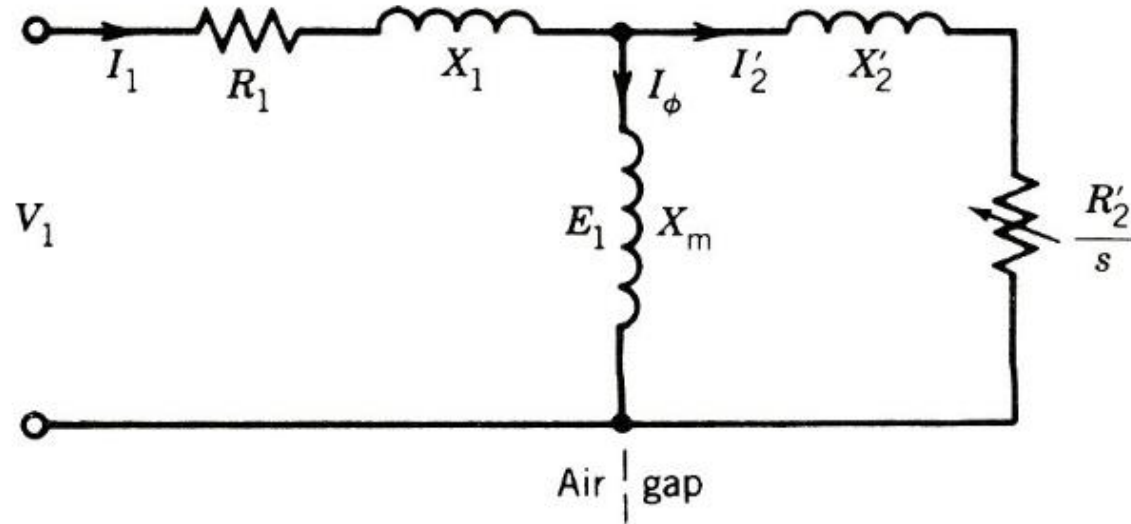


مشخصه های عملکردی موتور القایی سه فاز



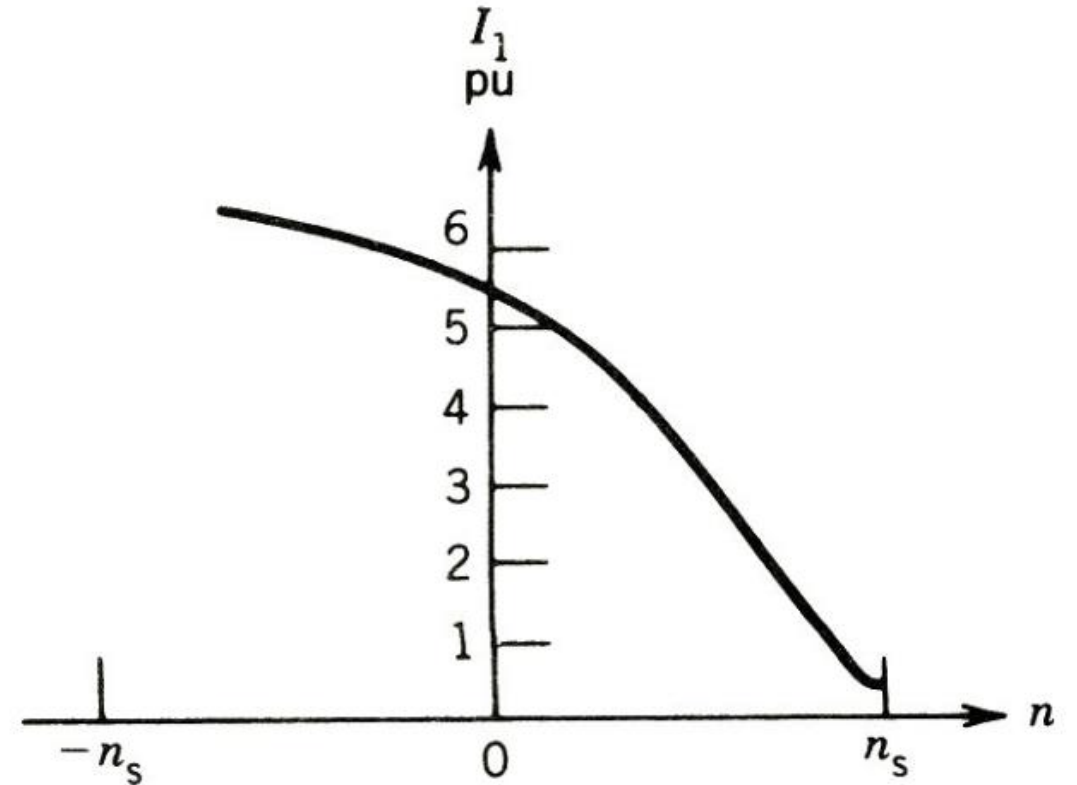
• جریان ورودی

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = I_\phi + I_2'$$

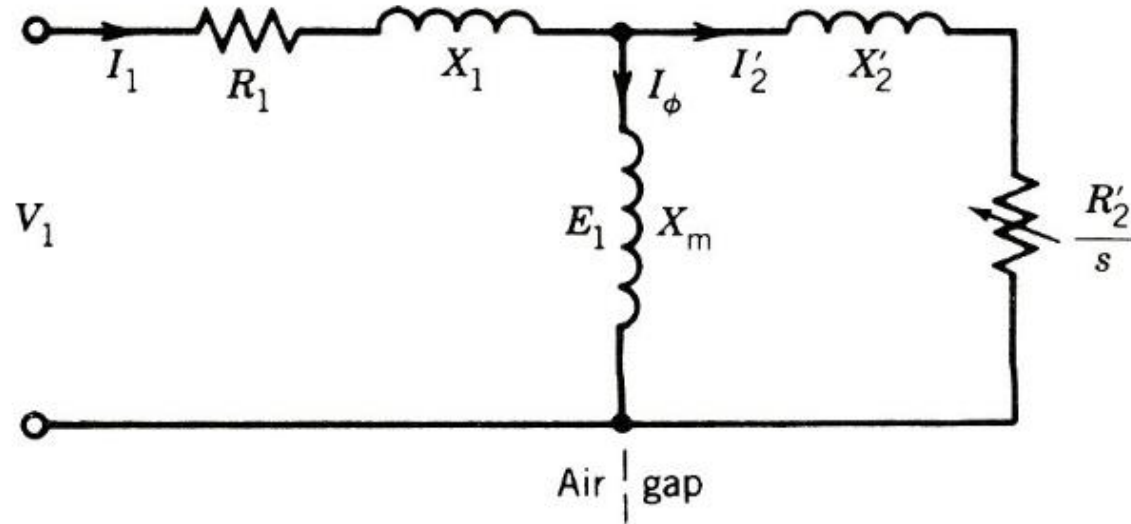
$$Z_1 = R_1 + jX_1 + jX_m \parallel \left(\frac{R_2'}{s} + jX_2' \right)$$

$$= R_1 + jX_1 + \frac{jX_m(R_2'/s + jX_2')}{R_2'/s + j(X_m + X_2')}$$

$$= |Z_1| \angle \theta_1$$



مشخصه های عملکردی موتور القایی سه فاز

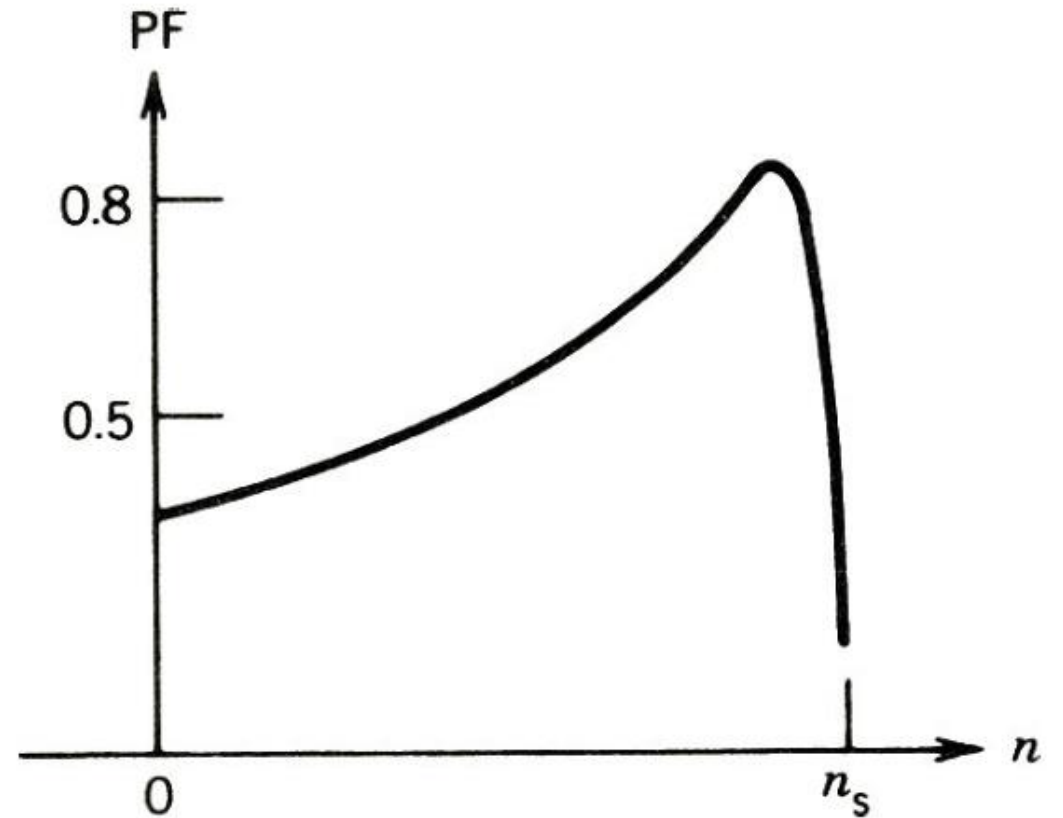


ضریب توان • $PF = \cos \theta_1$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 + jX_m \parallel \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)$$

$$= R_1 + jX_1 + \frac{jX_m(R'_2/s + jX'_2)}{R'_2/s + j(X_m + X'_2)}$$

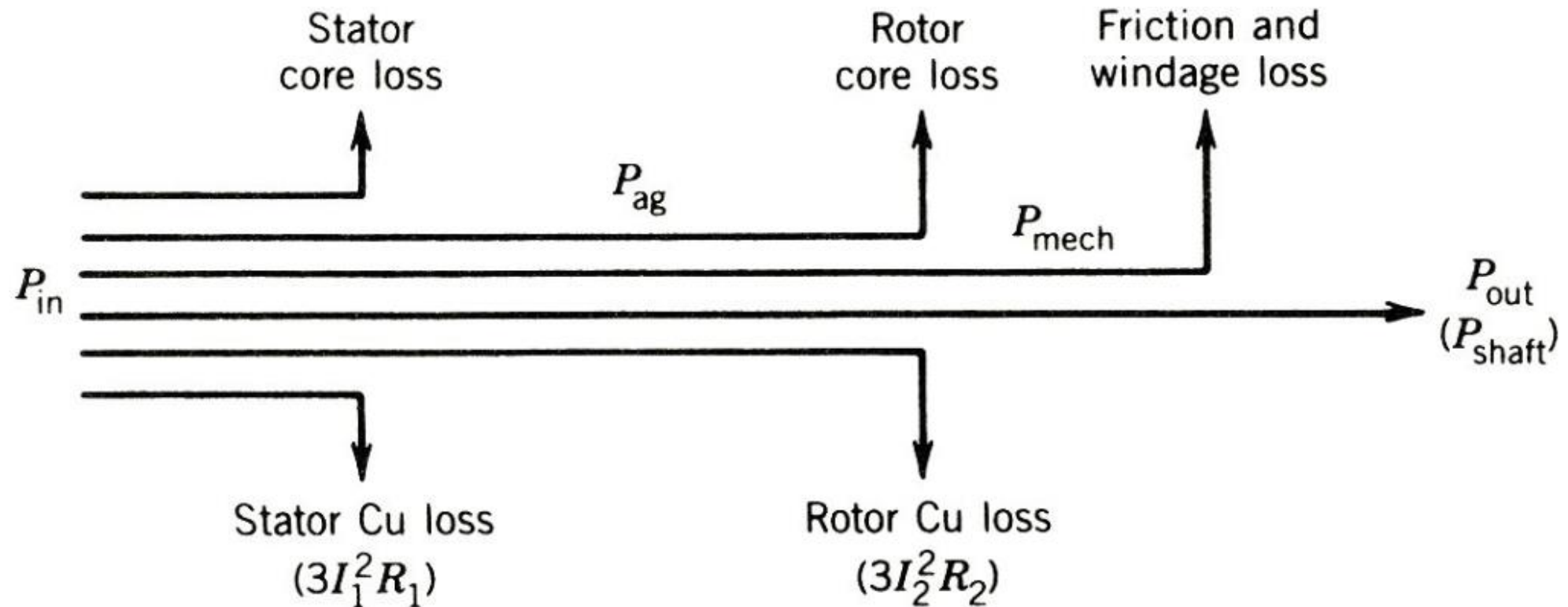
$$= |Z_1| \angle \theta_1$$



مشخصه های عملکردی موتور القایی سه فاز

- بازده

- نمودار پخش توان در موتور



مشخصه های عملکردی موتور القایی سه فاز

• بازده

$$P_{\text{in}} = 3 V_1 I_1 \cos \theta_1$$

$$P_1 = 3 I_1^2 R_1$$

$$P_2 = 3 I_2^2 R_2$$

$$\text{Eff} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

مشخصه های عملکردی موتور القایی سه فاز

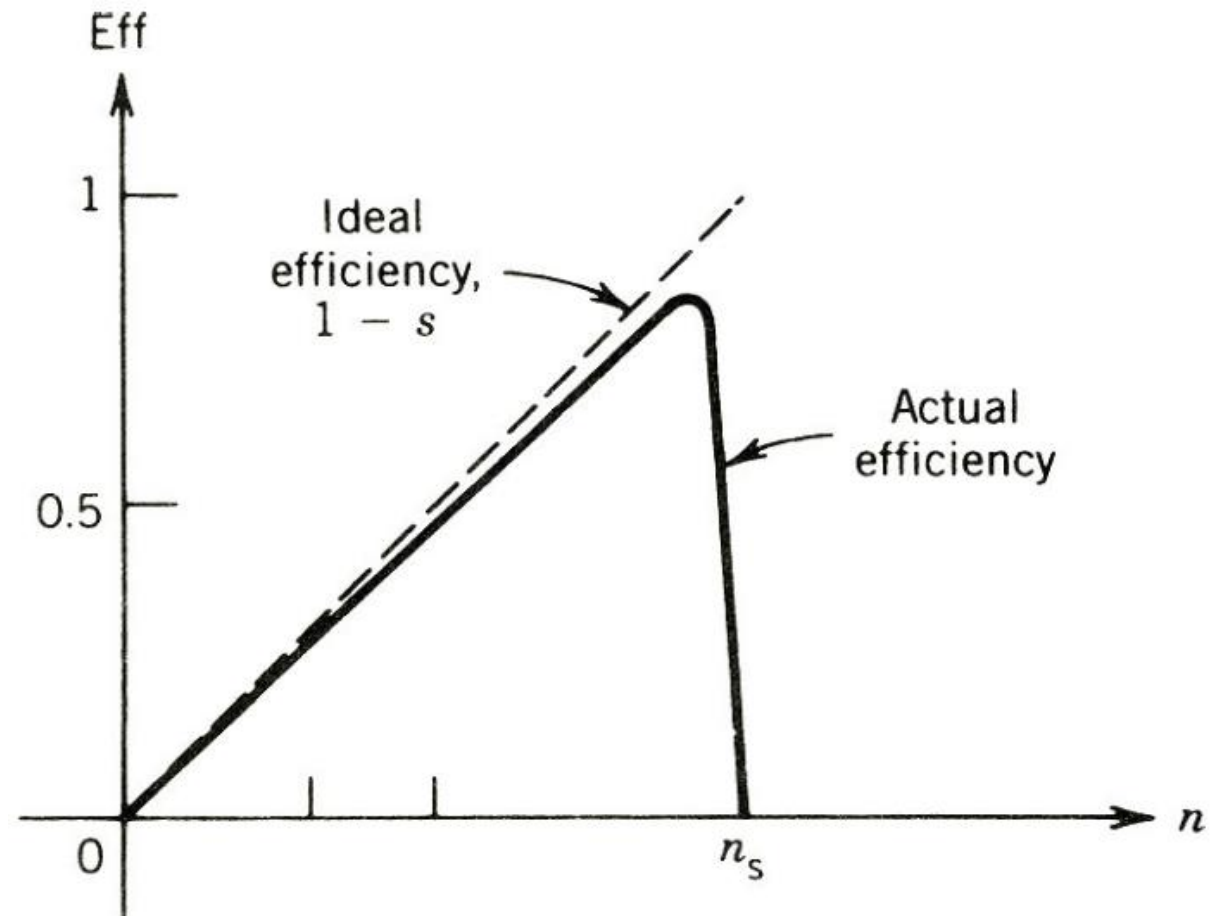
• بازده داخلی یا بازده ایده آل (از تمامی تلفات به جز تلفات مسی روتور صرف نظر می شود).

