ساختمان موتورهای القایی سه فاز

① استاتور ← هسته + سیم پیچ ← به صورت کلافهایی از قبل آماده برای نصب داخل شیارهای استاتور

② روتور ← هسته + سیم پیچ (آرمیچر)

← استوانه‌ای ورق (لایه لایه) از جنس فولاد مغناطیسی + شیارهایی در سطح داخلی

← استوانه‌ای ورق با ضخامت ورقه‌های حدود 0.5 mm (در موتورهای بالاتر کمتر از 0.18 mm)

← میله‌های مسی یا آلومینیومی (در موتورهای کوچک) + حلقه‌های انتهایی

← روتور سیم پیچی شده: سیم پیچ آرمیچر به صورت توزیع شده و گسترده در داخل شیارهای هسته قرار می‌گیرد. این مجموعه سیم پیچ تکفاز و شش پایانه دارد که سه پایانه توسط کارخانه‌ی سازنده ماشین به هم متصل می‌شود و سه پایانه دیگر از ماشین خارج می‌شود و به سه حلقه لغزان (slip-rings) که روی محور روتور هستند، متصل می‌شود. سه جاروبک روی حلقه‌های لغزان سوارند.

الف

ب ← روتور قفس سنجابی: به جای کویل‌ها از میله‌های مسی یا آلومینیومی استفاده می‌شود که با دو حلقه انتهایی به یکدیگر اتصال کوتاه می‌شوند. (چون شبیه یک قفس سنجاب است) این نوع قفس سنجابی متداول‌تر است و ارزانتر و مستحکم‌تر هستند.

* هادی‌های روتور معمولاً مورب اند و موازی محور نیستند و محاسن این کار:

1- زبیل گشتاور را کاهش می‌دهد.
2- صدای هوم مغناطیسی کاهش می‌یابد و موتور نرم‌تر کار می‌کند.
3- میل قفل شدن روتور کمتر می‌شود: یعنی تمایل باقی ماندن اندازه‌های روتور در راستای اندازه‌های استاتور بر اثر جاذبه مغناطیسی مستقیم بین دو اندازه کاهش می‌یابد.

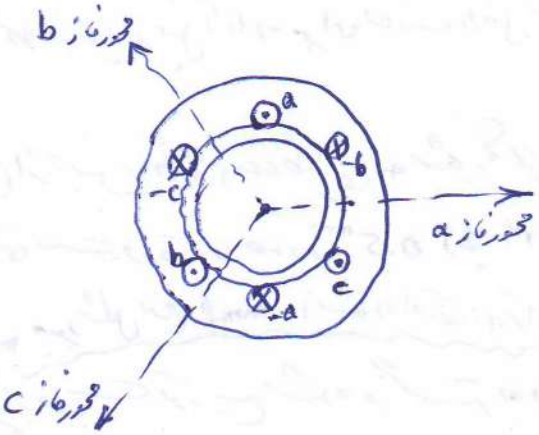
مورب بودن ← معایب

معایب مورب بودن

1- افزایش مقاومت روتور بر اثر افزایش طول میله‌ها
2- افزایش لغزش برای یک گشتاور مشخص

* اساس عملکرد موتور القایی مبتنی بر وجود میدان گردان است.

* در سیستم ۳ فاز با 120 درجه اختلاف فاز مکانی بین سه سیم پیچ و با هسته ایده آل:



برای یک سیم پیچ mmf دارای توزیع مکانی سینوسی (یا منحنی) است.

به صورت $F_\varphi = F_m \cos\theta$ نسبت به محور

هوای خارجی رشته، (یعنی مثلاً در صفر حداقل و در حداکثر و 90° عقب تر / جلوتر نسبت به آن حداکثر / حداقل است.)

بنابراین می توان نوشت:

$$\begin{cases} F_a = k\, i_a \cos\theta \\ F_b = k\, i_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ F_c = k\, i_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \qquad k = \frac{4}{\pi}\frac{N}{2g}$$

g فاصله هوایی
N تعداد دور

برای سیستم ۳ فاز نسبت به محور فاز a

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos\omega t \\ i_b = I_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c = I_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

$$F_{net} = F_a + F_b + F_c = k I_m \left[\cos\theta\cos\omega t + \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

$$F_{net} = \frac{3}{2} k I_m \cos(\theta - \omega t) \Longrightarrow$$

با حرکت زمانی، بردار فلوی (یک میدان) هم در طول فاصله هوایی (یا در محیط ماشین) جابجا می شود و اصطلاحاً می چرخد. (mmf برآیند بردار است با اندازه ثابت که با سرعت $\omega = 2\pi f$ می چرخد و به آن میدان گردان (دوار) گفته می شود.

