فهرست مطالب

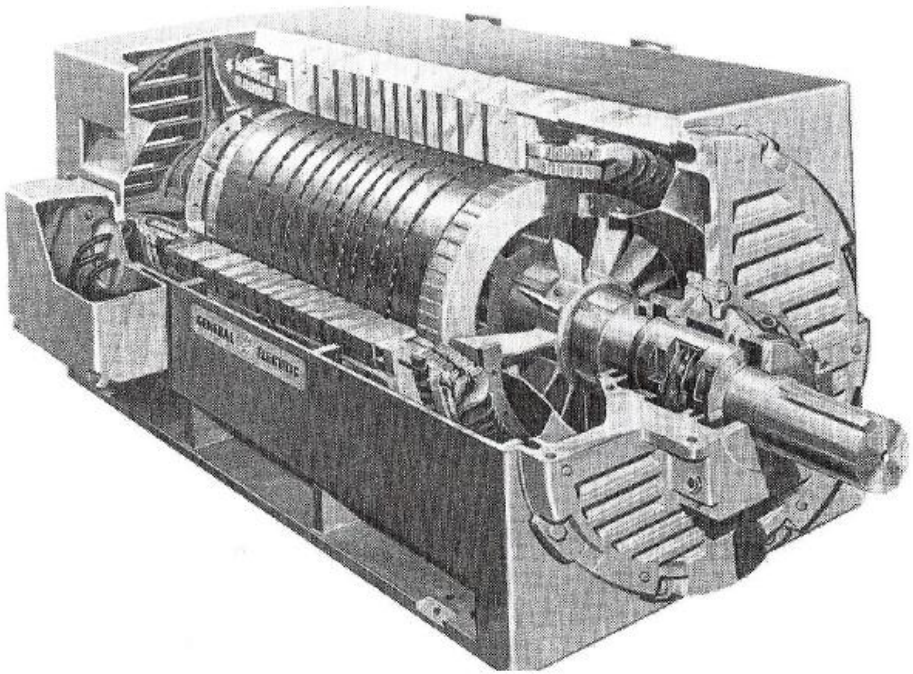
۱- ساختمان موتور
۲- مفاهیم اصلی موتور
- تولید گشتاور
- لغزش رتور
- فرکانس الکتریکی
۳- مدار معادل موتور
- مدل ترانسفورماتوری
- مدار معادل رتور
- مدار معادل نهایی
۴- توان و گشتاور در موتور
۵- مشخصه گشتاور-سرعت موتور
۶- بررسی راههای تغییر مشخصه موتور
۷- راه اندازی موتور
۸- روشهای کنترل سرعت موتور
۹- تعیین پارامترهای موتور

ساختمان موتور

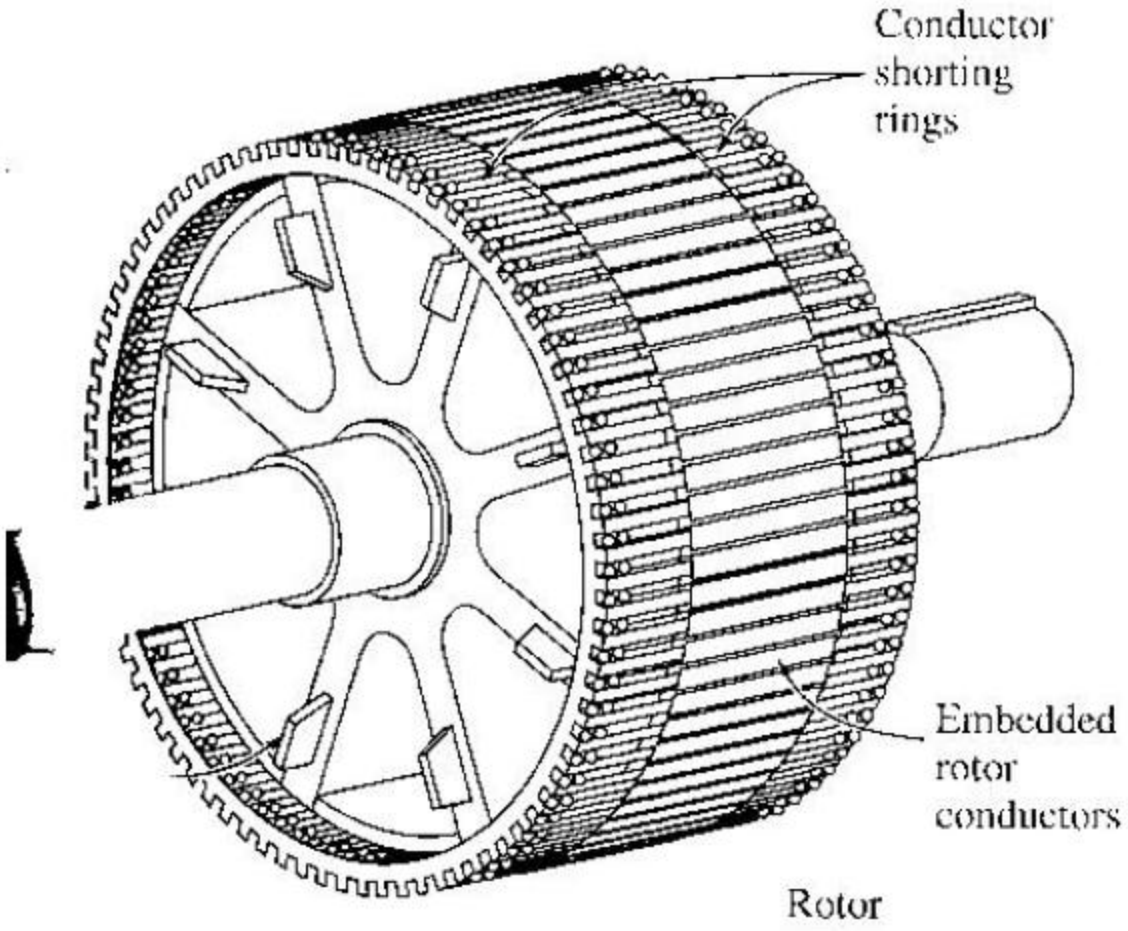
موتور القایی دو نوع دارد:

۱- قفسه ای (قفس سنجابی) : هیچ سیم پیچی و حلقه های لغزشی روی رتور وجود ندارد

۲- سیم پیچی : سیم پیچی سه فاز دارد که از طریق حلقه های لغزنده به هم متصل میشوند

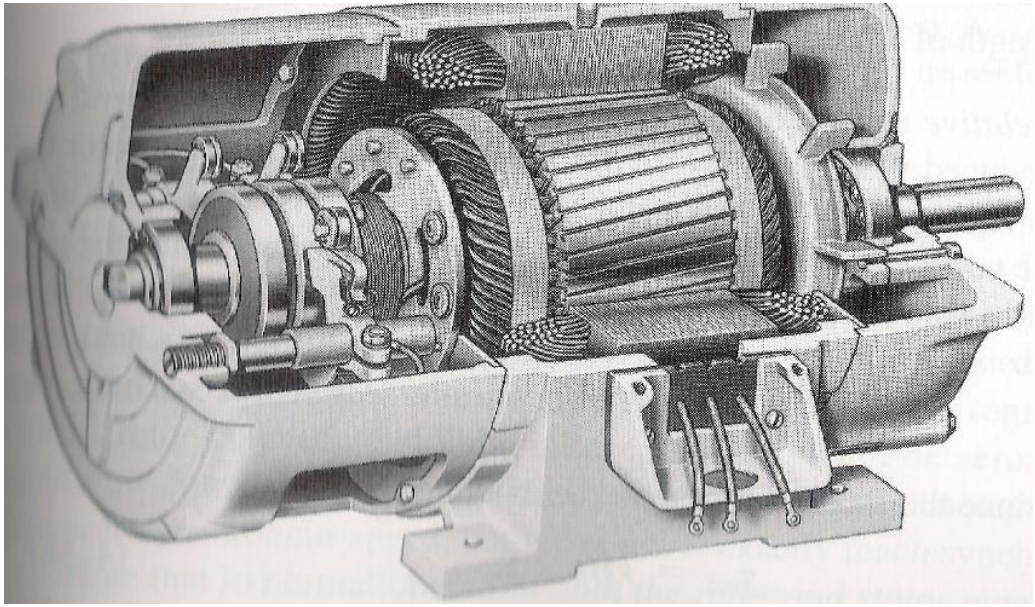


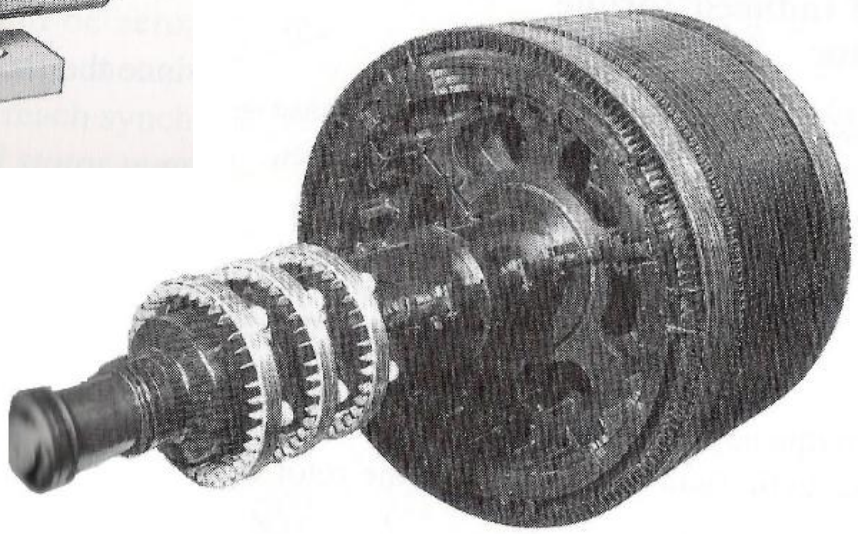
ساختمان موتور



Sketch of cage rotor

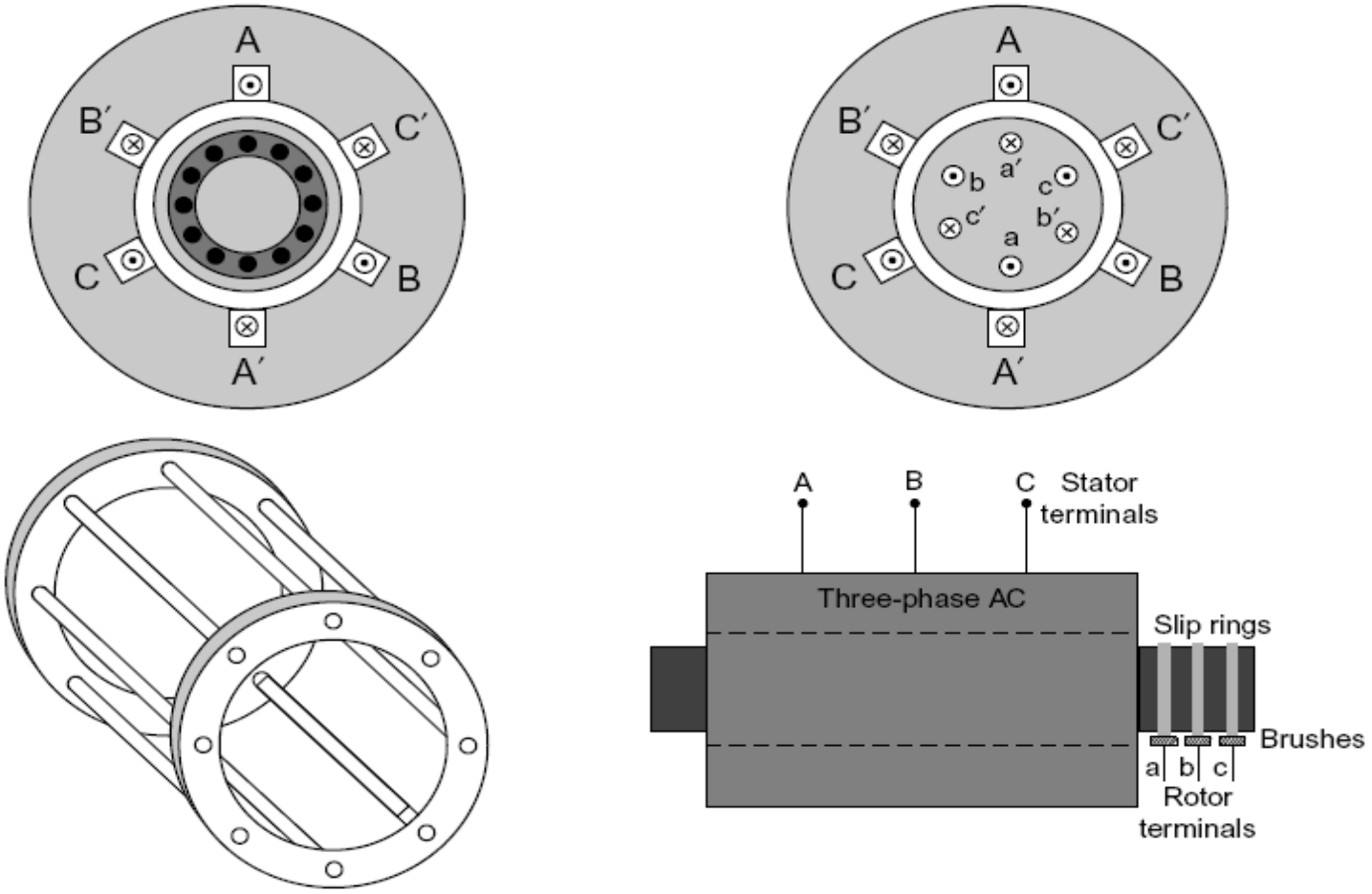
ساختمان موتور





Wound rotor IM

ساختمان موتور



(a) Squirrel-cage induction machine

(b) Wound-rotor induction machine

مفاهیم پایه

- جریان استاتور میدان دواری تولید میکند که با سرعت زیر در ماشین میچرخد

$$n_{sync} = \frac{120 f_e}{P}$$

- این میدان دوار در رتور ولتاژی القا میکند

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B})\, \boldsymbol{l}$$

- به علت خاصیت القایی رتور جریان رتور از ولتاژ ان عقبتر است.
- جریان رتور نیز میدانی تولید میکند که با سرعت رتور میچرخد.
- تعامل دو میدان رتور و استاتور ایجاد گشتاور میکند

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_S$$

لغزش رتور

- اگر رتور در سرعت سنکرون بچرخد، انگاه

$$\text{If } \omega_R=\omega_S \Rightarrow I_R=0 \Rightarrow F=0 \Rightarrow \omega_R=0$$

- بنابراین رتور در سرعت کمتر از سنکرون میچرخد $\omega_R < \omega_S$. سرعت لغزش به صورت زیر تعریف میشود:

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m$$

n_{slip} = slip speed of the machine
n_{sync} = speed of the magnetic field.
n_m = mechanical shaft speed of the motor.

لغزش رتور

$$s = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} \times 100\% = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \times 100\%$$

$$n_m = (1 - s) n_{sync} \qquad \omega_m = (1 - s) \omega_{sync}$$

- اگر رتور قفل شود، رتور فرکانسی برابر استاتور دارد
- در سرعت سنکرون، فرکانس رتور صفر است

$$\Rightarrow \quad f_r = s f_e$$

Example

A 208V, 10hp, 4 pole, 60Hz, Y-connected induction motor has a full-load slip of 5%.
(a) What is the synchronous speed of this motor?
(b) What is the rotor speed of this motor at the rated load?
(c) What is the rotor frequency of this motor at the rated load?
(d) What is the shaft torque of this motor at the rated load?