$$P_{ag} = P_{in}$$

$$P_2 = sP_{ag}$$

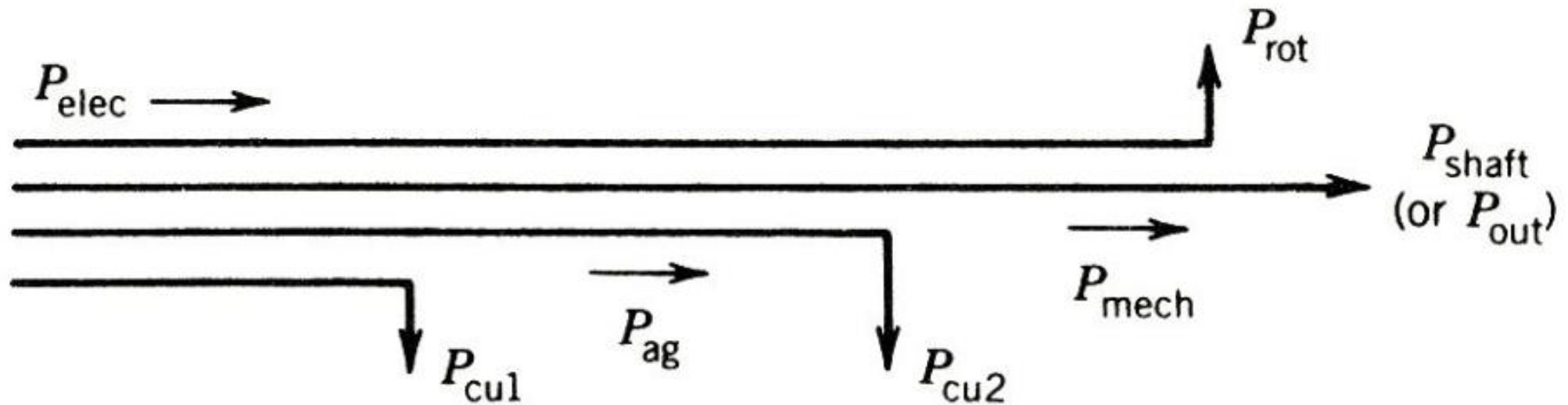
$$P_{out} = P_{mech} = P_{ag}(1 - s)$$

$$\text{Eff}_{(\text{ideal})} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - s$$



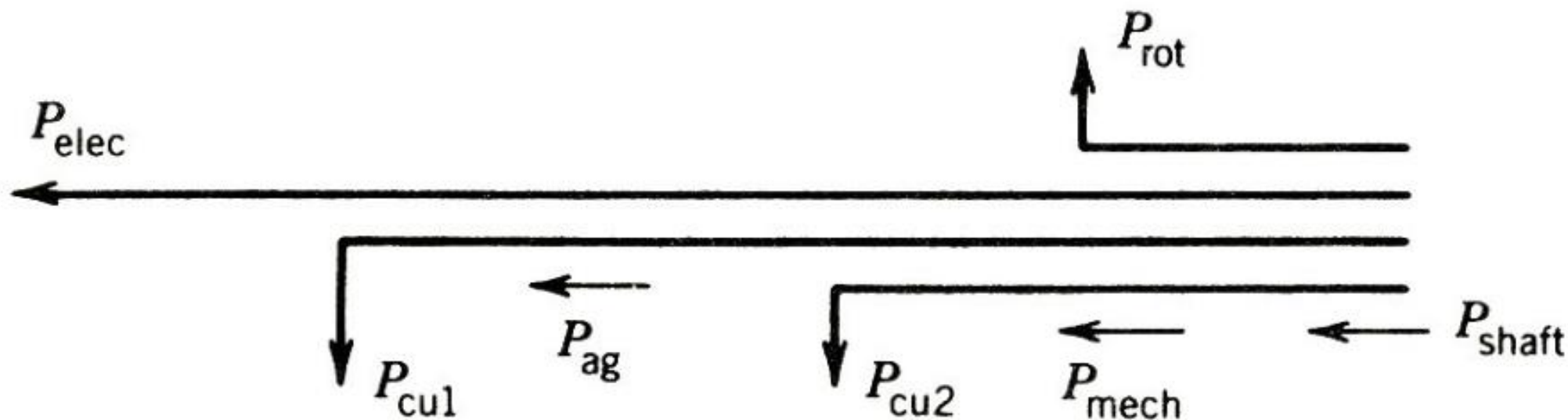
نمودار پخش توان ماشین القایی سه فاز

• مد موتوری



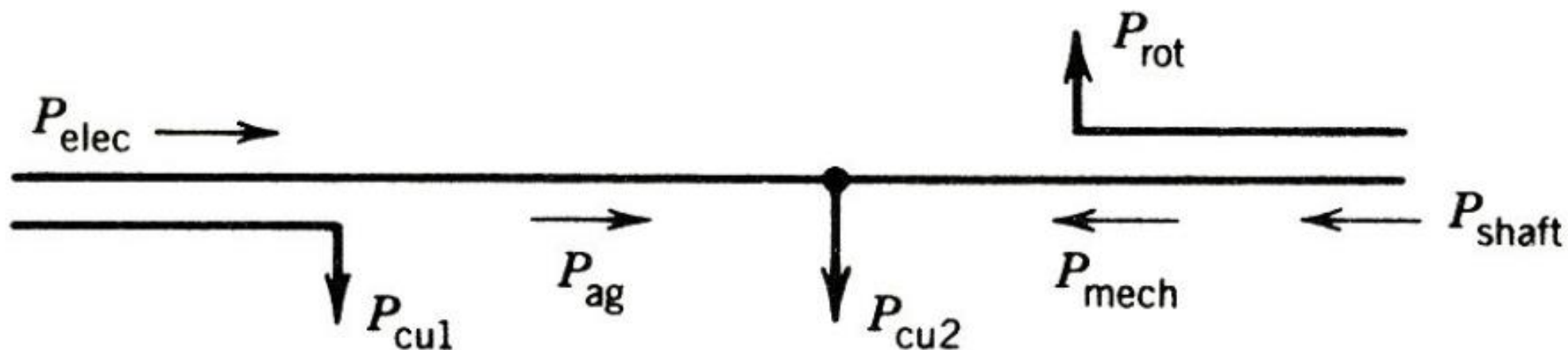
نمودار پخش توان ماشین القایی سه فاز

• مد ژنراتوری



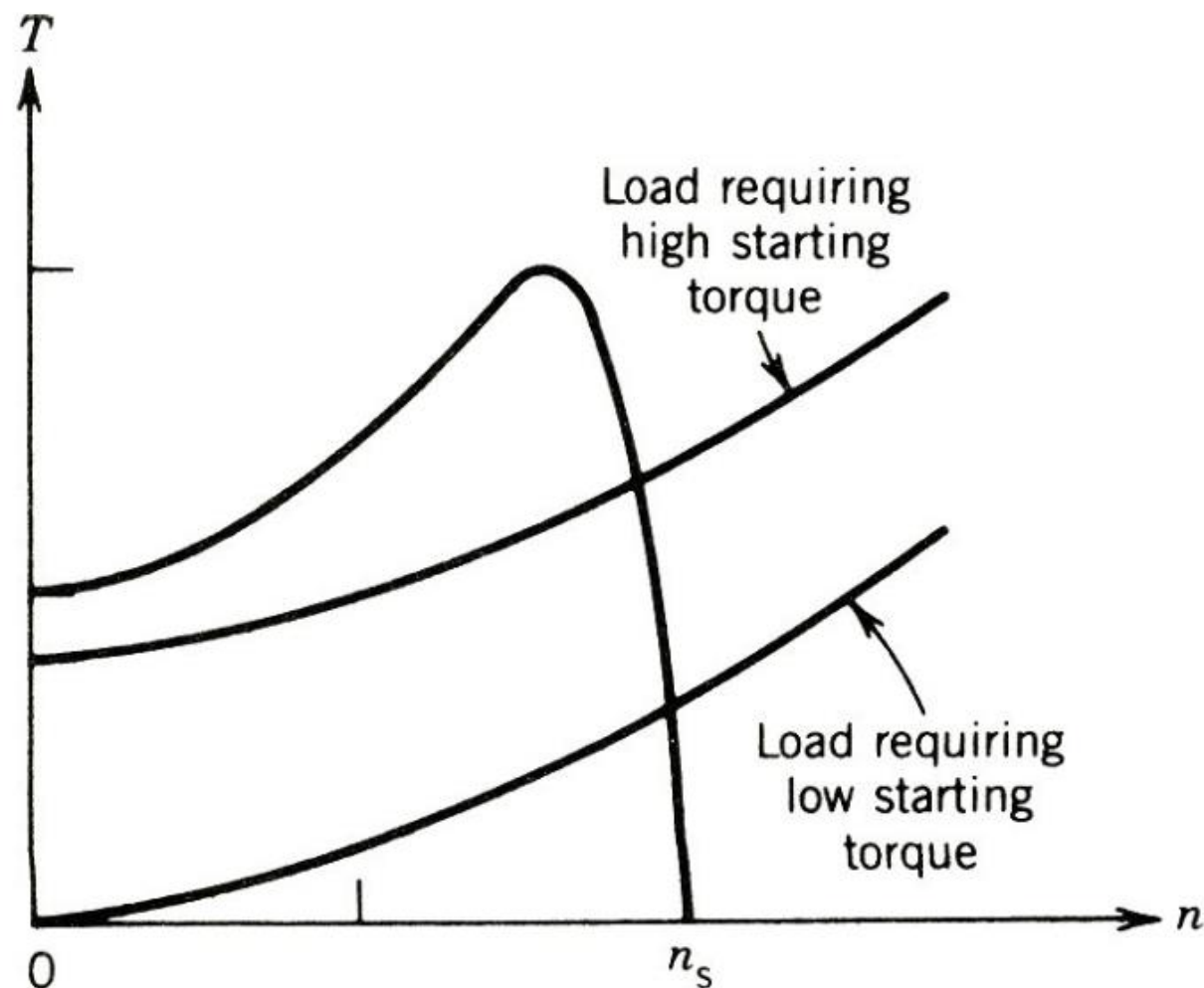
نمودار پخش توان ماشین القایی سه فاز

• مد ترمزی (ج)



تأثير مقاومة روتور بر عملکرد ماشین القای سه فاز

• بارهای با مشخصه گشتاور - سرعت مختلف



تأثير مقاومة روتور بر عملکرد ماشین القايی سه فاز

• موتور القايی روتور سيم بندی شده

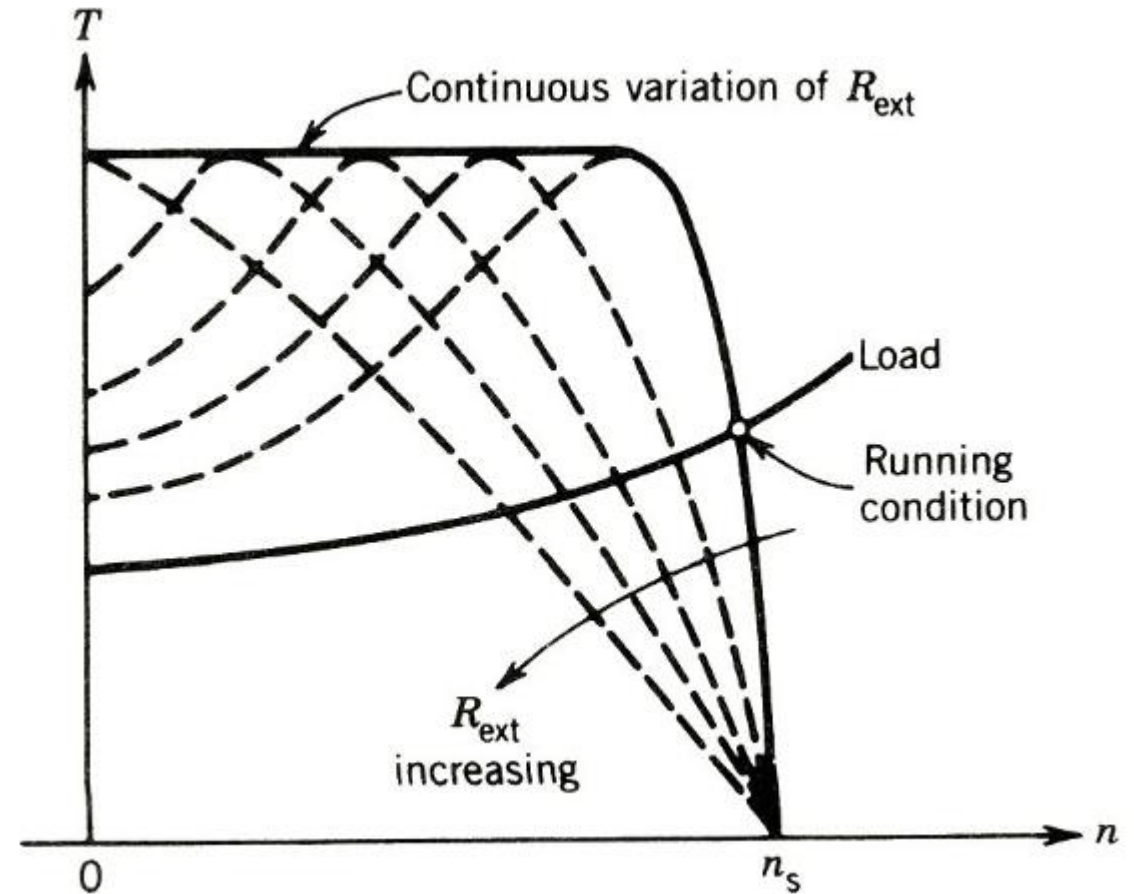
$$sT_{\max} = \frac{R'_2}{[R_{\text{th}}^2 + (X_{\text{th}} + X'_2)^2]^{1/2}}$$

$$T_{\max} = \frac{1}{2\omega_{\text{syn}}} \frac{V_{\text{th}}^2}{R_{\text{th}} + [R_{\text{th}}^2 + (X_{\text{th}} + X'_2)^2]^{1/2}}$$

