جزوه درس

ماشین مخصوص

استاد هاشم نیا

گردآورندگان:

محمد نصیری-مهدی جان نثار

اگر تغذیه متعادل m فاز ($m > 1$) به استاتور ماشین متعادل m فاز وارد شود میدان دوار در فاصله

هوایی شکل خواهد گرفت که اندازه آن ثابت است و با سرعت ثابت و مشخصی به نام سرعت سنکرون

می چرخد $\omega_s = \frac{120f}{P}$ rpm

بنابراین در ماشین های چندفاز حرکت میدان نسبت به سیم (هادی) به راحتی محقق می شود و وجود حرکت

میدان نسبت به سیم، لازمه چرخش روتور است (ولتاژ القا شده در روتور ولتاژ سرعتی است)

تغذیه متعادل:

$$\begin{cases} i_a(t) = I_m \sin \omega t \\ i_b(t) = I_m \sin(\omega t - 120) \\ i_c(t) = I_m \sin(\omega t - 240) = I_m \sin(\omega t + 120) \end{cases}$$

$$mmf(a) = F_a(t, \theta) = F_m \sin \omega t \cos \theta$$

$$F_a(t, \theta) = F_m \sin \omega t \cos \theta = \frac{1}{2} F_m [\sin(\omega t + \theta) + \sin(\omega t - \theta)]$$

$$F_b(t, \theta) = F_m \sin(\omega t - 120) \cos(\theta - 120) = \frac{1}{2} F_m [\sin(\omega t + \theta + 120) + \sin(\omega t - \theta)]$$

$$F_c(t, \theta) = F_m \sin(\omega t + 120) \cos(\theta + 120) = \frac{1}{2} F_m [\sin(\omega t + \theta - 120) + \sin(\omega t - \theta)]$$

$$F_{total}(t, \theta) = F_a + F_b + F_c = \frac{3}{2} F_m \sin(\omega t - \theta)$$

m

برای ۵ فاز:

$$F_a(t, \theta) = F_m \sin \omega t \cos \theta$$

$$F_b(t, \theta) = F_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{5}) \cos(\theta - \frac{2\pi}{5})$$

$$F_c(t, \theta) = F_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{5}) \cos(\theta - \frac{4\pi}{5})$$

$$F_a(t,\theta) = F_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{6}) \cos(\theta - \frac{4\pi}{6})$$
$$F_c(t,\theta) = F_m \sin(\omega t - \frac{8\pi}{6}) \cos(\theta - \frac{8\pi}{6})$$

$$F_{total} = \frac{3}{2} F_m \sin(\omega t - \theta)$$

اگر $m=2$ ، اختلاف فاز مکانی را ابتدا 180° فرض می‌کنیم.

$$F_a(t,\theta) = F_m \sin\omega t \cos\theta$$

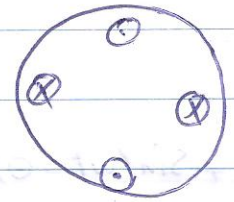
$$F_b(t,\theta) = F_m \underbrace{\sin(\omega t - 180)}_{-\sin\omega t} \underbrace{\cos(\theta - 180)}_{-\cos\theta}$$

$$F_{total} = 2F_m \sin\omega t \cos\theta \longrightarrow$$

اصلاً میدان دوار نیست

چون میدان دوار $(\omega t - \theta)$ دارد.
$(\omega t + \theta)$

در ماشین دو فاز مرسوم است اختلاف فاز زمانی و مکانی 90° ، 180° است.



$$F_a(t,\theta) = F_m \sin\omega t \cos\theta$$

$$F_b(t,\theta) = F_m \underbrace{\sin(\omega t - 90)}_{-\cos\omega t} \underbrace{\cos(\theta - 90)}_{\sin\theta}$$

$$F_{total} = F_m [\sin\omega t \cos\theta - \cos\omega t \sin\theta]$$

$$F_{total} = F_m \sin(\omega t - \theta)$$

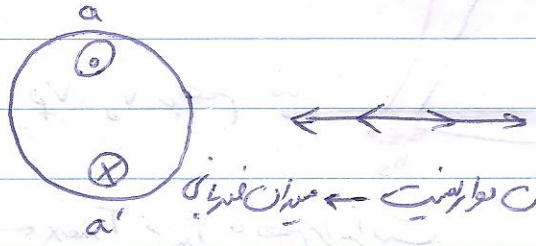
برای اینکه میدان دوار برای تک فاز کن را به دو فاز تبدیل کرده و بعد از راه‌اندازی یکی از فازها را برمی‌داریم.