Solution

(*a*) The synchronous speed of this motor is

$$n_{\text{sync}} = \frac{120 f_e}{P}$$

$$= \frac{(120)(50\ \text{Hz})}{4\ \text{poles}} = 1500\ \text{r/min}$$

(*b*) The rotor speed of the motor is given by

$$n_m = (1 - s) n_{\text{sync}}$$

$$= (0.95)(1500\ \text{r/min}) = 1425\ \text{r/min}$$

Example

(*c*) The rotor frequency of this motor is given by

$$f_r = sf_e = (0.05)(50 \text{ Hz}) = 2.5 \text{ Hz}$$

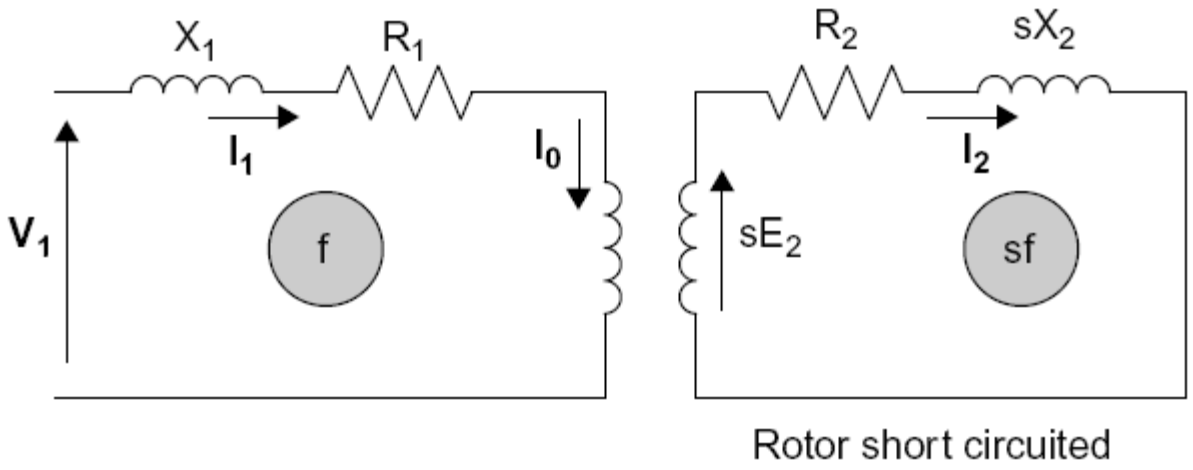
(*d*) The shaft load torque is given by

$$\tau_{\text{load}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega_m}$$

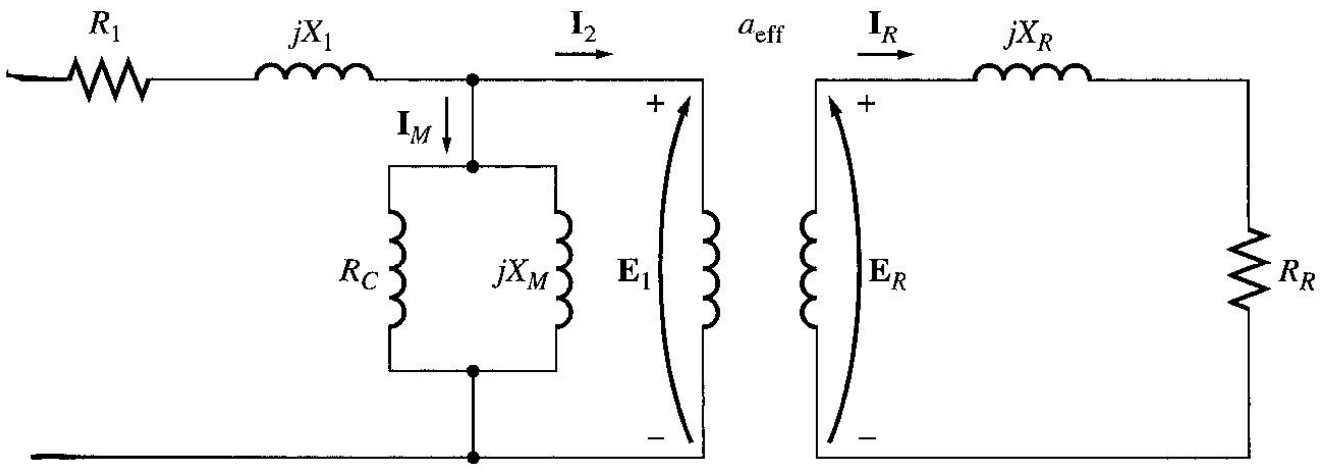
$$= \frac{(10 \text{ hp})(746 \text{ W/hp})}{(1425 \text{ r/min})(2\pi \text{ rad/r})(1 \text{ min}/60 \text{ s})} = 50 \text{ N} \cdot \text{m}$$

مدار معادل موتور

- مدار معادل شبیه ترانسفورماتور است
- فرکانس رتور متفاوت با استاتور است



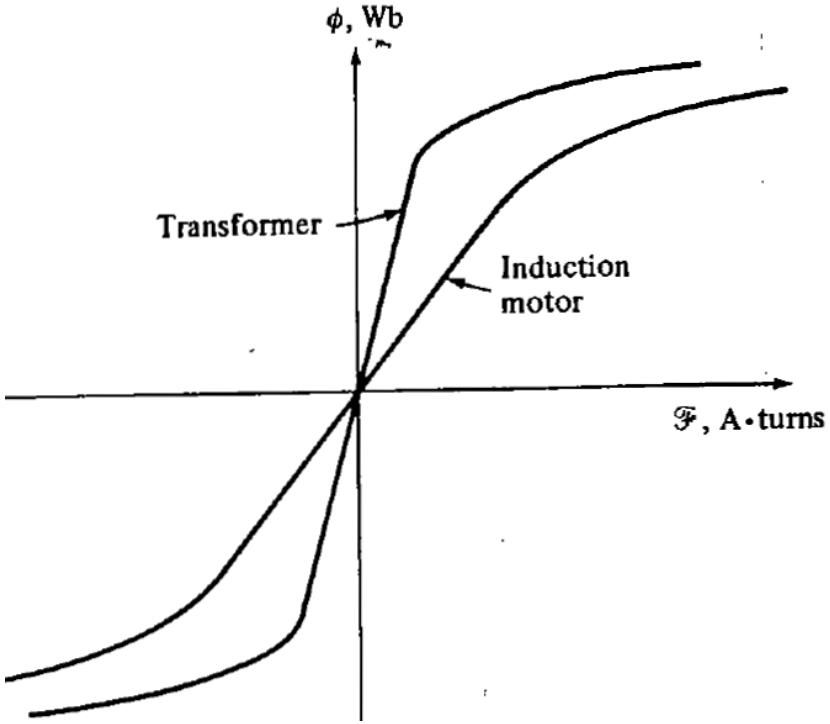
مدار معادل موتور



- R1: stator resistance
- X1: stator leakage reactance
- a_{eff} for a wound rotor is the ratio of the conductors per phase on the stator to the conductors per phase on the rotor.

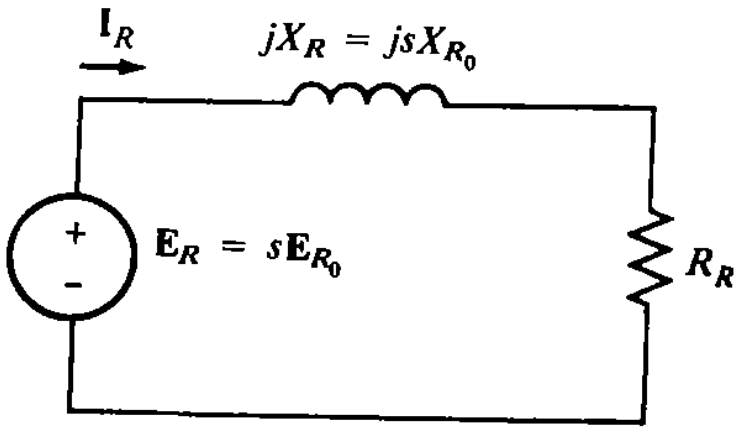
مدار معادل موتور

- تفاوت ترانسفورماتور و موتور در شیب منحنی شار–میدان است
- بعلت وجود فاصله هوایی راکتانس مغناطیسی موتور کمتر و جریان لازم برای تولید میدان زیادتر است



مدار معادل رتور

E_R : s E_{R0}
E_{R0}: locked-rotor conditions voltage in rotor



مدار معادل رتور

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R$$

$$f_r = sf_e,$$

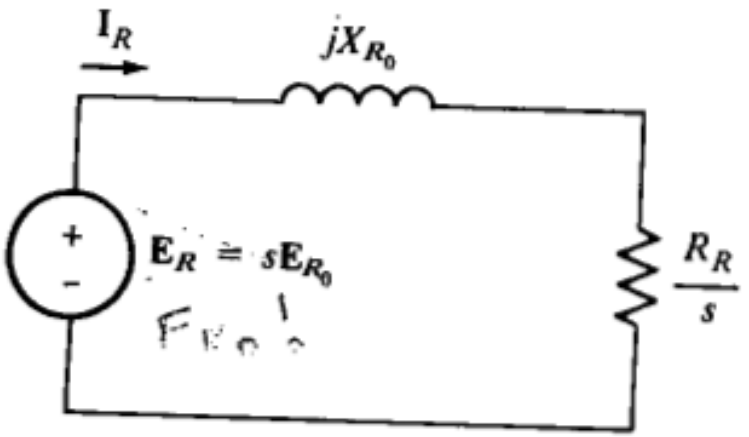
$$X_R = s2\pi f_e L_R = sX_{R0}$$

- X_{R0} راکتانس رتور قفل شده است

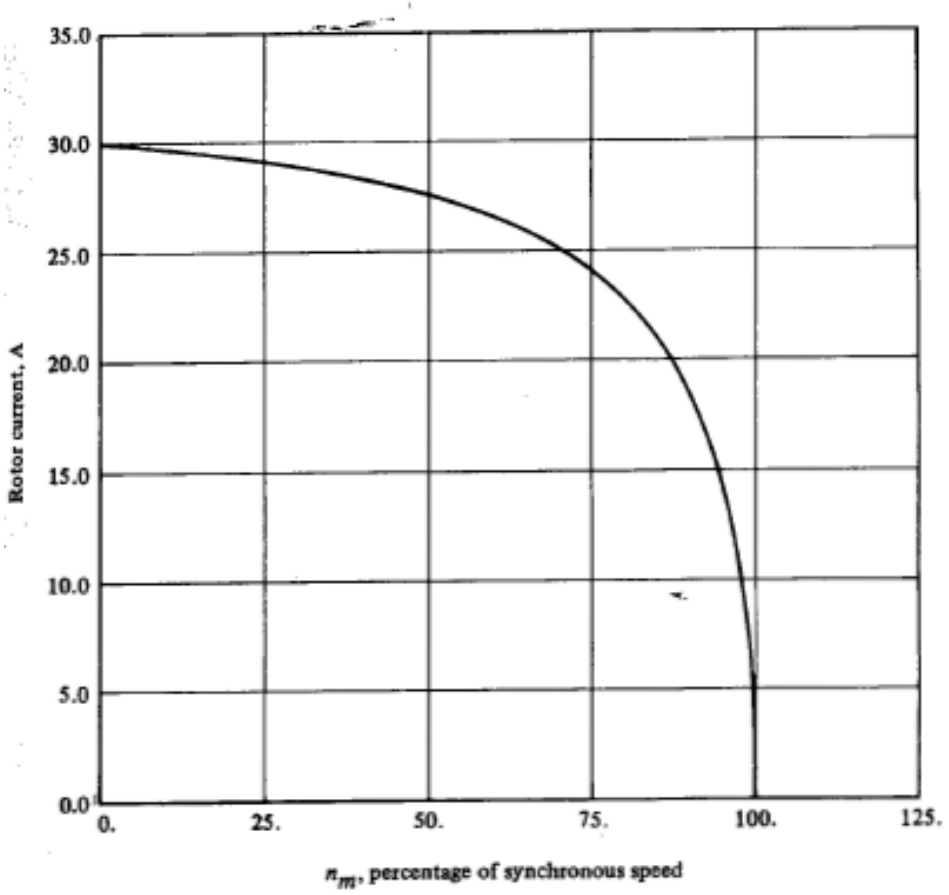
مدار معادل رتور

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}} = \frac{E_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}}$$

