



浙江大学电气工程学院

电机与拖动

主讲：卢琴芬

3

三相感应电动机的制动

一、感应电动机的反接制动

1. 转向反向的反接制动

类似于他励直流电动机的电动势反向反接制动，适用于将重物匀速下放。

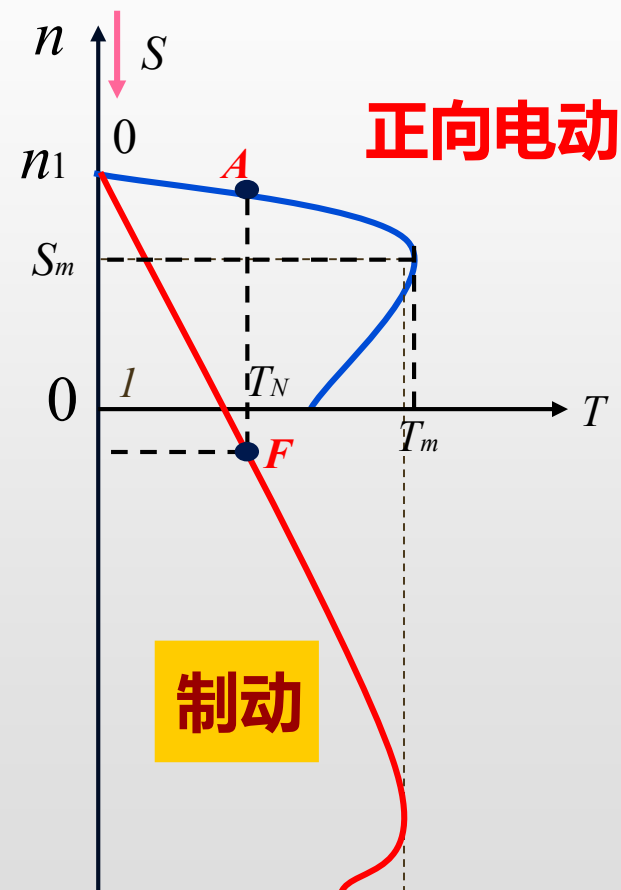
固有特性A点：正向电动，以 n_A 速度升高

串电阻特性F点：反向制动，以 n_F 速度下降

负载转矩 T_z 是驱动作用，
电磁转矩 T 是制动作用

1 工作点转速与同步转速 n_1 相反 $S > 1$

2 从能量来看



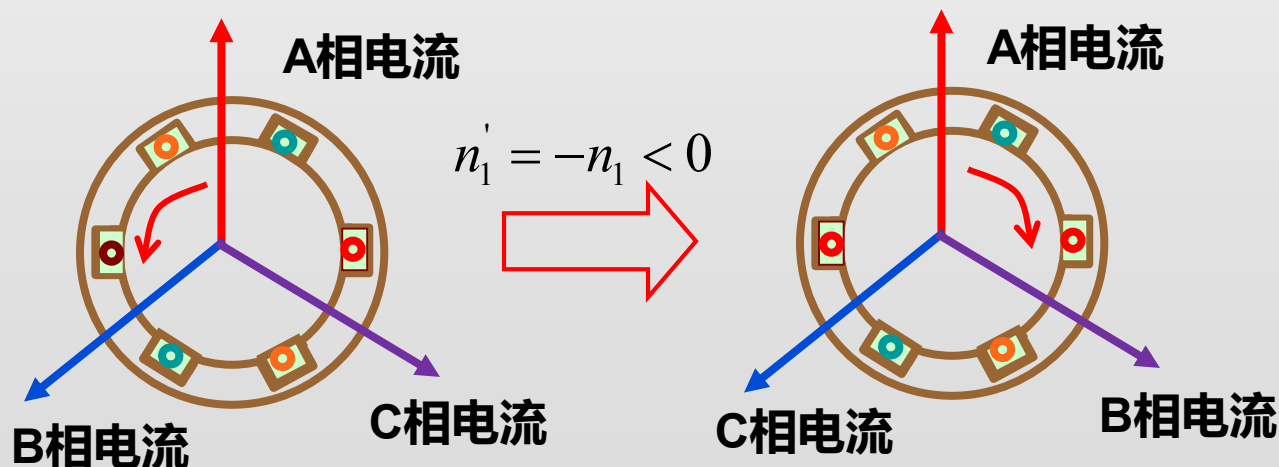
$$\begin{aligned}
 P_M &= m_1 I_2'^2 \frac{r_2' + R_\Omega'}{S} > 0 \\
 P_\Omega &= (1-S)P_M < 0
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} P_M &= m_1 I_2'^2 \frac{r_2' + R_\Omega'}{S} > 0 \\ P_\Omega &= (1-S)P_M < 0 \end{aligned}} \right\} \Rightarrow
 \begin{aligned}
 P_{cu2} &= m_1 I_2'^2 (r_2' + R_\Omega') \\
 &= m_1 I_2'^2 \frac{(r_2' + R_\Omega')}{S} - m_1 I_2'^2 \frac{(1-S)}{S} (r_2' + R_\Omega') \\
 &= P_M - P_\Omega = P_M + |P_\Omega|
 \end{aligned}$$


