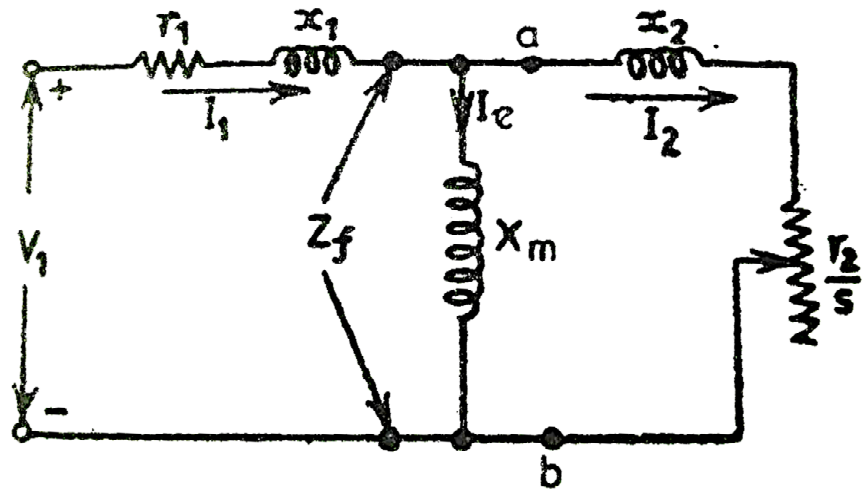
تحلیل مدار معادل

- تمام مشخصه های مهم عملکرد موتور را می توان از مدار معادل تعیین کرد، ساده سازی های ترانسفورماتور در نادیده گرفتن شاخه موازی شامل X_m و R_c در موتور القایی مجاز نیست زیرا جریان تحریک از 30 تا 50 درصد جریان بار کامل تغییر می کنند و مقاومت های القایی استاتور به نسبت ترانسفورماتور بزرگترند.

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{\left(\frac{r_2}{s} + jX_2\right)(jX_m)}{\frac{r_2}{s} + j(X_2 + X_m)}$$

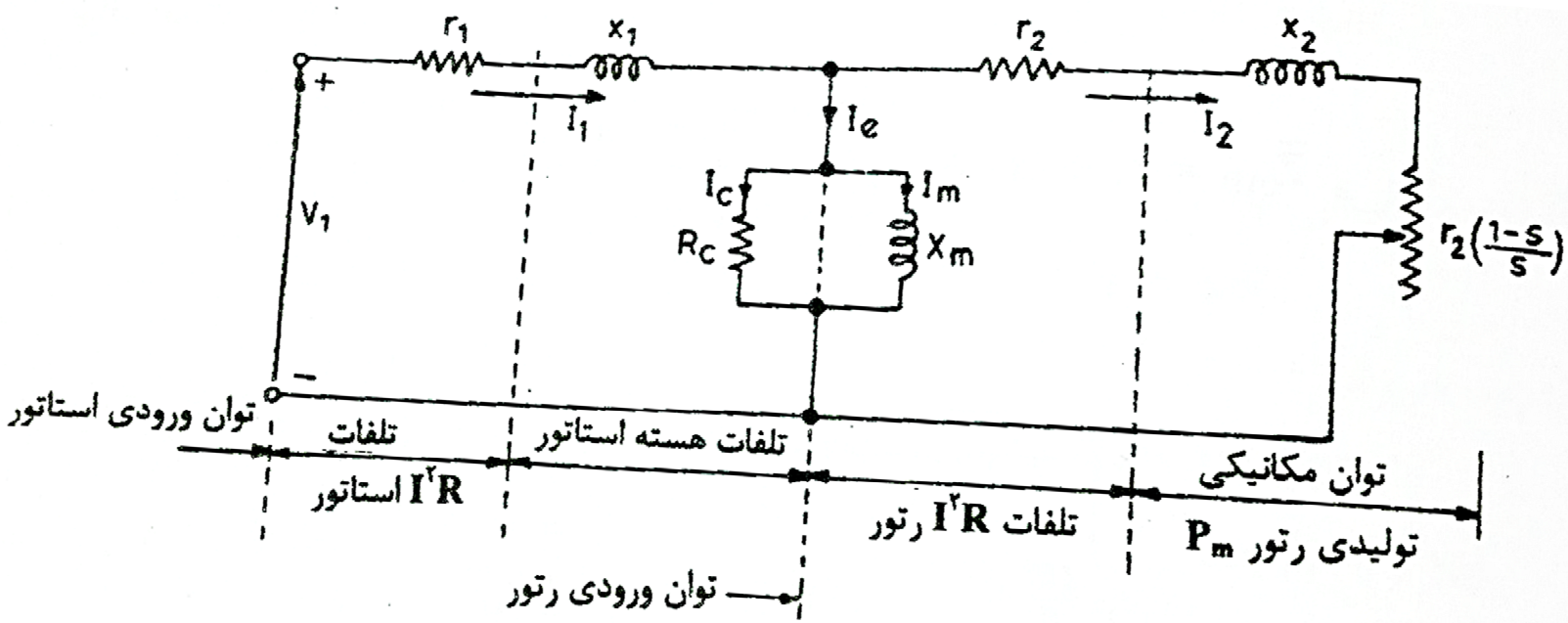


$$Z_1 = r_1 + j\,x_1 + Z_f \qquad I_1 = \frac{V_1}{Z_1} \qquad p_g = I_2^2 \frac{r_2}{s} = I_1^2 R_f$$

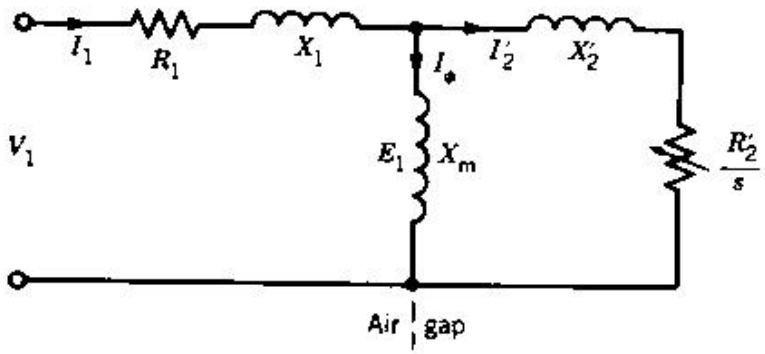
Z_1 مقاومت ظاهری دیده شده از طرف ولتاژ اعمال شده به استاتور

I_1 جریان استاتور

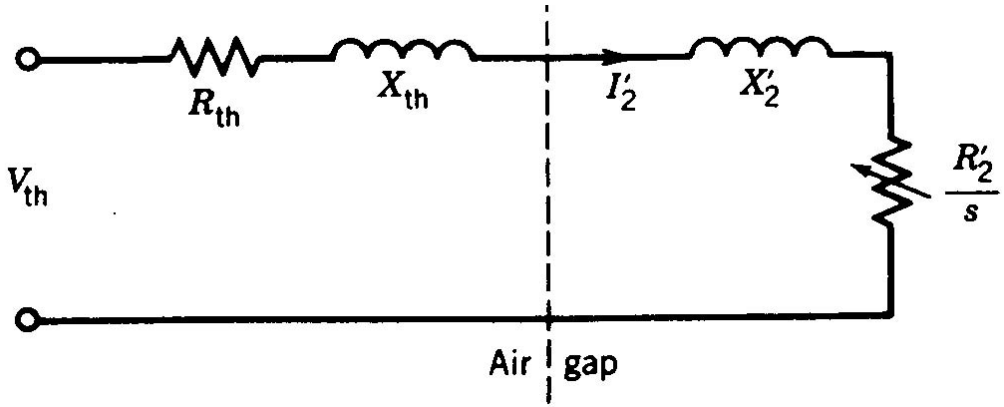
P_g قدرت هر فاز فاصله هوایی



مدار معادل ماشین القایی ـ معادل تونن

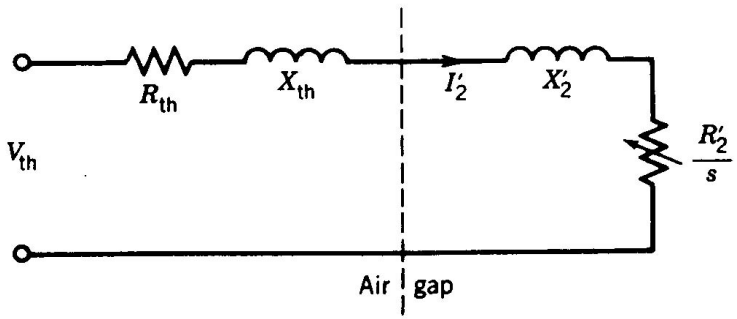


$$\vec{V}_{th} = \frac{j X_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \vec{V}_1$$



$$\vec{Z}_{th} = \frac{j X_m (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = R_{th} + j X_{th}$$

مدار معادل ماشین القایی ـ معادل تونن



$$R_{th} \gg \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m}\right)^2 R_1 = K_{th}^2 R_1$$

$$R_1^2 << (X_1 + X_m)^2$$

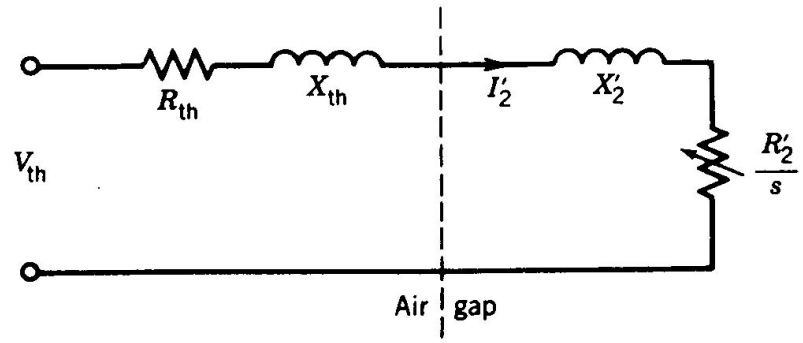
$$X_1 << X_m$$

$$K_{th} = \frac{X_m}{X_1 + X_m}$$

$$\vec{V}_{th} \gg \frac{X_m}{X_1 + X_m} \vec{V}_1 = K_{th} \vec{V}_1$$

$$X_{th} \gg X_1$$

روابط توان ، لغزش و گشتاور در موتور القایی



$$T_{mech} = \frac{P_{ag}}{w_{syn}} = 3\frac{I_2'^2 \frac{R_2'}{s}}{w_{syn}} = \frac{3}{w_{syn}} I_2'^2 \frac{R_2'}{s}$$

$$\vec{I}_2' = \frac{\vec{V}_{th}}{(R_{th} + R_2'/s) + j(X_{th} + X_2')} \quad , \quad I_2' = \ ?$$

