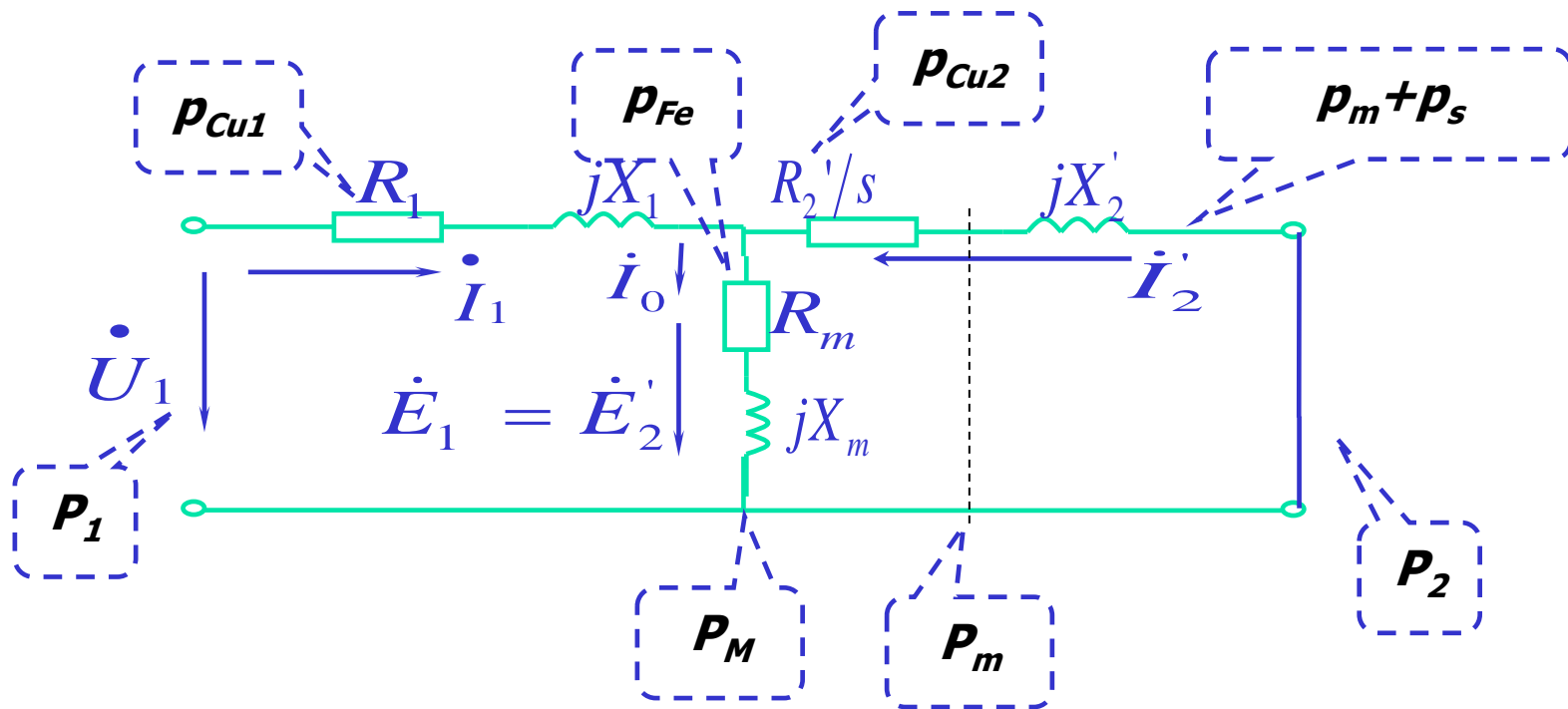


5、转子铜耗： $p_{Cu_2} = 3I_2'^2 R_2' = sP_M$

6、机械功率： $P_m = P_M - p_{Cu_2}$

$$= 3I_2'^2 \cdot \frac{1-s}{s} R_2' = (1-s)P_M$$

第三节三相异步电动机的功率与转矩

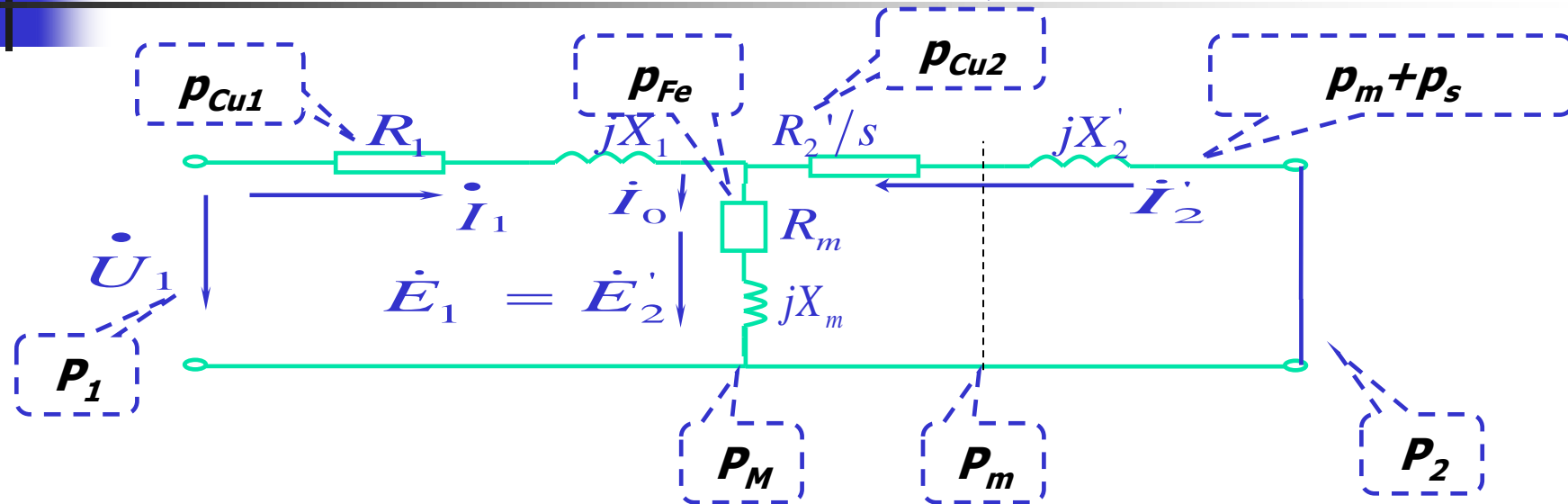


7、机械损耗： p_m 磨擦损耗等

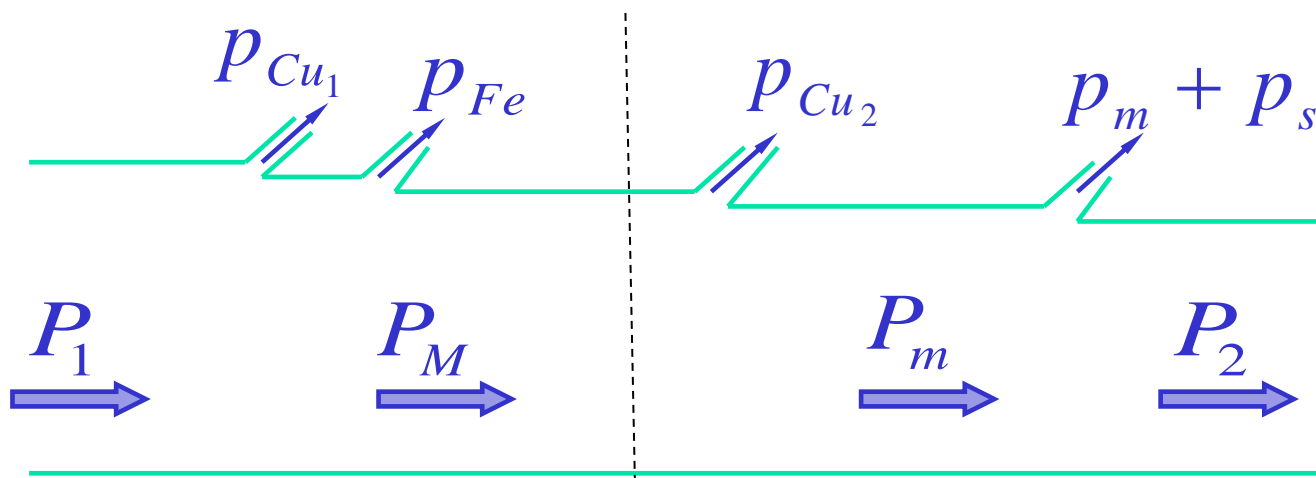
8、附加损耗： $p_s = \begin{cases} 0.5\% P_N (\text{大型}) \\ (1 \sim 3)\% P_N (\text{中、小型}) \end{cases}$

9、输出功率： $P_2 = P_m - p_m - p_s$

第三节三相异步电动机的功率与转矩



小结： $P_M : p_{Cu2} : P_m = 1 : s : (1 - s)$



第三节三相异步电动机的功率与转矩

二、转矩关系

1、由： $P_m = P_2 + (p_m + p_s) \Rightarrow T = T_2 + T_0$

2、 $T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{P_m}{1-s} \cdot \frac{1-s}{\Omega} = \frac{P_M}{\Omega_1}$

三、电磁转矩的物理表达式（理解，不需记住）

$$T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{3I_2'^2 \cdot R_2' / s}{2\pi n_1 / 60} = \frac{3E_2' I_2' \cos \varphi_2}{2\pi n_1 / 60}$$

$$= \frac{m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2}{2\pi n_1 / 60}$$

$$= \frac{m_2 \left(\sqrt{2} \pi f_1 N_2 k_{dp_2} \Phi_1 \right) I_2 \cos \varphi_2}{2\pi f_1 / p} C_{Tj} = \frac{\sqrt{2} m_2 p N_2 k_{dp_2}}{2} \text{ 转矩系数}$$

$$= C_{Tj} \Phi_1 I_2 \cos \varphi_2$$



第八章 三相异步电动机的电力拖动

- 三相异步电动机的机械特性（机械特性的参数表达式、固有特性、人为特性、实用公式和简化公式）
- 三相异步电动机的起动（直接起动、鼠笼电机的降压起动、绕线电机的重载起动）
- 三相异步电动机的各种运行状态（电动运行、能耗制动、反接制动、回馈制动）
- 三相异步电动机的调速（改变转差率调速、改变同步转速调速）

第一节 三相异步电动机的机械特性

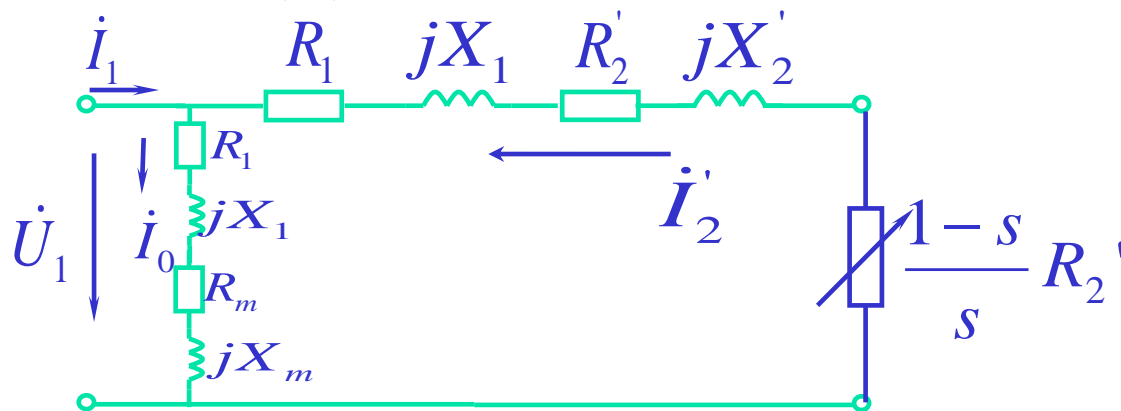
机械特性是指电机的电磁转矩与转速的关系

$$\text{即: } T = f(n)$$

$$\text{或: } T = f(s)$$

一、参数表达式

$$\begin{aligned} T &= \frac{P_M}{\Omega_1} \\ &= \frac{3I_2'^2 R_2' / s}{2\pi f_1 / p} \end{aligned}$$



