

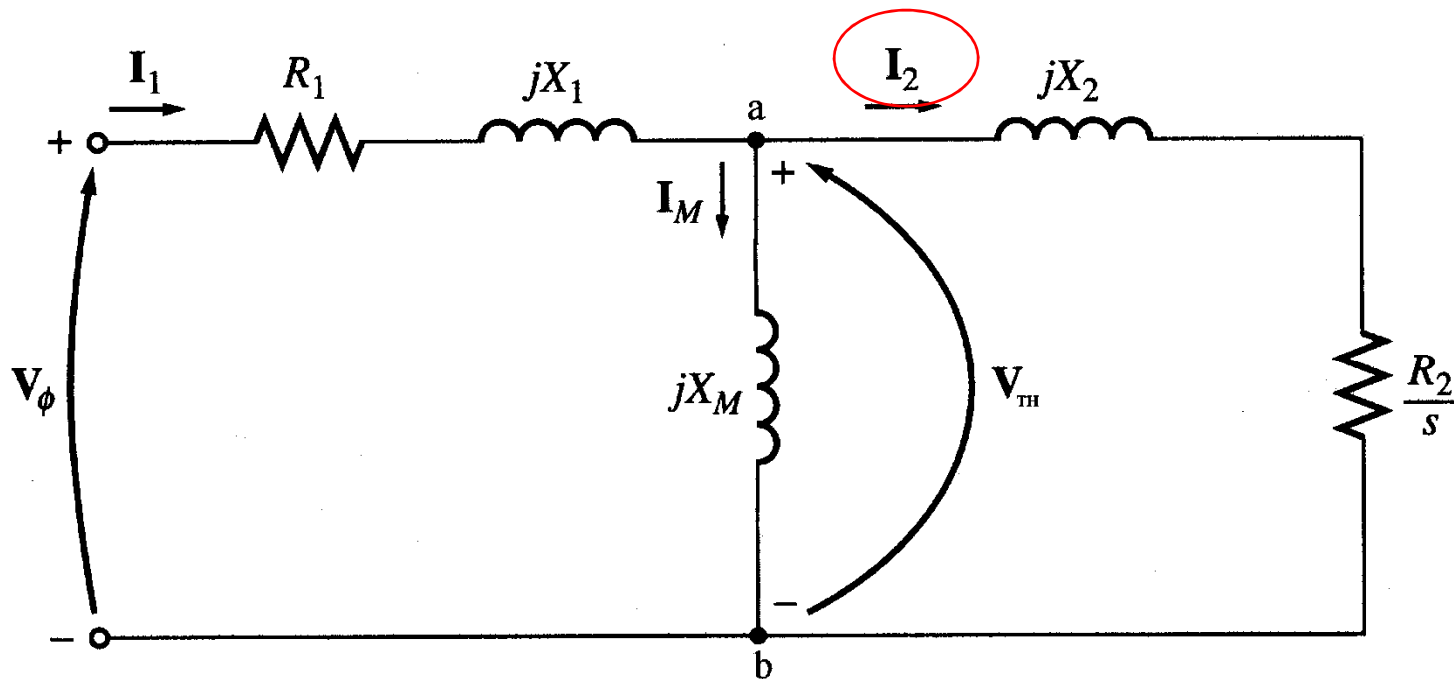
ادامه فصل پنجم: ماشینهای القای

موتور القایی

❖ استخراج رابطه گشتاور- سرعت در موتور القایی

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_m} = \frac{P_{\text{AG}}}{\omega_{\text{sync}}}$$

$$P_{\text{AG}} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

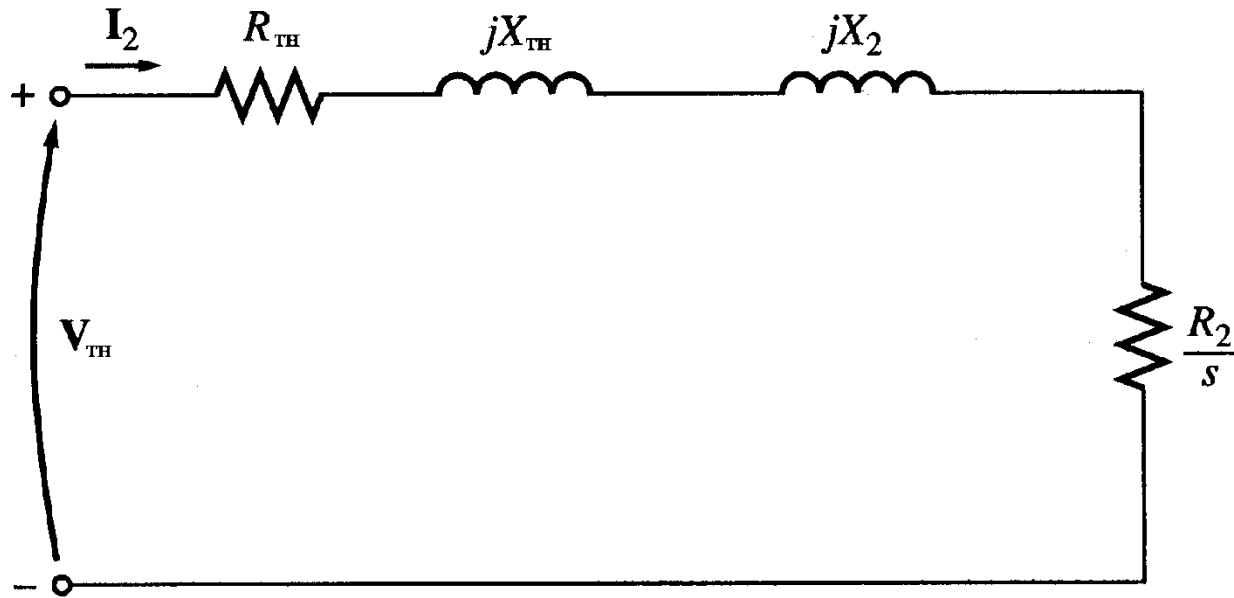


موتور القایی

❖ استخراج رابطه گشتاور- سرعت در موتور القایی

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{jX_M}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad |V_{TH}| = |V_{\phi}| \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}}$$

$$R_{TH} + jX_{TH} = (R_1 + jX_1) // jX_M \quad \mathbf{Z}_{TH} = \frac{jX_M (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)}$$



