

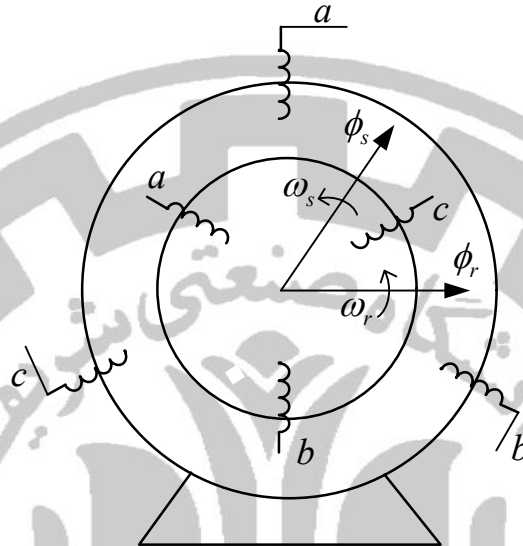
اصول ماشین های القایی (آسنکرون):

این نوع ماشین به دلیل ویژگی های مهم و خاص خود:

(1) خودراه انداز بودن

(2) بدون اتصال گالوانیک به روتور

در صنعت به طور گسترده استفاده می شود.



اعمال ولتاژ سه فاز به استاتور و عبور جریان از آن باعث ایجاد میدان ϕ_s می شود که با سرعت ω_s در حال چرخش است. ω_s سرعت حرکت نسبت به استاتور است.

سیم پیچ سه فاز روتور توسط این میدان قطع می شود و اگر روتور ساکن باشد، فرکانس این قطع برابر ω_s است. بنابراین میدان ϕ_r در روتور ایجاد می شود. (زیرا در سیم پیچ آن ولتاژ القا شده و در صورت بسته بودن مدار سیم پیچ روتور در آن جریان جاری می شود).

در این صورت (در صورت به وجود آمدن جریان در روتور) فرکانس آن ω_s است و بنابراین شار ϕ_r نسبت به روتور با سرعت ω_s می چرخد. چون روتور ساکن است پس سرعت حرکت ϕ_r نسبت به استاتور نیز ω_s خواهد شد، پس زاویه بین ϕ_s و ϕ_r پایدار است و گشتاور حاصل غیر صفر خواهد بود و باعث چرخش روتور می شود.

اکنون در اثر تولید این گشتاور روتور شروع به چرخش نموده است. بنابراین در صورت سرعت ω_m برای روتور نسبت به استاتور سرعت نسبی سیم پیچ های روتور نسبت به ϕ_s برابر $\omega_s - \omega_m$ خواهد شد. بنابراین فرکانس میدان ϕ_r (ناشی از جریان i_r) برابر $\omega_s - \omega_m$ می شود، بنابراین همچنان سرعت نسبی میدان روتور (ϕ_r) نسبت به استاتور برابر است با $(\omega_s - \omega_m) + \omega_m = \omega_s$ بنابراین موقعیت زاویه ای آن نسبت به ϕ_s حفظ می شود و گشتاور تولیدی پایدار خواهد بود.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \Rightarrow \omega_r = s\omega_s$$

تعریف لغزش:

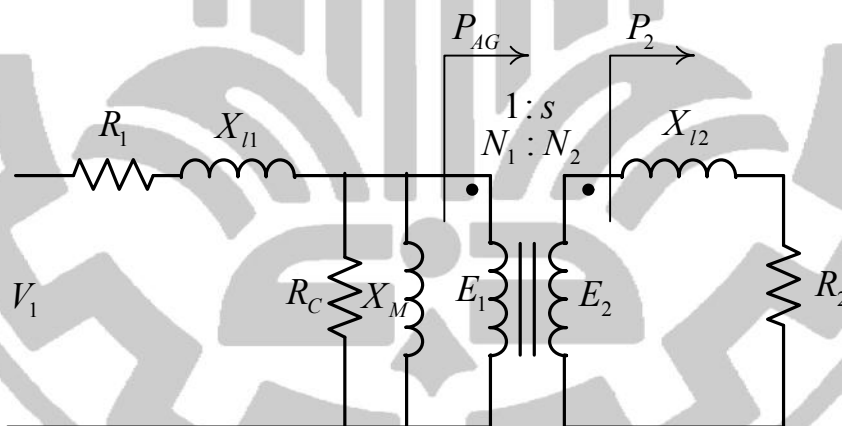
ω_m سرعت حرکت روتور نسبت به استاتور - ω_r فرکانس جریان روتور - ω_s فرکانس جریان استاتور
در ادامه مدل مداری این موتور را بدست می آوریم. (فقط مدل یک فاز از ماشین سه فاز را بدست می آوریم)
در مورد مدل مداری موتور القایی اولاً توجه کنید که در حالت مدار باز ولتاژ روتور بر طبق رابطه
 $V_r = 4.44 N f_r \phi_r$ بدست می آید.

بنابراین اگر روتور ساکن باشد. ($f_r = f_s$) با فرض برابر بودن دامنه شارها در دو طرف ولتاژ V_r حداکثر مقدار ممکن را خواهد داشت.

برای تولید گشتاور باید مدار روتور را بست. برای این کار روتور را اتصال کوتاه می کنیم. می توانستیم مدار روتور را با یک مقاومت نیز ببندیم اما وجود مقاومت دو اشکال دارد: یکی اینکه تلفات دارد و دیگر اینکه جاگیر است.