简化等值电路

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

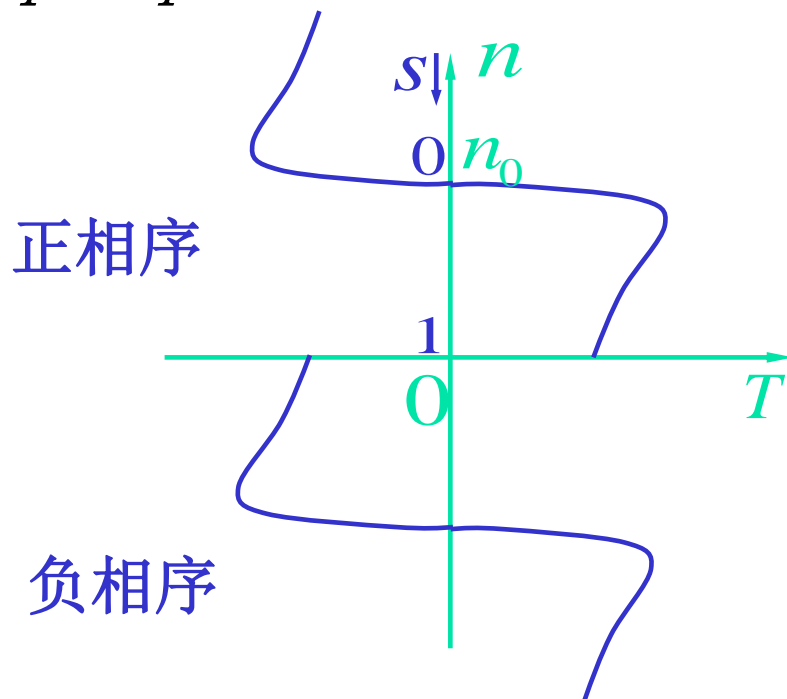
第一节 三相异步电动机的机械特性

$$T = \frac{3pU_1^2 R_2' / s}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

机械特性的参数表达式，也叫一般表达式

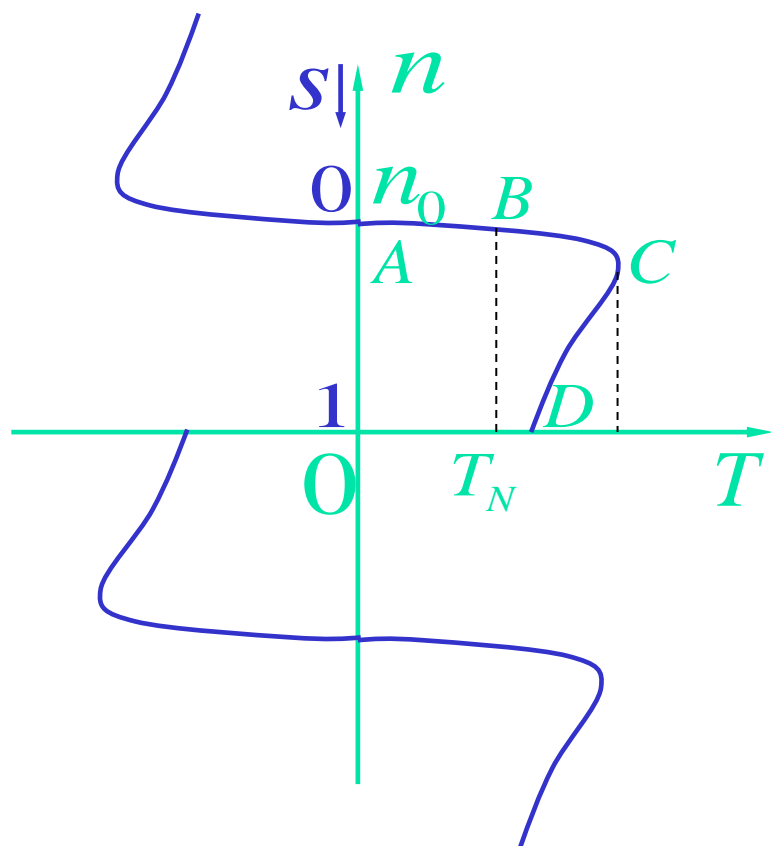
二、固有特性（ U_1 、 f_1 额定，定、转子回路不串元件）

1、曲线



二、固有特性

2、特点



(1) $0 \leq s \leq 1$ 时, $n_1 \geq n \geq 0$, 第一象限
正向电动状态

(2) $s < 0$ 时, $n > n_1$, 第二象限
发电状态

(3) $s > 1$ 时, $n < 0$, 第四象限
制动状态

(4) $s > 0$ 和 $s < 0$ 两部分曲线近似对称

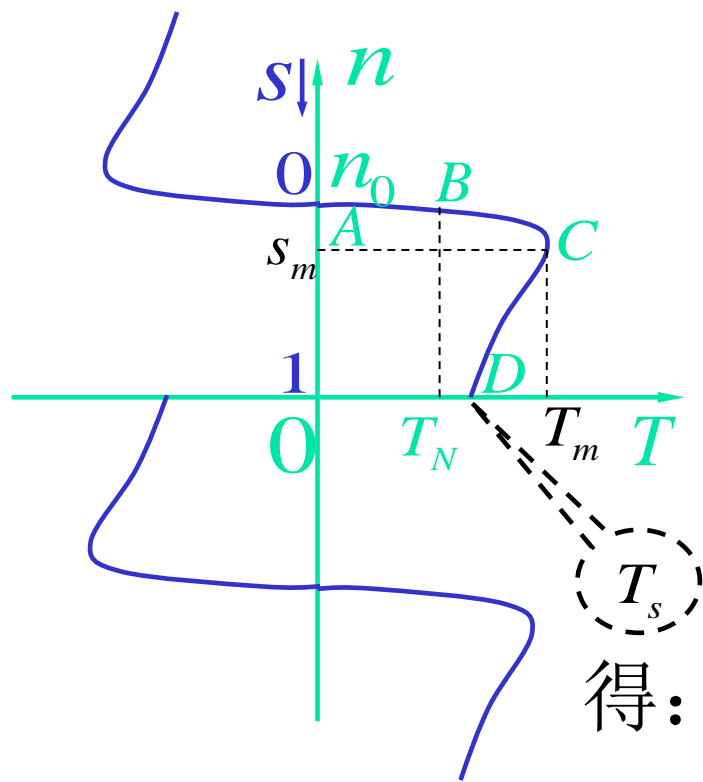
A : 理想空载运行点 (同步转速点)

B : 额定运行点

C : 电磁转矩最大点

D : 起动点

二、固有特性



T_m 与 R_2' 无关

s_m 与 U_1 无关

3、最大电磁转矩与临界转差率

T_m —— 最大电磁转矩

s_m —— 临界转差率

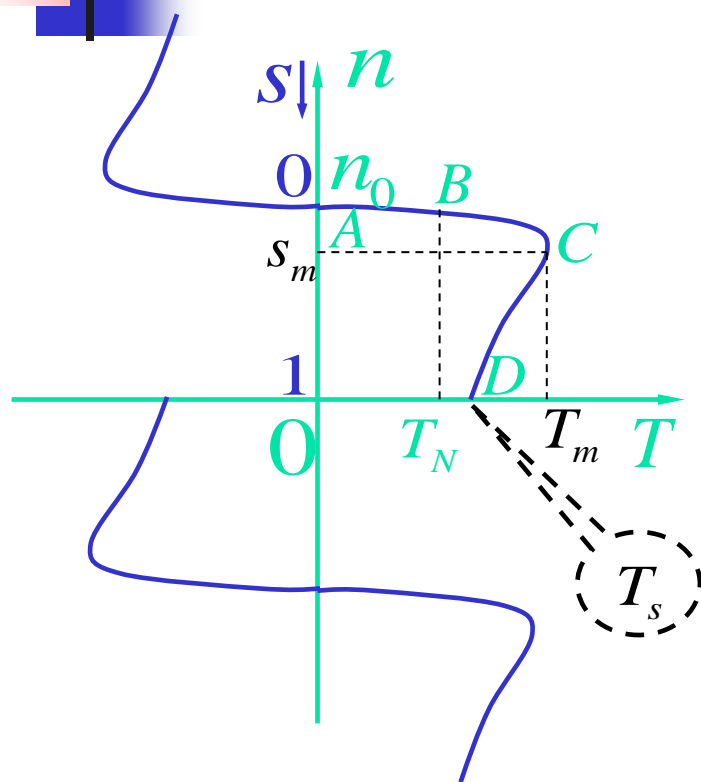
固有机机械特性对 s 求导，且导数为0

得：

$$T_m = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]}$$

$$s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

二、固有特性



一般: $R_1 < 0.05(X_1 + X_2')$

$$T_m \approx \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1(X_1 + X_2')}$$

$$s_m = \pm \frac{R_2'}{(X_1 + X_2')}$$

4、起动转矩

$$T_s = T|_{s=1} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

5、稳定运行的问题

在 $0 < s < s_m$ 范围内可稳定运行

在 $0 < s < s_N$ 范围内可长期稳定运行

6、两个常用参数

$$\lambda = \frac{T_m}{T_N} \text{——过载倍数}$$

一般 $1.6 \sim 2.5$

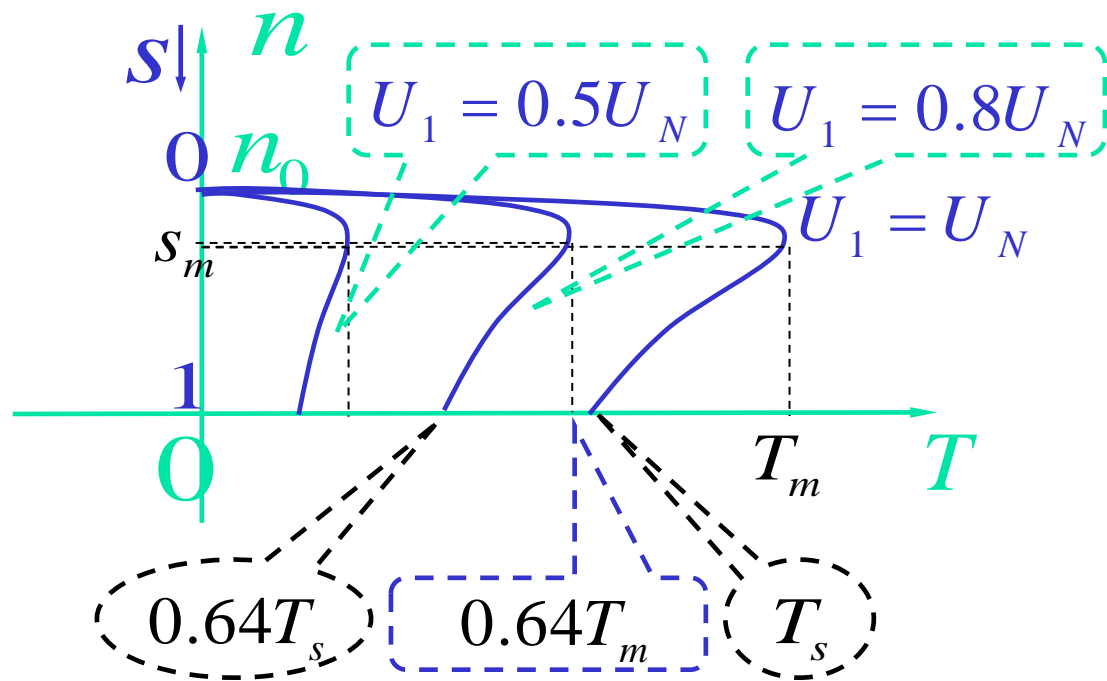
$$K_T = \frac{T_s}{T_N} \text{——堵转转矩倍数}$$

一般 $0.8 \sim 1.2$

三、人为特性

(改变 U_1 , 或定、转子回路串元件)

1、降压特性 (降低定子端电压)



特点:

- (1) 同步转速不变;
- (2) 临界转差率不变;
- (3) 最大电磁转矩、起动转矩与定子电压的平方成正比。

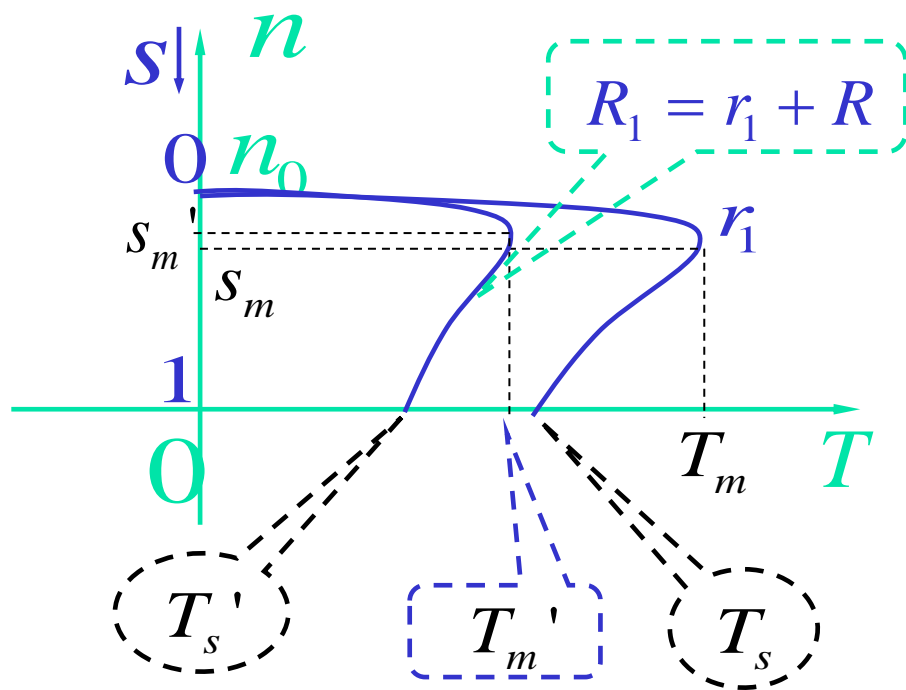
带恒转矩负载时: 由 $T = C_{Tj} \Phi_1 I_2 \cos \varphi_2$

