



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

由异步电动机的转速公式 $n = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s)$

可知，异步电动机有下列三种基本**调速方法**：

- (1) 改变定子极对数 p 调速。
- (2) 改变电源频率 f_1 调速。
- (3) 改变转差率 s 调速。



一、变极原理

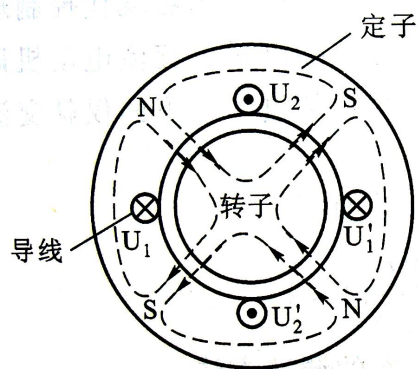
适用对象

- 只用于**笼型电动机**;
- 笼型转子电动机, 转子极数随定子极数改变, 改变极对数只考虑定子方面。

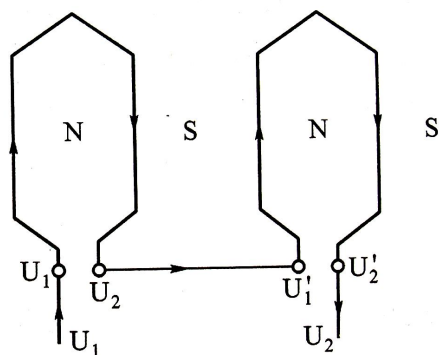
变极方式

- 改变定子绕组的接线方式;
- 改变每相绕组中半相绕组电流方向, 磁极数、同步转速成倍改变, 电动机转速近似成倍变化。

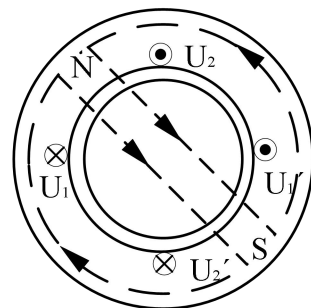
以4极变2极为例



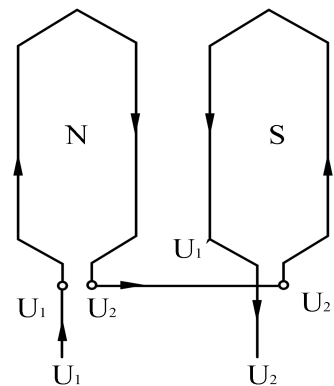
(a) 剖视原理图



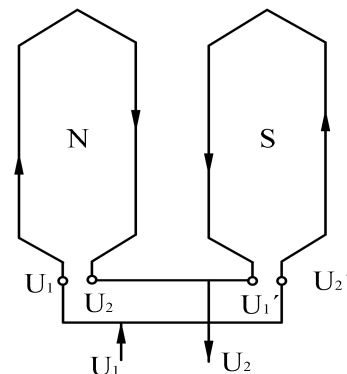
(b) 展开图



(a) 剖视原理图



(b) 串联展开图



(c) 并联展开图

U相两个线圈, **顺向串联**, 定子绕组产生4极磁场

反向串联和**反向并联**, 定子绕组产生2极磁场



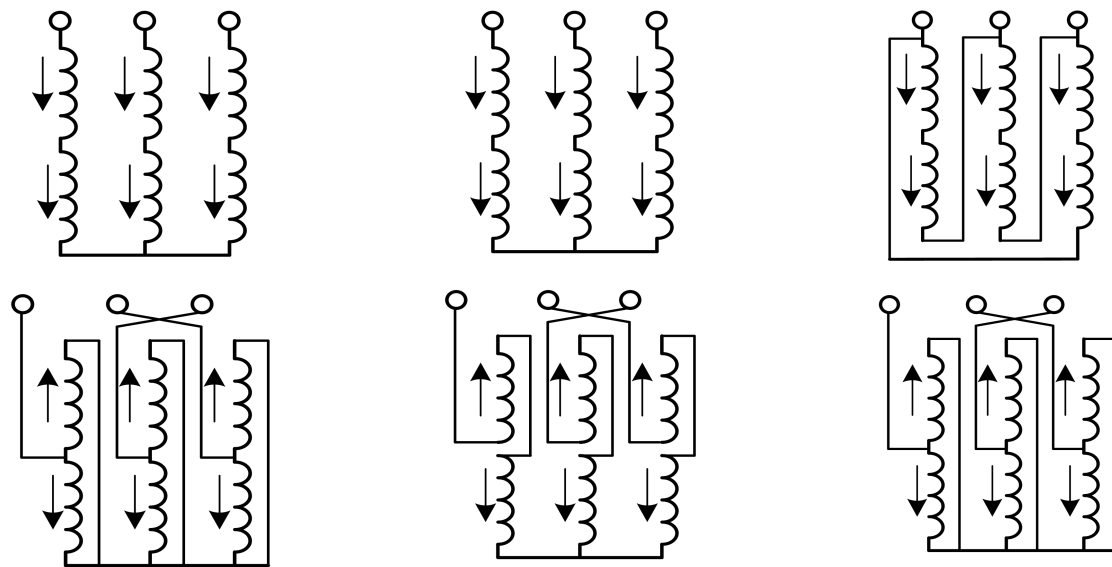
二、三种常用变极方式

注意事项

- 将三相绕组中任意两相的出线端交换一下；
- 否则电动机将反向转动。

换相原因

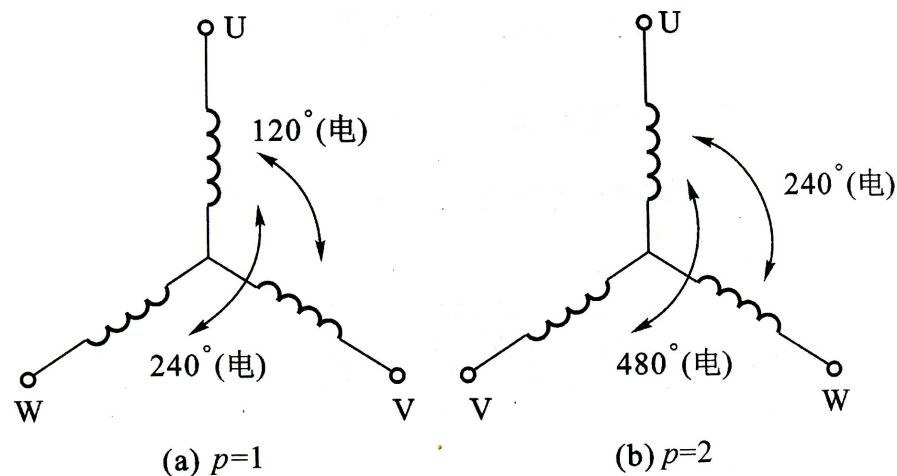
- 磁极对数 P 成倍变化；
- 各相绕组之间的空间电角度就会成倍变化，使得相序发生改变。



Y→反并YY, 2p-p

Y→反串Y, 2p-p

Δ →YY, 2p-p



二、三种常用变极方式

1、Y-YY联结

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

Y联结：两个半相绕组正向串联，极对数为 $2p$ ，同步转速为 n_1 ，相电压 $U_1 = U_N / \sqrt{3}$ ， R_1, X_1, R'_2, X'_2

YY联结：两个半相绕组反向并联，极对数为 p ，同步转速为 $2n_1$ 。相电压 $U_1 = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$ ， $\frac{R_1}{4}, \frac{X_1}{4}, \frac{R'_2}{4}, \frac{X'_2}{4}$