$$\Rightarrow \quad Z_{R,eq} = R_R/s + jX_{R0}$$



جریان رتور بر حسب سرعت

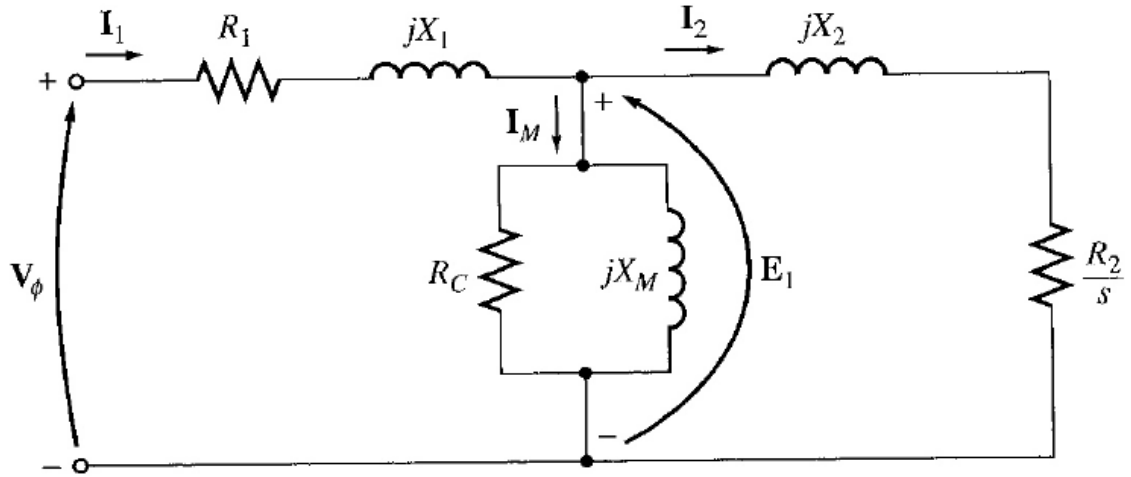


مدار معادل نهایی موتور القایی

- اگر کمیات رتور را به سمت استاتور برگردانیم:

$$E_1 = E'_R = a_{eff} E_{R0}$$

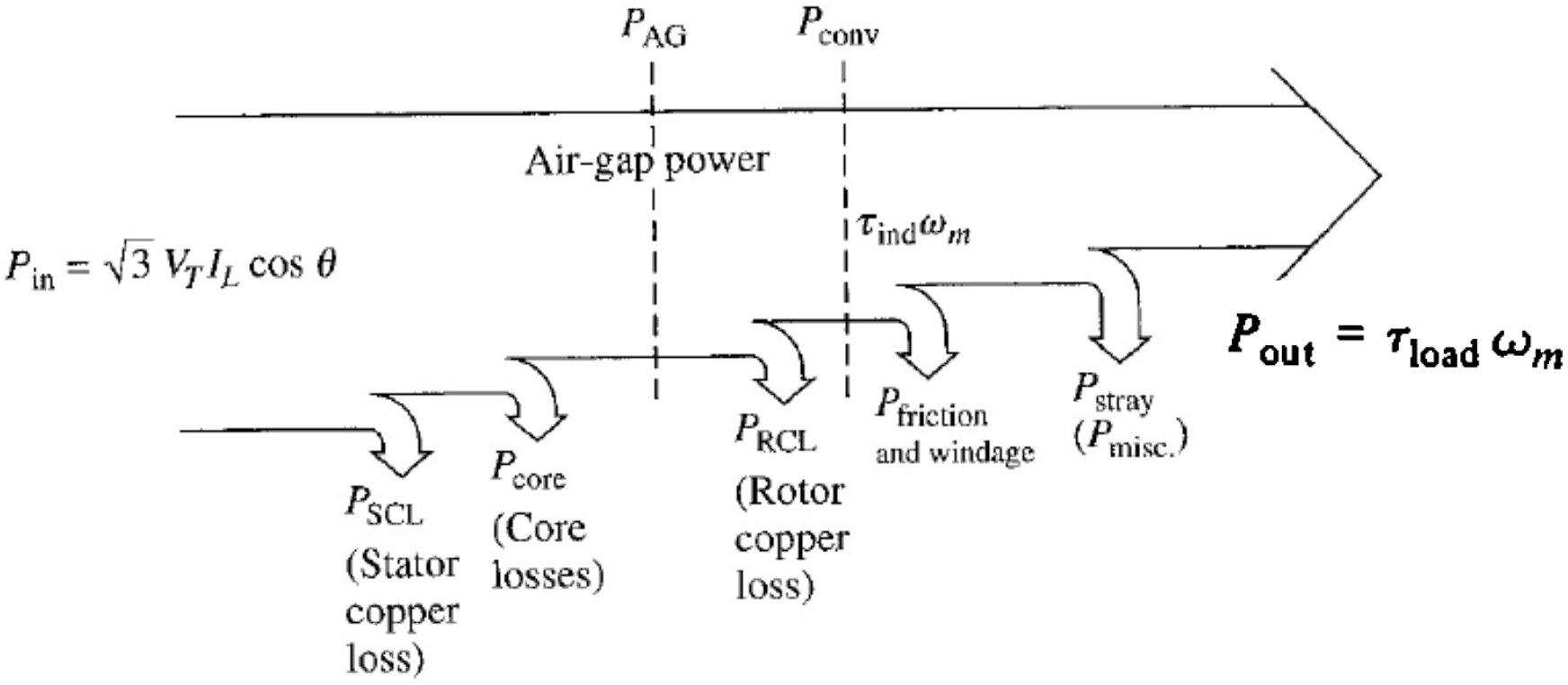
$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \qquad Z_2 = a_{eff}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right)$$



$$R_2 = a^2_{eff} R_R$$

$$X_2 = a^2_{eff} X_{R0}$$

نمودار توان در موتور القایی



تلفات در موتور القایی

- تلفات هسته به نحو دلخواه در نمودار توان جای داده میشود
- تلفات هسته مشتمل بر هسته استاتور و رتور است
- چون موتور نزدیک به سرعت سنکرون کار میکند، تلفات هسته رتور ناچیز است.
- مقاومت R_C در مدار معادل برای منظور کردن تلفات هسته است
- اگر تلفات هسته به صورت یک عدد به وات داده شود، با تلفات مکانیکی جمع میشود
- تلفات مکانیکی با افزایش سرعت زیاد میشود
- تلفات هسته با افزایش سرعت کم میشود
- مجموع تلفات هسته و مکانیکی را تلفات گردشی مینامند. تلفات گردشی با تغییر سرعت ثابت میماند

Example

A 480V, 60Hz, 50hp, 3-phase induction motor is drawing 60 A at 0.85 PF lagging. The stator copper losses are 2 kW, and the rotor copper losses are 700 W. The friction and windage losses are 600W, the core losses are 1800 W, and the stray losses are negligible. Find:

a) The air gap power P_{AG}
b) The power converted P_{conv}
c) The output power P_{out}
d) The efficiency

Example

(*a*) The air-gap power is just the input power minus the stator I^2R losses. The input power is given by

$$P_{in} = \sqrt{3}\, V_T I_L \cos\theta$$
$$= \sqrt{3}(480\ \text{V})(60\ \text{A})(0.85)$$
$$= 42.4\ \text{kW}$$

From the power-flow diagram, the air-gap power is given by

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core}$$
$$= 42.4\ \text{kW} - 2\ \text{kW} - 1.8\ \text{kW} = 38.6\ \text{kW}$$

(*b*) From the power-flow diagram, the power converted from electrical to mechanical form is

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$$
$$= 38.6\ \text{kW} - 700\ \text{W} = 37.9\ \text{kW}$$

Example

(*c*) From the power-flow diagram, the output power is given by

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= P_{\text{conv}} - P_{\text{F\&W}} - P_{\text{misc}} \\ &= 37.9\ \text{kW} - 600\ \text{W} - 0\ \text{W} \\ &= 37.3\ \text{kW} \end{aligned}$$

or, in horsepower,

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= (37.3\ \text{kW})\left(\frac{1\ \text{hp}}{0.746\ \text{kW}}\right) \\ &= 50\ \text{hp} \end{aligned}$$