تنها مشکل، جریان این اتصال کوتاه است که البته با راه اندازی روتور و تغییر فرکانس روتور از f_s به $f_r = sf_s$ ولتاژ روتور افت کرده و جریان محدود می شود.

مدار معادل ماشین القایی:



$$E_{20} = 4.44 N_r f_r \phi = 4.44 N_r f_s \phi \quad : (f_r = f_s) \text{ در حالت سکون}$$

(شار روتور و استاتور را یکی فرض کردیم، یعنی از پراکندگی آن در این بخش صرف نظر می شود.)

$$E_2 = sE_{20} \quad \text{اگر روتور با لغزش } s \text{ بچرخد:}$$

$$P_{AG} = P_m + P_2$$

P_{AG} توان عبوری از فاصله هوایی - P_2 توان تلف شده در روتور - P_m توان مکانیکی تولید شده

مثال : موتور $380V$ و $3ph$ و $10hp$ و $50Hz$ و $4P$ با اتصال ستاره در بار نامی با $s = 0.05$ مفروض است. $\frac{N_1}{N_2} = 2$ (که N_1 تعداد دور استاتور و N_2 تعداد دور روتور)

مطلوبست:

سرعت سنکرون ، سرعت روتور در بار نامی ، فرکانس روتور ، سرعت لغزش ، سرعت میدان روتور نسبت به روتور ، سرعت میدان روتور نسبت به استاتور ، سرعت میدان روتور نسبت به میدان استاتور ، ولتاژ القایی روتور در سرعت نامی (E_2) ، گشتاور خروجی
باتوجه به $4P$ بودن ، سرعت حرکت میدان گردان نسبت به پارامترهای مکانیکی نصف می شود.

با توجه به رابطه زاویه مکانیکی و الکتریکی : $f_m = \frac{2}{P} f_e$

اگر سرعت چرخش در دقیقه مدنظر باشد: $n_s = \frac{120}{P} f$

که f فرکانس تحریک جریان استاتور و n_s سرعت سنکرون (سرعت حرکت میدان گردان استاتور) می باشد.

$$n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{rpm}$$

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \Rightarrow n_m = (1 - s)n_s = 1425 \text{rpm}$$

$$f_r = sf_s = 2.5 \text{Hz}$$

فرکانس جریان الکتریکی روتور:

سرعت لغزش ، سرعت مکانیکی حرکت میدان روتور روی روتور است.

$$n_{slip} = 1500 - 1425 = 75 \text{rpm}$$

$$E_2 = sE_{20} = (0.05) \left(\frac{380}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{2} \right) = 5.5 \text{V}$$

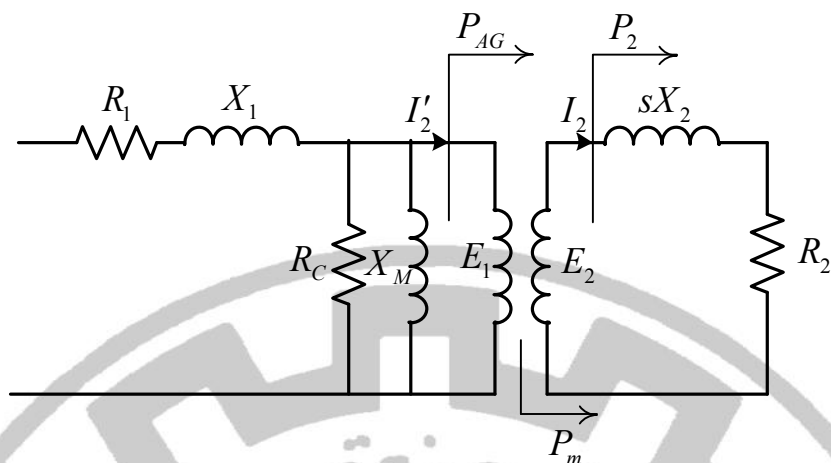
$$P_m = \tau_{total} \omega \Rightarrow 10 \times 746 = \tau_{total} \left(\frac{1425 \times 2\pi}{60} \right) \Rightarrow \tau_{total} = 50 \text{N.m}$$

سرعت میدان روتور نسبت به روتور: 75rpm

سرعت میدان روتور نسبت به استاتور: $1425 + 75 = 1500 \text{rpm}$

سرعت میدان روتور نسبت به میدان استاتور: 0

استخراج رابطه توان مکانیکی از مدل :



$$P_{AG} = P_m + P_2$$

$$P_2 = 3\text{Re}\{E_2 I_2^*\} = 3\text{Re}\{sE_2 I_2^*\} = s \times 3\text{Re}\{E_1 I_2^*\} = sP_{AG}$$

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

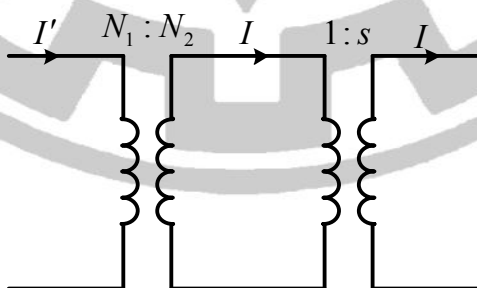
ساده کردن مدل :

