



电机与拖动**课件**之六

异步电机 拖动

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



章节目录

5.1 三相异步电动机的机械特性

5.2 三相异步电动机的起动

5.3 三相异步电动机的制动

5.4 三相异步电动机的调速

- 起动指电动机接通电源后由静止状态加速到稳定运行状态的过程。对电动机的起动性能要求二：起
动电流小，起动转矩大。

1、起动电流大的原因

起动时, $n = 0, s = 1$, 定子旋转磁场与转子相对切割速度很大, 转子频率大, 转子感应电动势大, 使转子电流大, 根据磁动势平衡关系, 定子电流必然增大。

2、起动转矩不大的原因

从下述公式分析 $T_{st} = T_{em} = C_T \Phi_0 I_2' \cos \varphi_2$

- 起动时, $s = 1$, 远大于运行时的 s , 转子漏抗 $X_{2s} = sX_2$ 很大, $\cos \varphi_2$ 很低, 尽管 I_2 很大, 但 $I_2 \cos \varphi_2$ 并不大。

由于起动电流大, 定子漏阻抗压降大, 使定子感应电动势减小, 对应的气隙磁通减小。

- 由上述两个原因使得起动转矩不大。



一、直接起动

异步电动机的功率低于7.5kW时允许直接起动。如果功率大于7.5kW，而电源总容量较大，符合下式要求者，电动机也可允许直接起动。

$$K_1 = \frac{I_{st}}{I_N} \leq \frac{1}{4} \left[3 + \frac{\text{电源总容量 (kV} \cdot \text{A)}}{\text{起动电动机容量 (kV} \cdot \text{A)}} \right]$$

二、降压起动

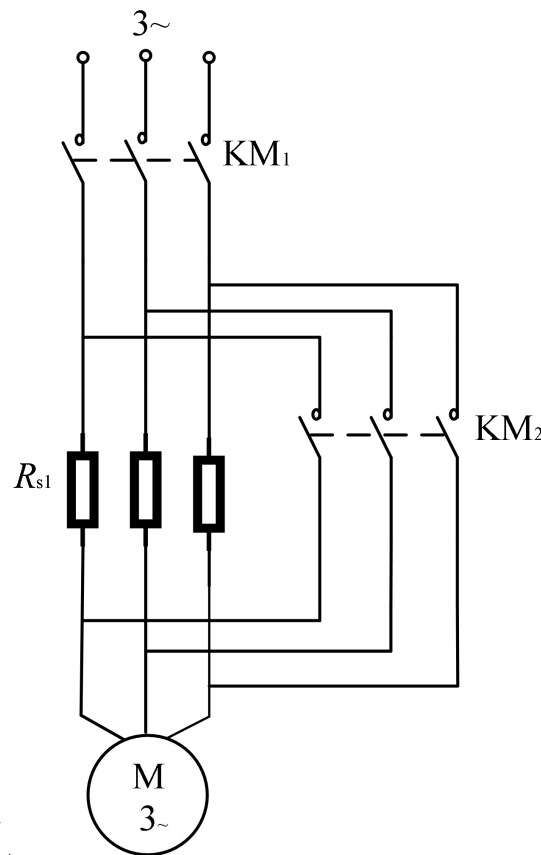
1、定子串电阻或串电抗降压起动

设电动机在全压起动时的起动电流为 I_{st} ，起动转矩为 T_{st} 。

当电动机定子串入电阻后， $U_1 = KU_N (K < 1)$ ，起动电流 I_{stR} 和起动转矩 T_{stR} 为：

$$\begin{aligned} I_{stR} &= \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \\ &= \frac{KU_N}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = KI_{st} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{stR} &= \frac{3pU_1^2 R'_2}{2\pi f_1 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]} \\ &= \frac{3p(KU_N)^2 R'_2}{2\pi f_1 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]} = K^2 T_{st} \end{aligned}$$