(*d*) Therefore, the induction motor's efficiency is

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \\ &= \frac{37.3\ \text{kW}}{42.4\ \text{kW}} \times 100\% \\ &= 88\% \end{aligned}$$

توان و گشتاور در موتور القایی

- تلفات اهمی استاتور : $P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1$
- تلفات هسته: $P_{Core} = 3 E_1^2 G_C$
- توان فاصله هوایی: $P_{AG} = P_{in} – P_{SCL} - P_{Core}$
- جریان ورودی هر فاز موتور

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{V}_\phi}{Z_{eq}}$$

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_C - jB_M + \frac{1}{R_2/s + jX_2}}$$

توان و گشتاور در موتور القایی

- توان در مقاومت R_2/s مصرف میشود. در نتیجه توان فاصله هوایی برابر است با

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

- تلفات واقعی در مدار رتور با رابطه زیر داده میشود:

$$P_{RCL} = 3\ I_R^{\ 2}\ R_R$$

- چون توان در عبور از ترانس ایده ال تغییر نمیکند تلفات مسی رتور به صورت زیر است:

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2$$

توان و گشتاور در موتور القایی

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$$

$$= 3I_2^{\,2}\frac{R_2}{s} - 3I_2^{\,2}R_2$$

$$= 3I_2^{\,2}R_2\left(\frac{1}{s} - 1\right)$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{P_{conv} = 3I_2^2R_2\left(\frac{1-s}{s}\right)}$$

$$\Rightarrow \quad P_{RCL} = s\,P_{AG}$$

توان و گشتاور در موتور القایی

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$$

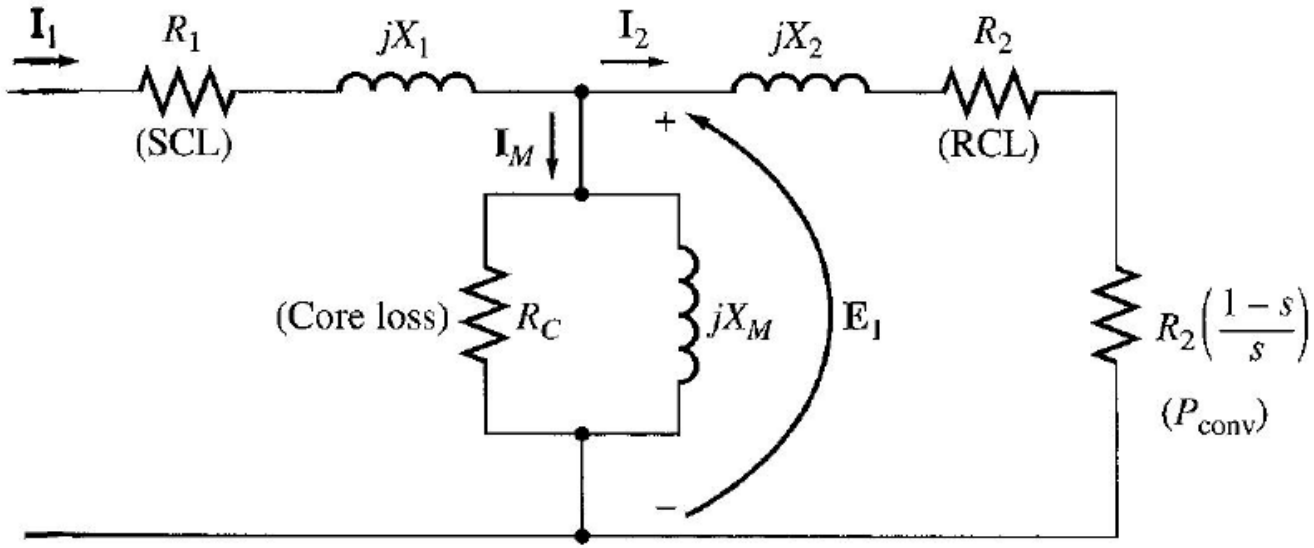
$$= P_{AG} - sP_{AG}$$

$$\Rightarrow \boxed{P_{conv} = (1 - s)P_{AG}}$$

$$\boxed{P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc}}$$

$$\Rightarrow \tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{(1-s)P_{AG}}{(1-s)\omega_{sync}} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$$

مدار معادل دیگر موتور القایی



Example

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

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

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

The total rotational losses are 1100 W and are assumed to be constant. The core loss is lumped in with the rotational losses. For a rotor slip of 2.2 percent at the rated voltage and rated frequency, find the motor's

(*a*) Speed
(*b*) Stator current
(*c*) Power factor
(*d*) P_{conv} and P_{out}
(*e*) τ_{ind} and τ_{load}
(*f*) Efficiency

Example

(*a*) The synchronous speed is

$$n_{\text{sync}} = \frac{120 f_e}{P}$$

$$= \frac{120(60 \text{ Hz})}{4 \text{ poles}} = 1800 \text{ r/min}$$

or

$$\omega_{\text{sync}} = (1800 \text{ r/min})\left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ r}}\right)\left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)$$

$$= 188.5 \text{ rad/s}$$

The rotor's mechanical shaft speed is

$$n_m = (1 - s)n_{\text{sync}}$$

$$= (1 - 0.022)(1800 \text{ r/min}) = 1760 \text{ r/min}$$

or

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{\text{sync}}$$

$$= (1 - 0.022)(188.5 \text{ rad/s}) = 184.4 \text{ rad/s}$$

Example

(*b*)

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 = \frac{0.332}{0.022} + j0.464 = 15.09 + j0.464\ \Omega = 15.10\ \angle 1.76^\circ\ \Omega$$

$$Z_f = \frac{1}{1/jX_M + 1/Z_2}$$

$$= \frac{1}{-j0.038 + 0.0662\ \angle -1.76^\circ} = 12.94\ \angle 31.1^\circ\ \Omega$$

$$Z_{tot} = Z_{stat} + Z_f$$

$$= 0.641 + j1.106 + 12.94\ \angle 31.1^\circ\ \Omega$$

$$= 11.72 + j7.79 = 14.07\ \angle 33.6^\circ\ \Omega$$

Example

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{V}_\phi}{Z_{tot}}$$

$$= \frac{266 \angle 0° \text{ V}}{14.07 \angle 33.6° \ \Omega} = 18.88 \angle -33.6° \text{ A}$$

(*c*) The power motor power factor is

$$\text{PF} = \cos 33.6° = 0.833 \quad \text{lagging}$$

(*d*) The input power to this motor is

$$P_{in} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta$$

$$= \sqrt{3}(460 \text{ V})(18.88 \text{ A})(0.833) = 12{,}530 \text{ W}$$

Example

The stator copper losses in this machine are

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

$$P_{SCL} = 3(18.88\ \text{A})^2(0.641\ \Omega) = 685\ \text{W}$$

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} = 12{,}530 - 685 = 11.845\ \text{W}$$

$$P_{conv} = (1 - s)P_{AG} = (1 - 0.022)(11{,}845\ \text{W}) = 11{,}585\ \text{W}$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot}$$

$$= 11{,}585\ \text{W} - 1100\ \text{W} = 10{,}485\ \text{W}$$

$$= (10{,}485\ \text{W})\left(\frac{1\ \text{hp}}{746\ \text{W}}\right) = 14.1\ \text{hp}$$

Example

(*e*) The induced torque is given by

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{11{,}845\ \text{W}}{188.5\ \text{rad/s}} = 62.8\ \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{10{,}485\ \text{W}}{184.4\ \text{rad/s}} = 56.9\ \text{N} \cdot \text{m}$$

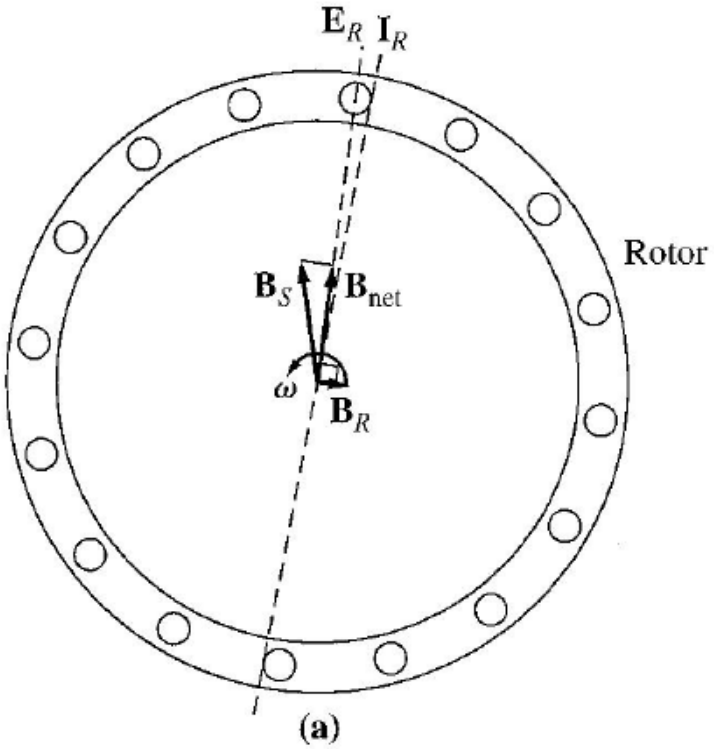
(*f*) The motor's efficiency at this operating condition is