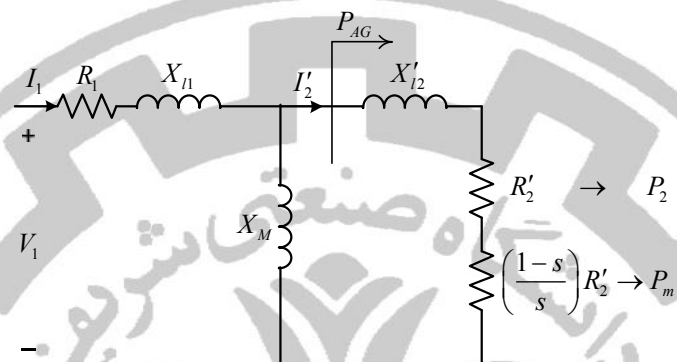
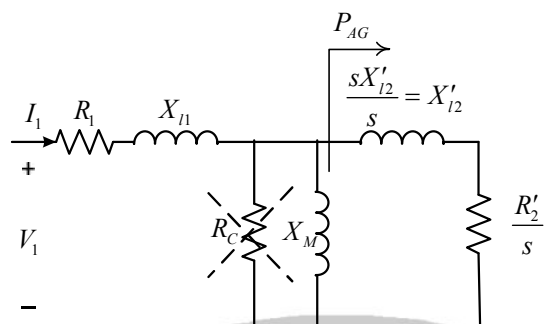
ترانسفورماتور موجود در مدل دارای نسبت تبدیل $\frac{sN_1}{N_2}$ می باشد ، بنابراین می توان آن را با ترانسفورماتور

$\frac{N_1}{N_2}$ سری شده با ترانسفورماتور $s:1$ مدل کرد .

ترانسفورماتور اول عادی بوده و امپدانسها با $\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$ منتقل می شوند.

در ترانسفورماتور دوم تغییر دور نداریم و تغییر ولتاژ با فرکانس انجام می شود، پس جریان ها در دو طرف با هم برابر هستند.





تلفات هسته روتور با با افزایش دور ، کاهش می یابد ($f_r \downarrow \Leftarrow s \downarrow$) اما تلفات چرخشی با افزایش دور، افزایش می یابد. بنابراین می توان مجموع تلفات هسته (شامل هسته استاتور با تلفات تقریباً ثابت و هسته روتور با تلفات متغیر) و تلفات چرخشی (متغیر با سرعت چرخش) را تقریباً ثابت فرض کرد. بنابراین R_C از مدل حذف می شود و مجموع این تلفات [تقریباً] ثابت را در انتها از P_m کم می کنیم.

$$P_{AG} = \frac{R'_2}{s} I_2'^2$$

$$P_{cu(rotor)} = R'_2 I_2'^2$$

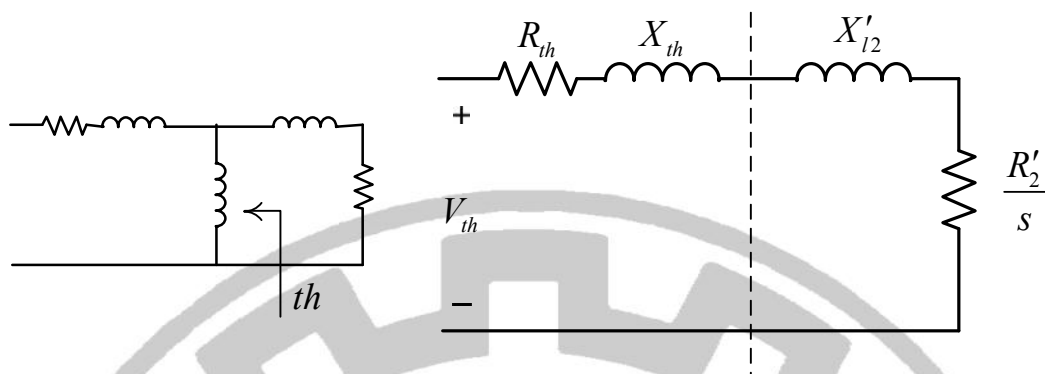
$$P_m = P_{AG} - P_{rotor} = \frac{R'_2}{s} I_2'^2 (1-s)$$

$$P_{shaft} = P_m - P_C$$

که P_C مجموع تلفات هسته و چرخشی است.

حال مدار معادل را ساده می کنیم :

از دید X_m به سمت چپ معادل تونن می نویسیم:



$$V_{th} = \frac{jX_m V_1}{R_1 + j(X_m + X_{l1})} \approx \frac{X_m}{X_m + X_{l1}} V_1$$

$$R_{th} + jX_{th} = \frac{jX_m (R_1 + jX_{l1})}{R_1 + j(X_m + X_{l1})}$$

$$(X_m + X_{l1})^2 \gg R_1^2 \Rightarrow R_{th} \approx \left(\frac{X_m}{X_m + X_{l1}} \right)^2 R_1$$

$$X_m \gg X_{l1} \Rightarrow X_{th} \approx X_{l1}$$

در ادامه مشخصه گشتاور - سرعت ماشین را بدست می آوریم:
 ترتیب حل مسئله ، در این حالت ، به صورت ثابت فرض کردن سرعت و یافتن توان خروجی و محاسبه ی
 گشتاور به صورت زیر می باشد.

$$P_m = \tau_m \omega_m$$

$$P_m = (1-s)P_{ag}$$

$$\omega_m = (1-s)\omega_s$$

$$\Rightarrow \tau_m = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$$

از مدار معادل داریم:

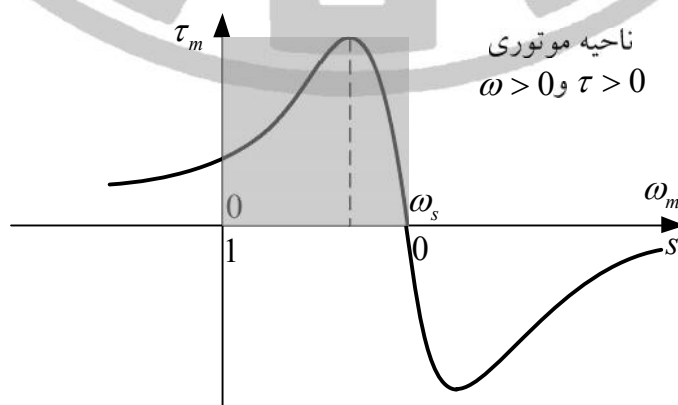
$$P_{ag} = 3 \frac{R'_2}{s} I_2'^2$$

$$I_2'^2 = \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X'_{l2})^2}$$

$$\Rightarrow \tau_m = \frac{3 \left(\frac{R'_2}{s}\right) V_{th}^2}{(\omega_s) \left[\left(R_{th} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X'_{l2})^2 \right]}$$

و یا به صورت تقریبی:

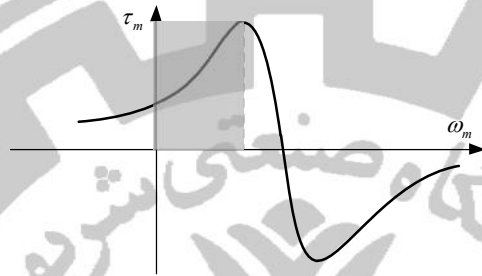
$$\tau_m = \frac{3 \left(\frac{R'_2}{s}\right) V_1^2}{(\omega_s) \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{l1} + X'_{l2})^2 \right]}$$



در رابطه با این مشخصه نکات زیر اهمیت دارد:

(1) گشتاور در سرعت صفر (گشتاور شروع) تا حد ممکن باید بالا باشد چون در این حالت ($\omega_m = 0$) بدترین حالت از نظر اصطکاک وجود دارد.

(2) در ناحیه سمت چپ ناحیه موتوری (بخش هاشور خورده منحنی زیر)، چ.ن شیب مشخصه مثبت است، ماشین ناپایدار است، یعنی با اغتشاش کوچکی، یا سرعت آن صفر می شود و یا به ناحیه سمت راست (ناحیه پایدار) انتقال می یابد.



(3) گشتاور ماکزیمم هر چه بیشتر باشد، بهتر است. زیرا ماشین بارهای بزرگتری را می تواند حرکت دهد. ($\tau_m > \tau_{load}$)

(4) شیب مشخصه در ناحیه پایدار عموماً خیلی تیز است، یعنی به ازای تغییرات گشتاور تغییرات ω خیلی زیاد نیست. این ویژگی از نظر کنترل سرعت بد است، اما از نظر تلفات روتور مناسب است. ($s \approx 0$)
مثال: موتور سه فاز القایی با اتصال Y و با مشخصات زیر مفروض است:

$$380v, 50Hz, 10hp, 4P$$

$$R_1 = 0.6\Omega \quad R'_2 = 0.3\Omega \quad X_{l1} = 1.1\Omega \quad X'_{l2} = 0.45\Omega$$

$$X_m = 25\Omega \quad P_C = 800w$$

موتور با ولتاژ و فرکانس نامی تحت $s = 0.02$ کار می کند. (اصطکاک ثابت فرض می شود).

مطلوبست: سرعت حرکت؟ توان؟ گشتاور خروجی؟ گشتاور فاصله هوایی؟ بازده؟ ضریب توان؟ I_1 ؟

$$\omega_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500rpm$$

$$\omega_m = (1-s)\omega_s = 1470rpm$$

$$|V_{th}| = \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_{l1} + X_m)^2}} V_1$$

$$V_1 = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220v \Rightarrow |V_{th}| \approx 210.6v$$

$$R_{th} \approx \left(\frac{X_m}{X_m + X_{l1}} \right)^2 R_1 = 0.55 \Omega$$

$$X_{th} \approx X_{l1} = 1.1 \Omega$$

$$|I_2'| = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_{l2}')^2}} = 13.44 A$$

$$P_{ag} = 3 \frac{R_2'}{s} I_2'^2 = 8138 w$$

$$P_m = (1-s)P_{ag} = 7875 w$$

$$\tau_m = \frac{P_m}{\omega_m} = 51.8 N.m$$

$$P_{load} = P_m - P_C = 7975 - 800 = 7175 w$$

محاسبه توان خروجی:

$$\tau_{load} = \frac{P_{load}}{\omega_m} = 46.6 N.m$$

$$\frac{I_2'}{I_1} = \frac{jX_m}{\frac{R_2'}{s} + j(X_m + X_{l2}')} \Rightarrow I_1 = 15.89 \angle -34^\circ$$

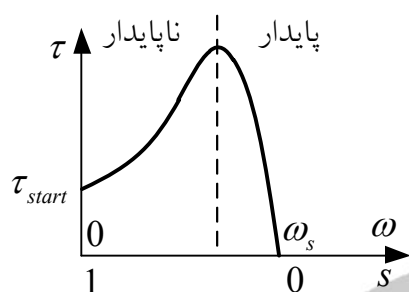
(فاز جریان نسبت به مرجع $V_1 \angle 0$ می باشد.)

$$P_{in} = 3VI \cos \varphi = 8592 w$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{7175}{8592} = 83.5\%$$

$$PF = \cos \varphi = 0.82 lag$$

مشخصه موتور القایی سه فاز:



$$P_{ag} = 3 \frac{R'_2}{s} I_2'^2$$

$$\tau_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$$

محاسبه گشتاور ماکزیمم:

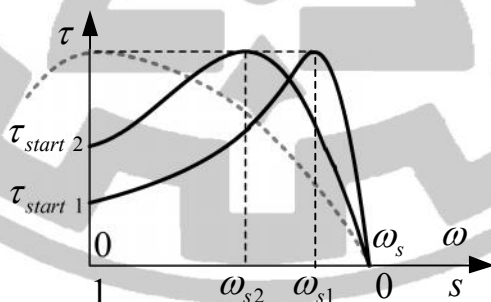
$$\tau = \frac{3 \left(\frac{R'_2}{s} \right) V_{th}^2}{(\omega_s) \left[\left(R_{th} + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{th} + X'_{l2})^2 \right]}$$

$$\frac{d\tau}{ds} = 0$$

$$\Rightarrow s_{\tau(\max)} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_{l2})^2}}$$

$$\Rightarrow \tau_{\max} = \frac{3V_{th}^2}{(2\omega_s) \left[R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_{l2})^2} \right]}$$

همان طور که دیده می شود مقدار τ_{\max} به R'_2 ربطی ندارد، اما نقطه ی وقوع آن ($s_{\tau(\max)}$) با R'_2 رابطه دارد. بنابراین می توان با تغییر R'_2 بدون تغییر در τ_{\max} ، نقطه ی وقوع آن را جابه جا کرد.



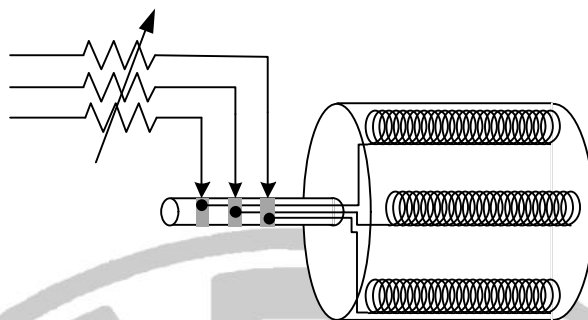
ویژگی ها :

(1) افزایش گشتاور start

(2) اضافه شدن قابلیت کنترل سرعت به ماشین

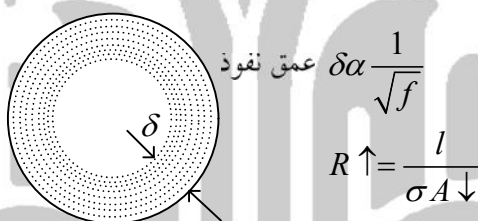
تبعات: کاهش بازده

مکانیزم تغییرات R'_2 :



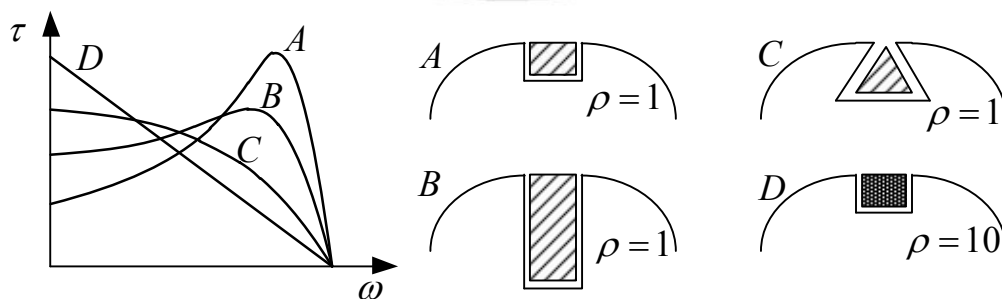
بررسی بیشتر راه اندازی ماشین:

معرفی اثر پوستی: در اثر این پدیده در فرکانس های غیر از DC، جریان در عمق نفوذ مشخصی که متناسب با $\frac{1}{\sqrt{f}}$ است تجمع کرده و در نتیجه مقاومت AC هادی نسبت به حالت DC افزایش می یابد.



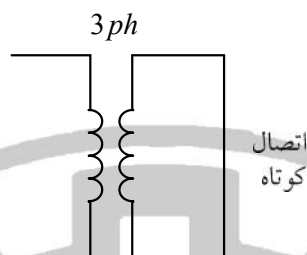
هر چه δ با قطر هادی (D) اختلاف بیشتری داشته باشد، ($D \gg \delta$) این تغییر مقاومت مشهودتر است. ربط این مسئله با راه اندازی موتور القایی در فرکانس متغیر روتور در دورهای مختلف است. با توجه به زیاد بودن فرکانس جریان روتور در راه اندازی ($\omega_r = \omega_s$)، اگر اثر پوستی رخ دهد ($D \gg \delta$) بنابراین مقاومت روتور در راه اندازی زیاد خواهد بود و گشتاور راه اندازی افزایش می یابد. با دور گرفتن روتور و کاهش، اثر پوستی از بین رفته و $R'_2 \downarrow \Rightarrow \eta \uparrow$

شکل هادی روتور روی وقوع این پدیده و نسبت $\frac{R_{ac}}{R_{dc}}$ تاثیر زیادی دارد و بر این اساس موتور های القایی در چهار کلاس ساخته می شوند که از نظر هادی روتور با هم تفاوت دارند.



