



第4篇 异步电机



2



第4篇 异步电机

第13章 异步电机的用途、分类、基本结构和额定值

▼ 学习目标

- 三相异步电动机的工作原理
- 异步电机的用途和常见分类方法
- 三相异步电动机的基本结构，笼型、绕线型绕组的结构特点
- 三相异步电动机的额定值

2



第13章 异步电机的用途、分类、基本结构和额定值

13.1 异步电机的用途、分类和基本结构

1. 异步电机的用途和特点

(1) 异步电机的用途

➤ 主要用作电动机

用于拖动各种机械，功率从几十瓦至数千千瓦，应用范围非常广泛。

(工业，农业，交通，民用，.....)

➤ 用作发电机

用于小水电站、风力发电等。

3



1. 异步电机的用途和特点

(2) 异步电动机的特点

➤ 优点

- 结构简单、制造容易、成本较低、运行可靠（笼型）；
- 具有适用的工作特性，运行效率较高。

➤ 缺点

- 功率因数总小于1（总需从电网吸收电感性无功功率）；
- 调速性能不如直流电动机。

4



13.1 异步电机的用途、分类和基本结构

2. 异步电动机的分类

常用的分类方法

➤ 按定子绕组相数

单相、两相、三相、多相异步电动机

➤ 按转子结构（转子绕组型式）

- 笼型异步电动机
- 绕线转子异步电动机

- ◆ 单笼
- ◆ 双笼
- ◆ 深槽

5

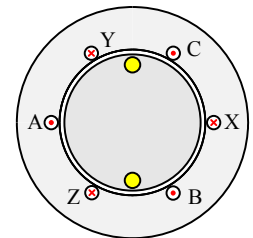


13.1 异步电机的用途、分类和基本结构

3. 三相异步电机的基本工作原理

将三相**隐极同步电机**的转子励磁绕组用一个集中绕组表示。将它短路起来。

❓ 在转子静止时，给定子三相绕组通入对称电流，会发生什么现象



6

3. 三相异步电机的工作原理

定子通电, 三相电流产生基波磁场, 以同步转速 n_1 旋转;

在转子绕组中产生感应电动势 e ;

e 在转子绕组中产生感应电流 i ;

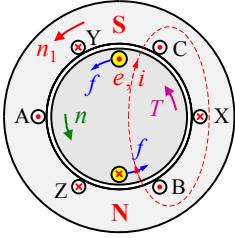
i 在磁场中产生电磁力 f ;

f 产生电磁转矩 T , 使转子以转速 n 向 n_1 的方向旋转。

电能 \rightarrow 机械能, 是电动机。

❓ n 会等于 n_1 ? — 要产生 T , 必须 $n \neq n_1$ — 异步

转子转速 n 与同步转速 n_1 间无严格比例关系



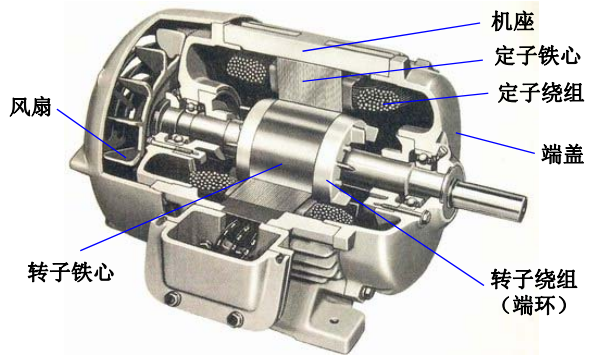
13.1 异步电机的用途、分类和基本结构

4. 三相异步电机的基本结构

- 定子**
 - 铁心: 0.5mm厚、涂漆的硅钢片叠压而成
 - 绕组: 双层绕组或单层绕组
 - 高压大、中型电机用Y联结;
 - 中小型电机6个出线端都引出。
- 机座**
- 气隙** — 均匀, 很小 (比同容量同步电机的小很多)
- 转子**
 - 铁心: 0.5mm厚硅钢片叠压而成
 - 绕组: 笼型, 绕线型
 - 转轴

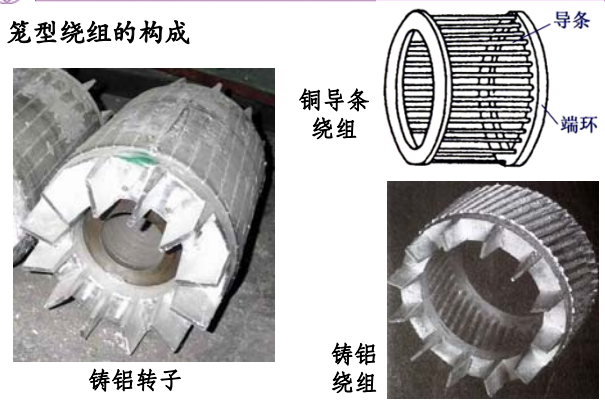
4. 三相异步电机的基本结构

笼型异步电机的基本结构



4. 三相异步电机的基本结构

笼型绕组的构成



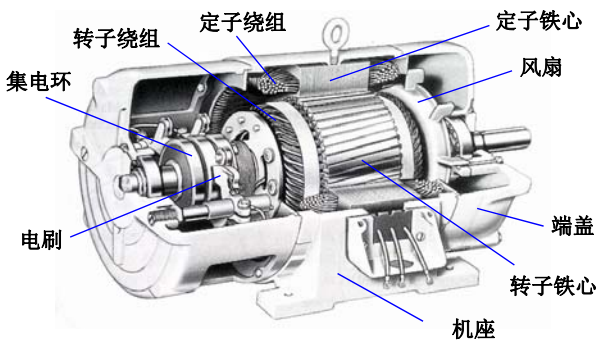
铜导条绕组

铸铝转子

铸铝绕组

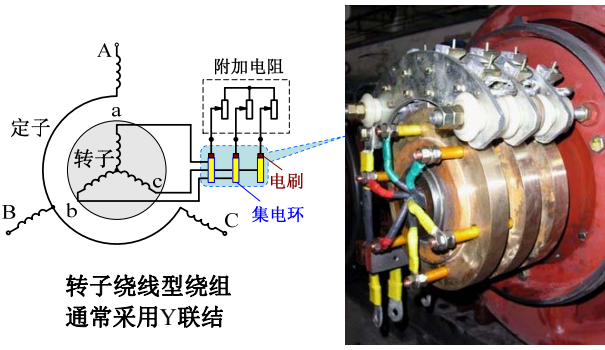
4. 三相异步电机的基本结构

绕线转子异步电机的基本结构



4. 三相异步电机的基本结构

绕线型绕组的联结方式



转子绕线型绕组通常采用Y联结

4. 三相异步电机的基本结构

转子 (中小型电机)




笼型异步电机转子

绕线转子异步电机
转子铁心

13

4. 三相异步电机的基本结构

转子 (中小型电机)




绕线转子 (嵌线后)

14

4. 三相异步电机的基本结构

定子 (中小型电机)



定子铁心

嵌放绕组的定子铁心

15

4. 三相异步电机的基本结构

定子
(中小型电机)

- 定子三相绕组的 6 个出线端都接到出线盒中的端子上。
- 可根据需要, 连接成 Y 或 D 联结。



16

第13章 异步电机的用途、分类、基本结构和额定值

13.2 三相异步电动机的额定值

额定功率 P_N (kW)
 额定电压 U_N (V, kV)
 额定电流 I_N (A)
 额定频率 f_N (Hz)
 额定转速 n_N (r/min)
 额定功率因数 $\cos\varphi_N$
 额定效率 η_N

铭牌上还标明: 绕组联结方式、温升、绝缘等级、工作方式等。

17

13.2 三相异步电动机的额定值

额定功率 P_N
 电动机额定运行时转轴输出的**机械功率**。

额定电压 U_N
 电动机额定运行时, 定子绕组出线端的**线电压**。

额定电流 I_N
 电动机额定运行 (定子绕组加额定电压、轴上输出额定功率) 时, 定子绕组的**线电流**。

额定频率 f_N
 我国规定的标准频率为50Hz。

18



13.2 三相异步电动机的额定值

额定转速 n_N

电动机额定运行（在额定电压、额定频率下，转轴输出额定功率）时的转速。

额定功率因数 $\cos\varphi_N$

电动机额定运行时定子侧的功率因数。

额定效率 η_N

电动机额定运行时的效率。

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{1N}} \times 100\% \quad (P_{1N}: \text{额定输入功率})$$

19



13.2 三相异步电动机的额定值

额定功率、额定电压、额定电流间的关系

$$P_N = P_{1N} \eta_N = (\sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N) \eta_N$$

例 一台三相异步电动机， $P_N = 55\text{kW}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ， $\cos\varphi_N = 0.89$ ， $\eta_N = 91.5\%$ ， $n_N = 1455\text{r/min}$ ，求该电动机的额定电流和额定输出转矩。

解：

$$I_N = \frac{P_N}{(\sqrt{3} U_N \cos\varphi_N) \eta_N} = \frac{55 \times 10^3}{(\sqrt{3} \times 380 \times 0.89) \times 0.915} = 102.6 \text{ A}$$

$$T_{2N} = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{60 P_N}{2\pi n_N} = \frac{60 \times 55 \times 10^3}{2\pi \times 1455} = 361 \text{ N} \cdot \text{m}$$

20



第13章 异步电机的用途、分类、基本结构和额定值

小 结

- ✓ 三相异步电动机的基本工作原理。
- ✓ 异步电机转子的结构特点（笼型、绕线转子）。
- ✓ 三相异步电动机的额定值。
- ✓ 异步电机的用途；异步电机的特点、主要分类（按相数、按转子结构）。
- ✓ 主要概念
异步，笼型绕组，绕线转子，额定值

21



第4篇 异步电机

第14章 三相异步电机的运行原理**▼ 学习目标**

- ⊙ 转差率及其与异步电机运行状态的对应关系
- ⊙ 三相异步电机的电磁关系（重点为：磁动势、电动势平衡关系，转子量与转差率的关系）
- ⊙ 转子频率折合和绕组折合方法
- ⊙ 三相异步电机的T型等效电路，等效电路中各参数的物理意义
- ⊙ 笼型绕组的极对数及相数、绕组因数

22



第14章 三相异步电机的运行原理

主要内容

以**三相绕线转子异步电机**为对象
(定、转子绕组均为三相)

- 研究**对称稳态**运行时各电磁量的相互作用关系——电磁关系。
- 定性和定量地描述电磁关系：
 - 时相矢量图、相量图
 - 电压方程式
 - 等效电路
- 由简到繁、由浅入深：转子不转 \Rightarrow 转子旋转

23



第14章 三相异步电机的运行原理

14.1 三相异步电机转子不转时的电磁关系**► 参考方向规定**

■ 空间坐标系

分别建立定、转子的空间坐标系：

- 纵轴 $+A_1$ 、 $+A_2$ 分别位于定、转子A相相轴；
- 横轴 α_1 、 α_2 仍为空间电角度，**逆时针**方向为正。

■ 磁动势、磁通密度、磁通（磁链）

从**定子到转子**的方向。

■ 每相绕组电压、电流、电动势

定子：**电动机惯例**； 转子：**发电机惯例**。

24

14.1 三相异步电机转子不转时的电磁关系

参考方向规定 (续)

25

14.1 三相异步电机转子不转时的电磁关系

分析思路

电流产生基波磁动势 → 磁动势产生磁通

磁通产生电动势 → 电路方程 → 等效电路

相量图

转子不转的两种情况

- 转子绕组开路 (电流为零)
- 转子堵转 (转子绕组有电流, 但人为堵住不转)

26

14.1 三相异步电机转子不转时的电磁关系

1. 转子绕组开路时的电磁关系

(1) 基波磁动势、磁通

励磁磁动势

- 定子三相对称绕组通以三相对称电流 i_0 , 产生合成基波旋转磁动势 F_0 。
- F_0 是产生气隙磁场的励磁磁动势, i_0 是励磁电流 (此时, 转子绕组无电流)。
- 转速: 取决于定子电流频率 f_1 , 为同步转速 $n_1 = \frac{60f_1}{p}$
相应的电角速度为 $\omega_1 = p \frac{2\pi n_1}{60} = 2\pi f_1$
- 转向: 取决于定子电流相序, 正序时为逆时针。

27

(1) 基波磁动势、磁通

气隙磁通密度、主磁通

- F_0 产生基波气隙磁场, 用气隙磁通密度矢量 B_δ 表示。相应的磁通与定、转子绕组都交链, 是主磁通。
- 气隙每极主磁通, 即每极磁通量为 $\Phi_m = \frac{2}{\pi} B_\delta \tau_p l_e$ 。
- B_δ 与 F_0 的空间相位关系
三相异步电机气隙均匀。考虑磁滞涡流的影响时, B_δ 滞后 F_0 一个小的角度。
- B_δ 在空间正弦分布, 以电角速度 ω_1 旋转, 使静止的定、转子绕组的磁通 (或磁链) 随时间以角频率 ω_1 按正弦规律变化。