موتور القایی

❖ استخراج رابطه گشتاور- سرعت در موتور القایی

❖ $X_M \gg X_1$ and $X_M \gg R_1$

$$V_{TH} \approx V_{\phi} \frac{X_M}{X_1 + X_M}$$

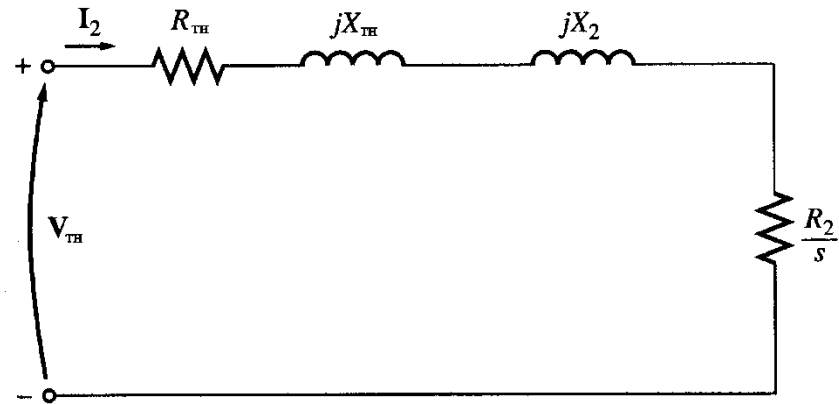
❖ $X_M \gg X_1$ and $X_M + X_1 \gg R_1$

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2$$

$$X_{TH} \approx X_1$$

موتور القایی

❖ استخراج رابطه گشتاور - سرعت در موتور القایی

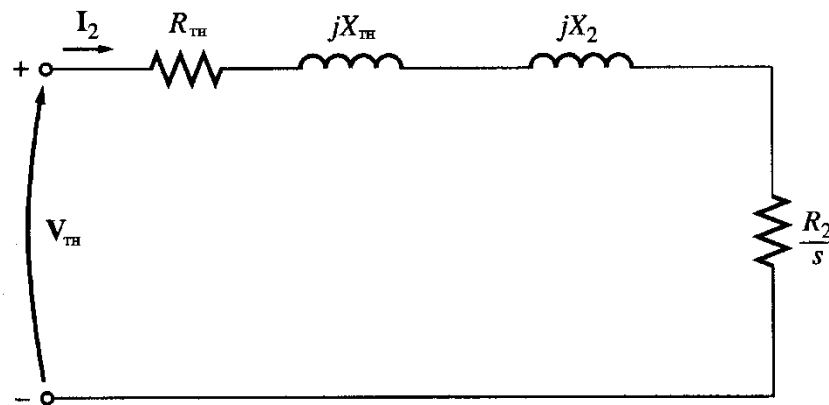


$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} = \frac{\vec{V}_{TH}}{R_{TH} + R_2 / s + jX_{TH} + jX_2}$$

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2 / s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

موتور القایی

❖ استخراج رابطه گشتاور - سرعت در موتور القایی

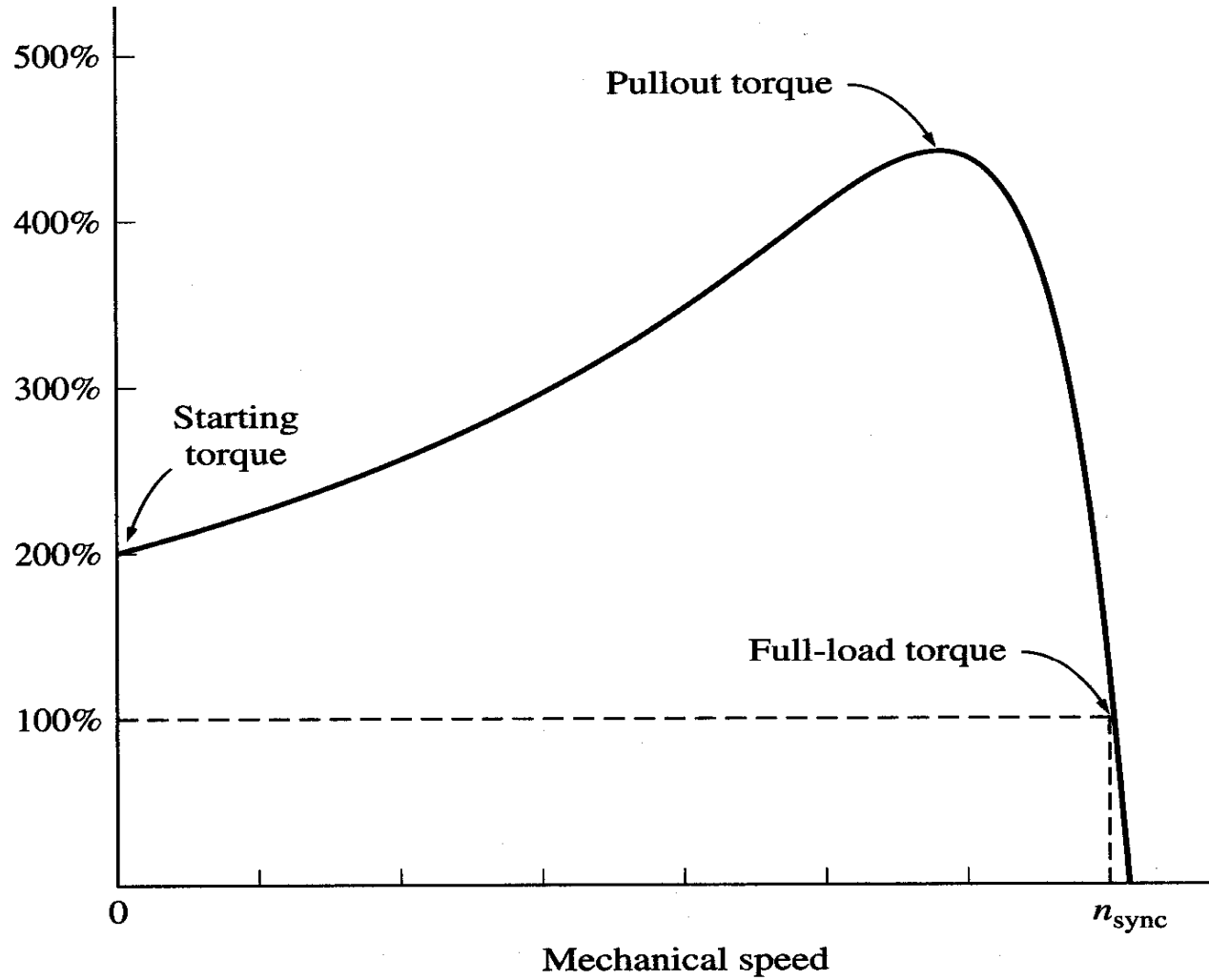


$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} = \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{s}}{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_{sync} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]}$$

موتور القای

❖ منحنی گشتاور - سرعت موتور القایی

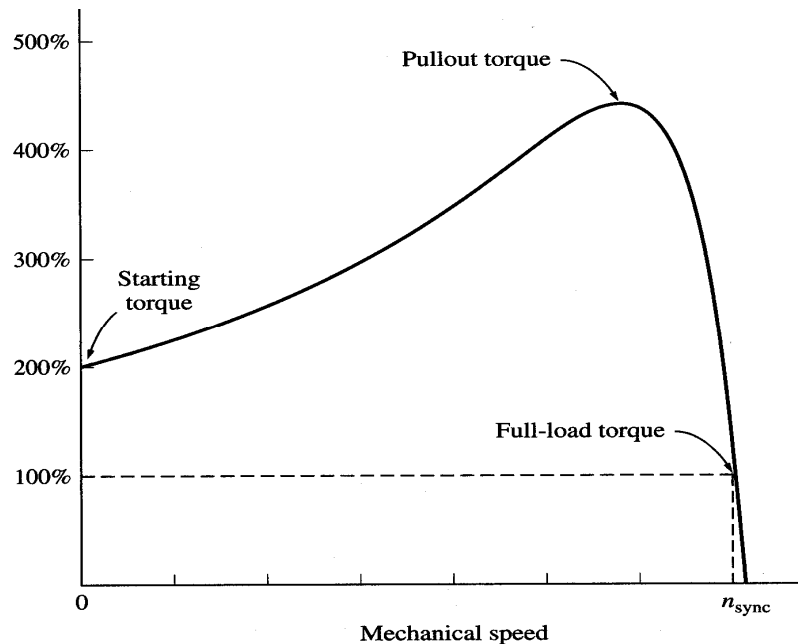


موتور القایی

❖ منحنی گشتاور - سرعت موتور القایی

❖ گشتاور القا شده موتور در سرعت سنکرون صفر است.