$$sT_{\max} \simeq \frac{R'_2}{X_{\text{th}} + X'_2}$$

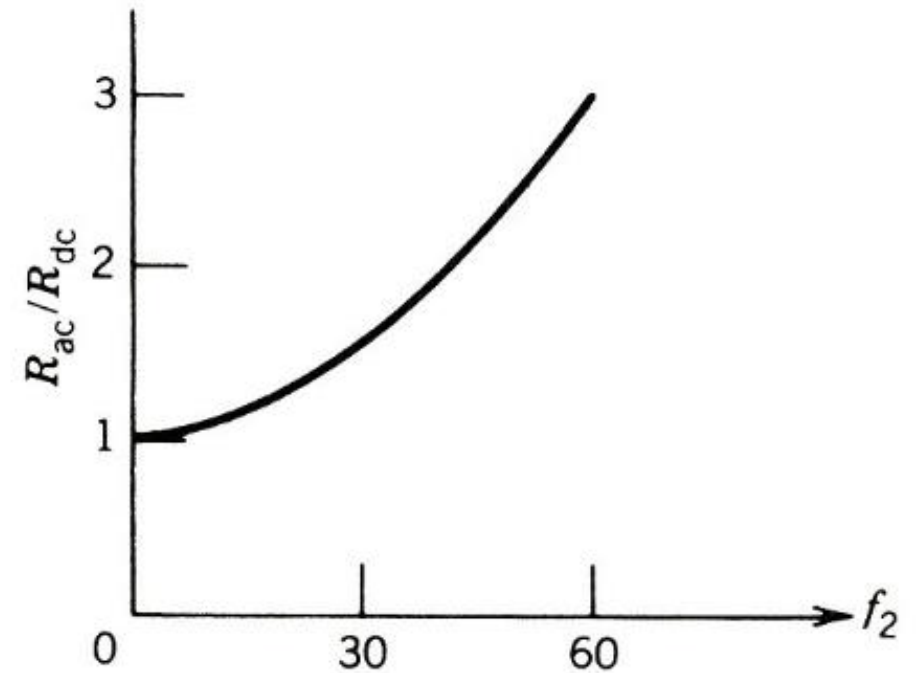
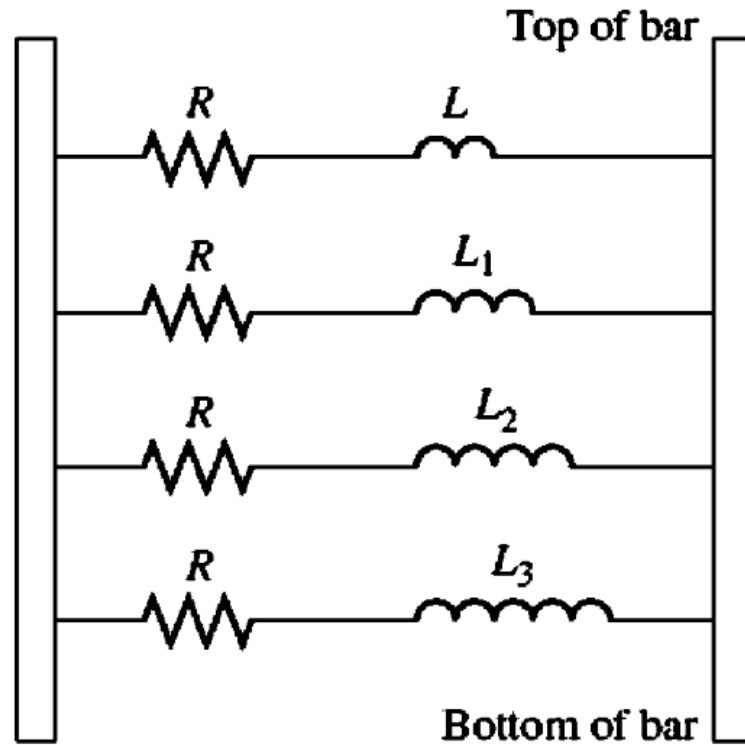
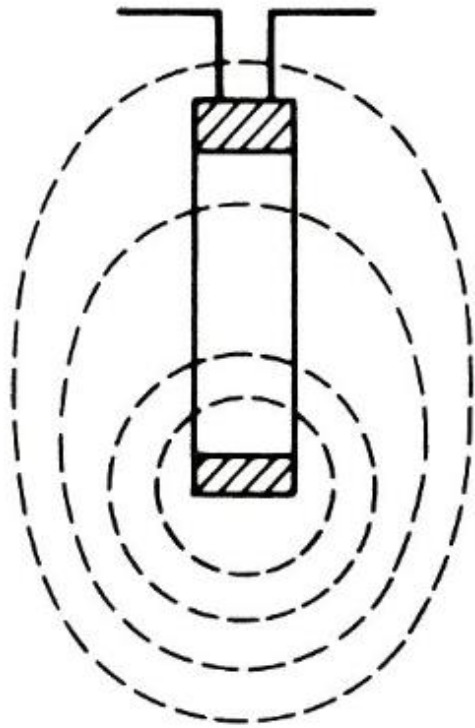
$$T_{\max} \simeq \frac{1}{2\omega_{\text{syn}}} \frac{V_{\text{th}}^2}{X_{\text{th}} + X'_2}$$

$$sT_{\max} \propto (R_{\text{w2}} + R_{\text{ext}})$$



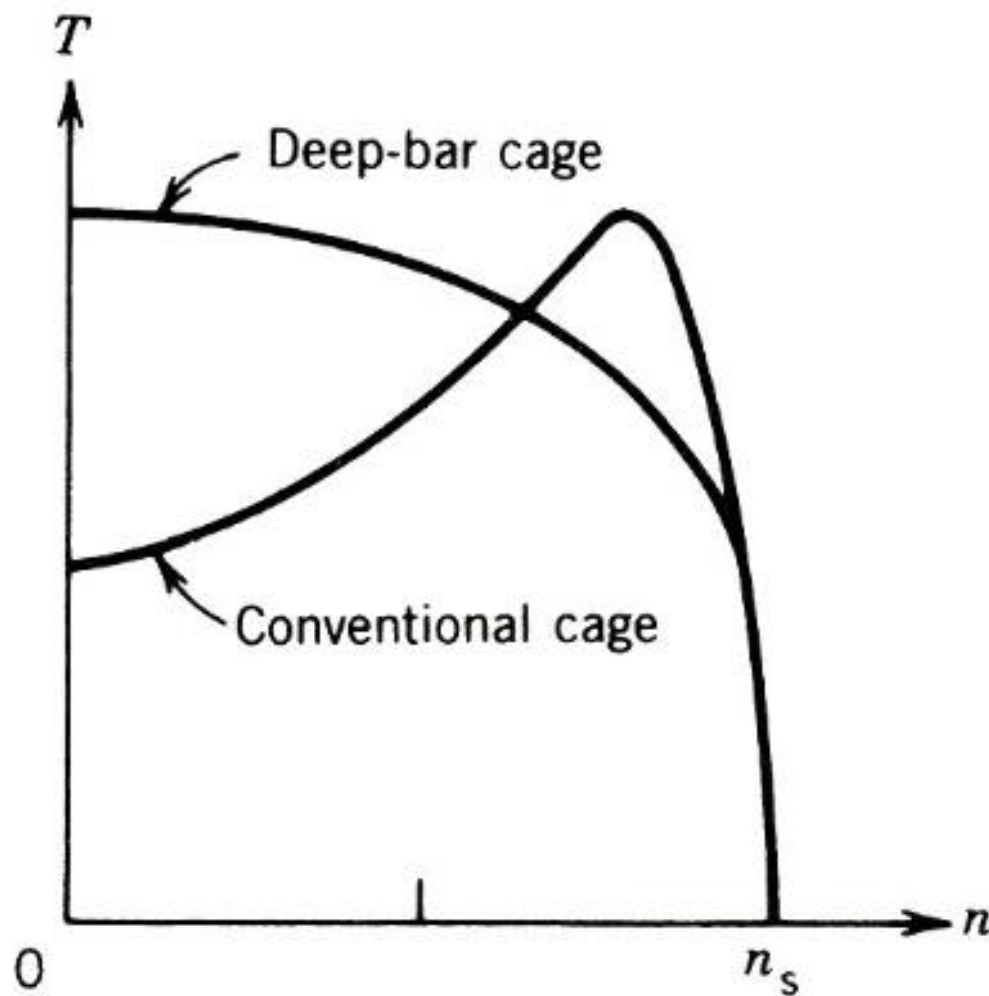
تأثير مقاومة روتور بر عملکرد ماشین القايی سه فاز

• موتور القايی قفس سنجابی



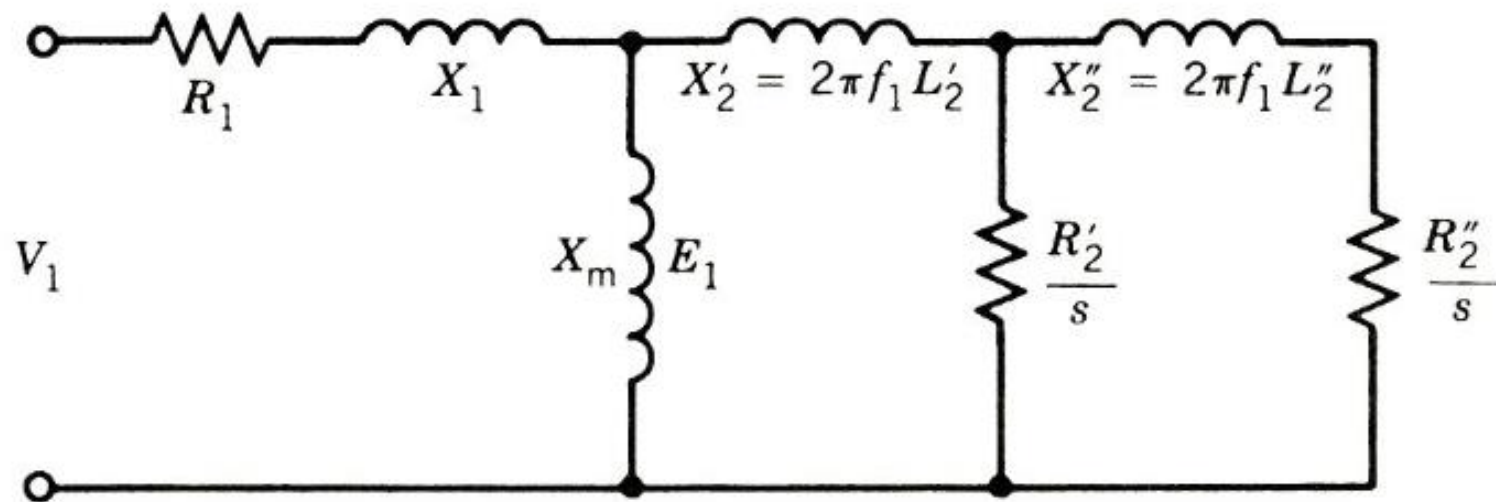
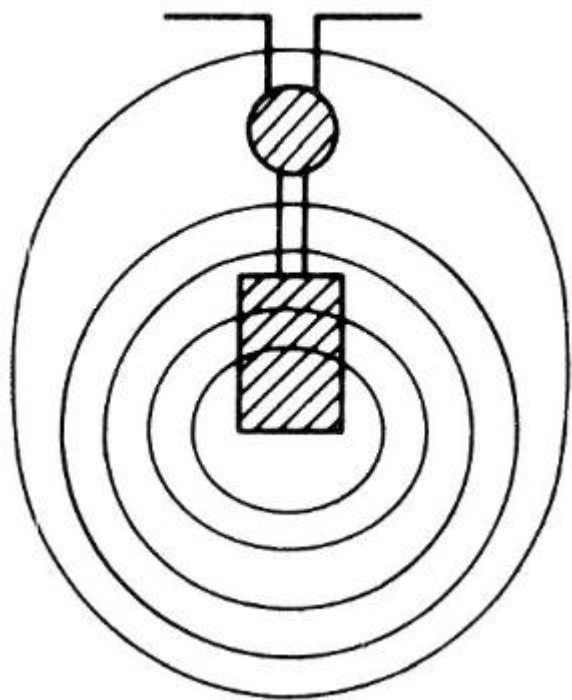
تأثير مقاومة روتور بر عملکرد ماشین القايی سه فاز

• موتور القايی قفس سنجابی



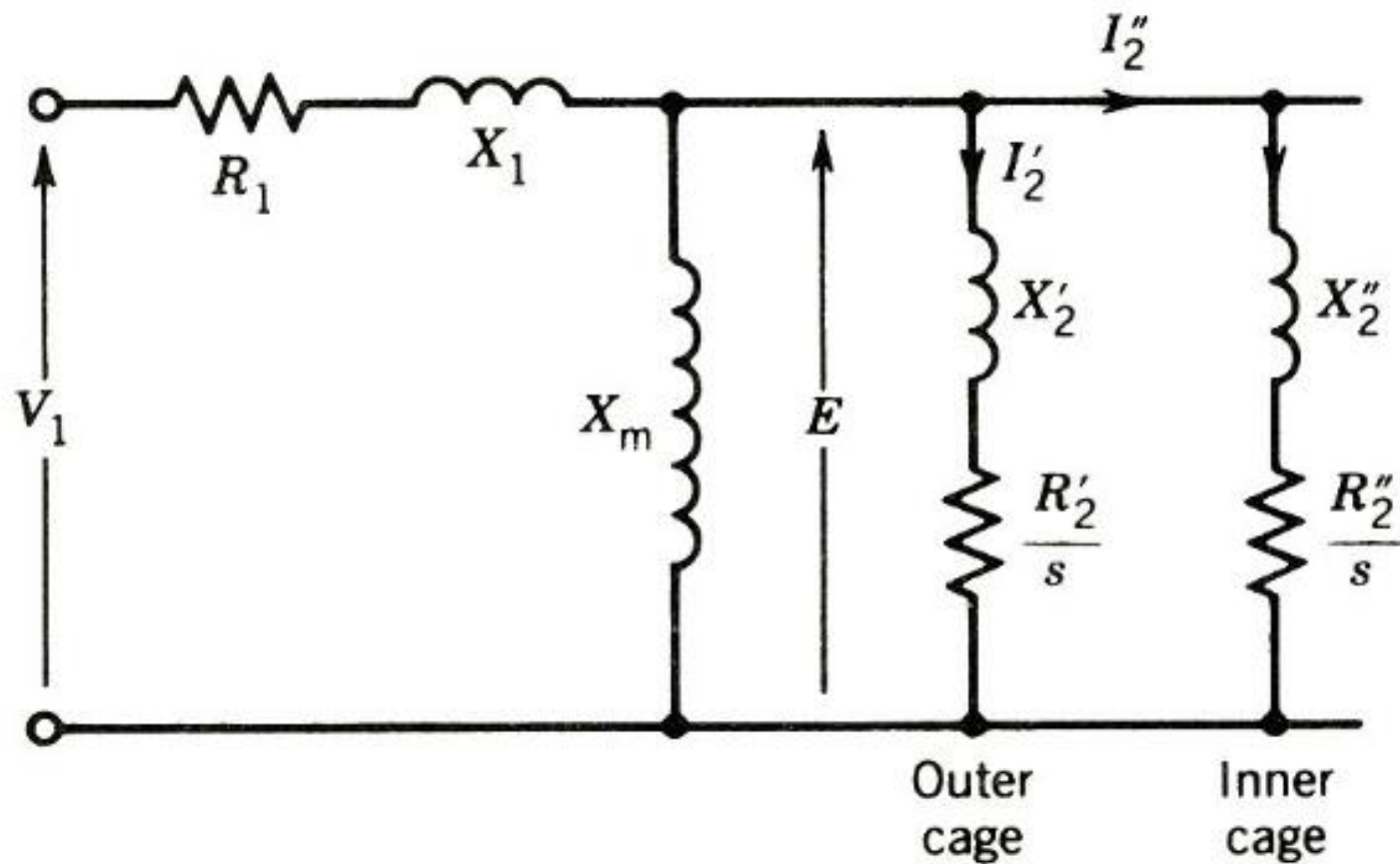
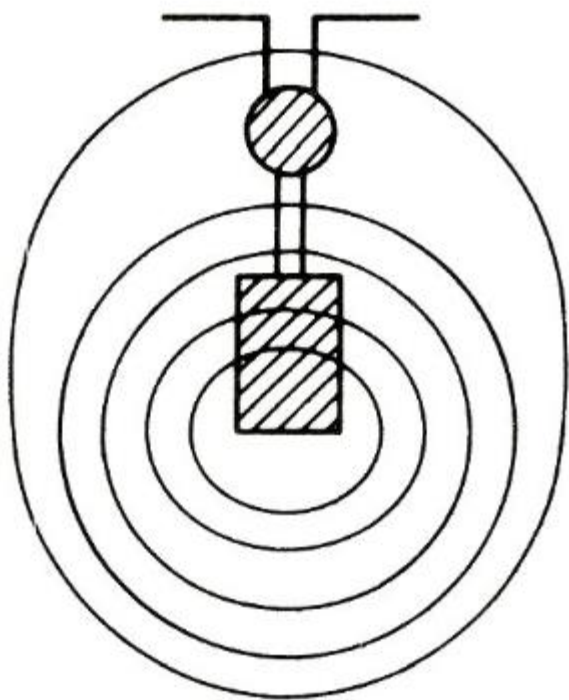
تأثير مقاومة روتور بر عملکرد ماشین القایی سه فاز

• موتور القایی دو قفسه ای (قفس سنجابی دابل)