28

(1) 基波磁动势、磁通

定子漏磁通

- 端部漏磁通
- 槽漏磁通
- 差漏磁通

与同步电机中的类似

F_0 产生的磁通

- 主磁通: 通过气隙, 与定、转子绕组同时交链, 是机电能量转换的媒介。
- 定子漏磁通: 不交链转子绕组, 仅和定子绕组自身交链。

29

1. 转子绕组开路时的电磁关系

(2) 感应电动势

气隙磁场 (主磁通) 产生的感应电动势

- B_δ 在定、转子相绕组中分别产生磁链 ψ_1 、 ψ_2 。
- ψ_1 、 ψ_2 以角频率 ω_1 交变, 在定、转子相绕组中产生基波电动势, 最大值
 $E_{1m} = \omega_1 \Psi_{m1} = \omega_1 N_1 k_{dp1} \Phi_m$
 $E_{2m} = \omega_1 \Psi_{m2} = \omega_1 N_2 k_{dp2} \Phi_m$

设 $\psi = \Psi_m \cos \omega_1 t$
则 $e = -\frac{d\psi}{dt} = \omega_1 \Psi_m \sin \omega_1 t$

N_2 、 k_{dp2} : 转子一相绕组的串联匝数、基波绕组因数。

30

(2) 感应电动势

➤ 气隙磁场 (主磁通) 产生的感应电动势 (续)

■ 定、转子相电动势的关系

$$E_{1m} = \omega_1 \Psi_{m1} = \omega_1 N_1 k_{dp1} \Phi_m$$

$$E_{2m} = \omega_1 \Psi_{m2} = \omega_1 N_2 k_{dp2} \Phi_m$$

● 数量关系

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{dp1} \Phi_m, E_2 = 4.44 f_1 N_2 k_{dp2} \Phi_m$$

◆ 一相基波感应电动势的有效值, 与频率 f_1 、一相有效匝数和每极磁通量 Φ_m 成正比;

◆ 电压变比 k_e : 定、转子相电动势有效值之比。

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

频率相同

(2) 感应电动势

➤ 气隙磁场 (主磁通) 产生的感应电动势 (续)

■ 定、转子相电动势的关系

● 相位关系

◆ \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 分别滞后产生它们的磁链 $\dot{\Psi}_1$ 、 $\dot{\Psi}_2$ 90° 。

◆ \dot{E}_2 滞后 \dot{E}_1 的电角度为 α_0 。(等于 $+A_2$ 超前 $+A_1$ 的空间电角度 α_0)

◆ 改变转子位置 (空间电角度 α_0)，可改变 \dot{E}_2 的相位 —— 移相器。

(2) 感应电动势

➤ 定子漏磁通产生的漏磁感应电动势

定子绕组漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1} \Rightarrow$ 漏磁电动势 $\dot{E}_{\sigma 1}$
(随时间按正弦规律变化)

● 漏磁路主要是空气, 通常可认为是**不饱和**的 (电流过大时除外)。

● 仍采用同步电机中的处理方法 (用参数 X_{σ} 表示 E_{σ} 与 I 的数量关系)。按规定的参考方向, 有

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

$X_{\sigma 1}$ —— 定子一相绕组的漏电抗,
 $X_{\sigma 1} = \omega_1 L_{\sigma 1}$, 通常看作常数。

1. 转子绕组开路时的电磁关系

(3) 励磁电流

● 计及铁耗时, B_δ 滞后 F_0 一个小的角度。

\downarrow

$\dot{\Psi}_1$ 滞后 \dot{I}_0 一个同样的角度。

● 相应地, 励磁电流 \dot{I}_0 可分解成两个分量:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r}$$

\dot{I}_{0a} —— 有功分量, 产生铁耗;
 \dot{I}_{0r} —— 无功分量, 产生 B_δ 。

1. 转子绕组开路时的电磁关系

(4) 时空相矢量图

定子

转子

电 → 磁

磁 → 电

电势平衡关系

电动势平衡关系

1. 转子绕组开路时的电磁关系

转子绕组开路时的电磁关系总结

电 → 磁

磁 → 电

电势平衡关系

电动势平衡关系

1. 转子绕组开路时的电磁关系

(5) 电压方程式、相量图、等效电路

➤ 定、转子一相电压方程式

定子: $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1$
 $= -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1$
 $= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$

其中, $Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$
 为定子一相绕组的漏阻抗。

转子: $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$

参考方向规定

(5) 电压方程式、相量图、等效电路

➤ 相量图

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

结论: 异步电动机总需从电网吸收电感性(滞后)无功功率, 以产生气隙磁场。

异步电动机气隙通常应尽可能小

- 减小励磁电流 I_0
- 提高功率因数

(5) 电压方程式、相量图、等效电路

➤ 等效电路

- 为得到等效电路, 需对 \dot{E}_1 做等效处理。
- 把 \dot{E}_1 看作 \dot{I}_0 在阻抗上产生压降的形式。
 (依据: $\dot{I}_0 \Rightarrow \phi_m \Rightarrow \dot{E}_1$, 并有铁耗)
- 按规定的参考方向, 得: $\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 Z_m$

其中, $Z_m = R_m + jX_m$

R_m —— 励磁电阻, 是等效铁耗的参数;
 X_m —— 励磁电抗, 是对应于 ϕ_m 的参数;
 Z_m —— 励磁阻抗。

(5) 电压方程式、相量图、等效电路

➤ 等效电路(续)

定子一相的电压方程式为

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

等效电路

- 转子绕组开路的三相异步电动机, 类似于二次绕组开路的三相变压器。
- Z_m (R_m 、 X_m) 与主磁路饱和程度有关。

14.1 三相异步电机转子不转时的电磁关系

2. 转子堵转时的电磁关系

■ 转子堵转

- 转子三相绕组短路, 并将转子堵住不转, 定子三相绕组接对称交流电源。
- 堵转时:
 转速 $n=0$
 转子相电压 $\dot{U}_2 = 0$
 转子相电流 $\dot{I}_2 \neq 0$
 定子相电流用 \dot{I}_1 表示

2. 转子堵转时的电磁关系

(1) 基波磁动势

➤ 定子基波磁动势

稳态时, 定子三相对称绕组通以三相对称电流 \dot{I}_1 , 产生合成基波旋转磁动势 F_1 。

- 幅值: $F_1 = \frac{m_1}{2} \frac{4}{\pi} \frac{N_1 I_1}{p} k_{dp1}$ (m_1 为定子绕组相数)
- 转速: 取决于定子电流频率 f_1 , 为同步转速 n_1 , 电角速度为 ω_1 。
- 转向: 取决于定子电流 \dot{I}_1 的相序 (为逆时针)。



(1) 基波磁动势

► 转子基波磁动势

在 \dot{E}_2 作用下, 转子三相绕组中产生对称电流 \dot{i}_2 。

因定、转子绕组**极对数相同**, 故转子三相对称电流 \dot{i}_2 产生合成**基波**旋转磁动势 F_2 。

- 幅值: $F_2 = \frac{m_2}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_2 I_2}{p} k_{dp2}$ (m_2 为转子绕组相数)
- 转速: 取决于转子电流频率 $f_2 \Leftarrow n_1 \Leftarrow f_1$
 $f_2 = f_1$, 故为同步转速 n_1 , 电角速度为 ω_1 。
- 转向: 取决于 \dot{i}_2 的相序 $\Leftarrow B_\delta$ 的转向 (逆时针),
 \dot{E}_2 与 \dot{i}_2 的相序为正序 ($A_2-B_2-C_2$),
所以, F_2 逆时针旋转。

43



(1) 基波磁动势

► 磁动势的合成

- 转子基波磁动势 F_2 与定子基波磁动势 F_1 转速和转向都相同, 在空间保持**相对静止**。
- F_1 与 F_2 都作用于主磁路上, **共同产生**基波气隙磁通密度 B_δ , 起着励磁磁动势的作用。
- 仍用 F_0 表示此时的励磁磁动势即合成磁动势:

$$F_0 = F_1 + F_2$$

- **注意:** 此时 F_0 的性质虽然与转子绕组开路时的相同, 但幅值和空间相位不同。

44



(1) 基波磁动势

► 磁动势的合成 (续)

将上式改写为定、转子磁动势平衡关系:

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

即可将 F_1 看成由 2 个分量组成:

F_0 —— 产生气隙磁通密度 B_δ 的励磁磁动势分量。

与 F_0 相对应的定子电流为励磁电流 \dot{i}_0 与转子开路时的不同

$$F_0 = \frac{m_1}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 I_0}{p} k_{dp1}$$

$(-F_2)$ —— 与 F_2 幅值相等、方向相反的分量, 用于抵消 F_2 对 B_δ 的影响。

→ F_2 影响 F_1 , 即 \dot{i}_1 受 \dot{i}_2 影响。

45



2. 转子堵转时的电磁关系

(2) 磁通、感应电动势

磁通 $\begin{cases} \text{主磁通 } \dot{\Phi}_m: \text{在定、转子相绕组中产生 } \dot{E}_1、\dot{E}_2。 \\ \text{漏磁通 } \begin{cases} \text{定子漏磁通 } \dot{\Phi}_{\sigma 1}: \\ \text{在定子相绕组中产生漏磁电动势 } \dot{E}_{\sigma 1} \\ \text{转子漏磁通 } \dot{\Phi}_{\sigma 2}: \\ \text{在转子相绕组中产生漏磁电动势 } \dot{E}_{\sigma 2} \end{cases} \end{cases}$

将 $\dot{E}_{\sigma 2}$ 用 \dot{i}_2 在电抗上产生的电压降来表示。

按照规定的参考方向, 有

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{i}_2 X_{\sigma 2}$$

$X_{\sigma 2}$: 转子一相绕组漏电抗, $X_{\sigma 2} = \omega_1 L_{\sigma 2}$, 通常视为**常数**。

46



2. 转子堵转时的电磁关系

(3) 电压方程式

► 定子一相电压方程式

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

$$\Downarrow \dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{i}_1 X_{\sigma 1}$$

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

► 转子一相电压方程式

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{i}_2 R_2$$

$$\Downarrow \dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{i}_2 X_{\sigma 2}$$

$$\dot{E}_2 = \dot{i}_2 (R_2 + jX_{\sigma 2}) = \dot{i}_2 Z_2$$

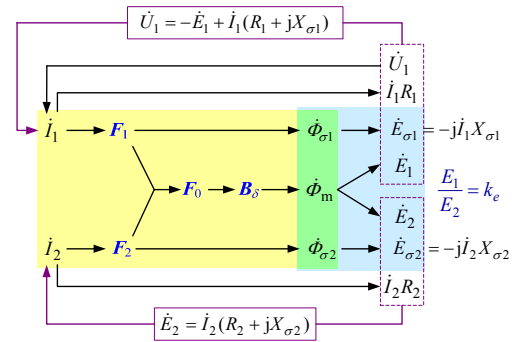
$Z_2 = R_2 + jX_{\sigma 2}$, 为转子一相绕组的**漏阻抗**。