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

روابط گشتاور و لغزش در موتور القایی

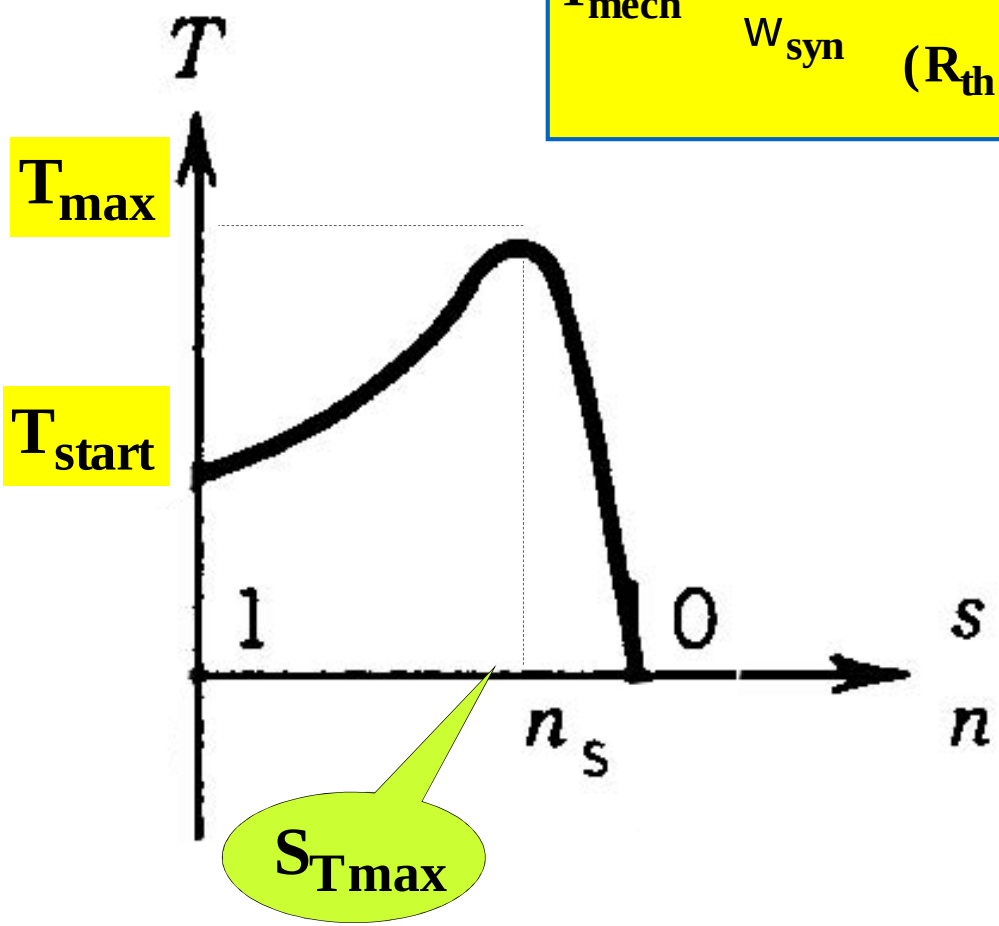
$$T_{mech} = \frac{P_{ag}}{W_{syn}} = \frac{3}{W_{syn}} I_2'^2 \frac{R_2'}{s}$$

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

$$T_{mech} = \frac{3}{W_{syn}} \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{th} + X_2')^2} \frac{R_2'}{s}$$

رابطه گشتاور ـ لغزش و منحنی آن در یک موتور القایی

$$T_{mech} = \frac{3}{w_{syn}} \frac{V_{th}^{2}}{(R_{th} + \frac{R_2^{¢}}{s})^2 + (X_{th} + X_2^{¢})^2} \frac{R_2^{¢}}{s}$$



موتور القایی - تقریب مشخصه گشتاور–سرعت در سرعتهای نزدیک سرعت سنکرون

$$T_{mech} = \frac{3}{w_{syn}} \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{th} + X_2')^2} \frac{R_2'}{s}$$

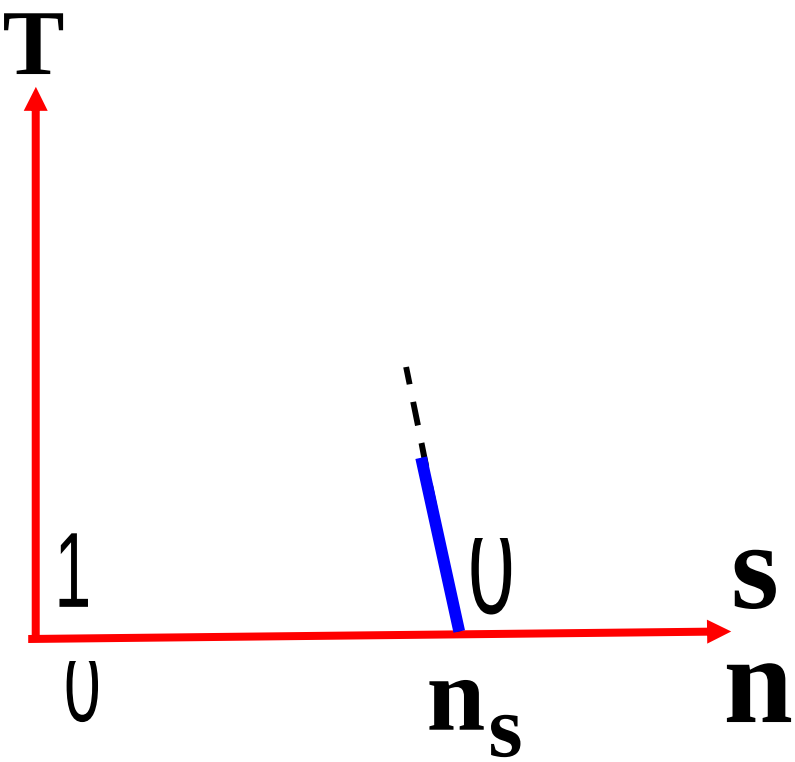
در لغزش کم و در شرایط بي بار

$$s \to 0$$

$$R_{th} + \frac{R_2'}{s} >> X_{th} + X_2'$$

$$\frac{R_2'}{s} >> R_{th}$$

$$T_{mech} \approx \frac{1}{w_{syn}} \frac{V_{th}^2}{R_2'} s \propto s$$



موتور القایی - مشخصه گشتاور ـ سرعت در سرعتهای کم

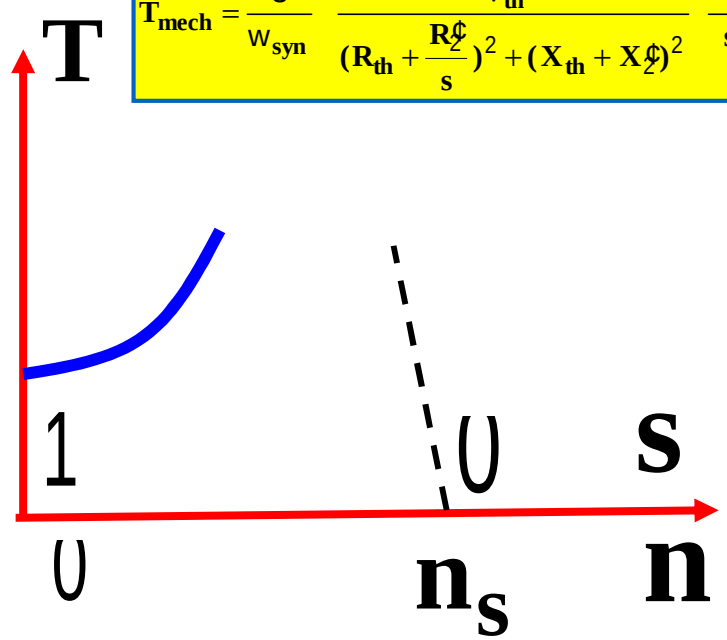
در شرایط لغزش زیاد و راه‌اندازي

$$R_{th} + \frac{R_2'}{s} << X_{th} + X_2'$$

$$T_{mech} \approx \frac{1}{w_{syn}} \frac{V_{th}^2}{(X_{th} + X_2')} \frac{R_2'}{s}$$