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

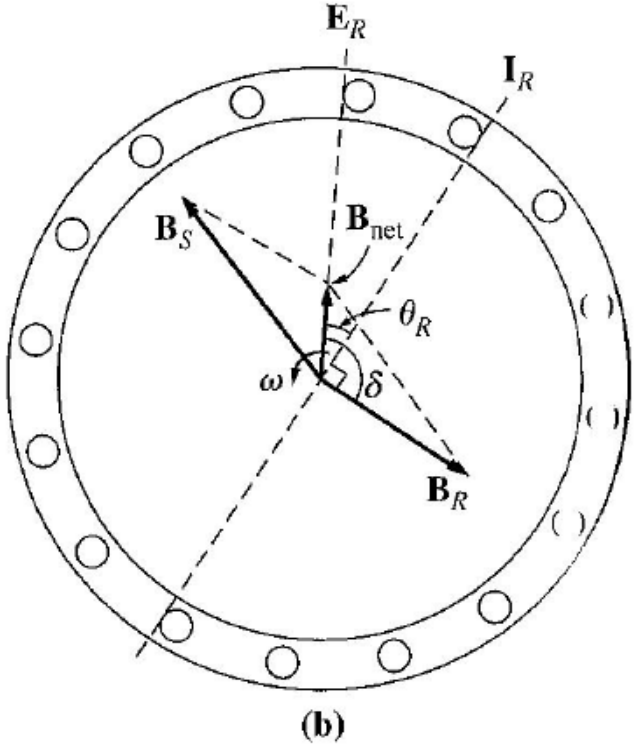
$$= \frac{10{,}485\ \text{W}}{12{,}530\ \text{W}} \times 100\% = 83.7\%$$

مشخصه گشتاور-سرعت موتور القایی

دیدگاه فیزیکی



The magnetic fields in an induction motor under **light loads**



The magnetic fields in an induction motor under **heavy loads**

مشخصه گشتاور-سرعت موتور القایی

دیدگاه فیزیکی

شرایط بی باری:

- راکتانس رتور و جریان رتور ناچیز است و جریان و ولتاژ رتور همفازند
- B_{net} که توسط I_m تولید میشود متناسب با E_1 است. بنابراین B_{net} تقریبا ثابت است.
- جریان رتور یک میدان B_R تولید میکند که با زاویه کمی بیشتر از ۹۰ درجه عقبتر از B_{net} است.
- جریان استاتور در شرایط بی باری نسبتا بزرگ است زیرا تولید B_{net} میکند

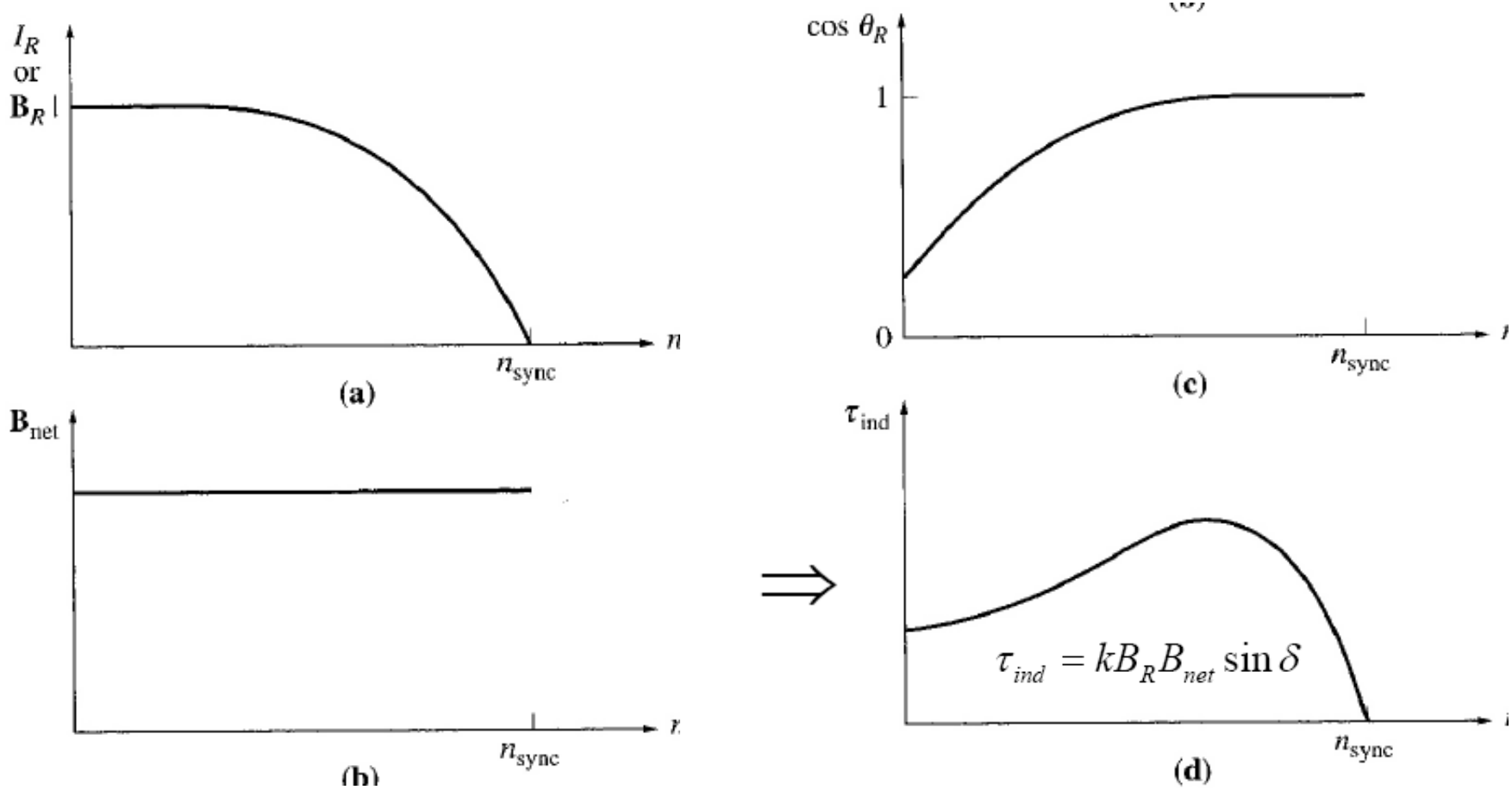
مشخصه گشتاور-سرعت موتور القایی

دیدگاه فیزیکی

شرایط تحت بار:

- سرعت نسبی بزرگتر به معنای قوی تر بودن E_R و I_R و B_R است. فرکانس رتور f_r افزایش میابد و راکتانس رتور ωL_R افزایش میابد.
- جریان رتور پس فاز تر میشود و میدان رتور نیز با جریان جابجا میشود.
- این امر باعث افزایش δ شده و گشتاور را افزایش میدهد تا زمانی که δ کمتر ۹۰ درجه باشد. افزایش بیش از ۹۰ درجه موجب کاهش گشتاور میشود.
- اثر خالص این فرایند افزایش گشتاور موتور است که برای تغذیه بار لازم است.

مشخصه گشتاور-سرعت موتور القایی



مشخصه گشتاور–سرعت موتور القایی

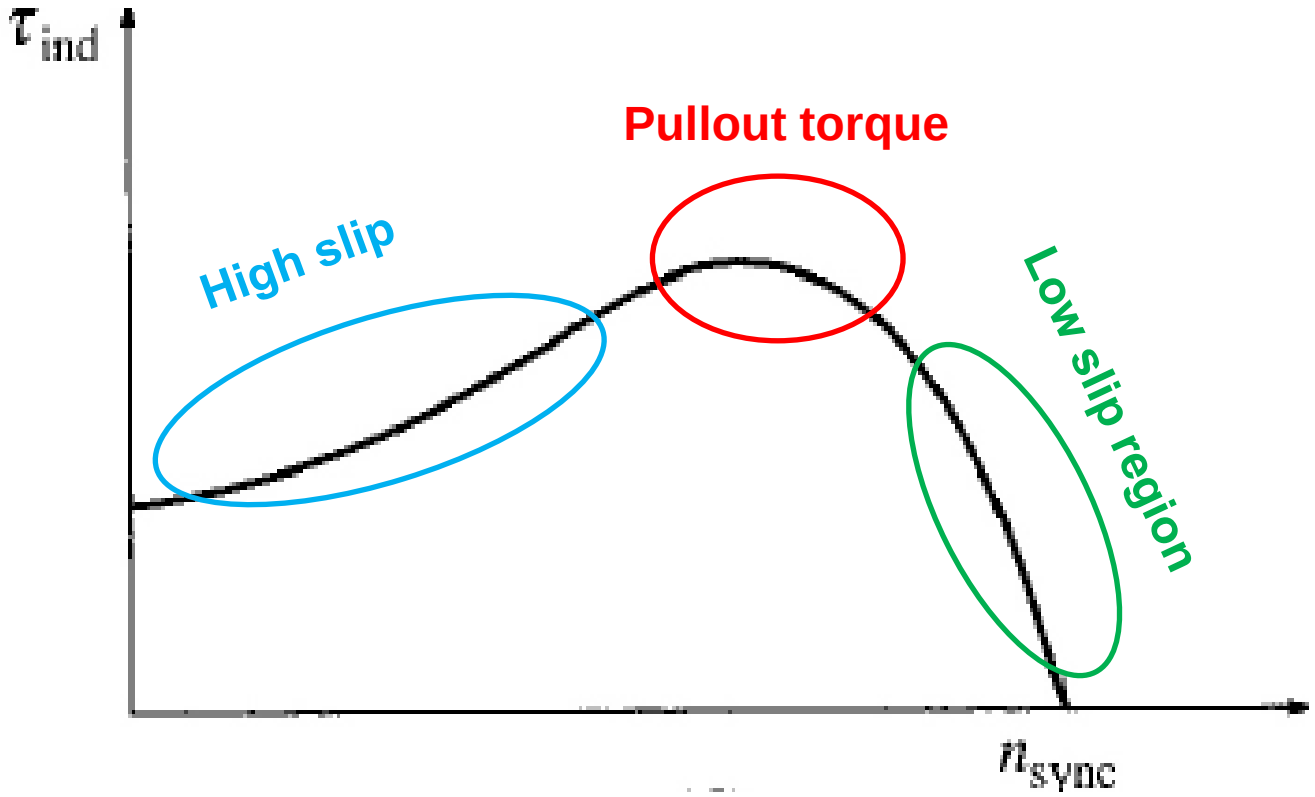
$$\tau_{ind} = kB_R B_{net} \sin\delta$$