ماشین القایی تک‌فاز: تحلیل عملکرد در هنگام راه‌اندازی / در حوالی سرعت سنکرون

$$F_{net} = F_a(t,\theta) = F_m \sin\omega t \cos\theta \quad ; (\omega_r = 0 \;/\; s=1)$$

$$= \tfrac{1}{2} F_m [\sin(\omega t + \theta) + \sin(\omega t - \theta)]$$

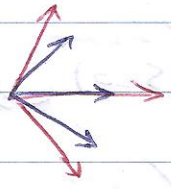
میدان پیشرو — میدان پسرو



$m=1$:
- راستا ثابت (میدان)
- دامنه میدان ثابت نیست ⇐ میدان نوسانی ← میدان پسرو

$m>1$:
- دامنه میدان ثابت ⇐ میدان دوار
- راستای میدان ثابت نیست

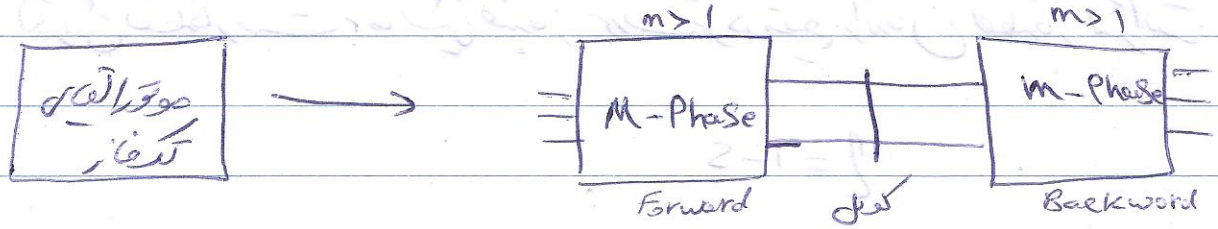
* میدان نوسانی را می‌توان به صورت برهم‌نهی دو میدان دوار یکی پیشرو و دیگری پسرو در نظر گرفت.



در ماشین القایی تک‌فاز، جفت‌راه‌انداز خود $T_{start} = 0$ است.

بنابراین موتور القایی تک‌فاز خود راه‌انداز نیست.

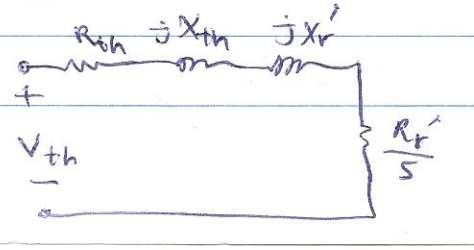
تخمینی از مشخصه موتور القایی تک‌فاز: (امتحانی)



سرعت‌ها با هم برابر، گشتاورها با هم جمع شوند.

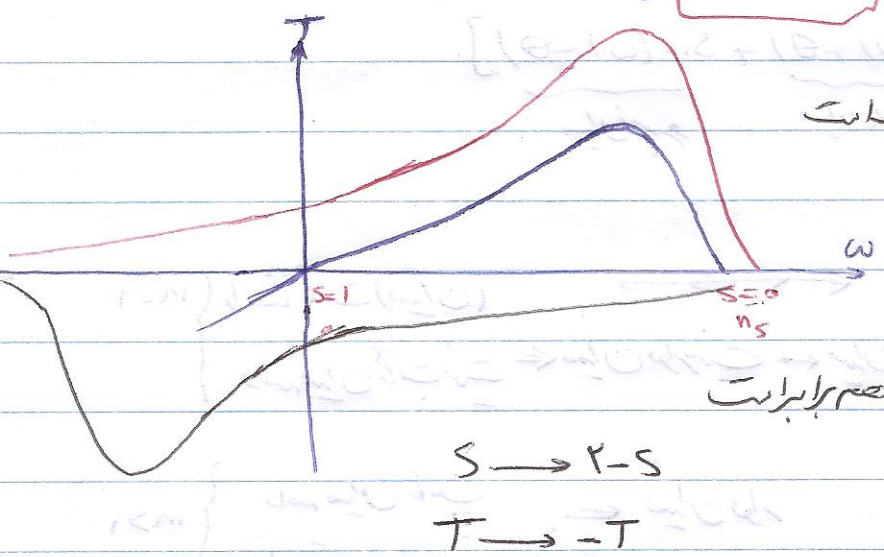
$$\Rightarrow T = \frac{P_{mech}}{\omega_{rot}} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s}\frac{R_r'}{s} I_r'^2$$