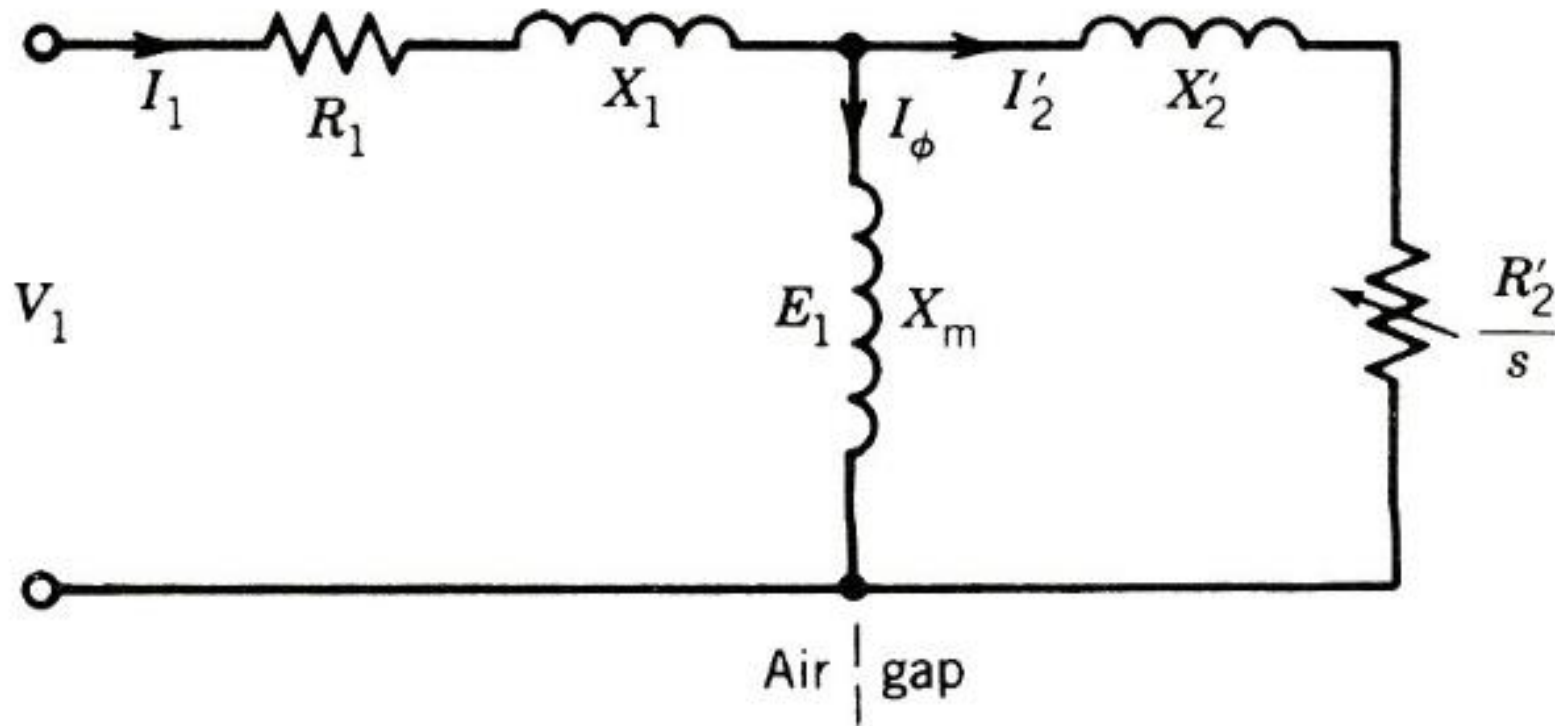
تأثير مقاومة روتور بر عملکرد ماشین القایی سه فاز

• موتور القایی دو قفسه ای (قفس سنجابی دابل)



تعیین پارامترهای مدار معادل موتور القایی سه فاز

• مدار معادل IEEE موتور القایی سه فاز



آزمایش های لازم برای تعیین پارامترهای مدار معادل موتور القایی سه فاز

• آزمایش DC

• آزمایش بی باری یا (NLT)

• آزمایش روتور قفل شده یا (BRT)

آزمایش DC برای تعیین مقاومت DC سیم پیچی استاتور

- اگر R مقدار DC مقاومت بین دو ترمینال از ترمینال های موتور القایی سه فاز باشد، آنگاه مقاومت هر فاز استاتور موتور عبارتست از:

$$R_1 = 0.5 R \quad \text{for Y-connection}$$

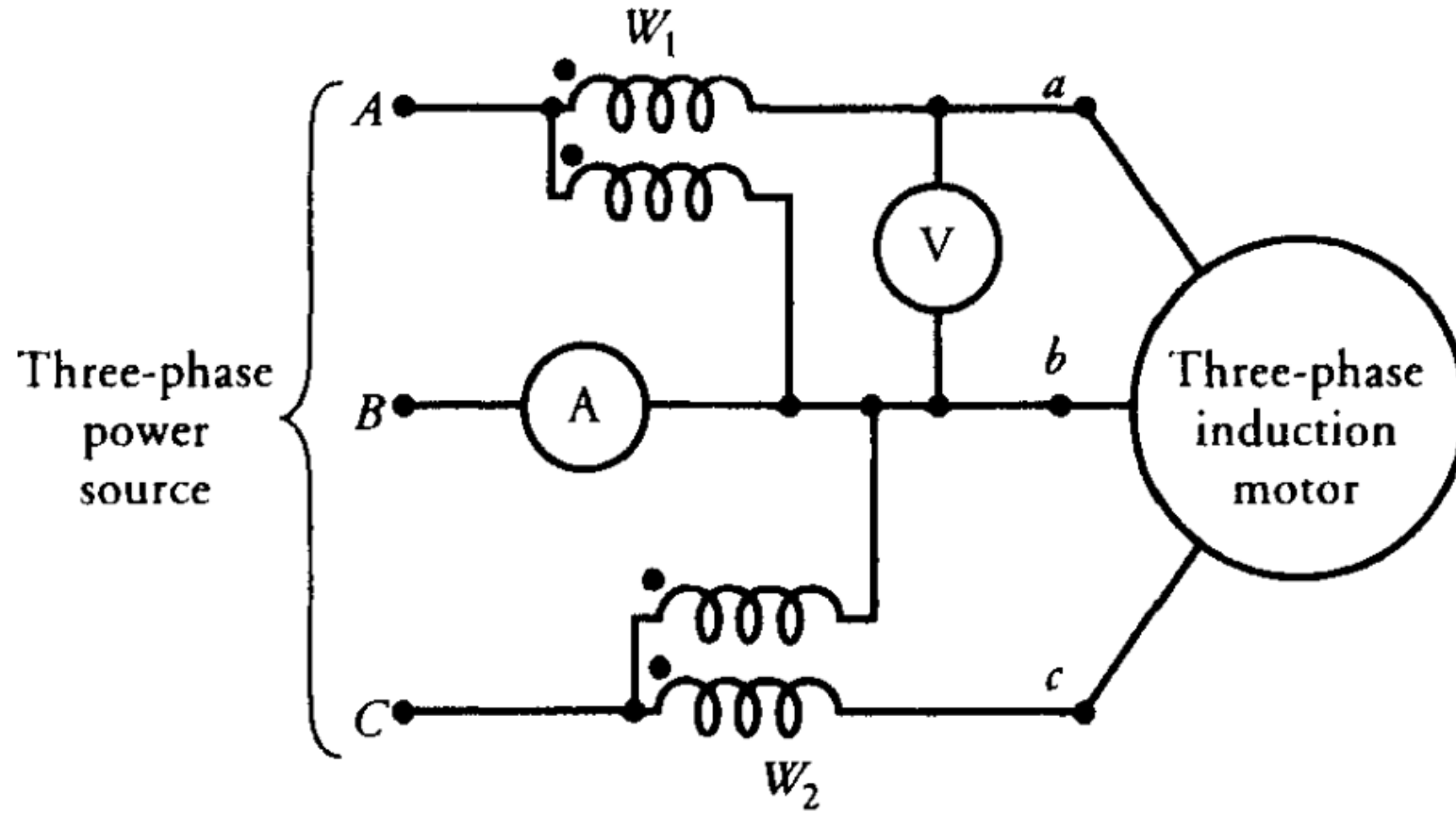
$$R_1 = 1.5 R \quad \text{for } \Delta\text{-connection}$$

- برای در نظر گرفتن اثر پوستی در شرایط تحریک AC با فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز، مقدار بدست آمده برای مقاومت را باید در ضریبی در محدوده ۱.۰۵ تا ۱.۲۵، ضرب نمود.
- این آزمایش باید در شرایطی که موتور کار کرده و داغ است، انجام شود.

آزمایش بی باری موتور القایی سه فاز

- ❖ اطلاعاتی در خصوص جریان تحریک و تلفات چرخشی ماشین القایی ارائه می کند.
- ❖ با اعمال ولتاژ سه فاز متعادل تحت فرکانس نامی به سیم پیچی سه فاز استاتور انجام می شود.
- ❖ در این آزمایش هیچ بار مکانیکی به روتور کوپل نمی شود.
- ❖ در این شرایط، ولتاژ اعمالی به موتور در هر فاز (V_{NL})، جریان هر فاز موتور (I_{NL}) و توان دریافتی موتور (P_{NL}) اندازه گیری و یادداشت می شوند.
- ❖ توان دریافتی توسط موتور در این آزمایش، ناشی از تلفات هسته، اصطکاک و بادخوری می باشد.
- ❖ تلفات چرخشی کل در ولتاژ و فرکانس نامی در شرایط بارداری، معمولاً ثابت و برابر با مقدار آن در شرایط بی باری در نظر گرفته می شود.

آزمایش بی باری موتور القایی سه فاز

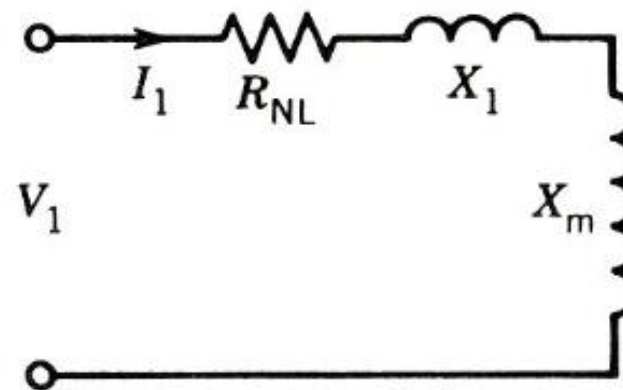
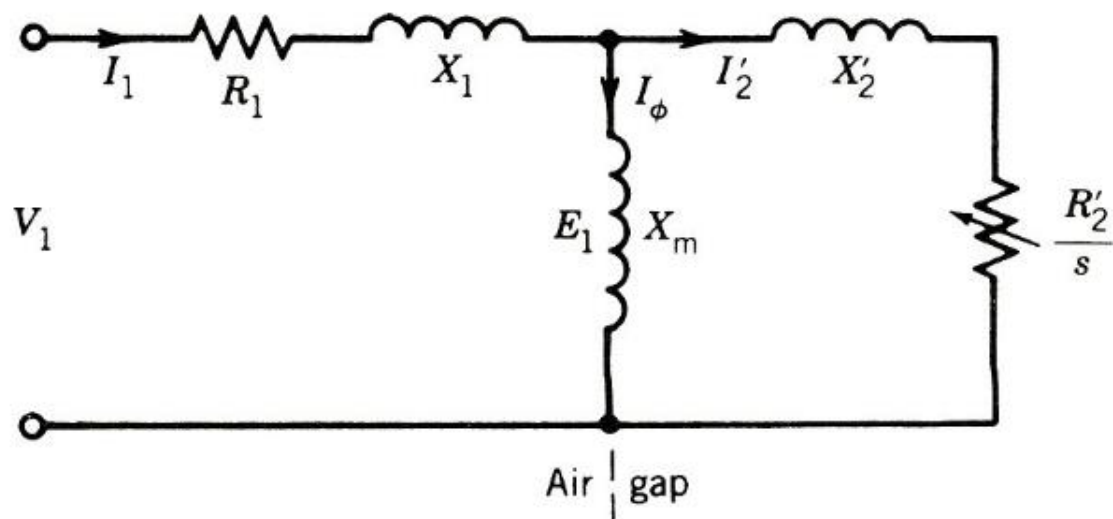


مدار معادل موتور القایی سه فاز در شرایط بی باری

• مدار معادل IEEE موتور القایی سه فاز

• مدار معادل موتور القایی در شرایط بی باری

در شرایط بی باری، لغزش کم و بنابراین امپدانس روتور بسیار زیاد می باشد و می توان ترکیب موازی راکتانس مغناطیس کننده و امپدانس روتور را معادل راکتانس مغناطیس کننده در نظر گرفت.



بررسی مدار معادل موتور در شرایط بی باری

$$P_{rot} = P_{NL} - 3R_1 I_{NL}^2$$

محاسبه تلفات چرخشی موتور از نتایج آزمایش بی باری

$$Z_{NL} = \frac{V_{NL}}{I_{NL}}$$

امپدانس بی باری موتور در هر فاز

$$R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3I_{NL}^2}$$

مقاومت بی باری موتور

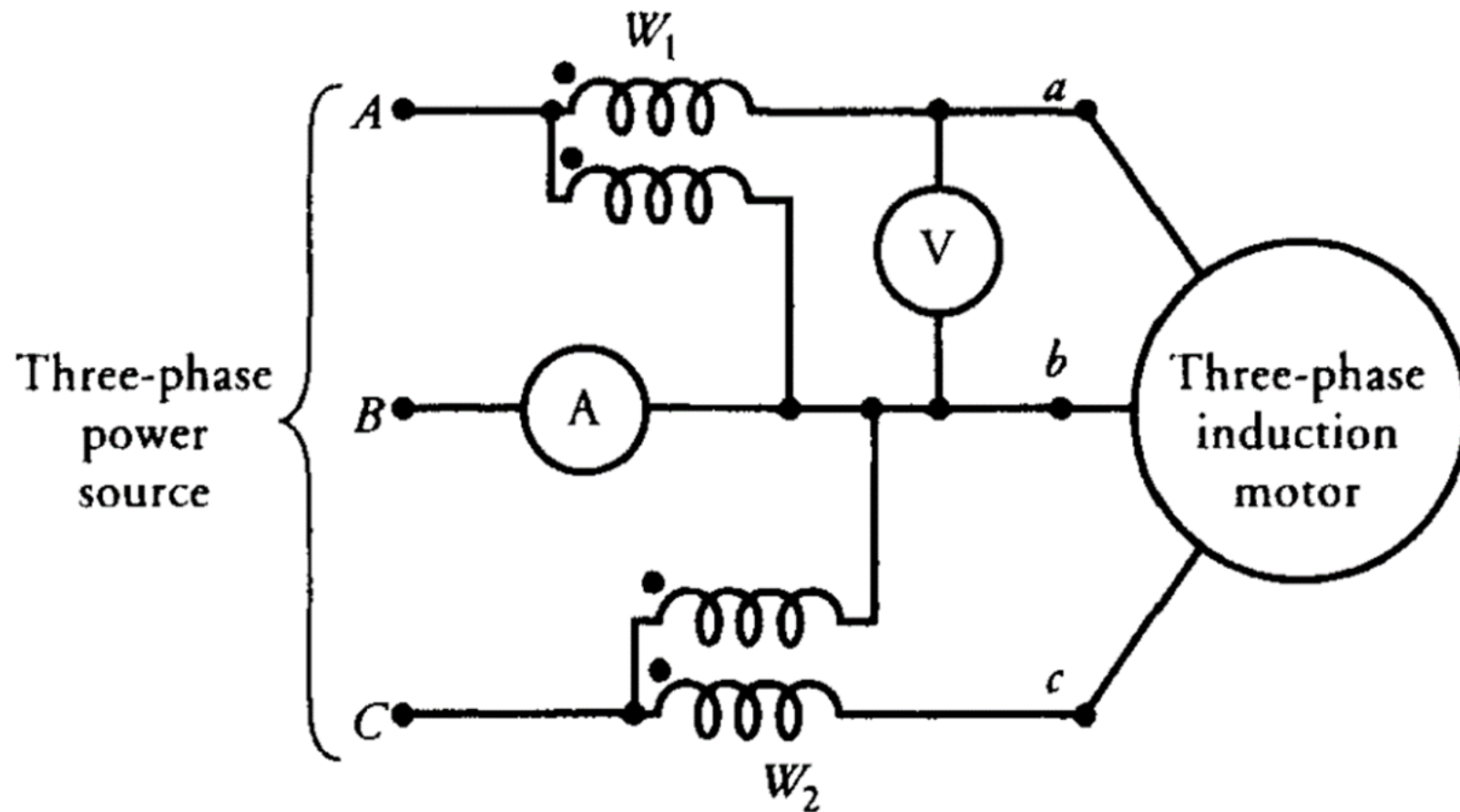
$$X_{NL} = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2} = X_1 + X_m$$

راکتانس بی باری موتور در هر فاز

آزمایش روتور قفل شده موتور القایی سه فاز

- ❖ شبیه آزمایش اتصال کوتاه ترانس، اطلاعاتی در خصوص امیدانس های ناشی ماشین القایی ارائه می کند.
- ❖ در این آزمایش روتور بگونه ای قفل می شود، که قادر به چرخش نباشد و به سیم پیچی سه فاز استاتور، ولتاژهای سه فاز متعادل اعمال می شود.
- ❖ این آزمایش باید تحت شرایطی انجام شود که جریان و فرکانس روتور مشابه شرایط عملکرد نرمال باشد. بنابراین، این آزمایش با اعمال یک ولتاژ با دامنه متغیر به استاتور انجام می شود و دامنه ولتاژ تا جایی افزایش داده می شود که جریان نامی از استاتور عبور کند. برای در نظر گرفتن تاثیر فرکانس رتور (در حالت کار دائم کم است) روی مقاومت موثر و اندوکتانس ناشی روتور، فرکانس ولتاژ اعمالی به استاتور در این آزمایش باید کم باشد.
- ❖ طبق استاندارد IEEE، فرکانس استاتور در آزمایش روتور قفل شده ۲۵ درصد فرکانس نامی استاتور می باشد. برای موتورهای معمولی با توان نامی کمتر از ۲۰ اسب بخار، به دلیل ناچیز بودن اثر فرکانس، آزمایش روتور قفل در فرکانس نامی انجام می شود.
- ❖ در این آزمایش، ولتاژ اعمالی به موتور در هر فاز (V_{BR})، جریان هر فاز موتور (I_{BR}) و توان دریافتی موتور (P_{BR}) اندازه گیری و یادداشت می شوند.