$$T_m = \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}]} \quad T_{mYY} = 2T_{mY}$$

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

$$s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad s_{mYY} = s_{mY}$$

$$P_2 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi_1 \eta,$$

$$T_2 = 9.55 \frac{P_2}{n} \approx 9.55 \frac{P_2}{n_1},$$

$$P_{2Y} = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi_1 \eta,$$

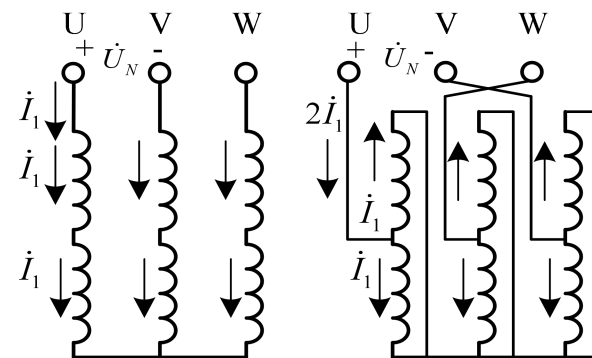
$$T_2 = 9.55 \frac{P_{2Y}}{n_1}$$

$$P_{2YY} = \sqrt{3}U_1 (2I_1) \cos \varphi_1 \eta = 2P_{2Y}$$

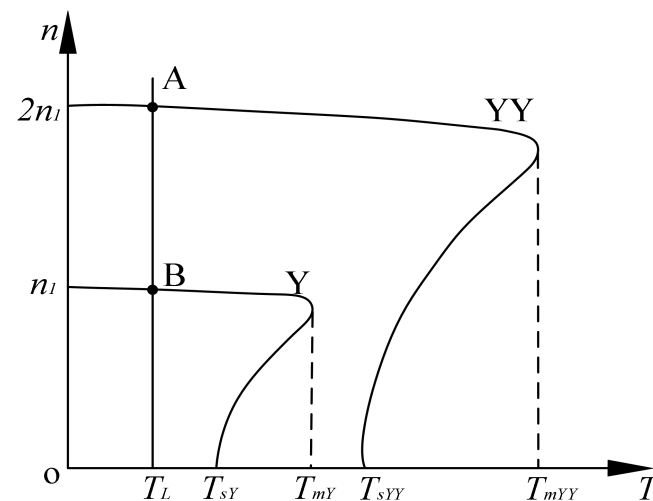
$$T_{2YY} = 9.55 \frac{P_{2YY}}{2n_1} = 9.55 \frac{2P_{2Y}}{2n_1} = T_{2Y}$$

$$P_{2YY} = 2P_{2Y},$$

$$T_{2YY} = T_{2Y},$$



三相异步电动机Y-YY变极接线图



Y-YY变极调速的机械特性

Y-YY属于恒转矩调速，常应用于起重电葫芦、运输传送带等恒转矩生产机械。



二、三种常用变极方式

2、 Δ -YY联结

Δ 联结：两个半相绕组正向串联，极对数为 $2p$ ，同步转速为 n_1 ，相电压 $U_1 = U_N$ ， R_1, X_1, R'_2, X'_2

YY联结：两个半相绕组反向并联，极对数为 p ，同步转速为 $2n_1$ 。相电压 $U_1 = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$ ， $\frac{R_1}{4}, \frac{X_1}{4}, \frac{R'_2}{4}, \frac{X'_2}{4}$

$$T_m = \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}]} \quad T_{mYY} = \frac{2}{3} T_{m\Delta}$$

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

$$s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad s_{mYY} = s_{m\Delta}$$