* با توجه به دوار بودن میدان مغناطیسی برآیند در فاصله هوایی و سرعت نسبی آن نسبت به روتور و روتور که در آنها ولتاژ القا شده و با توجه به اتصال کوتاه بودن حلقه های روتور، جریان برای عبور جریان از مقاومت می شود و طبق قانون لورنتس $F = i(\vec{l} \times \vec{B})$ در این حلقه ها، گشتاور القا می شود (قانون فنر) و روتور شروع به حرکت می کند (با سرعت $\omega_m < \omega$)

(3)

* میدان ضربانی : اگر فقط یک فاز داشته باشیم، mmf حاصل از آن به صورت توزیع می شود

$$\begin{cases} F = k i \cos\theta \\ i = I_m \cos\omega t \end{cases} \Rightarrow F_{net} = k I_m \cos\omega t \cos\theta$$

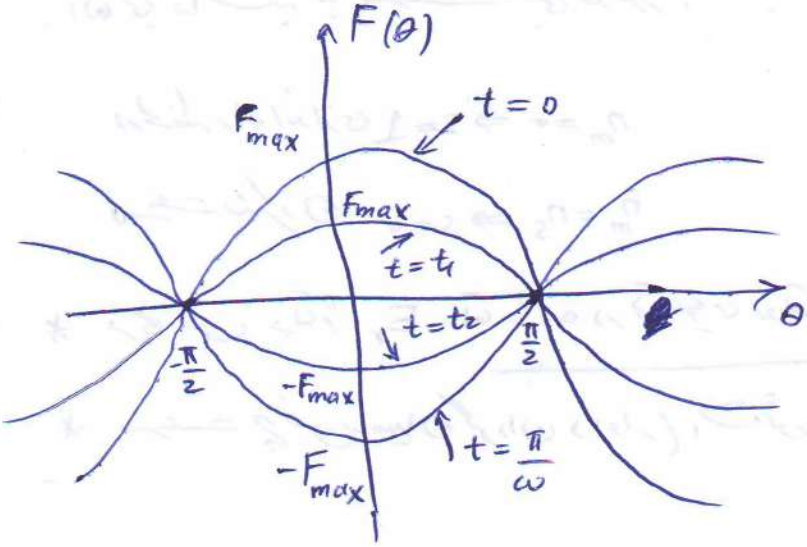
حال اگر توزیع این نیروی محرکه مغناطیسی mmf در فاصله هوایی برحسب θ رسم شود، داریم:

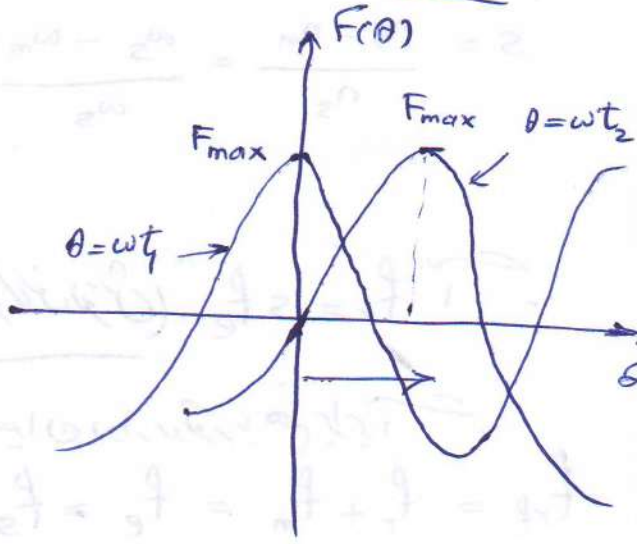
۱- دامنه mmf بسته به اندازه $\cos\omega t$ در هر لحظه ωt متغیر و تابعی از زمان است.

۲- با گذشت زمان، شکل موج مثبت، مکان حرکت نمی کند و ثابت است.

به این سیگنال که از لحاظ مکانی، ثابت ولی دامنه متغیر با زمان دارند، میدان ضربانی می گویند.