$U_1 \downarrow \Rightarrow \Phi_1 \downarrow, I_2 \uparrow$

即铁耗减小, 铜耗增大

三、人为特性

2、定子串三相对称电阻特性 $r_1 \rightarrow R_1 = r_1 + R$



特点:

- (1) n_1 不变;
- (2) T_m 、 T_s 、 s_m 减小;
- (3) R 消耗有功功率。

3、定子串三相对称电抗特性 $x_1 \rightarrow X_1 = x_1 + X$

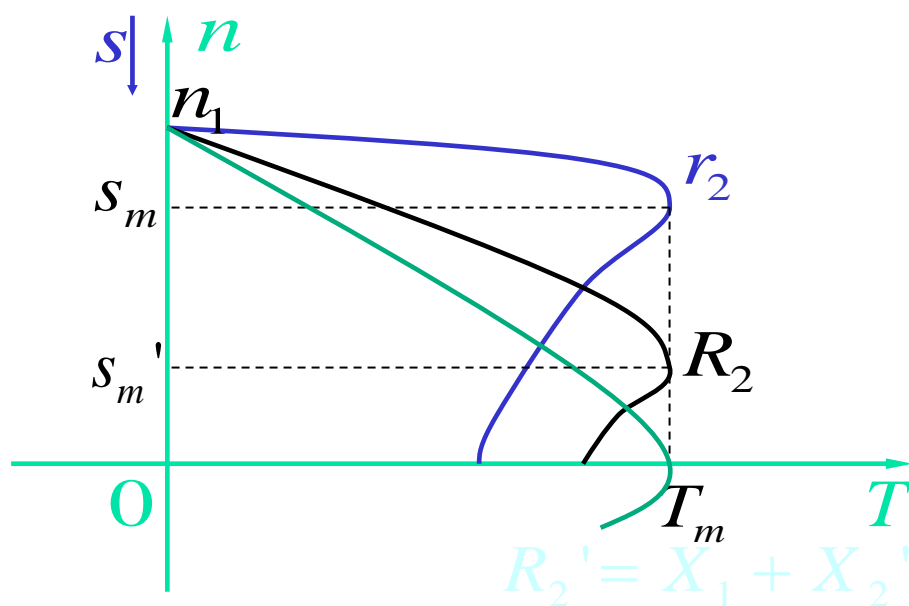
与定子串三相对称电阻特性类似 X 不消耗有功功率

三、人为特性

4、转子串三相对称电阻特性

$$r_2 \rightarrow R_2 = r_2 + R$$

$$R_2' = k_e k_i R_2$$



特点:

- (1) n_1 不变;
- (2) T_m 不变;
- (3) T_s 、 s_m 均增大;
- (4) $s_m = \frac{R_2' + R_s'}{X_1 + X_2'} = 1$ 时, $T_s = T_m$

四、机械特性实用公式（必考）

1、结论：实用公式
$$\frac{T}{T_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

3、简化公式

$s \leq s_N$ 时

$$T = \frac{2T_m}{s_m} \cdot s$$

2、应用：（要先知道 T_m 、 s_m 后才能使用）

已知： P_N 、 U_N 、 I_N 、 n_N 和 λ

(1) T_m 的估算： $T_N \approx T_{2N} = \frac{P_N}{\Omega_N}$, $T_m = \lambda T_N$

(2) s_m 的估算：

a、已知 s_N 、 T_N

$$\frac{T_N}{T_m} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_m} + \frac{s_m}{s_N}} = \frac{1}{\lambda}$$

$$s_m = s_N \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right)$$
$$s_m = s_N \left(\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) \text{舍去}$$

b、已知 s_A 、 T_A

$$\frac{T_A}{T_m} = \frac{2}{\frac{s_A}{s_m} + \frac{s_m}{s_A}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{T_A}{T_N}$$

$$s_m = s_A \left[\lambda \cdot \frac{T_N}{T_A} + \sqrt{\left(\lambda \frac{T_N}{T_A} \right)^2 - 1} \right]$$

例题 7-11 一台三相绕线式异步电动机, 已知额定功率 $P_N = 150\text{kW}$, 额定电压 $U_N = 380\text{V}$, 额定频率 $f_1 = 50\text{Hz}$, 额定转速 $n_N = 1460\text{r/min}$, 过载倍数 $\lambda = 2.3$ 。求电动机的转差率 $s = 0.02$ 时的电磁转矩及拖动恒转矩负载 $860\text{N} \cdot \text{m}$ 时电动机的转速。

解

根据额定转速 n_N 的大小可以判断出气隙旋转磁密 \dot{B}_s 的转速 $n_1 = 1500\text{r/min}$ 。则额定转差率

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1460}{1500} = 0.027$$

临界转差率

$$s_m = s_N(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.027(2.3 + \sqrt{2.3^2 - 1}) = 0.118$$

额定转矩

$$\begin{aligned} T_N &= 9550 \times \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{150}{1460} \\ &= 981.2\text{N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

当 $s = 0.02$ 时的电磁转矩

$$\begin{aligned} T &= \frac{2T_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2 \times 2.3 \times 981.2}{\frac{0.02}{0.118} + \frac{0.118}{0.02}} \\ &= 743.5\text{N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

当 $s=0.02$ 时的电磁转矩

$$T = \frac{2T_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2 \times 2.3 \times 981.2}{\frac{0.02}{0.118} + \frac{0.118}{0.02}} \\ = 743.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电磁转矩为 $860 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时转差率为 s' , 则

$$T = \frac{2\lambda T_N}{\frac{s'}{s_m} + \frac{s_m}{s'}} \\ 860 = \frac{2 \times 2.3 \times 981.2}{\frac{s'}{0.118} + \frac{0.118}{s'}}$$

求出 $s'=0.0234$ (另一解为 0.596 , 不合理, 舍去)

电动机转速

$$n = n_1 - s'n_1 = (1 - s')n_1 \\ = (1 - 0.0234) \times 1500 = 1465 \text{ r/min}$$

第二节 三相异步电动机的起动

一、直接起动（鼠笼式和绕线式）

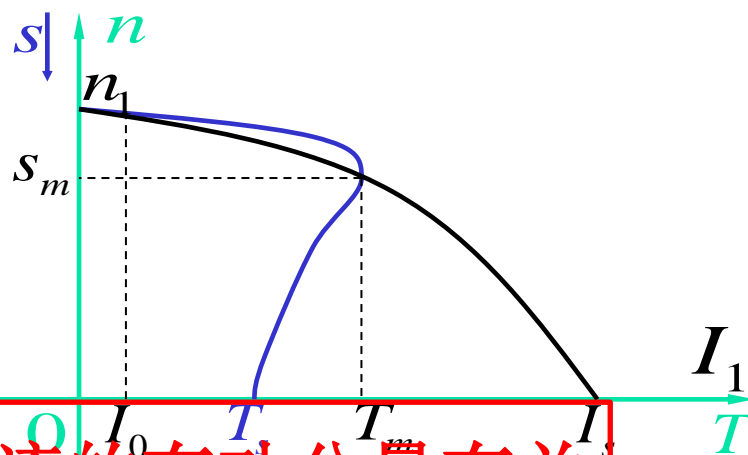
1、 I_s 、 T_s 的分析

起动初始瞬间 $n=0$, $s=1$, I_0 主要是建立磁势

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$T_s = T|_{s=1} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

$$T = C_{Tj} \Phi_1 I_2 \cos \varphi_2 \text{ 与主磁通和转子电流的有功分量有关}$$



结论：起动电流较大，起动转矩较小

一般鼠笼电机 $I_s = K_I I_N = (4 \sim 7) I_N$ $T_s = K_T T_N = (0.9 \sim 1.3) T_N$

第二节 三相异步电动机的起动

2、 I_s 较大的影响 $I_s = K_I I_N = (4 \sim 7) I_N$

(1) 对电机本身

(2) 对配电变压器

3、 T_s 较小的影响 $T_s = K_T T_N = (0.9 \sim 1.3) T_N$

(1) 轻载

(2) 重载

4、结论 (1) 一般情况下可以直接起动

(2) 两种情况下不可直接起动

5、解决途径 即配电变压器容量不足够大和重载

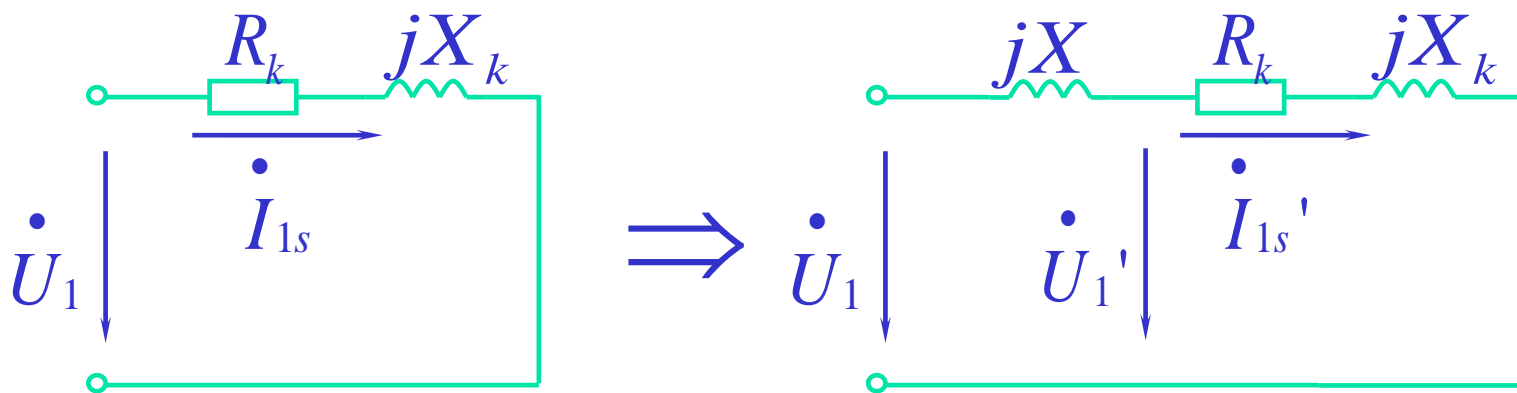
(1) 轻载时降压起动

(2) 重载时转子回路串电阻

二、三相鼠笼式异步电动机的降压起动（适用于轻载）

1、定子串接电抗器起动

(1) 方法：起动时串入电抗器，正常运行时切除电抗器



(2) 分析： 令： $u = \frac{U_1'}{U_1} = \frac{Z_k}{Z_k + jX}$

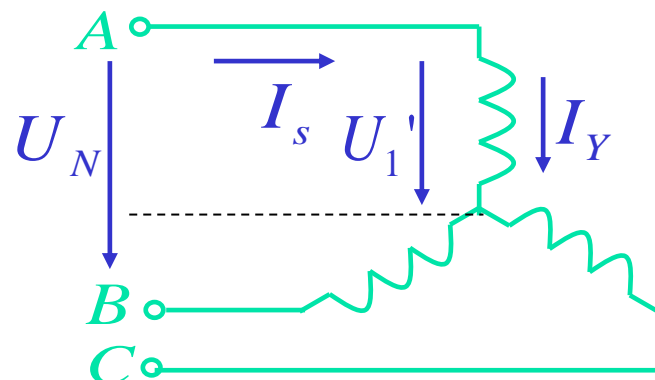
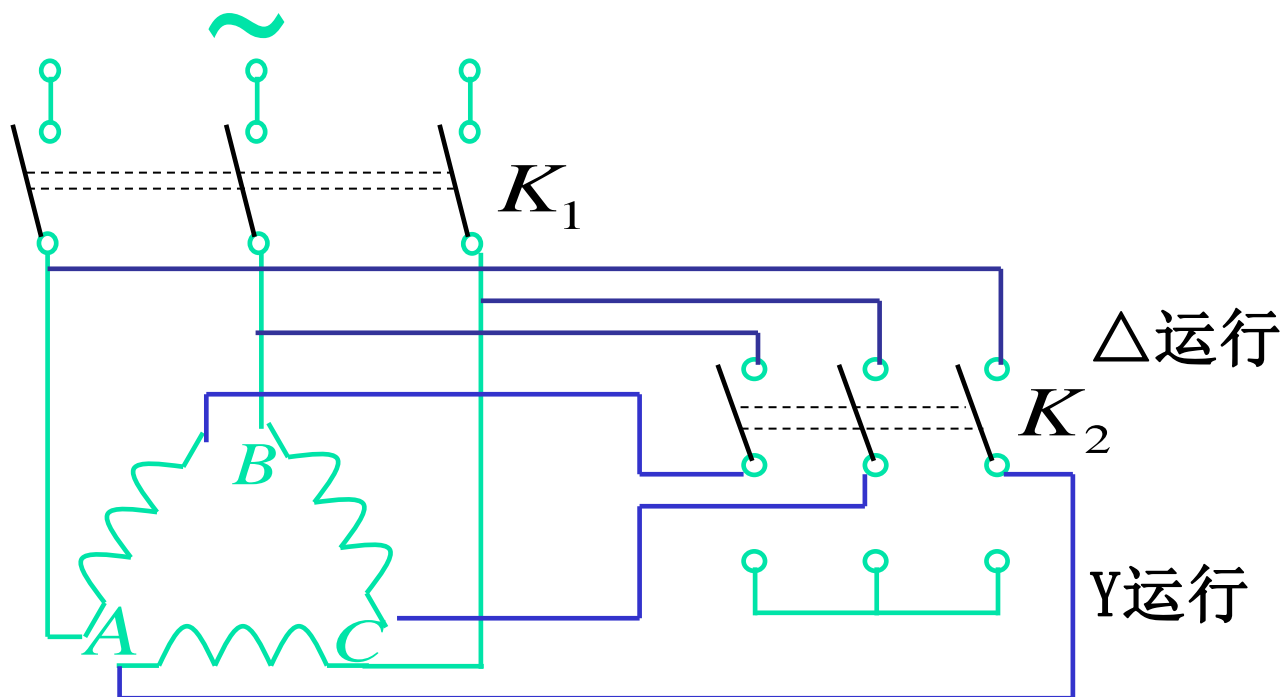
$$\text{则：} \frac{I_{1s}'}{I_{1s}} = \frac{Z_k}{Z_k + jX} = u \qquad \frac{T_s'}{T_s} = \left(\frac{U_1'}{U_1} \right)^2 = u^2$$