$$P_2 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1 \eta,$$

$$T_{2\Delta} = 9.55 \frac{P_2}{n} \approx 9.55 \frac{P_2}{n_1}$$

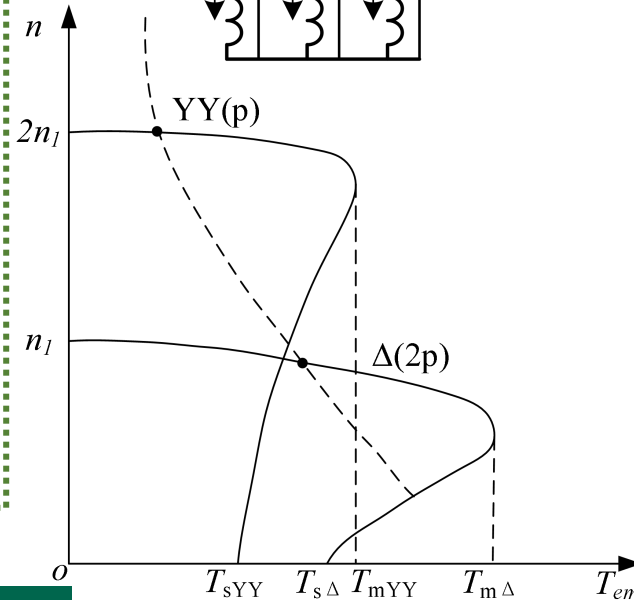
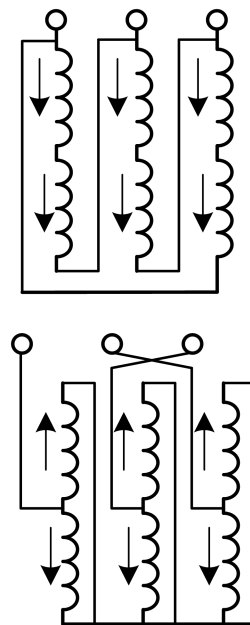
$$P_{2\Delta} = \sqrt{3} U_N (\sqrt{3} I_N) \cos \varphi_1 \eta,$$

$$T_2 = 9.55 \frac{P_{2\Delta}}{n_1}$$

$$P_{2YY} = \sqrt{3} U_N (2I_N) \cos \varphi_1 \eta = 1.155 P_{2\Delta},$$

$$T_{2YY} = 9.55 \frac{P_{2YY}}{2n_1} = 9.55 \frac{1.155 P_{2\Delta}}{2n_1} = 0.577 T_{2\Delta}$$

$$P_{2YY} = 1.155 P_{2\Delta} \approx P_{2\Delta}$$



Δ -YY属于恒功率调速，常应用于各种机床的粗加工（低速）和精加工（高速）等恒功率生产机械

Δ -YY变极调速的机械特性



一、变频调速的原理

(1)变频调速：若连续改变异步电动机电源频率 f_1 ，就可以连续改变同步转速 n_1 ，从而可平滑连续的改变电动机的转速 n 。

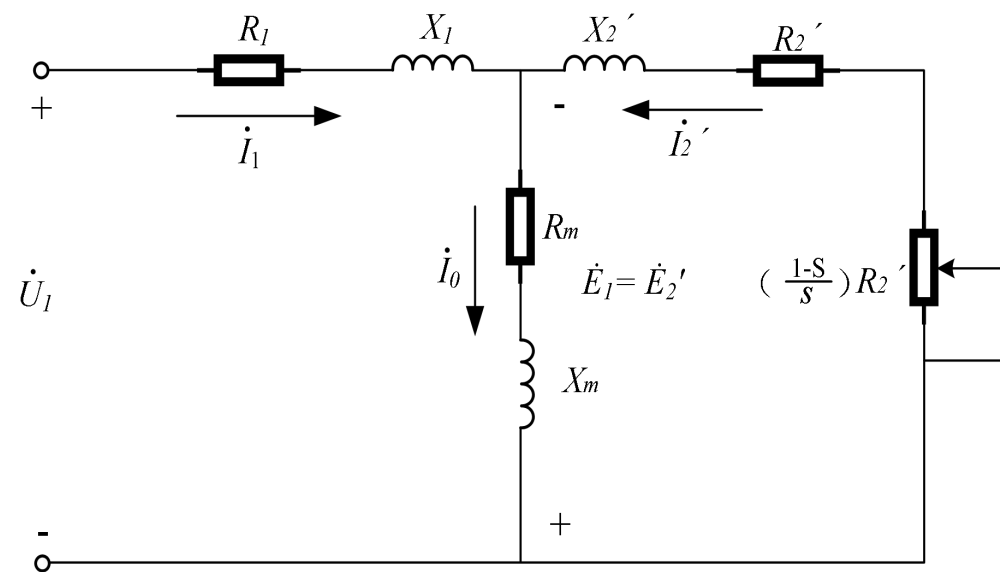
$$\text{改变 } f_1 \xrightarrow{n_1 = \frac{60 f_1}{n_p} = \frac{60 \omega_1}{2\pi n_p}} \text{改变 } n_1 \xrightarrow{n = (1-s)n_1} \text{改变 } n$$

(2)异步电动机的实际转速： $n = (1-s)n_1 = n_1 - sn_1 = n_1 - \Delta n$

(3)基频以下的调速($f_1 < f_N$)

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

若忽略定子绕组漏阻抗压降，则 $U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 K_M \Phi_1$



为了保证电动机安全运行,就要保持气隙磁通 Φ_1 恒定, 因此应使 $\frac{E_1}{f_1} = \text{常数}$, 或者 $\frac{U_1}{f_1} = \text{常数}$

因此，调频时一定要调压。



二、电压随频率调节的规律

➤ 当转差率 s 变化不大时，电动机的转速 n 基本与电源频率 f_1 成正比，连续调节电源频率，可以平滑地改变电动机的转速。

$$\Phi_0 = \frac{E_1}{4.44 f_1 N_1 k_{w1}} \approx \frac{U_1}{4.44 f_1 N_1 k_{w1}}; \lambda_T = \frac{T_m}{T_N} \approx \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (X_1 + X'_2) T_N} = c \frac{U_1^2}{f_1^2 T_N}$$

频率改变将影响磁路的饱和程度、励磁电流、功率因数、铁损及过载能力的大小。

(1) 为了保持变频率前、后主磁通不变，要满足：

$$\frac{E_1}{f_1} \approx \frac{U_1}{f_1} = \frac{U'_1}{f'_1}$$

(2) 为了保持变频率前、后过载能力不变，要满足：

$$\frac{U_1^2}{f_1^2 T_N} = \frac{U_1'^2}{f_1'^2 T'_N} \text{ 及 } \frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1} \sqrt{\frac{T'_N}{T_N}}$$