در میدان دوار، دامنه ثابت ولی مکان آن متغیر با سرعت ω است.





میدان ضربانی، پیک (دامنه) سر جای خود ثابت است ولی مقدار آن با زمان عوض می شود. ولی همیشه در مکان $\theta = 0$ قرار دارد.

F_{max}

$$F = k I_m \cos\omega t \cos\theta$$

$$t = 0 \Rightarrow F = \underbrace{k I_m}_{F_{max}} \cos\theta$$

$$t = t_1 \Rightarrow F = \underbrace{k I_m \cos\omega t_1}_{F_{max}} \cos\theta$$

$$t = t_2 \Rightarrow F = \underbrace{k I_m \cos\omega t_2}_{F_{max}} \cos\theta$$

$$t = \frac{\pi}{\omega} \Rightarrow F = \underbrace{k I_m \cos\pi}_{F_{max}} \cos\theta$$

میدان دوار، پیک (دامنه) با مکان حرکت می کند ولی مقدار آن در طول زمان ثابت است.

$F_{max} = \frac{3}{2} k I_m$ است.

$$F = \frac{3}{2} k I_m \cos(\theta - \omega t)$$

$$t = 0 \Rightarrow F = \frac{3}{2} k I_m \cos\theta$$

$$t = t_1 \Rightarrow F = \frac{3}{2} k I_m \cos(\theta - \underbrace{\omega t_1}_{\alpha_1})$$

$$t = t_2 \Rightarrow F = \frac{3}{2} k I_m \cos(\theta - \underbrace{\omega t_2}_{\alpha_2})$$

$$t = \frac{\pi}{\omega} \Rightarrow F = \frac{3}{2} k I_m \cos(\theta - \underbrace{\pi}_{\alpha_3})$$

تحلیل رفتار موتور القایی سه فاز

برای تحلیل هر سیستم فیزیکی، لازم است مدل ساده‌ای از آن سیستم موجود باشد.

* مدار معادل ماشین القایی در شرایط ماندگار و با استفاده از ایده مدار معادل ترانسفورماتور تشکیل می‌شود (به شرط تبدیل $\frac{N_s}{N_r} = \frac{E_s}{E_r}$) * روتور اتصال کوتاه است.

* از آنجایی که سرعت گردش روتور در موتورهای القایی با سرعت سنکرون مساوی نیست، این موتورها را موتورهای آسنکرون نیز می‌نامند. اگر روتور با سرعت n_m در جهت میدان دوار بچرخد، میدان دوار با سرعت $n_s - n_m$ سیم‌پیچی روتور را قطع می‌کند. بنابراین ولتاژ القا شده با سرعت نسبی بین میدان دوار و روتور بستگی دارد. کمیت لغزش در موتورهای القایی وابسته به سرعت نسبی مذکور است.

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$$

در لحظه راه اندازی $n_m = 0 \Rightarrow s = 1$

در سرعت سنکرون $n_m = n_s \Rightarrow s = 0$

* فرکانس ولتاژ E_r القا شده در سیم‌پیچی روتور (فرکانس لغزش) $f_r = s f_e$ است.

* سرعت چرخش میدان گردان (دوار) استاتور و میدان دوار روتور با هم برابر است.

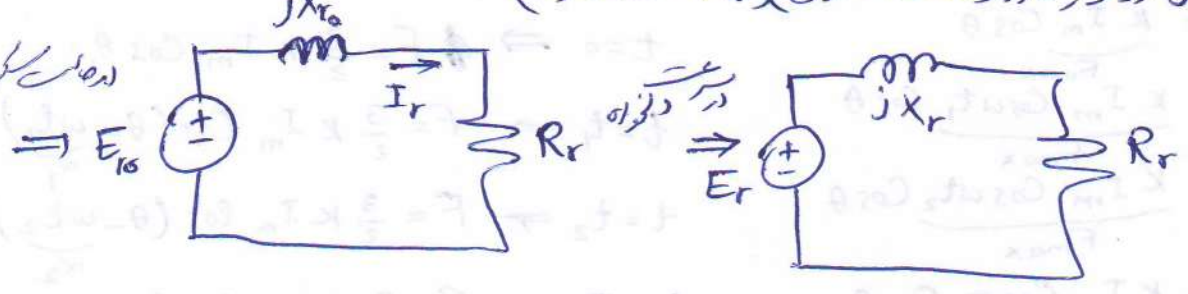
$$f_{rf} = f_r + f_m = f_e = f_s$$

* ولتاژ القا شده در روتور طی لغزش s نسبت به حالت سکون:

$$E_r|_s = 4.44 N_r f_r \varphi = 4.44 N_s f_e \varphi = s E_{r_0}$$

$$X_r|_s = s X_{r_0}$$

مدار معادل روتور: (در حالت سکون و در سرعت دلخواه)