47

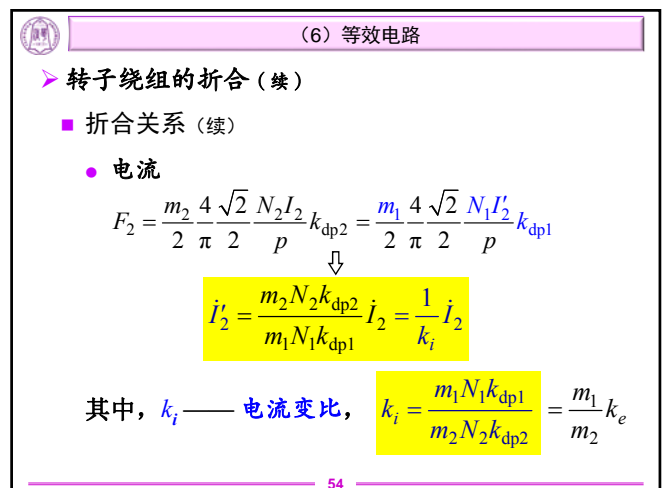
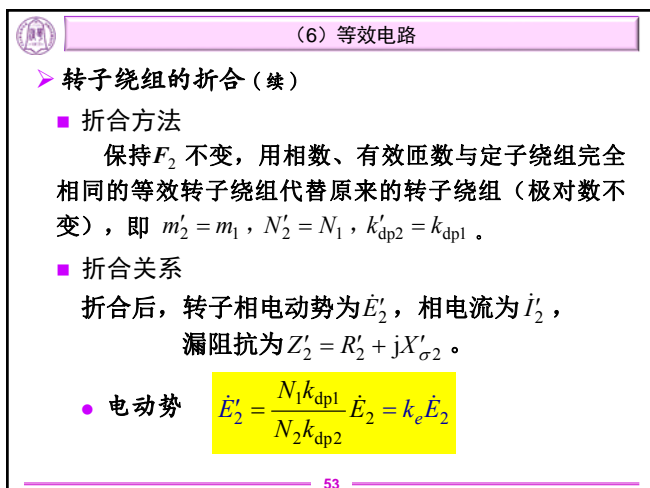
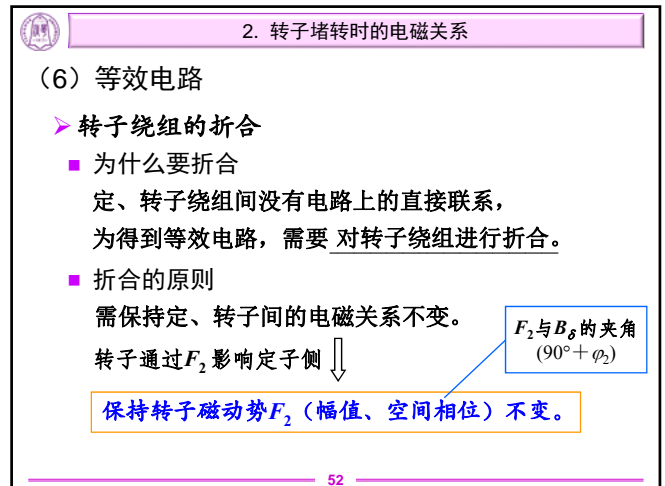
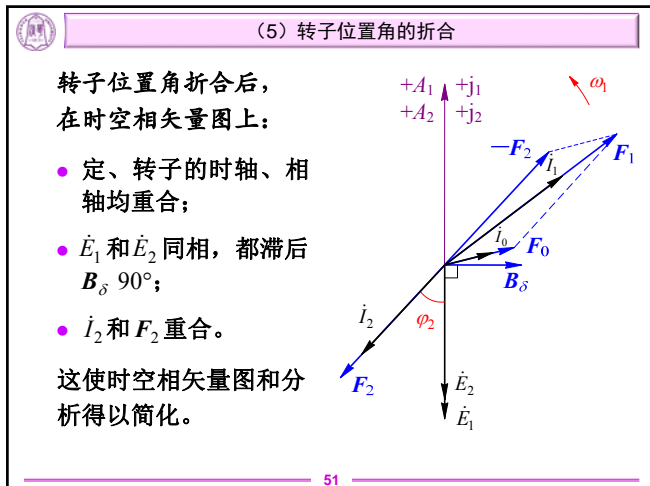
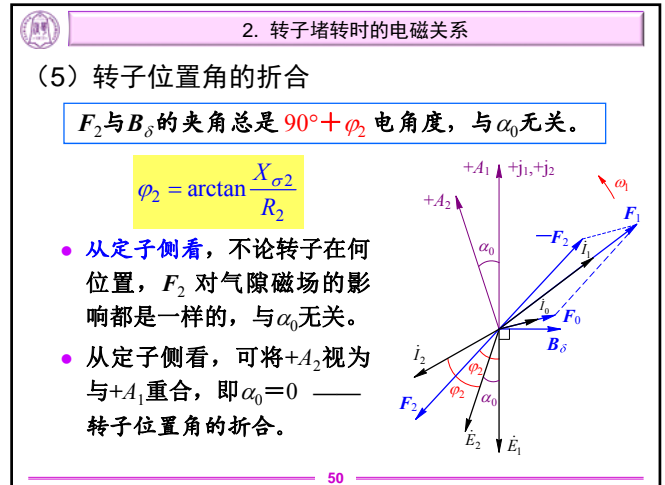
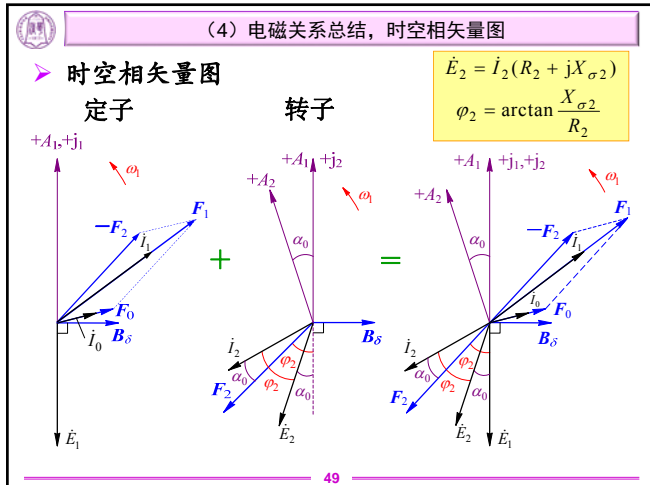


2. 转子堵转时的电磁关系

(4) 电磁关系总结, 时空相矢量图



48





(6) 等效电路

转子绕组的折合 (续)

折合关系 (续)

● 阻抗 $Z'_2 = \frac{\dot{E}'_2}{\dot{I}'_2} = \frac{k_e \dot{E}_2}{\frac{1}{k_i} \dot{I}_2} = k_e k_i \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2} = k_e k_i Z_2$

即 $R'_2 = k_e k_i R_2$, $X'_{\sigma 2} = k_e k_i X_{\sigma 2}$

由折合关系可知, 绕组折合后,

● 转子阻抗角不变: $\varphi'_2 = \arctan \frac{X'_{\sigma 2}}{R'_2} = \arctan \frac{X_{\sigma 2}}{R_2} = \varphi_2$

● 功率关系不变

例如: $m_1 I_1'^2 R'_2 = m_2 I_2'^2 R_2$, $m_1 I_1'^2 X'_{\sigma 2} = m_2 I_2'^2 X_{\sigma 2}$

55



(6) 等效电路

转子绕组的折合 (续)

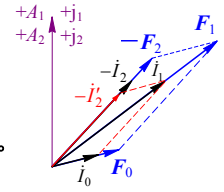
折合后的定、转子电流关系

- 在时空相矢量图上, \dot{I}_1 、 \dot{I}_0 、 \dot{I}'_2 分别和 F_1 、 F_0 、 F_2 重合;

● $F_1 = KI_1$, $F_0 = KI_0$, $F_2 = KI'_2$.

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

因此, 磁动势平衡关系 $F_1 = F_0 + (-F_2)$ 可变换为
电流平衡关系: $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$ 或 $\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0$.



56



(6) 等效电路

基本方程式

对转子进行位置角折合、绕组折合后, 转子堵转时的基本方程式为 (按规定的参考方向)

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_{\sigma 1}) \\ \dot{E}'_2 = \dot{I}'_2(R'_2 + jX'_{\sigma 2}) \\ \dot{E}_1 = \dot{E}'_2 \\ \dot{E}_1 = -\dot{I}_0(R_m + jX_m) \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 \end{cases}$$

57

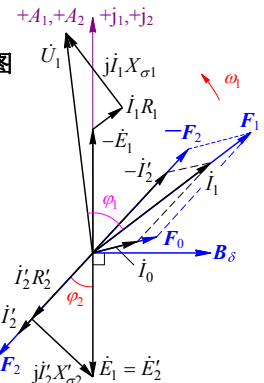
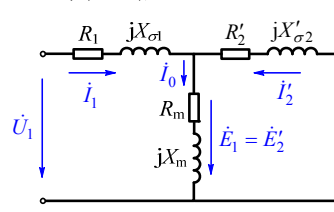


(6) 等效电路

等效电路, 相量图

基本方程式 \Rightarrow 时空相矢量图
相量图

等效电路



58



(6) 等效电路

等效电路, 相量图 (续)

讨论

- 转子堵转的三相异步电动机, 类似于二次绕组短路的三厢变压器。
- 由于 $|Z_m| \gg |Z'_2|$, 因此转子堵转时, U_1 基本上被 Z_1 、 Z'_2 分压, 与转子绕组开路时相比, E_1 、 Φ_m 大幅降低, I_0 很小。
- $X_{\sigma 1}$ 、 $X_{\sigma 2}$ 都较小 (通常为 0.06~0.12), R_1 、 R_2 更小。
- 转子堵转时, 要保证不出现过电流, U_1 须比较低 (一般 $U_1 \leq 0.2$)。

59



14.1 三相异步电机转子不转时的电磁关系

例题1 (教材练习题14-1-6)

一台三相、4极、50Hz的绕线转子异步电机, 电压变比 $k_e = 10$, 转子不转时, 转子每相电阻 $R_2 = 0.02 \Omega$, 漏电阻 $X_{\sigma 2} = 0.08 \Omega$ 。当转子堵转、定子相电动势 $E_1 = 200V$ 时, 求转子的相电动势 E_2 、相电流 I_2 及功率因数 $\cos \varphi_2$ 。

解:

欲求相电动势和相电流, 可能有两种途径:

① 等效电路或电压方程式; ② 变比。

题中已知 E_1 和 k_e 。转子不转时, 在任何情况下, 相电动势关系 $E_1 = k_e E_2$ 都成立, 因此可由 k_e 求出 E_2 。

因转子参数已知, 故可由转子电压方程式求出 I_2 。

60

14.1 三相异步电机转子不转时的电磁关系

解: (续)

$$\text{转子相电动势 } E_2 = \frac{E_1}{k_e} = \frac{200}{10} = 20 \text{ V}$$

$$\text{因转子堵转时 } \dot{E}_2 = \dot{I}_2(R_2 + jX_{\sigma 2})$$

所以, 转子相电流为

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{\sigma 2}^2}} = \frac{20}{\sqrt{0.02^2 + 0.08^2}} = 242.5 \text{ A}$$

转子功率因数取决于转子一相绕组的漏阻抗, 即

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{\sigma 2}^2}} = \frac{0.02}{\sqrt{0.02^2 + 0.08^2}} = 0.2425$$

61

14.1 三相异步电机转子不转时的电磁关系

例题2 (教材例14-1)

一台三相绕线转子异步电动机, 转子绕组为Y联结, 当定子加额定电压、转子绕组开路时, 集电环电压为260V, 转子每相漏阻抗为 $(0.06 + j0.2) \Omega$, **不计转子绕组开路时定子绕组的漏阻抗压降**。试求在下列两种情况下转子堵转时的转子相电流 (设 $Z_1 = Z_2'$) :

(1) 定子加额定电压;

(2) 定子加额定电压、转子每相串入 0.2Ω 电阻。

解题分析:

已知条件中有转子参数和电压, 欲求转子相电流, 可考虑用等效电路求解。

注意: 不能直接用 $E_2/|Z_2|$ 求 I_2 。

62

14.1 三相异步电机转子不转时的电磁关系

解题分析: (续)

转子开路时, 集电环电压是转子线电动势。

不计转子绕组开路时定子绕组漏阻抗压降, 意为在转子开路时的定子电压方程式中, 不计 $\dot{I}_0 Z_1$, 因此 $E_1 = U_1$ 。

已知的转子开路相电动势 ($260/\sqrt{3} \text{ V}$) 是定子加额定电压时的值, 其折合值是定子额定相电压。反过来看, 它就是定子额定相电压折合到转子侧的值。

现 k_e 未知, 但已知转子参数, 且 $Z_1 = Z_2'$ 即 $Z_1' = Z_2$, 因此, 可采用折合到转子侧的等效电路计算。

题中未给出励磁阻抗。在额定电压下堵转时, 定、转子电流很大, 主磁通较低, 故励磁电流可忽略。

63

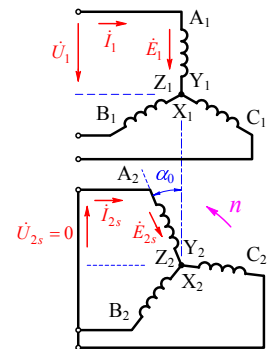
第14章 三相异步电机的运行原理

14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系

异步电机转子绕组通常是短路的 (绕线转子异步电机转子三相绕组还可在外部串入电阻后短路), 定子三相绕组接对称交流电源。

异步电机以转速 n 运行时:

- $n \neq n_1$
- 转子相电动势、相电流分别用 \dot{E}_{2s} 、 \dot{I}_{2s} 表示。



64

14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系

1. 转差率

(1) 定义

同步转速 n_1 与转子转速 n 的差与同步转速 n_1 的比值。

用 s 表示:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

注意: 若令 $n_1 > 0$, 则当 n 与 n_1 反向时, n 应取负值。

转子转速 n 可用转差率 s 表示为

$$n = (1 - s) n_1$$

65

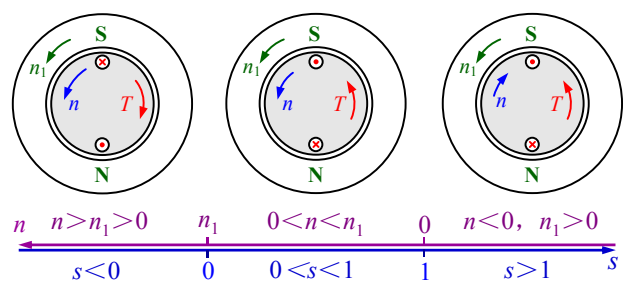
1. 转差率

(2) 用转差率表示异步电机的三种运行状态

发电机状态

电动机状态

电制动状态



66



14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系

2. 定、转子基波磁动势关系

(1) 定子基波磁动势

大小、相位与转子不转时的不同

转子旋转时, 定子电流仍用 i_1 表示。三相对称电流 i_1 产生合成基波旋转磁动势 F_1 。

- 幅值: $F_1 = \frac{m_1}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 I_1}{p} k_{dp1}$
- 转向: 取决于 i_1 的相序, 为逆时针。
- 转速: 取决于定子电流频率 f_1 ; 相对定子的转速为同步转速 n_1 , 电角速度为 ω_1 。