二、电压随频率调节的规律

1、恒转矩变频调速

对恒转矩负载 $\frac{U_1}{U'_1} = \frac{f_1}{f'_1} = \text{常数}$ 此条件下变频调速，电机的主磁通和过载能力不变。

2、恒功率变频调速

对恒功率负载 $P_N = \frac{T_N n_N}{9550} = \frac{T'_N n'_N}{9550} = \text{常数}$ $\frac{T'_N}{T_N} = \frac{n_N}{n'_N} = \frac{f_1}{f'_1}$
得 $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U'_1}{\sqrt{f'_1}} = \text{常数}$ 此条件下变频调速，电机的过载能力不变，但主磁通发生变化。



三、从基频向下的变频调速

$$\left(\frac{E_1}{f_1} \approx \frac{U_1}{f_1} = C\right)$$

1、机械特性表达式

$$T_e = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{3I_2'^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi n_1 / 60} = \frac{3 \left(\frac{E_2'}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + X_2'^2}} \right)^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 / p} = \frac{\frac{3pf_1}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1} \right)^2 \frac{R_2'}{s}}{(R_1/s)^2 + X_2'^2}$$

$$\approx \frac{3 \left(\frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2}} \right)^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 / p} = \frac{3pU_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

$$= \frac{\frac{3pf_1}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \frac{R_2'}{s}}{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2}$$

2、临界转差率 s_m 令 $dT_e/ds=0$ 3、最大转矩 T_m

将 s_m 代入 T_e 中, 得

$$T_m = \frac{1}{2} \frac{3p}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1} \right)^2 \frac{1}{2\pi L_2'} = \text{常数}$$

f_1 变 $\Rightarrow T_m$ 不变

4、转速降落 Δn 与 T_e 的关系

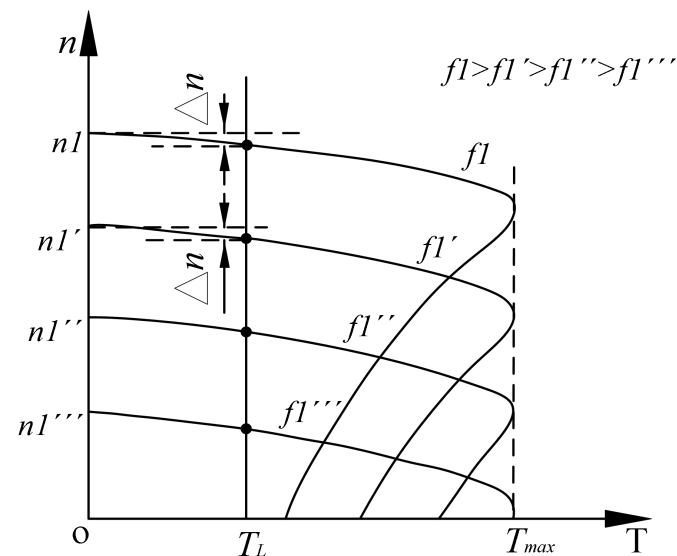
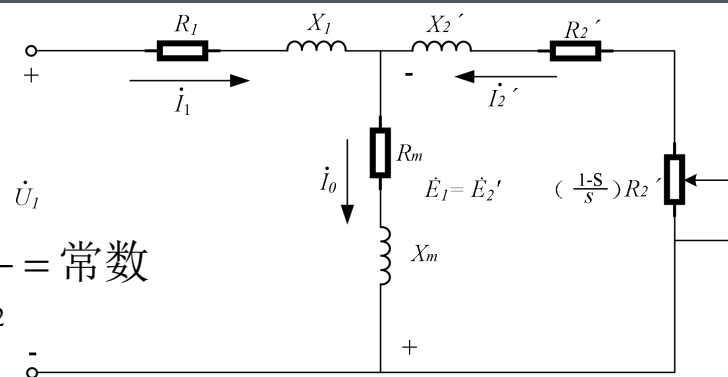
在 T_e 中, 忽略 X_2'

$$T_e = \frac{3pf_1}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1} \right)^2 \frac{1}{R_2'/s} = Kf_1 s$$