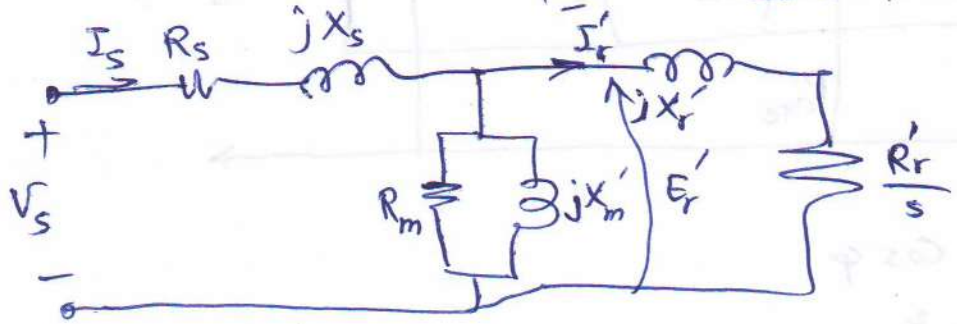


* برای بدست آوردن مدار معادل کلی موتور القایی با در نظر گرفتن تلفات های روتور و استاتور یک ن شوند، لذا داریم

$$E_r = R_r I_r + j X_r I_r$$

$$sE_{r_0} = R_r I_r + js X_{r_0} I_r \Rightarrow E_{r_0} = \frac{R_r}{s} I_r + j X_{r_0} I_r$$

سپس از انتقال پارامترهای روتور به سمت استاتور داریم:



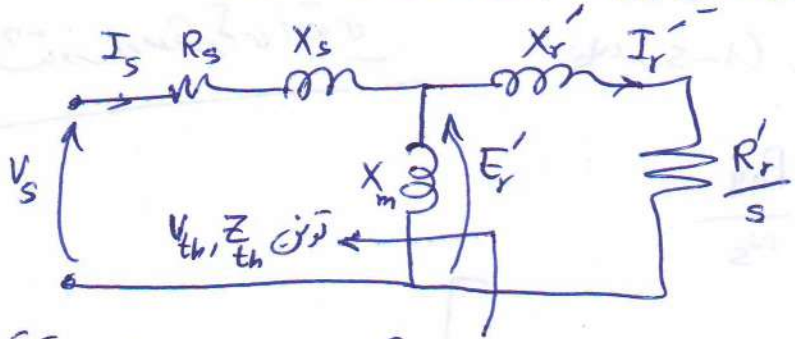
برای هر فاز در حالت ماندگار

با صرف نظر از تلفات هسته روتور (به دلیل آنکه موتورهای القایی معمولاً در لغزش‌های کوچک کار می‌کنند و مقداری در آنها کوچک است و فرکانس روتور ناچیز می‌شود، در نتیجه از تلفات هسته که متناسب با مجذور فرکانس است می‌توان صرف نظر کرد. هرچند که با افزایش سرعت موتور بر تلفات چرخشی و اصطکاک موتور افزوده می‌شود. اما مجموع این تلفات در سرعت‌های مختلف ثابت است که با آن تلفات چرخشی (P_{rot}) گفته می‌شود.

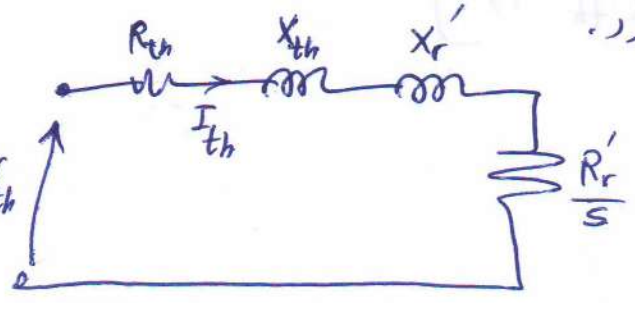
$$P_{rot} = P_{core} + P_{mec} + P_{stray} = cte$$