$$\sin\delta = \sin\left(\theta_r + 90^\circ\right) = \cos\theta_r$$

$$\theta_r = \tan^{-1}\frac{X_r}{R_r} = \tan^{-1}\frac{sX_o}{R_r}$$

θ_r: the angle between E_R and I_R

مشخصه گشتاور–سرعت موتور القایی



- Pullout torque ≈ 200% to 250% of the rated full load torque.
- Starting torque ≈ 150% of full load torque;
- Hence, induction motor may be started at full load.

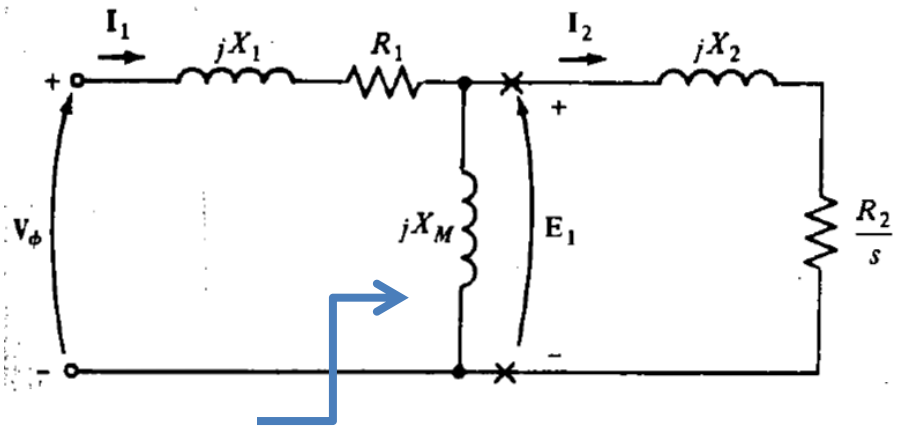
معادلات گشتاور موتور القایی

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

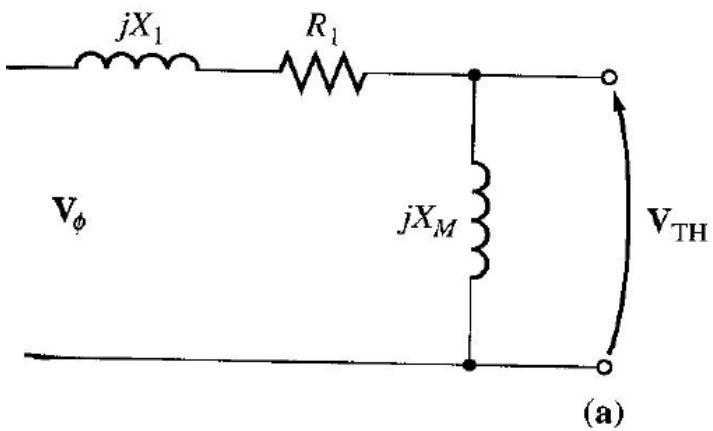
- P_{AG} توان انتقال یافته از استاتور به رتور از طریق فاصله هوایی است.

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

- برای محاسبه جریان I_2 ابتدا مدار معادل تونن از دید رتور را بدست می اوریم:



معادلات گشتاور موتور القایی



ولتاژ تونن

$$V_{TH} = \mathbf{V}_\phi \frac{Z_M}{Z_M + Z_1}$$

$$= \mathbf{V}_\phi \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M}$$

امپدانس تونن

$$Z_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)}$$

معادلات گشتاور موتور القایی

تقریبهای عملی

$$X_M \gg R_1 \qquad X_M \gg X_1 \text{ and } X_M + X_1 \gg R_1$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{V_{TH} = V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M}}$$

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

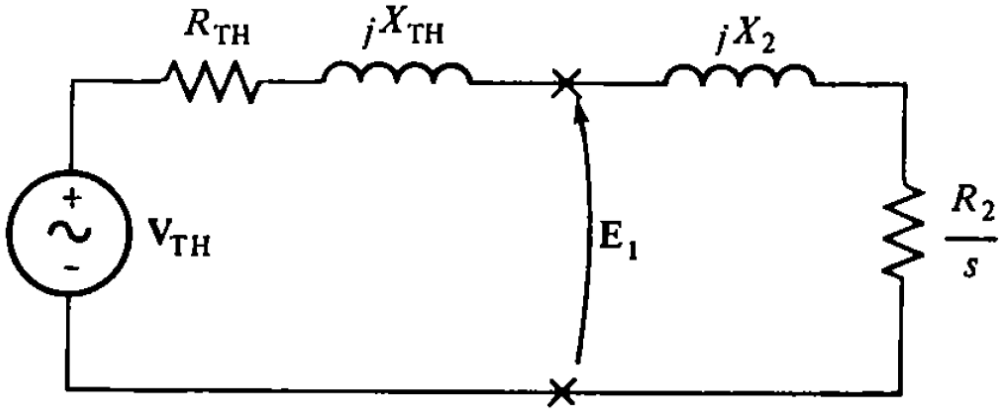
معادلات گشتاور موتور القایی

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

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

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

معادلات گشتاور موتور القایی



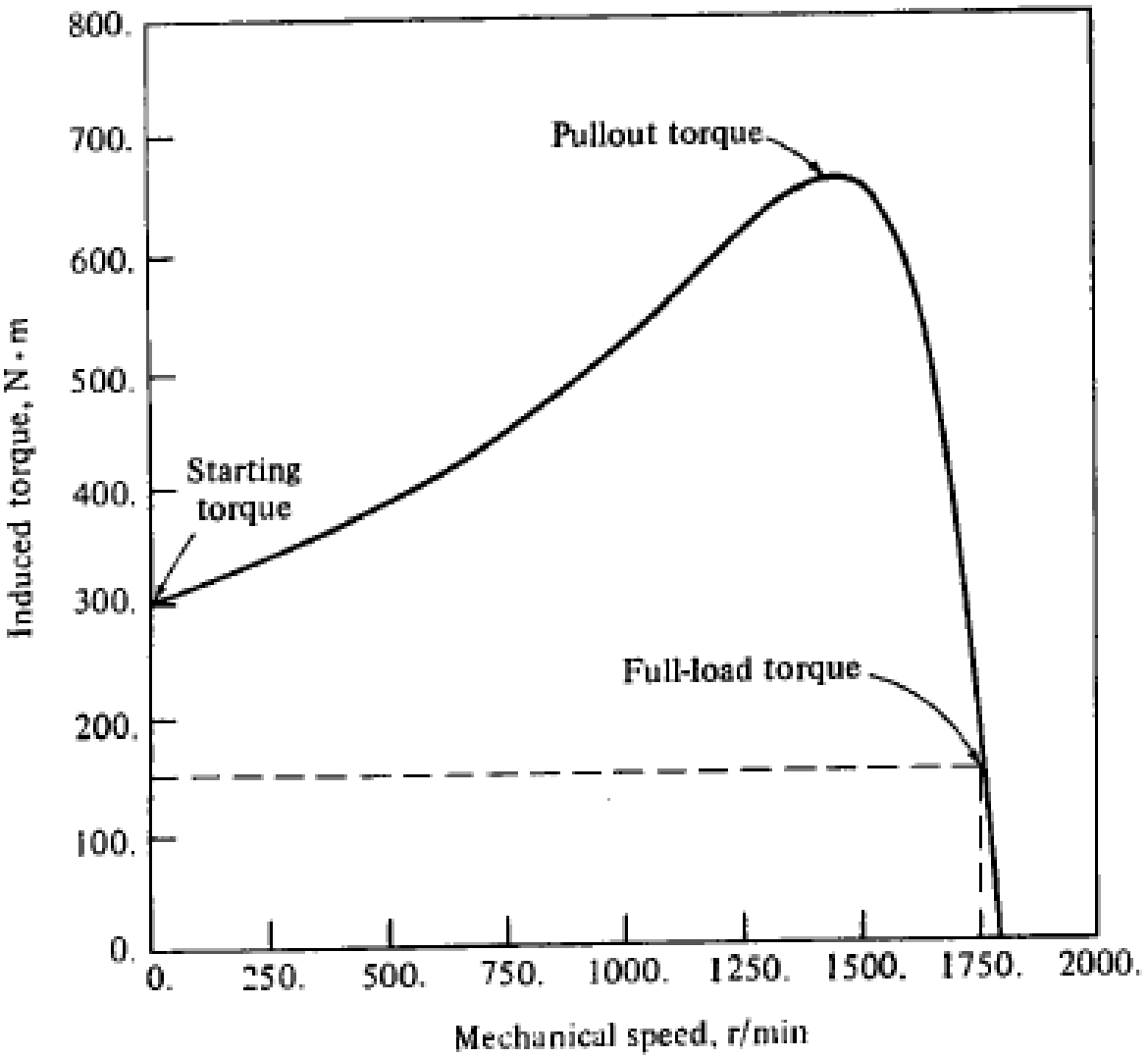
$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{V}_{TH}}{Z_{TH} + Z_2}$$

