浙江大学电气工程学院

电机与拖动

主讲：卢琴芬

4

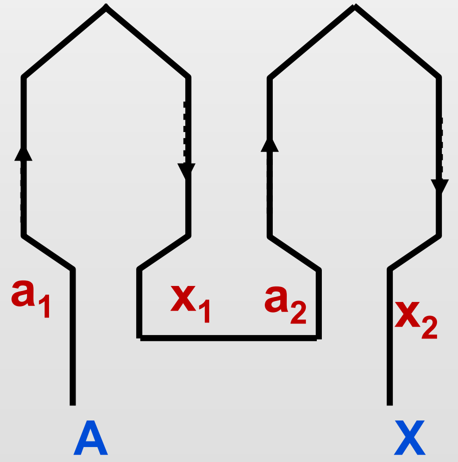
三相感应电动机的调速

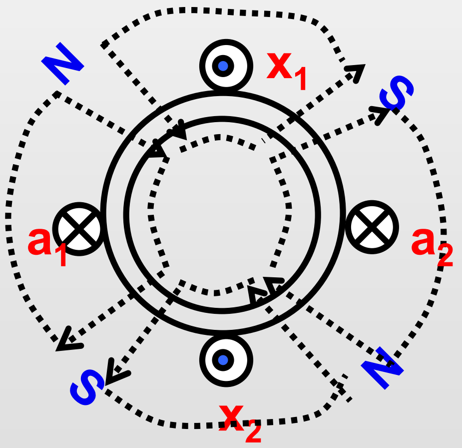
一、感应电动机的变极调速

$$n=(1-S)n_1=\frac{60f_1}{p}(1-S)$$ ⇒ 改变n_1, S ⇒

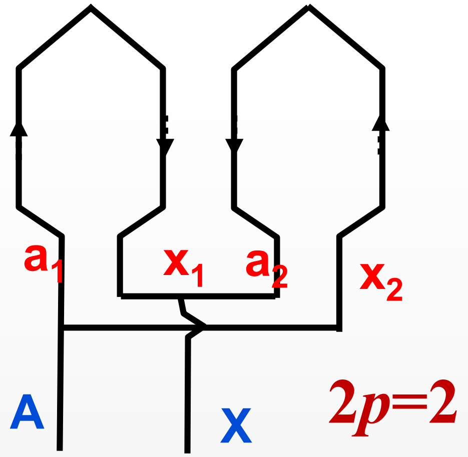
- 改变n_1可改变p, f_1
- 改变S的方法很多：U, r_2等

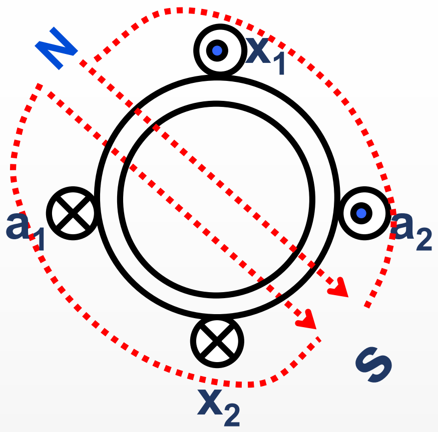
1、变极原理





2*p*=4





只要将两个半相绕组中的一个的电流反向，

电机的极对数就能增加一倍或减少一半

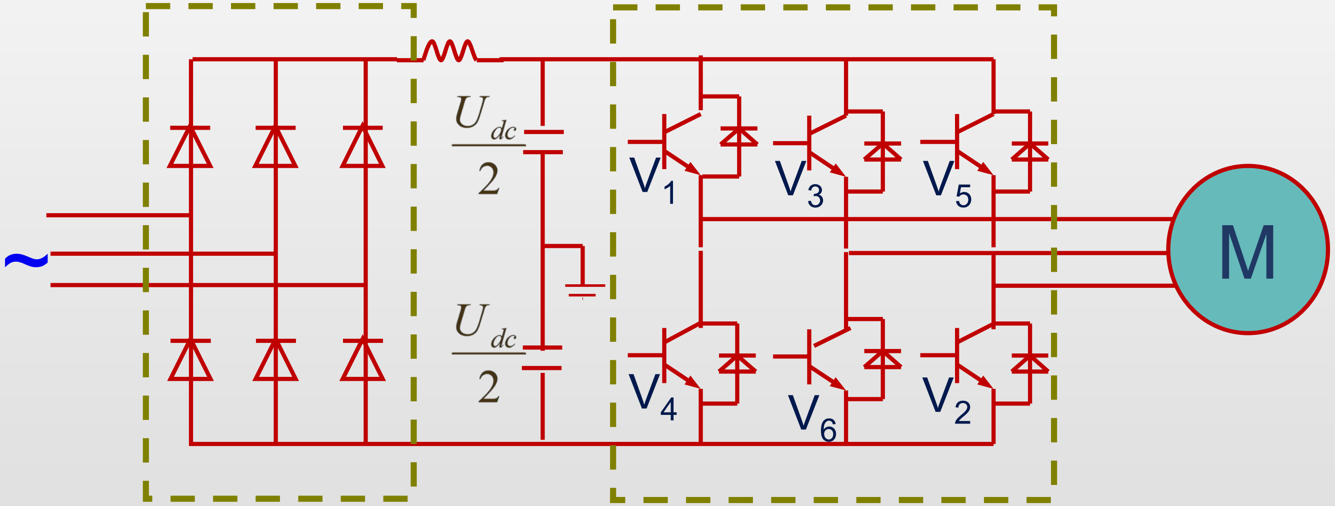
单绕组倍极比的变极原理：2/4,4/8

2、对变极调速的评价

简单可靠，成本低，效率高，机械特性硬，既可适用于恒转矩调速也适用于恒功率调速。

二、感应电动机的变频调速

变频电源 ⇨ **静止变频装置** ⇨ { **交-直-交变频系统** / **交-交变频系统** }



整流 → U_{dc} 逆变 → U_{abc}, f 可调

1、变频调速时的频率与端电压的关系

(1)为使变频时主磁通保持不变，端电压的变化规律

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m$$

$f_1 \downarrow$ 且 $U_1 = c \Rightarrow \Phi_m \uparrow$

使主磁路过分饱和，励磁分量大大增加，功率因数下降，损耗增加，效率降低，负载能力变小

$$\frac{U'}{U_1} = \frac{4.44 f' N_1 k_{w1} \Phi_m}{4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m} = \frac{f'}{f_1} \Rightarrow \frac{U'}{f'} = \frac{U_1}{f_1}$$

(2)为使变频时过载能力保持不变，端电压的变化规律

$$T_m=\frac{pm_1}{4\pi f_1}\frac{U_1^2}{\left[\pm r_1+\sqrt{r_1^2+\left[2\pi f_1\left(L_{1\sigma}+L_{2\sigma}^{'}\right)\right]^2}\right]}$$

$$\text{当}f_1\text{较高时},2\pi f_1\left(L_{1\sigma}+L_{2\sigma}{}'\right)>>r_1$$

$$\therefore T_m=\frac{pm_1}{4\pi f_1}\frac{U_1^2}{2\pi f_1\left(L_{1\sigma}+L_{2\sigma}^{'}\right)}=C\left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2\propto\left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2$$