تلفات هسته — تلفات سرگردان — تلفات مکانیکی

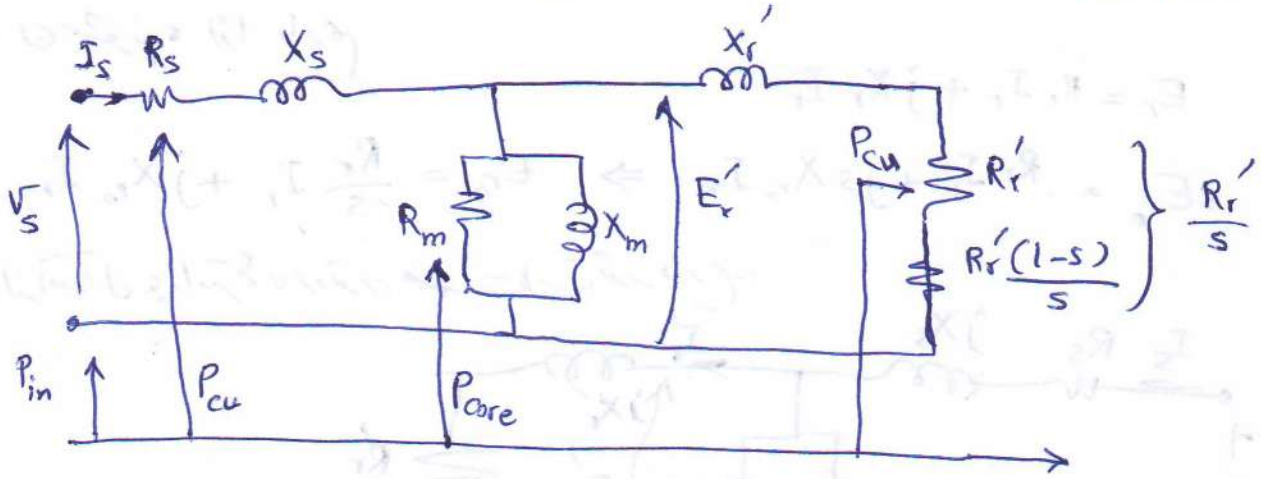
بر همین اساس، در مدار معادل پیشنهادی IEEE، مقاومت R_m از مدار حذف و اثر آن به عنوان بخشی از تلفات ماشین در محاسبات لحاظ می‌شود.



برای ساده سازی می‌توان در موتور، از مدار معادل تونن از دید X_m برای استاتور و مدل ساده شده نهایی استفاده می‌شود.



* معادلات توان و گشتاور در موتور القایی



توان ورودی $P_{in} = \sqrt{3}\, V_L\, I_L \cos\varphi$

تلفات مسی استاتور $P_{cus} = 3 R_s I_s^2$

تلفات مسی روتور $P_{cur} = 3 R_r I_r^2$

توان فاصله هوایی $P_{ag} = P_{in} - P_{cus} = 3\frac{R_r}{s} I_r^2$

توان مکانیکی $P_m = P_{ag} - P_{cur} = 3\frac{R_r}{s} I_r^2 - 3 R_r I_r^2 = (1-s) P_{ag}$

خروجی $P_{out} = P_m - P_{rot}$

~~$P_{out} = P_m - P_{rot} = P_m$~~

$P_{rot} = cte$

$$I_r = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + \left(X_{th} + X_r'\right)^2}}$$