(3) 工程中，一般先给出起动电流，再计算串接的电抗

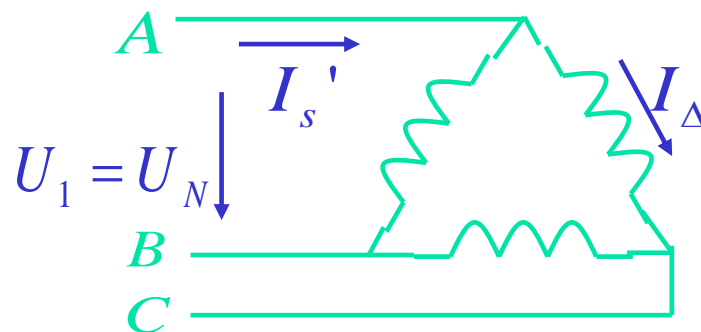
二、三相鼠笼式异步电动机的降压起动（适用于轻载）

2、Y- Δ 起动（适用于 Δ 接使用的电机）

(1) 方法：起动时 K_2 合向下方，正常运行时 K_2 合向上方



Y运行



Δ 运行

(2) 分析：直接起动时 $I_s = \sqrt{3}I_\Delta$

Y接起动时 $I_s' = I_Y = I_\Delta / \sqrt{3}$

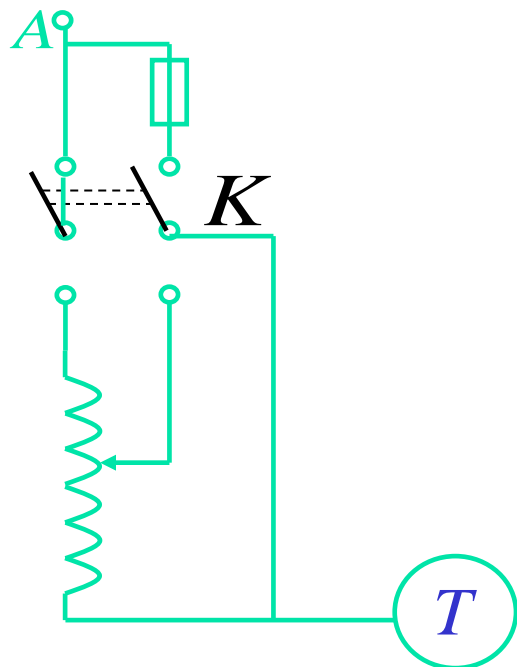
$$\therefore I_s' = I_s / 3$$

$$T_s' = (U_1' / U_1)^2 = T_s / 3$$

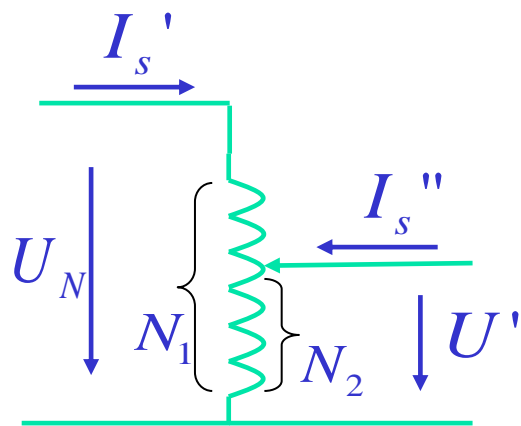
二、三相鼠笼式异步电动机的降压起动（适用于轻载）

3、自耦变压器降压起动

(1) 方法：K向下合时
降压起动，K向上合时正
常运行



(2) 分析：



$$\frac{I_s''}{I_s} = \frac{U'}{U_N} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{I_s''}{I_s'} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\Rightarrow \frac{I_s'}{I_s} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

$$\frac{T_s'}{T_s} = \left(\frac{U'}{U_N} \right)^2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

4、延边三角形起动（适用于绕组带中间抽头的电机） 自学

二、三相鼠笼式异步电动机的降压起动（适用于轻载）

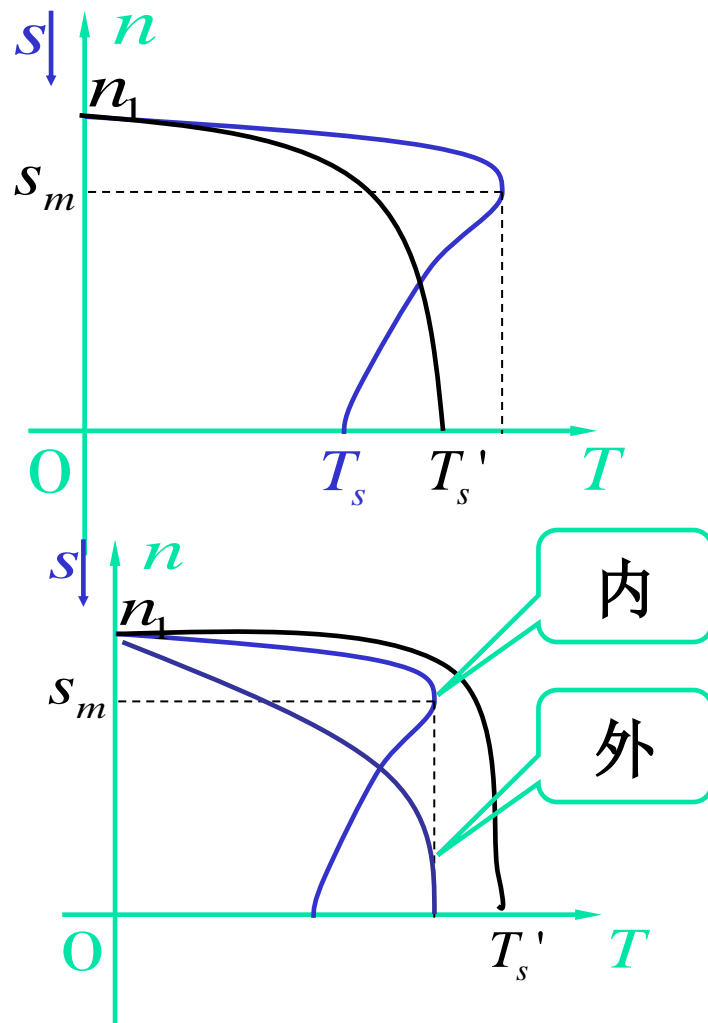
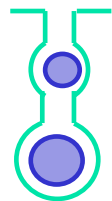
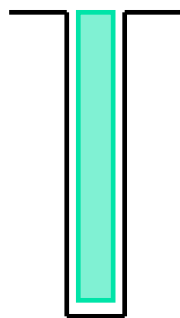
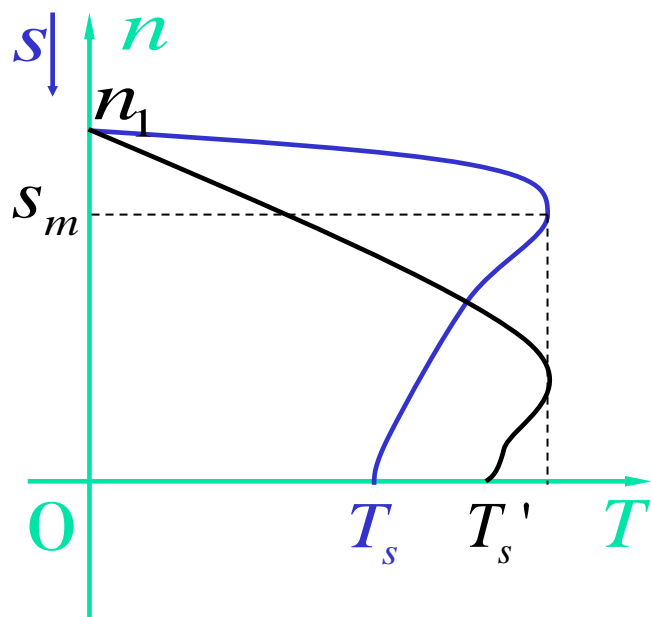
表 8.1 三相鼠笼式异步电动机降压起动与直接起动

起动方法	起动电压相对值 (电动机相电压)	起动电流相对值 (供电变压器线电流)	起动转矩相对值	起 动 设 备
直接起动	1	1	1	最简单
串电抗 起动	u	u	u^2	一般
Y Δ 起动	$1/\sqrt{3}$	1/3	1/3	简单,只用于 Δ 接 380V 电机
自耦 变压器	u	u^2	u^2	较复杂,有三种 抽头可选
延边 三角形	中心抽头	0.5	0.45	简单,但要 专门设计电机

第263页例题8-2

三、高起动转矩的三相鼠笼式异步电动机（适用于重载）

- 1、转子电阻较大的鼠笼式异步电动机
（包括高转差率电动机、力矩式电动机等）



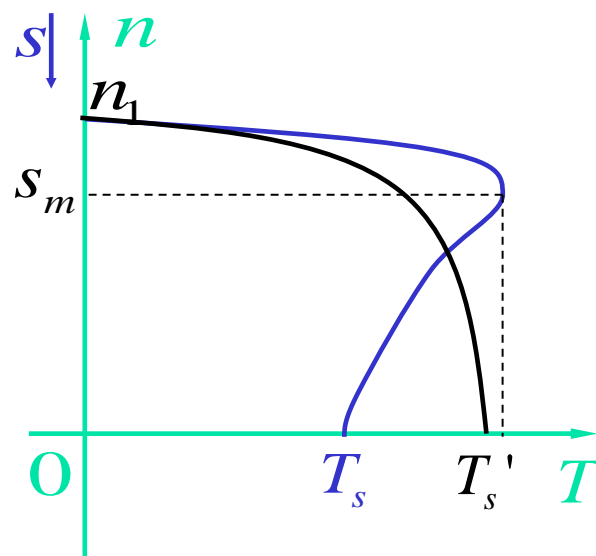
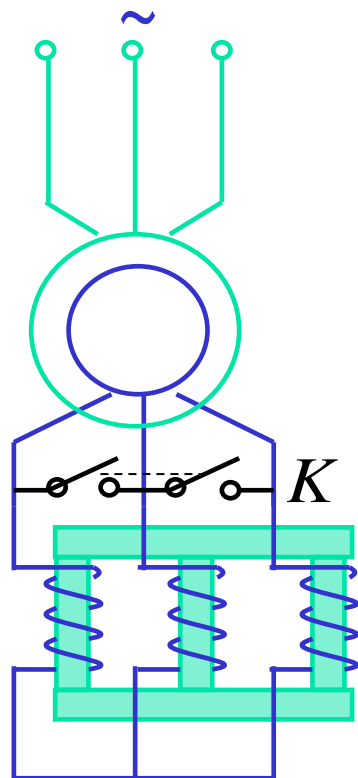
- 2、深槽式鼠笼异步电动机
- 3、双鼠笼异步电动机