$$\frac{T_m}{T_N}=\frac{T_m^{'}}{T_N^{'}}\Rightarrow\frac{T_N^{'}}{T_N}=\frac{T_m^{'}}{T_m}=\frac{\left(U_1^{'}/f_1^{'}\right)^2}{\left(U_1/f_1\right)^2}\quad\Longrightarrow\quad\frac{U_1^{'}}{U_1}=\frac{f_1^{'}}{f_1}\sqrt{\frac{T_N^{'}}{T_N}}$$

$T_N^{'}$是$f_1^{'}$时额定转矩(额定电流所对应的转矩),它的大小与负载性质有关

① 恒转矩负载,$T_z=c,T_N^{'}=T_N,\dfrac{U_1^{'}}{f_1^{'}}=\dfrac{U_1}{f_1}=c$

即能保证过载能力不变，又可使主磁通保持不变

变频调速最适合于恒转矩调速

② $\frac{U_1'}{U_1}=\frac{f_1'}{f_1}\sqrt{\frac{f_1}{f_1'}}=\sqrt{\frac{f_1'}{f_1}}$ ⇒ $\frac{U_1'}{\sqrt{f_1'}}=\frac{U_1}{\sqrt{f_1}}=c$

能保证过载能力不变，但主磁通要变

$\frac{U_1'}{f_1'}=\frac{U_1}{f_1}=c$ **能保证主磁通不变，但过载能力要变**

2、变频调速时的机械特性

当f_1比较高时，可以忽略r_1

$$S_m=\frac{r_2'}{2\pi f_1\left(L_{1\sigma}+L_{2\sigma}'\right)} \Rightarrow \Delta n_m=S_m n_1=\frac{r_2'}{2\pi f_1\left(L_{1\sigma}+L_{2\sigma}'\right)}\frac{60 f_1}{p}=\frac{60 r_2'}{2\pi p\left(L_{1\sigma}+L_{2\sigma}'\right)}=c$$

$$\frac{U_1'}{f_1'}=\frac{U_1}{f_1}=c \Rightarrow T_m=c$$

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

$$T_Q = \frac{pm_1U_1^2r_2'}{2\pi f_1\left[(r_1+r_2')^2+(x_{1\sigma}+x_{2\sigma}')^2\right]} \approx \frac{pm_1U_1^2r_2'}{2\pi f_1(x_{1\sigma}+x_{2\sigma}')^2} = \frac{pm_1r_2'}{8\pi^3 f_1(L_{1\sigma}+L_{2\sigma}')^2}\left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 \propto \frac{1}{f}$$