定子串电阻（电抗）起动时，起动电流下降到 KI_{st} ，起动转矩下降到了 K^2T_{st} ，该方法适用于轻载起动。

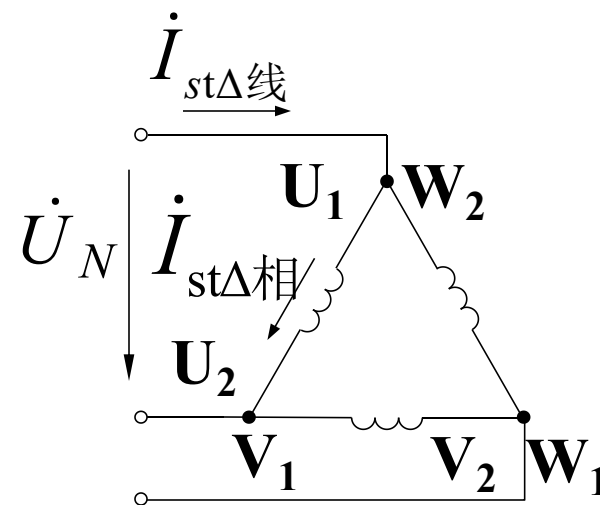
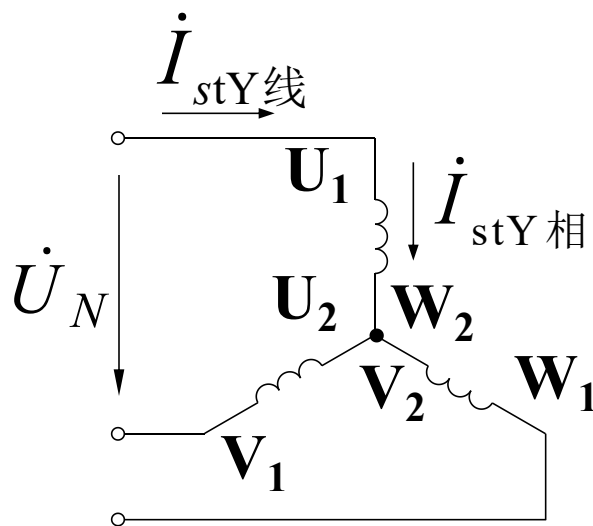
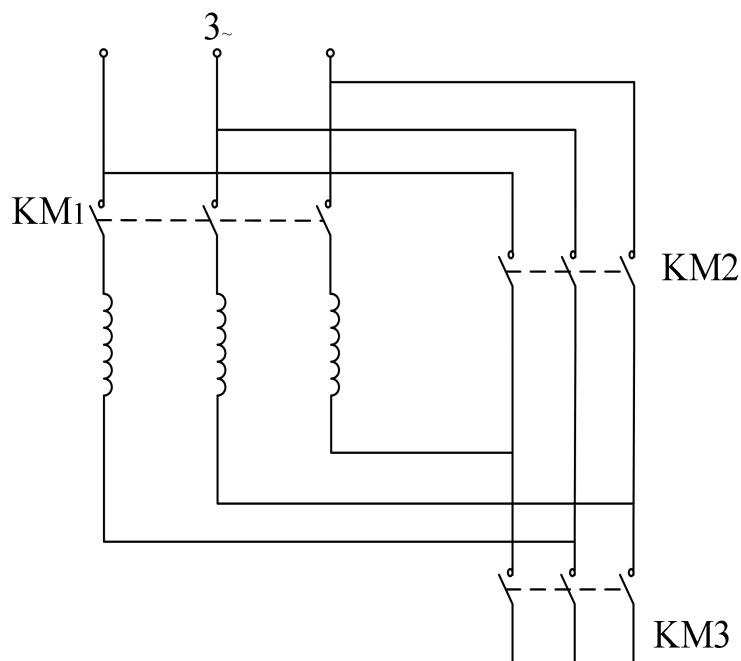


二、降压起动

2、Y— Δ 起动

适用场合：正常运行时定子绕组为三角形联结的异步电动机。

- (1) 起动时，接触器触点 KM_1 和 KM_3 闭合， KM_2 断开，电动机定子绕组接成Y。
- (2) 待转速升高到一定程度后，接触器触点 KM_3 断开， KM_2 闭合，定子绕组改接成 Δ ，电动机进入正常运行状态。

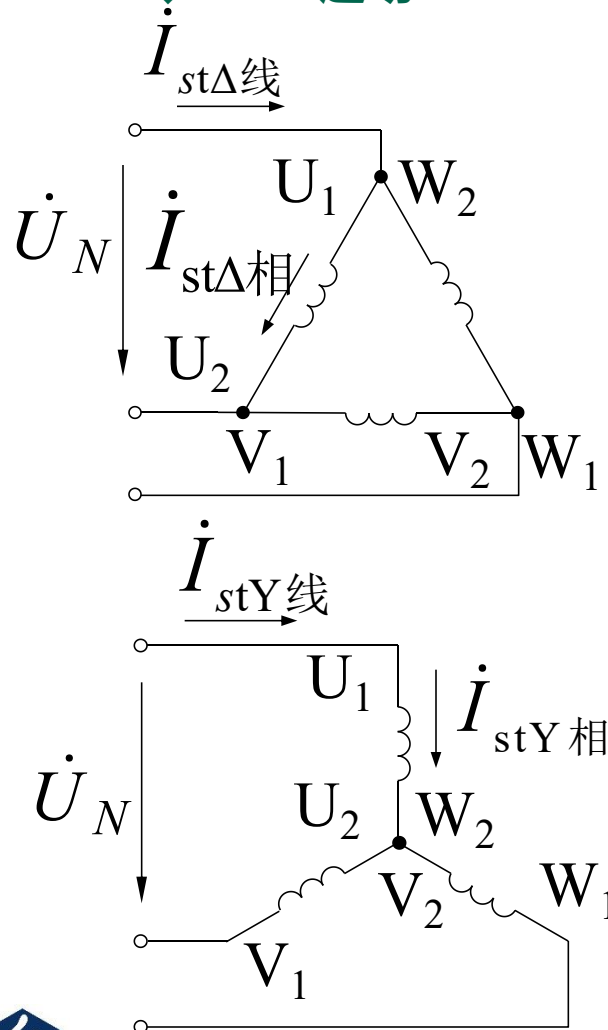


5.2 三相异步电动机的启动

5.2.1 三相笼型异步电动机的启动

二、降压启动

2、Y—Δ启动



$$\dot{I}_{st} = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

$$T_{st} = \frac{3pU_1^2 R'_2}{2\pi f_1 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

$$\frac{I_{stY\text{相}}}{I_{st\Delta\text{相}}} = \frac{U_N / \sqrt{3}}{U_N} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\frac{I_{stY\text{线}}}{I_{st\Delta\text{线}}} = \frac{I_{stY\text{相}}}{\sqrt{3} I_{st\Delta\text{相}}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{T_{stY}}{T_{st\Delta}} = \left(\frac{U_{Y\text{相}}}{U_{\Delta\text{相}}} \right)^2 = \left(\frac{U_N / \sqrt{3}}{U_N} \right)^2 = \frac{1}{3}$$