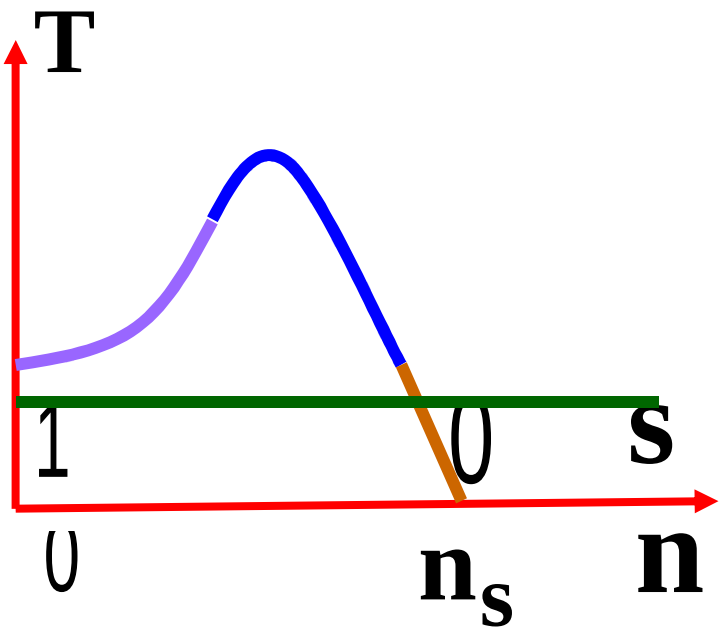
$$T_{mech} \approx \frac{1}{s}$$

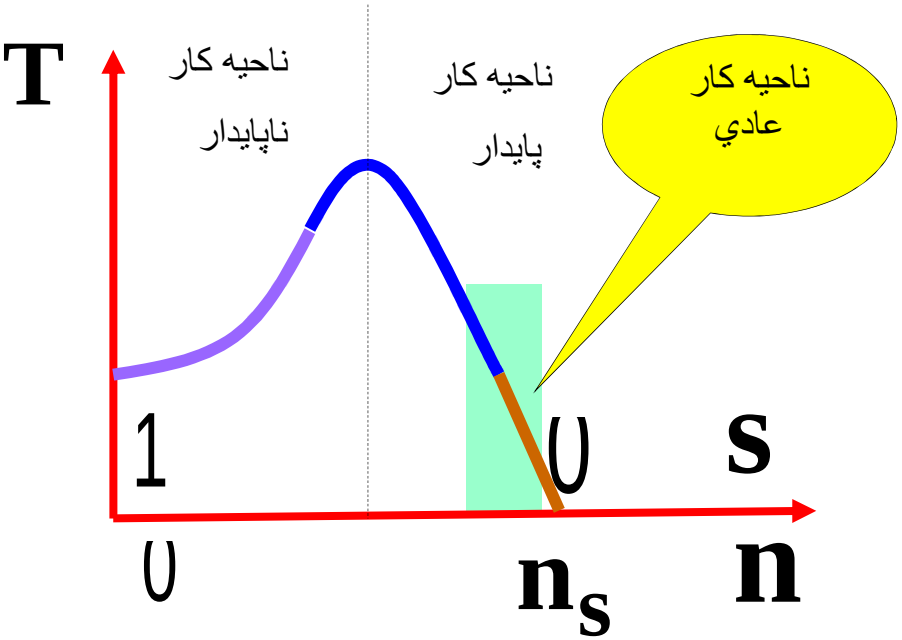
$$T_{mech} = \frac{3}{w_{syn}} \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{th} + X_2')^2} \frac{R_2'}{s}$$



در لغزش زیاد و در راه‌اندازي رابطه بین گشتاور و لغزش معکوس و به صورت $\frac{1}{s}$ است.

موتور القایی - مشخصه گشتاور – سرعت و وضعیت آن نسبت به گشتاور بار

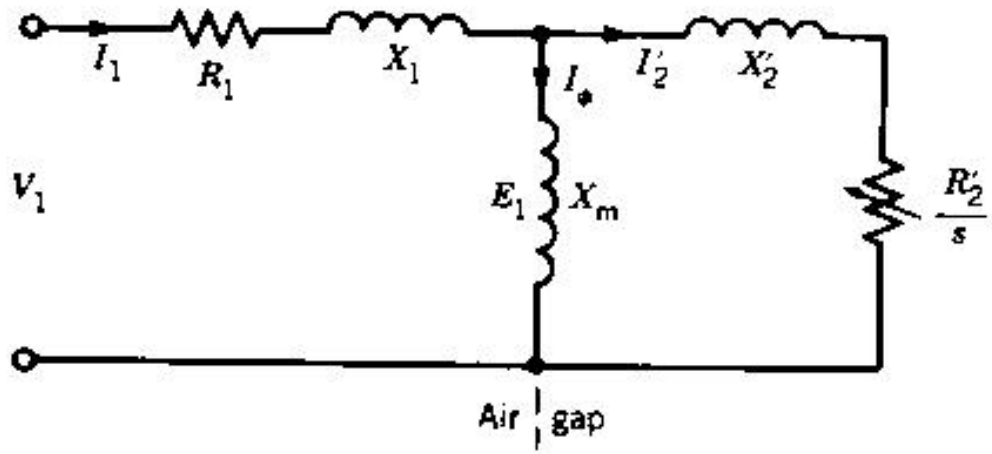




$$T_{mech} = \frac{1}{w_{syn}} \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{th} + X_2')^2} \frac{R_2'}{s}$$

موتور القایی - پخش توان و تلفات

انرژی الکتریکی ورودی



انرژی مکانیکی خروجی

P_{in}

$3\,V_1\,I_1\cos q$

P_{ag}

P_{mech}

P_{out}

$3\,R_1\,I_1^2$

تلفات مسی استاتور

توان عبوری از فاصله هوایی (توان ورودی به رتور)

$3\,R_2\,I_2^2$

تلفات مسی رتور

توان تبدیل شده از الکتریکی به مکانیکی

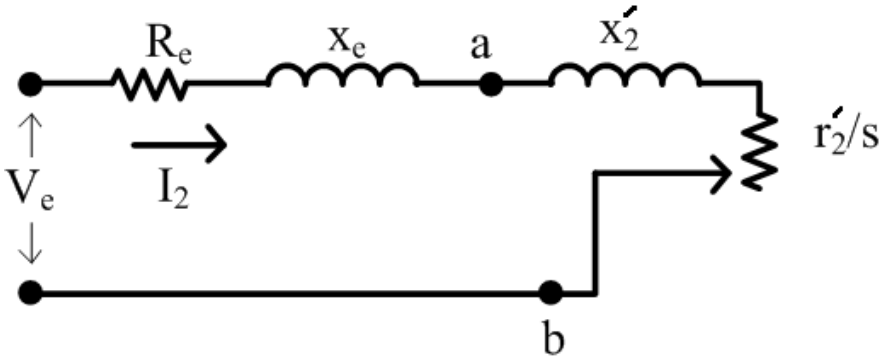
$P_{rot.}$

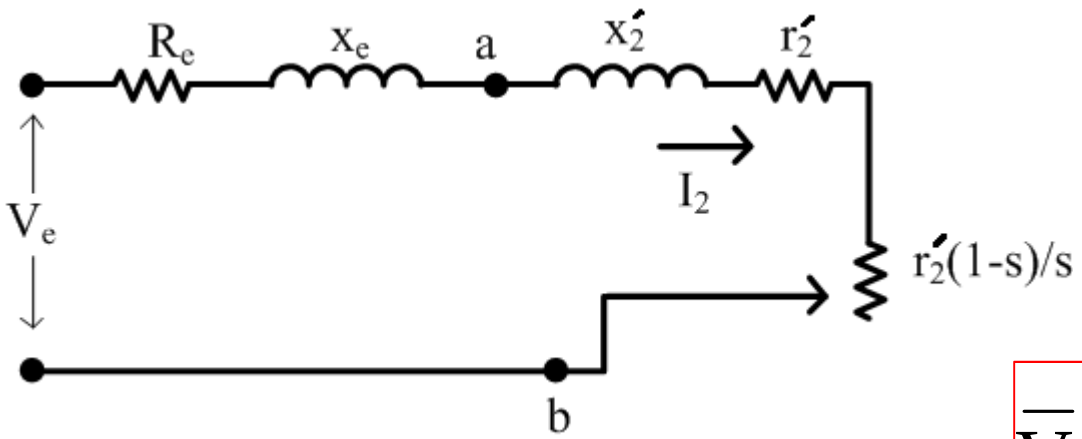
تلفات چرخشی یا ثابت شامل تلفات آهنی و تلفات مکانیکی

مشخصه گشتاور - لغزش

$$\overline{V}_e = \frac{V_1 (j X_m)}{r_1 + j(x_1 + X_m)}$$

$$\overline{Z}_e = \frac{(r_1 + j x_1)(j X_m)}{r_1 + j(x_1 + X_m)}$$





$(x_1 + x_m)$ **f f** r_1

$$\overline{V}_e = \frac{V_1 X_m}{x_1 + X_m} = \frac{V_1 X_m}{X_1}$$

$$\left(x_1 + x_m\right) \mathbf{f}\,\mathbf{f}\; r_1$$

$$\overline{Z}_e = \frac{\left(r_1 + jx_1\right)\left(j\,X_m\right)}{r_1 + j\left(x_1 + X_m\right)}$$

$$\overline{Z}_e = R_e + j\,X_e = \frac{r_1 X_m}{x_1 + X_m} + \frac{j\,x_1 X_m}{x_1 + X_m} = \frac{r_1 X_m}{X_1} + j\,\frac{x_1 X_m}{X_1}$$

$$\overline{I}_2 = \frac{\overline{V}_e}{\left(R_e + \frac{r_2}{s}\right) + j\left(x_2 + X_e\right)}$$

$$T_e = \frac{1}{w_s} \cdot I_2^2 \cdot \frac{r_2}{s}$$

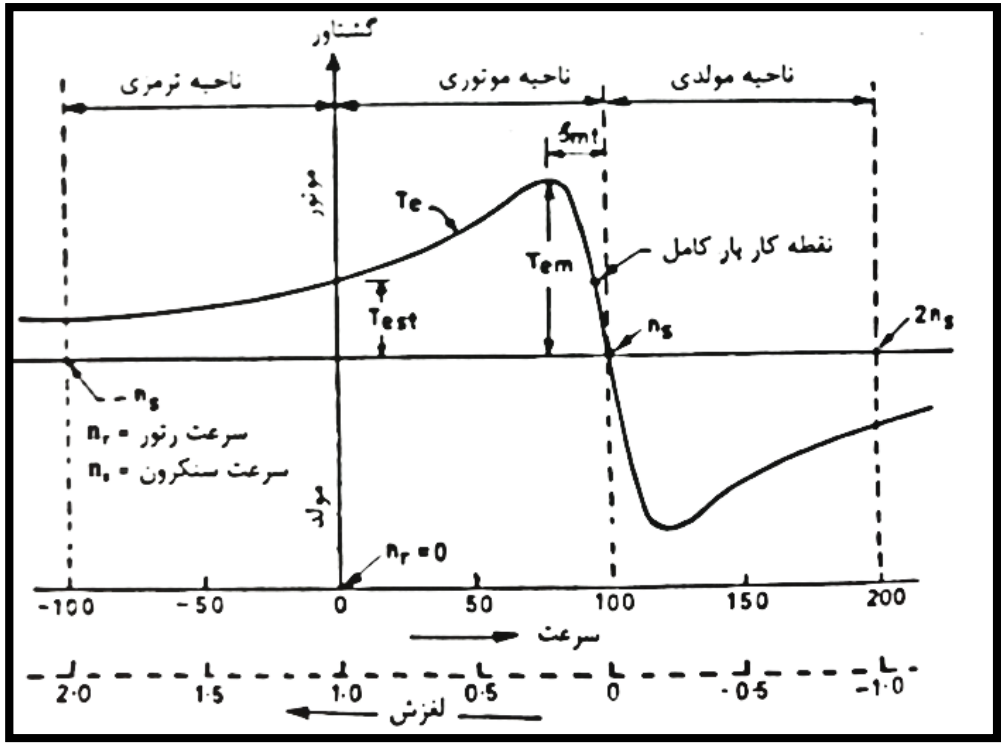
$$T_e = \frac{m}{w_s} \frac{V_e^2}{\left(R_e + \frac{r_2}{s}\right)^2 + \left(x_2 + X_e\right)^2} \frac{r_2}{s}$$