四、绕线式三相异步电动机的起动（适用于重载）

绕线式异步电机可以在转子回路中串电阻，且

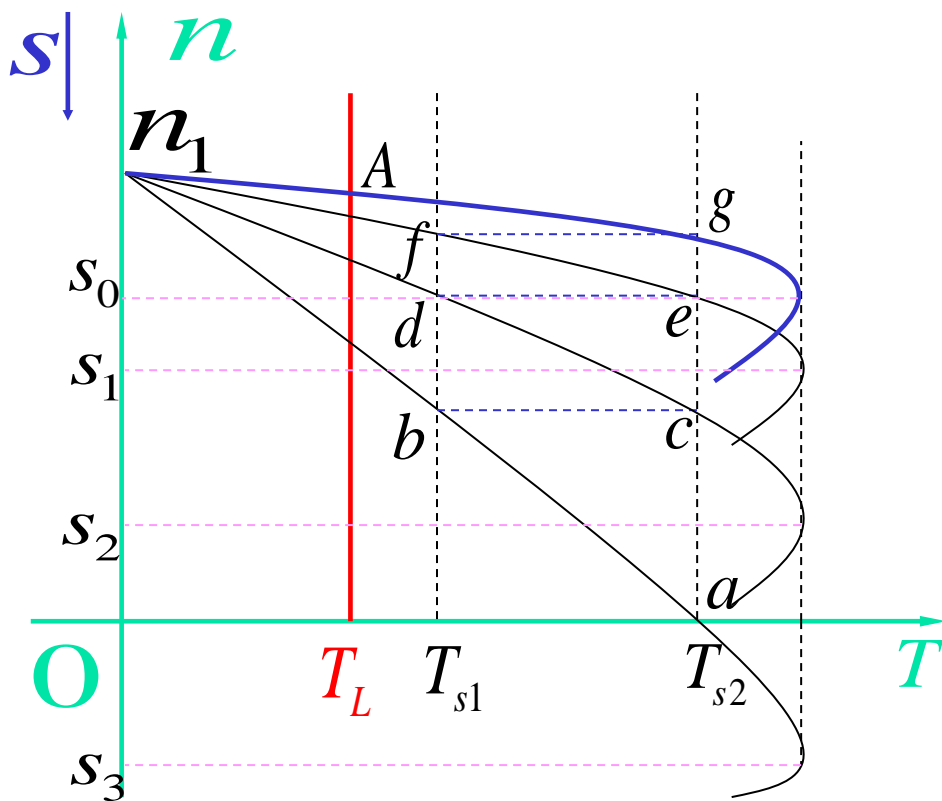
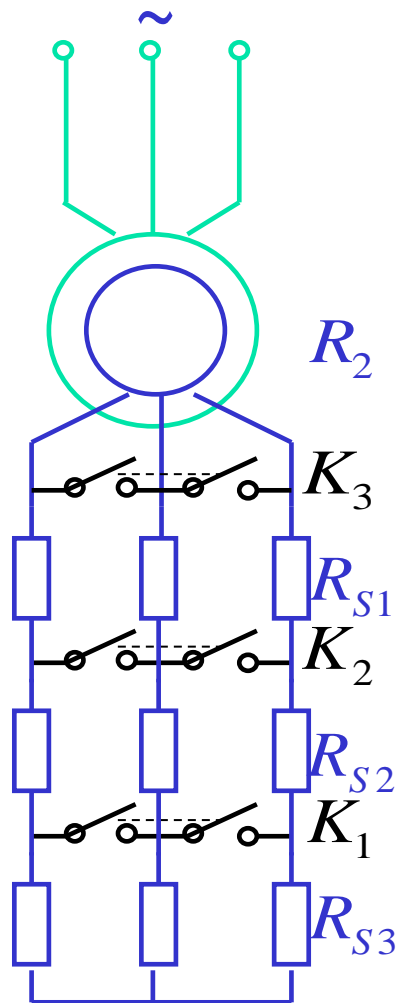
$$R_2' + R_s' = X_1 + X_2' \text{ 时 } T_s = T_m$$

1、转子串频敏变阻器起动



四、绕线式三相异步电动机的起动（适用于重载）

2、转子串电阻分级起动



起动顺序：

$a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow A$

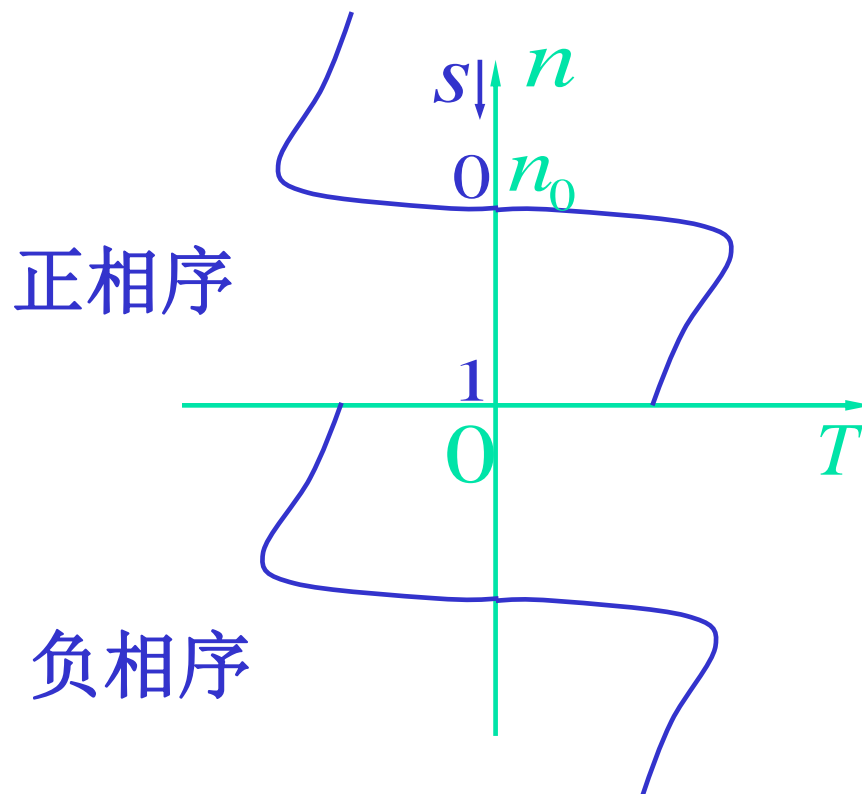
第三节 三相异步电动机的各种运行状态

- 各种运行状态的定义与直流电机中的定义类似
 电动运行—— T 与 n 同向
 制动运行—— T 与 n 反向
- 制动运行包括能耗制动、反接制动、倒拉反转、回馈制动

一、电动运行

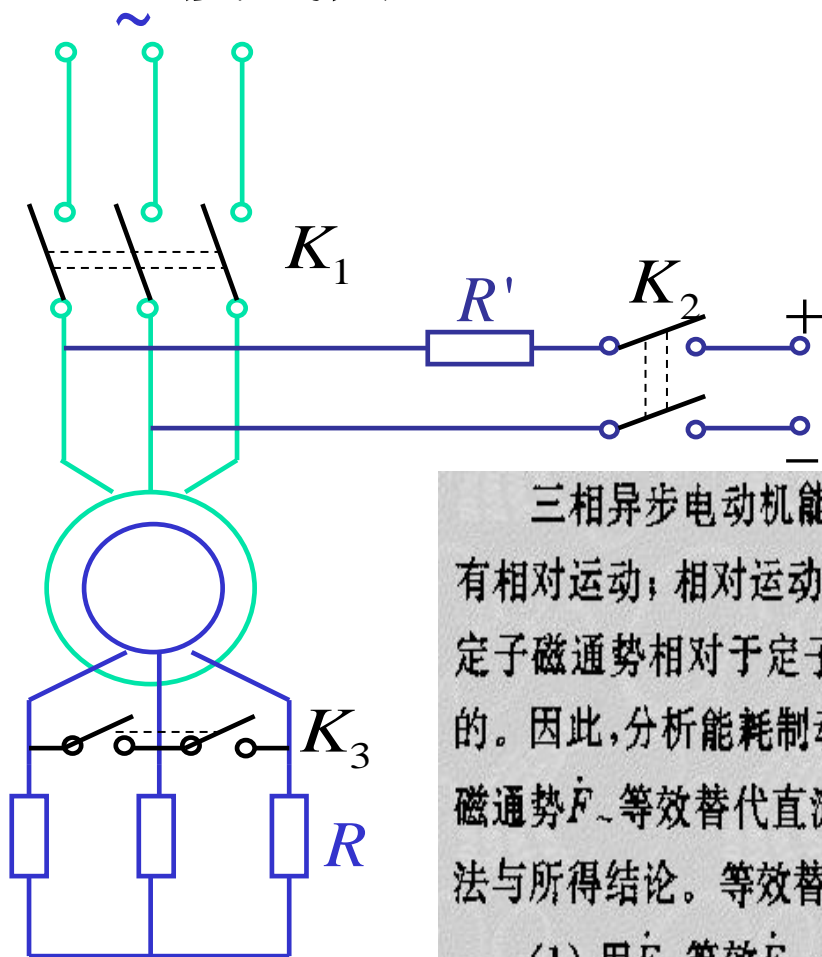
第一象限——正向电动

第三象限——反向电动



二、能耗制动

1、接线图



2、操作与工作原理

类似直流电机的能耗制动

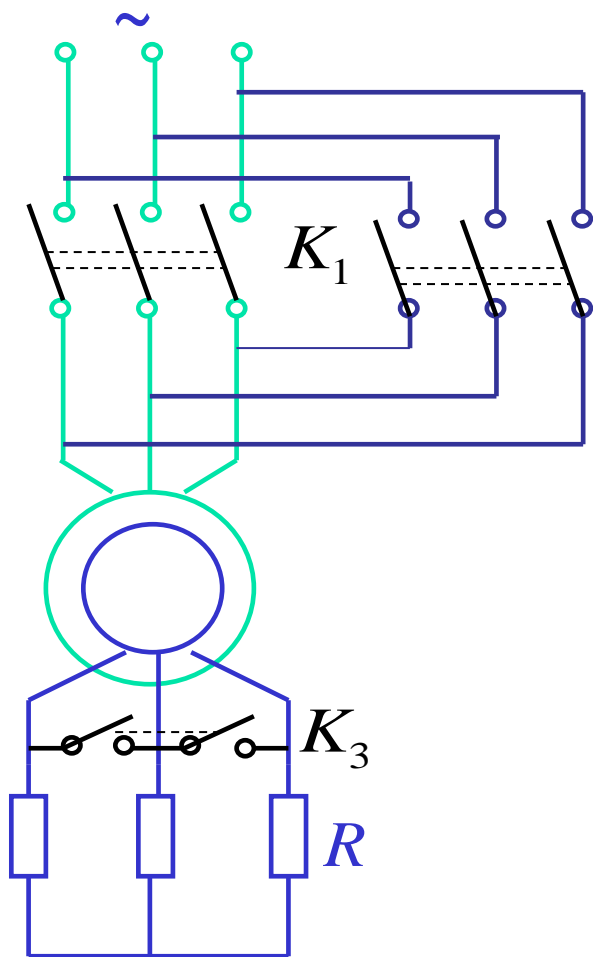
三相异步电动机能耗制动过程中电磁转矩 T 的产生,是由于转子与定子磁通势之间有相对运动;相对运动速度的大小与方向不同,则转矩 T 的大小与方向也随之不同。至于定子磁通势相对于定子本身是旋转的还是静止的,以及相对转速是多少,都是无关紧要的。因此,分析能耗制动状态下运行的三相异步电动机,可以用三相交流电流产生的旋转磁通势 \dot{F}_\sim 等效替代直流磁通势 $\dot{F}_=$,在等效替代后,就可以使用电动运行状态时的分析方法与所得结论。等效替代的条件是:

(1) 用 \dot{F}_\sim 等效 $\dot{F}_=$,需保持磁通势幅值不变,即 $F_\sim = F_ = F$;