优点

启动启动电流小、设备简单、体积小、重量轻、价格便宜、维修方便。

适用场景

启动转矩减小为直接启动转矩的1/3，所以只适用于**空载或轻载启动**。

电机要求

正常运行时，定子绕组为Δ联结；定子绕组必须引出六个出线端。

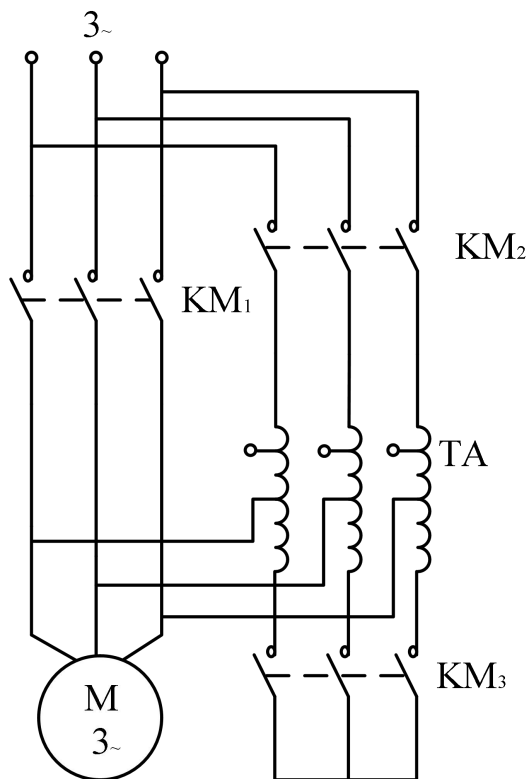


5.2 三相异步电动机的起动

5.2.1 三相笼型异步电动机的起动

二、降压起动

3、自耦变压器降压起动



自耦变压器降压起动接线原理图

$$\dot{I}_{st} = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad T_{st} = \frac{3pU_1^2 R'_2}{2\pi f [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

- (1) 起动时, KM_2 、 KM_3 闭合, KM_1 断开。
- (2) 待电动机的转速升高到一定程度后, KM_2 、 KM_3 断开, KM_1 闭合。

自耦变压器一次电流 I'_{st1} 与二次电流 I_{st2} 之比为: $\frac{I'_{st1}}{I_{st2}} = \frac{N_2}{N_1} = K$

降压起动时, 起动电流 I_{st2} 与直接起动电流 I_{st1} 之比为: $\frac{I_{st2}}{I_{st1}} = \frac{U'_2}{U_N} = \frac{KU_N}{U_N} = K$

对电源的冲击电流 I_{st1} 与直接起动时对电源的冲击电流 I'_{st1} 之比为:

$$\frac{I'_{st1}}{I_{st1}} = \frac{I'_{st1}}{I_{st2}} \cdot \frac{I_{st2}}{I_{st1}} = K \cdot K = K^2$$

降压起动时, 电动机起动转矩 T'_{st1} 与直接起动转矩 T_{st1} 之比为:

$$\frac{T'_{st1}}{T_{st1}} = \left(\frac{U'_2}{U_N} \right)^2 = \left(\frac{KU_N}{U_N} \right)^2 = K^2$$



二、降压起动

3、自耦变压器降压起动

优点

有几种电压可供选择（有可供选择的K值，如QJ2型，QJ3型），比较灵活，在起动次数少，容量较大的笼型异步电动机上应用较为广泛。

缺点

体积大、价格高、维修麻烦、且不允许频繁起动。

适用场景

减小了起动电流，但同时也降低了起动转矩，只适合**空载或轻载起动**。



5.2 三相异步电动机的起动

5.2.1 三相笼型异步电动机的起动

【例】一台笼型三相异步电动机： $P_N = 100\text{kW}$ ， $U_{1N} = 380\text{V}$ ， $n_N = 1450\text{r/min}$ ，定子 Δ 联结，定子额定电流 $I_{1N} = 184.6\text{A}$ ，起动电流倍数 $K_I = 6.5$ ，起动转矩倍数 $K_T = 1.2$ ，带50%额定负载起动，其电源变压器要求最大电流不得大于800A，请选择一种最佳起动方案。（自耦变压器为QJ₃系列）

解：(1)直接起动，一般在7.5kW以下的异步电动机中采用： $I_{1st} = K_I I_{1N} = 6.5 \times 184.6\text{A} = 1200\text{A} > 800\text{A}$

(2)定子串电阻（或电抗）：设起动电流需要降低的倍数为 α ，则 $\alpha = \frac{I_{1st}}{800} = \frac{1200}{800} = 1.5$

$$T_{st} = K_T T_N = 1.2 \times 9550 \frac{P_N}{n_N} = 1.2 \times 9550 \times \frac{100}{1450} \text{N.m} = 790 \text{N.m} \quad T'_{st} = \frac{T_{st}}{\alpha^2} = \frac{790}{1.5^2} = 351 \text{N.m}$$

带 T_L 负载时需要的起动转矩为： $T_{Lst} = K_T T_L = 1.2 \times 329 \text{N.m} = 395 \text{N.m}$ $T'_{st} < T_{Lst}$ 所以不能用该起动方法

(3)Y- Δ 起动： $T'_{st} = \frac{1}{3} T_{st} = \frac{1}{3} \times 790 \text{N.m} = 263 \text{N.m} < T_{Lst}$ 故不能用Y- Δ 起动

(4)自耦变压器起动：

QJ₃系列抽头电压为40%、60%、80%，当抽头为60%时， $K=0.6$ ，限流倍数 $\alpha=1/K^2=2.78>1.5$ ，达到要求

$$T'_{st} = T_{st} K^2 = 790 \times 0.36 = 284.4 \text{N.m} < T_{Lst} \quad \text{无法起动}$$

当抽头为80%时， $K=0.8$ ，限流倍数 $\alpha=1/K^2=1.56>1.5$ ，达到要求 $T'_{st} = T_{st} K^2 = 790 \times 0.64 = 505.6 \text{N.m} > T_{Lst}$

可以起动。综上，最佳起动方案为自耦变压器降压起动，选用抽头80%。



三、高起动转矩笼型异步电动机

$$T_{st} = \frac{3pU_1^2 R'_2}{2\pi f_1 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

