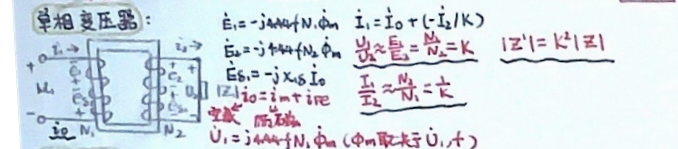


1.  $P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3} U_P I_P \cos\varphi$  (交流, 直流无 $\cos\varphi$ );  $S_N = \sqrt{3} U_L I_L = 3 U_P I_P$
2. 保留四位有效数字
3. 公式 and 代入过程要写
4. 检查单位
5. 功率因数是 $\cos\varphi$ , 不是 $\varphi$
6. 机械特性硬 $\rightarrow K$ 小, 越值准
7. 单位转换
8. 线电压 VS 相电压 (三相交流)
9. 计算 P 有 $\sqrt{3}$ ?

**变压器** 实现电能在不同电压等级间转换, 心式, 壳式  
**工作原理:** 电磁感应, 两绕组间只有磁通, 没有电联  
 S7-500/10: S 型号, 7 设计序号, 500 容量 (KV·A), 10 高压侧电压 (KV)  
 $U_{1N}, U_{2N}$  (线电压),  $2 \rightarrow$  空载时的绕组电压  
 $S_N$ : 单相  $\rightarrow S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$  三相  $\rightarrow S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$  (KV·A)

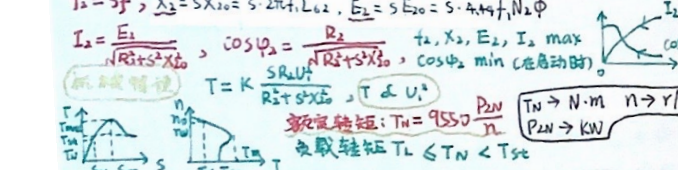


**运行特性:**  
 $\Delta U\% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\%$  (外特性) 电压变化率  
 $U_{2N}$  为负载二次侧端电压  $U_2$  为一次侧空载时端电压  
 $P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1$   $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$   $P_1 - P_2 = \Delta P = P_{cu} + P_{fe}$  可变 不变  $P_{cu} = P_{fe}$  时,  $\eta_{max}$   
 $\eta = (1 - \frac{\Delta P}{P_2}) \times 100\% = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$   $\beta = I_2 / I_{2N}$  (负载特性)

**三相变压器:** 三相之间, 只有电联, 没有磁联  
 电压互感器: 副边接地且不能短路  
 电流互感器:  $\sim$ , 正负极接线短接

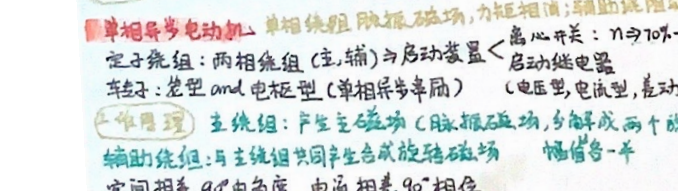
**三相异步电动机** 定子通三相电形成旋转磁场, 转子切割磁感线, 产生感应电动势  
 定子:  $\Delta, Y \rightarrow$  接电源; 转: 鼠笼, 绕线, 变频调速  
 感应电动势方向: 右手(四指); 安培力: 左手(大拇指)  
 旋转磁场同步转速:  $n_0 = 60 f / p$  ( $n_0$ : r/min,  $f$ : 电源频率 Hz)  
 转差率:  $s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\%$   $n$  转子转速  
 Y132S-2: Y 接法 132 机座号 S 代号 2: 2 对磁极 ( $p=1$ )  
 $P_N$ : 轴功率,  $U_N, I_N$ : 额定电压, 额定电流,  $\cos\varphi \rightarrow UI$  或  $P$

**等效电路:** 转子绕组短路运行  $P_{1T} \times \sqrt{3}$   
 $U_1 \times E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \rightarrow U_1$  定子电压,  $\Phi$  为旋转磁场内每极磁通  
 $f_1 = 50$ ,  $\lambda_2 = S X_{20} = S \cdot 2\pi f_1 L_{20}$ ,  $E_2 = S E_{20} = S \cdot 4.44 f_1 N_2 \Phi$   
 $I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + S^2 X_{20}^2}}$ ,  $\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + S^2 X_{20}^2}}$ ,  $\cos\varphi_2 \min$  (在启动时)  
 $T = K \frac{S R_2 U_1^2}{R_2^2 + S^2 X_{20}^2} = T \propto U_1^2$   $T_N \rightarrow N \cdot m$   $n \rightarrow r/min$   
 额定转矩:  $T_N = 9550 \frac{P_N}{n}$   $P_N \rightarrow KW$   
 负载转矩  $T_L \leq T_N < T_{st}$