 电动机一方面从电网吸收电功率(P_M)，另一方面从轴上输入机械功率 P_Ω ，两者全部消耗为转子回路的铜耗

2. 定子两相对调的反接制动

类同于他励直流电动机的电压反向反接制动，适用于使反抗性负载快速停机

(1) 感应电动机定子两相对调后的机械特性



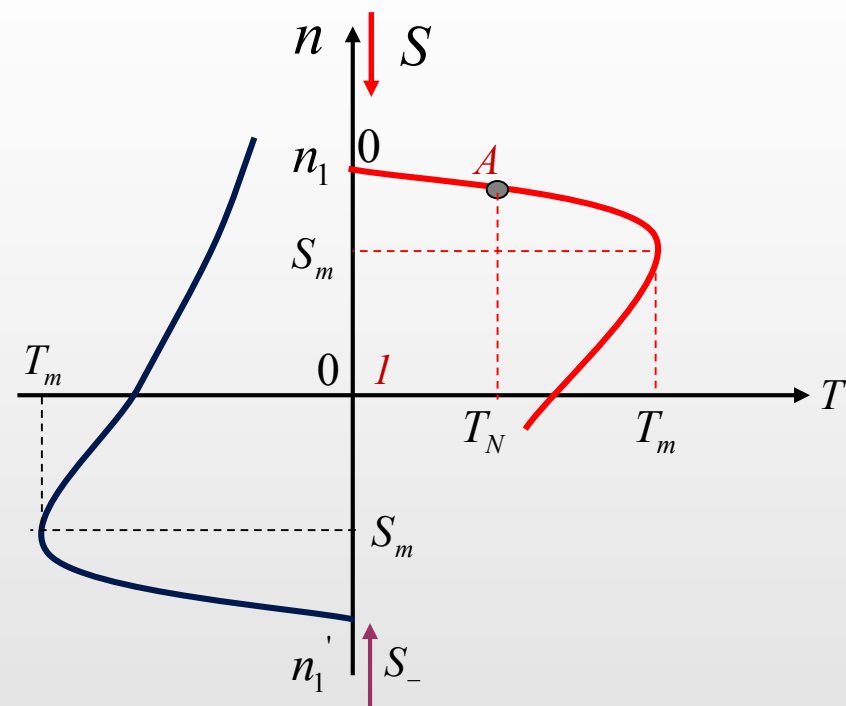
$$\left\{ \begin{array}{l} n_1' = -n_1 < 0 \\ T = -\frac{m_1}{\Omega_1} \frac{U_1^2 \frac{r_2'}{S_-}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S_-}\right)^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2} \\ T = -\frac{2T_m}{\frac{S_-}{S_m} + \frac{S_m}{S_-}} \\ T = -(2T_m / S_m) S_- \end{array} \right.$$