当f_1比较低时，不可以忽略r_1

尽管保持$\frac{U_1'}{f_1'} = \frac{U_1}{f_1} = c$

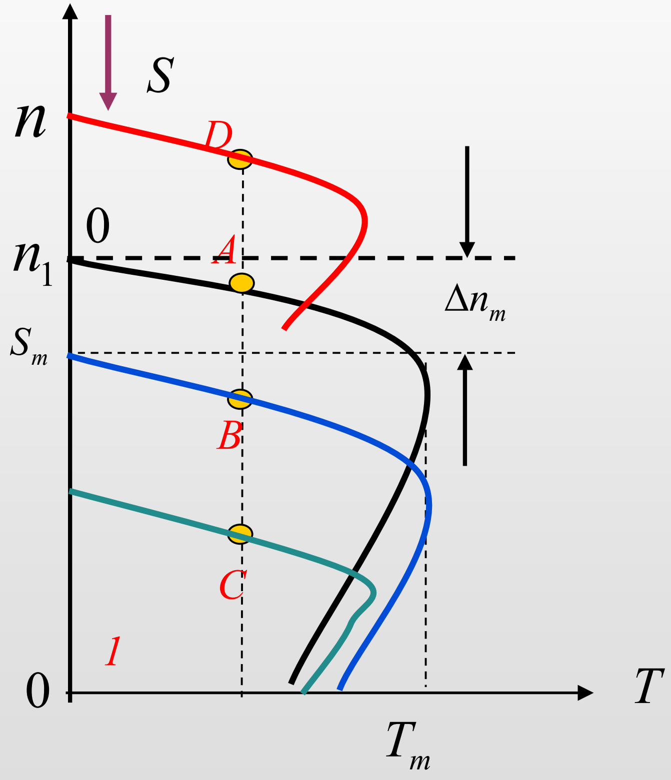
分子降低变化比分母快，则T_m变小

为了不使它下降太多，低速时提高端电压

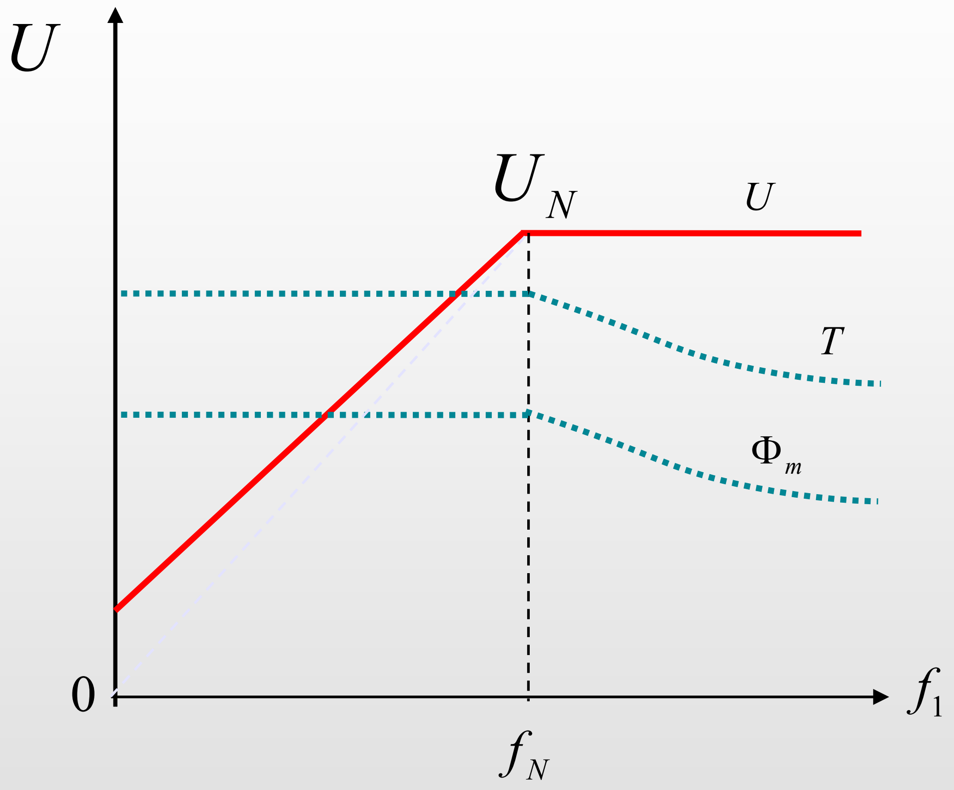
频率升高时，端电压保持不变

则频率大，磁通小，相当于弱磁调速

恒功率调速方式



主讲：浙江大学卢琴芬



保持 Φ_m 不变

$$\frac{U_1}{f_1} = const$$

保持 λ_M 不变

$$\frac{U_1}{f_1} = const$$

(恒转矩负载)

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const$$

(恒功率负载)