❖ مشخصه گشتاور - سرعت بین حالت بی باری تا بار کامل تقریباً خطی است. در این محدوده، مقاومت رتور خیلی بیشتر از راکتانس رتور است. لذا جریان رتور، میدان مغناطیسی رتور و گشتاور القایی با افزایش لغزش، به طور خطی اضافه می شوند.



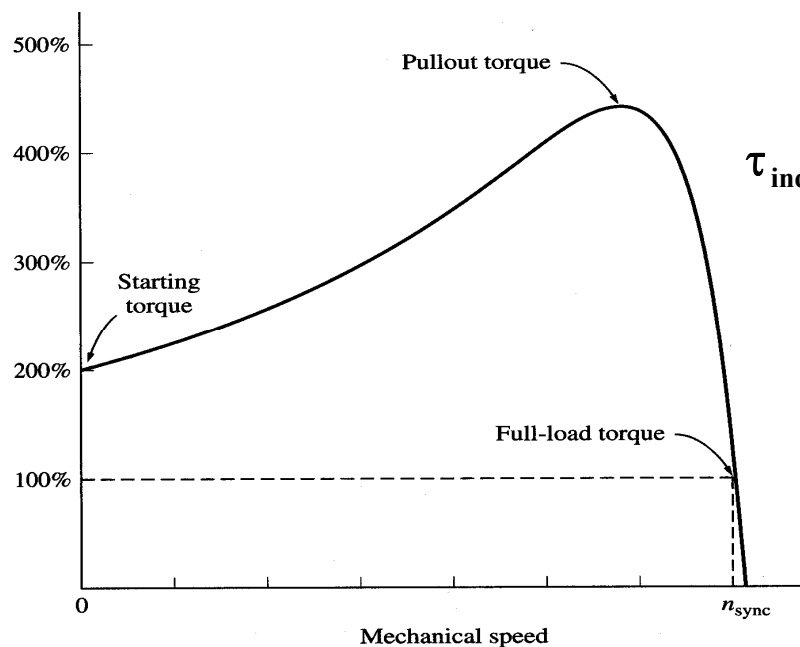
❖ گشتاور ماکزیممی وجود دارد که نمی توان از آن عبور کرد. این گشتاور را **گشتاور شکست** یا **برون کش** می نامند. مقدار این گشتاور ۲ تا ۳ برابر **گشتاور نامی** با بار کامل موتور است و مقدار آن در ادامه محاسبه می شود.

موتور القایی

❖ منحنی گشتاور - سرعت موتور القایی

❖ گشتاور راه اندازی موتور کمی بیشتر از گشتاور بار نامی است، لذا این موتور می تواند تحت بار نامی، راه اندازی شود.

❖ گشتاور موتور به ازای یک لغزش مفروض، متناسب با مجذور ولتاژ اعمال شده تغییر می کند. از این موضوع در ادامه برای کنترل سرعت موتور القایی استفاده می کنیم.



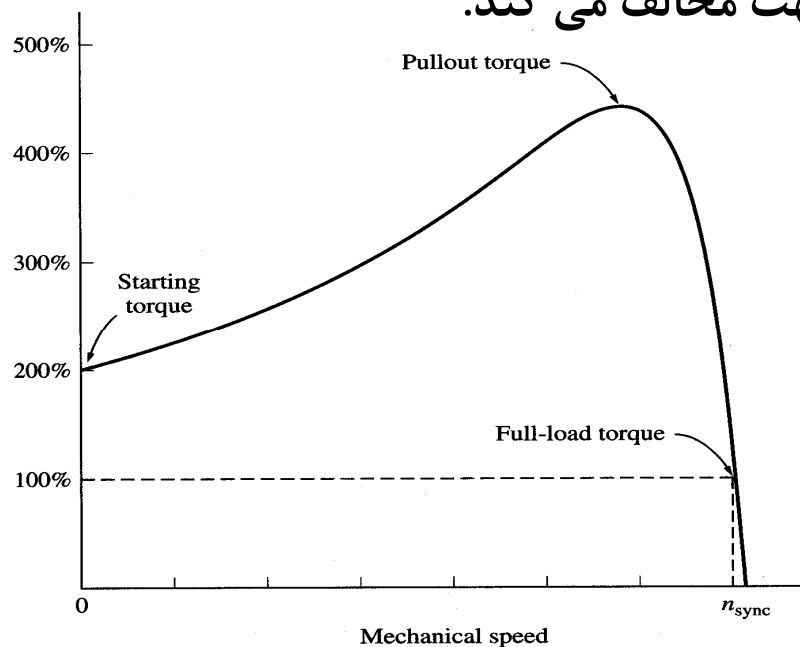
$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_{sync} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]}$$

موتور القایی

❖ منحنی گشتاور - سرعت موتور القایی

❖ اگر موتور موتور القایی با سرعتی بیش از سرعت سنکرون چرخانده شود، گشتاور القایی در ماشین معکوس می شود و ماشین تبدیل به ژنراتور می شود و انرژی مکانیکی را به الکتریکی تبدیل می کند (تمرین: مکانیزم تولید ولتاژ در ژنراتور القایی را توضیح دهید).

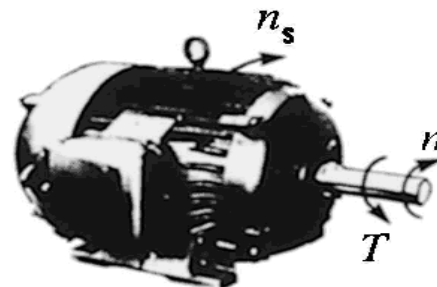
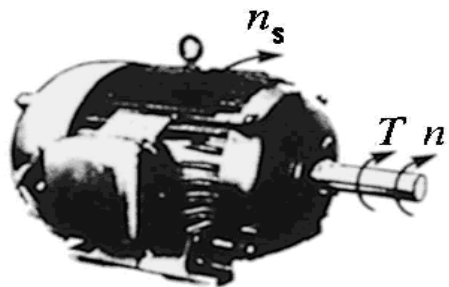
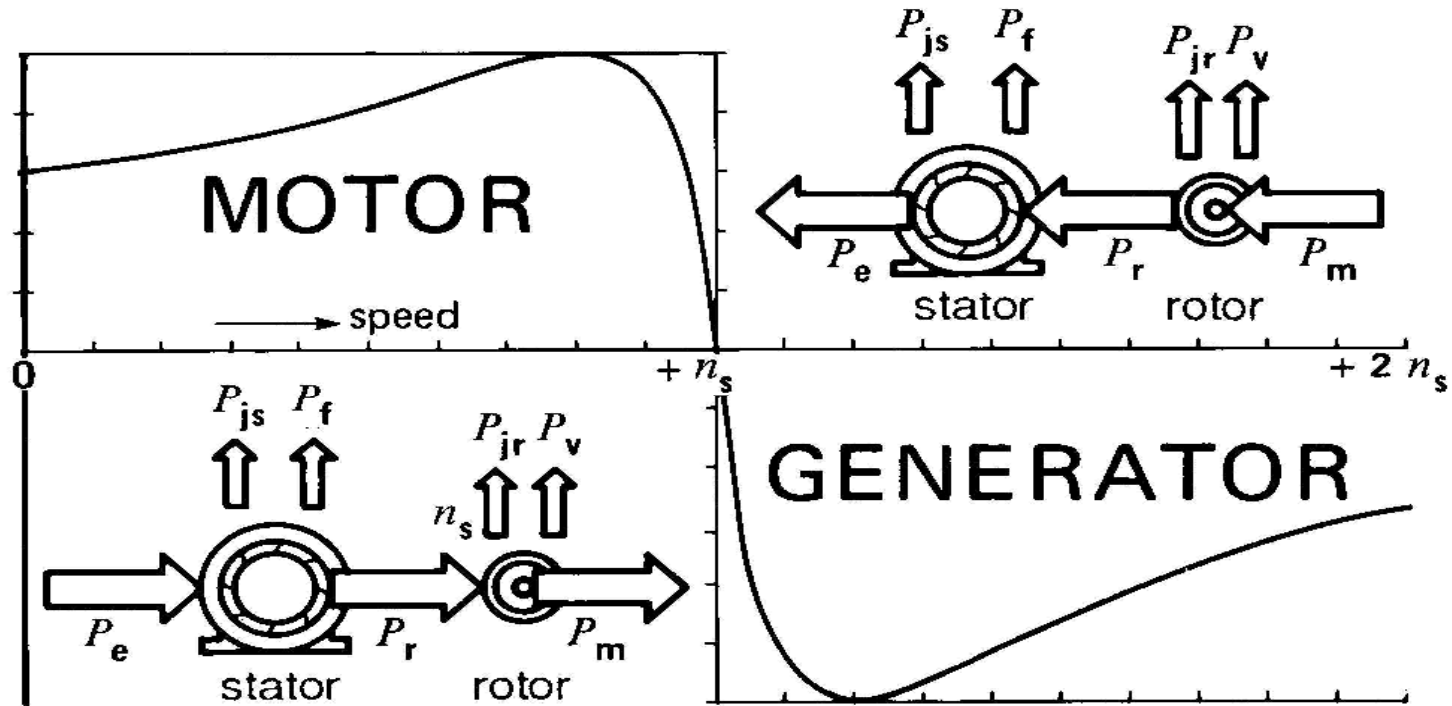
❖ اگر موتور نسبت به جهت میدان مغناطیسی معکوس بگردد، گشتاور القایی، ماشین را به سرعت متوقف نموده و سعی در گرداندن موتور در جهت مخالف می کند.