正向电动的值

参数表达式

实用表达式

直线表达式



串电阻后的实用表达式

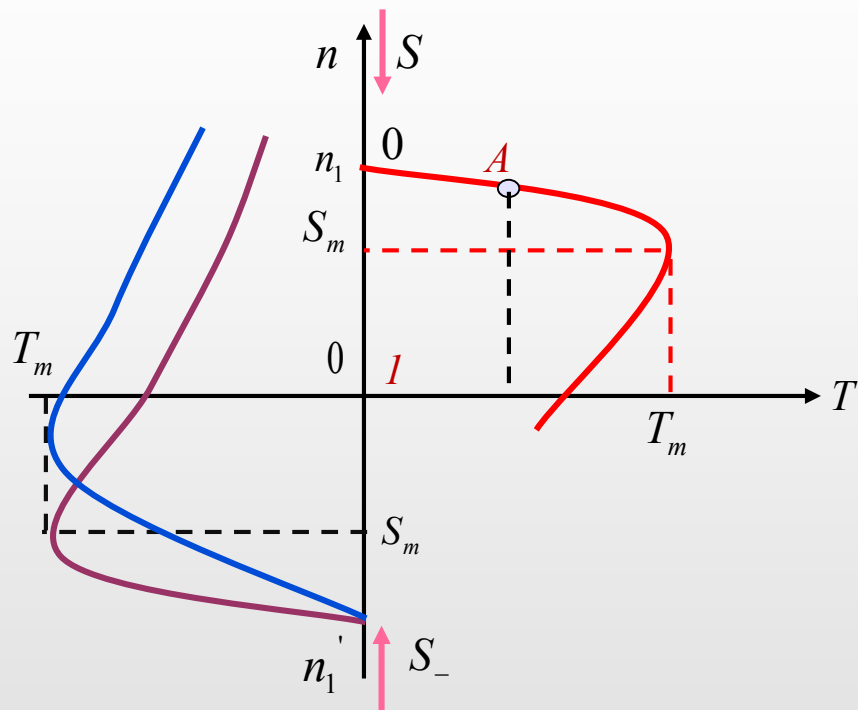
$$T = -\frac{2T_m}{\frac{S_-}{S'_m} + \frac{S_m}{S_-}}$$