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const$$

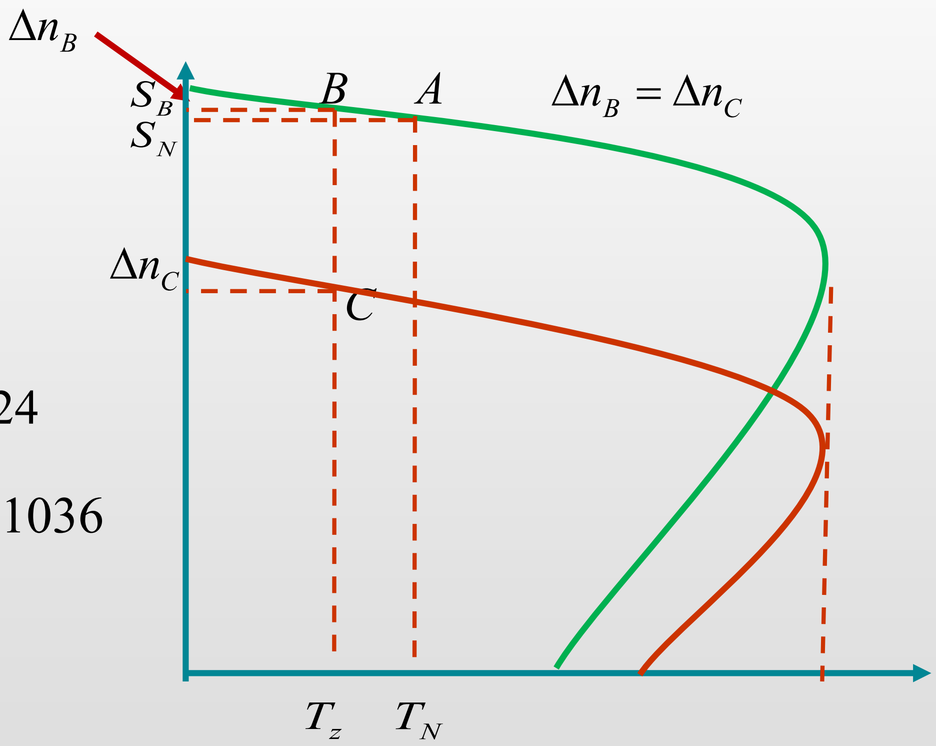
(通风机负载)

5-10

三相四极50Hz笼型感应电动机额定数据如下：$U_N = 380V, I_N = 30A$, $n_N = 1455 r/\min$，现采用变频调速使该$T_z = 0.8T_N$负载的转速降为1000 $r/\min$，并且保持调速前后电机的主磁通不变，试求：

(1)频率 = ?

(2)定子线电压$U1 = ?$



$$\Delta n_N = n_1 - n_N = 1500 - 1455 = 45 \text{ r/min}$$

$$S_N = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03 \text{ r/min}$$

$$S_B / S_N = T_z / T_N = 0.8 \quad \therefore S_B = 0.8 \times S_N = 0.024$$

$$n_1' = n' + \Delta n_C = n' + \Delta n_B = 1000 + 0.024 \times 1500 = 1036$$

$$f' = \frac{pn_1'}{60} = \frac{2 \times 1036}{60} = 34.53 \quad \text{Hz}$$

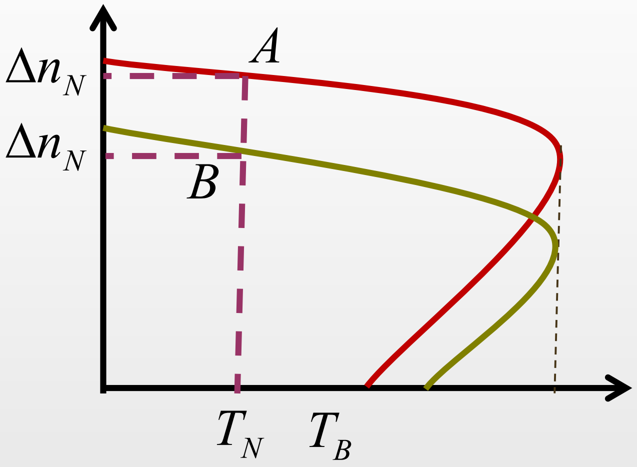
$$\frac{U'}{f'} = \frac{U_1}{f_1} \Rightarrow U' = \frac{U_1}{f_1} \times f' = \frac{380}{50} \times 34.53 = 262.4 \quad \text{V}$$

主讲：浙江大学卢琴芬

三相四极50Hz笼型感应电动机额定数据如下：$U_N=380V, I_N=30A$, $n_N=1455r/min$，该机带恒转矩负载运行于额定数据，现采用变频调速使该负载的转速降为$1000r/min$，并且保持调速前后电机的主磁通不变，试求：

(1)频率＝？

(2)定子线电压$U1=?$



$$\Delta n_N=n_1-n_N=1500-1455=45 \text{ r/min}$$

$$n_1'=n'+\Delta n_N=1000+45=1045 \text{ r/min}$$

$$f'=\frac{pn_1'}{60}=\frac{2\times1045}{60}=34.83 \text{ Hz}$$

$$\frac{U'}{f'}=\frac{U_1}{f_1} \Rightarrow U'=\frac{U_1}{f_1}\times f'=\frac{380}{50}\times34.83=264.708 \text{ V}$$