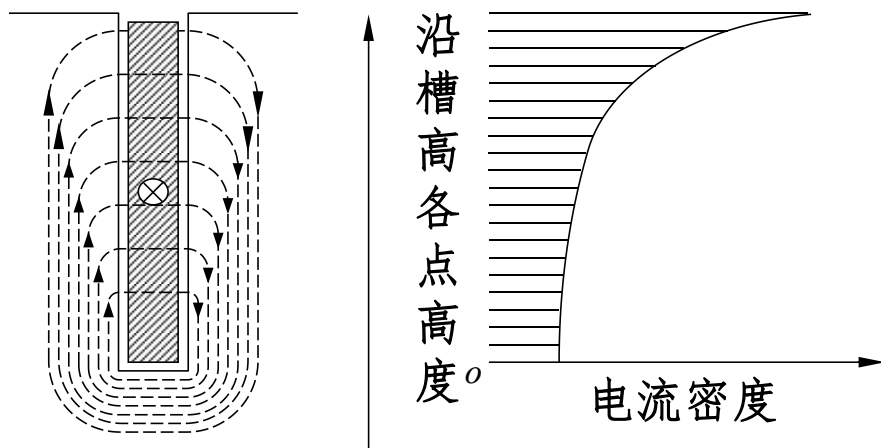
通过**改变**笼型异步电动机的**转子结构**，结构简单、运行可靠、维修方便、价格低廉，**高起动转矩**和**低起动电流**。

1、高转差率笼型异步电动机

转子导体由高电阻率的锰、铝或硅铝合金铸成，有较小的截面，因此转子电阻大。

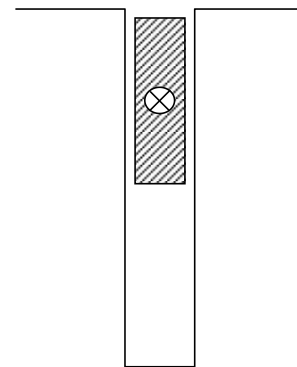
2、深槽式异步电动机

利用转子**槽漏磁通**所引起的**电流趋肤效应**（集肤效应）。结构特点：**转子槽做得又深又窄**。



转子槽型及漏磁通分布

导条内电流密度分布



导条的有效截面

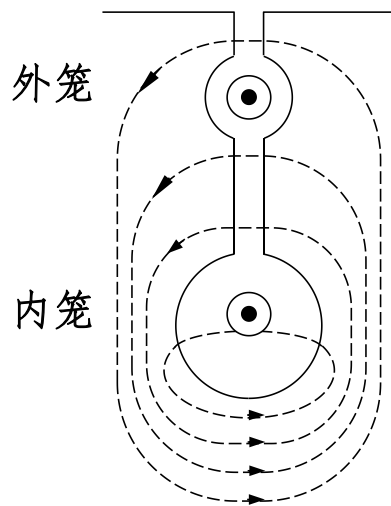
趋肤效应跟频率有关

当电动机达到额定转速稳定运行时，转子电流频率 f_2 很小，大约为0.5~3Hz，趋肤效应就很小，此时电流将均匀分布。

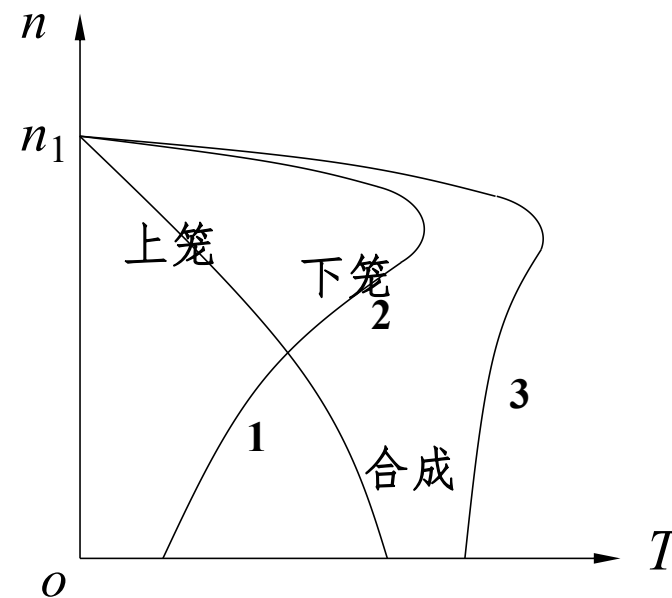


3、双笼型异步电动机

上、下笼导条的横截面积、材料不同，在起动及运行过程中所起的作用不同，分别具有不同的机械特性，以合成总的、所需的机械特性。



双笼型电动机转子槽型



双笼型电动机机械特性

和普通笼型电动机比较，双笼型电动机的功率因数很低。在构造上，双笼型电动机比较复杂，价格昂贵。



一、转子回路串电阻起动

在转子回路中串联适当的电阻，既能限制起动电流，又能增大起动转矩。

1、**原理图**：开始起动时：KM1~KM3均断开，QS闭合，然后逐级切除RΩ3，RΩ2，RΩ1。

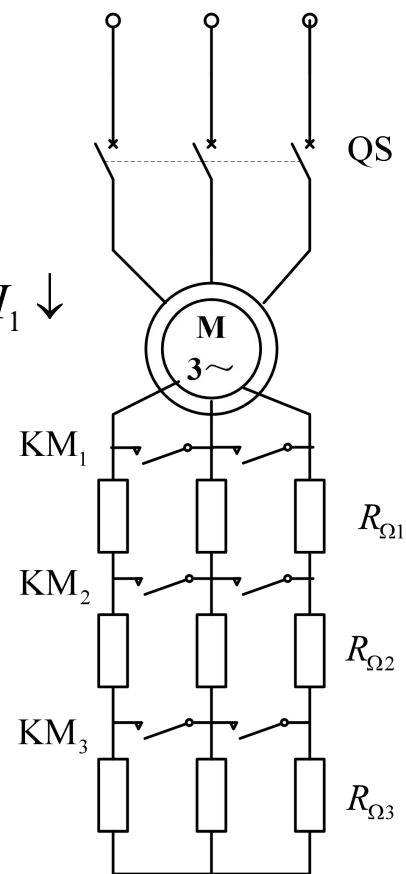
2、**优点**：可以增大起动转矩，减少起动电流，起动性能良好。

$$T_{st} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]} \quad I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad R_2' \uparrow \rightarrow \begin{cases} I_2' \downarrow \\ T_{st} \uparrow \end{cases} \xrightarrow{I_1 = I_0 + (-I_2')} I_1 \downarrow$$