(2) 用 \dot{F}_\sim 等效 $\dot{F}_=$,需保持磁通势与转子之间相对转速(即转差)不变,为 $0 - n = -n$ 。

三、反接制动

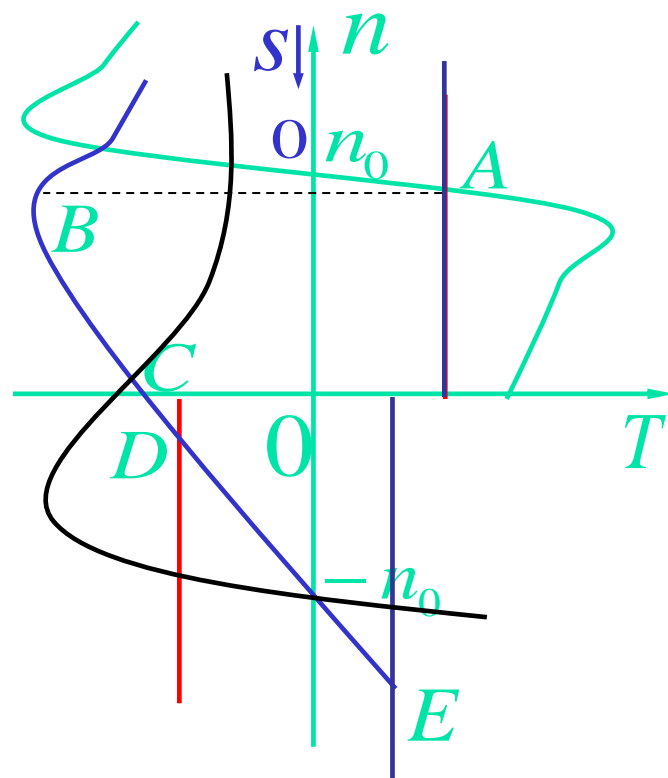
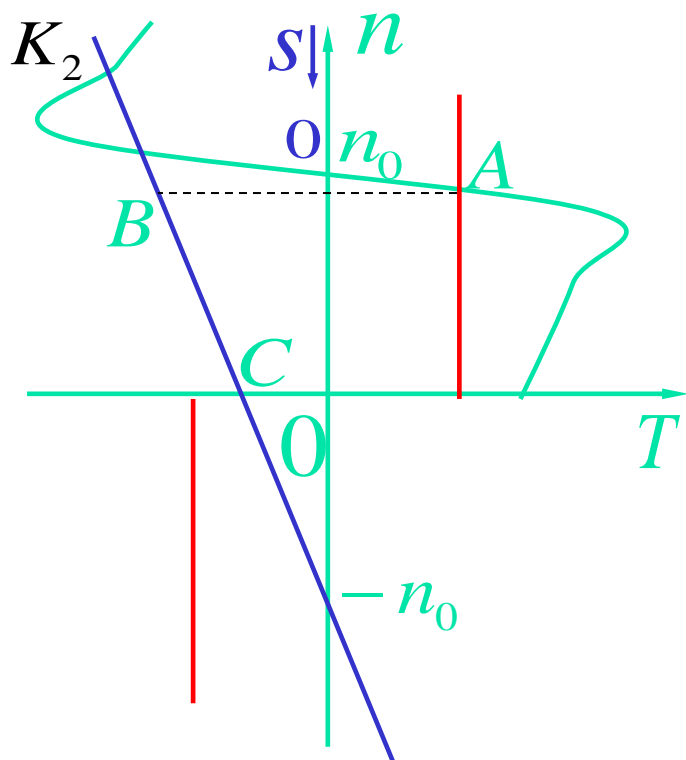
1、接线图



2、操作与工作原理

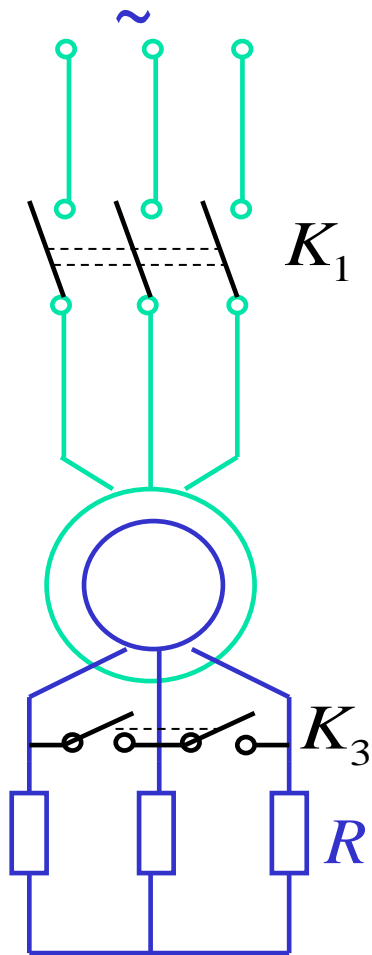
类似直流电机的反接制动

3、机械特性



四、倒拉反转制动（了解）

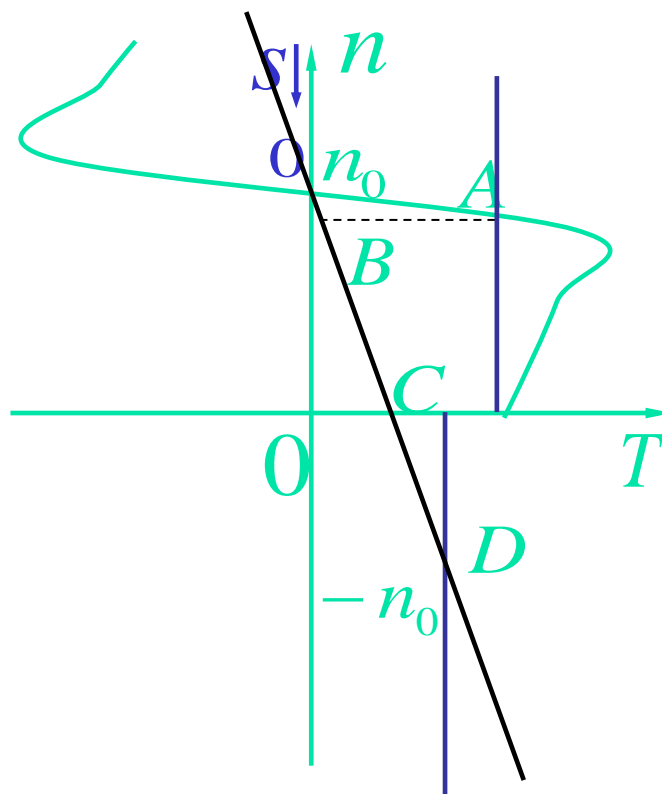
1、接线图



2、操作与工作原理

类似直流电机的倒拉反转

3、机械特性



五、回馈制动（了解）

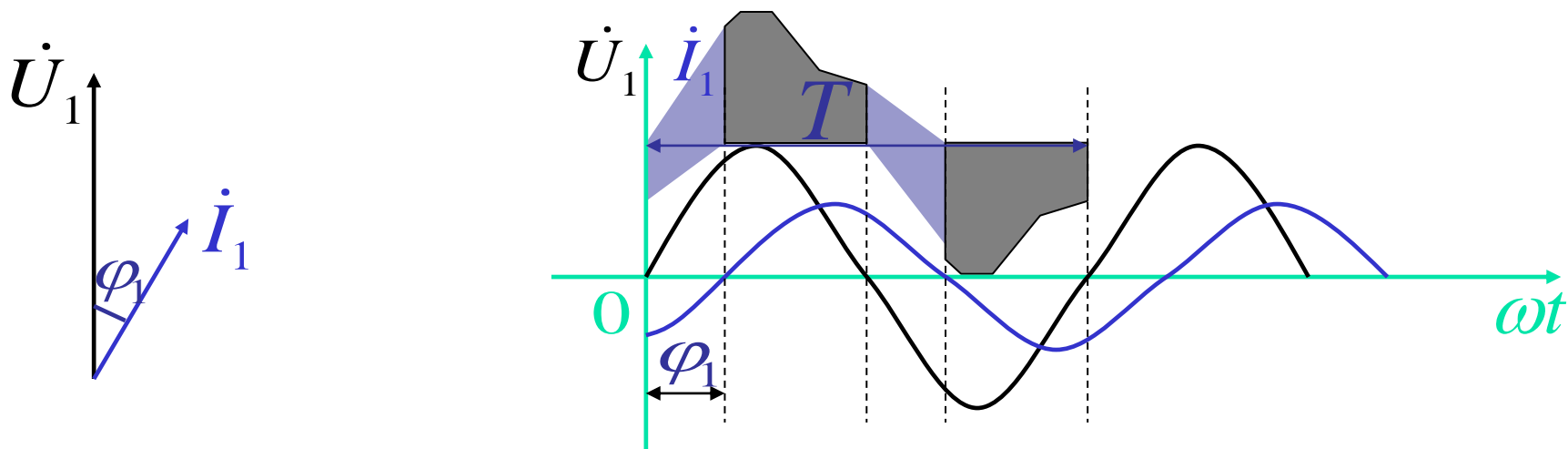
1、交流电机功率的吸收与回馈

（ 1 ）直流电机功率的吸收与回馈是如何判别的？

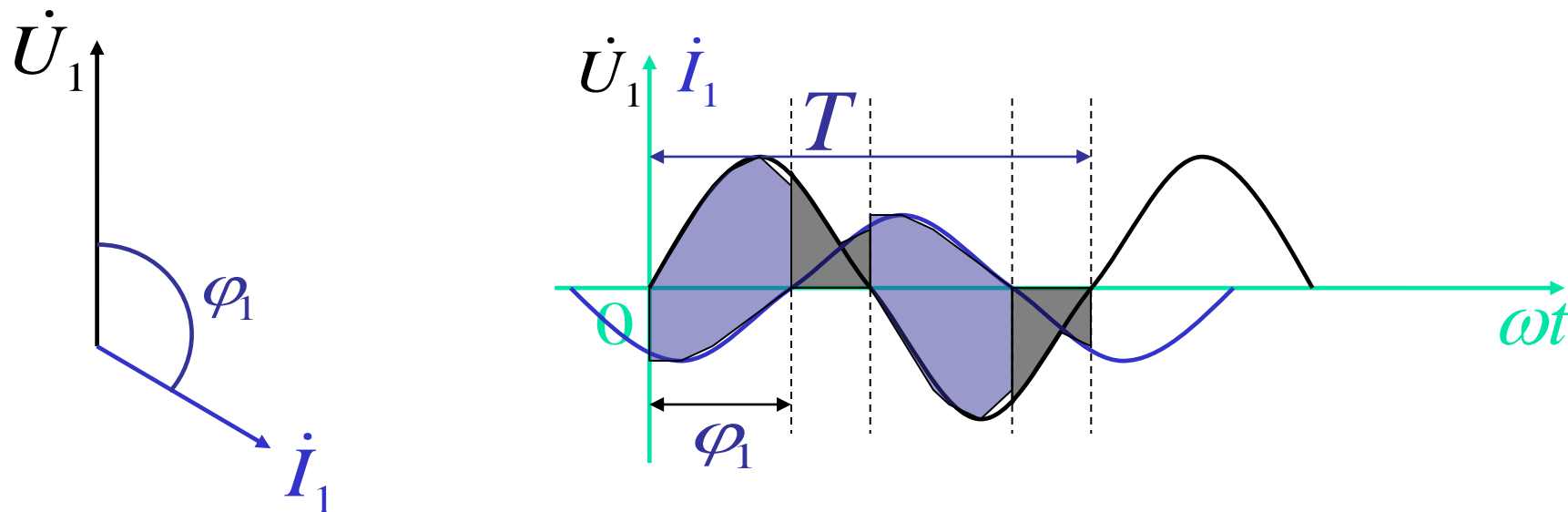
通过电源极性与电流方向的相对关系来判别

（ 2 ）交流电机功率的吸收与回馈该如何判别？

通过一个周期平均功率的流向来判别



五、回馈制动



结论1: $0 < \varphi_1 < 90^\circ$ 时, 电机从电源吸收功率
 $90^\circ < \varphi_1 < 180^\circ$ 时, 电机向电源回馈功率

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 & \dot{E}_1 &= \dot{E}_2' \\ \dot{E}_2' &= \dot{I}_2' (R_2'/s + jX_2') & \dot{I}_1 &\approx \dot{I}_2' \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{U}_1 \approx \dot{I}_1 [(R_2'/s + R_1) + j(X_1 + X_2')]$$