67



2. 定、转子基波磁动势关系

(2) 转子基波磁动势

转子以转差率 s 旋转时, 转子三相对称电流为 i_{2s} 。定、转子绕组的极对数相同, 故三相 i_{2s} 产生合成基波旋转磁动势 F_2 。

● 幅值

$$F_2 = \frac{m_2}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_2 I_{2s}}{p} k_{dp2} \quad (m_2 \text{ 为转子绕组相数})$$

● 转向 —— 取决于转子电流 i_{2s} 的相序在电动机状态, $0 < n < n_1$, B_δ 在转子绕组中产生的电动势和电流仍为正序, 则 F_2 转向为逆时针。

68



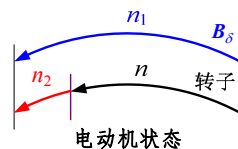
(2) 转子基波磁动势

● 转速 —— 取决于转子电流频率 f_2 f_2 取决于 B_δ (或 F_1) 相对转子的转速。转子静止时: B_δ 相对转子的转速为 n_1 , $f_2 = \frac{pn_1}{60} = f_1$ 转子旋转时: B_δ 相对转子的转速为 $(n_1 - n)$,

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{pn_1}{60} \frac{n_1 - n}{n_1} = sf_1 \quad \text{—— 转差频率}$$

因此, F_2 相对转子的转速为

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = s \frac{60f_1}{p} = sn_1$$



69

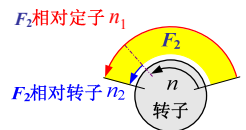


2. 定、转子基波磁动势关系

(3) 定、转子基波磁动势的转速关系

 F_1 相对定子的转速为同步转速 n_1 。 F_2 相对定子的转速为

$$n_2 + n = sn_1 + (1 - s)n_1 = n_1$$

即: F_1 、 F_2 都以同步转速 n_1 相对定子同向旋转。结论: 定、转子基波磁动势 F_1 、 F_2 在空间保持相对静止。
 n_1 一定, $n \uparrow \Rightarrow n_2 \downarrow$
 $n + n_2$ 不变

对于异步电机, 只要定、转子极对数相等, 则在任何转速下都有这种相对静止的关系。

70



2. 定、转子基波磁动势关系

(4) 定、转子磁动势的合成

- 在空间保持相对静止的 F_1 与 F_2 , 共同产生基波气隙磁通密度 B_δ , 起励磁磁动势的作用。
- 仍用 F_0 表示此时的励磁磁动势, 即合成磁动势,

$$F_0 = F_1 + F_2$$

注意: 与转子绕组开路、堵转时相比, 转子旋转时

- F_0 的性质相同, 但幅值不等;
- F_1 与 F_2 的幅值及其空间相位也不同。

71



(4) 定、转子磁动势的合成

将上式改写为定、转子磁动势平衡关系:

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

仍可将 F_1 看成由 2 个分量组成:

F_0 —— 励磁分量。产生气隙磁通密度 B_δ , 与 F_0 相应的定子电流为励磁电流 i_0 ,

$$F_0 = \frac{m_1}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 I_0}{p} k_{dp1}$$

$(-F_2)$ —— 负载分量。与 F_2 幅值相等、方向相反, 用于抵消 F_2 对 B_δ 的影响。

表明 F_1 (I_1) 随负载变化而变化

72



14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系

3. 感应电动势

(1) 定子感应电动势

$F_0 \rightarrow B_\delta \rightarrow$ 主磁通 $\dot{\Phi}_m \rightarrow \dot{E}_1$ (频率为 f_1)

$F_1 \rightarrow$ 定子漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1} \rightarrow \dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 X_{\sigma 1}$ (f_1)

(2) 转子感应电动势

• B_δ ($\dot{\Phi}_m$) 在转子一相绕组中产生电动势 \dot{E}_{2s} 。

• \dot{E}_{2s} 的频率为 $f_2 = sf_1$ 。

$\dot{I}_{2s} \rightarrow F_2 \rightarrow$ 转子漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 2s} \rightarrow \dot{E}_{\sigma 2s} = -j\dot{I}_{2s} X_{\sigma 2s}$
(f_2) (f_2) (f_2)

73



14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系

4. 转子电压方程式

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

(1) 电动势 E_{2s}

$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 k_{dp2} \Phi_m = 4.44 s f_1 N_2 k_{dp2} \Phi_m$$

$$E_{2s} = s E_2 \quad \text{前提: } \Phi_m \text{ 不变}$$

转子旋转时, 转子相电动势 E_{2s} 与转差率 s 成正比。

注意: $E_2 = 4.44 f_1 N_2 k_{dp2} \Phi_m = E_{2s} / s$

E_2 是在相同的 Φ_m 下, 折合到频率 f_1 的转子相电动势。

74



4. 转子电压方程式

(2) 漏电抗 $X_{\sigma 2s}$

电抗与频率成正比, 因此

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

($L_{\sigma 2}$ 为转子一相漏电感; 不计趋肤效应时, 是常数)

$$X_{\sigma 2s} = s X_{\sigma 2}$$

转子一相漏电抗 $X_{\sigma 2s}$ 与转差率 s 成正比。

注意:

$X_{\sigma 2}$ 是频率为 f_1 ($L_{\sigma 2}$ 不变) 时的转子一相漏电抗。

异步电动机正常运行时, s 通常很小, $X_{\sigma 2s} \ll X_{\sigma 2}$ 。

75



4. 转子电压方程式

(3) 转子电阻 R_2

忽略趋肤效应, 则 $R_2 = \text{const.}$

(4) 转子功率因数角 (阻抗角) φ_2

由转子一相电压方程式 $\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s} (R_2 + jX_{\sigma 2s})$ 解得

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

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

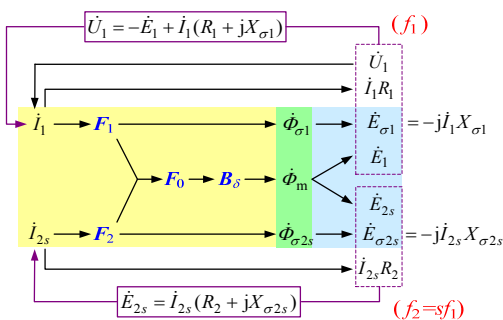
76



14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系

5. 电磁关系总结, 转子相矢量图

(1) 电磁关系总结

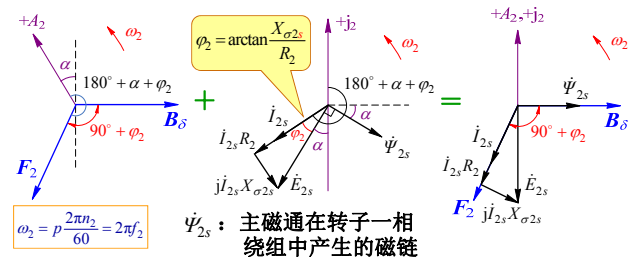


77



5. 电磁关系总结, 转子相矢量图

(2) 转子时空相矢量图 (以电动机状态为例)



结论: 不论 B_δ 相距 $+A_2$ 轴的空间电角度有多大, F_2 总是滞后 B_δ $90^\circ + \varphi_2$ 空间电角度。

78



14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系

6. 等效电路

(1) 转子绕组的频率折合

➤ 折合的依据和原则

- 为得到转子旋转时的等效电路, 需要转子频率 f_2 与定子频率 f_1 相同。
- 用 **静止的转子等效代替实际旋转的转子**, 从而使转子频率由 f_2 变为 f_1 —— **转子绕组的频率折合**。

理由:

- 转子通过其磁动势 F_2 影响定子侧;
- 无论 n 和 f_2 是多少, F_2 相对定子转速都是 n_1 ;
- 只要保持 F_2 (**幅值、相位**) 不变, 则无论 f_2 是何值, **对定子侧而言**, 转子的作用都一样。

79



(1) 转子绕组的频率折合

➤ 频率折合关系

$$\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s}(R_2 + jX_{\sigma 2s}) \quad (\text{频率为 } f_2)$$

两边同除以 s , 得

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \left(\frac{R_2}{s} + jX_{\sigma 2} \right) \quad \text{或} \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\frac{R_2}{s} + jX_{\sigma 2}} \quad (\text{频率为 } f_1)$$

\dot{E}_2 、 \dot{I}_2 、 $X_{\sigma 2}$ —— **折合到定子频率 f_1 的转子相电动势、相电流、漏电抗**。

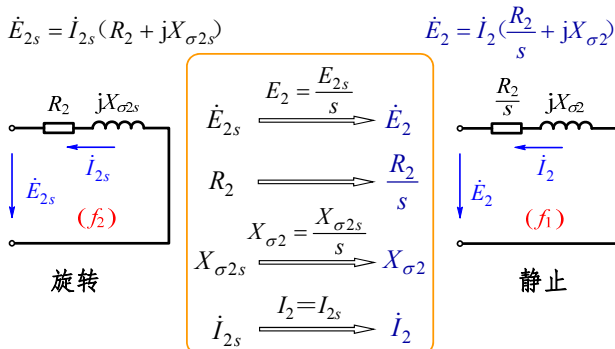
$$\begin{aligned} I_2 &= I_{2s} \\ \varphi_2 &= \arctan \frac{X_{\sigma 2}}{R_2/s} = \arctan \frac{X_{\sigma 2s}}{R_2} \end{aligned} \Rightarrow F_2 \text{ 的 } \begin{matrix} \text{幅值} \\ \text{相位} \end{matrix} \text{ 不变}$$

80



(1) 转子绕组的频率折合

➤ 频率折合关系 (续)



81



6. 等效电路

(2) 转子绕组折合

- 频率折合后 (还有转子位置角折合), 再进行转子绕组折合, 即 $m_2 \rightarrow m_1$, $N_2 \rightarrow N_1$, $k_{dp2} \rightarrow k_{dp1}$ 。

- 转子电压方程式变为 $\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{\sigma 2} \right)$

其中, \dot{E}'_2 、 \dot{I}'_2 、 R'_2 、 $X'_{\sigma 2}$ 分别是 \dot{E}_2 、 \dot{I}_2 、 R_2 、 $X_{\sigma 2}$ 折合到定子侧的折合值。

- 转子绕组折合后, 定、转子磁动势平衡关系可以等效变换为定、转子电流的平衡关系

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2) \quad \text{定子电流的负载分量}$$

82



6. 等效电路

转子折合关系表

实际值	频率折合		绕组折合	
	折合关系	折合值	折合关系	折合值
f_2	f_2/s	f_1	$\times 1$	f_1
\dot{E}_{2s}	E_{2s}/s (Φ_m 不变)	\dot{E}_2	$\times k_e$	\dot{E}'_2
R_2	R_2/s	R_2/s	$\times k_e k_i$	R'_2/s
$X_{\sigma 2s} = \omega_2 L_{\sigma 2}$	$X_{\sigma 2s}/s$ ($L_{\sigma 2}$ 不变)	$X_{\sigma 2}$	$\times k_e k_i$	$X'_{\sigma 2}$
\dot{I}_{2s}	$I_{2s} = I_2$	\dot{I}_2	$\times 1/k_i$	\dot{I}'_2

83



6. 等效电路

(3) 基本方程式、相量图

➤ 基本方程式

对转子进行频率折合 (及位置角折合)、绕组折合后, 可列出 **转子旋转时** 的基本方程式 (按参考方向)。

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_{\sigma 1}) \\ \dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{\sigma 2} \right) \\ \dot{E}_1 = \dot{E}'_2 \\ \dot{E}_1 = -\dot{I}_0(R_m + jX_m) \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 \end{cases}$$

84

(3) 基本方程式、相量图

➤ 相量图

- 根据基本方程式, 可作出转子旋转时的时空相量图。
- 不画出空间矢量时, 即为时间相量图。
- 频率折合后, $+A_2$ 轴是静止的。

6. 等效电路

(4) T型等效电路

根据基本方程式, 作出三相异步电机转子旋转时的一相等效电路。

与转子堵转时的等效电路相比, 转子回路中多了一个与转子旋转相关的附加电阻 $\frac{1-s}{s} R_2'$ 。

(4) T型等效电路

■ 讨论

- 电动机空载运行时
 - s 很小 ($s \approx 0$), 转子绕组近乎开路, $I_2 \approx 0$ 。此时, 定子电流 I_1 (空载电流) 基本上是励磁电流 I_0 , 定子功率因数 $\cos \phi_1$ 很低。
 - 在额定电压下, 通常 $I_0 = (0.2 \sim 0.5) I_N$ 。
- 电动机额定运行时
 - 通常 $s_N \leq 0.05$, 等效电路转子侧基本呈阻性, $\cos \phi_2$ 很高, $\cos \phi_1$ 也较高。
 - 通常, $\cos \phi_N = 0.7 \sim 0.9$ (中小型异步电动机)。

(4) T型等效电路

■ 讨论 (续)