$$S'_m = (1 + R_\Omega / r_2) \bullet S_m$$

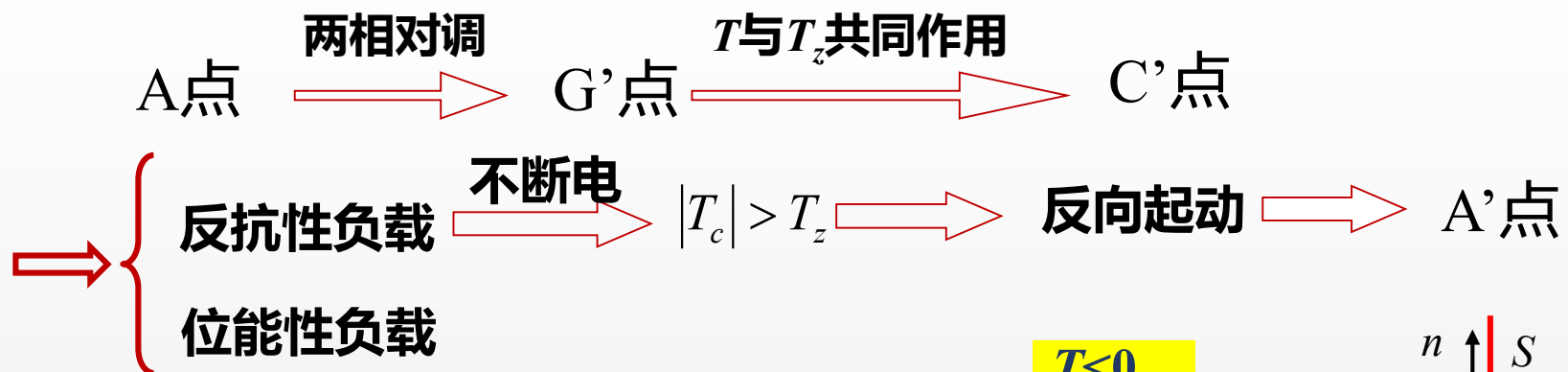
串电阻后的直线段表达式

$$T = -\frac{2T_m}{S'_m} S_-$$

$$S'_m = (1 + R_\Omega / r_2) \bullet S_m$$

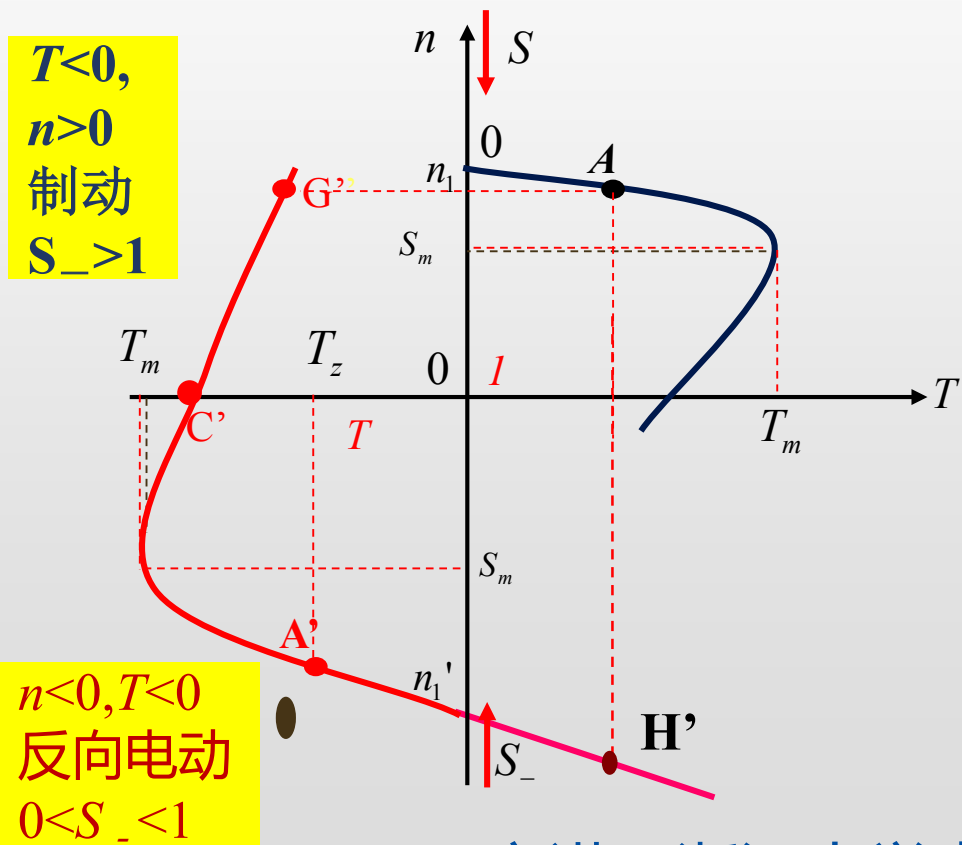


(2)感应电动机定子两相对调后的物理过程



第二象限是反接制动状态

$$\left. \begin{array}{l} S_- > 1 \\ E_{2S_-} > E_2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} I_1, I_2 \downarrow, \text{制动 } T \uparrow \\ \text{串 } R_\Omega \end{array}$$