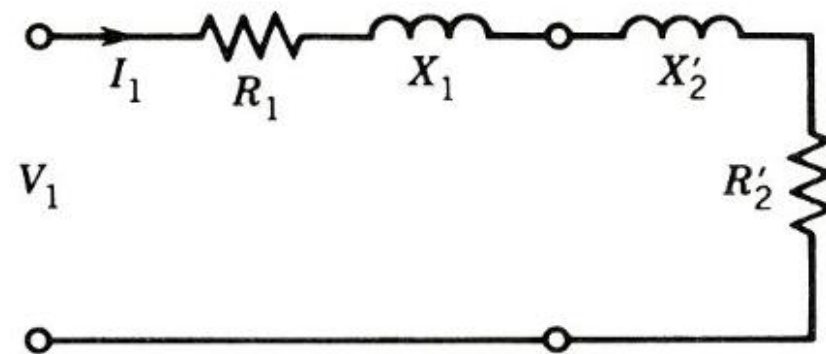
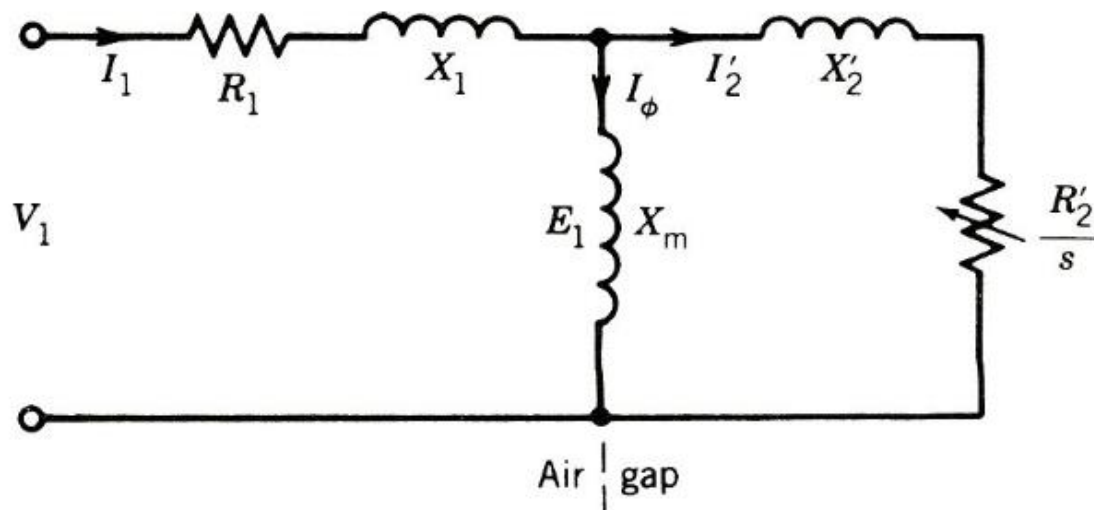
آزمایش روتور قفل شده موتور القایی سه فاز



مدار معادل موتور القایی سه فاز در شرایط روتور قفل شده

- مدار معادل موتور القایی سه فاز شده
- مدار معادل IEEE موتور القایی سه فاز شده

در شرایط روتور قفل شده، لغزش برابر ۱ و بنابراین امپدانس روتور در مقایسه با راکتانس مغناطیس کننده کم می باشد و می توان ترکیب موازی راکتانس مغناطیس کننده و امپدانس روتور را معادل امپدانس روتور در نظر گرفت.



بررسی مدار معادل موتور در شرایط بی باری

مقاومت روتور قفل

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}}{3I_{BR}^2}$$

$$R_2' = R_{BL} - R_1$$

$$Z_{BR} = \frac{V_{BR}}{I_{BR}}$$

امپدانس روتور قفل موتور در هر فاز

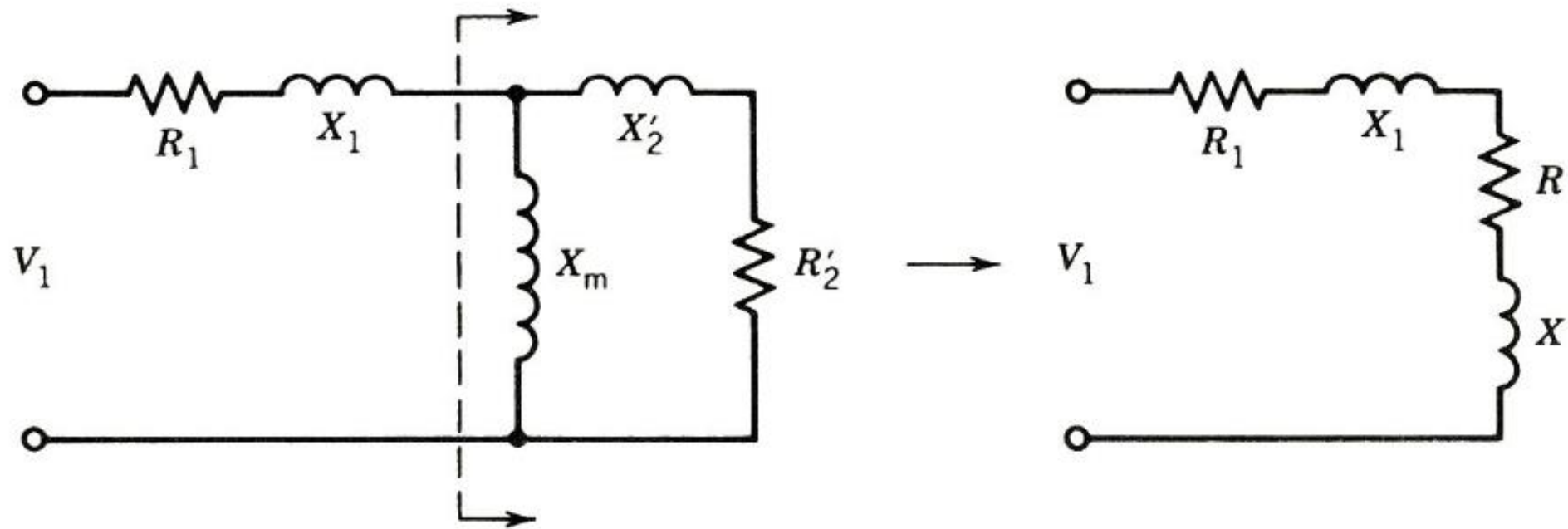
$$X_{BR} = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2}$$

راکتانس روتور قفل موتور در هر فاز

$$X_{BR} = X_1 + X_2' \rightarrow X_1 = X_2' = 0.5X_{BR}$$

$$X_m = X_{NL} - X_1$$

محاسبه دقیق تر مقاومت روتور



(c) Blocked-rotor equivalent circuit for improved value for R'_2

محاسبه دقیق تر مقاومت روتور

$$R = \frac{X_m^2}{R_2'^2 + (X_2' + X_m)^2} R_2'$$

If $X_2' + X_m \gg R_2'$, as is usually the case,

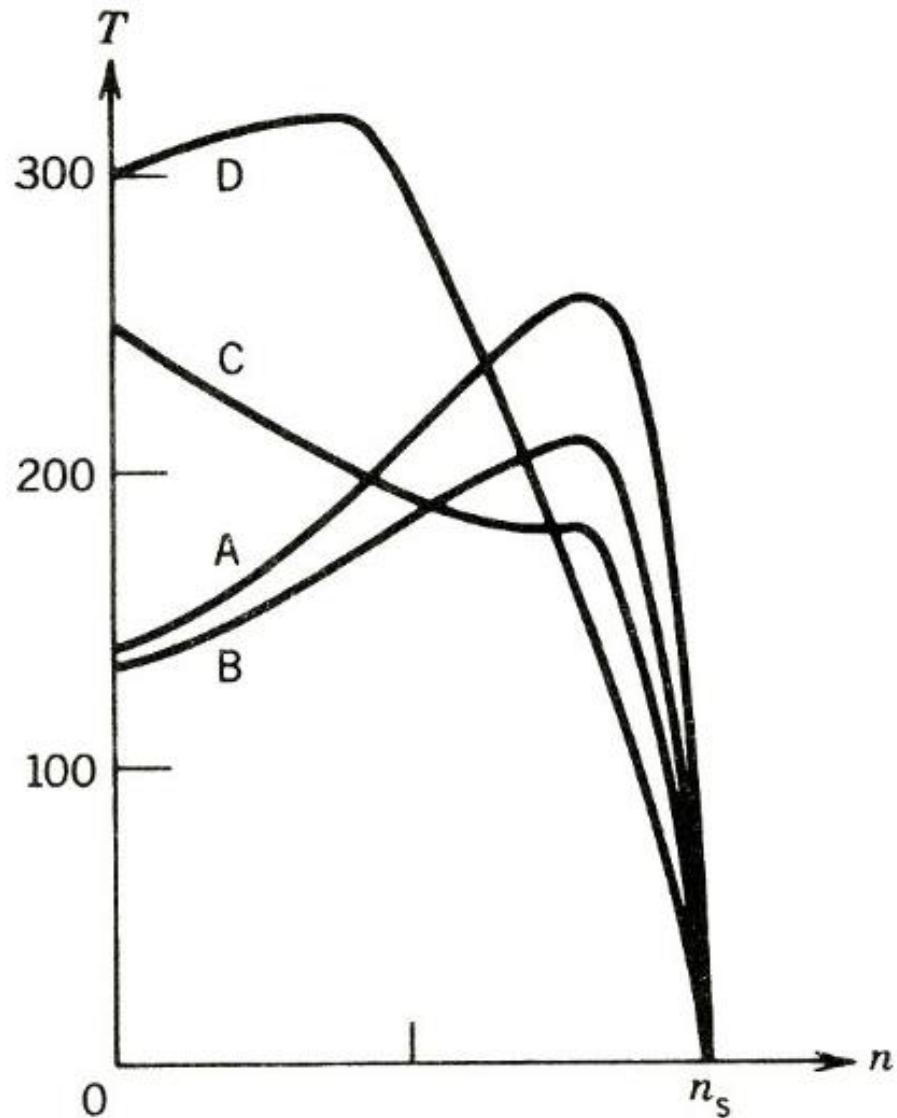
$$R \simeq \left(\frac{X_m}{X_2' + X_m} \right)^2 R_2'$$

or

$$R_2' = \left(\frac{X_2' + X_m}{X_m} \right)^2 R$$

$$R = R_{BL} - R_1$$

کلاس های موتورهای القایی قفس سنجابی



کلاس های مختلف موتورهای القایی قفس سنجابی

کلاس A

- گشتاور راه اندازی نرمال
- جریان راه اندازی بالا
- لغزش عملیاتی کم بین ۰.۰۰۵ تا ۰.۰۱۵
- دارای مقاومت مدار روتور کم
- برای کاربردهایی که نیاز به گشتاور راه اندازی پایینی دارند، مناسب هستند.

کلاس B

- گشتاور راه اندازی نرمال مشابه کلاس A
- جریان راه اندازی کم (حدود ۷۵ درصد کلاس A)
- از میله های عمیق یا روتور دوقفسی استفاده شده است تا با افزایش راکتانس نشتی روتور، جریان راه اندازی محدود شود.
- لغزش عملیاتی کم
- راکتانس نشتی بالا، باعث کاهش گشتاور ماکزیمم می شود.

کلاس های مختلف موتورهای القایی قفس سنجابی

کلاس C

- دارای گشتاور راه اندازی زیاد
- دارای جریان راه اندازی کم
- دارای روتور دوقفسی با مقاومت روتور بیشتر در مقایسه با موتور کلاس B
- دارای لغزش بار کامل بیشتر و بنابراین بازده کمتر در مقایسه با موتورهای کلاس A و B.
- مناسب برای کاربردهایی که نیاز به گشتاور راه اندازی بالا دارند، از قبیل کمپرسورها و نوارهای نقاله.

کلاس D

- دارای گشتاور راه اندازی زیاد، جریان راه اندازی کم و لغزش عملیاتی بالا
- میله های روتور بجای مس از مواد با مقاومت بالا از قبیل برنج ساخته می شوند.
- مشخصه گشتاور سرعت آنها شبیه موتورهای روتور سیم بندی شده با مقاومت اضافی در مدار روتور می باشد.
- گشتاور ماکزیمم در لغزشی حدود ۰.۵ یا بیشتر رخ می دهد.
- لغزش بار کامل بالا (حدود ۸ تا ۱۵ درصد) و بنابراین بازده پایین در حالت کار عادی
- مناسب برای کاربردهایی که نیاز به شتابگیری سریع دارند.

ورقه های روتور کلاس های مختلف



(a)



(b)



(c)



(d)

کنترل سرعت موتورهای القایی

مقایسه موتورهای DC و القایی از نظر کنترل سرعت و سایر مسائل

- موتورهای جریان مستقیم گران تر هستند و نیاز به تعمیر و نگهداری بیشتر دارند و استفاده از آنها در جاهایی که احتمال انفجار در اثر نشت گاز وجود دارد، ممنوع است. کنترل سرعت این موتورها بسیار راحت است و از طریق تغییر ولتاژ تغذیه آرمیچر و یا تغییر جریان تحریک موتور صورت می گیرد.

- موتورهای القایی، تحت ولتاژ و فرکانس تغذیه ثابت، اساساً موتورهای سرعت ثابتی هستند. این موتورها ارزان تر و چون سخت تر بوده و نیاز به تعمیر و نگهداری اندکی دارند. کنترل سرعت این موتورها دشوار است و نیاز به روش های کنترلی پیچیده دارد.