اندازه گیری پارامترهای مدار معادل:

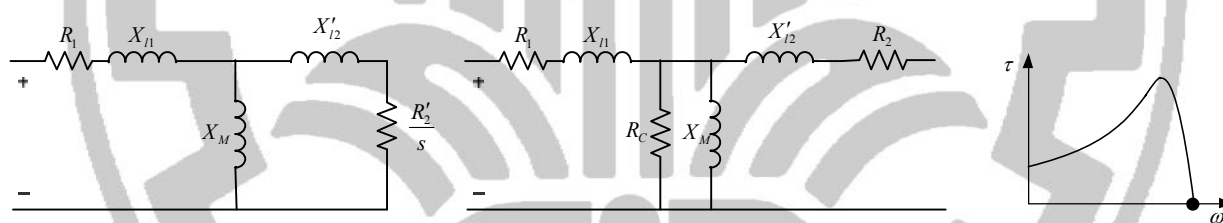
همان طور که دیدیم موتور القایی مشابه با یک ترانسفورماتور می باشد؛ تنها فرق این دو وجود چرخش در موتور القایی است.



پارامترهای مدار معادل (R_1 ، X_{l1} ، X_M ، R'_2 ، X'_{l2}) تابعی از نقطه کار موتور (τ و ω) نیستند. بنابراین به عنوان مثال در سرعت صفر (روتور ساکن)، ترانسفورماتور و موتور القایی از نظر مدار معادل کاملاً مشابه یکدیگر می باشند.

مرور تست های ترانسفورماتور:

(1) آزمایش بی باری: در این حالت مشابه با ترانسفورماتور باید شاخه روتور مدار باز شود. این حالت در صورت $s \rightarrow 0$ رخ می دهد که معادل کارکرد ماشین در بی باری است. بنابراین ماشین را در بی باری چرخانده و P ، V و I استاتور را اندازه گیری می کنیم.



$$P_{nl} = 3R_1 I_1^2 + P_{rot} = 3R_{nl} I_{nl}^2$$

مقدار R_1 را به کمک تست اهم متری بدست می آوریم.

$$\Rightarrow P_{rot} \quad \checkmark$$

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

$$X_{nl} = X_{l1} + X_m = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2}$$

روش دوم:

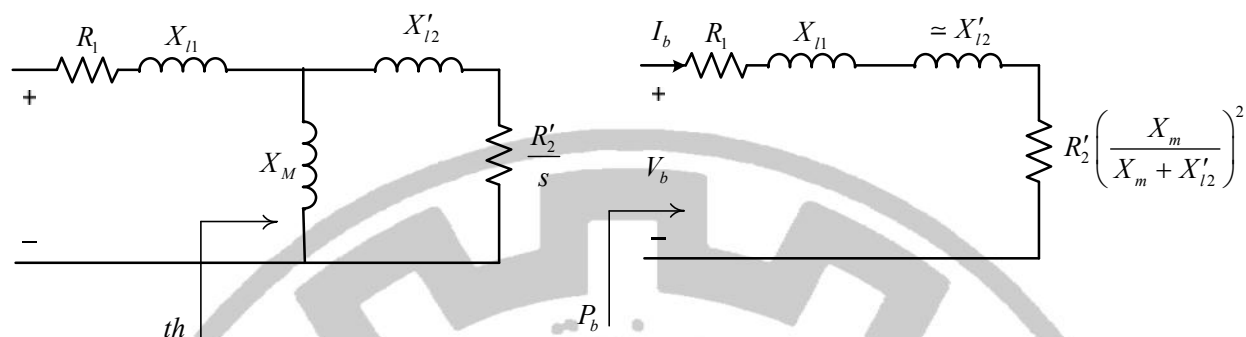
$$S_{nl} = V_{nl} I_{nl}$$

$$Q_{nl} = \sqrt{S_{nl}^2 - P_{nl}^2} = 3X_{nl} I_{nl}^2$$

$$X_{nl} \approx X_m$$

بنابراین از آزمایش nl مقادیر P_{rot} و X_{nl} بدست می آید.

(2) آزمایش اتصال کوتاه : در این حالت اگر روتور را قفل کنیم، دقیقاً معادل یک ترانسفورماتور اتصال کوتاه شده بدست می آید و با اندازه گیری P ، V و I می توان پارامترهای شاخه سری را یافت. در این حالت می توان از X_m در مقابل شاخه روتور صرف نظر کرد، اما بهتر است آن را نیز لحاظ کنیم.



$$P_b = 3R_b I_b^2$$

$$R_b = R_1 + R'_2 \left(\frac{X_m}{X_m + X'_{l2}} \right)^2$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} \Rightarrow X_{l1} + X'_{l2} = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2}$$

(اندیس **b** مربوط به آزمایش روتور قفل شده می باشد!)

بر حسب کلاس های مختلف ماشین ، هر چه شیار عمیق تر شود به سهم X'_{l2} افزوده می شود.

	$\frac{X_{l1}}{X_b}$	$\frac{X'_{l2}}{X_b}$
A و D	0.5	0.5
B	0.4	0.6
C	0.3	0.7

$$\Rightarrow X_{l1}, X'_{l2}$$

$$\Rightarrow X_m$$

$$\Rightarrow R'_2$$

در نتیجه تمام پارامترهای مدار معادل محاسبه می شوند .

تمرین : نتایج آزمایش روی یک موتور القایی با مشخصات زیر در دست می باشد.