- 关于 ϕ_m 的大小
 - 电动机从空载到额定负载正常运行时, 因 $I_1 |Z_1|$ 比 U_1 小很多, $E_1 \approx U_1$, 故 E_1 和产生它的 ϕ_m 的变化不大, 所需 I_0 也变化不大。
- 关于等效电路的参数
 - R_m 、 X_m 与磁路饱和程度有关, 其他参数通常可认为是常数。
 - 各参数大小与同容量变压器的相差较大 (因结构不同、有气隙)。
- 堵转时, E_1 和 ϕ_m 比正常运行时大幅降低。

6. 等效电路

(5) 等效电路的简化

➤ 思路

Z_m 支路移至输入端, 变为2条并联支路。

➤ 说明

- 采用何种等效电路, 应视电机功率大小和计算精度要求而定。
- 一般都可采用较准确 Γ 型等效电路 (通常 $c = 1.03 \sim 1.08$)。

准确 Γ 型等效电路 $\dot{c} = 1 + \frac{Z_1}{Z_m}$

较准确 Γ 型等效电路 $\dot{c} \approx c = 1 + \frac{X_{\sigma 1}}{X_m}$

14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系

7. 笼型绕组的极对数、相数、有效匝数

(1) 笼型绕组的极对数

结论: 笼型绕组没有固定的极对数, 其极对数取决于 (等于) 气隙磁场或定子绕组的极对数。

以电动机为例



7. 笼型绕组的极对数、相数、有效匝数

(2) 笼型绕组的相数、匝数、绕组因数

笼型绕组的导条沿圆周均匀分布。

各导条切割气隙磁场产生的基波感应电动势的幅值相同；相邻两根导条的基波感应电动势的相位差，等于二者的空间电角度差 $p \cdot 360^\circ / Q_2$ (Q_2 为转子槽数)。

因此，笼型绕组构成了一个对称的多相电路系统，其相数 $m_2 = Q_2$ 。

每相绕组仅有一根导条，所以

$$N_2 = \frac{1}{2}, \quad k_{dp2} = 1$$

91



14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系

8 例题3 (参见教材习题14-9)

一台三相、50Hz的绕线转子异步电动机，额定转速 $n_N = 980 \text{ r/min}$ 。当定子加额定电压、转子绕组开路时，转子每相感应电动势为 110 V ；转子堵转时，参数为 $R_2 = 0.1 \Omega$ ， $X_{\sigma 2} = 0.5 \Omega$ 。求：

(1) 电动机的极对数 p ；Y联结时，集电环电压为 $110\sqrt{3} \text{ V}$

(2) 额定运行时转子相电动势和相电流 (忽略定子漏阻抗)。

解：

(1) 因 $s_N \leq 0.05$ ，所以由 $n_N = 980 \text{ r/min}$ 和 $f_N = 50 \text{ Hz}$ ，可知 $n_1 = 1000 \text{ r/min}$ 。则 $p = 3$ 。

92



14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系

解：(续)

(2) 忽略定子绕组漏阻抗时， $E_1 = U_1$ ，则额定运行时和转子开路时的 ϕ_m 相同， E_2 相等。

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1000 - 980}{1000} = 0.02$$

额定运行时的转子相电动势、相电流为

$$E_{2s} = s_N E_2 = 0.02 \times 110 = 2.2 \text{ V}$$

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{\sigma 2s}^2}} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + (s_N X_{\sigma 2})^2}} = \frac{2.2}{\sqrt{0.1^2 + (0.02 \times 0.5)^2}} = 21.89 \text{ A}$$

$$\text{或 } I_{2s} = I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s_N)^2 + X_{\sigma 2}^2}} = \frac{110}{\sqrt{(0.1/0.02)^2 + 0.5^2}} = 21.89 \text{ A}$$

93



第14章 三相异步电机的运行原理

小 结

- ✓ 三相异步电机的电磁关系。
(特别是：定、转子磁动势相对静止，共同产生气隙磁场的关系；转子量与转差率的关系)
- ✓ 三相异步电机的频率折合和绕组折合：折合原则，折合关系 (绕线转子)。
- ✓ 三相异步电机的基本方程式，T型等效电路及其参数的意义。

94



第14章 三相异步电机的运行原理

小 结 (续)

✓ 主要概念

频率折合，绕组折合，T型等效电路，
转差率，电压变比，电流变比，
定、转子漏阻抗，励磁电阻，励磁电抗，励磁阻抗
合成磁动势，励磁磁动势
主磁通，每极磁通量，定、转子漏磁通
转子绕组开路 / 短路，转子堵转，
空载，空载电流，励磁电流
转子功率因数，转子阻抗角 (功率因数角)

95



第4篇 异步电机

第15章 三相异步电动机的功率、
转矩和运行特性

▼ 学习目标

- 三相异步电动机的转矩平衡关系，功率平衡关系及其与等效电路的联系，功率与转矩的关系
- 三相异步电动机的固有机械特性和人为机械特性，能够分析电动机运行工况变化时有关物理量的变化趋势
- 测取三相异步电动机参数的试验方法

96



第15章 三相异步电动机的功率、转矩和运行特性

15.1 三相异步电动机的功率与转矩关系

1. 三相异步电动机的功率关系

(1) 异步电动机的损耗

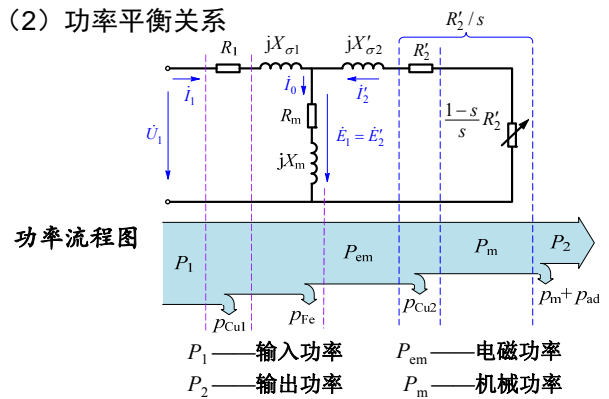
- 铜耗 —— 定、转子电流流过绕组电阻产生。
包括：定子铜耗 p_{Cu1} 、转子铜耗 p_{Cu2} 。
- 铁耗 p_{Fe} —— 气隙磁场旋转、铁心中磁通交变而产生。
一般只计定子的铁耗，不计转子的铁耗。
原因：正常运行时， s 很小、 f_2 很低；转子叠片铁心。
- 机械损耗 p_m —— 风阻、轴承摩擦等阻力转矩产生。
- 附加损耗 p_{ad} —— 定、转子开槽、谐波磁动势等引起。

97



1. 三相异步电动机的功率关系

(2) 功率平衡关系

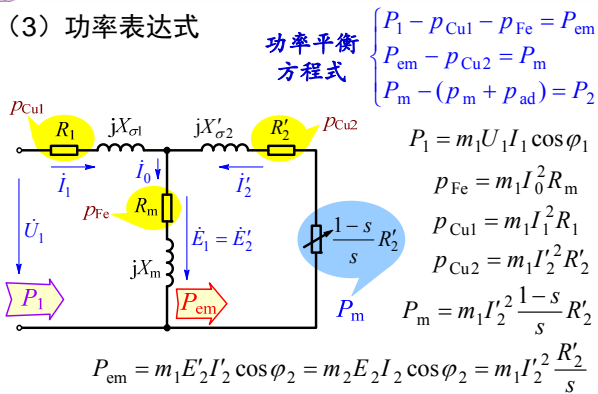


98



1. 三相异步电动机的功率关系

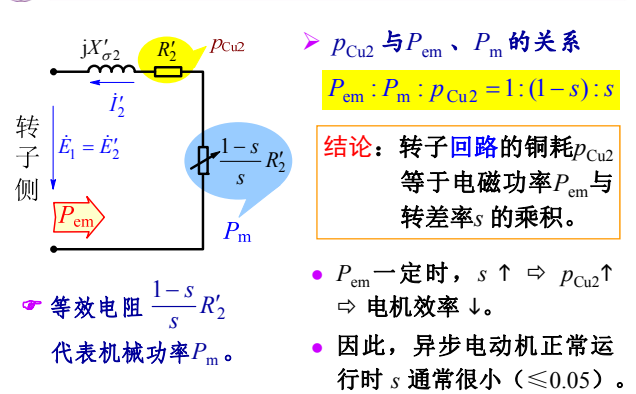
(3) 功率表达式



99



(3) 功率表达式



100



15.1 三相异步电动机的功率与转矩关系

2. 三相异步电动机的转矩关系

(1) 转矩平衡关系

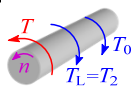
作用在转子上的 3 个转矩

- 电磁转矩 T —— 气隙磁场与转子电流相互作用产生。
- 负载转矩 T_L —— 机械负载反作用于转子的转矩，与电动机输出转矩 T_2 大小相等。
- 空载转矩 T_0 —— p_m 和 p_{ad} 引起的制动转矩。

转矩平衡方程式 (按右图的参考方向)

$$T = T_L + T_0 = T_2 + T_0$$

即：电磁转矩 T 等于输出转矩 T_2 与空载转矩 T_0 之和。



101



2. 三相异步电动机的转矩关系

(2) 转矩与功率间的关系

机械功率等于作用在旋转体上的转矩与机械角速度的乘积。

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega}, \quad T_0 = \frac{P_m + p_{ad}}{\Omega}, \quad P_m = P_2 + (p_m + p_{ad})$$

$$T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{(1-s)P_{em}}{(1-s)\Omega_1} = \frac{P_{em}}{\Omega_1}$$

$$\text{其中, } \Omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad \Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$$

结论：电磁转矩 T 等于机械功率 P_m 除以转子机械角速度 Ω ，也等于电磁功率 P_{em} 除以同步机械角速度 Ω_1 。

102



第15章 三相异步电动机的功率、转矩和运行特性

15.2 三相异步电动机的机械特性

概述

机械特性的定义

当异步电动机定子电压、频率和参数一定时，电磁转矩 T 与转子转速 n （或转差率 s ）之间的关系。

机械特性的表达式

- 用函数形式表示时，以 s (n) 为自变量，以 T 为因变量，即 $T=f(s)$ 或 $T=f(n)$ 。
- 用曲线表示时，习惯上以 T 为横坐标，以 s (n) 为纵坐标（也称 $T-s$ 曲线）。

103



15.2 三相异步电动机的机械特性

1. 电磁转矩的一般表达式

$$T = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2}{\Omega_1} = \frac{m_2 (4.44 f_1 N_2 k_{dp2} \Phi_m) I_2 \cos \varphi_2}{2\pi f_1 / p}$$

即

$$T = C_T \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$$

其中， C_T 为转矩因数，

$$C_T = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_2 N_2 k_{dp2}$$

结论：电磁转矩 T 与每极磁通量 Φ_m 和转子电流有功分量 $I_2 \cos \varphi_2$ 的乘积成正比。

104



15.2 三相异步电动机的机械特性

2. 机械特性的参数表达式

(1) 机械特性表达式

$$T = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}}{\frac{2\pi f_1}{p}}$$

由近似等效电路，得

$$\frac{I_2'}{c} = \frac{U_1}{\sqrt{(cR_1 + c^2 \frac{R_2'}{s})^2 + (cX_{\sigma 1} + c^2 X_{\sigma 2}')^2}}$$

代入上式，得 T 的参数表达式。

$$c = 1 + \frac{X_{\sigma 1}}{X_m}$$

105



(1) 机械特性表达式

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[(R_1 + c \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{\sigma 1} + c X_{\sigma 2}')^2 \right]}$$

近似认为 $c=1$ 时，有

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2]}$$

结论

- 电磁转矩 T 与定子电压 U_1 ，频率 f_1 ，转差率 s ，相数 m_1 及漏阻抗参数 $(R_1, R_2', X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}')$ 有关。
- $T \propto U_1^2$ ，说明 T 对定子电压的变化很敏感。

106



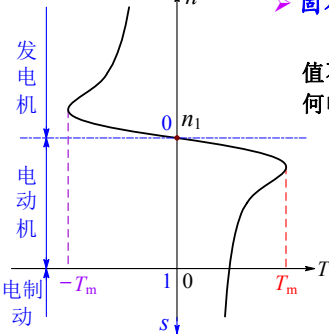
2. 机械特性的参数表达式

(2) 机械特性曲线

固有机械特性

定子电压、频率均为额定值不变，定、转子回路不串任何电路元件时的机械特性。

- 电动机状态
 $0 < n < n_1, 0 < s < 1$
- 发电机状态
 $0 < n_1 < n, s < 0$
- 电制动状态
 $n_1 > 0, n < 0, s > 1$



107



(2) 机械特性曲线

电动机的机械特性 ($0 < s < 1$)