$$T_e = \frac{K_t}{\left(R_e + \frac{r_2}{s}\right)^2 + \boxed{X^2}} \frac{r_2}{s}$$

$$X = x_2 + X_e$$

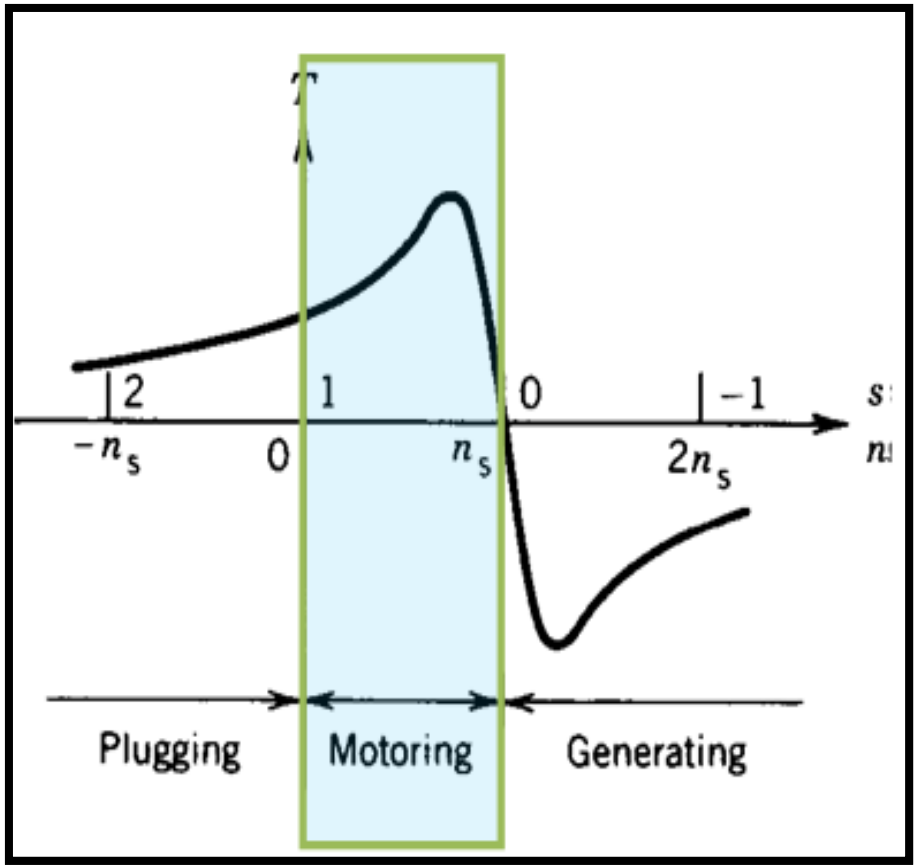
$$K_t = \frac{mV_e^2}{w_s} = \frac{mV_e^2}{2p\,n_s}$$

مشخصه گشتاور-لغزش



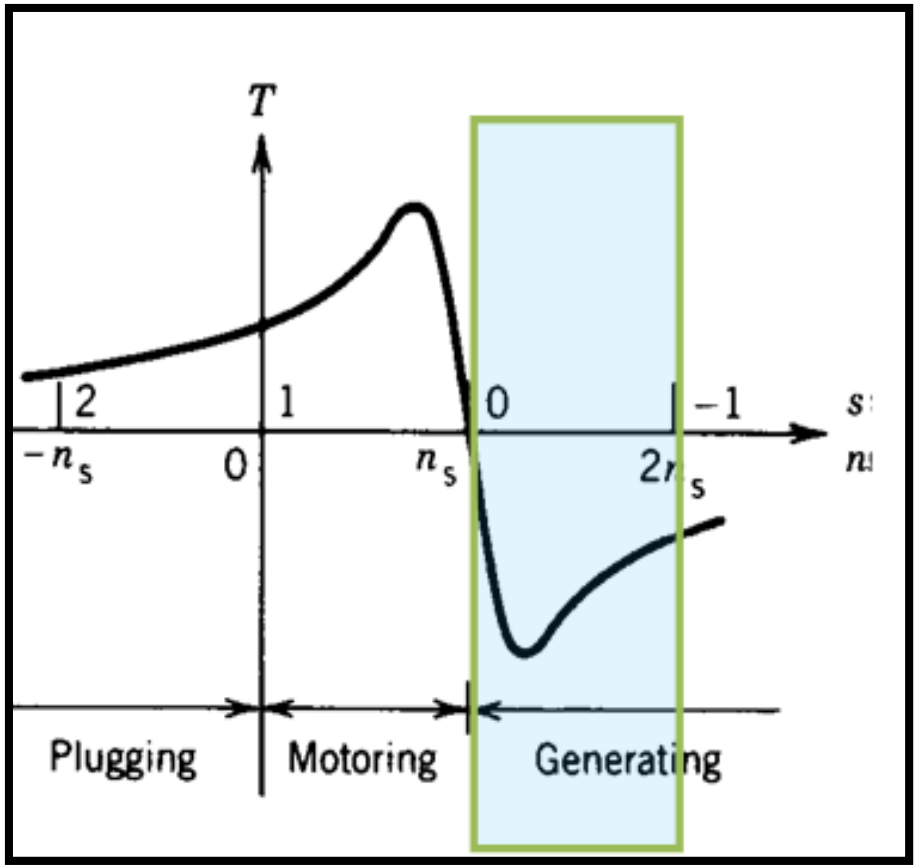
حالت موتوری: $0 \leq s \leq 1$

تحت شرایط کار عادی ، رتور در جهت گردش میدان دوار ناشی از جریانهای استاتور می چرخد.بدین لحاظ لغزش از یک در حال سکون تا صفر در سرعت سنکرون تغیر می کند.مقادی متناظر سرعت صفر $(s = 1)$ و سرعت سنکرون $(s = 0)$ می باشند.



حالت مولدی: $s < 0$

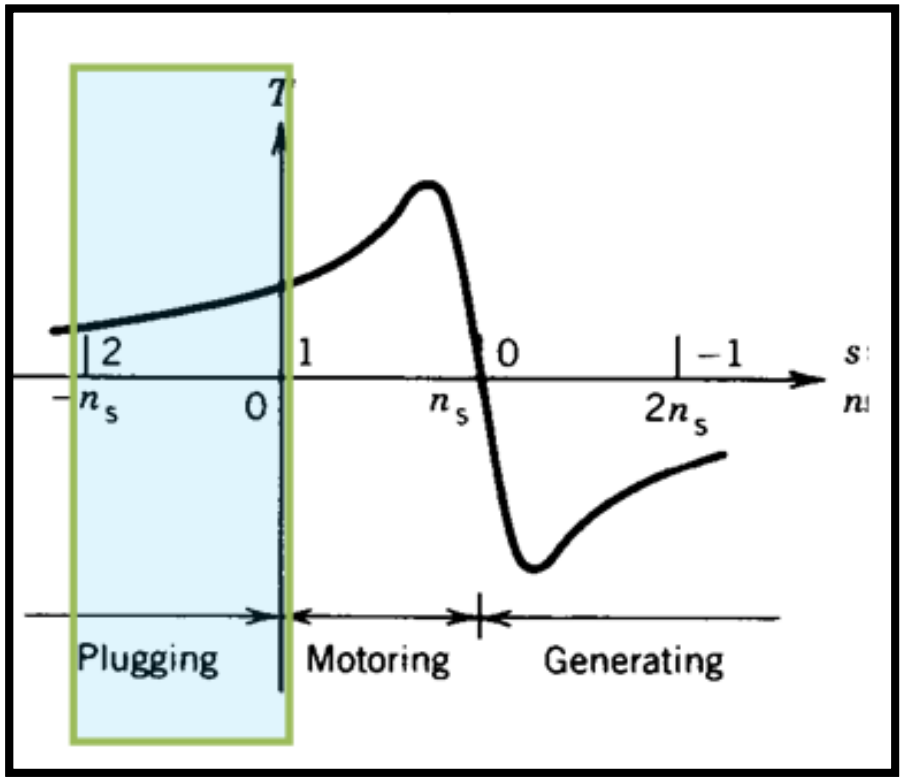
برای این حالت کار لغزش منفی است.موتور القایی در این ناحیه تنها وقتی کار می کند که استاتور آن به منبع ولتاژ با فرکانس ثابت وصل بوده و روتور آن توسط چرخاننده در سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون بچرخد.



حالت ترمزی: $s > 1$

لغزش بیش از یک را می توان با چرخاندن رتور توسط چرخاننده در جهت خلاف میدان دوار بدست آورد.

استفاده عملی از لغزش بیش از 1 توقف سریع رتور با عمل ترمزی است، برای بدست آوردن عمل ترمزی دو سر استاتور با هم عوض می شود.