3、异步电机的机械特性

$$\left. \begin{aligned} s_m &= \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \xrightarrow{\text{忽略} R_1} s_m = \frac{R_2'}{(X_1 + X_2')} \\ T_m &= \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]} \xrightarrow{\text{忽略} R_1} T_m = \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 (X_1 + X_2')} \\ T &= \frac{3pU_1^2 R_2' / s}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2]} \xrightarrow{\text{带负载在额定负载转矩范围内}} T \approx \frac{2T_m}{s_m} s \end{aligned} \right\} \rightarrow T \approx \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 R_2'} s$$

近似为一条直线



原理图



一、转子回路串电阻启动

4、启动过程

①初始状态:KM1~KM3均断开, QS闭合。转子回路总电阻
 $R_{30}=R_2+R_{\Omega 3}+R_{\Omega 2}+R_{\Omega 1}$

$T \approx \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 R'_{30}} s \rightarrow$ 特性直线Aa 工作点由a点 \rightarrow b点

②b点:闭合KM3, 转子总电阻 $R_{20}=R_2+R_{\Omega 2}+R_{\Omega 1}$

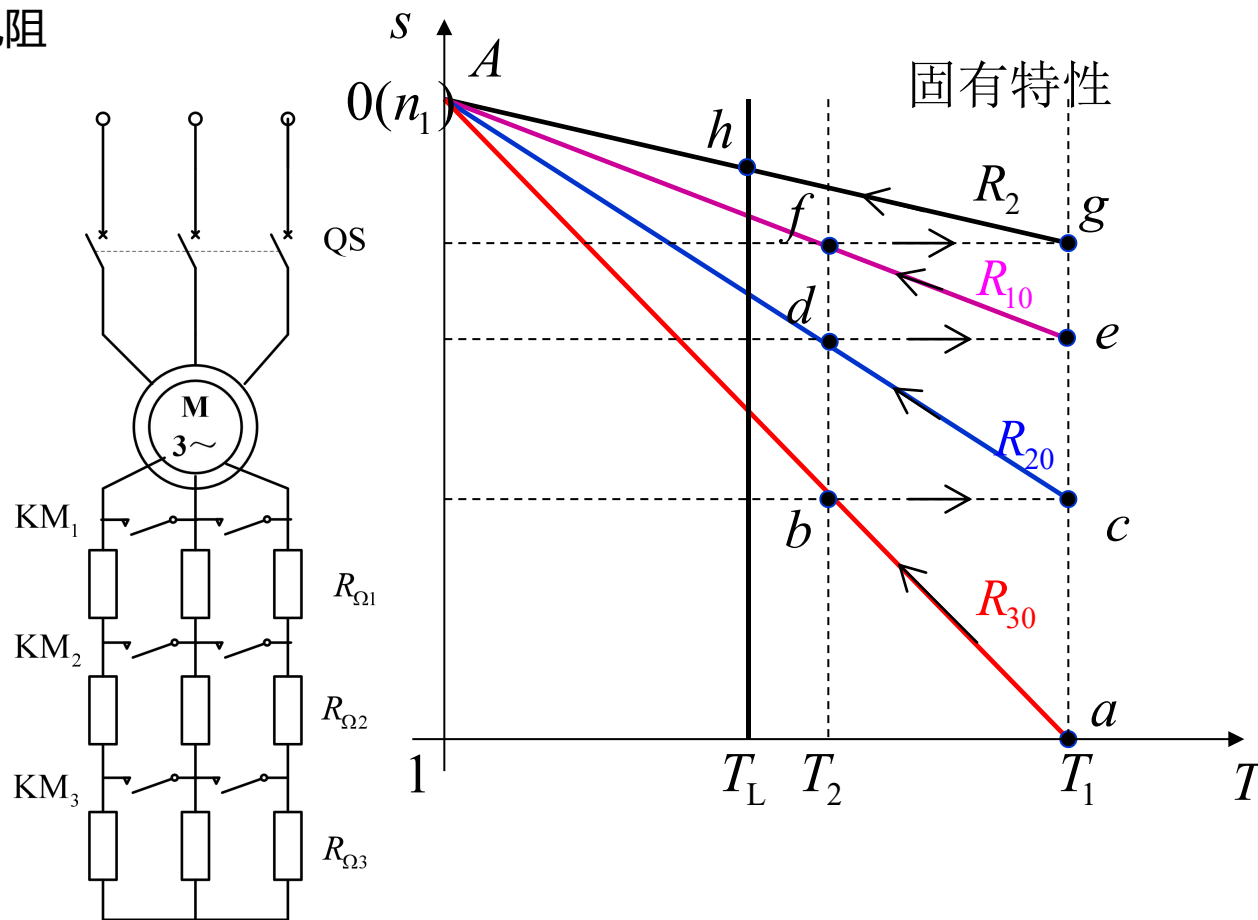
$T \approx \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 R'_{20}} s \rightarrow$ 特性直线Ac 由b点 \rightarrow c点 \rightarrow d点