恒转矩负载的机械特性

临界转差率 s_m

产生最大转矩 T_m 的转差率。

稳定运行问题

当 T 与负载转矩 T_L 相平衡时（忽略 T_0 ），

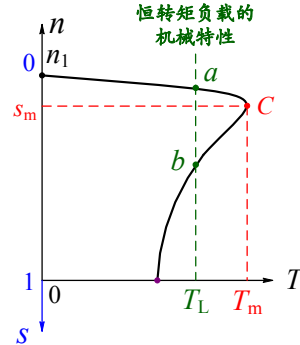
a点：稳定

b点：不稳定

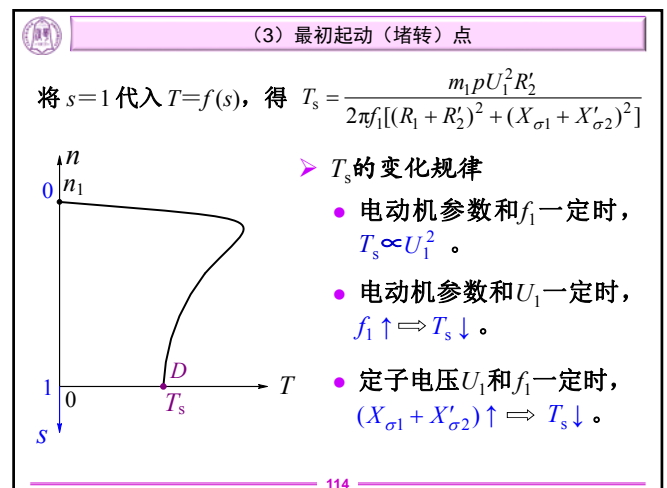
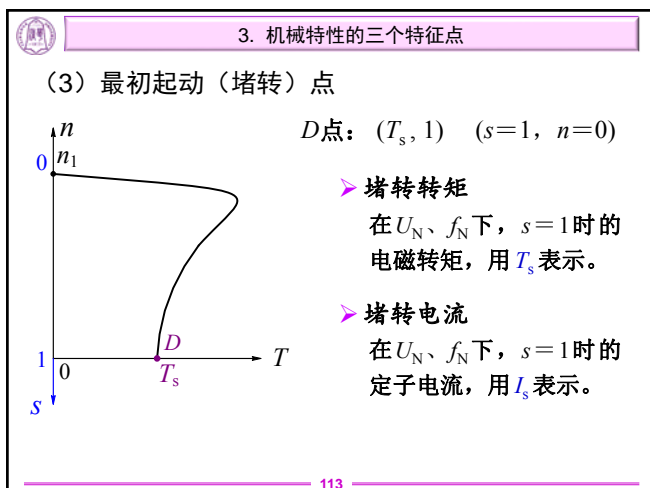
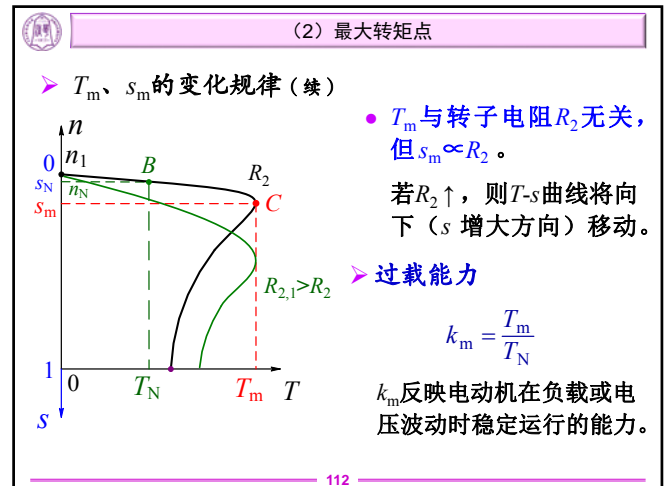
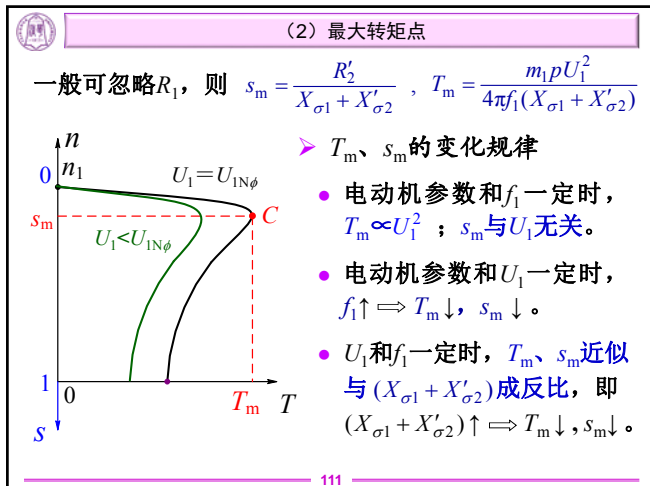
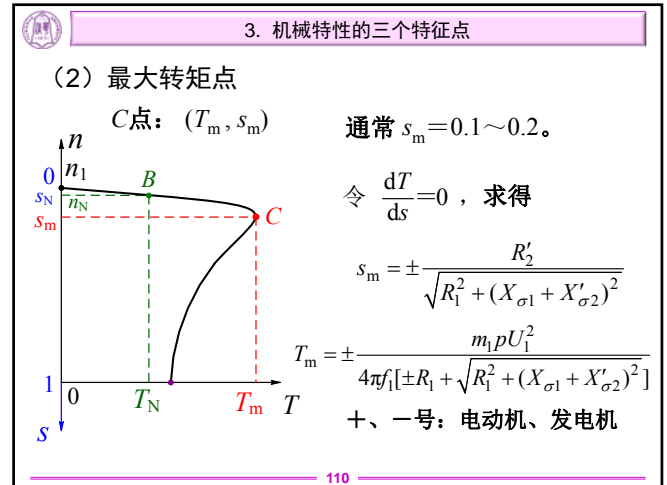
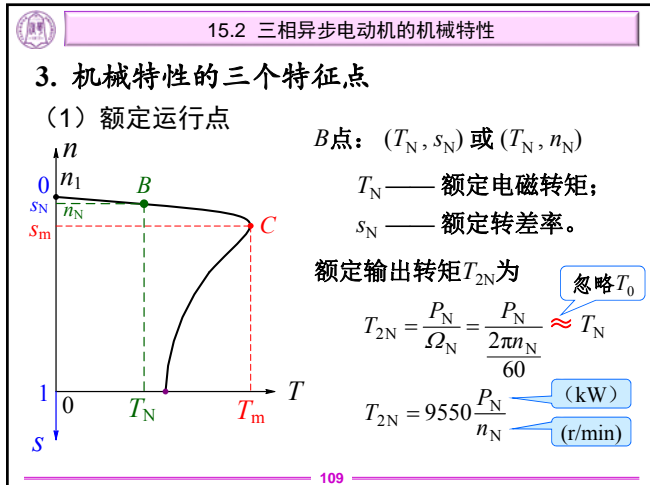
对于恒转矩负载：

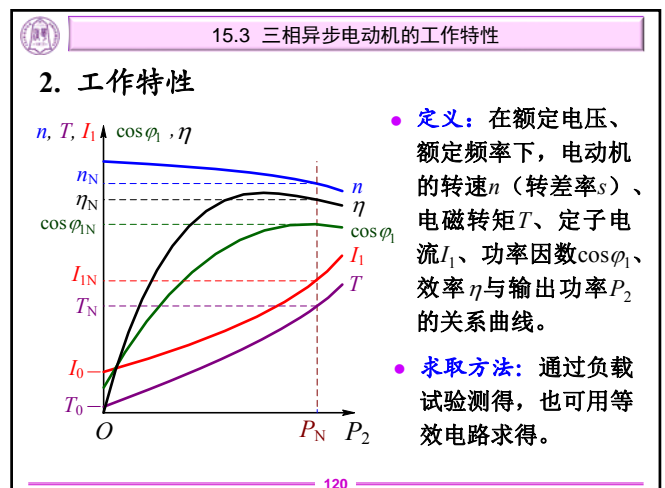
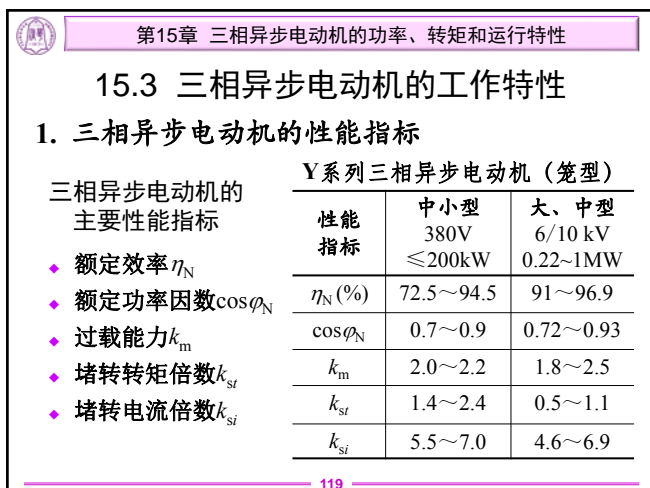
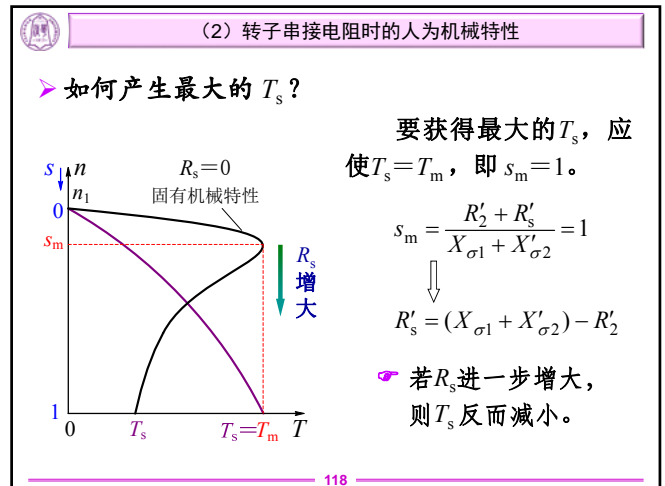
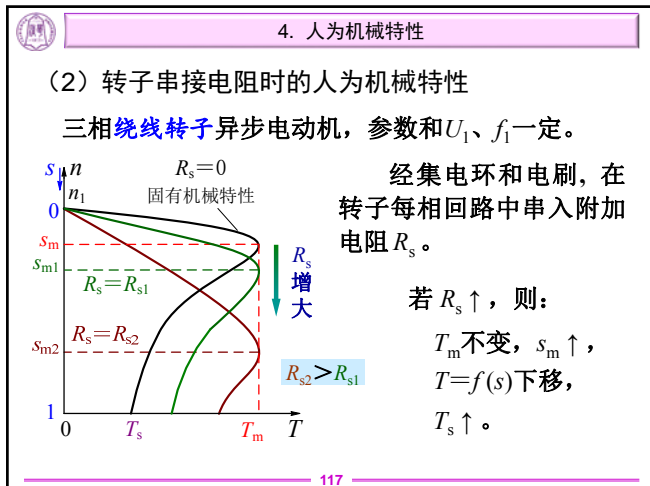
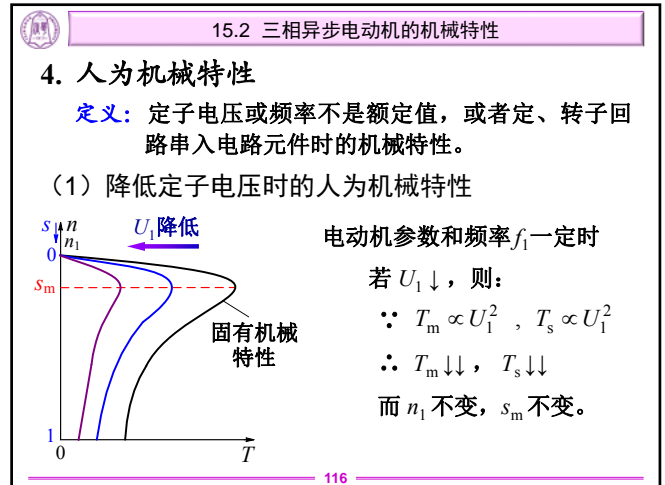
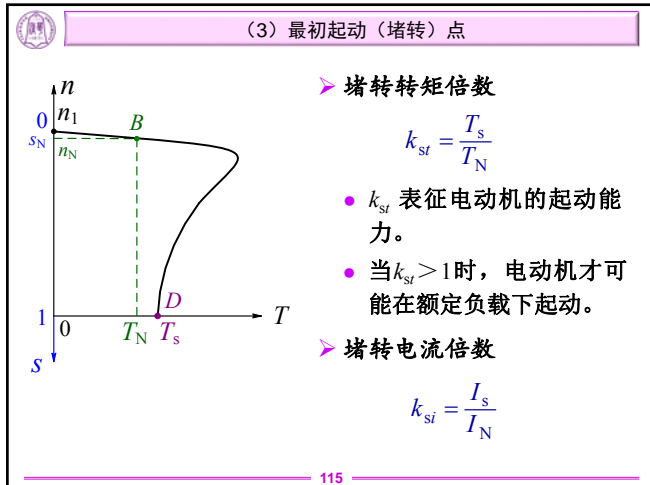
$0 < s < s_m$ 内为稳定区