2、对变频调速的评价

平滑性好，效率高，机械特性硬，调速范围广，只要控制端电压与频率变化的规律，可以适应不同负载的要求。

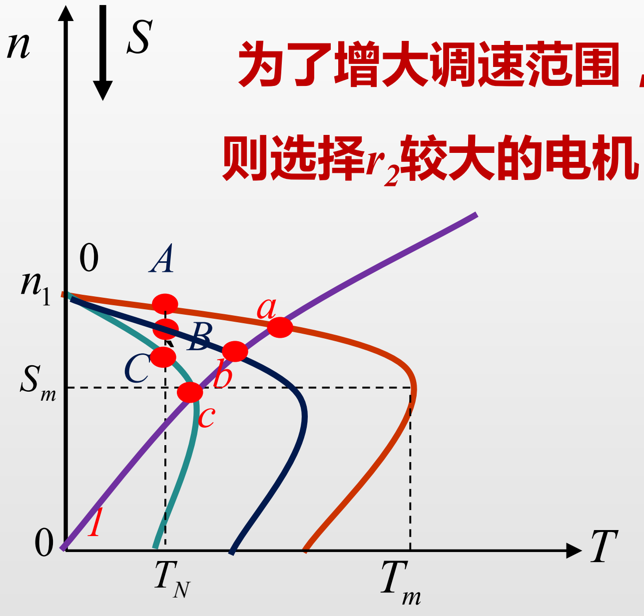
适用于通风机型负载

1.可以运行于曲线段，得到较低的速度

2.降压时，允许输出的功率减小

$$T_L \downarrow = \frac{m_1}{\Omega_1} I_{2N}^{'2} \frac{r_2}{S} \propto \frac{1}{S \uparrow}$$

3.降压时，起动转矩仍可以大于负载转矩。



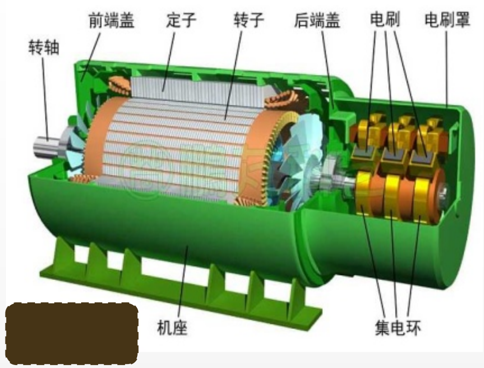
为了增大调速范围，

则选择r_2较大的电机

四、绕线式感应电动机的转子串电阻调速

对变压调速的评价

结构简单，控制方便，价格便宜，调压装置可以兼作起动设备，闭环控制得到较硬的特性。与变极调速配合可以获得较好的调速性能。适用于通风机型负载。

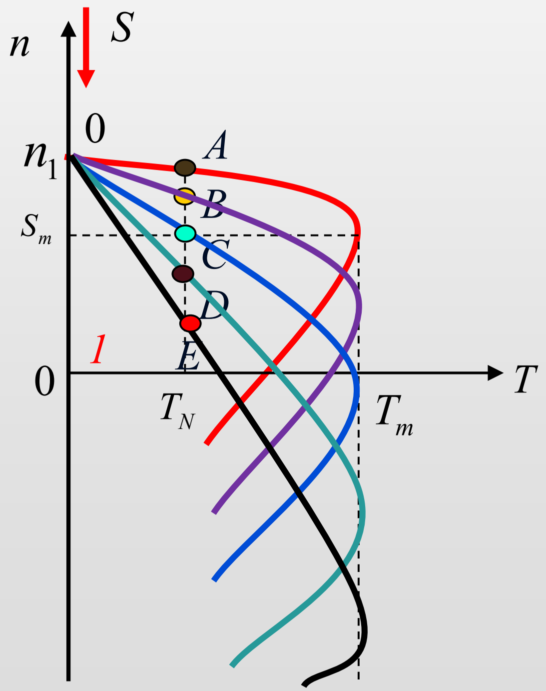


缺点：低速时转子回路的滑差功率大，效率低

1、调速原理

$$I_z = I_{2N}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2+R_\Omega}{S}\right)^2 + x_{2\sigma}^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{S_N}\right)^2 + x_{2\sigma}^2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{r_2+R_\Omega}{S} = \frac{r_2}{S_N}$$



主讲：浙江大学卢琴芬

$$\cos\varphi_2=\frac{\left(\frac{r_2+R_\Omega}{S}\right)}{\sqrt{\left(\frac{r_2+R_\Omega}{S}\right)^2+x_{2\sigma}^2}}=\frac{\left(\frac{r_2}{S_N}\right)}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{S_N}\right)^2+x_{2\sigma}^2}}=\cos\varphi_N$$

$$T=C_{M1}\Phi_m I_2^{'}\cos\varphi_2=C_{M1}\Phi_m I_{2N}^{'}\cos\varphi_{2N}=T_N$$

$$P_M=T\Omega_1=T_N\Omega_1=P_{M(N)}$$

感应电机调速时，$I_z=I_N$保持不变，则$\frac{r_2}{S}$，$\cos\varphi_2$，T，P_M均不变，但$P_\Omega=(1-S)P_M$减小

对转子回路串电阻调速的评价

分级调节，级数不宜太多，平滑性差，特性较软，低速静差度大，调速范围不大，低速时转子铜耗很大，效率低，发热严重

简单方便，投资少，容易实现，电阻可以兼作起动与制动电阻使用

例： 某三相绕线式感应电动机额定数据如下：$P_N=75kW, U_{1N}=380V, I_{1N}=148A, n_N=720r/\min, E_{2N}=213V, I_{2N}=220A, \lambda_M=2.4$。定、转子绕组都是Y接法。拖动恒转矩负载 $T_Z=0.85T_N$ 时，要求电动机运行在 $n=540r/\min$ 。