结论2: $n > n_1 (s < 0)$ 时, $\varphi_1 > 90^\circ$, 回馈制动
 也可由电磁功率进行讨论

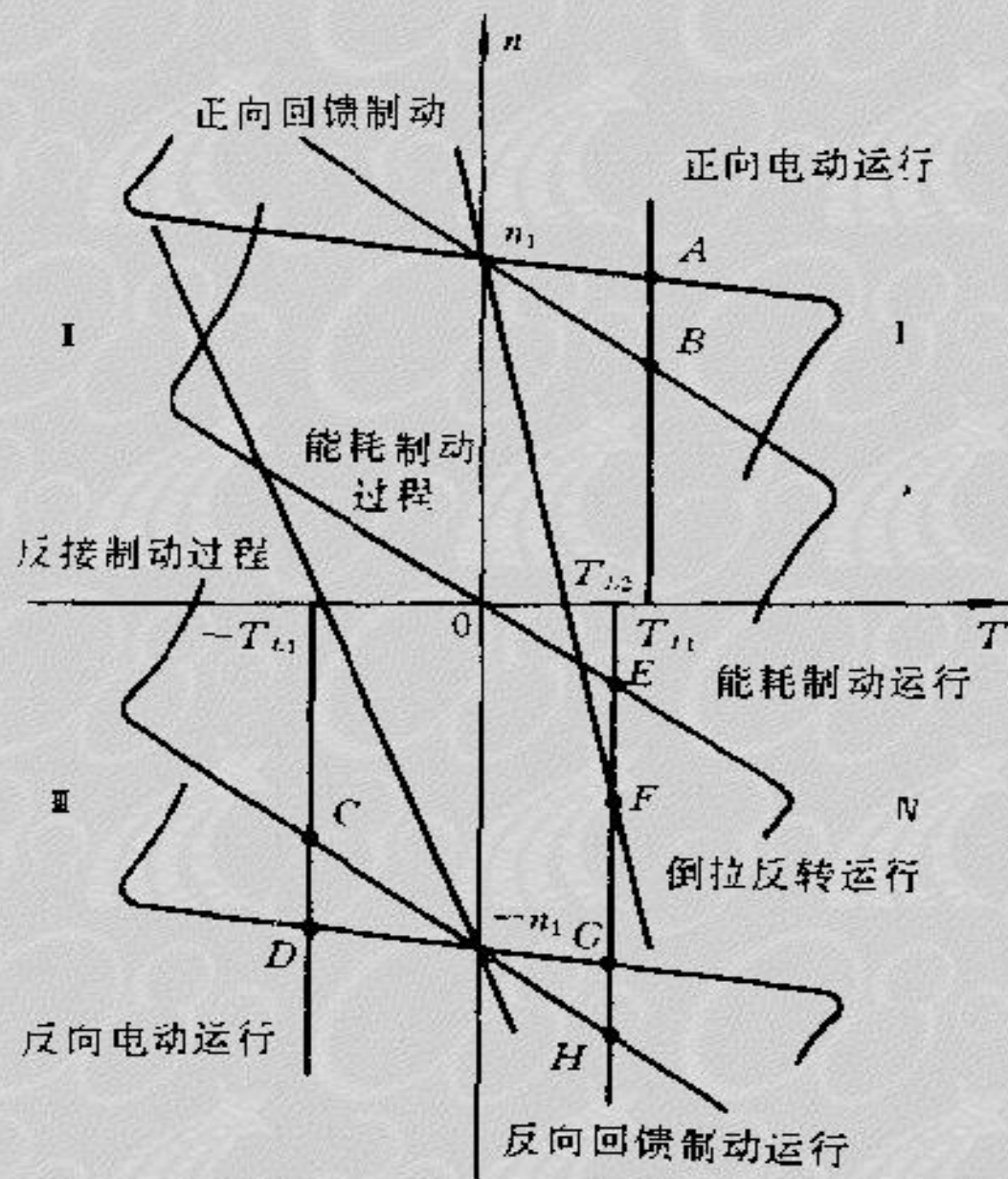


图 8.28 三相绕线式异步电动机的各种运行状态

第四节 三相异步电动机的调速

在一定负载下，异步电机的速度：

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s)$$

异步电机调速

改变转差率
调速

降低定子电压调速

绕线电机转子串电阻调速

绕线电机转子串附加电势调速

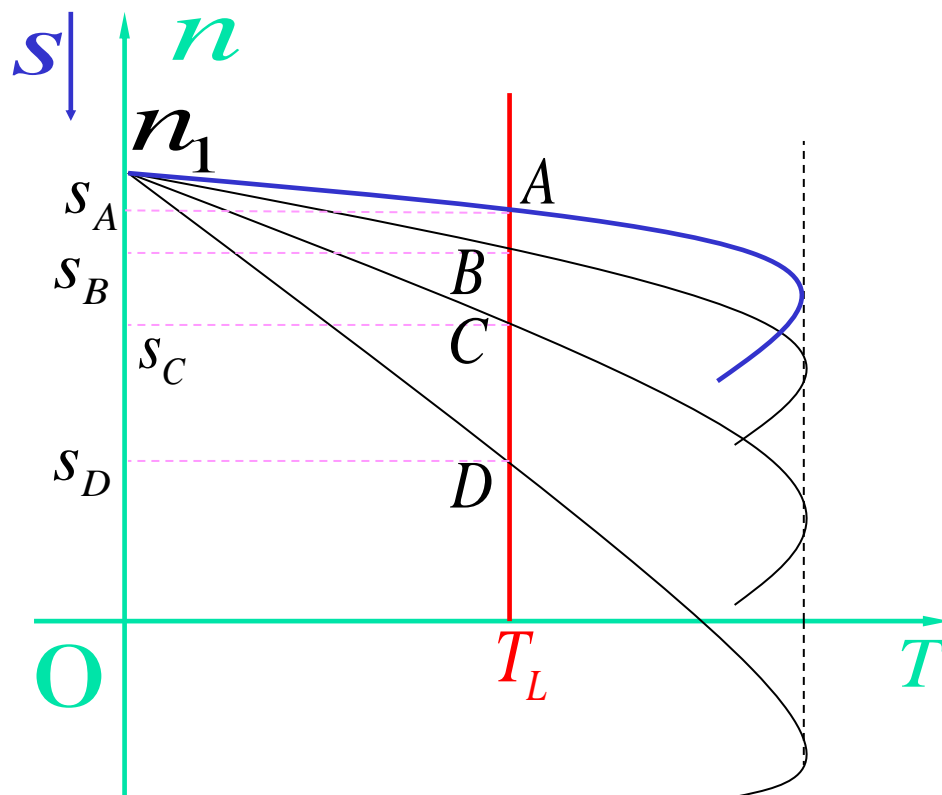
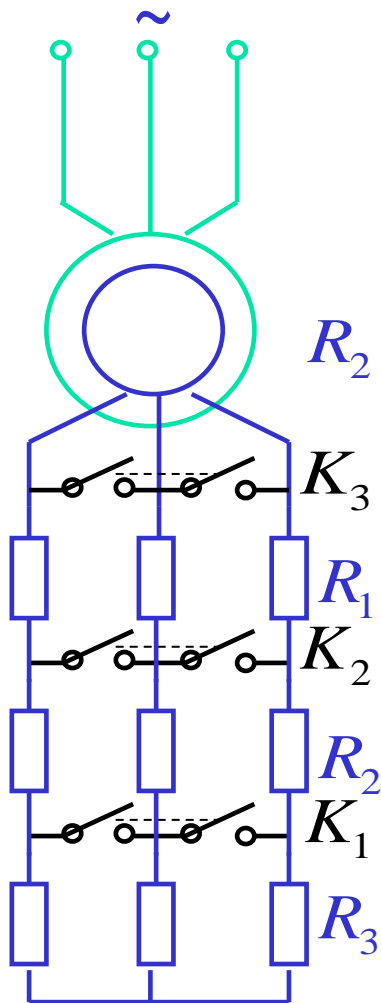
改变同步转速
调速

变极调速

变频调速

一、改变转差率调速

1、绕线式异步电动机转子回路串电阻调速



$$\frac{R_2}{s_A} = \frac{R_2 + R_s}{s}$$



一、改变转差率调速

特点与性能

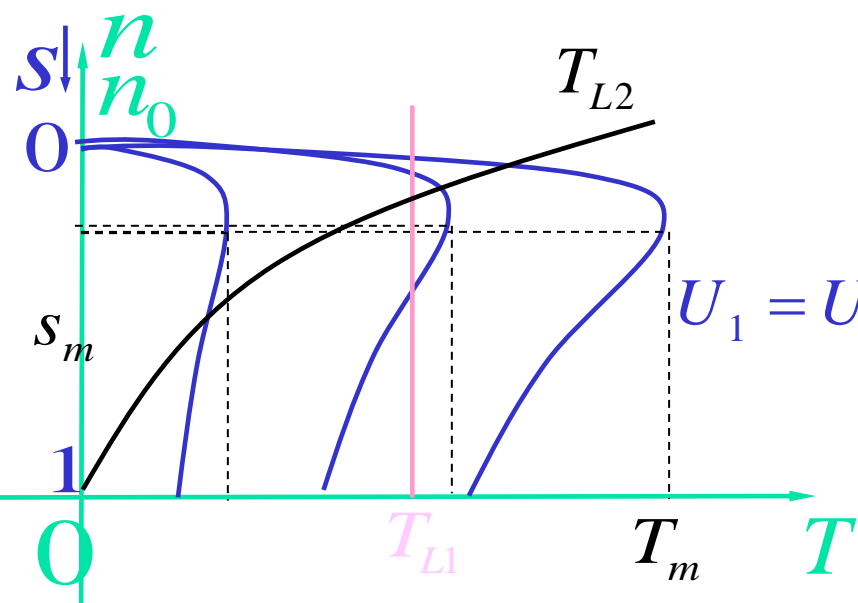
- (1) 近似属于恒转矩调速方式;
- (2) $D=(2-3)$ 主要受静差率限制;
- (3) 有级调速, 平滑性差;
- (4) 转速较低时, 串接电阻上损耗大, 经济性较差。

转子损耗称为转差损耗

$$P_s = sP_M = 3I_2^2(R_2 + R_s)$$

$$P_2 = (1-s)P_M$$

2、降低定子电压调速



特点与性能

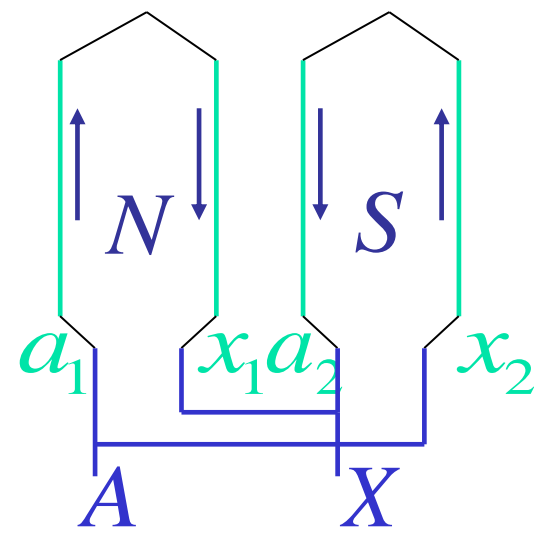
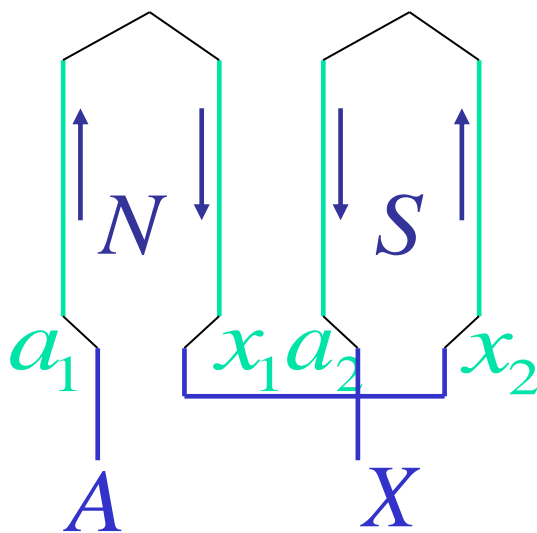
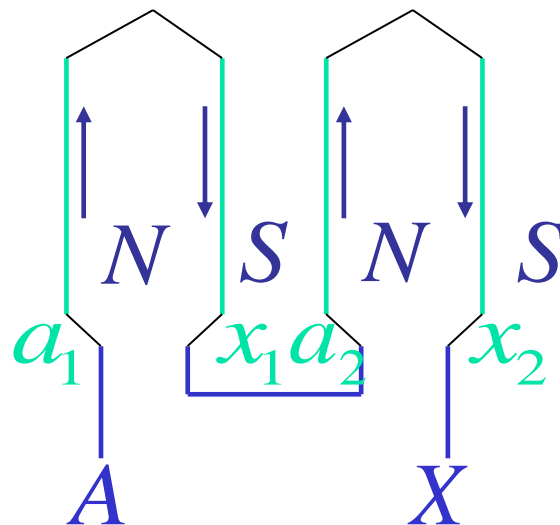
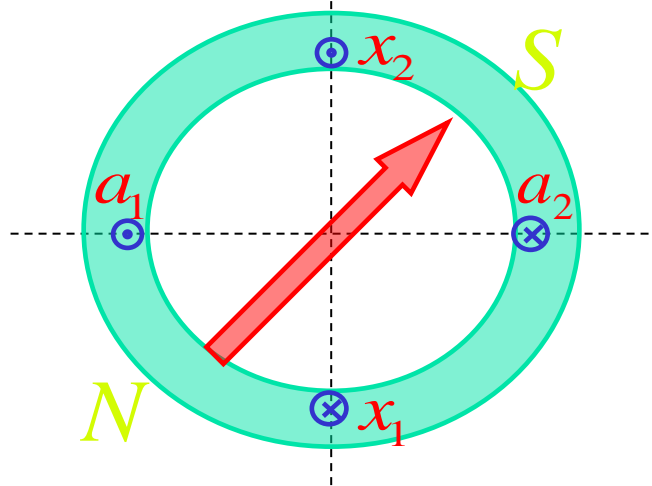
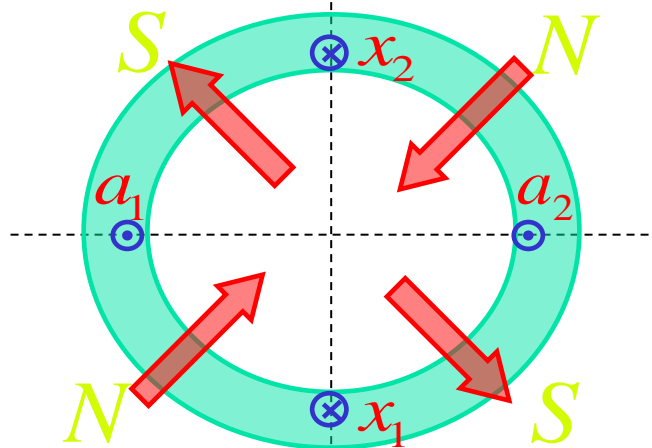
- (1) 近似属于恒转矩调速方式;
- (2) 调速范围小, 带泵类负载时可达10;
- (3) 转速较低时, 转差损耗大, 经济性较差。