**运行速度:**  $T_L \rightarrow n \rightarrow T_1$ ? 拖 / 不拖  $T_{st} = K \frac{U_1^2}{R_2^2 + X_{20}^2}$   
**启动:** 启动电流大  $\rightarrow T_{st} > T_N$   $I_{st} < I'$   
 1. 直接 2. Y- $\Delta$  接法:  $U_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{\Delta}$ ,  $I_Y = \frac{1}{3} I_{\Delta}$ ,  $T_Y = \frac{1}{3} T_{\Delta}$  空载, 轻载  
 3. 自耦降压: 线路  $I_{st} = K^2 I_{st}$ ,  $T_{st} = K^2 T_{st}$  大功率 卡车电阻: 大  $T_{st}$   
**调速:**  $n = (1-s) 60 f / p$   
 1. 变频 (无级, 范围大) 2. 变频调速 (绕线式, 起重设备) 3. 变频 (有级)  
**制动:** 1. 能耗 (需直流电) 2. 反接 (防反转, 速度差) 3. 发电回馈 ( $n > n_0$ )

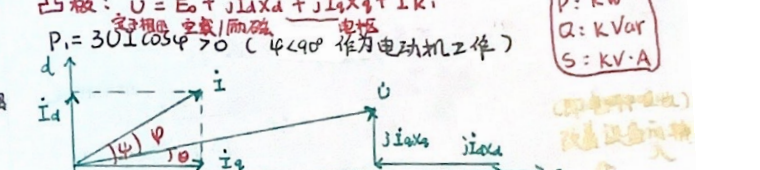
**单相异步电动机** 单相绕组脉振磁场, 力矩相消; 辅助绕组通初相  
 定子绕组: 两相绕组 (主, 辅)  $\rightarrow$  启动装置 < 离心开关:  $n \rightarrow 10\% - 50\% n_N$   
 转子: 笼型 and 电容型 (单相异步电动机) (电压型, 电流型, 差动型)  
**工作原理:** 主绕组: 产生主磁场 (脉振磁场, 分解成两个旋转磁场)  
 辅助绕组: 与主绕组共同产生合成旋转磁场 幅值一半  
 空间相差  $90^\circ$  电角度, 电流相差  $90^\circ$  相位



**同步电动机** 定子外接三相电形成旋转磁场, 转子形成恒定磁场  
 不能自启动, 转矩控制困难; 功率因数高,  $\cos\varphi$  可调, 体积小  
 定子三相异步, 转子: 凸极式, 隐极式 (有励磁绕组式)  
 凸极式通励磁后, 相邻磁极 N/S 交替排列 ( $p=6$ )  
 TD 260/120-12 T 同步电动机 260 轴径 120 长度 12 极数  
 $U_N, I_N$ : 定子端电压, 定子电流  $\sim$  转子  $n = n_0$  (同步)  $= \frac{60 f}{p}$

$\Delta$ :  $U_p = U_L$ ,  $I_p = \frac{P}{U_L}$  }  $P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi = 3 U_p I_p \cos\varphi$   
 $Y$ :  $I_p = I_L$ ,  $U_p = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$

**转子:** 励磁  $\rightarrow f$ ; 空载  $\rightarrow 0$  纵/直  $\rightarrow d$   
**定子:** 电枢  $\rightarrow a$  横/交  $\rightarrow q$   
 空载: 通  $I_f$ ,  $T = 0 \rightarrow F$  定子切割  $\Phi \rightarrow$  产生  $E_o$   
 $F$  在  $d$  轴上,  $E_o$  在  $q$  轴上  
 负载后, 产生不在  $d$  轴上的  $F_a = F_{ad} + F_{aq}$  (双反应原理)  
 $F_a = \frac{1}{2} \frac{U}{\omega} \frac{I}{P}$ ,  $I = I_d + I_q$



**功率因数角  $\varphi$ :**  $\dot{U}, \dot{I}$  (滞后/超前关系写错)  
**功率角  $\theta$  (功角):**  $\dot{E}_o, \dot{U}$   
**内功率因数角  $\psi$ :**  $\dot{E}_o, \dot{I}$   $I_d = I \sin\psi$ ,  $I_q = I \cos\psi$

**隐极式:**  $X_q = X_d = X_c$  (气隙均匀)  
 $\dot{U} = \dot{E}_o + j I X_c + I R$   
 $\dot{U} = \dot{E}_o + j I (R + j X_c)$  同步阻抗

**功率关系方程和转矩方程**  $U, I$  均为相电  $\sim$   
 $P_t = I_f^2 R_f$  (直流电源损耗)  
 $P_{cu} = 3 I_a^2 R$ ,  $P_1 = 3 U I \cos\varphi$  (电网吸收有功 P)  
**电磁功率:**  $P_{em} = P_1 - P_{cu}$  机械摩擦  
**机械输出:**  $P_2 = P_{em} - P_o$   $P_o = P_{fe} + P_m$