试求: (1) 若采用转子串电阻调速，每相应串入多大电阻？

解：

$$r_2=\frac{S_N\cdot E_{2N}}{\sqrt{3}I_{2N}}=\frac{0.04\times 213}{\sqrt{3}\times 220}=0.0224(\Omega)$$

$$S_N=\frac{n_1-n_N}{n_1}=\frac{750-720}{750}=0.04$$

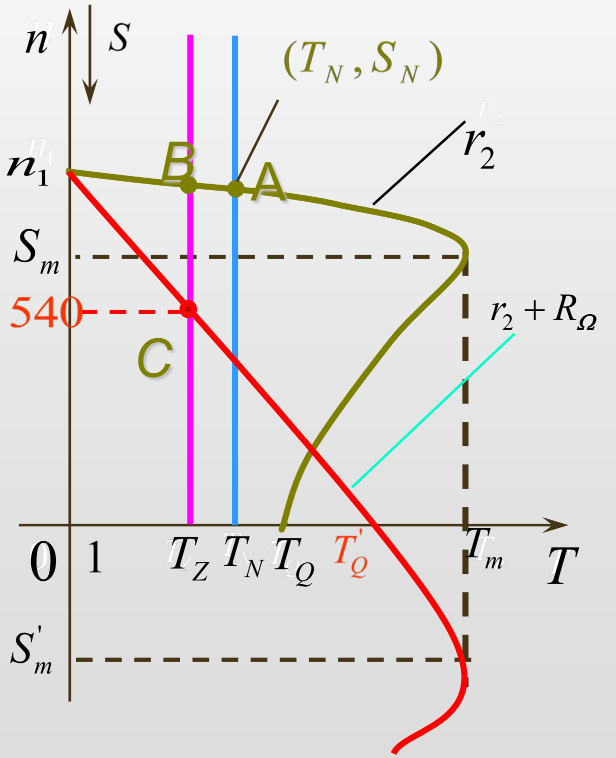
$$S_m=S_N(\lambda_M+\sqrt{\lambda_M^2-1})=0.04(2.4+\sqrt{2.4^2-1})=0.183$$

串电阻后对应 S_m' ，将C点代入机械特性， 得

$$0.85T_N=\frac{2\lambda_M T_N}{\frac{S_C}{S_m'}+\frac{S_m'}{S_C}} \Rightarrow 0.85=\frac{2\times 2.4}{\frac{0.28}{S_m'}+\frac{S_m'}{0.28}}$$