❖ برای معکوس کردن جهت چرخش میدان مغناطیسی فقط کافیست جای دو فاز عوض شود. به تعویض دو فاز برای توقف سریع موتور، معکوس کردن می گویند.

موتور القایی

❖ منحنی گشتاور - سرعت موتور القایی



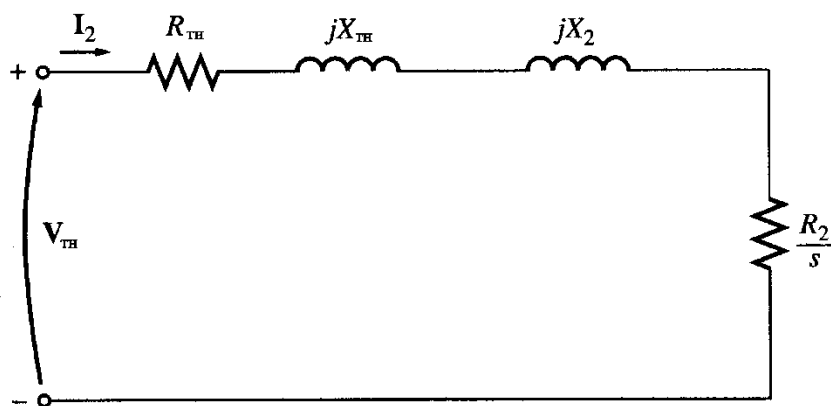
موتور القایی

❖ محاسبه گشتاور ماکزیمم

❖ حداکثر گشتاور وقتی رخ می دهد که حداکثر توان در مقاومت R_2/s مصرف شود:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_{sync} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]}$$

❖ این شرط زمانی برقرار است که اندازه مقاومت بار R_2/s با اندازه امپدانس منبع برابر باشد:



$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{(R_{TH})^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

موتور القایی

❖ محاسبه گشتاور ماکزیمم

❖ با حل این رابطه برای لغزش:

$$s_{T_{\max}} = \frac{R_2}{\sqrt{(R_{TH})^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

❖ یعنی لغزشی که در آن گشتاور حداکثر رخ می دهد به صورت مستقیم متناسب با مقاومت رتور است.

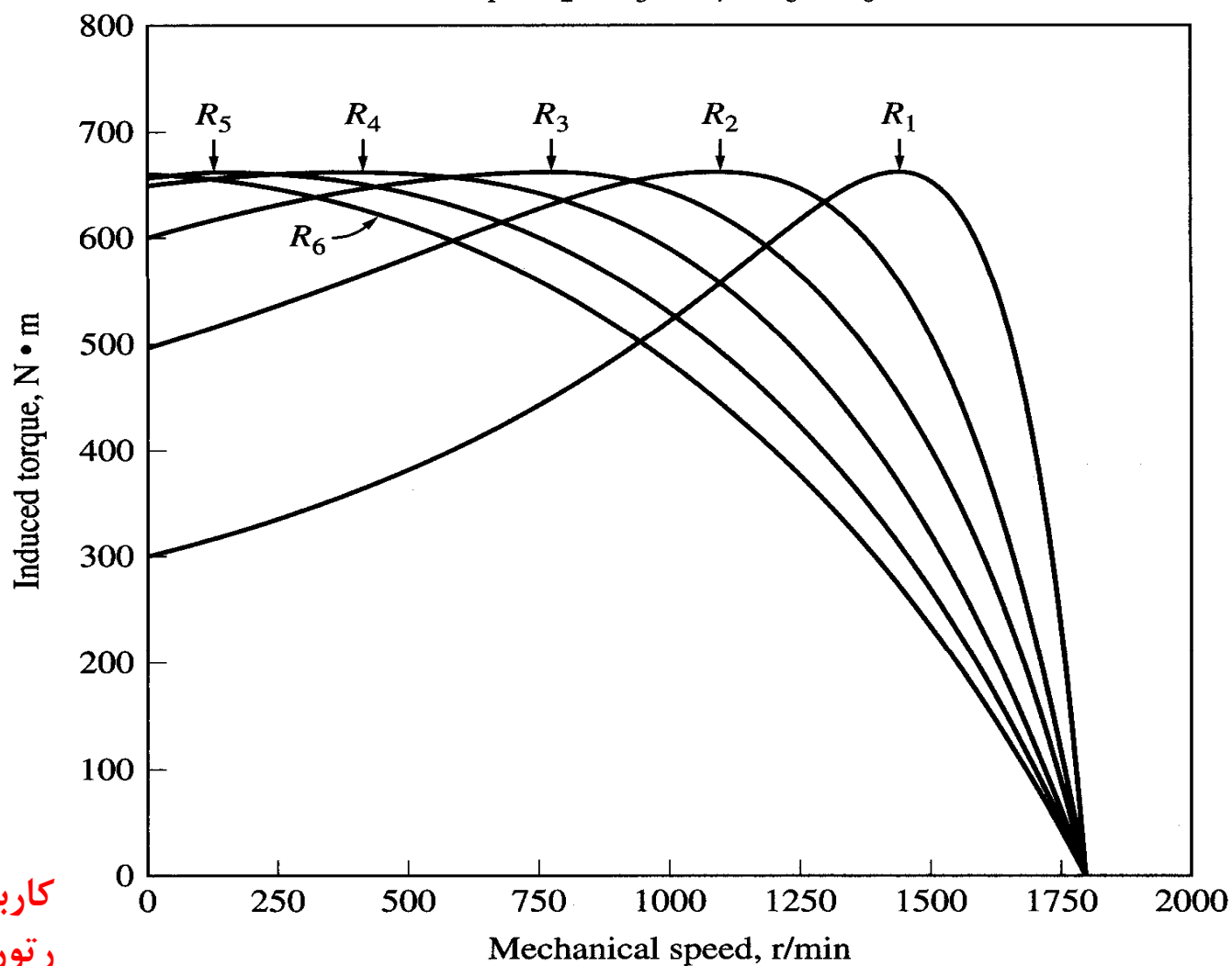
❖ مقدار گشتاور حداکثر که مستقل از مقدار مقاومت رتور است:

$$\tau_{\max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{\text{sync}} [R_{TH} + \sqrt{(R_{TH})^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]}$$

موتور القایی

❖ تاثیر مقاومت رتور در مشخصه گشتاور-سرعت موتور القایی

$$R_1 < R_2 < R_3 < R_4 < R_5 < R_6$$



کاربرد در موتور های
رتور سیم پیچی شده

Example

A 50-Hz, 2 Poles induction motor supplies 15kW to a load at a speed of 2950 rpm.