(忽略  $R$ )  $\rightarrow P_{em} = P_1 \rightarrow P_{em} = 3 \frac{E_o U}{X_d} \sin\theta + \frac{3 U^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin 2\theta$   
 $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$   $n \rightarrow r/min$ ,  $\Omega \rightarrow rad/s$   $T_{em} = P_{em} / \Omega$   $T_2 = T_{em} - T_o$   
**功角特性**  $P_{em} =$  励磁功率 + 凸极电磁功率  
 (忽略  $R$ )  $\rightarrow$  隐极  $P_{em} = 3 \frac{E_o U}{X_c} \sin\theta$   $\rightarrow$  凸极

$T_{em} = P_{em} / \Omega$ , 隐极:  $T_{em} = 3 \frac{E_o U}{X_c \Omega} \sin\theta$   $\rightarrow$  隐极  
 隐极稳定区:  $0^\circ \sim 90^\circ$ , 不稳区:  $90^\circ \sim 180^\circ$   
**过载倍数:**  $K_T = T_m / T_N \approx \sin 90^\circ / \sin\theta_N$

**功率因数调节**  $U, f, P$  不变, 通过改变  $I_f$  影响  $\cos\varphi$   
 $\rightarrow I_f \uparrow \rightarrow E_o \uparrow$ ;  $I \cos\varphi =$  常数  $I_f < I_{f0}$  欠,  $I_f > I_{f0}$  过  
 $I \cos\varphi = C \frac{E_o}{E_o - U}$   $E_o = U + I R + j I X_c$   
 $\rightarrow P_2 \uparrow \rightarrow I \uparrow$   $\rightarrow I_{in}$  时,  $\cos\varphi = 1$

**启动:** ① 变频启动 (定子电流  $f$  从小到大)  
 ② 异步启动 (励磁绕组通过电阻短接)  $\rightarrow$  转子凸极  $\cos\varphi$   
**励磁:** ① 永磁式: 永久磁钢, 不能自启动 大容量 恒速运行,  $I_f, n$   
 ② 反应式: 软磁体, 不能自启动 (只能用于异步启动)  $\rightarrow$  启动性能  
 ③ 磁滞式: 硬磁, 无预磁充  $S = 90^\circ, T_{em} = 0$   
 ④ 磁滞式: 有预磁充, 有极大  $T_{st}$ , 可自启动, 用于启动元件,  $\eta, \cos\varphi$  低  
 $S = 0^\circ, T_{em} = 0$   $S = 180^\circ, T_{em} = 0$

**调速:** 变频, 降压:  $\rightarrow$  串电抗器 ( $n_N$  往下)  $\rightarrow$  定子绕组抽头 (台扇, 落地扇)



## 直流电动机 定子形成固定磁极, 转子通 $I_a$ 受下

电枢绕组中的电流是交变的, 感应电动势  $E$  也是交变的  
受到电磁转矩  $T$  的方向是不变的

励磁绕组 + 主磁极铁心  $\Rightarrow$  固定磁极

变向: ① 改变励磁电流方向 ② 改变电枢电流方向

$U_N, I_N$ : 电枢绕组上输入的电

$$= \frac{2\pi}{60} I_N n_N$$

$P_N$ : 轴上输出的机械功率  $\Rightarrow P_N = U_N I_N \eta = T_N \omega_N$

定子  $\Rightarrow$  励磁  $\Rightarrow$  +, 转子  $\Rightarrow$  电枢  $\Rightarrow$  a

基本方程式 先通  $I_f$ , 再通  $I_a$ , 转子切割主磁场

在电枢绕组中产生反电动势  $E$ 。每极生成磁

$$U = I_a R_a + E_a \quad E_a = C_e \phi n \quad E_a \Rightarrow V \quad n \Rightarrow r/min$$

$$T = T_2 + T_0 \rightarrow \text{空载 } T = C_T \phi I_a \quad \phi \Rightarrow Wb \text{ (与电动机结构相关, 每极磁通)}$$

$C_e \Rightarrow$  电动势常数  
 $C_T \Rightarrow$  转矩常数

$$T \Rightarrow N \cdot m \quad I_a \Rightarrow A$$

$$\frac{U I_a}{P_i} = \frac{I_a^2 R_a}{P_{cu}} + \frac{E_a I_a}{P_m} \Rightarrow P_m = E_a I_a = C_e \phi n I_a = T \omega$$

$$C_T / C_e = 60 / 2\pi \approx 9.55 \quad \omega \Rightarrow rad/s$$

$$P_i = P_{cu} + P_m \Rightarrow P_m = P_i - P_{cu} \rightarrow P_0 = P_{Fe} + P_{me} + P_{ad}$$

$$P_i = P_2 + \Sigma P \quad T \omega = T_2 \omega_2 + T_0 \omega \quad \eta = P_2 / P_i \times 100\%$$