三相绕线式感应电机

例5-7 $P_N = 60\text{kW}$, $U_{1N} = 380\text{V}$, $I_{1N} = 133\text{A}$, $n_N = 577\text{r/min}$,
 $E_{2N} = 253\text{V}$, $I_{2N} = 160\text{A}$, $\lambda_M = 2.5$ 。定转子绕组都Y接法。求:(1)采用反接制动, 使位能性负载 $T_z = 0.8T_N$ 以 $n = 150\text{r/min}$ 稳速下放, 应在转子中串入 $R_\Omega = ?$

解

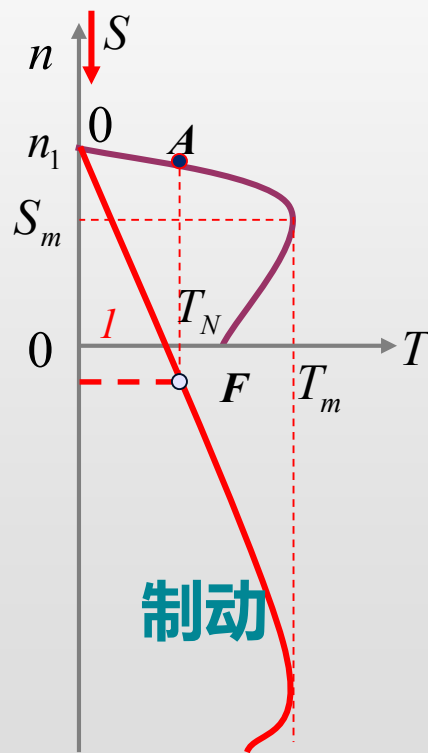
$$S_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{600 - 577}{600} = 0.0383$$

$$r_2 = \frac{E_{2S\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{S_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = 0.035\Omega$$

$$S_m = S_N (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) = 0.0383 (2.5 + \sqrt{2.5^2 - 1}) = 0.183$$

$$n = -150\text{r/min}, S = \frac{600 - (-150)}{600} = 1.25$$

串电阻后的特性, 经过F点 $(1.25, 0.8T_N)$



$$0.8T_N = \frac{2 \times 2.5T_N}{\frac{1.25}{S'_m} + \frac{S'_m}{1.25}} \Rightarrow S'_m = \begin{cases} 0.203 < S = 1.25, \text{舍去} \\ 7.61 \end{cases}$$

$$R_\Omega = \left(\frac{S'_m}{S_m} - 1 \right) r_2 = \left(\frac{7.61}{0.183} - 1 \right) \times 0.035 = 1.42\Omega$$

机械特性的直线段表达式

$$0.8T_N = \frac{2T'_m}{S'_m} S = \frac{2 \times 2.5T_N}{S'_m} \times 1.25 \Rightarrow S'_m = 7.81$$

$$S_m = 2S_N \lambda_M = 0.0383 \times 2.5 = 0.193$$

$$R_\Omega = \left(\frac{S'_m}{S_m} - 1 \right) r_2 = \left(\frac{7.81}{0.193} - 1 \right) \times 0.035 = 1.39\Omega$$