روش های کنترل سرعت موتورهای القایی

- ۱- تغییر تعداد قطب ها
- ۲- کنترل ولتاژ تغذیه
- ۳- کنترل فرکانس تغذیه
- ۴- کنترل حلقه بسته با روش V/f ثابت
- ۵- کنترل مقاومت روتور

کنترل سرعت موتورهای القایی با تغییر تعداد قطب ها

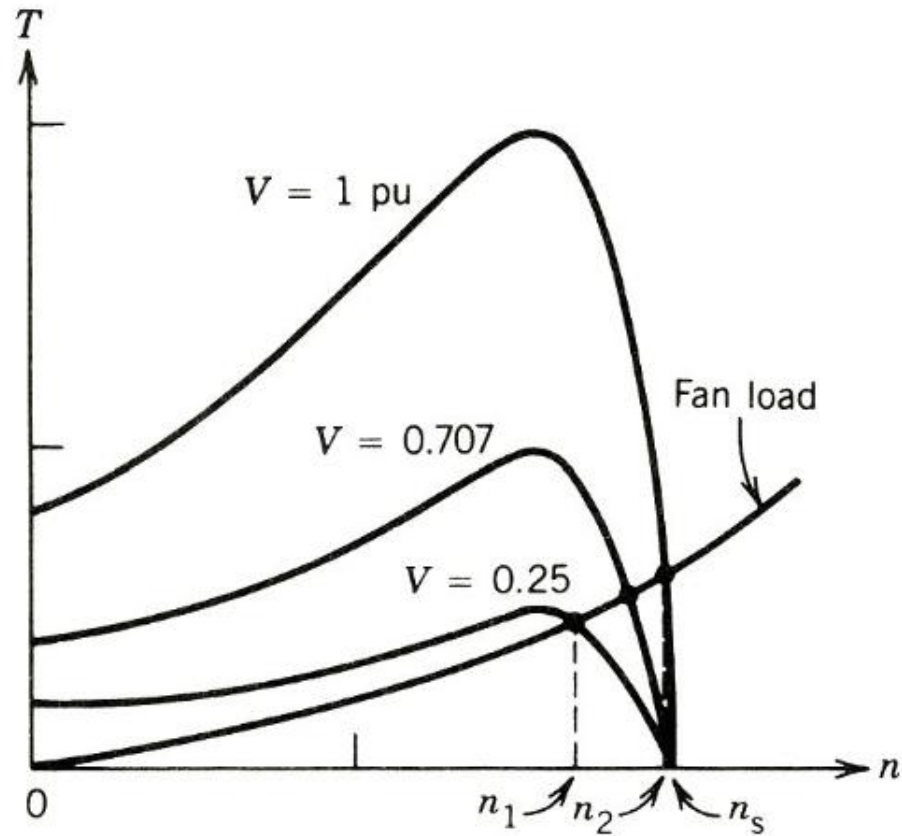
✓ به این دلیل که سرعت موتورهای القایی نزدیک به سرعت سنکرون می باشد، تغییر سرعت سنکرون می تواند به تغییر سرعت روتور منجر شود.

✓ سرعت سنکرون با تعداد قطب موتور رابطه عکس دارد، بنابراین با تغییر تعداد قطب های موتور (با تغییر اتصالات کویل های سیم پیچی استاتور) می توان سرعت موتور را به نسبت ۲ به ۱ تغییر داد.

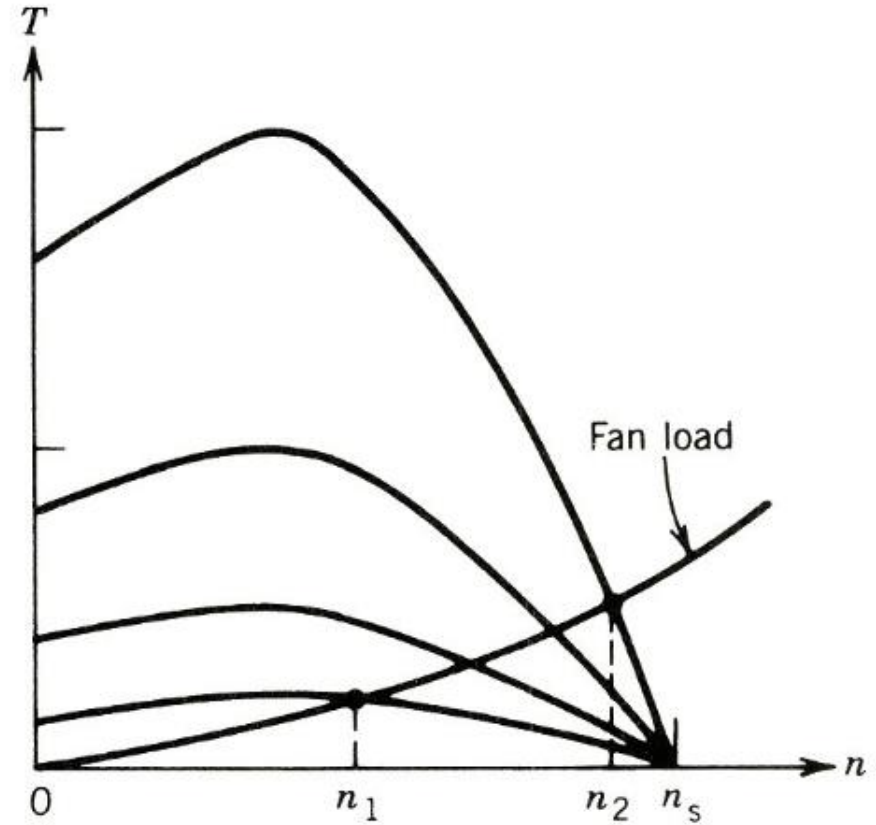
✓ بیشتر در مورد موتورهای قفس سنجابی استفاده می شود.

✓ باعث افزایش هزینه ساخت موتور می شود.

کنترل سرعت موتورهای القایی با کنترل ولتاژ تغذیه



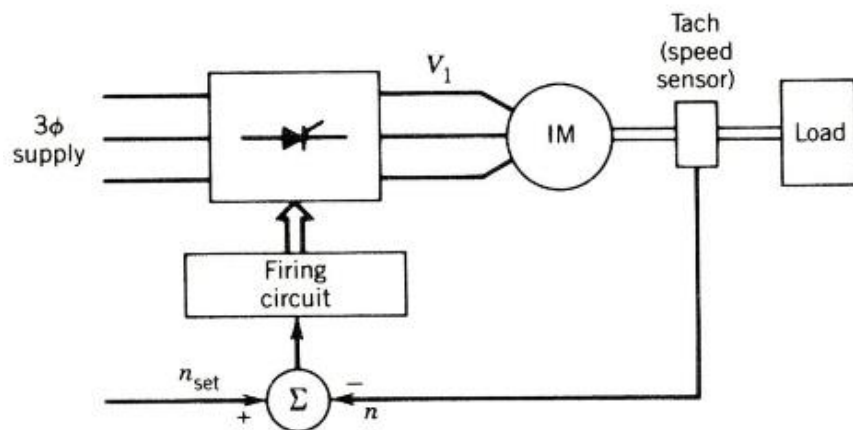
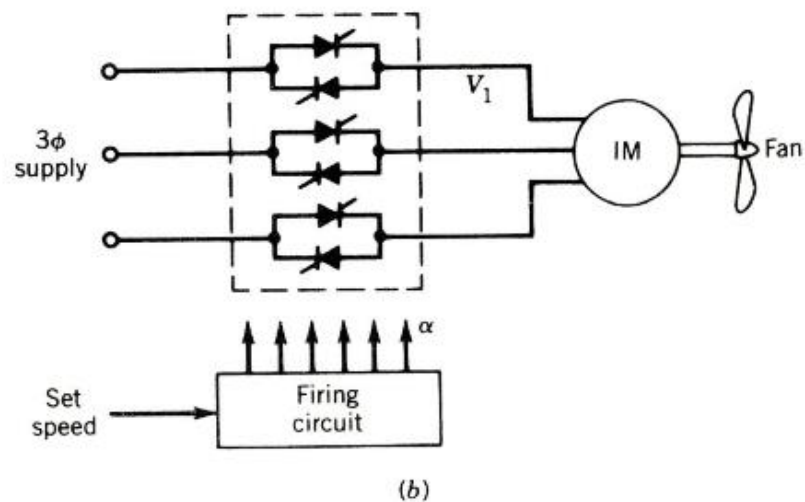
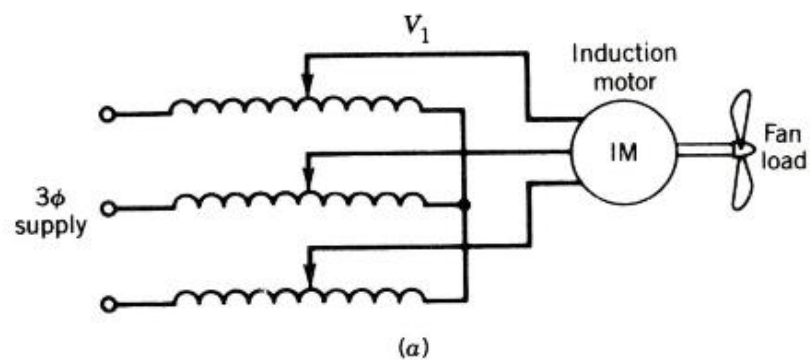
(a)



(b) Class D motor

FIGURE 5.29 Torque-speed characteristics for various terminal voltages.

کنترل سرعت موتورهای القایی با کنترل ولتاژ تغذیه



کنترل سرعت موتورهای القایی با کنترل فرکانس تغذیه

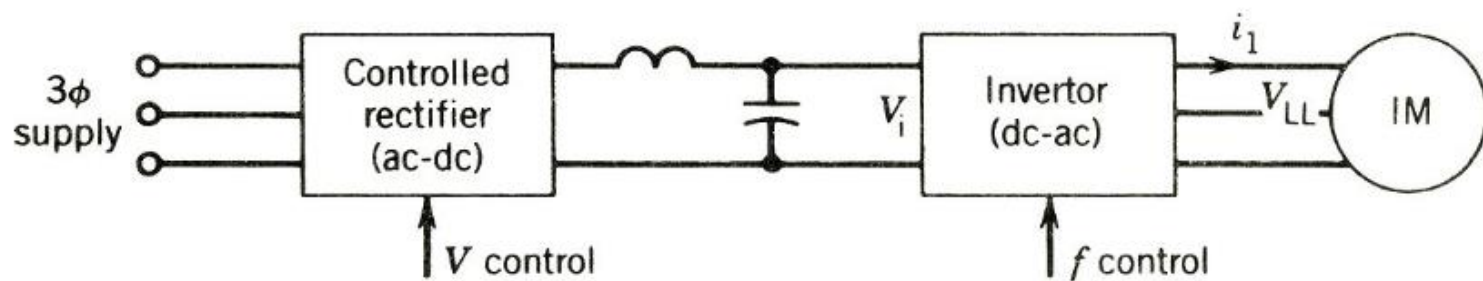
- با توجه به اینکه شار موتور تقریباً متناسب با نسبت ولتاژ تغذیه به فرکانس تغذیه می باشد، بنابراین، در صورتی که ولتاژ تغذیه موتور ثابت باشد، کاهش فرکانس تغذیه منجر به اشباع و افزایش فرکانس تغذیه منجر به کاهش شار و بنابراین کاهش گشتاور تولیدی موتور می

$$\Phi_p \propto \frac{E}{f} \quad (5.72)$$

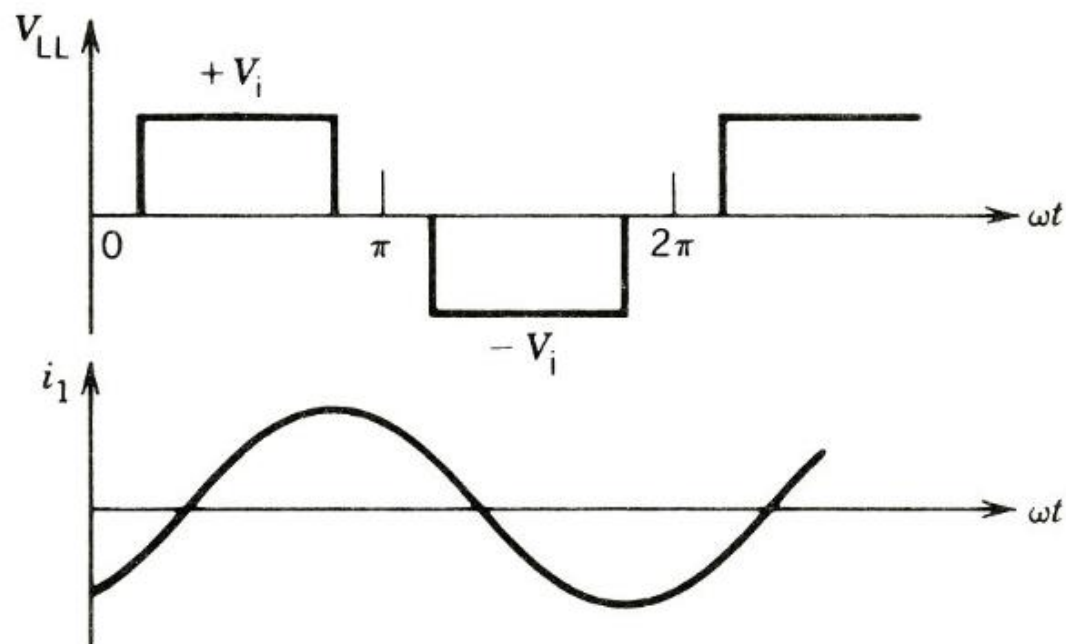
If the voltage drop across R_1 and X_1 (Fig. 5.15) is small compared to the terminal voltage V_1 —that is, $V_1 \approx E_1$ —then

$$\Phi_p \propto \frac{V}{f} \quad (5.73)$$

کنترل سرعت موتورهای القایی با روش V/f ثابت (حلقه باز)



(a)



(b)

کنترل سرعت موتورهای القایی با روش V/f ثابت (حلقه باز)

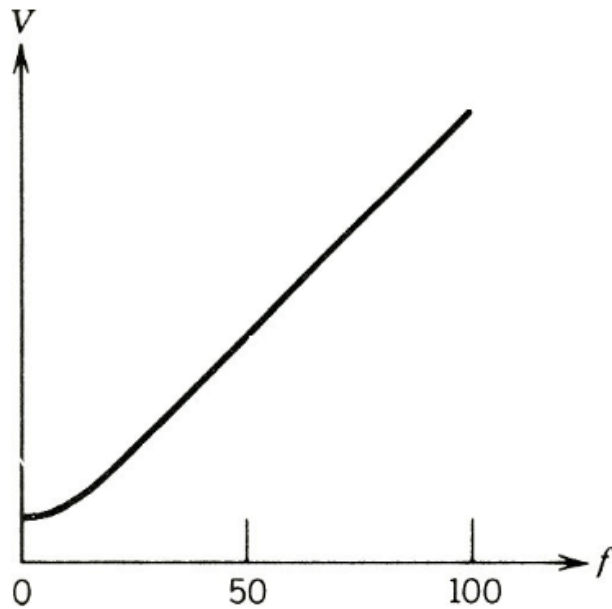


FIGURE 5.32 Required variation in voltage with change in frequency to maintain constant air gap flux density.