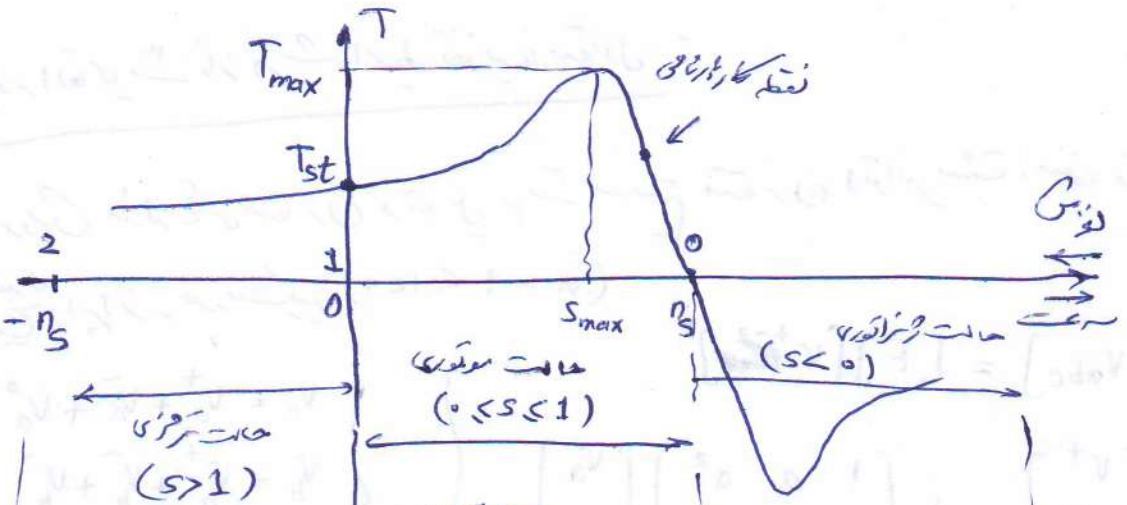
* گشتاور در موتور القایی

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad \& \quad \omega_r = (1-s)\omega_s$$

$$T_m = \frac{(1-s) P_{ag}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$$

$$T_m = \frac{3 R_r'}{s \omega_s} \left[\frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + \left(X_{th} + X_r'\right)^2} \right]$$

(7)



* روتور خلاف جهت میدان دوار است تقریبی چرخد.
* از این حالت برای توقف سریع روتور استفاده می شود.
* تغییر جهت چرخش میدان را می توان با جابجایی دو فاز استاتور انجام داد.

* روتور به دنبال میدان گردان استاتور کشیده می شود.
* روتور هم جهت با میدان دوار استاتور و با سرعت کمتر می چرخد.

* روتور هم جهت با میدان دوار است تقریبی با سرعت بیشتر می چرخد.
* بنابراین به محرک مکانیکی بیرونی برای افزایش سرعت روتور است.

* نقطه ای که در آن گشتاور ماکزیمم است، نقطه گشتاور ماکزیمم یا گشتاور شکست گفته می شود.
در این نقطه، منحنی گشتاور - سرعت به دو ناحیه کار پایدار و ناپایدار تقسیم می شود.
* در منحنی که شیب منحنی مثبت است سیستم ناپایدار است. (فیدبک مثبت)، زیرا به ازای سرعت بیشتر، گشتاور بیشتر می شود و به همین ترتیب سرعت افزایش می یابد تا خروج از حالت پایدار.
* در منحنی که شیب منحنی منفی است برعکس حالت قبل، سیستم پایدار است (فیدبک منفی).

$$s_{max} = \frac{R_r'}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_r')^2}} \quad , \quad T_{max} = \frac{3V_s^2}{\omega_s} \frac{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_r')^2}}{\left(R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_r')^2}\right) + (X_{th} + X_r')^2}$$

* مقدار T_{max} به R_r' بستگی ندارد ولی تغییری که در T_{max} رخ می دهد مستقیماً با R_r' متناسب است.

* نکته:

$$① \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{s_2}{s_1} \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2$$

(8) رفتار موتور القایی ۳ فاز در شرایط تغذیه نامتعادل :

با استفاده از روش مؤلفه های متقارن و تبدیل به ۳ سیستم متقارن (توالی مثبت، منفی و صفر)
به کمک ماتریس تبدیل وارد آنالیز موتور تحت عدم تقارن میشویم ($a = 1\angle 120$)

$$[V_{abc}] = [F][V^{+-0}]$$

$$\begin{bmatrix} V^+ \\ V^- \\ V^0 \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}}_{[F]^{-1}} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} V_a = V_a^+ + V_a^- + V_a^0 \\ V_b = V_b^+ + V_b^- + V_b^0 \\ V_c = V_c^+ + V_c^- + V_c^0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} |V_a^+| = |V_b^+| = |V_c^+| = V^+ \\ |V_a^-| = |V_b^-| = |V_c^-| = V^- \end{cases}$$

اگر بجای فاز a بر فازی شود:

$$\begin{cases} V_a = V_a^+ + V_a^- + V_a^0 \\ V_b = a^2 V_a^+ + a V_a^- + V_a^0 \\ V_c = a V_a^+ + a^2 V_a^- + V_a^0 \end{cases}$$

اکنون موتور را با استفاده از هر کدام از ولتاژهای توالی مثبت، منفی و صفر جداگانه تحلیل می کنیم.