(2) 定子两相反接制动，要求制动瞬间 $T = 1.2T_N$ ，应在转子中串入 $R_\Omega = ?$

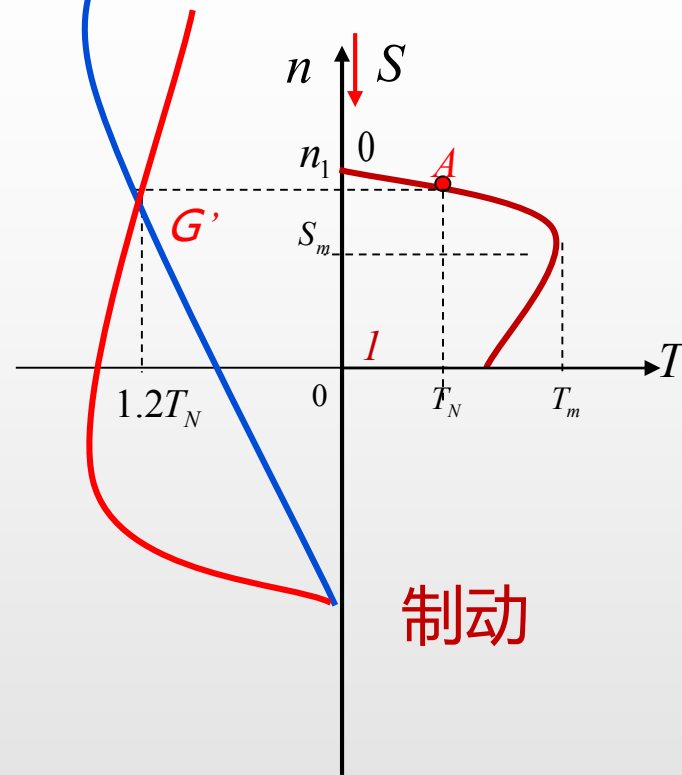
$$n = n_N \Rightarrow S_- = \frac{n_1' - n}{n_1'} = \frac{-600 - 577}{-600} = 1.96$$

经过 $(1.96, -1.2T_N)$

$$-1.2T_N = -\frac{2 \times 2.5T_N}{\frac{1.96}{S_m'} + \frac{S_m'}{1.96}} \Rightarrow S_m' = \begin{cases} 0.5 \\ 7.67 \end{cases}$$

$$R_\Omega = \left(\frac{S_m'}{S_m} - 1 \right) r_2 = \left(\frac{0.5}{0.183} - 1 \right) \times 0.035 = 0.06\Omega$$

$$R_\Omega = \left(\frac{S_m'}{S_m} - 1 \right) r_2 = \left(\frac{0.7.67}{0.183} - 1 \right) \times 0.035 = 1.43\Omega$$



两个解 {
 曲线段: 平均制动转矩大, 停机时间短。
 直线段: 阻值大, 电流冲击小

二、感应电动机的回馈制动

1. 感应电动机的发电运行状态

$$\text{当 } |n| > |n_1| \quad S = \frac{n_1 - n}{n_1} < 0$$

$$I'_{2a} = I'_2 \cos \varphi_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + x'^2_{2\sigma}}} \cdot \frac{r'_2/S}{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + x'^2_{2\sigma}}} = \frac{E'_2 r'_2 / S}{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + x'^2_{2\sigma}} < 0$$

$$I'_{2r} = I'_2 \sin \varphi_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + x'^2_{2\sigma}}} \cdot \frac{x'_{2\sigma}}{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + x'^2_{2\sigma}}} = \frac{E'_2 x'_{2\sigma}}{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + x'^2_{2\sigma}} > 0$$

$$90^\circ < \varphi_2 < 180^\circ \quad 90^\circ < \varphi_1 < 180^\circ$$

$$T = m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2 / \Omega_1 \xrightarrow{S < 0} \cos \varphi_2 < 0, T < 0 \Rightarrow \text{制动}$$