$$\Rightarrow s = \frac{T}{Kf_1}$$

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

$$= n_1 - \Delta n$$



保持 $\frac{E_1}{f_1} = \text{常数}$ 、变频调速时的机械特性

$$T \propto 60f_1 \quad 60T$$

结论: 当 E_1/f_1 为恒值时, 不管 f_1 如何变化, 对于同一负载转矩 T_L , Δn 基本不变, 即机械特性斜率相同, 各特性基本平行。



三、从基频向下的变频调速

$$\left(\frac{E_1}{f_1} \approx \frac{U_1}{f_1} = C\right)$$

5、基频以下的变频调速是恒转矩调速方式

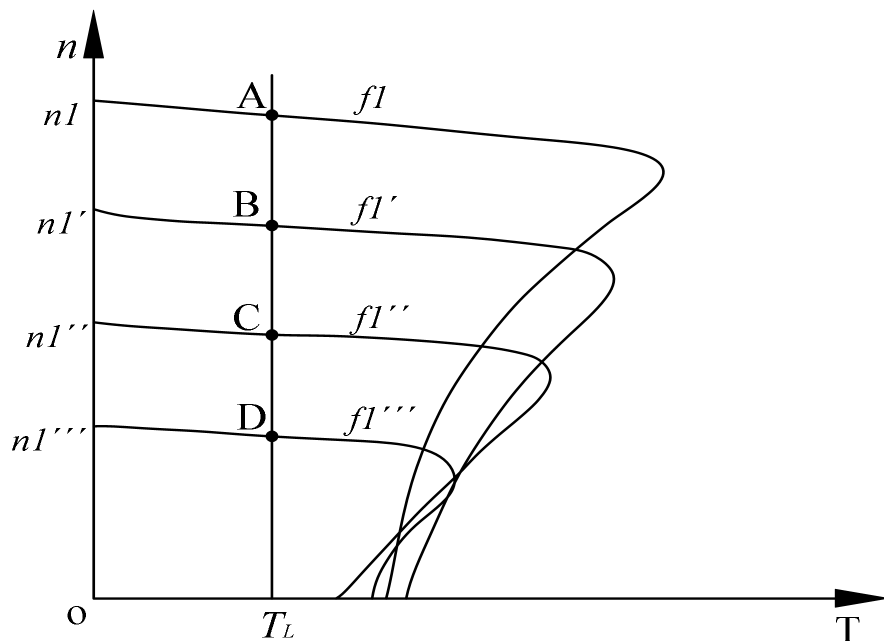
$$T = C_T \Phi_1 I_2' \cos \varphi_2$$

若带恒转矩负载，则 T 为常数，属于恒转矩调速方式。

6、基频以下变压变频调速的转差功率为

$$P_{Cu2} = sP_{em} = s\Omega_1 T_e \approx s \frac{2\pi f_1}{p} T_e = \frac{4\pi^3 T_e^2 R_2'}{3p^2 \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2} = C$$

与转速无关，故称作转差功率不变型调速方法。



保持 $\frac{U_1}{f_1}$ 为常数： T_m 减小； Δn_m 常数

$$T_e = \frac{3pf_1}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 \frac{\frac{R_2'}{s}}{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2} \approx \frac{3pf_1}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 \frac{s}{R_2'}$$



四、从基频向上的变频调速

$$(U_1 = U_{1N})$$

1、机械特性表达式

$$T_e = \frac{3pU_N^2 R'_2 / s}{2\pi f_1 [(R_1 + R'_2 / s)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

2、临界转差率 s_m

$$s_m = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2} = \frac{R'_2}{2\pi f_1 (L_1 + L'_2)} \propto \frac{1}{f_1} \quad f_1 \uparrow \Rightarrow s_m \downarrow$$

4、最大转矩 T_m

将 s_m 代入 T_e 中, 得

$$T_m = \frac{3pU_N^2}{4\pi f_1} \frac{1}{2\pi f_1 (L_1 + L'_2)} \propto \frac{1}{f_1^2} \quad f_1 \uparrow \Rightarrow T_m \downarrow$$

6、基频以上的变频调速是恒功率调速

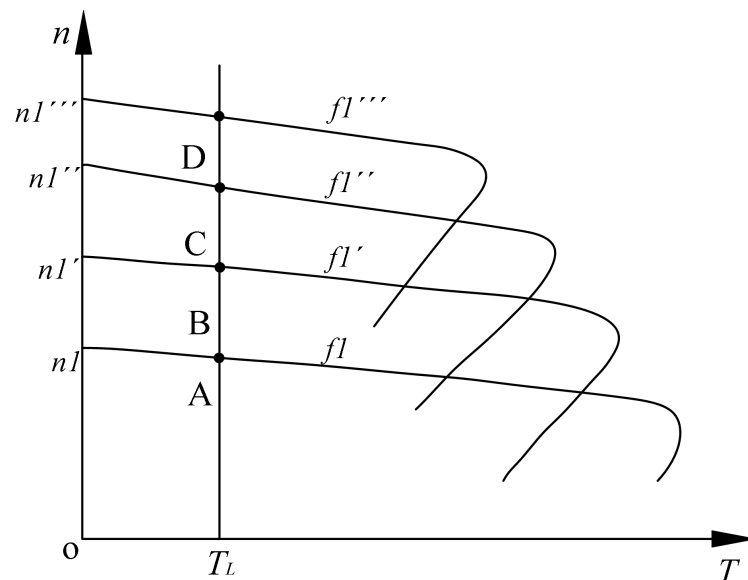
$$\left. \begin{array}{l} T_L \text{ 不变} \Rightarrow I'_2 \cos \varphi_2 \text{ 不变} \\ f_1 \uparrow \xrightarrow{U_1 = 4.44 f_1 N_1 K_{N1} \Phi_1 = U_N} \Phi_1 \downarrow \end{array} \right\} \xrightarrow{T = C_T \Phi_1 I'_2 \cos \varphi_2} T \downarrow \left\{ \begin{array}{l} f_1 \uparrow \xrightarrow{n = (1-s)n_1} n_1 \uparrow \\ P_M = 0.105 T n_1 \rightarrow P_M = \text{常数} \end{array} \right.$$

5、最大转矩时的转速降落 Δn 与 T_e 的关系

在 T_e 中, 忽略 X'_2

$$n = (1-s)n_1 = n_1 - sn_1 = n_1 - \Delta n$$

$$\Delta n_m = s_m n_1 \approx \frac{R'_2}{2\pi f_1 (L_1 + L'_2)} \frac{60 f_1}{p} = \text{常数}$$



四、从基频向上的变频调速

$$(U_1 = U_{1N})$$

7、基频以上变压变频调速的转差功率为

$$P_{Cu2} = sP_{em} = s\Omega_1 T_e \approx \frac{T_e \Omega_1 R_2'}{3U_N^2} T_e \Omega_1 = \frac{(T_e \Omega_1)^2 R_2'}{3U_N^2} \approx C$$

$$T_e = \frac{3pU_N^2 R_2' / s}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2]} \approx \frac{3pU_N^2}{2\pi f_1} \frac{s}{R_2'}$$

$$T_e \times \frac{2\pi f_1}{p} \approx \frac{3U_N^2 s}{R_2'} \rightarrow s = \frac{T_e \Omega_1 R_2'}{3U_N^2}$$