* مؤلفه توالی صفر نمی تواند میدان دوار تولید کند فقط می تواند تولید یک میدان جریانی می کند. لذا فقط دو مؤلفه مثبت و منفی لحاظ

$$F^0 = K I_m \cos 3\theta \cos 3\omega t \quad \text{(جریانی)}$$

و مؤلفه صفر در تولید گشتاور برآیند مؤثر نیست.

---

* در تغذیه سه سیم را می توان با دو مؤلفه توالی مثبت و توالی منفی به صورت زیر بیان کرد:

برای هر فاز:

$f \rightarrow$ Foreward

$b \rightarrow$ backward

فاز a

$$\begin{cases} V_{af} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\ V_{ab} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_a = V_{af} + V_{ab} \\ I_a = I_{af} + I_{ab} \end{cases}$$

نکته: مقدار لغزش برای مؤلفه توالی مثبت s_f و لغزش برای مؤلفه توالی منفی s_b متفاوت است و داریم:

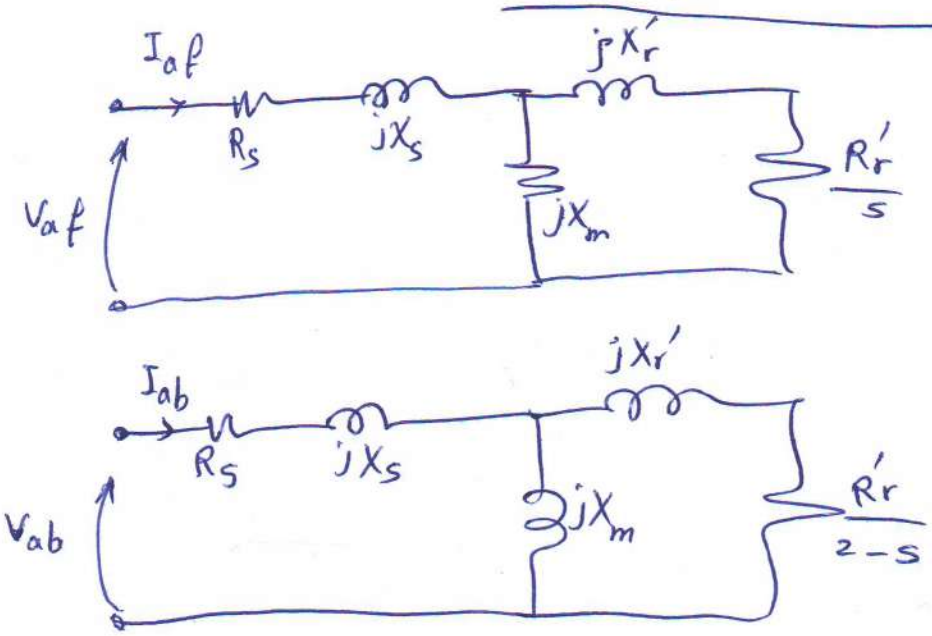
$$s_b = \frac{-n_s - n_m}{-n_s} = \frac{n_s + n_m}{n_s} = \frac{2n_s - (n_s - n_m)}{n_s}$$

$$\boxed{s_b = 2 - s} \quad \& \quad \boxed{s_f = s}$$

* مقدار گشتاور هم برای دو مدل forward و backward از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T = T_f + T_b = \frac{3R'_r (I'_{rf})^2}{s\omega_s} + \frac{3R'_r (I'_{rb})^2}{(2-s)(-\omega_s)}$$

* مدار معادل موتور القایی ۳ فاز در شرایط نامتعادل:



میزان نامتعادل ولتاژ:

$$V_{unb} = \frac{V_{ab}}{V_{af}}$$

$$V_{imbalance} = \frac{V_{max} - V_{min}}{\frac{(V_a + V_b + V_c)}{3}}$$

ΔV_{max}

V_{ave}

* عدم تعادل ولتاژ تولید نوسان، ذکاش $2f_e$ می‌کند که باعث افزایش حرارت می‌شود. (یعنی میدان جدیدی که با سرعت n_s - می‌چرخد ایجاد می‌کند و میدان برآیند، سرعت $2n_s$ خواهد چرخید و تعادل ذکاش حول $2f_e$ می‌باشد.)