$$= \frac{\mathbf{V}_{TH}}{R_{TH} + R_2/s + jX_{TH} + jX_2}$$

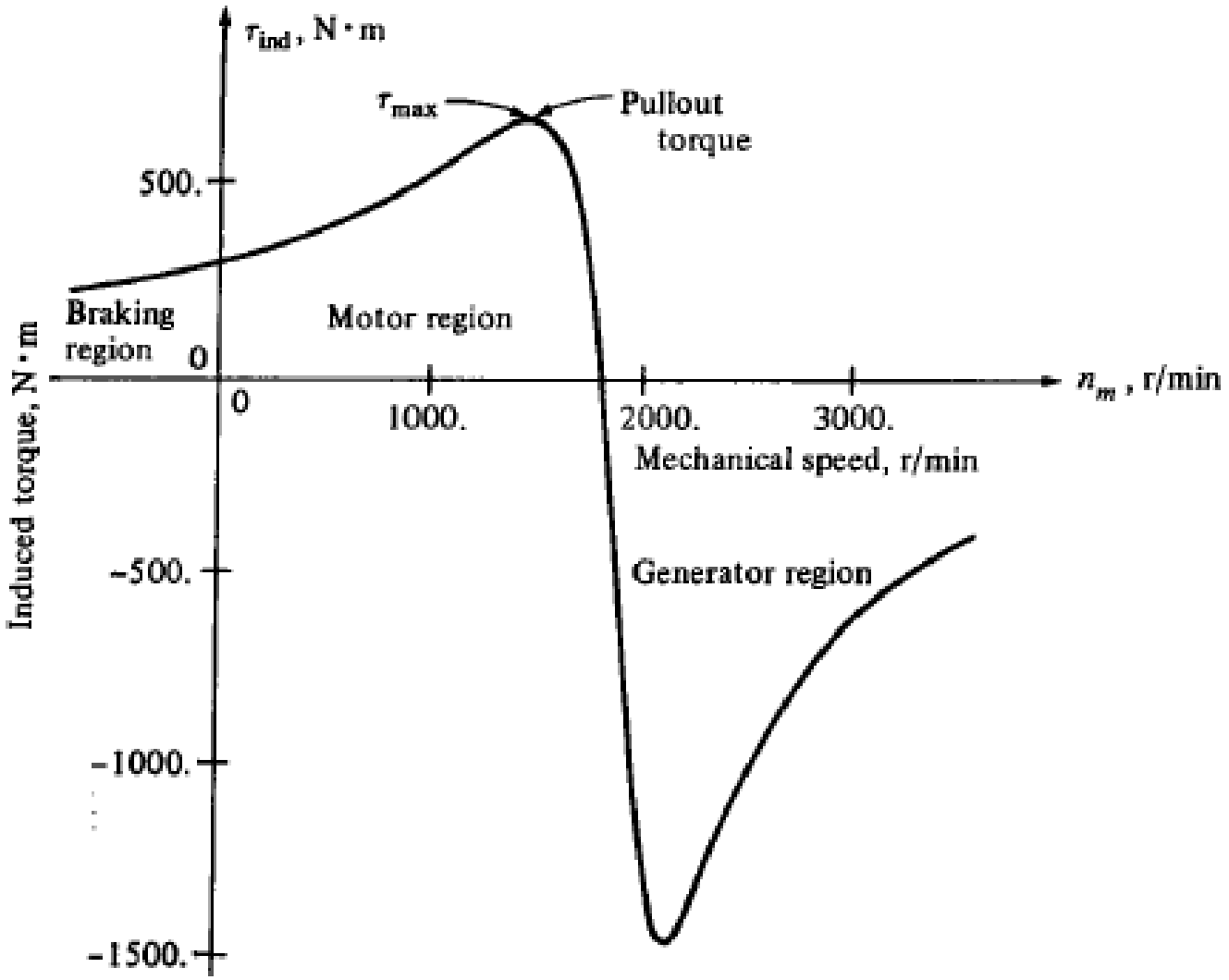
$$|I_2| = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

جریان رتور که میخواستیم محاسبه کنیم

منحنی گشتاور-سرعت موتور القایی



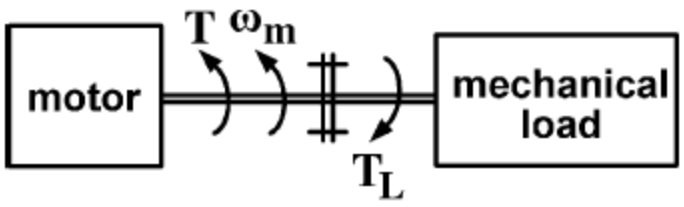
منحنی گشتاور-سرعت موتور القایی

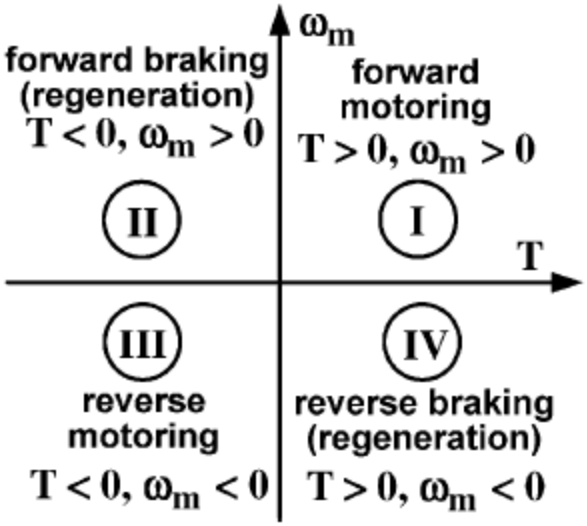


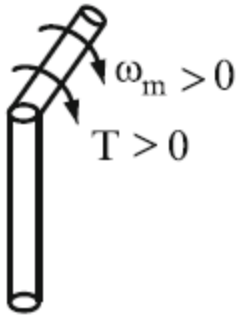
نکاتی پیرامون منحنی گشتاور-سرعت موتور القایی

- گشتاور القایی در سرعت سنکرون صفر است.
- منحنی در اطراف سرعت سنکرون صفر است.
- گشتاور راه اندازی بزرگ است.
- گشتاور در یک لغزش معین با مجذور ولتاژ متناسب است.
- اگر موتور با سرعت بیشتر از سنکرون بچرخد موتور به ژنراتور بدل میشود.
- اگر جهت دوران میدان استاتور معکوس شود یک گشتاور ترمزی تولید میگردد (انرژی از بار به رتور و از استاتور به رتور منتقل میشود)

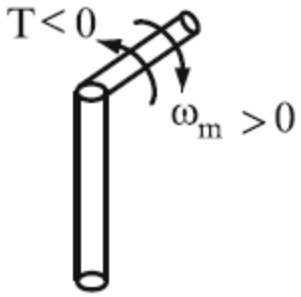
تقسیم بندی مود کار ماشین القایی



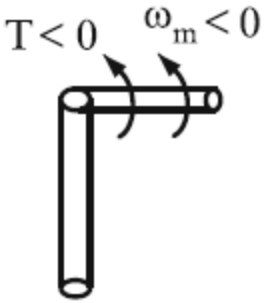




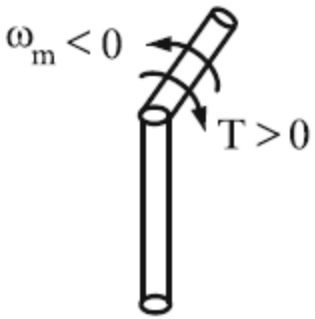
acceleration in forward direction



deceleration in forward direction



acceleration in reverse direction



deceleration in reverse direction