带恒功率负载运行时，转差功率基本不变。



转差功率消耗型

从定子传入转子的电磁功率 P_{em} 可分成两部分：

一部分为拖动负载的**有效功率（机械功率）** $P_2 = (1-s)P_{\text{em}}$ ；

另一部分是**转差功率** $P_s = sP_{\text{em}}$ ，与转差率成正比。

- 全部转差功率都转换成热能消耗掉；
- 以增加转差功率的消耗来换取转速的降低（恒转矩负载时），越向下调效率越低；
- 这类调速方法的**效率最低**。

转差功率回馈型

- 转差功率的一部分消耗掉；
- 大部分则通过变流装置回馈电网或转化成机械能予以利用，转速越低时回收的功率越多；
- 其效率比前者高。

转差功率不变型

- 转差功率中转子铜损部分的消耗是不可避免的；
- 这类调速方法无论转速高低，转差功率的消耗也基本不变；
- 因此**效率最高**。

从能量转换的角度看，可把异步电动机的调速方法分为三类：



转差率不变型调速方法

- 变极调速;
- 变频调速。

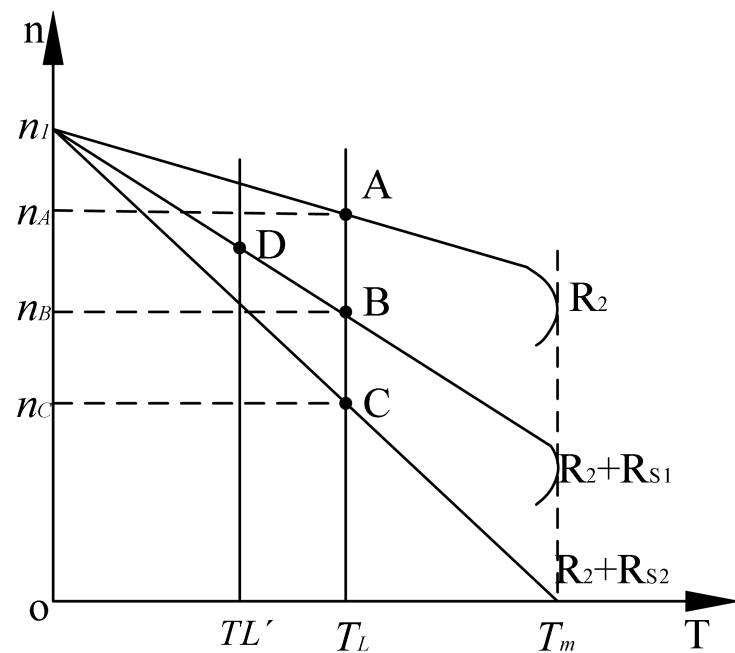
变转差率型调速方法

- 定子调压调速;
- 绕线转子异步电动机转子串电阻调速;
- 串级调速等。

一、绕线转子电动机的转子串接电阻调速

- 从机械特性看，转子串电阻时，同步速和最大转矩不变，但临界转差率增大。当恒转矩负载时，电机的转速随转子串联电阻的增大而减小。

- 设 s_m 、 S 、 T_{em} 是转子串联电阻 R_s 前的量， s'_m 、 s' 、 T'_{em} 是串联电阻后的量，则转子串接的电阻为
$$R_s = \left(\frac{s'_m T_{em}}{s T'_{em}} - 1 \right) R_2$$



二、改变定子电压调速

原理

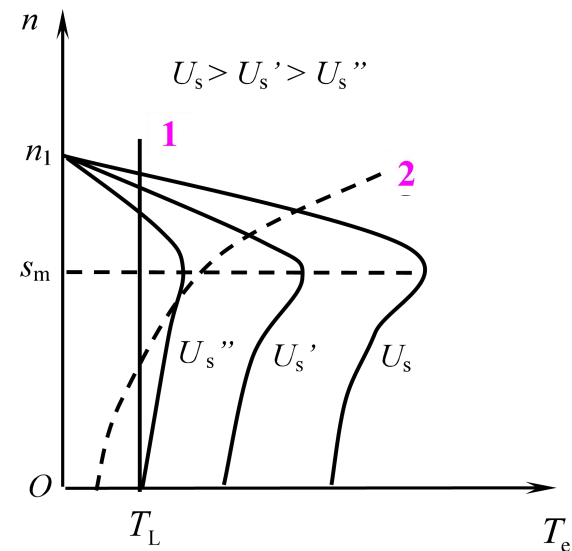
- 同步转速 n_1 和临界转差率 s_m 不变时，输出转矩与所加定子电压的平方成正比。
- 改变定子电压就可以**改变其机械特性**的函数关系。

优缺点

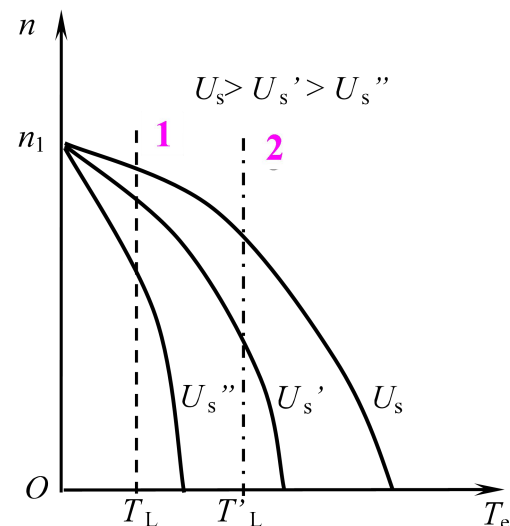
- 对于恒转矩调速，增加转子电阻，则改变电动机定子电压可获得**较大的调速范围**。
- **机械特性太软**，往往不能满足生产机械的要求。
- 且低压时的**过载能力较低**，负载的波动稍大，电动机就有可能停转。
- 对恒转矩性质的负载，如果要求调速范围较大，往往采用**带转速反馈控制**的交流调压器。