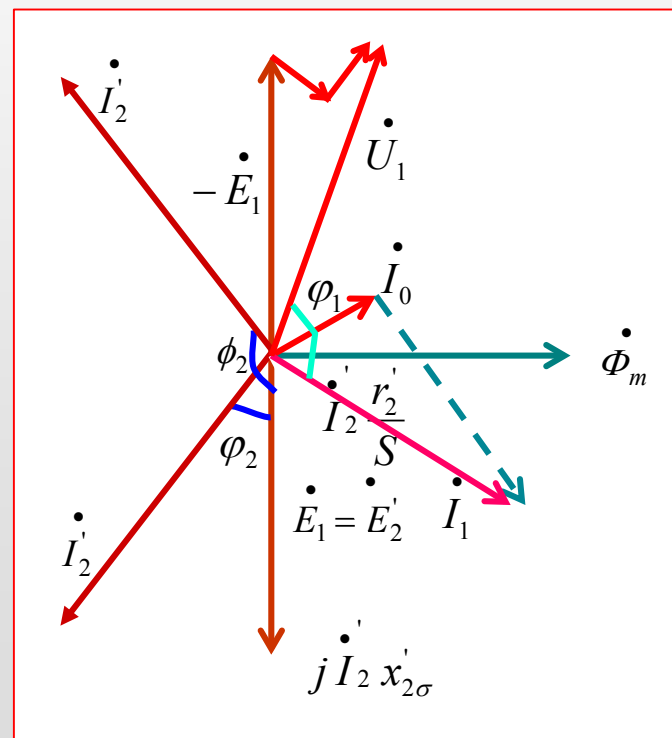
$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 < 0 \quad \text{把轴上输入的机械功率转化为电功率返回电网}$$