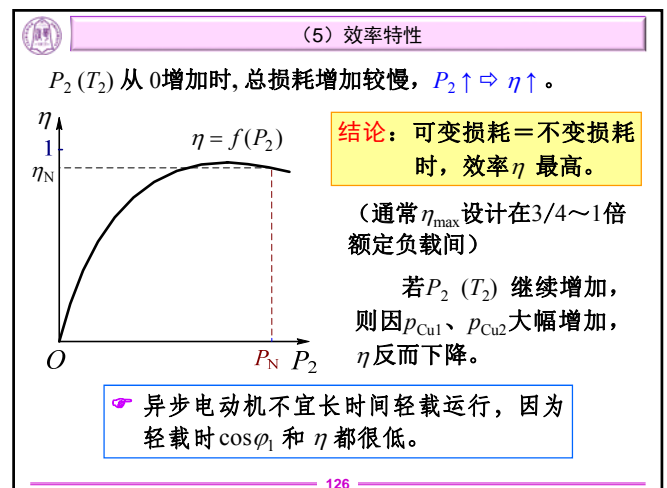
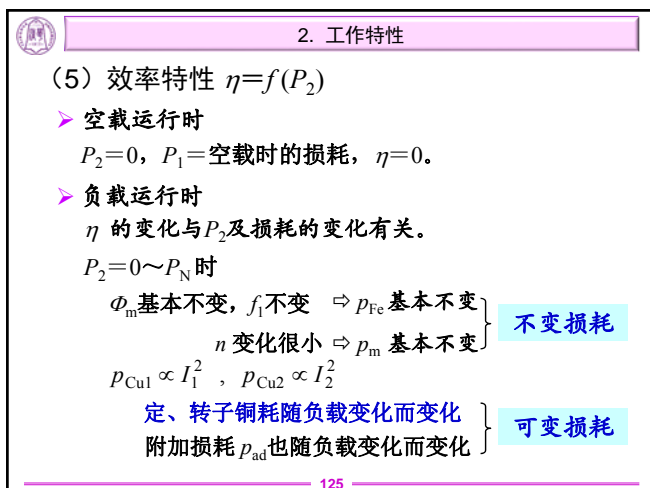
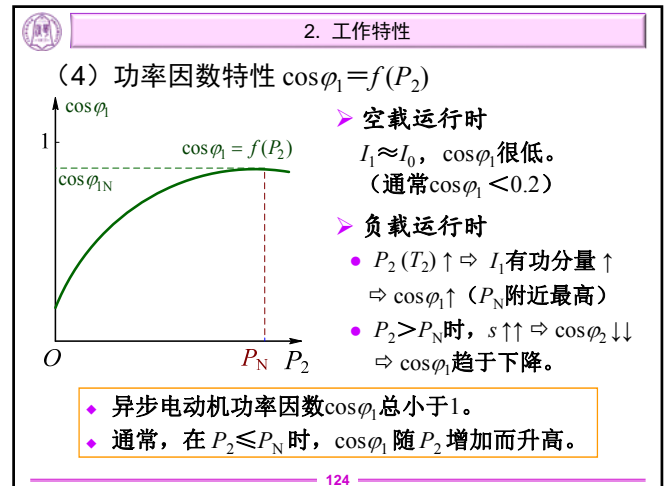
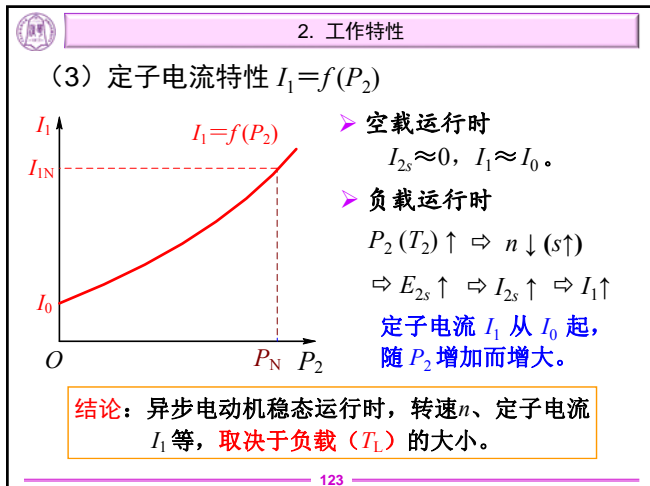
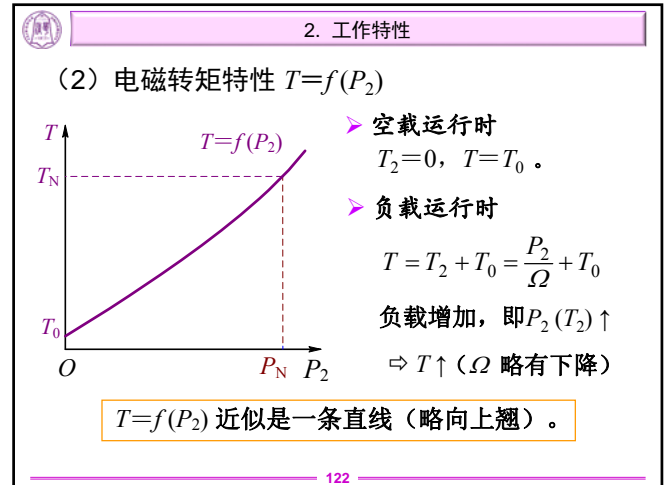
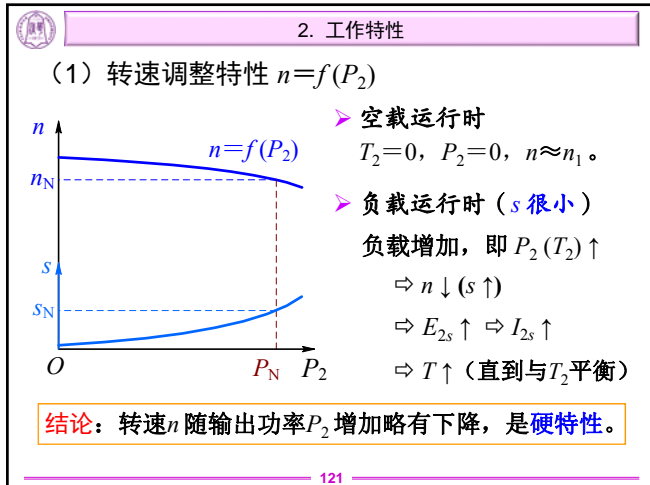
$s_m < s < 1$ 内为不稳定区



108









第15章 三相异步电动机的功率、转矩和运行特性

15.4 三相异步电动机参数的测定

通过堵转试验、空载试验，测取T型等效电路的参数。

1. 堵转试验

(1) 试验方法

- 转子绕组短路、转子卡住不转；
- 若为防止过电流，则定子三相绕组应加**低电压**；
- 测得定子的**线电压** U_k 、**线电流** I_k 、**三相输入功率** P_k （试验前需测出定子绕组电阻 R_1 ）。

分析：对于大、中型电动机，堵转试验时，

$p_m=0$ ，忽略 p_{ad} ； U_k 很低， p_{Fe} 和 I_0 可忽略。

127



1. 堵转试验

(2) 参数求取

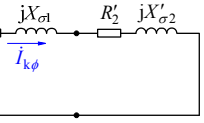
$$P_k = m_1 I_{k\phi}^2 R_1 + m_1 I_{k\phi}^2 R'_2 = m_1 I_{k\phi}^2 (R_1 + R'_2)$$

$$\text{短路阻抗 } |Z_k| = \frac{U_{k\phi}}{I_{k\phi}}$$

$$\text{短路电阻 } R_k = R_1 + R'_2 = \frac{P_k}{m_1 I_{k\phi}^2}$$

$$\text{短路电抗 } X_k = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = \sqrt{|Z_k|^2 - R_k^2}$$

对大、中型异步电动机，可认为 $X_{\sigma 1} \approx X'_{\sigma 2} \approx \frac{X_k}{2}$



$U_{k\phi}$ 、 $I_{k\phi}$ ：定子
相电压、相电流

128



15.4 三相异步电动机参数的测定

2. 空载试验

(1) 试验方法

- 电动机在 U_N 下空载运转一段时间，使 p_m 稳定；
- 改变定子电压，从 $(1.1 \sim 1.3)U_N$ 开始降低，直到转速 n 有明显变化为止；
- 测得定子的**线电压** U_0 、**线电流** I_0 、**三相输入功率** P_0 。

分析：空载试验时， I_2 、 p_{Cu2} 均很小，忽略不计。则

$$P_0 = m_1 I_{0\phi}^2 R_1 + p_{Fe} + p_m + p_{ad0}$$

$$P'_0 = P_0 - m_1 I_{0\phi}^2 R_1 = p_m + p_{Fe} + p_{ad0}$$

空载时的
附加损耗

129



2. 空载试验

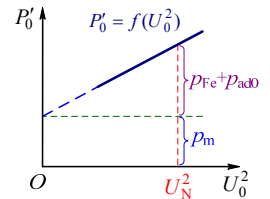
- $P'_0 = p_m + p_{Fe} + p_{ad0}$ 中 $\begin{cases} p_m = \text{const} (n \text{ 不变时}) ; \\ \text{可认为 } (p_{Fe} + p_{ad0}) \propto B_\delta^2, \end{cases}$
- 则近似的有 $(p_{Fe} + p_{ad0}) \propto U_0^2$ 。

(2) 参数求取

作曲线 $P'_0 = f(U_0^2)$ ，可
分离 p_m 和 $(p_{Fe} + p_{ad0})$ 。

$$|Z_0| = \frac{U_{0\phi}}{I_{0\phi}}, \quad R_0 = \frac{P_0 - p_m}{m_1 I_{0\phi}^2}$$

$$\text{则 } X_0 = \sqrt{|Z_0|^2 - R_0^2}, \quad X_m = X_0 - X_{\sigma 1}, \quad R_m = \frac{p_{Fe}}{m_1 I_{0\phi}^2}$$



130



第15章 三相异步电动机的功率、转矩和运行特性

小 结

- ✓ 三相异步电动机的功率平衡关系、转矩平衡关系，功率与转矩的关系，功率表达式（与T型等效电路的联系）。
- ✓ 三相异步电动机的机械特性（公式、三个特征点及其变化规律），人为机械特性（变定子电压、转子串接电阻）；电磁转矩一般表达式。
- ✓ 三相异步电动机的工作特性（负载变化时 n 、 T 、 I_1 、 $\cos\phi_1$ 、 η 等的变化情况的分析）。
- ✓ 三相异步电动机参数的测定方法。

131



第15章 三相异步电动机的功率、转矩和运行特性

小 结（续）

✓ 主要概念

电磁功率，机械功率

铁耗，铜耗，机械损耗，附加损耗

电磁转矩，额定电磁转矩

负载转矩，输出转矩，空载转矩

机械特性， $T-s$ 曲线，固有、人为机械特性

最大转矩，过载能力，临界转差率

堵转转矩，堵转转矩倍数，堵转电流倍数

空载试验，堵转试验，不变损耗，可变损耗

132



第4篇 异步电机

第16章 三相异步电动机的起动、调速和制动

▼ 学习目标

- 了解三相异步电动机全压起动存在的问题, 了解笼型异步电动机常用的降压起动方法和绕线转子异步电动机的起动方法。
- 理解三相异步电动机的主要调速方法(改变定子电压、转子串接电阻、变极、变频)的基本原理, 熟练掌握绕线转子异步电动机转子串接电阻调速的特点。

133



第16章 三相异步电动机的起动、调速和制动

16.1 三相异步电动机的起动

起动: 三相异步电动机定子施加对称电压, 转子从静止升速到稳定运行转速的过程。

1. 三相异步电动机全压起动的问题

全压起动 —— 用开关或接触器将三相异步电动机定子直接投入额定电压的电网上进行起动。

► 问题1: 堵转电流 I_s 很大 (通常 $k_{st}=5\sim7$)

$$I_s = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2}} = \frac{U_1}{|Z_k|}$$

134



1. 三相异步电动机全压起动的问题

结论: 堵转电流 I_s 的大小只取决于定、转子绕组的漏阻抗, 与负载大小无关。

I_s 大 \Rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \text{频繁起动的异步电动机发热多} \\ \text{(因此需限制每小时的起动次数)} \\ \text{使供电电压降低} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{电动机起动转矩} \downarrow \\ \text{影响同一配电变压器供电的} \\ \text{其他电动机和设备} \end{array} \right. \end{array} \right.$

► 问题2: 堵转转矩 T_s 不够大

(通常, 低压电动机 $k_{st}=1.5\sim2.5$, 高压电动机 $k_{st}<1$)

原因: $T = C_T \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$ 。堵转时, I_2 很大, 但 Φ_m 和 $\cos \varphi_2$ 都很低, 故 T_s 并不够大。

135



16.1 三相异步电动机的起动

2. 三相笼型异步电动机的降压起动

降压起动 —— 利用某些设备或采用定子绕组换接方法, 使电动机起动时定子电压低于其额定电压。

目的: $U_1 \downarrow \Rightarrow I_s \downarrow$ 。

问题: $U_1 \downarrow \Rightarrow T_s \propto U_1^2 \downarrow \downarrow$ 。

适用性: 对 T_s 要求不高的场合 (如轻载起动)。

► 常用的降压起动方法

- 电抗器起动 (定子回路串接电抗器)
- 自耦变压器起动 (用自耦变压器降压)
- 星-三角 (Y- Δ) 起动
- 软起动 (采用电力电子装置控制起动电流)