适用场景

- 既非恒转矩调速，也非恒功率调速。
- 它最适用于转矩随转速降低而减小的负载，如**风机类负载**。
- 也可用于恒转矩负载，最不适用恒功率负载。



改变定子电压调速的机械特性



高转差率电动机变压调速的机械特性



三、绕线转子电动机的串级调速

1、串级调速的基本原理

问题

串电阻调速低效

解决方法

转子电路中串入附加电动势 E_{add} 取代电阻

效果

同时从定子和转子向电机馈送功率，又称为双馈调速

实现方式

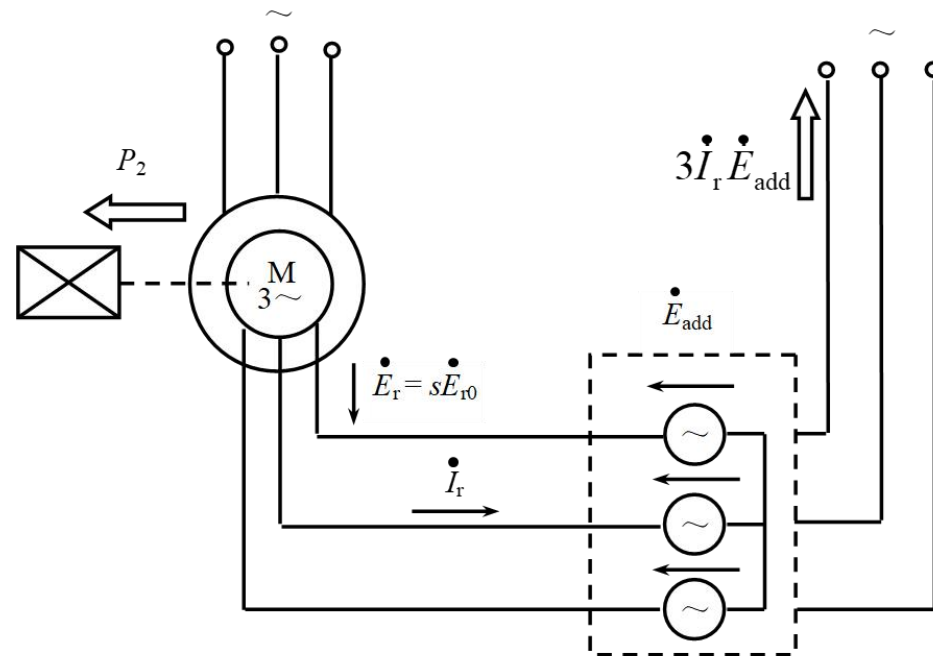
串入一个电压和频率可控的交流附加电动势 \dot{E}_{add} ，通过控制其与转子电动势 \dot{E}_r 具有相同的频率，相位相同或相反。

原理

调节 E_{add} 的大小改变转子电流 I_r ， T_e 也将随着 I_r 变化，使电力拖动系统稳定运行条件 $T_e = T_L$ 被打破，变速。

优点

转差功率 $P_s = sP_{\text{em}}$ 大部分被 E_{add} 吸收，再回馈给电网。因此具有较高的效率。



当 $E_{\text{add}}=0$ 时，异步电动机处在固有机械特性上运行。若 $E_{\text{add}} \neq 0$ ，这时，转子电流 I_r 为

$$I_r = \frac{sE_{r0} \pm E_{\text{add}}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}}$$



三、绕线转子电动机的串级调速

2、串级调速的控制方式

(1) 次同步调速方式 使 E_{add} 的相位与 E_r 相差 180° , 这时转子电流的表达式为
$$I_r = \frac{sE_{r0} - E_{\text{add}}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}}$$

E_{add} 的幅值 $\uparrow \rightarrow$ 转子电流 $I_r \downarrow \rightarrow$ 转矩 $T_e \downarrow \rightarrow$ 转速 $n \downarrow, n < n_1$ 。

(2) 超同步调速方式 使串接的附加电势 E_{add} 与 E_r 同相, 则转子电流 I_r 变为
$$I_r = \frac{sE_{r0} + E_{\text{add}}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}}$$

E_{add} 的幅值 $\uparrow \rightarrow$ 转子电流 $I_r \uparrow \rightarrow T_e$ 也 $\uparrow \rightarrow$ 转速 $n \uparrow$ 。同时, 转差率 $s \downarrow \rightarrow I_r$ 也随之减小, 最终转矩平衡 $T_e = T_L$ 。



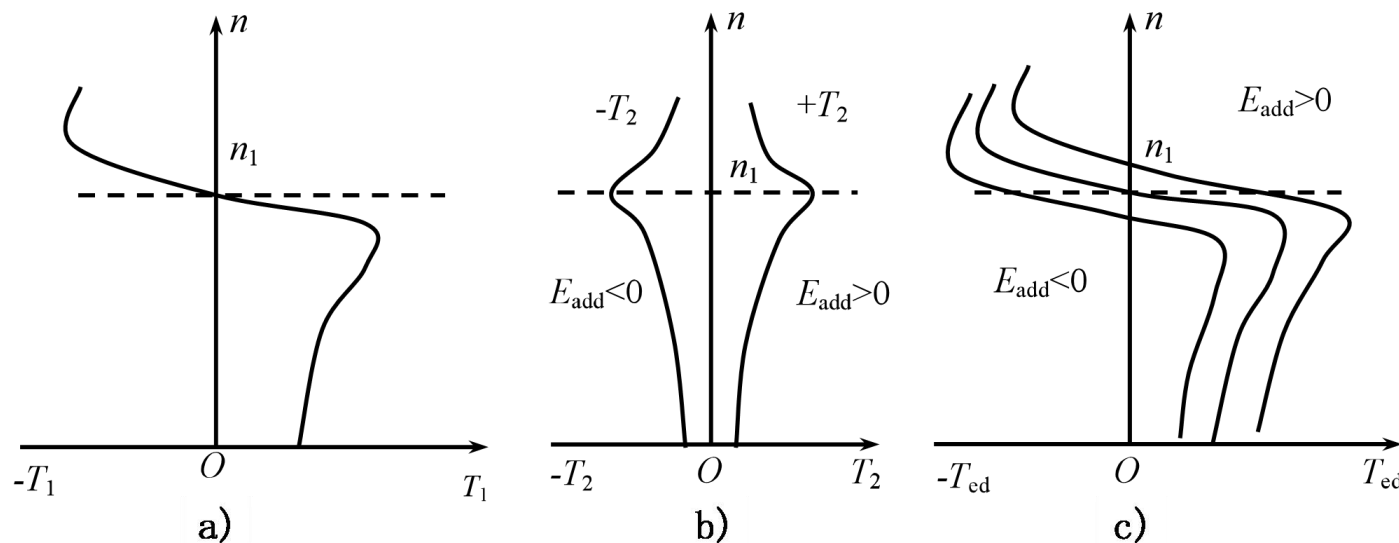
三、绕线转子电动机的串级调速

3、串级调速的机械特性

$$T_{ed} = \frac{2T_m}{(s/s_m) + (s_m/s)} + \frac{2T_m}{(s/s_m) + (s_m/s)} \frac{E'_{add}}{sE'_{r0}} = T_1 + T_2$$