$C - Class, 4P, 60Hz, 19A, 220v, 3ph, 7.5hp$

(ولتاژ خط و جریان خط داده شده اند)

بی باری: $380w, 5.7A, 219v$

روتور قفل شده: $675w, 18.57A, 26.5v$ (در فرکانس $15Hz$)

$$R_l = 0.262 \frac{\Omega}{phase}$$

مطلوبست محاسبه پارامترهای مدار معادل؟

نکته : آزمایش روتور قفل شده باید در فرکانس کمتری نسبت به فرکانس نامی انجام شود؛ زیرا در حالت عادی کارکرد موتور ($f_r = sf_s$) به دلیل کاهش s ، f_r خیلی کمتر از f_s است. بنابراین تمام اندازه گیری های شاخه روتور باید در این فرکانس انجام شوند (در حالت روتور ساکن $f_r = f_s$). برطبق قرارداد این آزمایش در

فرکانس $\frac{1}{4}$ نامی انجام می شود و X'_{l2} حاصل باید به فرکانس نامی تصحیح شود: $X = X_b \times \frac{f_{s-rated}}{f_b}$

کنترل سرعت موتور القایی:

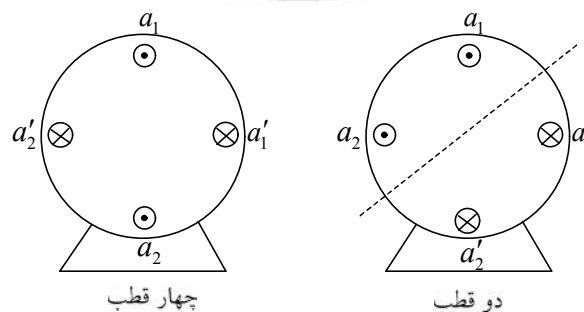
بر طبق تئوری میدان گردان الکترومغناطیسی، روش اصولی برای تغییر سرعت در ماشین، تغییر در سرعت میدان گردان است، که این کار بر طبق رابطه $n = \frac{120f_s}{P}$ با کمک تغییر فرکانس استاتور و یا تغییر تعداد قطب ها میسر است.

چون P عدد صحیح مضرب دو است بنابراین از طریق تغییر تعداد قطب ها فقط با این ضریب می توان سرعت را تغییر داد.

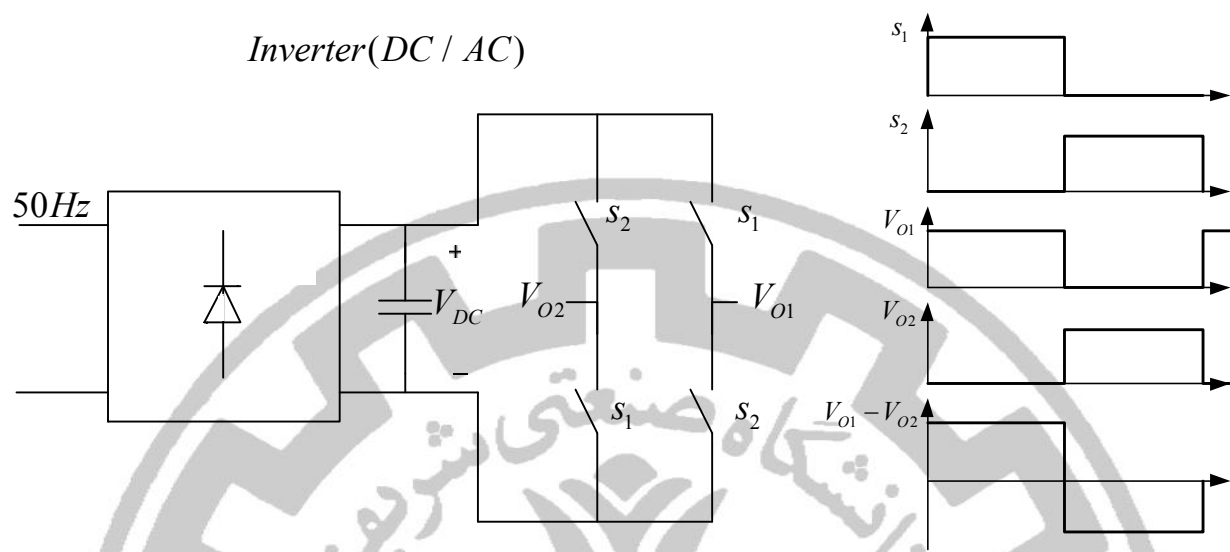
مثال : دور تند و کند موتور کولر آبی

از آنجا که عموم موتور ها مستقیماً به برق شهر وصل می شوند، بنابراین تغییر f_s ممکن نیست، در نتیجه تغییر P تنها گزینه ممکن است.