$$\Rightarrow S_m'=\begin{cases}1.53\\ 0.05 \text{ (舍去)}\end{cases}$$

$$\Rightarrow R_\Omega=\left(\frac{S_m'}{S_m}-1\right)r_2=0.165(\Omega)$$



主讲：浙江大学卢琴芬

(2) 若采用调压调速，是否可行？若可行，定子电压应为多少？

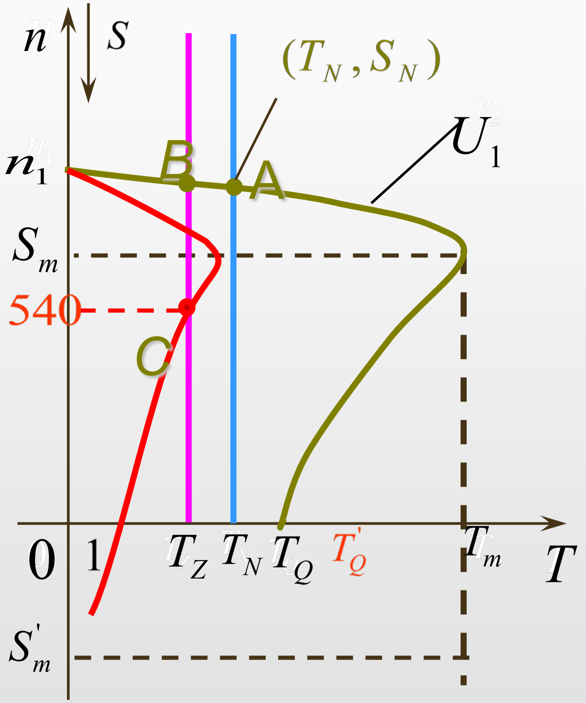
解： $U_1 \downarrow \Rightarrow S_m$ 不变

$$S_m = S_N(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1})$$

$$= 0.04(2.4 + \sqrt{2.4^2 - 1}) = 0.183$$

$$S_C = \frac{750 - 540}{750} = 0.28$$

$S_C > S_m \Rightarrow$ **C点不能稳定运行，故不能采用调压调速。**



注意

对于恒转矩负载，调压调速的调速范围为 $0 < S < S_m$

(3) 若采用变频调速，保持$U/f=c$，频率、定子电压及定子电流各为多少？（I_m不计）

解：

A（S_N,T_N）：$T_N=\dfrac{2T_m}{S_m}\cdot S_N$

B（S_B,0.85T_N）：$0.85T_N=\dfrac{2T_m}{S_m}\cdot S_B$

➡ $S_B=0.85S_N=0.034$

➡ $\Delta n_B=S_B\cdot n_1=0.034\times750=25.5(r/\min)$

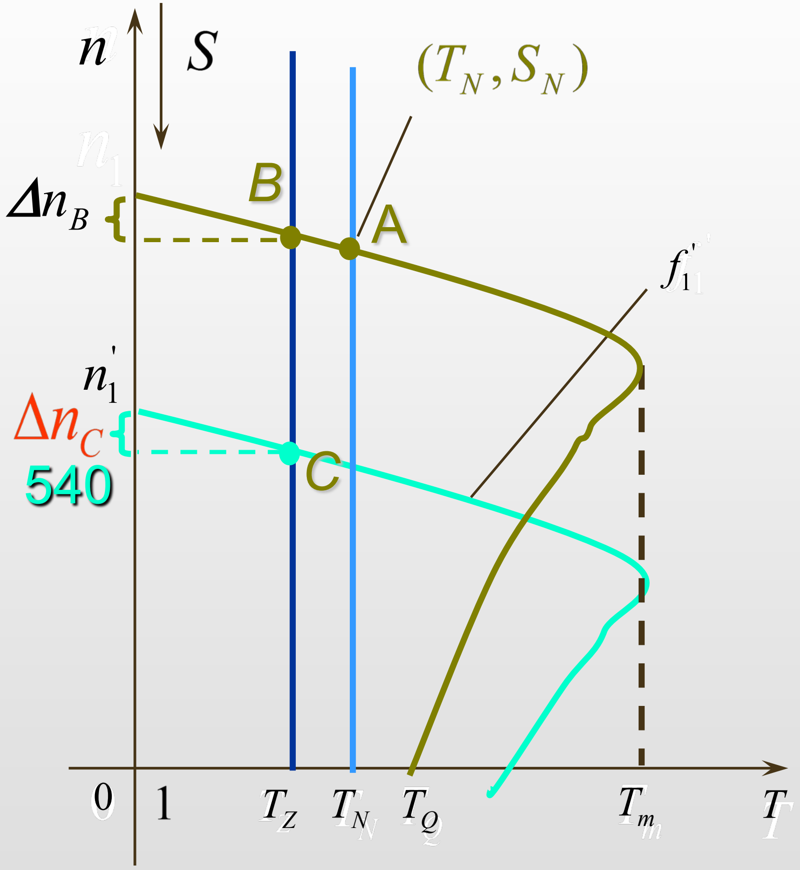
由平行特性：$\Delta n_C=25.5(r/\min)$

➡ $n_1^{'}=n_C+\Delta n_C=540+25.5=565.5(r/\min)$

➡ $f_1^{'}=\dfrac{pn^{'}}{60}=\dfrac{4\times565.5}{60}=37.7(Hz)$

由U/f=const

➡ $U_1^{'}=\dfrac{U_N}{f_N}\cdot f_1^{'}=\dfrac{380}{50}\times37.7=286.5(V)$



主讲：浙江大学卢琴芬

(3) 若采用变频调速，保持U/f =c，频率、定子电压及定子电流各为多少？（I_m不计）

I_m不计，则有 $I_1 = I_2'$

由 $$T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{1}{\Omega_1} m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{S} = \frac{1}{\Omega_1} m_1 I_1^2 \frac{r_2'}{S}$$

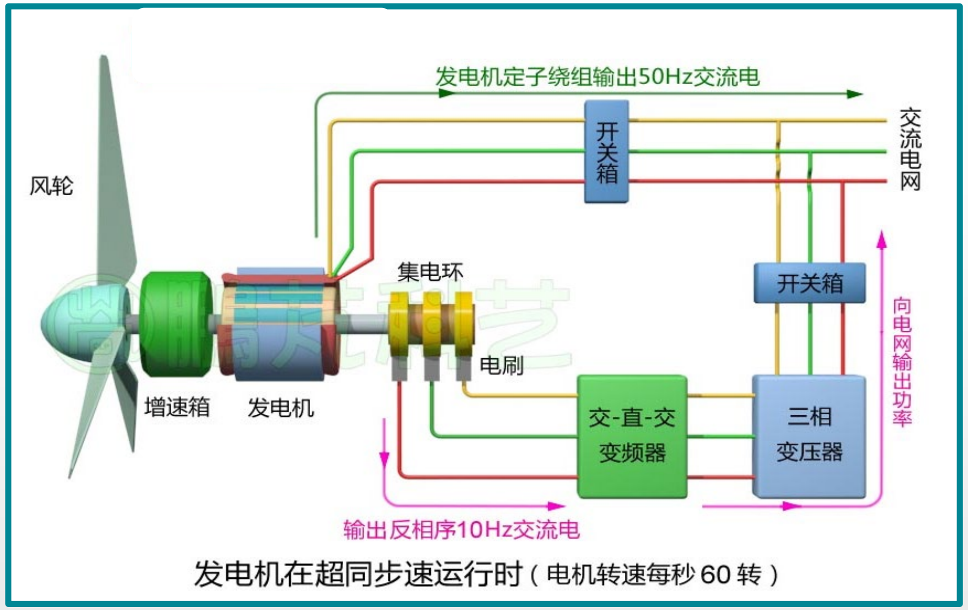
C点： $$T_C = \frac{1}{\Omega_1'} m_1 I_{1C}^2 \frac{r_2'}{S_C} \qquad S_C = \frac{n_1' - n_C}{n_1'} = \frac{565.5 - 540}{565.5} = 0.045$$