③ b点:闭合KM2, 转子总电阻 $R_{10}=R_2+R_{\Omega 1}$

$T \approx \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 R'_{10}} s \rightarrow$ 特性直线Ae 由d点 \rightarrow e点 \rightarrow f点

④ b点:闭合KM1, 转子回路总电阻 $R_{10}=R_2$

$T \approx \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 R'_2} s \rightarrow$ 特性直线Ag 由f点 \rightarrow g点 \rightarrow h点



一、转子回路串电阻起动

5、各级起动电阻的计算

为加快起动过程，需将串入的起动电阻逐段切除，保证整个起动过程中，电动机转矩在最大起动转矩 T_1 和切换转矩 T_2 之间变化，不至于过小，从而保证一定大小的加速度，使电动机以较短的时间达到固有特性上的稳定运行点。一般有：

$$T_1 = (1.5 \sim 2)T_N$$

$$T_2 \geq (1.1 \sim 1.2)T_L$$

T_2 的大小与起动转矩的级数有关，级数越少， T_2 也就越小。



一、转子回路串电阻起动

5、各级起动电阻的计算

已知条件：电动机的型号，额定功率 P_N ，额定电压 U_N ，额定转速 n_N ，转子额定电动势 E_{2N} ，转子额定相电流 I_{2N} 。

由异步电动机机械特性的简化实用表达式： $T = \frac{2T_m}{s_m} s$

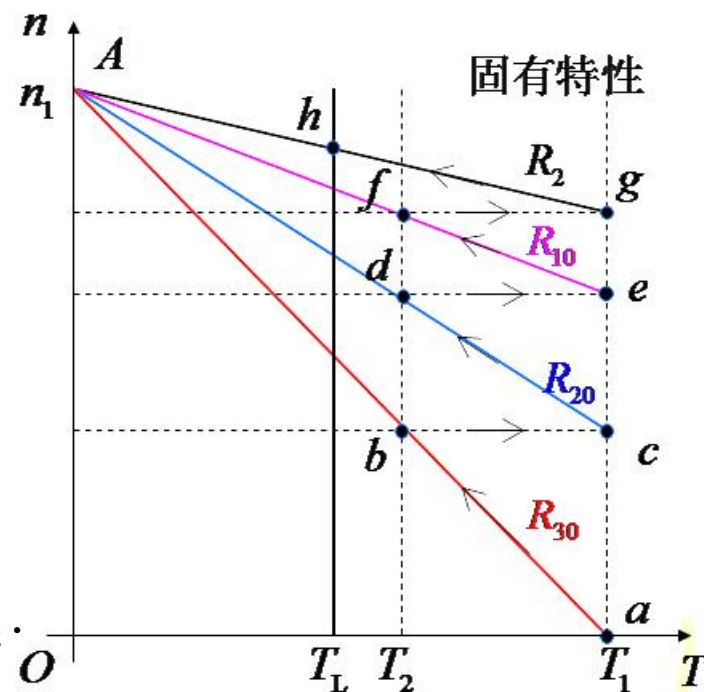
$$\text{又 } s_m = \frac{R'_2 + R'_\Omega}{X_1 + X'_2}, \text{ 则 } T = \frac{2T_m(X_1 + X'_2)}{R'_2 + R'_\Omega} s$$

$$\text{由 } s_b = s_c \text{ 得: } \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_c}{T_b} = \frac{R'_{30}}{R'_{20}} = \frac{R_{30}}{R_{20}} \quad \text{同理有: } \frac{R_{30}}{R_{20}} = \frac{R_{20}}{R_{10}} = \frac{R_{10}}{R_2} = \frac{T_1}{T_2} = \beta$$

β 称为起动转矩比 则各级起动电阻为： $R_{10} = \beta R_2, R_{20} = \beta^2 R_2, \dots, R_{m0} = \beta^m R_2$ 。

起动电阻各分段电阻值为： $R_{\Omega 1} = (\beta - 1)R_2, R_{\Omega 2} = \beta R_{\Omega 1}, R_{\Omega 3} = \beta R_{\Omega 2} \dots$

在额定状态下： $P_{Cu2} = s_N P_M \approx s_N \sqrt{3} E_{2N} I_{2N} = 3 R_2 I_{2N}^2$ ，则： $R_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}}$



一、转子回路串电阻起动

5、各级起动电阻的计算

起动级数 m 和起动转矩比 β 的关系:

$$\because R_{m0} = \beta^m R_2 \Rightarrow \beta = \left(\frac{R_{m0}}{R_2} \right)^{\frac{1}{m}}$$

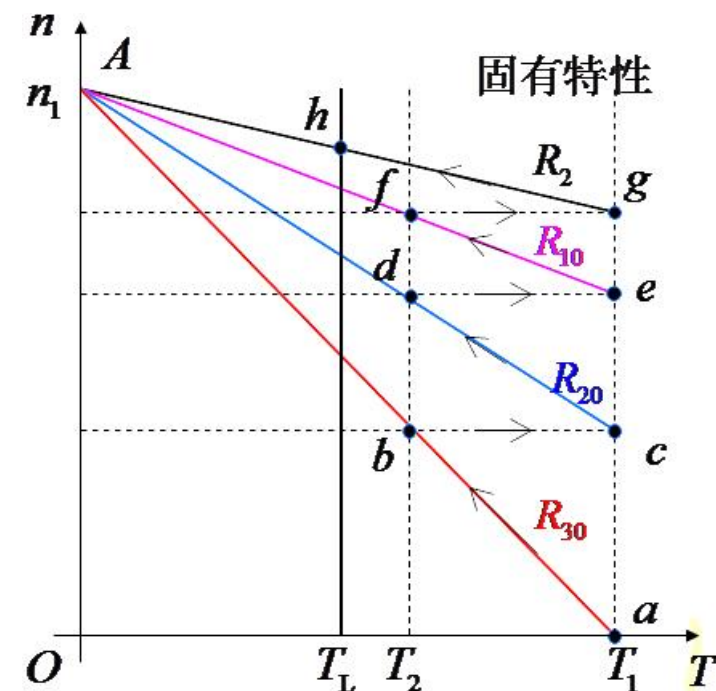
$$\text{对于 } h \text{ 点: } T_N = \frac{2T_m(X_1 + X'_2)}{R'_2} s_N \rightarrow R'_2 = \frac{2T_m(X_1 + X'_2)s_N}{T_N}$$