$$P_M = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{S} < 0$$

$$P_\Omega = (1 - S) P_M < 0$$

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1 > 0$$

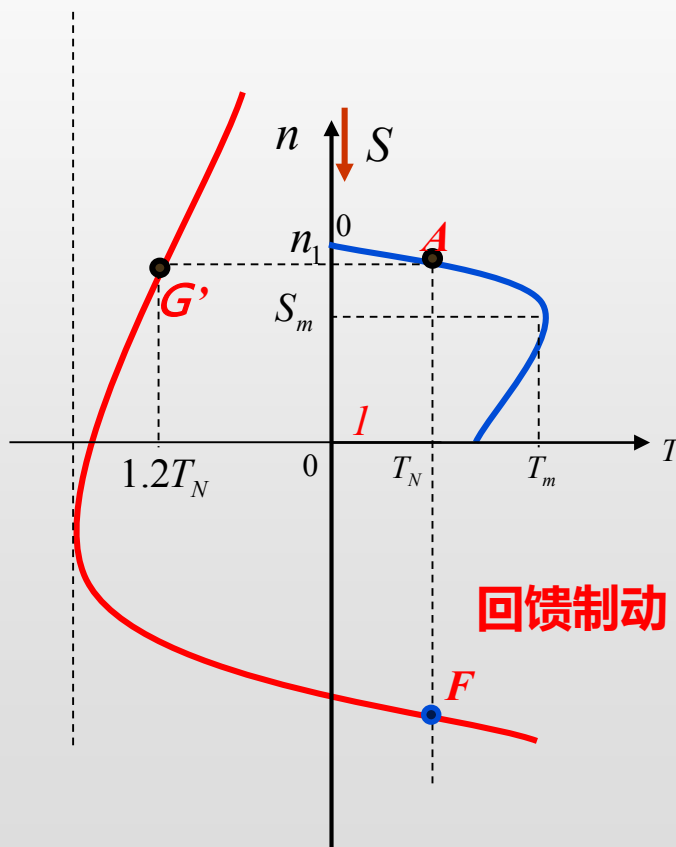
从电网吸取无功功率，建立磁场。



2. 感应电动机回馈制动的实现

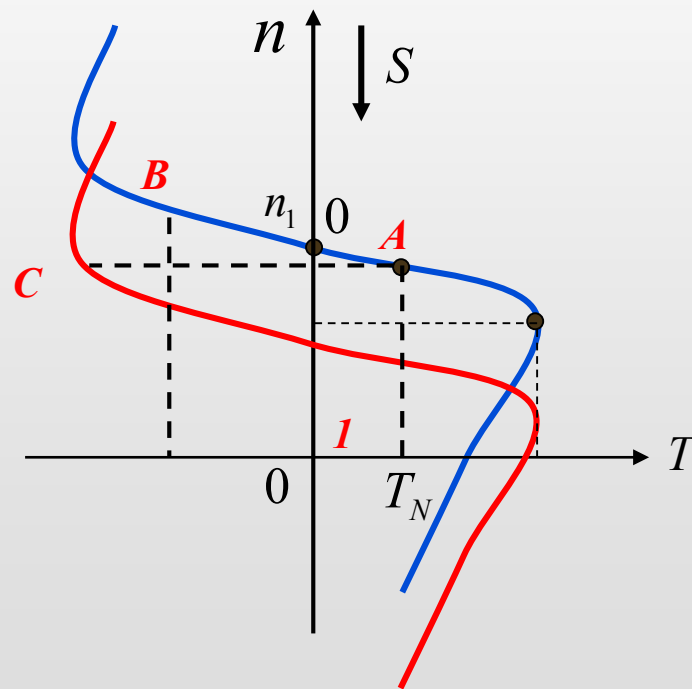
(1) 转向反向的回馈制动

定子两相对调



(2) 转向不变的回馈制动

电车下坡或变级调速或变频调速

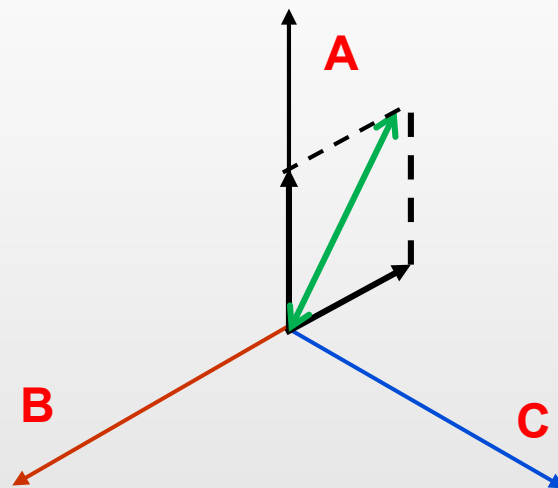
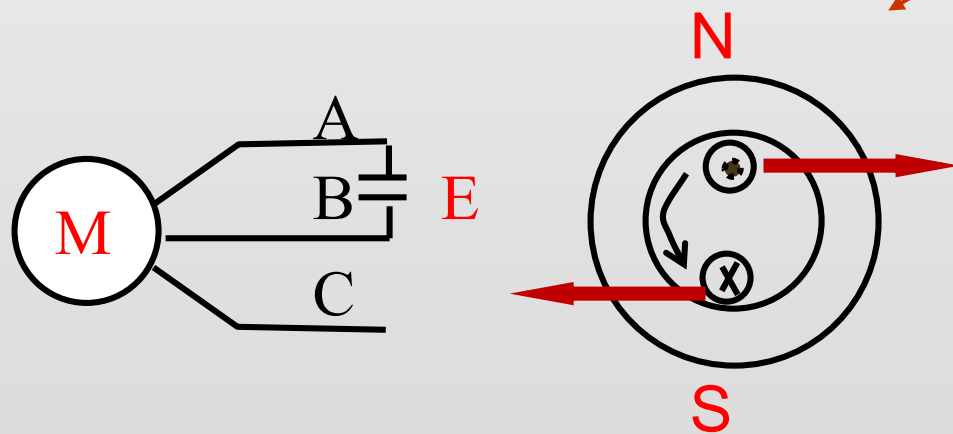


三、感应电动机的能耗制动

制动时，定子绕组脱离交流电网，而通入一个直流电，形成固定磁场，旋转的转子切割磁场，产生制动转矩，可使反抗性负载准确停机，也能使位能性负载匀速下放。

$$F_{A1} = F_{B1} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_C$$

$$F_{\Sigma} = 2F_{A1} \cos 30^\circ = \sqrt{3} \times \frac{2}{\pi} \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_C$$





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