- 1. What is the motor's slip?**
- 2. What is the induced torque in the motor in N.m under these conditions?**
- 3. What will be the operating speed of the motor if its torque is doubled?**
- 4. How much power will be supplied by the motor when the torque is doubled?**

Solution

$$1. \quad n_{sync} = \frac{120 f_e}{P} = \frac{120 \times 50}{2} = 3000 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = \frac{3000 - 2950}{3000} = 0.0167 \text{ or } 1.67\%$$

2.

\therefore no P_{f+W} given

\therefore assume $P_{conv} = P_{load}$ and $\tau_{ind} = \tau_{load}$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{15 \times 10^3}{2950 \times \frac{2\pi}{60}} = 48.6 \text{ N.m}$$

Solution

3. In the low-slip region, the torque-speed curve is linear and the induced torque is direct proportional to slip. So, if the torque is doubled the new slip will be 3.33% and the motor speed will be

$$n_m = (1 - s)n_{sync} = (1 - 0.0333) \times 3000 = 2900 \text{ rpm}$$

4.

$$\begin{aligned} P_{conv} &= \tau_{ind} \omega_m \\ &= (2 \times 48.6) \times \left(2900 \times \frac{2\pi}{60}\right) = 29.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

Example

A 460-V, 25-hp, 60-Hz, four-pole, Y-connected wound-rotor induction motor has the following impedances in ohms per phase referred to the stator circuit

$$R_1 = 0.641 \, \Omega \quad R_2 = 0.332 \, \Omega$$

$$X_1 = 1.106 \, \Omega \quad X_2 = 0.464 \, \Omega \quad X_M = 26.3 \, \Omega$$

1. What is the maximum torque of this motor? At what speed and slip does it occur?
2. What is the starting torque of this motor?
3. If the rotor resistance is doubled, what is the speed at which the maximum torque now occur? What is the new starting torque of the motor?

Solution

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}}$$
$$= \frac{\frac{460}{\sqrt{3}} \times 26.3}{\sqrt{(0.641)^2 + (1.106 + 26.3)^2}} = 255.2 \text{ V}$$

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2$$
$$\approx (0.641) \left(\frac{26.3}{1.106 + 26.3} \right)^2 = 0.590 \Omega$$

$$X_{TH} \approx X_1 = 1.106 \Omega$$

Solution

$$\begin{aligned} 1. \quad s_{T_{\max}} &= \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \\ &= \frac{0.332}{\sqrt{(0.590)^2 + (1.106 + 0.464)^2}} = 0.198 \end{aligned}$$

The corresponding speed is:

$$n_m = (1 - s)n_{sync} = (1 - 0.198) \times 1800 = 1444 \text{ rpm}$$

Solution

The torque at this speed is

$$\begin{aligned}
 \tau_{\max} &= \frac{1}{2\omega_s} \left(\frac{3V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \right) \\
 &= \frac{3 \times (255.2)^2}{2 \times (1800 \times \frac{2\pi}{60}) [0.590 + \sqrt{(0.590)^2 + (1.106 + 0.464)^2}] } \\
 &= 229 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

Solution

2. The starting torque can be found from the torque eqn. by substituting $s = 1$

$$\begin{aligned}
 \tau_{start} = \tau_{ind} \Big|_{s=1} &= \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{TH}^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \Big|_{s=1} \\
 &= \frac{3V_{TH}^2 R_2}{\omega_s [(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \\
 &= \frac{3 \times (255.2)^2 \times (0.332)}{1800 \times \frac{2\pi}{60} \times [(0.590 + 0.332)^2 + (1.106 + 0.464)^2]} \\
 &= 104 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

Solution

3. If the rotor resistance is doubled, then the slip at maximum torque doubles too

$$s_{T_{\max}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} = 0.396$$

The corresponding speed is

$$n_m = (1 - s)n_{sync} = (1 - 0.396) \times 1800 = 1087 \text{ rpm}$$

The maximum torque is still

$$\tau_{max} = 229 \text{ N.m}$$

Solution

The starting torque is now

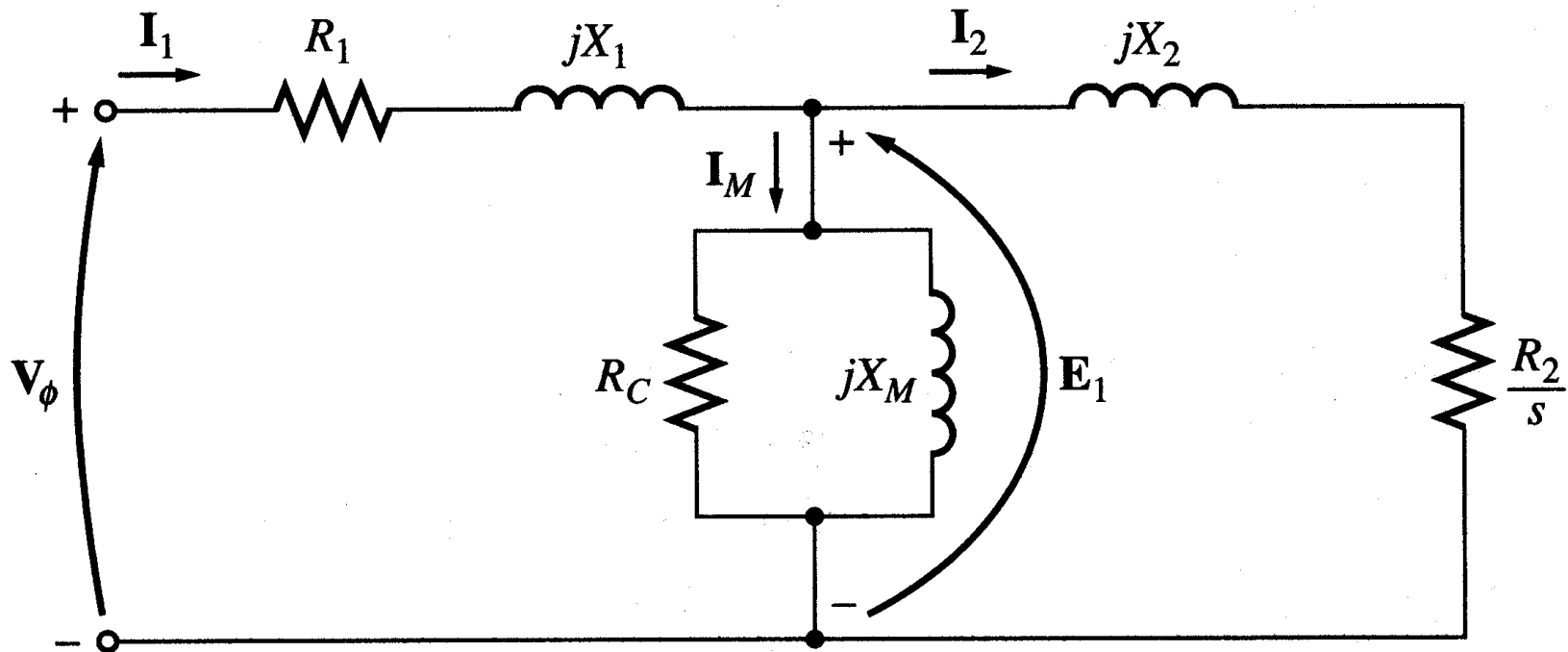
$$\begin{aligned}\tau_{start} &= \frac{3 \times (255.2)^2 \times (0.664)}{1800 \times \frac{2\pi}{60} \times [(0.590 + 0.664)^2 + (1.106 + 0.464)^2]} \\ &= 170 \text{ N.m}\end{aligned}$$

موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل

❖ آزمایشهای لازم برای استخراج پارامترهای مدار معادل، بر اساس تجهیزات مورد استفاده و سهولت انجام به روشهای کلاسیک و نوین تقسیم می شوند.