$$\text{对于 } a \text{ 点: } T_1 = \frac{2T_m(X_1 + X'_2)}{R'_{m0}} s_a \xrightarrow{s_a=1} R'_{m0} = \frac{2T_m(X_1 + X'_2)}{T_1}$$

$$\therefore \frac{R_{m0}}{R_2} = \frac{R'_{m0}}{R'_2} = \frac{1/T_1}{s_N/T_N} = \frac{T_N}{s_N T_1}$$

$$\therefore \beta = \left(\frac{R_{m0}}{R_2} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{T_N}{s_N T_1} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$\lg \beta = \frac{1}{m} \lg \left(\frac{T_N}{s_N T_1} \right) \Rightarrow m = \frac{\lg \left(\frac{T_N}{s_N T_1} \right)}{\lg \beta}$$



一、转子回路串电阻起动

5、各级起动电阻的计算

起动电阻的计算步骤为：

已知起动级数 m ：

- 计算 R_2 $R_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}}$
- 求出 T_N $T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$
- 选取 T_1 和 T_2 $T_1 = (1.5 \sim 2.0) I_N, T_2 \geq (1.1 \sim 1.2) I_N$
- 求起动转矩比 β $\beta = \frac{T_1}{T_2}$
- 求起动电阻中各分段电阻值 $R_{\Omega 1}, R_{\Omega 2}, \dots, R_{\Omega m}$

$$R_{\Omega 1} = (\beta - 1) R_2, R_{\Omega 2} = \beta R_{\Omega 1}, \dots, R_{\Omega m} = \beta R_{\Omega m-1}$$

起动级数 m 未知时，起动电阻的计算步骤为：

- 计算 R_2 $R_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}}$
- 求出 T_N $T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$
- 选取 T_1 和 T_2 $T_1 = (1.5 \sim 2.0) I_N, T_2 \geq (1.1 \sim 1.2) I_N$
- 求起动转矩比 β' $\beta' = \frac{T_1}{T_2}$
- 计算 m $m' = \lg(T_N / s_N T_1) / \lg \beta, m = [m']$
取较大的整数，将 m 代入 $\beta = \sqrt[m]{\frac{T_N}{T_1 s_N}}$
计算修正后的 β
校核 $T_2 = \frac{T_1}{\beta} \geq (1.1 \sim 1.2) T_L$
若不满足要求，重新修正 β 和 T_2 ，直到满足要求。
- 求各分段电阻值 $R_{\Omega 1}, R_{\Omega 2}, \dots, R_{\Omega m}$
 $R_{\Omega 1} = (\beta - 1) R_2; R_{\Omega 2} = \beta R_{\Omega 1}; \dots R_{\Omega m} = \beta R_{\Omega m-1}$



【例】 一台三相绕线转子异步电动机： $P_N = 15\text{kW}$ ， $n_N = 730\text{r/min}$ ， 转子三相绕组Y联结， 其额定电压 $E_{2N} = 165\text{V}$ ， 额定电流 $I_{2N} = 48\text{A}$ ， 已知负载转矩 $T_L = 110\text{N.m}$ ， 要求最大起动转矩等于额定转矩的2倍。 求： 起动分级数及每级起动电阻值。

$$\text{解： } s_N = \frac{750 - 730}{750} = 0.027$$

$$R_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.027 \times 165}{\sqrt{3} \times 48} \Omega = 0.054 \Omega$$

$$T_1 = 2T_N = 2 \times 9550 \times \frac{15}{730} \text{N.m} = 392.5 \text{N.m}$$

选 $T_2 = 1.2T_L = 1.2 \times 110 \text{N.m} = 132 \text{N.m}$ ， 得：

$$\beta' = \frac{T_1}{T_2} = \frac{392.5}{132} = 2.97$$

则： $m' = \lg(T_N / s_N T_1) / \lg \beta' = 2.68$ ，

$m = [m']$ ， 取较大的整数， 取 $m = 3$

$$\text{将 } m \text{ 代入 } \beta = \sqrt[m]{\frac{T_N}{T_1 s_N}} = \sqrt[3]{\frac{T_N}{0.027 \times 2T_N}} = 2.6457,$$

$$\text{校核： } T_2 = T_1 / \beta = 392.5 / 2.6457 = 148.354 \text{N.m} > 1.2T_L$$

$m = 3$ 符合要求

$$R_{\Omega 1} = (\beta - 1)R_2 = (2.6457 - 1) \times 0.054 \Omega = 0.0889 \Omega$$