گشتاور داخلی حداکثر

$$X = x\,¢ + X_e \qquad K_t = \frac{mV_e^2}{w_s} = \frac{mV_e^2}{2p\,n_s}$$

$$T_e = \frac{K_t}{\left(R_e + \frac{r\,¢}{s}\right)^2 + X^2}\,\frac{r\,¢}{s} = \frac{K_t\,r\,¢}{\left(sR_e^2 + \frac{r\,¢^2}{s} + 2\,R_e\,r\,¢ + sX^2\right)} = ¾¾¾®\ \frac{d}{ds}$$

$$= \frac{-K_t\,r\,¢\left(R_e^2 - \frac{r\,¢^2}{s^2} + X^2\right)}{\left(sR_e^2 + \frac{r\,¢^2}{s} + 2\,R_e\,r\,¢ + sX^2\right)^2} = 0 \quad Þ \quad R_e^2 - \frac{r\,¢^2}{s^2} + X^2 = 0 \quad Þ \quad \frac{r\,¢}{s} = \sqrt{R_e^2 + X^2}$$

گشتاور داخلی حداکثر

این گشتاور به نام های گشتاور بازدارنده،گشتاور نا میزانی یا گشتاور شکست خوانده می شود.

$$\frac{r_2'}{s_{TMax}} = \sqrt{R_e^2 + (X_e + x_2')^2} = \sqrt{\frac{r_1 X_m}{x_1 + X_m} + \left(\frac{x_1 X_m}{x_1 + X_m} + x_2'\right)^2} \approx \sqrt{\frac{r_1 X_m}{x_1 + X_m} + (x_1 + x_2')^2}$$

لغزش s_{mT} که در آن گشتاور حداکثر اتفاق می افتد برابر است با :

$$s_{TMax} = \frac{r_2'}{\sqrt{R_e^2 + X^2}}$$

$$X = x_2' + X_e$$

$$T_e = \frac{K_t}{\left(R_e + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + X^2} \frac{r_2'}{s}$$

$$T_{eMax} = \frac{K_t \left[\sqrt{R_e^2 + X^2}\right]}{\left[R_e + \sqrt{R_e^2 + X^2}\right]^2 + X^2} = \frac{K_t}{2\left[R_e + \sqrt{R_e^2 + X^2}\right]}$$

نشان می دهد که لغزشی که در ان گشتاور حداکثر رخ می دهد متناسب با مقاومت رتور است اما گشتاور حداکثر مستقل از مقاومت رتور است.

محاسبه تقریبی لغزش متناسب با گشتاور ماکزیمم

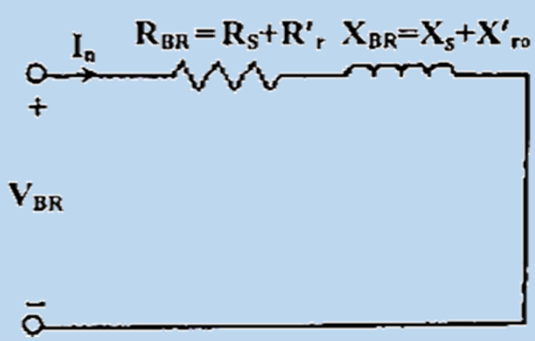
$$\frac{r_2'}{s_{TMax}} = \sqrt{R_e^2 + (X_e + x_2')^2} = \sqrt{\left(\frac{r_1 X_m}{x_1 + X_m}\right)^2 + \left(\frac{x_1 X_m}{x_1 + X_m} + x_2'\right)^2} \gg$$

$$\sqrt{(\gg 0) + (x_1 + x_2')^2} = x_1 + x_2'$$

$$\Rightarrow$$

$$s_{TMax} = \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} = \frac{r_2'}{2x_2'}$$

$$s_{TMax} = \frac{r_2'}{X_{BR}}$$



در آزمایش روتور قفل شده راکتانس دیده شده در سمت استاتور (XBR) برابر است با :

$$X_S = X'_{TO} = \frac{X_{BR}}{۲}$$

از منحنی گشتاور لغزش می توان نتیجه گرفت که برای موتور القایی رتور سیم پیچی شده:

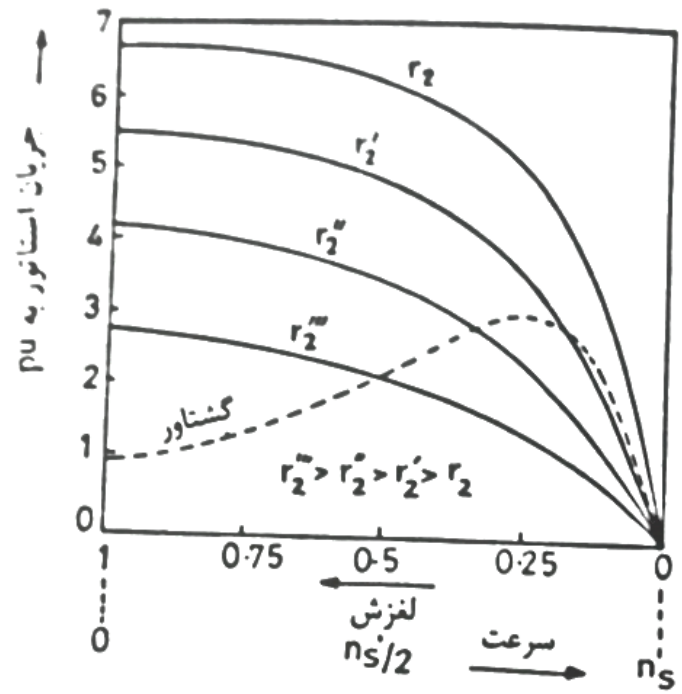
۱. سرعت موتور را می توان با تغییر مقاومت مدار رتور کنترل کرد اما گشتاور حداکثر بدون تغییر می ماند.

۲. گشتاور راه اندازی را می توان با تغییر مقاومت رتور تغییر داد.

۳. جریان گرفته شده از خط بوسیله موتور نیز باید با مقاومت مدار رتور تغیر کند.

۴. ضریب توان در راه اندازی نیز متاثر از مقاومت رتور است.

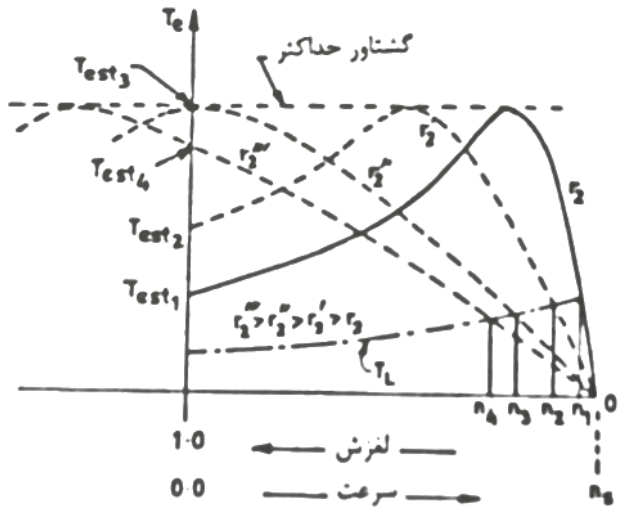
$$T_e = \frac{m}{\omega_s} \frac{V_e^2}{\left(R_e + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (X_e + X_2')^2} \frac{r_2'}{s}$$



اثر مقاومت رتور بر جریان استاتور روی مشخصه‌های لغزش موتور القائی سه فاز

گشتاور راه اندازی

در راه اندازی لغزش برابر یک بوده.



شکل (۱۹-۶ منحنی‌های گشتاور - لغزش موتور القائی با مقادیر مختلف مقاومت مدار رتور

$$T_{est} = \frac{K_t}{(R_e + r_2)^2 + X^2} \cdot r_2$$

کار موتور در نزدیکی سرعت سنکرون

$$I_2 = \frac{sV_e}{r_2}$$

$$K = \frac{K_t}{r_2}$$

$$T_e = \frac{K_t}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + X^2} \cdot \frac{r_2}{s} = \frac{sK_t}{r_2} = sK$$

گشتاور موتور بر حسب T_{em}

$$\frac{T_e}{T_{em}} = \frac{2\left[R_e + \sqrt{R_e^2 + X^2}\right]}{\left(R_e + \frac{r_2}{s}\right)^2 + X^2} \cdot \frac{r_2}{s} \rightarrow \frac{T_e}{T_{em}} = \frac{2X}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + X^2} \cdot \frac{r_2}{s} \rightarrow \frac{T_e}{T_{em}} = \frac{2X}{\left(\frac{S_{mT} X}{s}\right)^2 + X^2} \cdot \frac{S_{mT} X}{s}$$

$$\frac{T_e}{T_{em}} = \frac{2}{\frac{S_{mT}}{s} + \frac{s}{S_{mT}}} \rightarrow T_e = \frac{2T_{em}}{\frac{S_{mT}}{s} + \frac{s}{S_{mT}}}$$

مشخصه قدرت - لغزش

قدرت مکانیکی کل داخلی تولید شده :

$$P_m = m(1-s)P_g = mI_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}$$

یا :

$$P_m = \frac{mV_e^2}{\left[R_e + r_2 + \frac{r_2(1-s)}{s}\right]^2 + X^2} \cdot r_2 \frac{1-s}{s} \qquad *$$

با استفاده از قضیه انتقال توان ، حداکثر قدرت مکانیکی داخلی تولیدی زمانی است که :

$$\frac{r_2(1-s_{mP})}{s_{mP}} = \sqrt{(R_e + r_2)^2 + X^2}$$

یا :

$$s_{mP} = \frac{r_2}{\sqrt{(R_e + r_2)^2 + X^2} + r_2}$$

برای حداکثر مقدار P_m عبارت $\frac{r_2(1-s_{mP})}{s_{mP}}$ را به جای $\frac{r_2(1-s)}{s}$ در* جاگذری می کنیم :

$$P_{mm}=\frac{mV_e^2\sqrt{(R_e+r_2)^2}+X^2}{\left[R_e+r_2\sqrt{(R_e+r_2)^2}+X^2\right]^2+X^2}$$