❖ روش کلاسیک بر اساس آزمایشهای بی باری، رتور قفل و تست DC بر اساس استاندارد IEEE 112 انجام می شوند.



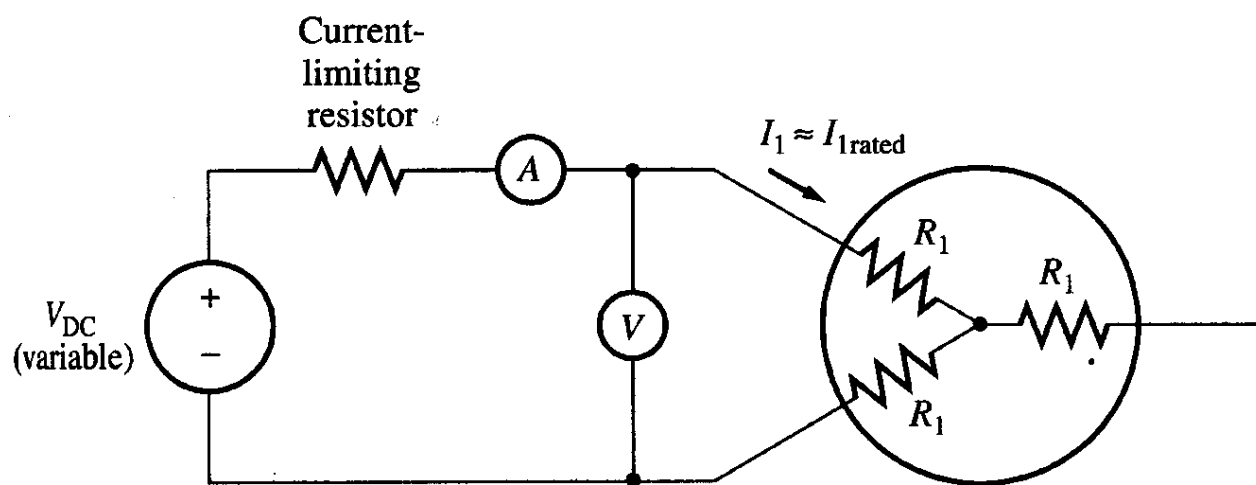
موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل: آزمایش DC

❖ برای تعیین مقاومت استاتور از این آزمایش استفاده می شود.

❖ مقدار ولتاژ منبع به نحوی تنظیم می شود که جریان سیم پیچ ها برابر جریان نامی آنها شود تا به دمای واقعی هنگام کار معمولی برسند.

❖ در مقدار مقاومت محاسبه شده از اثر پوستی صرف نظر شده است. برای تعیین مقدار دقیق مقاومت لازم است مقدار محاسبه شده، تصحیح شود.



$$R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

$$R_1 = \frac{R_{DC}}{2}$$

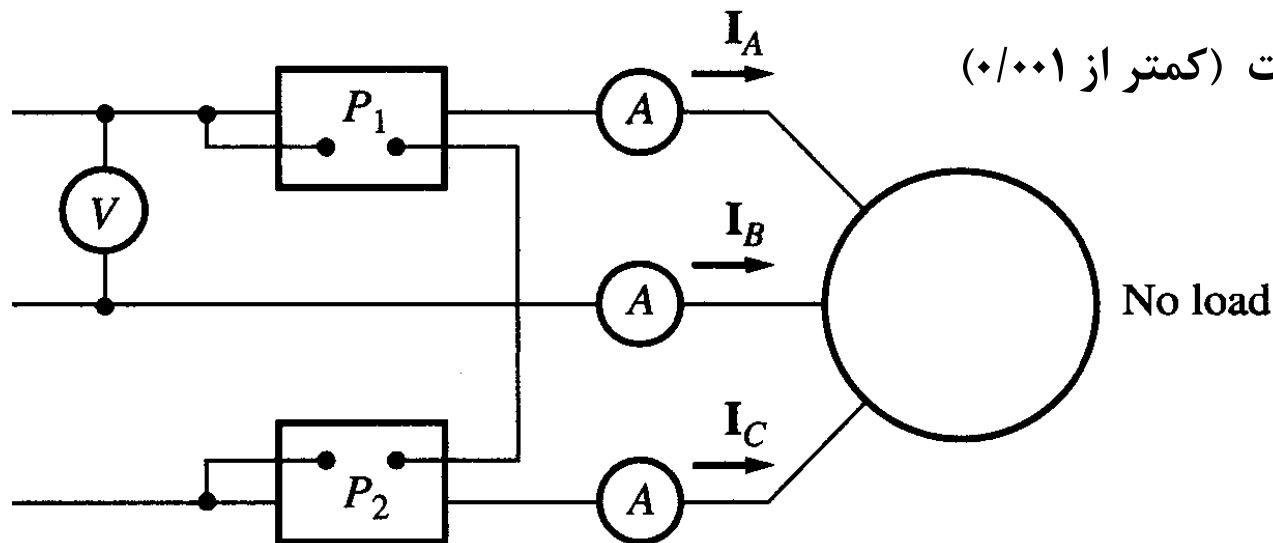
موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل: آزمایش بی باری

❖ این آزمایش تلفات چرخشی موتور را اندازه گیری می کند و اطلاعاتی درباره جریان مغناطیس کننده می دهد

❖ رتور رهاست تا در سرعت نامی بچرخد.

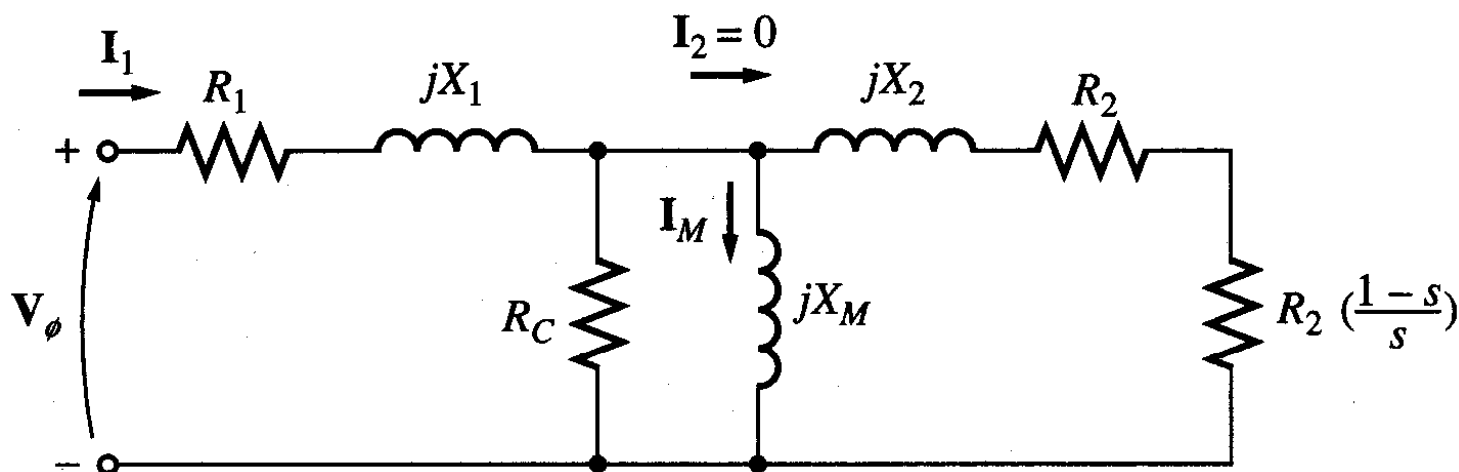
❖ تنها بار روی موتور تلفات اصطکاک و بادخوری است. بنابراین همه P_{conv} در این موتور تلفات مکانیکی است.