کنترل سرعت موتورهای القایی با روش V/f ثابت (حلقه باز)

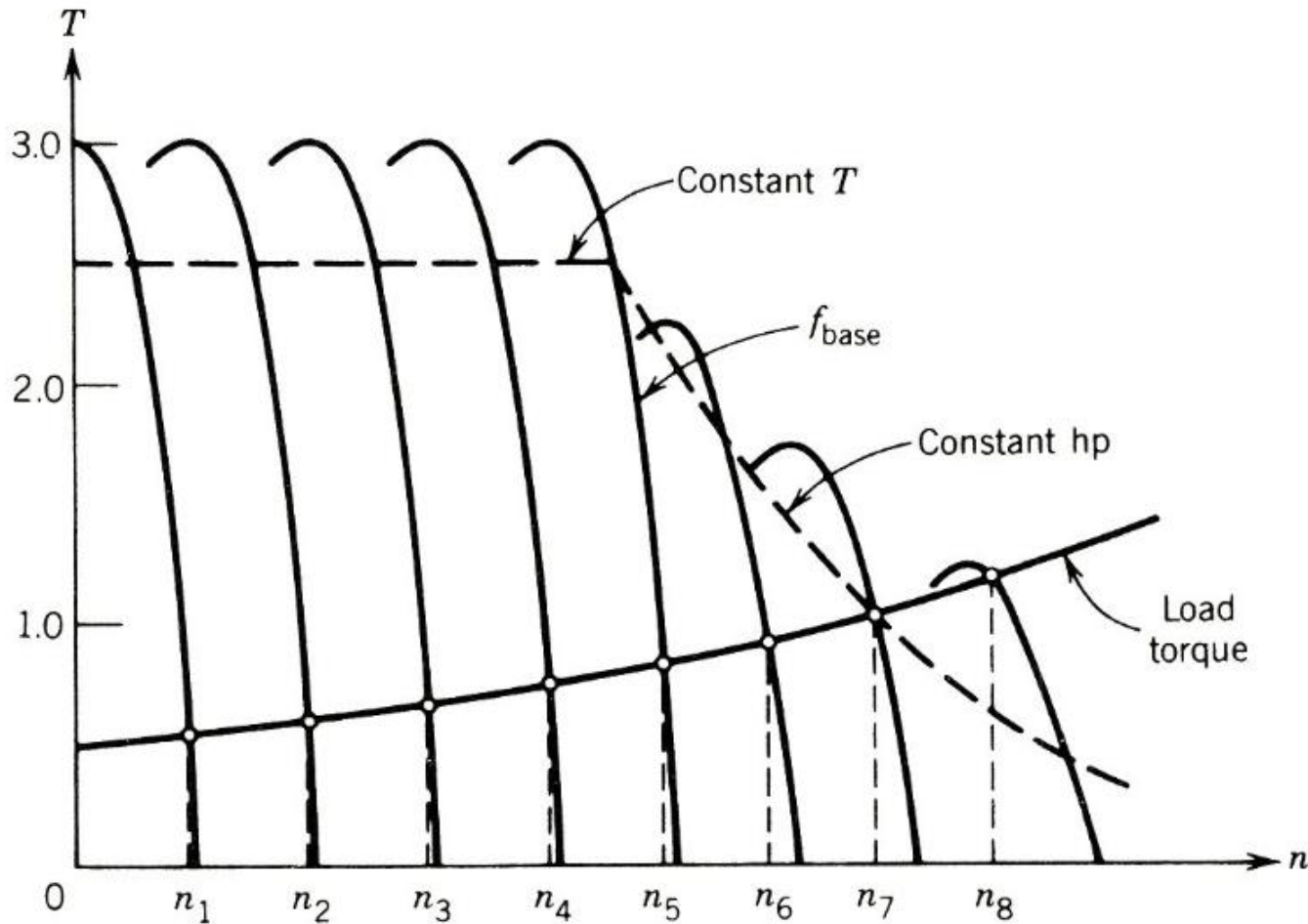


FIGURE 5.33 Torque-speed characteristics of an induction motor with variable-voltage, variable-frequency control.

کنترل سرعت موتورهای القایی با روش V/f ثابت (حلقه بسته)

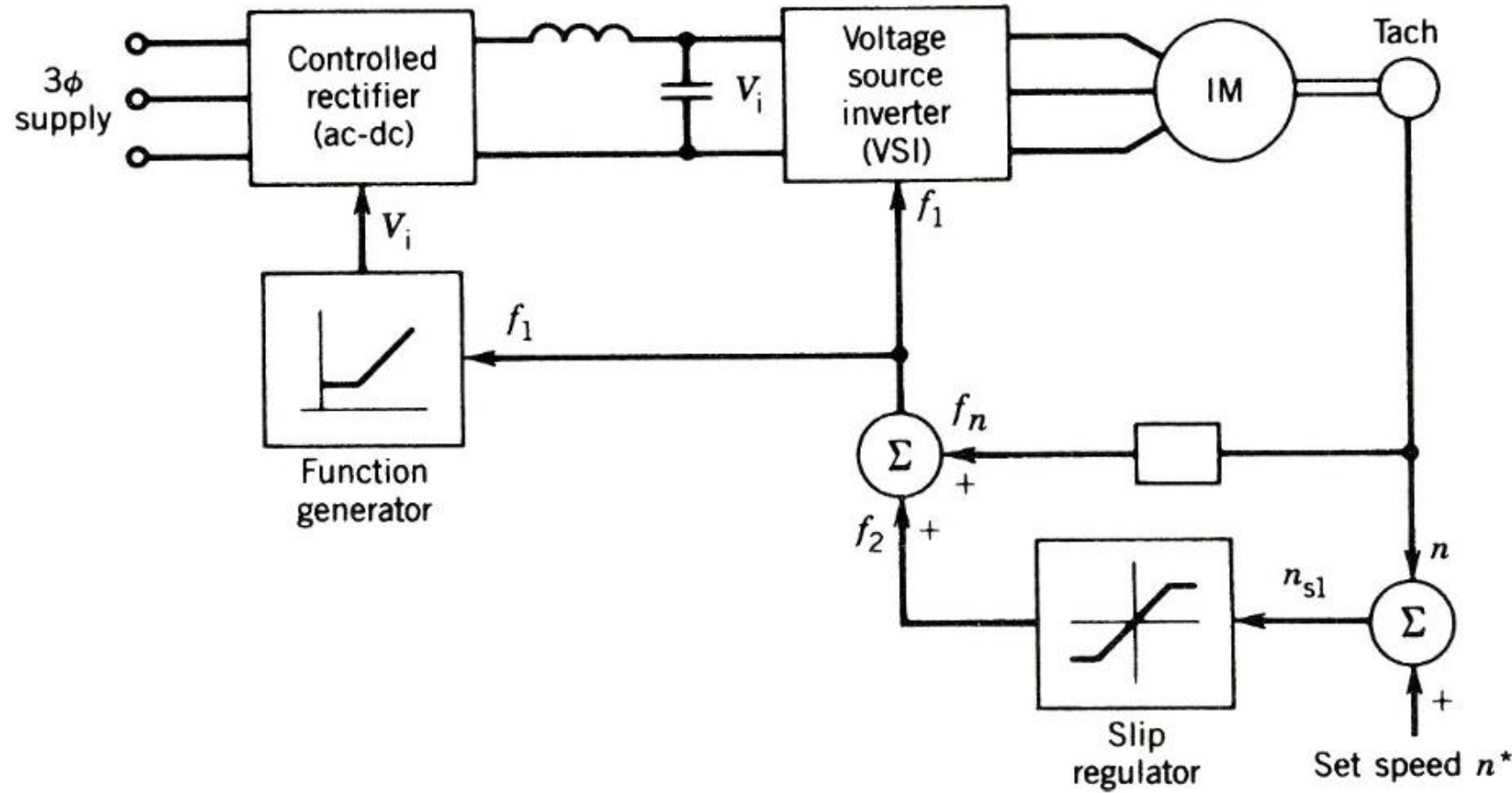
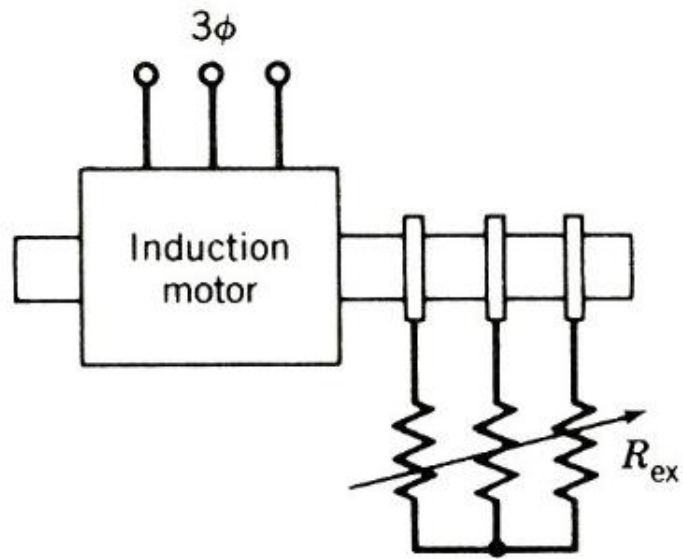
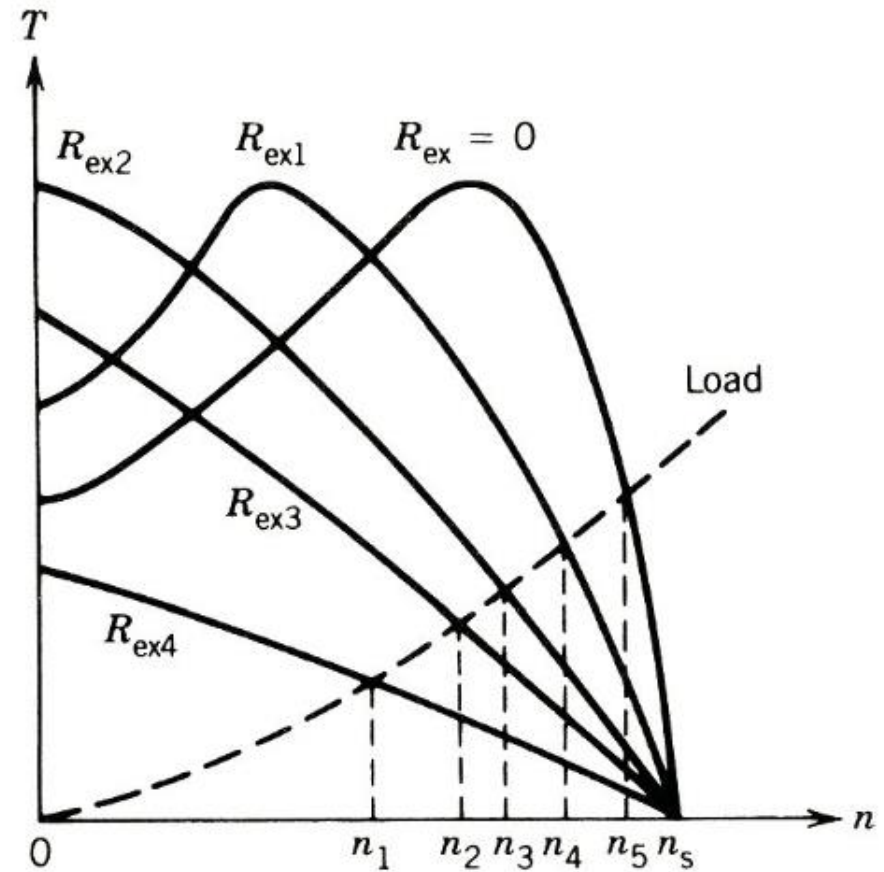


FIGURE 5.36 Speed control system employing slip frequency regulation and constant V/f operation.

کنترل سرعت موتورهای القایی با روش تغییر مقاومت روتور



(a)



(b)

راه اندازی موتورهای القایی سه فاز

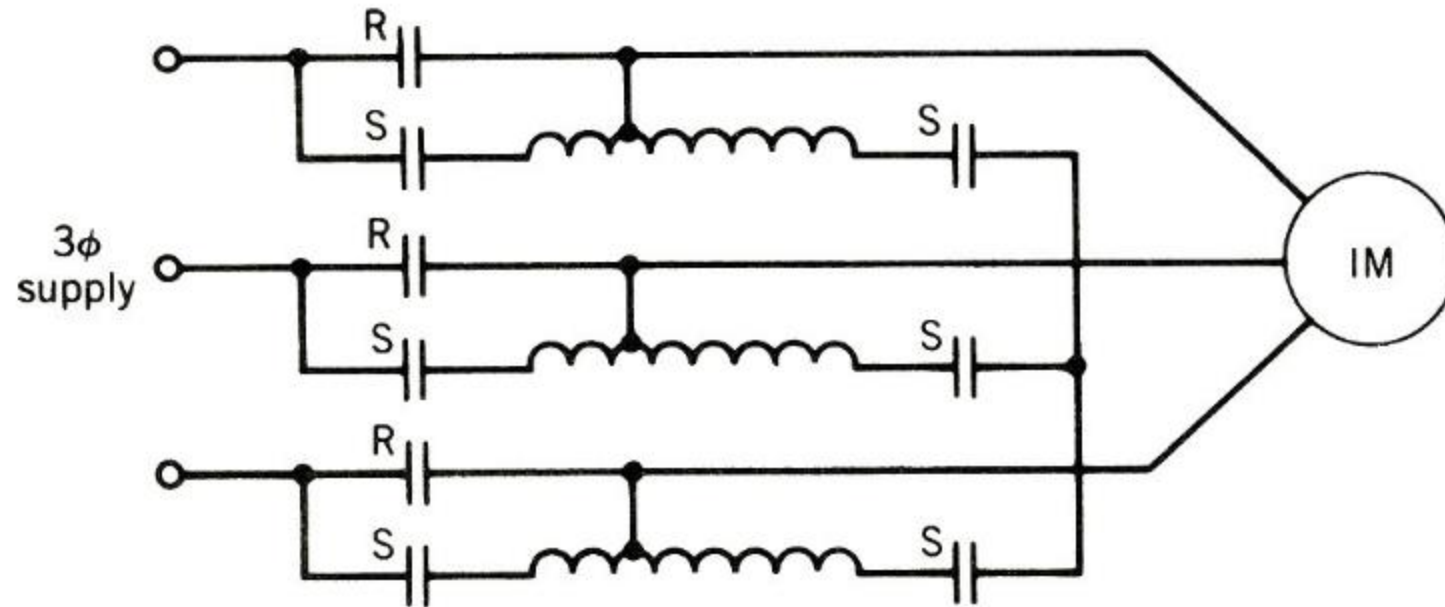
- در صورتی که موتورهای القایی قفس سنجابی مستقیماً به منبع تغذیه سه فاز با ولتاژ نامی متصل شوند، جریانی راه اندازی آنها می تواند بین ۵ تا ۸ برابر جریان اسمی آنها باشد.

- در این شرایط، افت ولتاژ قابل ملاحظه ای در خط تغذیه ایجاد می شود که می تواند اثر نامطلوبی بر روی عملکرد سایر کننده های متصل به خط تغذیه داشته باشد.

- همچنین، در صورتی که زمان راه اندازی موتور تا رسیدن به سرعت نامی بالا باشد، حرارت زیادی در ماشین ایجاد می شود که می تواند باعث آسیب به عایق سیم پیچی ماشین شود.

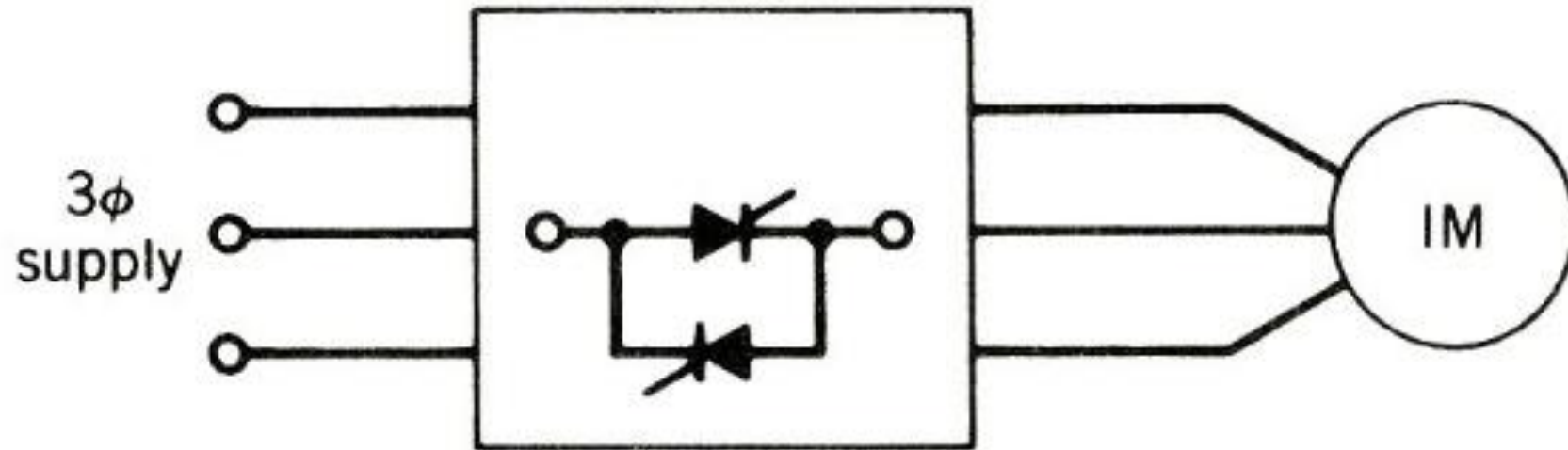
- در این شرایط باید ولتاژ اعمالی به موتور در زمان راه اندازی کاهش یابد. این کار با قرار دادن راکتانس متغیر یا رئوستا سری با مدار استاتور و یا با استفاده از اتوترانسفورماتور و یا با استفاده از مدارات کنترل کننده ولتاژ جریان متناوب امکان پذیر است.