یا :

$$P_{mm}=\frac{mV_e^2}{2\left[R_e+r_2\sqrt{(R_e+r_2)^2+X^2}+X^2\right]}$$

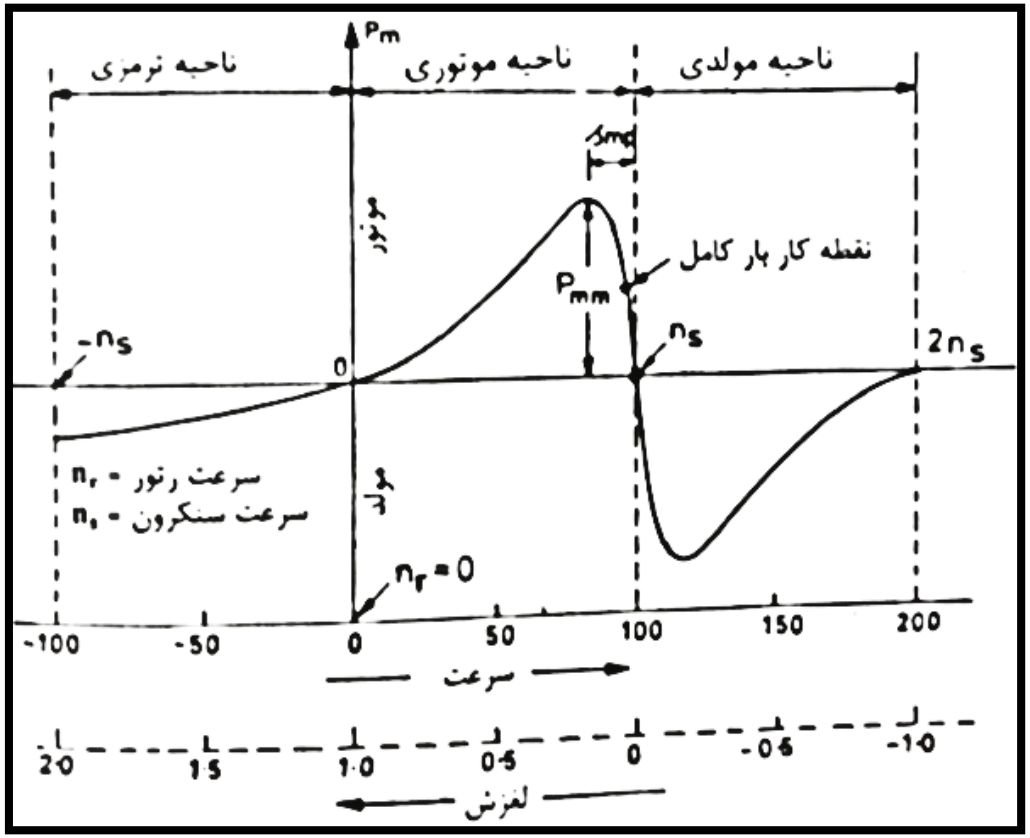
مقدار P_m به مقاومت رتور بستگی دارد در حالی که T_{em} مستقل از آنست .

همچنین داریم : $|s_{mP}|<|s_{mT}|$

در راه اندازی s=1 و $P_m=0$

در حالت راه اندازی گشتاور راه اندازی صفر نیست .

$$T_{est}=\frac{1}{w_s}I_2^2r_2$$



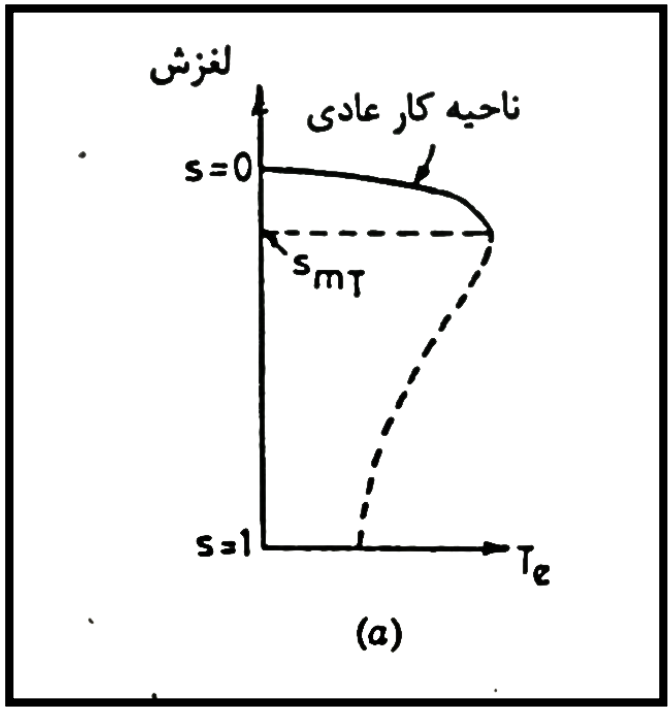
سرعت رتور در حداکثر قدرت خروجی یک مولد القائی :

$$n_s\left[1+\frac{r_2}{\sqrt{(R_e+r_2)^2+X^2}+r^2}\right]$$

پایداری موتور القایی

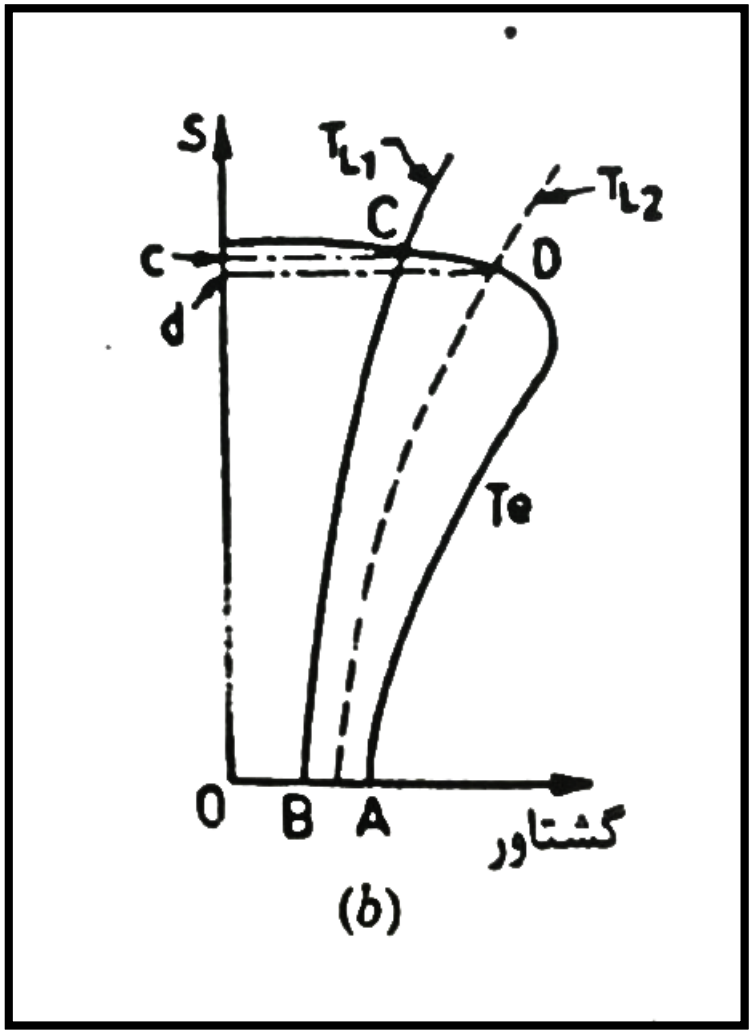
عملا در تمام موتور ها وقتی گشتاور بار افزایش می یابد سرعت افت می کند.تنها تقاطع مشخصه های گشتاور T_e و گشتاور بار T_l نقطه کار پایدار را تضمین نمی کند.کار پایدار سیستم مرکب از موتور و بار وقتی ممکن است که سرعت موتور با افزایش گشتاور بار کاهش یابد و برعکس.

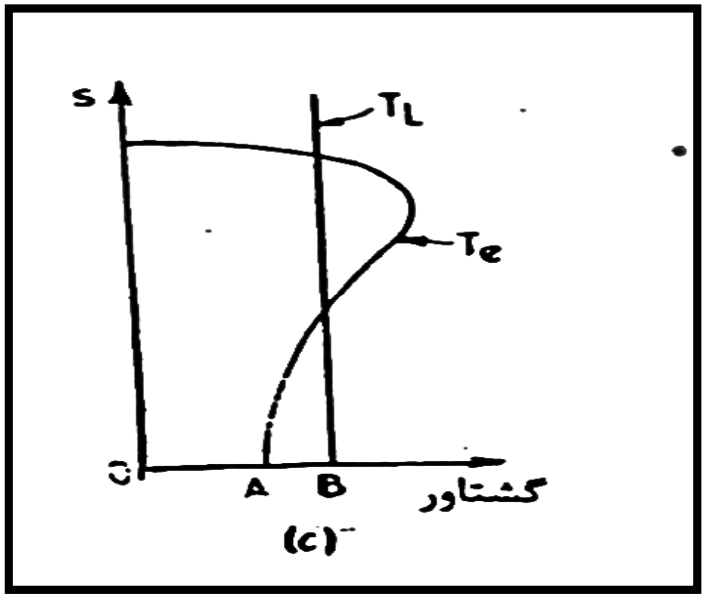
موتور القایی طوری طرح شده است که در بار کامل با مقادیر کم لغزش (از 2% تا 5%) در شرایط عادی کار می کند.



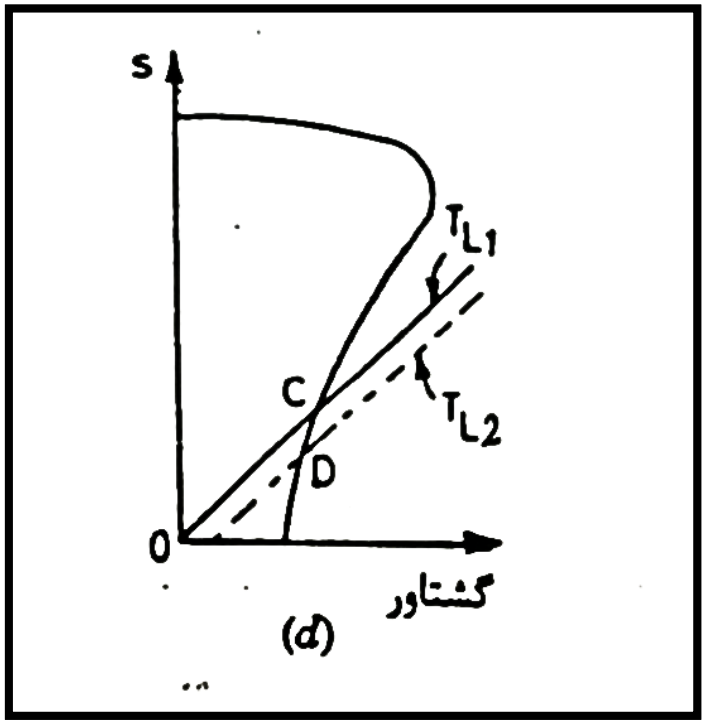
در شکل a ناحیه کار عادی از $s = 0$ تا s_{mT} با منحنی خط پر نشان داده شده است.ناحیه از $s = 1$ تا s_{mT} با خط چین نمایش داده شده است به ندرت به کار می رود.