136

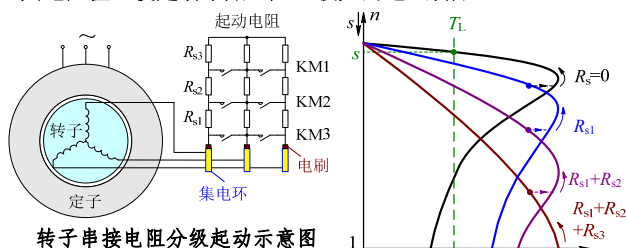


16.1 三相异步电动机的起动

3. 三相绕线转子异步电动机的起动方法

(1) 转子串接电阻起动

起动时, 在转子回路中串入变阻器; 在起动中逐渐减小其电阻值, 使起动中始终产生较大的电磁转矩。



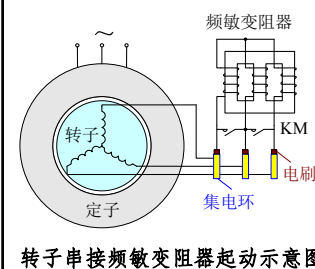
137



3. 三相绕线转子异步电动机的起动方法

(2) 转子串接频敏变阻器起动

起动时, 在转子回路中串入频敏变阻器。



- 频敏变阻器实际上是无二次绕组的三相心式变压器, 铁心由较厚的钢板或铁板制成, 磁路饱和程度高, 涡流损耗很大。
- 起动中, 频敏变阻器的铁耗及其等效电阻 R_m 随转速升高而自动减小。

138



第16章 三相异步电动机的起动、调速和制动

16.2 三相异步电动机的调速

► 调速的必要性及意义

- 满足生产工艺要求, 提高产品品质或生产效率。
- 提高运行效率, 节约电能。

► 三相异步电动机的调速方法

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

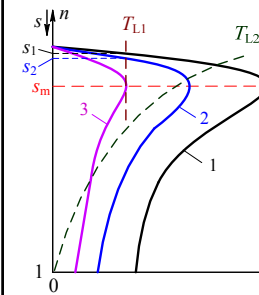
- 改变转差率 s
 - 改变 U_1 , 改变 R_2
 - 转子回路外加频率为 f_2 的电动机
- 改变同步转速 n_1
 - 改变 p —— 变极调速
 - 改变 f_1 —— 变频调速

139



16.2 三相异步电动机的调速

1. 调压调速



定子电压只能从额定值调低。

对 T - s 曲线为硬特性的电动机

- 拖动恒转矩负载 ($T_L = \text{const}$) 时, 调速范围很小; 且 T_L 越小, 调速范围也越小;
- 拖动风机类负载 ($T_L \propto n^2$) 时, 有较好的调速效果。

1—固有机械特性

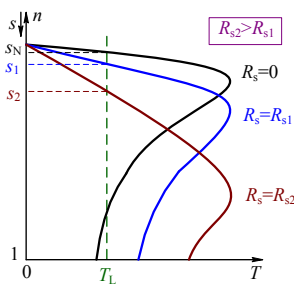
2, 3—降低 U_1 的人为机械特性

140



16.2 三相异步电动机的调速

2. 转子串接电阻调速



只用于绕线转子电动机!

当负载转矩不变 ($T_L = \text{const}$) 时:转子串接电阻 $R_s \uparrow$ $\Rightarrow s_m \uparrow, T_m$ 不变 $\Rightarrow s \uparrow, n \downarrow$

调速时效率较低, 调速范围与负载大小有关。

调速方法简单。多用于中、小功率三相绕线转子异步电动机, 拖动断续工作的生产机械。

141



2. 转子串接电阻调速

► 恒转矩负载下的关系

恒转矩负载时, $T_2 = T_L = \text{const}$ 。设 T_0 不变 (或忽略 T_0), 则 $T = \text{const}$ 。

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2]} \Rightarrow \frac{R'_2}{s} = \text{const}$$

设不串电阻时的转差率为 s_N , 每相串入电阻 R_s 时的转差率为 s

$$\frac{R'_2}{s_N} = \frac{R'_2 + R'_s}{s}$$

$$\cos \phi_2 = \text{const}$$

142



2. 转子串接电阻调速

► 恒转矩负载下的关系 (续)

$$T = \text{const} \Rightarrow P_{em} = \text{const}, \text{ 即 } P_{em} = m_1 I_2'^2 \frac{R'_2}{s} = \text{const}$$

$$\text{则 } I_2 = \text{const}$$

$$\text{于是 } E_2 = \text{const}, \Phi_m = \text{const}$$

$$\text{所以, } I_0 = \text{const}, I_1 = \text{const}$$

不计转子铁耗的变化 (即认为 $p_{Fe} = \text{const}$), 则

$$P_1 = \text{const}, \cos \phi_1 = \text{const}$$

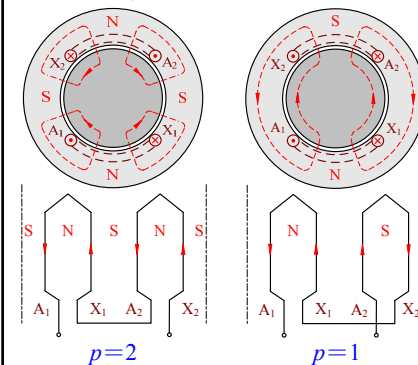
$$\text{② 什么改变了 } \left. \begin{array}{l} n \downarrow \Rightarrow P_m \downarrow, P_2 \downarrow \\ s \uparrow \Rightarrow P_{Cu2} \uparrow \end{array} \right\} \Rightarrow \eta \downarrow$$

143



16.2 三相异步电动机的调速

3. 变极调速



通常只用于笼型异步电动机

电流反向变极法

将每相绕组中一半线圈的电流反向, 使电机极对数成倍变化。

 $p=2$ $p=1$

144



16.2 三相异步电动机的调速

4. 变频调速

- 一般用于笼型异步电动机。
- 采用电力电子变流器(变频器或逆变器), 作为异步电动机的对称交流电源, 其输出电压(基波)的大小及频率均连续可调。
 - 定子频率 $f_1 \geq f_N$ 时, 保持定子电压 U_1 为额定值。
 - 定子频率 $f_1 < f_N$ 时, 需随 f_1 降低而降低 U_1 , 以保持主磁通 Φ_m 不变。

原因: $U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{dp1} \Phi_m$, 当 $N_1 k_{dp1}$ 一定时,

$$\Phi_m \propto \frac{E_1}{f_1} \approx \frac{U_1}{f_1}$$

145



16.2 三相异步电动机的调速

8 例题

一台三相、4极、50Hz的绕线转子异步电动机, 定子绕组均为Y联结, 定子加额定电压380V时, 转子绕组开路电压为190V。转子电阻 $R_2 = 0.016 \Omega$, 漏电抗 $X_{\sigma 2} = 0.6 \Omega$ 。该电动机拖动恒转矩额定负载运行时, 转速为1470 r/min, 定子电流为50A。不计励磁电流。

(1) 求电动机额定运行时的电磁转矩。

(2) 若负载转矩不变, 不计空载转矩 T_0 , 在转子回路串入电阻将转速降至1125 r/min, 求转子每相应串入的电阻为多大? 此时转子绕组相电动势为多大? 与额定运行时相比, 定子电流、输入功率是否变化?

146



16.2 三相异步电动机的调速

解:

(1) 根据已知条件(转子参数和电流), 可考虑用 $T = P_{em} / \Omega_1$ 求解。

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r/min}$$

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0.02$$

$$k_e = k_i = \frac{U_N / \sqrt{3}}{190 / \sqrt{3}} = \frac{380 / \sqrt{3}}{190 / \sqrt{3}} = 2$$

$$R'_2 = k_e k_i R_2 = 2 \times 2 \times 0.016 = 0.064 \Omega$$

因忽略 I_0 , 则额定运行时, $I_1 = I'_2 = 50 \text{ A}$ 。

147



16.2 三相异步电动机的调速

解: (续)

$$P_{em} = m_1 I_2'^2 \frac{R'_2}{s_N} = 3 \times 50^2 \times \frac{0.064}{0.02} = 24000 \text{ W}$$

$$\text{或 } P_{em} = m_2 I_2'^2 \frac{R_2}{s_N} = m_2 (k_i I_1)^2 \frac{R_2}{s_N} = 3 \times (2 \times 50)^2 \times \frac{0.016}{0.02} = 24000 \text{ W}$$

$$\text{则 } T = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{p P_{em}}{2 \pi f_1} = \frac{2 \times 24000}{2 \pi \times 50} = 152.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 转子串入电阻 R_s , 使 $n = 1125 \text{ r/min}$ 时

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1125}{1500} = 0.25$$

因忽略 T_0 , T_L 不变, 所以 T 不变。因此,

148



16.2 三相异步电动机的调速

解: (续)

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

$$\text{则 } R_s = \left(\frac{s}{s_N} - 1 \right) R_2 = \left(\frac{0.25}{0.02} - 1 \right) \times 0.016 = 0.184 \Omega$$

$$E_2 = I_2 \sqrt{\left(\frac{R_2 + R_s}{s} \right)^2 + X_{\sigma 2}^2} = k_i I_1 \sqrt{\left(\frac{R_2}{s_N} \right)^2 + X_{\sigma 2}^2}$$

$$= 2 \times 50 \times \sqrt{\left(\frac{0.016}{0.02} \right)^2 + 0.6^2} = 100 \text{ V}$$

$$E_{2s} = s E_2 = 0.25 \times 100 = 25 \text{ V}$$

此时, P_{em} 不变, I_1 、 I_2 均不变, P_1 不变(不计 I_0 及 p_{Fe})。

149



第16章 三相异步电动机的起动、调速和制动

小 结

- ✓ 三相笼型异步电动机的起动方法。
(全压起动、降压起动方法)
- ✓ 三相绕线转子异步电动机的起动方法。
- ✓ 三相异步电动机的调速方法。
(变转差率, 变同步转速)
- ✓ 三相绕线转子异步电动机转子串接电阻调速。
- ✓ 主要概念
全压起动, 降压起动
变极调速, 变频调速

150



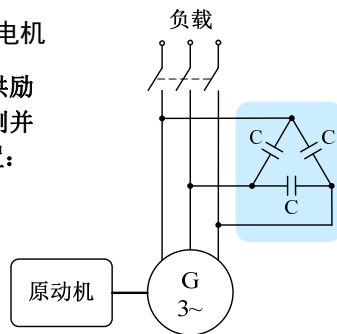
第4篇 异步电机

三相异步发电机简介

■ 独立运行的异步发电机

为了给发电机提供励磁电流, 需在其定子侧并联电感性无功发生装置:

- ◆ 电容器
- ◆ 电力电子变流器



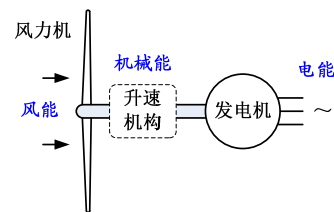
151



三相异步发电机简介

■ 并联运行的异步发电机

异步发电机的典型应用
——风力发电



风力发电能量转换示意图

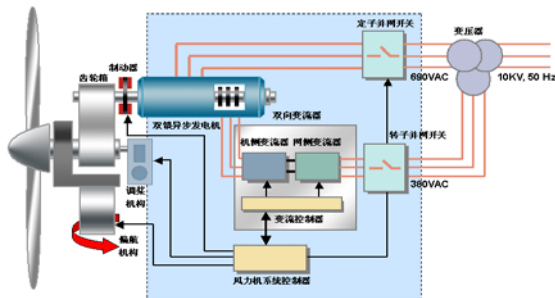


152



三相异步发电机简介

典型双馈异步风力发电系统的组成



双馈——参见思考题14-15 (3)

153



第4篇 异步电机

总结

1. 三相异步电机的结构特点 (笼型、绕线转子), 三相异步电动机的额定值。
2. 三相异步电机的工作原理, 用转差率表示异步电机的三种运行状态。
3. 三相异步电机的电磁关系 (定、转子基波磁动势的相对静止, 转子量与转速或转差率的关系, 等)。
4. 频率折合、绕组折合 (原则与方法、折合关系)。

154



第4篇 异步电机

总结 (续)

5. 三相异步电机的T型等效电路。
6. 三相异步电动机的功率平衡关系 (包括 P_{em} 、 P_m 、 p_{Cu2} 之间的关系), 转矩平衡关系, 转矩与功率的关系, 功率的表达式 (结合T型等效电路)。
7. 三相异步电动机的机械特性, 其特征点 (T_m 、 T_s) 与电压、频率、参数等的关系 (\rightarrow 人为机械特性)。
8. 异步电动机的主要起动方法和调速方法, 三相绕线转子异步电动机转子串接电阻调速时的关系。

155



第4篇 异步电机

总结 (续)

9. 运用电磁转矩一般表达式 ($T = C_T \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$)、机械特性、等效电路等, 定性分析三相异步电动机运行条件变化时有关物理量的变化趋势 (如: 工作特性)。
10. 与以上内容相关的主要概念。

156