❖ لغزش موتور خیلی کم است (کمتر از ۰/۰۰۱)

موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل: آزمایش بی باری



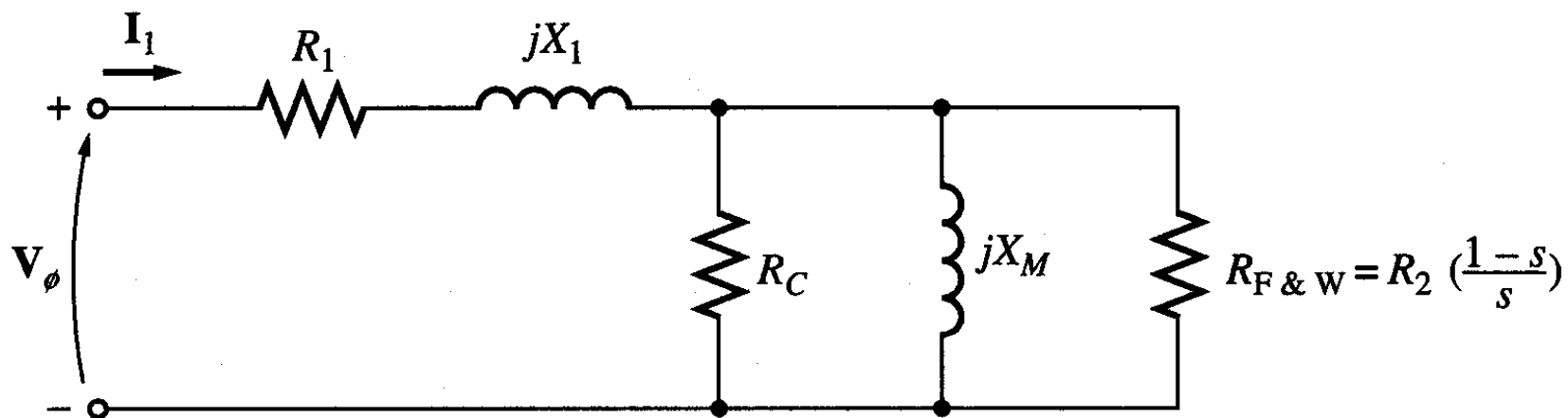
❖ در این لغزش کوچک:

$$\frac{R_2(1-s)}{s} \gg R_2$$

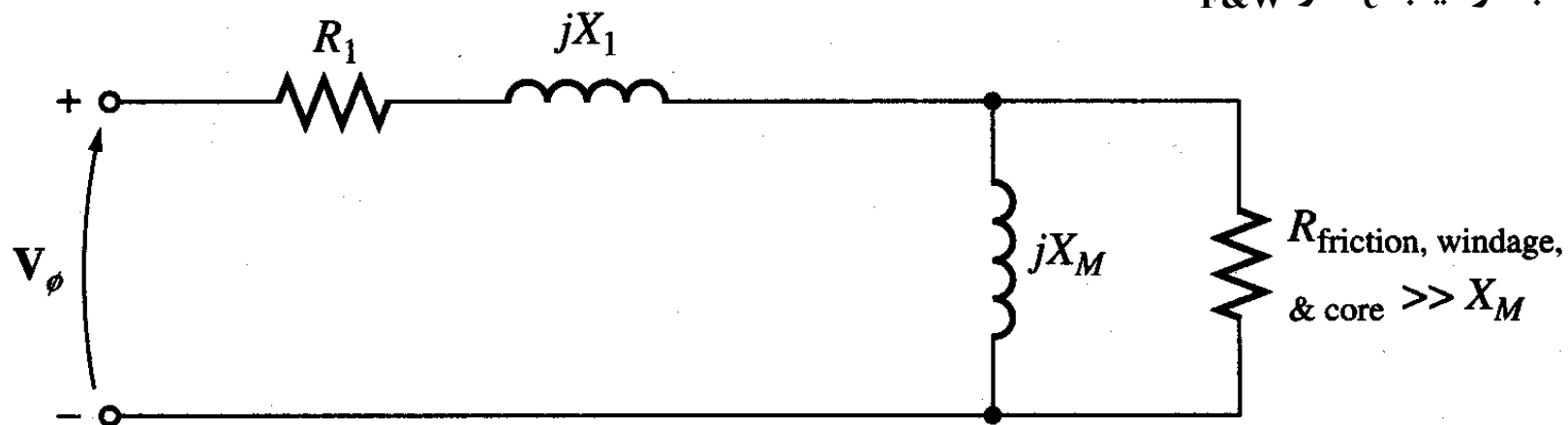
$$\frac{R_2(1-s)}{s} \gg X_2$$

موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل: آزمایش بی باری



❖ با ترکیب $R_{F \& W}$ و R_c



موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل: آزمایش بی باری

❖ توان اندازه گیری شده در حالت بی باری برابر تلفات است.

❖ تلفات مسی رتور بسیار ناچیز است زیرا جریان رتور ناچیز است (زیرا مقاومت $R_2(1-s)/s$ بسیار بزرگ است)

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$$

❖ تلفات مسی استاتور:

❖ بنابراین توان اندازه گیری شده در حالت بی باری:

$$P_{in} = P_{SCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

$$P_{in} = 3I_1^2 R_1 + P_{rot}$$

موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل: آزمایش بی باری

❖ جریان لازم برای ایجاد میدان مغناطیسی در یک موتور القایی بسیار بزرگ است و دلیل آن رلاکتانس فاصله هوایی است. بنابراین X_M خیلی کوچک تر از مقاومت موازی با آن بوده و ضریب توان ورودی کل خیلی کوچک خواهد بود.