در شکل b گشتاور راه اندازی موتور OA از گشتاور بار OB بیشتر است. و لذا موتور به نقطه کار C شتاب میگیرد. اگر گشتاور بار از منحنی T_{L1} به T_{L2}افزایش یابد، نقطه کار از C به D جابجا شده و سرعت موتور از Oc به Od افت می کند. می توان ثابت کرد که اگر گشتاور بار کاهش یابد سرعت موتور افزایش می یابد. نتیجه آنست که نقطه C پایدار است.

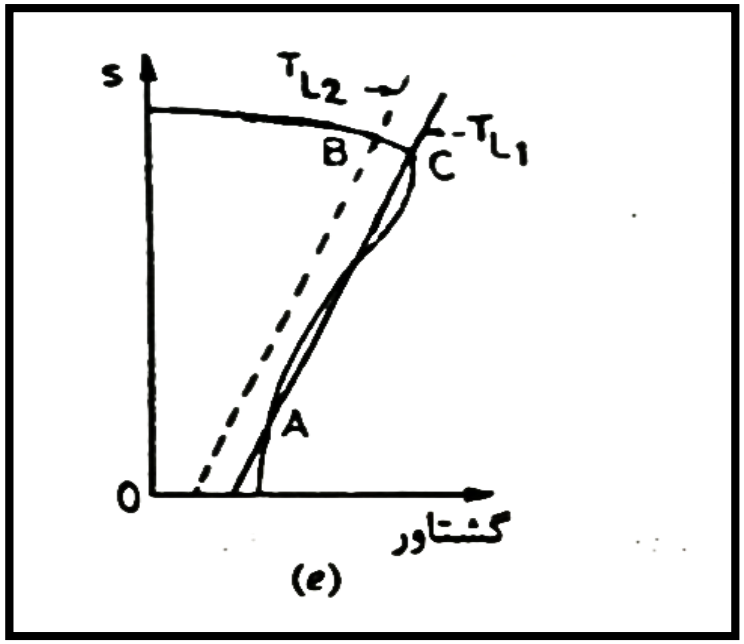




برای مشخصه بار T_{L1} شکل c موتور راه نمی افتد زیرا گشتاور راه اندازی OA کمتر از گشتاور بار OB است، از اینرو نقطه کاری نخواهیم داشت.



برای مشخصه بار T_{L1} شکل d ، C نقطه کار پایدار است زیرا افزایش گشتاور بار از T_{L1} به T_{L2} نقطه کار را از C به D جابجا می کند و لذا سرعت کاهش نشان می دهد. اما چنین مشخصه باری در شرایط عادی به ندرت اتافق می افتد زیرا نقطه کار C در لغزش بالاتر ، جریان بزرگتر و ضریب توان کمتر، تلفات بیشتر و بازده خیلی کمتر حاصل می شود.



برای مشخصه بار T_{L1} شکل e ، A نقطه کار پایدار است. اگر به هر دلیلی گشتاور بار ناگهانی از T_{L1} به T_{L2} کاهش یابد، گشتاور موتوراز T_{L2} فراتر رفته و رتور شتاب میگیرد تا نقطه کار B فرابرسد. بعد از آنکه نقطه B رسید T_{L2} به T_{L1}افزایش یافته نقطه کار C در سرعت کم بدست می آید. از اینرو ناحیه کار عادی از s=0 تا S_{mT} پایدارتر از ناحیه از S_{mT} تا s=1 است.

نتیجه آنکه، کار پایدار بستگی به طبیعت مشخصه ای گشتاور بار و گشتاور موتور و محل تقاطع آنها دارد.همچنین می توان ثابت کرد که اگر $\frac{dT_l}{dn} > \frac{dT_e}{dn}$ باشد،سیستم پایدار است. در حالتی که $\frac{dT_l}{dn} < \frac{dT_e}{dn}$ باشد،سیستم ناپایدار است.

در عمل ناحیه بین s=0 و S_{mT}مورد استفاده قرار میگیرد. این ناحیه را گاهی ناحیه پایدار می گویند زیرا تمام مشخصه های بار در این منطقه به نقطه کار پایدار می رسند. از آنجا که مشخصه گشتاور-سرعت در ناحیه کار عادی مشابه موتور شنت جریان مستقیم است (تغییرات کم سرعت از بی بار تا بار کامل) موتور القائی مشخصه موتور شنت را داراست.

راه اندازی موتور های القایی چندفاز

- موتور القایی سه فاز دارای گشتاور راه اندازی مثبت به ازای $s=1$ می باشد یعنی خود راه انداز بوده و با اتصال به منبع شروع به حرکت می کند.
- در لحظه شروع مانند ترانسفورماتور اتصال کوتاه عمل کرده و اگر با ولتاژ کامل راه اندازی شود جریان راه اندازی زیادی خواهد کشید.

ü راه اندازی موتور های قفس سنجابی

دو روش برای راه اندازی موجود است :

الف) راه اندازی ولتاژ کامل یا راه اندازی مستقیم به خط

در این روش استاتور توسط کلید به منبع بسته می شود و موتور در حدود 5 تا 7 برابر جریان نامی در ضریب توان پایین از شبکه می گیرد.

رابطه بین گشتاور راه اندازی و گشتاور بار کامل :

$$T_e = \frac{1}{W_s} I_2^2 \frac{r_2}{s}$$

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \frac{I_{2st}^2 \frac{r_2}{1}}{I_{2fl}^2 \frac{r_2}{s_{fl}}} = \left(\frac{I_{2st}}{I_{2fl}}\right)^2 s_{fl}$$

تعداد دور موثر رتور I'_{2st} = تعداد دور موثر استاتور I'_{st}

- I_{2st} جریان هر فاز رتور در حالت راه اندازی و I_{st} جریان هر فاز استاتور در حالت راه اندازی است.

$$\frac{I_{st}}{I_{fl}} = \frac{I_{2st}}{I_{2fl}} \Rightarrow \frac{T_{est}}{T_{efl}} = \left(\frac{I_{st}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl}$$

- V_1 ولتاژ هر فاز استاتور و Z_{sc} مقاومت ظاهری سکون هر فاز ارجاع داده شده به استاتور و I_{Sc} جریان اتصال کوتاه:

$$I_{sc} = \frac{V_1}{Z_{sc}} = I_{st} \Rightarrow \frac{T_{est}}{T_{efl}} = \left(\frac{I_{sc}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl}$$

ب) راه اندازی با مقاومت در استاتور

مقاومتی بین سر های موتور و سرهای منبع قرار داده می شود که با سرعت گرفتن موتور به صورت مرحله ای از مدار خارج می شود و وقتی سرعت موتور نزدیک سرعت نامی رسید اتصال کوتاه می شود، ولتاژ هر فاز نیز به نسبت xV_1 کاهش می یابد :

$$I_{st} = \frac{xV_1}{Z_{sc}} = xI_{sc} \Rightarrow \frac{T_{est}}{T_{efl}} = x^2\left(\frac{I_{sc}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl}$$

- در یک موتور القایی گشتاور متناسب با مجذور ولتاژ است.

- راکتور سری گرانتر از مقاومت است اما راکتور تلفات انرژی کمتری داشته و برای کاهش ولتاژ موثر است، زیرا ضریب توان موتور القایی در راه اندازی خیلی کم است.

ج) راه اندازی اتوترانسفورماتور

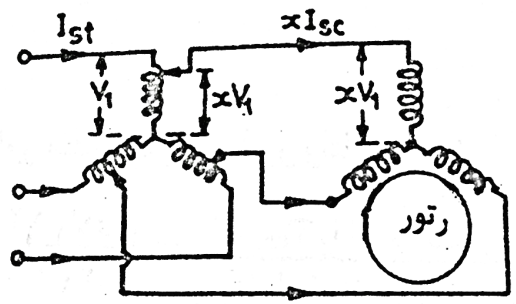
در این روش به کمک اتو ترانس در لحظه راه اندازی ولتاژ x برابر ولتاژ منبع V_1 به استاتور اعمال شده و باعث می شود جریان گرفته شده از منبع کاهش یابد که پس از رسیدن موتور به سرعت نامی اتوترانسفورماتور از مدار خارج می شود.

جریان راه اندازی هر فاز سیم پیچی موتور:

$$I_{st} = \frac{xV_1}{Z_{sc}} = xI_{sc}$$

- با صرف نظر از جریان بی باری،جریان راه اندازی از هر فاز منبع :

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \frac{(xI_{st})^2}{I_{fl}^2} S_{fl}$$



• نسبت گشتاور راه اندازی به گشتاور بار کامل :

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \frac{\left(x^2 I_{sc}\right) I_{sc}}{I_{fl}^2} \cdot S_{fl} = \frac{I_{st} I_{sc}}{I_{fl}^2} S_f$$

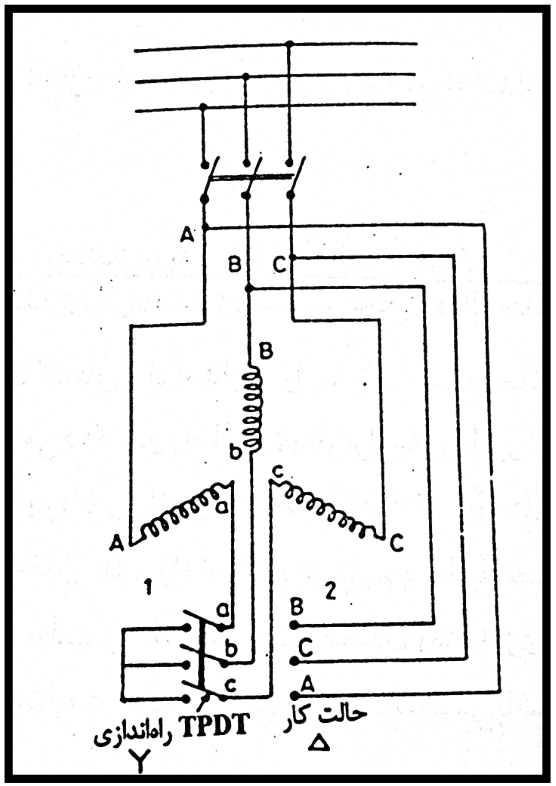
• جریان راه اندازی هر فاز موتور بر حسب I_{st} :

$$xI_{sc} = x.\frac{1}{x^2} I_{st} = \frac{1}{x} I_{st}$$

د) راه انداز ستاره – مثلث

این روش راه اندازی برای موتورهایی که برای کار با اتصال مثلث طراحی شده اند به کار می رود.