راه اندازی موتورهای القایی سه فاز (استفاده از اتوترانس)



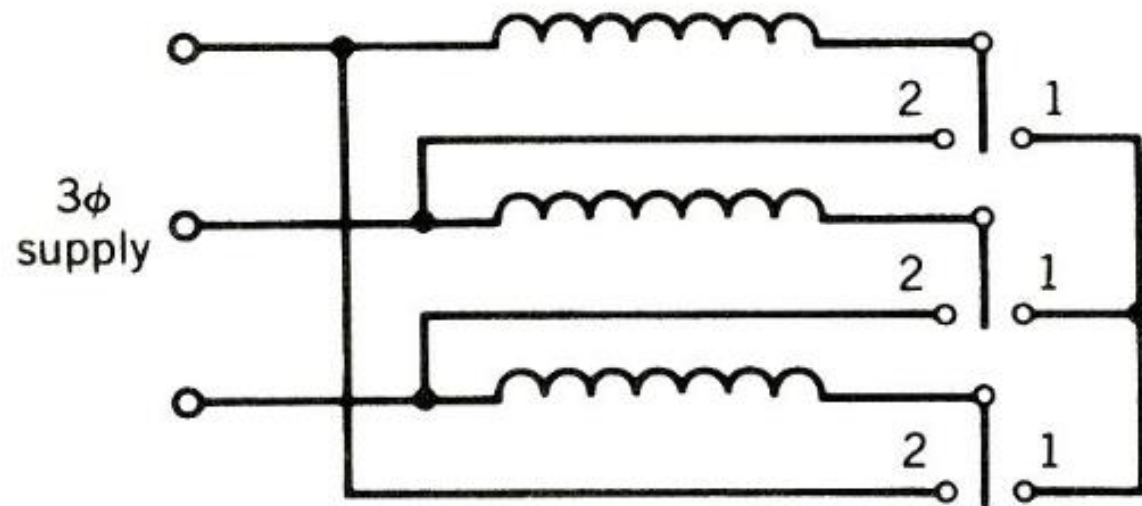
R : running contacts
S : Starting contacts
Start : S closed, R open
Run : S open, R closed

راه اندازی موتورهای القایی سه فاز (استفاده از کنترل کننده های ولتاژ (ac



راه اندازی موتورهای القایی سه فاز (روش ستاره - مثلث)

- در این روش در هنگام راه اندازی اتصال سیم پیچی استاتور به صورت ستاره و در هنگام کار دائم اتصال سیم پیچی استاتور بصورت مثلث می باشد.
- در هنگام راه اندازی با اتصال مثلث، ولتاژ فاز سیم پیچی موتور کاهش یافته و باعث می شود تا جریان کمتری در راه اندازی از سیم پیچی استاتور عبور کند. هنگامی که سرعت موتور به سرعت نامی رسید اتصال سیم پیچی موتور از ستاره به مثلث تغییر می یابد.



1 : Star connection
2 : Delta connection

هارمونیک های زمانی و فضایی

- موتورهای القایی اغلب توسط اینورترهای منبع جریان یا اینورترهای منبع ولتاژ کنترل می شوند. بنابراین، جریان های ماشین غیرسینوسی و شامل یک مولفه اصلی و مولفه های هارمونیک هستند. هارمونیک های جریان باعث ایجاد میدان های مغناطیسی دواری در فاصله هوایی می شوند که با سرعت های بالاتر در مقایسه با میدان دوار تولیدی توسط مولفه اصلی جریان می چرخند. هارمونیک های زمانی جریان و میدان های دوار آنها باعث ایجاد گشتاورهای پارازیتی در ماشین می شوند.

- سیم پیچی یک فاز یک ماشین القایی درون تعداد محدودی شیار استاتور توزیع شده است. بنابراین، هنگامی که جریان از سیم پیچی عبور می کند، توزیع mmf حاصله در فاصله هوایی غیرسینوسی می باشد. بنابراین، شار فاصله هوایی شامل یک مولفه اصلی و مولفه های هارمونیک می باشد. این مولفه های هارمونیک شار ناشی از سیم پیچی توزیع شده به هارمونیک های فضایی معروف هستند. این هارمونیک های فضایی نیز باعث ایجاد گشتاورهای پارازیتی در ماشین می شوند.

هارمونیک های زمانی

- برای بررسی هارمونیک های زمانی، فرض می شود که توزیع mmf در فاصله هوایی سینوسی می باشد (توزیع سیم بندی در فاصله هوایی ماشین سینوسی می باشد).

Let phase currents in the three-phase induction machine be as follows:

$$i_a = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\max)} \cos h\omega t \quad (5.96)$$

$$i_b = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\max)} \cos h(\omega t - 120^\circ) \quad (5.97)$$

$$i_c = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\max)} \cos h(\omega t + 120^\circ) \quad (5.98)$$

where h is the order of harmonics

$I_{h(\max)}$ is the amplitude of the h th-order harmonic current

هارمونیک های زمانی

Assume that turns of a phase winding are sinusoidally distributed. From Fig. 5.6a, the mmf along θ due to current in phase a is

$$F_a = Ni_a \cos \theta \quad (5.99)$$

where N is the turns per phase. From Eqs. 5.96 and 5.99,

$$F_a(\theta, t) = \sum_{h=1}^{\infty} NI_{h(\max)} \cos h\omega t \cos \theta \quad (5.100)$$

$$= \sum_{h=1}^{\infty} F_{h(\max)} \cos h\omega t \cos \theta \quad (5.101)$$

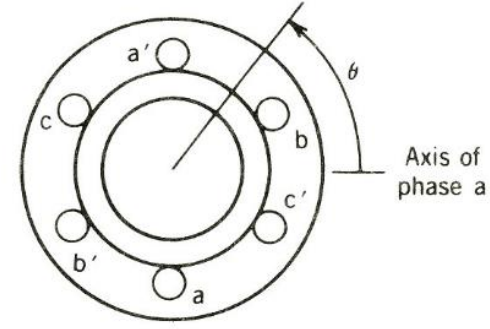
where

$$F_{h(\max)} = NI_{h(\max)} \quad (5.102)$$

Similarly, contributions from phases b and c are, respectively,

$$F_b(\theta, t) = \sum_{h=1}^{\infty} F_{h(\max)} \cos h(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \quad (5.103)$$

$$F_c(\theta, t) = \sum_{h=1}^{\infty} F_{h(\max)} \cos h(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \quad (5.104)$$



The resultant mmf along θ is

$$F(\theta, t) = F_a(\theta, t) + F_b(\theta, t) + F_c(\theta, t) \quad (5.105)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{h=1}^{\infty} F_{h(\max)} [\cos(h\omega t) \cos \theta + \cos h(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \\ &\quad + \cos h(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ)] \end{aligned} \quad (5.106)$$

Fundamental mmf

From Eq. 5.106,

$$\begin{aligned} F_1(\theta, t) &= F_{1(\max)} [\cos \omega t \cos \theta + \cos (\omega t - 120^\circ) \cos (\theta - 120^\circ) \\ &\quad + \cos (\omega t + 120^\circ) \cos (\theta - 120^\circ)] \\ &= \frac{3}{2} F_{1(\max)} \cos(\theta - \omega t) \end{aligned} \quad (5.107)$$

The fundamental mmf is therefore a rotating mmf that rotates in the forward direction (i.e., in the direction of θ) at an angular speed of ω radians per second.

Third Harmonic mmf

From Eq. 5.106,

$$\begin{aligned} F_3(\theta, t) &= F_{3(\max)} \{ \cos 3\omega t [\cos \theta + \cos(\theta - 120^\circ) + \cos(\theta + 120^\circ)] \} \\ &= F_{3(\max)} \times 0 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (5.108)$$

Note that in a three-phase, three-wire system, third harmonic current is absent. Therefore, $F_{3(\max)}$ is also zero.

Fifth Harmonic mmf

From Eq. 5.106, it can be shown that

$$F_5(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{5(\max)} \cos(\theta + 5\omega t) \quad (5.109)$$

The fifth harmonic mmf wave is also a rotating wave that rotates in the opposite direction (with respect to the rotation of the fundamental wave) and at five times the speed of the fundamental wave.

Seventh Harmonic mmf

From Eq. 5.106, it can be shown that

$$F_7(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{7(\max)} \cos(\theta - 7\omega t) \quad (5.110)$$

**TABLE 5.1 Synchronous Speeds for
Different Time Harmonic mmf Waves in a
3 ϕ , Four-Pole, 60 Hz Induction Machine**

Current Harmonic	Synchronous Speed (rpm)
1	1800
3	0
5	$-5 \times 1800 = -9000$
7	$7 \times 1800 = 12,600$

The seventh harmonic mmf wave therefore rotates in the same direction as the fundamental wave, but at seven times the speed of the fundamental wave.

Other Harmonic mmf Waves

In general, all odd harmonic mmf waves of order $h = 6m \pm 1$, where m is an integer, are present. These are represented by

$$F_h(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{h(\max)} \cos(\theta \pm h\omega t) \quad (5.111)$$

The h th-order mmf wave rotates at a speed $h\omega$ radians per second. It rotates in the same direction as the fundamental wave if $h = 6m + 1$, and in the opposite direction if $h = 6m - 1$.

Effects on $T - n$ Characteristic

For a four-pole, three-phase, 60 Hz induction machine the speeds of the rotating mmf waves corresponding to various time harmonic currents are shown in Table 5.1. The torque–speed characteristics corresponding to fundamental, fifth, and seventh harmonic currents are shown in Fig. 5.42. In the normal region of operation of the induction motor, the magnitudes of the parasitic torques are very small. Therefore, time harmonics produce no significant effects on the operation of the induction motor. This is further illustrated in Example 5.10.

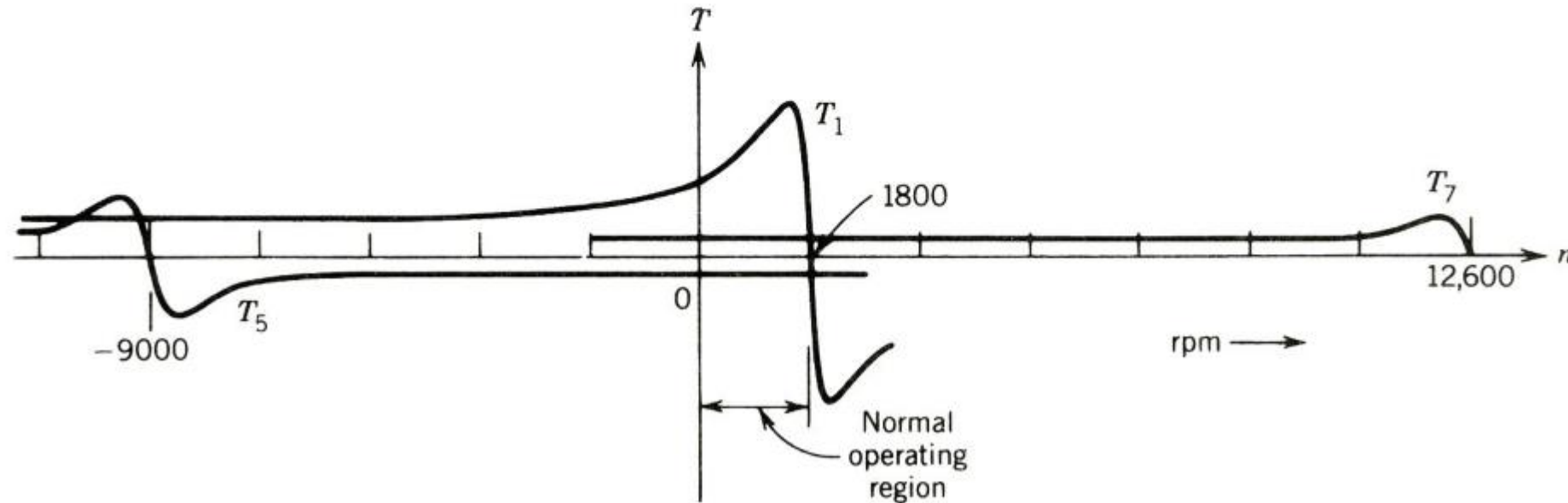


FIGURE 5.42 $T-n$ characteristics for different time harmonic currents.

هارمونیک های مکانی

- یک توزیع سینوسی ایده آل برای mmf در ماشین تنها در صورتی امکان پذیر است که ماشین دارای تعداد نامحدودی شیار باشد و دورهای یک سیم پیچی بصورت سینوسی درون این شیارها توزیع شوند.
- در یک ماشین واقعی تعداد شیارهای ماشین محدود است و بنابراین، هنگامی که جریان از سیم پیچی عبور می کند، توزیع mmf در فضا مشابه شکل زیر است.

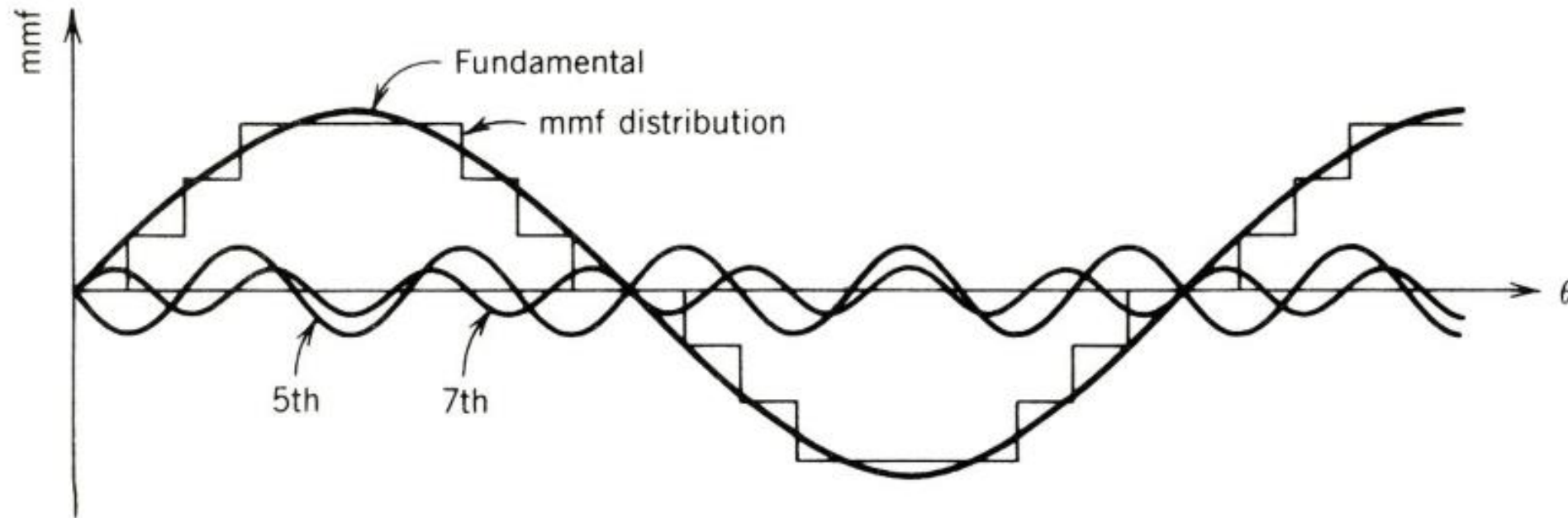


FIGURE 5.43 MMF distribution in the air gap.

هارمونیک های مکانی

The mmf distribution contains a fundamental and a family of space harmonics of order $h = 6m \pm 1$, where m is a positive number. The fundamental and the fifth harmonic component of mmf are also shown in Fig. 5.43.

In a three-phase machine, when sinusoidally varying currents flow through the windings, the space harmonic waves rotate at $(1/h)$ times the speed of the fundamental wave. The space harmonic waves rotate in the same direction as the fundamental wave if $h = 6m + 1$ and in the opposite direction if $h = 6m - 1$.

A space harmonic wave of order h is equivalent to a machine with hp number of poles. Therefore, the synchronous speed of the h th space harmonic wave is

$$n_{s(h)} = \frac{n_s}{h} = \frac{120f}{hp} \quad (5.112)$$

Effects on T - n Characteristics

هارمونیک های مکانی

TABLE 5.2 Synchronous Speeds for Space Harmonics of a 3ϕ , Four-Pole, 60 Hz Induction Machine

Space Harmonic	Synchronous Speed (rpm)
1	1800
5	$-\frac{1800}{5} = -360$
7	$\frac{1800}{7} = 257.1$
11	$-\frac{1800}{11} = -163.6$
13	$\frac{1800}{13} = 138.5$

Effects on T - n Characteristics

هارمونیک های مکانی