❖ بنابراین بخش عمده افت ولتاژ در مدار، دو سر عناصر القایی است و امپدانس ورودی:

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{\phi}}{I_{1,NL}} \approx X_1 + X_M$$

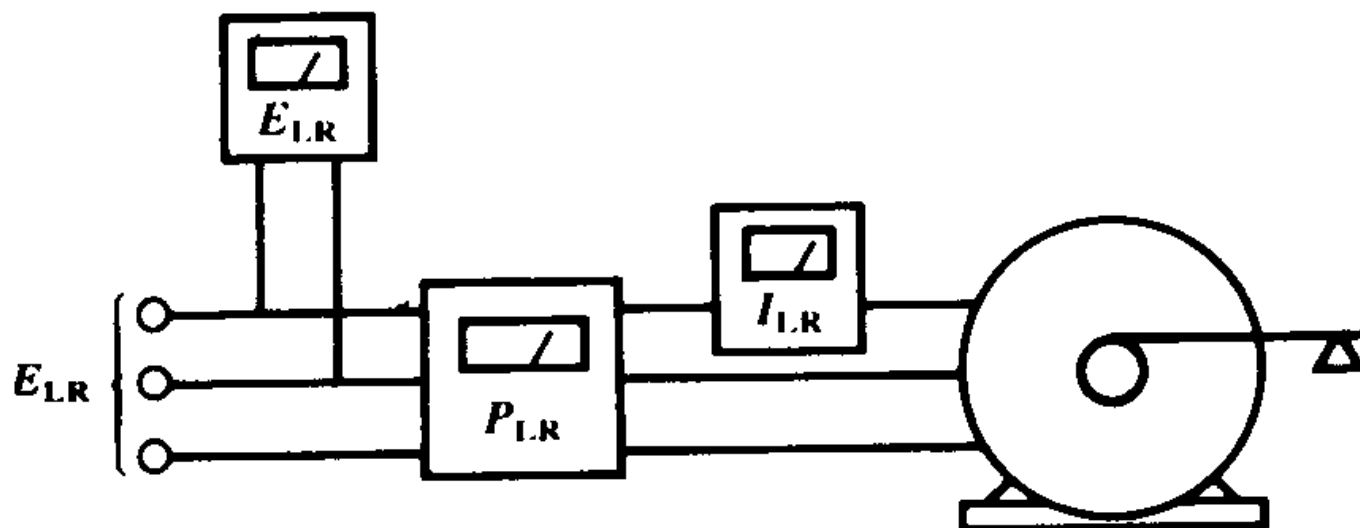
❖ اگر X_1 به نحوی تعیین شود، X_M معلوم خواهد بود.

موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل: آزمایش رتور قفل شده

❖ متناظر با آزمایش اتصال کوتاه در ترانسفورماتور است.

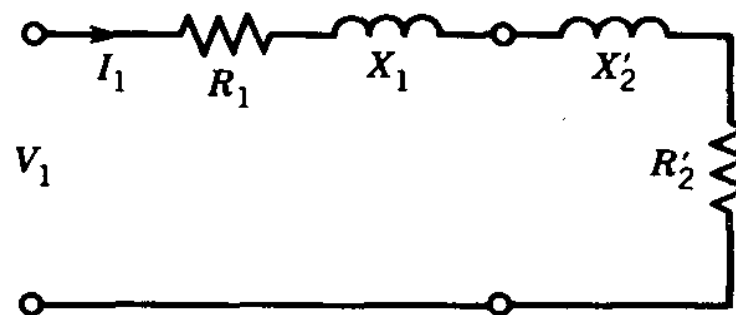
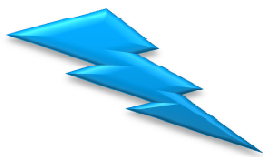
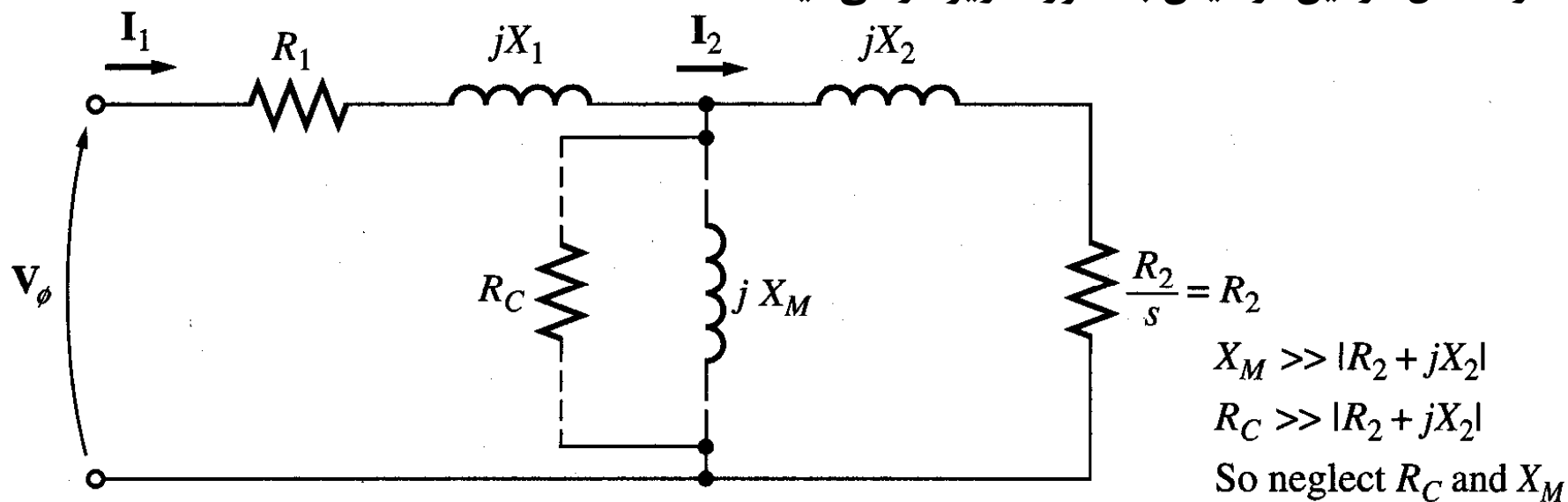
❖ رتور قفل می شود تا نتواند بچرخد و سپس ولتاژ ورودی تا جایی افزایش می یابد که جریان نامی در سیم پیچ ها جاری شود.



موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل: آزمایش رتور قفل شده

❖ مدار معادل در این آزمایش به صورت زیر در می آید:



موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل: آزمایش رتور قفل شده

❖ توان ورودی موتور:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$

❖ ضریب توان در حالت رتور قفل:

$$\cos \theta = \frac{P}{\sqrt{3} V_L I_L}$$

❖ اندازه امپدانس کل در مدار موتور:

$$|Z_{LR}| = \frac{V_\phi}{I_1} = \frac{V_L}{\sqrt{3} I_1}$$

❖ امپدانس حالت رتور قفل:

$$Z_{LR} = R_{LR} + jX'_{LR} = |Z_{LR}| \cos \theta + j|Z_{LR}| \sin \theta$$

موتور القایی

❖ محاسبه پارامترهای مدار معادل: آزمایش رتور قفل شده

❖ مقاومت رتور قفل:

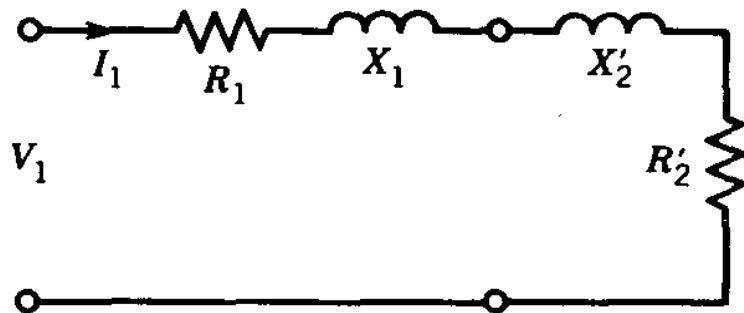
$$R_{LR} = |Z_{LR}| \cos \theta = R_1 + R_2$$

❖ راکتانس رتور قفل:

$$X'_{LR} = |Z_{LR}| \sin \theta = X'_1 + X'_2$$

راکتانس استاتور و رتور در فرکانس آزمایش

❖ مقاومت رتور:



$$R_2 = R_{LR} - R_1$$

از تست DC