3、串级调速 (附加电势调速)

将串电阻调速时, 外串电阻上的损耗功率, 采用电气或机械方法再利用。分机械串级和电气串级两类。

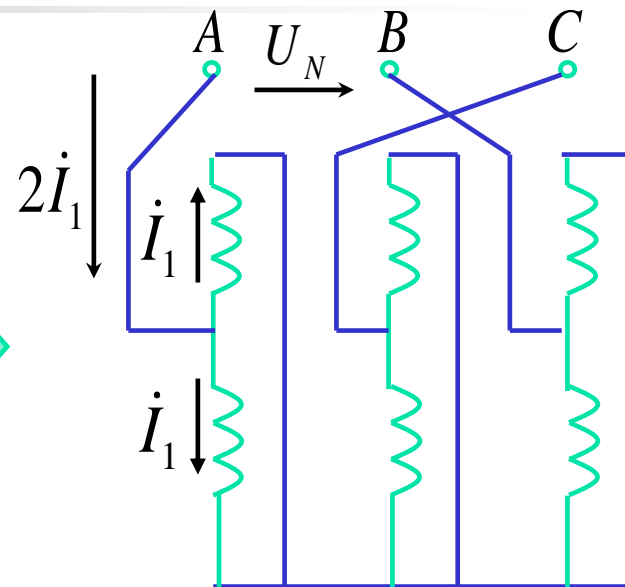
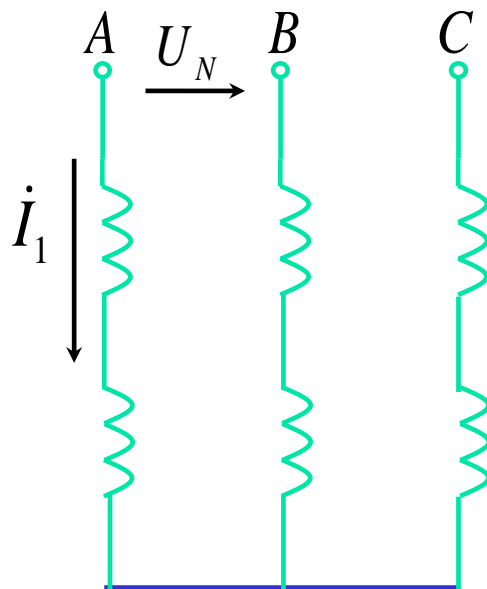
二、改变同步转速调速

1、变极调速

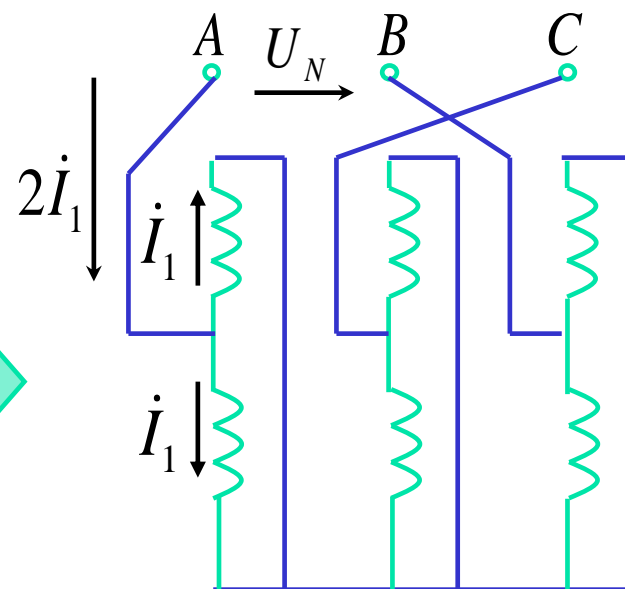
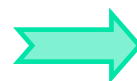
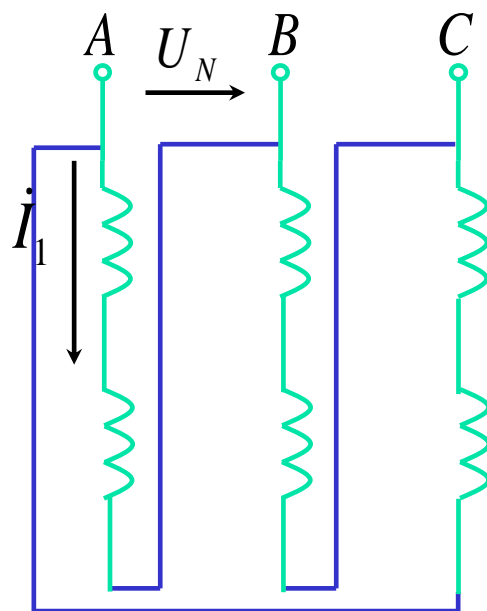


变极调速典型应用

Y---YY



Δ --- YY



2、变频调速

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{dp1} \Phi_m$$

$f_1 \downarrow \Rightarrow \Phi_m \uparrow \Rightarrow I_0 \uparrow \uparrow$ 是不允许的

要求 $U_1 \downarrow$ ，保持 Φ_m 基本不变

$f_1 \uparrow \Rightarrow \Phi_m \downarrow$ 不允许 U_1 超过 U_N ，必然 $\Phi_m \downarrow$

(1) 从基频向上调速

随着频率的上升，而输入电压不变，主磁通下降，电磁转矩也会下降。接近恒功率调速

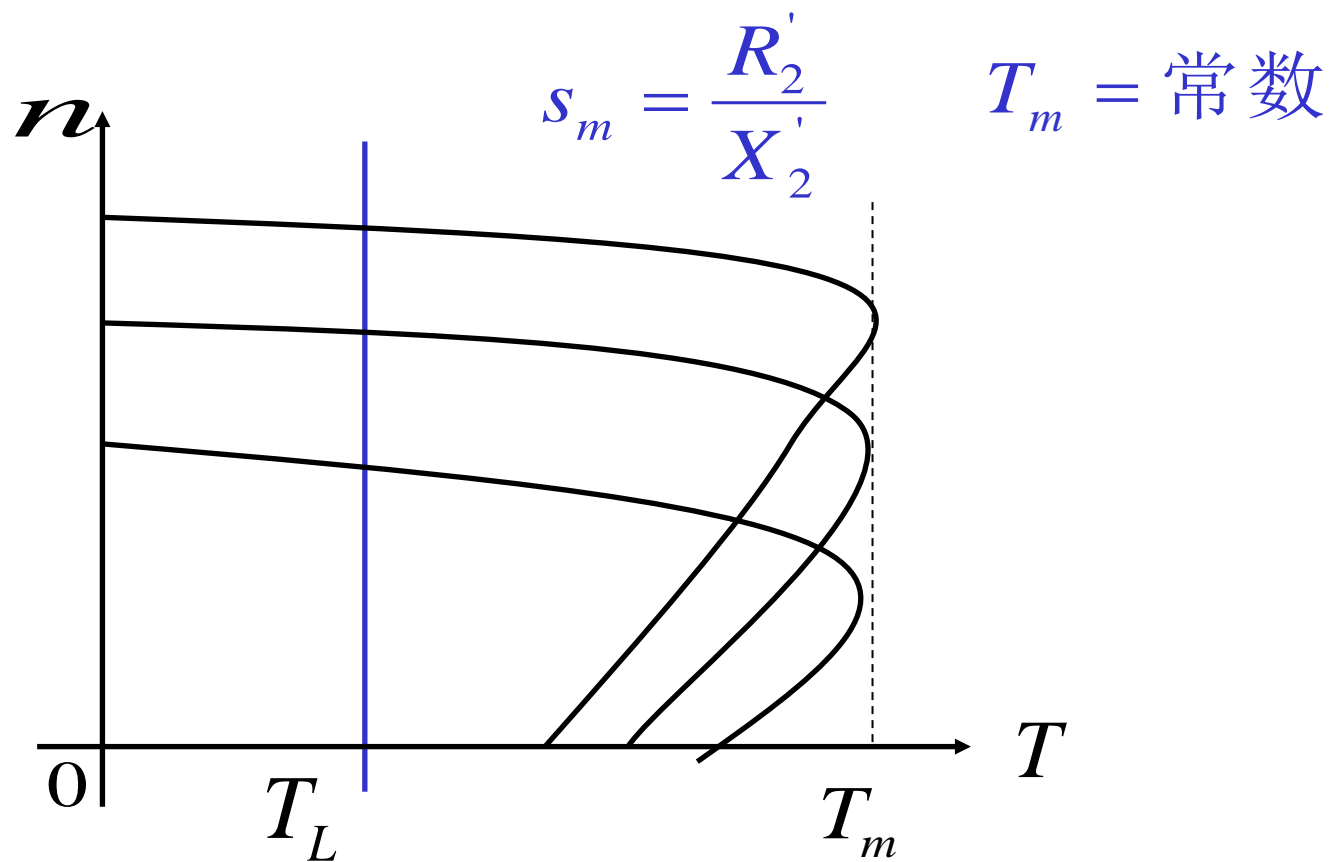
2、变频调速

(2) 从基频向下调速

A: 保持 $\frac{E_1}{f_1} = \text{常数}$ (恒磁通控制方式)

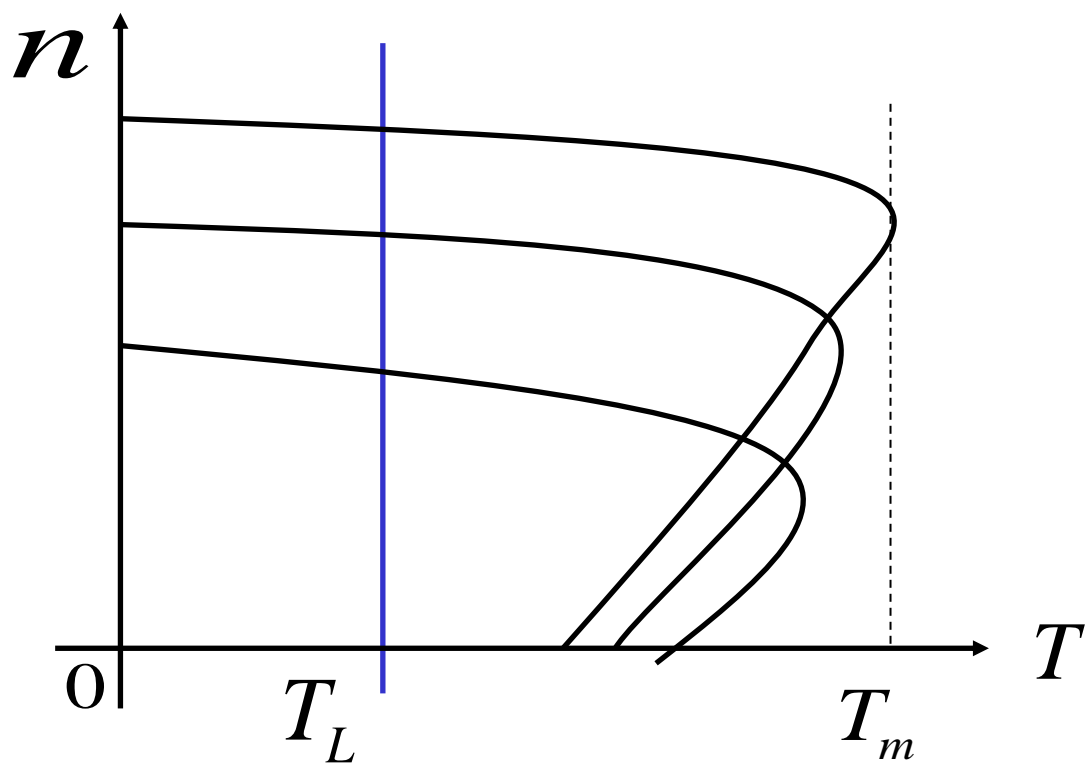
$$\begin{aligned} U_1 &\approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{dp1} \Phi_m \\ T &= \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{m_1 I_2' R_2' / s}{2\pi n_1 / 60} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \left[\frac{E_2'}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_2')^2}} \right]^2 \frac{R_2'}{s} \\ &= \frac{m_1 p f_1}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1} \right)^2 \frac{\frac{R_2'}{s}}{\left(\frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_2')^2} \\ &= \frac{m_1 p f_1}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1} \right)^2 \frac{1}{R_2' / s + s X_2'^2 / R_2'} \end{aligned}$$

机械特性



恒转矩调速方式

机械特性



近似恒转矩调速方式



三相异步电动机变频调速的特点

- 从基速向下调速，为恒转矩调速方式；
- 从基速向上调速，为恒功率调速方式。
- 调速范围大。
- 转速稳定性好。
- 运行时转差率小，效率高。
- 频率可以连续调节，为无级调速。