فاز های استاتور ابتدا با قرار دادن کلید TPDT در وضعیت1 به صورت ستاره وصل می شوند و بعد از انکه به حالت دائمی رسید،TPDT به وضعیت 2 قرار می گیرد و سیم پیچی استاتور را به اتصال مثلث تبدیل می نمایید.



- اگر V_l ولتاژ خط باشد در اتصال ستاره استاتور جریان راه اندازی هر فاز موتور(I_{sty}) با جریان راه انداز خط نیز برابر می باشد و داریم:

$$I_{sty} = \frac{V_L}{\sqrt{3}\, Z_{sc}}$$

- اگر اتصال سیم پیچی استاتور مثلث باشد با راه اندازی مستقیم به خط I_{std} برابر است و داریم :

$$I_{std} = \frac{V_L}{Z_{sc}} = I_{scd}$$

- جریان راه اندازی با روش راه اندازی مستقیم :

$$\sqrt{3}\frac{V_L}{Z_{sc}} = \sqrt{3}\, I_{std} = \sqrt{3}\, I_{scd}$$

- می دانیم :

$$I_{sty} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{std}$$

$$\frac{T_{est}}{T_{efld}} = \frac{\frac{1}{w_s}\left(I_{sty}\right)^2 \frac{r_2}{1}}{\frac{1}{w_s}\left(I_{fl.d}\right)^2 \frac{r_2}{s_{fl}}} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_{std}\right)^2}{\left(I_{fld}\right)^2} \cdot s_{fl} = \frac{1}{3}\left(\frac{I_{sd}}{I_{fld}}\right)^2 \cdot s_{fl}$$

T_{est} گشتاور راه اندازی با اتصال ستاره – مثلث

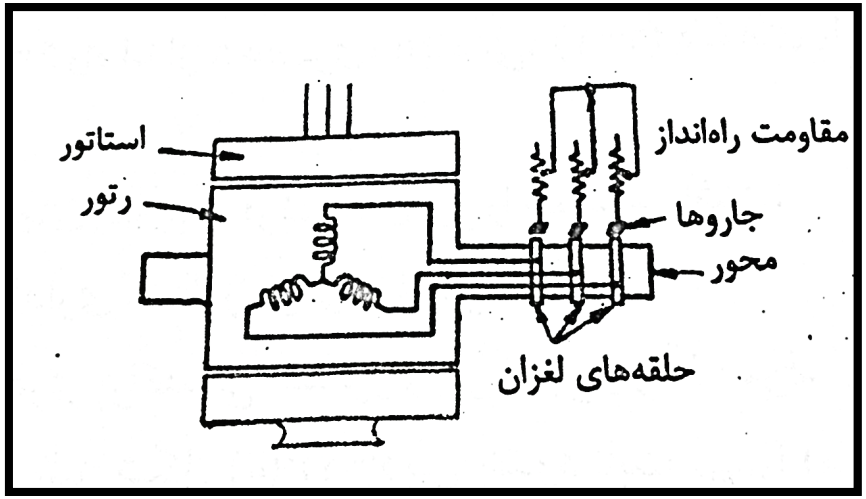
T_{efld} گشتاور بار کامل با اتصال مثلث در استاتور

- برای مواردی که گشتاور راه اندازی بیشتر از 50 % گشتاور نامی لازم نیست این روش مناسب ترین روش است.راه انداز ستاره-مثلث در مقایسه با اتوترانسفورماتور ارزان تر است.

راه اندازی موتور رتور سیم پیچی شده

- ساده ترین و ارزانترین روش برای راه اندازی موتور رتور سیم پیچی شده اضافه کردن مقاومت در رتور با اعمال ولتاژ کامل به سرهای استاتور است، در هنگام راه اندازی اضافه کردن مقاومت خارجی درمدار رتور موتور القایی با رتور سیم پیچی شده :

1) جریان راه اندازی را کاهش می دهد.
2) گشتاور راه اندازی را افزایش می دهد.
3) ضریب توان را بهبود می بخشد.



ü محاسبه بخش های مقاومت راه انداز

اگر r_2 مقاومت رتور موتور القایی ، $R_1, R_2, R_3, \ldots, R_n$ مقاومت های n بخش و $R'_1, R'_2, R'_3, \ldots, R'_n, R'_{n+1}$ مقاومت های کل مدار رتور باشد:

$$R_1' = R_1 + R_2 + R_3 + \dots\dots + R_{n-1} + R_n + r_2$$

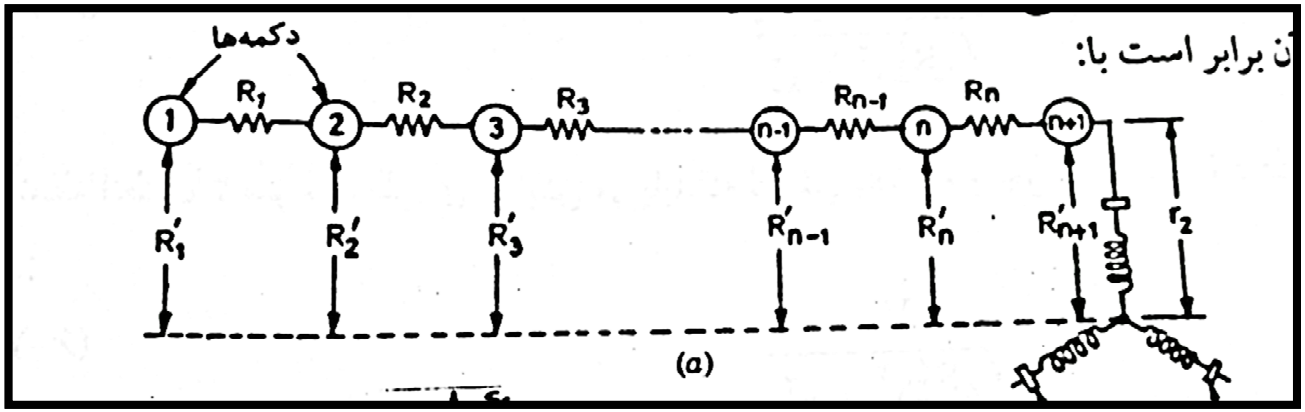
$$R_2' = R_2 + R_3 + R_4 + \dots\dots + R_n + r_2$$

.

.

.

$$R_{n+1}' = r_2$$



- برای محاسبه بخش های مقاومت فرض های زیر را داریم :

- هنگام راه اندازی گشتاور بار ثابت فرض شود.
- از مقاومت ظاهری استاتور و جریان بی بار آن صرف نظر شود.
- جریات استاتور بین حدودی ثابت تغییر می کند .(I_{1min} تا I_{1max})

- در لحظه راه اندازی لغزش $s_1 = 1$ است:

$$I_{1max} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_1}\right)^2 + X_2^2}}$$

- در همان نقطه اتصال اول وقتی جریان از I_{1max} افت می کند لغزش از s_1 به s_2 افت می کند:

$$I_{1min} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_2}\right)^2 + X_2^2}}$$

- جریان در نقطه اتصال 2 I_{1max} خواهد شد:

$$I_{1max} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_2}\right)^2 + X_2^2}}$$

- در این نقطه سرعت طوری افزایش یافته که لغزش s_2 شده و جریان به I_{1min} کاهش می یابد.

$$I_{1min} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_3}\right)^2 + X_2^2}}$$

$$I_{1max} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_3}\right)^2 + X_2^2}} \qquad I_{1min} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_3}{s_4}\right)^2 + X_2^2}}$$

- در نقطه اتصال سوم وقتی R_2 از مدار خارج می شود داریم :

$$I_{1max} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_1}{s_1}\right)^2 + X_2^2}} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_2}\right)^2 + X_2^2}} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_3}{s_3}\right)^2 + X_2^2}} \Rightarrow \frac{R_1}{s_1} = \ldots = \frac{R_n}{s_n} = \frac{R_{n+1}}{s_{n+1}} = \frac{r_2}{s_m}$$

$$I_{1min} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_1}{s_2}\right)^2 + X_2^2}} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_3}\right)^2 + X_2^2}} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_3}{s_4}\right)^2 + X_2^2}} \Rightarrow \frac{R_1}{s_2} = \ldots = \frac{R_n}{s_{n+1}} = \frac{R_{n+1}}{s_{n+2}}$$

$$\frac{s_1}{s_2} = \ldots = \frac{s_n}{s_{n+1}} = \frac{s_{n+1}}{s_{n+2}} \quad , \quad \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{r_2}{R_n} = a$$

• از آن جا که $s_1 = 1$، مقاومت کل در مدار رتور در اولین مرحله :

$$R_1 = \frac{s_1}{s_m} r_2 = \frac{r_2}{s_m}$$

$$R_2 = R_1 a, \quad R_3 = R_2 a = R_1 a^2$$

$$R_4 = R_3 a, \quad R_2 = R_1 a^3$$

.

.

به این ترتیب داریم :

$$R_{n+1} = R_1 a^n$$

$$r_2 = R_1 a^n$$

$$r_2 = \left(\frac{r_2}{s_m}\right) a^n$$

$$a^n = s_m \Rightarrow a = (s_m)^{\frac{1}{n}}$$

مقاومت های بخش رئوستا عبارت اند از:

$$R_1 = R_1 - R_2 = R_1(1-a)$$

$$R_2 = R_2 - R_3 = R_2(1-a) = a R_1(1-a) = a R_1$$

$$R_3 = R_3 - R_4 = R_3(1-a) = a R_2(1-a) = a^2 R_1$$

.

.

$$R_n = a^{n-1} R_1$$