$$R_{\Omega 2} = \beta R_{\Omega 1} = 0.235 \Omega$$

$$R_{\Omega 3} = \beta R_{\Omega 2} = 0.62$$

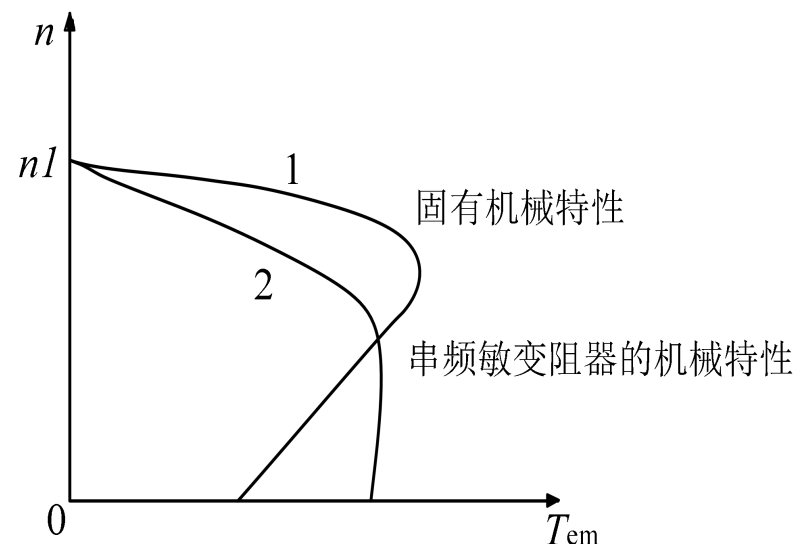
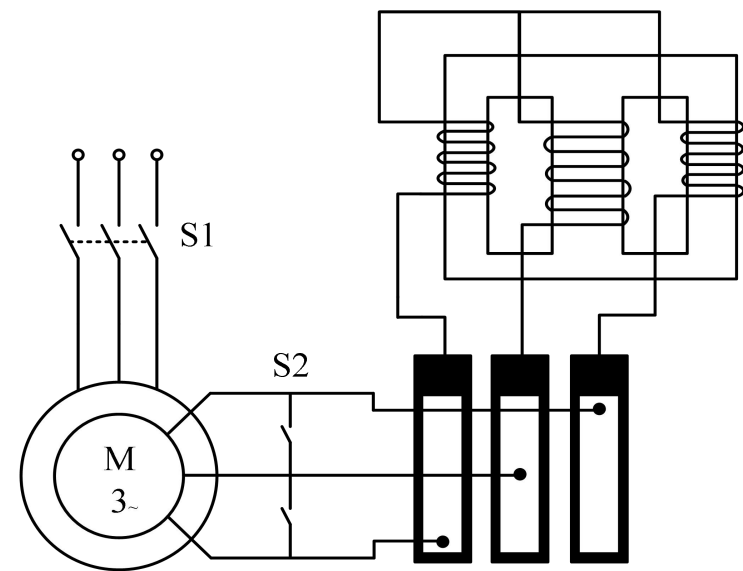


二、转子串频敏变阻器起动

频敏变阻器是一铁损很大的三相电抗器。

起动时，S2断开，转子串入频敏变阻器，S1闭合，电机通电开始起动。

- 起动时， $f_2 = f_1$ ，频敏变阻器铁损大，反映铁损耗的等效电阻 R_m 大，相当于转子回路串入一个较大电阻。
- 随着 n 上升， f_2 减小，铁损减少，等效电阻 R_m 减小，相当于逐渐切除 R_m 。
- 起动结束，S2闭合，切除频敏变阻器，转子电路直接短路。



小结

1、起动电流大的原因

起动时, $n=0, s=1$, 定子旋转磁场与转子相对切割速度很大, 转子频率大, 转子感应电动势大, 使转子电流大, 根据磁动势平衡关系, 定子电流必然增大。

直接起动 $K_1 = \frac{I_{st}}{I_N} \leq \frac{1}{4} \left[3 + \frac{\text{电源总容量 (kV} \cdot \text{A)}}{\text{起动电动机容量 (kV} \cdot \text{A)}} \right]$

$$I_{stR} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$T_{stR} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

定子串电阻或串电抗降压起动

$$= \frac{KU_N}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} = KI_{st} = \frac{3p(KU_N)^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]} = K^2 T_{st}$$

定子串电阻 (电抗) 起动时, 起动电流下降到 KI_{st} , 起动转矩下降到了 $K^2 T_{st}$, 该方法适用于轻载起动

降压起动

Y—Δ起动 $\dot{I}_{st} = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}$

$$T_{st} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

$$\frac{I_{stY线}}{I_{st\Delta线}} = \frac{I_{stY相}}{\sqrt{3}I_{st\Delta相}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{T_{stY}}{T_{st\Delta}} = \left(\frac{U_{Y相}}{U_{\Delta相}} \right)^2 = \left(\frac{U_N / \sqrt{3}}{U_N} \right)^2 = \frac{1}{3}$$

适用场合: 正常运行时定子绕组为三角形联结的异步电动机。

自耦变压器降压起动 $\dot{I}_{st} = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}$

$$T_{st} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

$$\frac{I'_{st1}}{I_{st1}} = \frac{I'_{st1}}{I_{st2}} \cdot \frac{I_{st2}}{I_{st1}} = K \cdot K = K^2 \quad \frac{T'_{st1}}{T_{st1}} = \left(\frac{U'_2}{U_N} \right)^2 = \left(\frac{KU_N}{U_N} \right)^2 = K^2$$

高起动转矩笼型异步电动机 1、高转差率笼型异步电动机 2、深槽式异步电动机 3、双笼型异步电动机

绕线型异步电动机

转子回路串电阻起动

$$T_{st} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

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

$$R_2' \uparrow \rightarrow \begin{cases} T_{st} \uparrow \\ I_2' \downarrow \xrightarrow{I_1 = I_0 + (-I_2')} I_1 \downarrow \end{cases}$$

2、起动转矩不大的原因

从下述公式分析 $T_{st} = T_{em} = C_T \Phi_0 I_2' \cos \varphi_2$

➤ 起动时, $s=1$, 远大于运行时的 s , 转子漏抗 $X_{2s} = sX_2$ 很大, $\cos \varphi_2$ 很低, 尽管 I_2 很大, 但 $I_2 \cos \varphi_2$ 并不大。

由于起动电流大, 定子漏阻抗压降大, 使定子感应电动势减小, 对应的气隙磁通减小。

起动