机械特性  $U_a, I_a, I_f$  不变,  $n$  与  $T$  的关系

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \phi} \Rightarrow n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_a}{C_e \phi^2} T = n_0 - \beta T$$

$$R = R_a + R_2 \text{ (外接)} \quad \text{理想空载转速 } n_0 = \frac{U}{C_e \phi}$$

$$\beta = \frac{R}{C_e C_T \phi^2} \quad (\beta \uparrow \text{ 机械特性越软})$$

固有机械特性:  $R = R_a$  (无  $R_2$ )

$$\text{额定转速变化率: } \Delta n_N = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\%$$

人为机械特性:  $R \uparrow \Rightarrow n_0$  不变,  $\beta \uparrow \Rightarrow$  硬度  $\downarrow$

$U \downarrow \Rightarrow n_0 \downarrow, \beta$  不变, 同  $T$  下  $n \downarrow$

$R_f \uparrow \Rightarrow I_f \downarrow \Rightarrow \phi \downarrow \Rightarrow n_0 \uparrow, \beta \uparrow$

启动 ① 直接启动 (微型) ② 无级启动 (大功率)

$$n=0 \Rightarrow E_a=0 \quad I_{scm} = \frac{U_N}{R_a + R_2}$$

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{U}{R_a} \quad R_N = U_N / I_{scm} - R_a$$

③ 有级启动

$$I_{s1} = (1.5 \sim 2.0) I_N \quad R_{sm} = R_a + R_1 + \dots + R_m$$

$$I_{s2} = (1.1 \sim 1.2) I_N \quad \beta = \frac{R_{sm}}{R_{sm} - U} = \frac{R_1}{R_a}$$

$$I_{s1} = \frac{U_N}{R_a + R_1 + R_2 + R_3} \quad \beta > 1$$

$$I_{s2} = \frac{U_N - E_a}{R_a + R_1 + R_2 + R_3} \quad \beta = \frac{m R_m}{R_a}$$

$$I_{s2} = \frac{U_N - E_a}{R_a + R_1 + R_2} \quad r_1 = (C_e \beta - 1) R_a$$

$$I_{s2} = \frac{U_N - E_a}{R_a + R_1 + R_2} \quad r_2 = (C_e \beta - 1) R_a$$

$$I_{s2} = \frac{U_N - E_a}{R_a + R_1 + R_2} \quad r_3 = (C_e \beta - 1) R_a$$

$$R_m = \frac{U_N}{I_{scm}}$$

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R}{C_e C_T \phi^2} T \quad \text{验证 } I_2$$

降低  $U$  (只能从  $n_N$  往下调) (无级, 要求高)

串电阻  $R_2$  (只能从  $n_N$  往下调) (有级)

弱磁  $\phi$  ( $\phi$  只能从  $\phi_N$  往下调,  $n_N$  只能从  $n_N$  往上调)  $\Rightarrow$  恒功率调速

能耗制动:  $I_a = -\frac{E_a}{R_a + R_b}$

反接制动:  $I_a = -\frac{U + E_a}{R_a + R_b}$

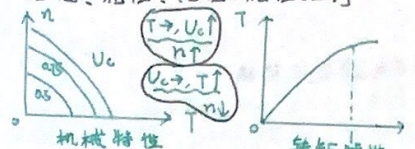
回馈制动:  $I_a = (U_N - E_a) / R_a \leq 0$

电车上坡  $n < n_N$  (不能用于快速停车)

## 何用电动机 特性曲线 磁电线性, 控制

交流 定子: 励磁绕组 + 控制绕组

幅值、相位、幅值-相位控制



- 运行范围宽 (调速)
  - 无自转现象
  - 可使  $S_0 > 1$
- 更大  $T_{sc}$   
特性接近线性

直流 用  $U_a$  控制  $n$

$$\text{电枢回路: } U_a = E_a + I_a R_a \quad n = \frac{U_a - R_a I_a}{K_e} \Rightarrow K_e$$

$$E_a = C_e \phi n = K_e n \quad n = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_e K_t} T_{em}$$

$$T_{em} = C_T \phi I_a = K_t I_a \quad n = n_0 - K T_{em}$$

$$n_0 = U_a / K_e \quad E_a = 0 \text{ 堵转时 } n=0 \quad E_a=0$$

$$T_d = U_a K_t / R_a \quad K_t \Rightarrow \text{单位电枢电流产生的转矩}$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$

$$K = R_a / K_e K_t = n_0 / T_d \quad \text{在国际单位制下, } K_t = K_e$$