$T_1 = T_e$ 为未串接 E_{add} 时的固有转矩

T_2 为串接 E_{add} 所引起的转子电流分量与旋转磁场相互作用所产生的转矩分量



串级调速时异步电动机的机械特性

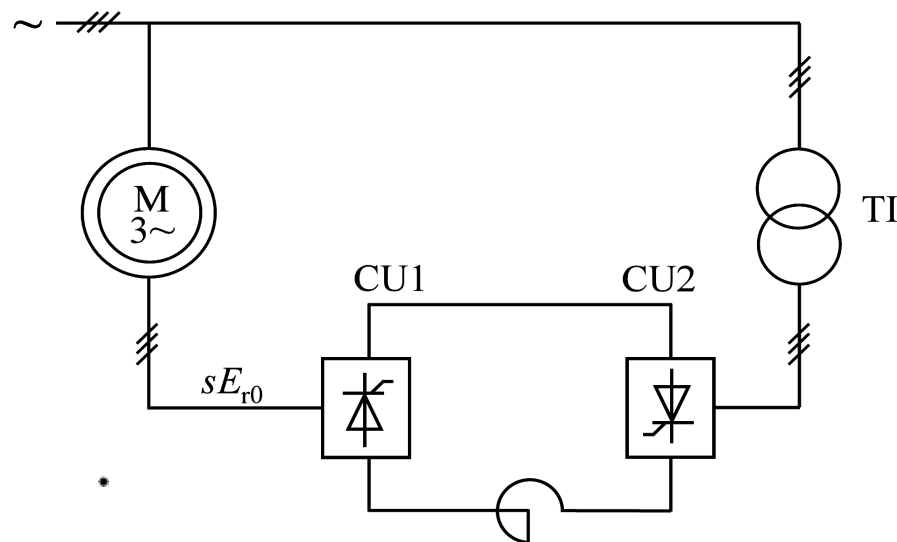
a) $n = f(T_1)$ 曲线 b) $n = f(T_2)$ 曲线 c) $n = f(T_{ed})$ 曲线



三、绕线转子电动机的串级调速

4、串级调速的实现

异步电动机转子中感应电势 sE_{r0} 的频率是随着转速而变化的，在电机调速时 E_{add} 的频率必须随着 sE_{r0} 频率的改变而同步变化。目前 E_{add} 大多采用由电力电子器件组成的变频装置，其具体线路及其控制方式可参阅有关文献。



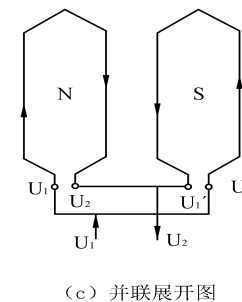
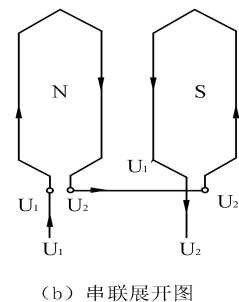
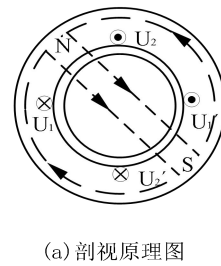
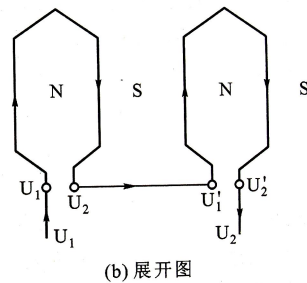
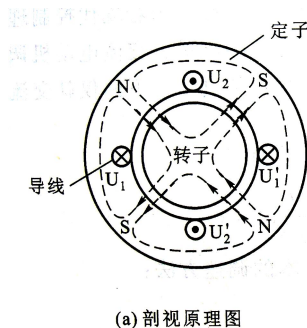
晶闸管串级调速系统结构



小结

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

(1) 改变定子极对数 p 调速



$$n_1 = \frac{60f_1}{n_p} = \frac{60\omega_1}{2\pi n_p} \quad \text{改变 } f_1 \rightarrow \text{改变 } n_1 \xrightarrow{n=(1-s)n_1} \text{改变 } n$$

1、恒转矩变频调速

对恒转矩负载 $\frac{U_1}{U_1'} = \frac{f_1}{f_1'} = \text{常数}$ 此条件下变频调速，电机的主磁通和过载能力不变。

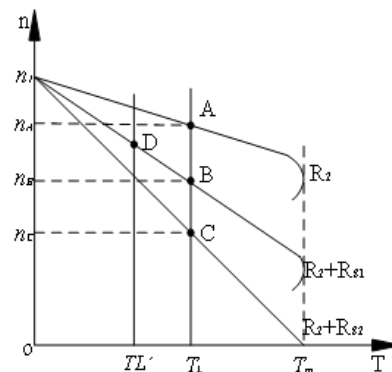
2、恒功率变频调速

对恒功率负载 $P_N = \frac{T_N n_N}{9550} = \frac{T_N' n_N'}{9550} = \text{常数}$ $\frac{T_N'}{T_N} = \frac{n_N}{n_N'} = \frac{f_1}{f_1'}$

得 $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_1'}{\sqrt{f_1'}} = \text{常数}$ 此条件下变频调速，电机的过载能力不变，但主磁通发生变化。

变转差率型调速方法

- 定子调压调速;
- 绕线转子异步电动机转子串电阻调速;
- 串级调速等。



调速

(2) 改变电源频率 f_1 调速

(3) 改变转差率 s 调速