A点： $$T_A = \frac{1}{\Omega_1} m_1 I_{1N}^2 \frac{r_2'}{S_N} \qquad S_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 720}{750} = 0.04$$

$$\frac{T_C}{T_A} = \frac{f_N}{f_1'} \cdot \left(\frac{I_{1C}}{I_{1N}}\right)^2 \cdot \frac{S_N}{S_C} = 0.85$$

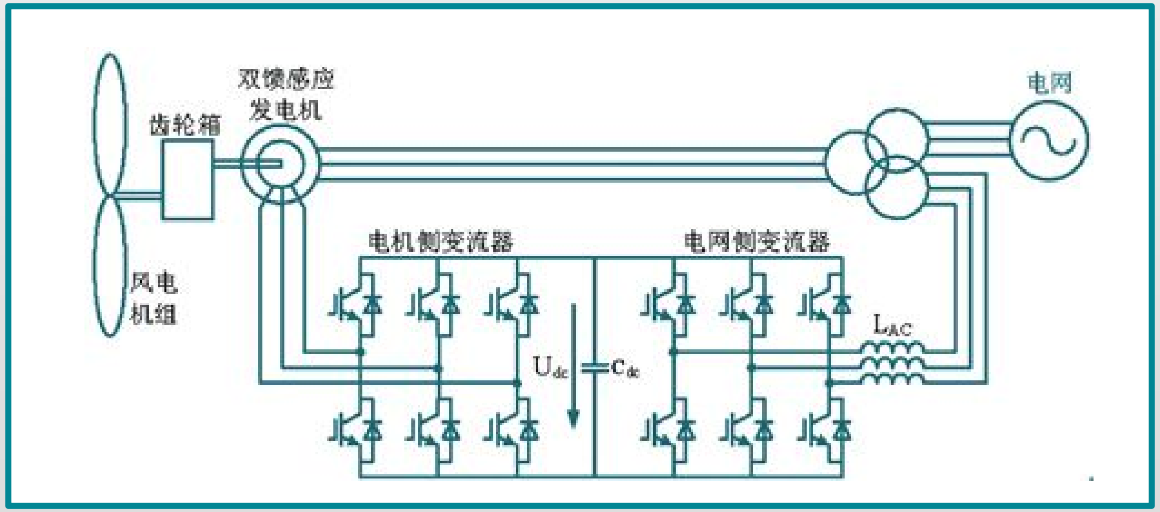
$$I_{1C} = I_{1N}\sqrt{0.85 \times \frac{f_1'}{f_N} \times \frac{S_C}{S_N}} = 148\sqrt{0.85 \times \frac{37.7}{50} \times \frac{0.045}{0.04}} = 125.7(A)$$

绕线式感应电机串级调速*

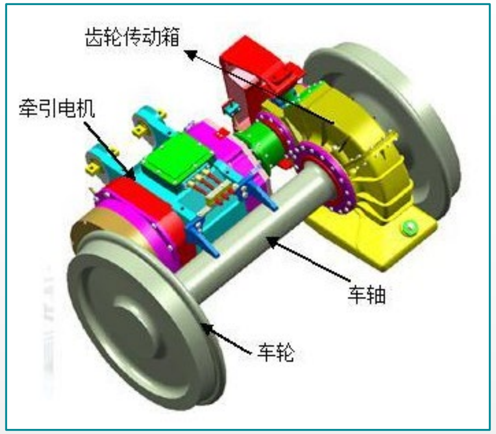


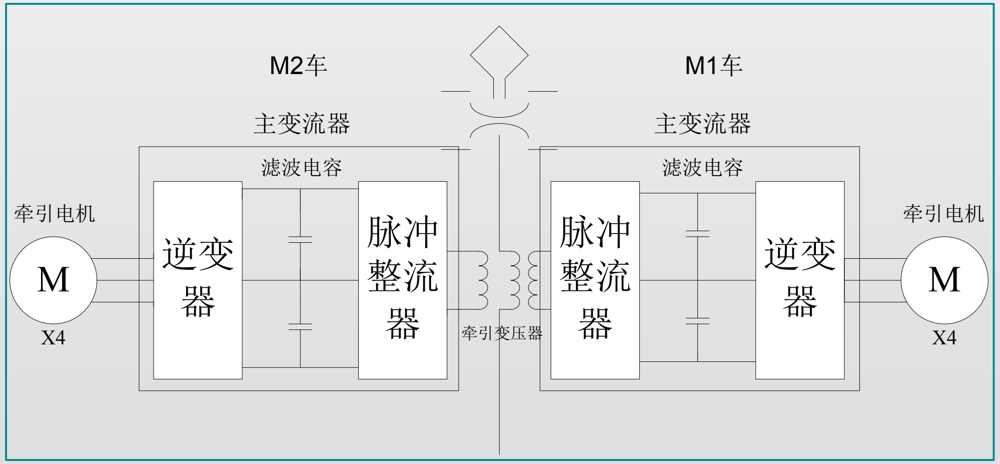
$$I_{2s}=\frac{E_{2s}}{\sqrt{(r_2+R_\Omega)^2+(Sx_{2\sigma})^2}}$$

$$I_{2s}=\frac{E_{2s}+E_f}{\sqrt{{r_2}^2+(Sx_{2\sigma})^2}}$$



三相感应电机拖动系统的应用





浙江大学电气工程学院

T H A N K S

主讲：浙江大学卢琴芬