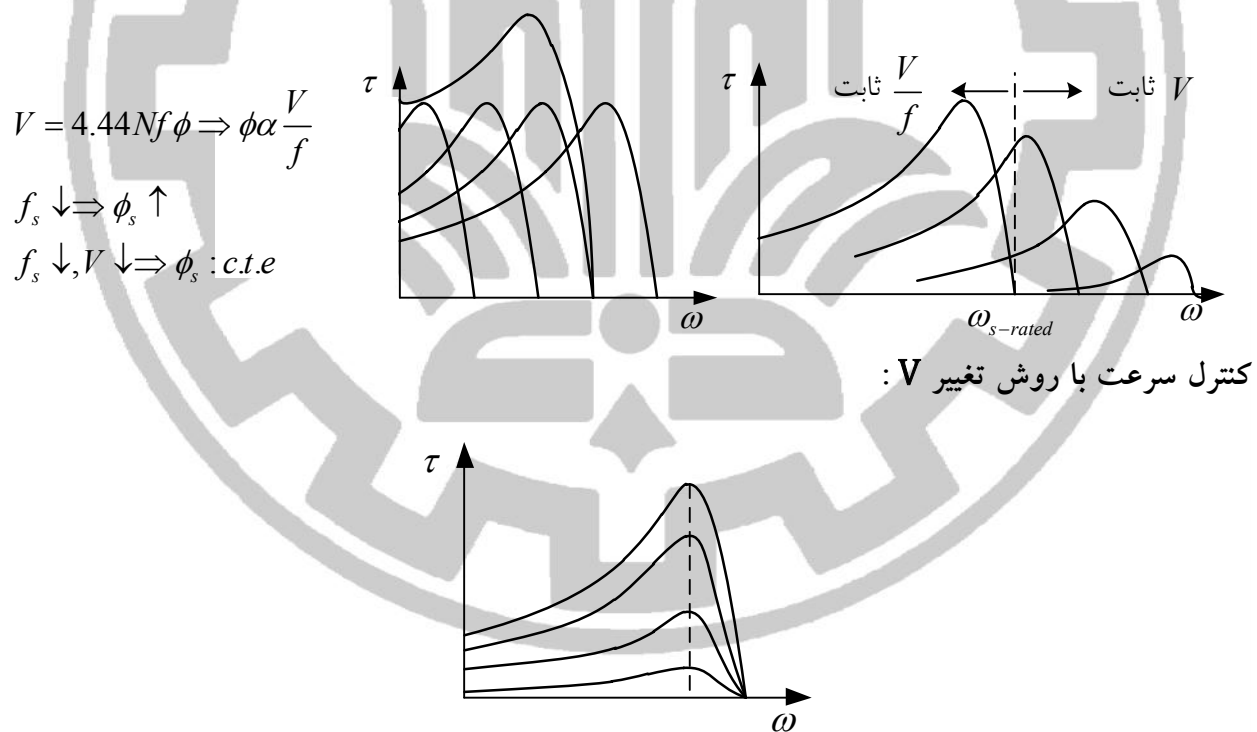
مثال:



امروزه با پیشرفت الکترونیک قدرت، روش تغییر فرکانس به روشهای الکترونیکی بسیار مورد استفاده قرار می گیرد.



اثر تغییر فرکانس روی رفتار و مشخصه موتور القایی:



راه اندازی موتور القایی:

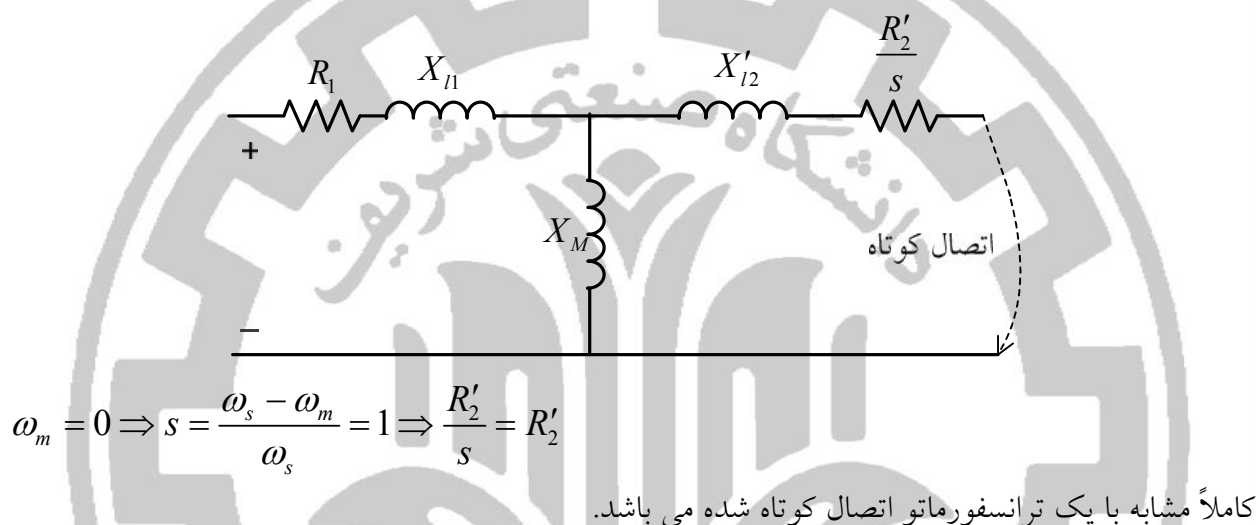
به دلیل اتصال کوتاه بودن روتور، در حالت سکون (در شروع به کار موتور)، جریان موتور که مانند یک ترانسفورماتور عمل می کند، زیاد بوده و این باعث بروز مشکلاتی می شود:

(1) مسائل حفاظتی

(2) تداخل الکترومغناطیسی روی محیط مجاور^۵

(3) تلفات

در حالت سکون:



راه اندازی ستاره - مثلث در استاتور:

در این روش موتور باید ویژگی Δ شدن را داشته باشد. بر طبق رابطه $V = 4.44NfBA$ به ازای چگالی شار اشباع باید ولتاژ خط نتیجه شود. در غیر این صورت با اعمال اتصال Δ به سیم پیچی فاز ماشین ولتاژ خط اعمال می شود و جریان ماشین به دلیل به اشباع رفتن بسیار افزایش می یابد و کلید حفاظتی را قطع می کند.

^۵ EMI