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



$$S_f = S^+ = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad , \quad S_b = S^- = \frac{-\omega_s - \omega_r}{-\omega_s} = 1 + \frac{\omega_r}{\omega_s} = 1 + 1 - S^+$$

$$\Rightarrow \boxed{S^- = 2 - S^+}$$



$T \propto V_{th}^2$

* گشتاور با حضور مقاومت آن متناسب است

فرض کردیم که V_f و V_b با هم

برابرند $\Leftarrow$ T_{max} و T_{min} با هم برابرند

$S \longrightarrow 2 - S$

$T \longrightarrow -T$

نتایج: ① در $S=1$ گشتاور صفر است $\Leftarrow$ گشتاور راه اندازه ندارد.

② در سرعت سنکرون ($S=0$) گشتاور متقابلاً صفر

③ در سرعت کمتر از سرعت سنکرون گشتاور صفر است.

④ متضاد است با ماشین القایی ضعیف متاثر، نازل تر است

⑤ تقریباً نقطه کار نسبت به ماشین ضعیف بزرگتر در نتیجه راندمان نقطه کار کمتر است.

$$\eta = 1 - S$$

تکفاز: در توان های زیر یک اسب بخار معمولاً از موتورهای تکفاز استفاده می شود

$\Leftarrow$ راندمان کمتر، کاربرد خانگی

سه فاز : در توان های بالاتر از موتورهای خنثی فاز استفاده می‌شود ← راندمان بالاتر ← کاربرد صنعتی

توان لحظه‌ای در تک فاز متغیر با زمان است ولی توان لحظه‌ای در سه فاز ثابت است چرا؟

خنثی فاز : $V_a = V_m \sin \omega t$ $\quad i_a = I_m \sin(\omega t + \varphi)$

$V_b = V_m \sin(\omega t - 120)$ $\quad i_b = I_m \sin(\omega t - 120 + \varphi)$

$V_c = V_m \sin(\omega t + 120)$ $\quad i_c = I_m \sin(\omega t + 120 + \varphi)$

$$P(t) = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c = \frac{3}{2} V_m I_m \cos\varphi$$

در سیستم خنثی فاز نوسانات توان مکانیکی نداریم.

تک فاز : $V_a = V_m \sin \omega t$ $\quad i_a = I_m \sin(\omega t + \varphi)$

$$P(t) = V_a I_a = V_m I_m \sin\omega t \sin(\omega t + \varphi) = \frac{V_m I_m}{2}\left[\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)\right]$$

گشتاور موتور القایی سه فاز تابع زمان نیست اما در تک فاز گشتاور حول مقدار متوسط خود نوسان می‌کند ← فرکانس $2f_e$ ← نوسانات $P(t)$ و نیز T_e

در سه فاز

میدان‌های ثابت ← جریان متغیر ← القای ولتاژ در روتور (سرعتی) ← میدان دوار استاتور

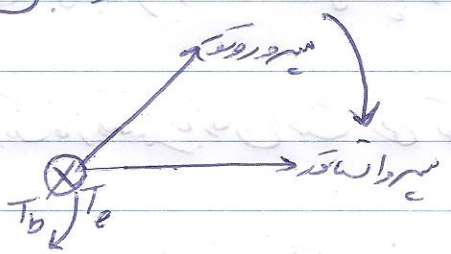
گشتاور ← برهم‌کنش میدان‌ها

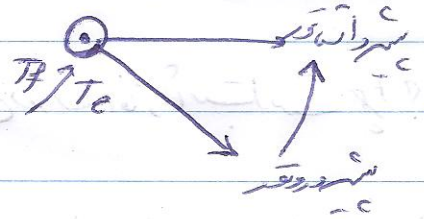
$N_m I_m \cos\omega t \cos\theta = \frac{1}{2} N_m I_m [\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta)]$

سرعتی ← سرعتی ← در تک فاز میدان فقط نوسانی است.

توان تک فاز ورودی به موتور القایی تک فاز دارای نوسان است با فرکانس $2f_e$.

www.naserhashemnia.blogfa.com

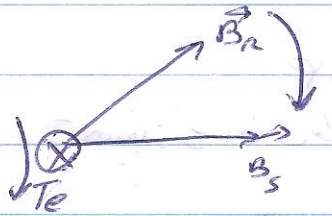




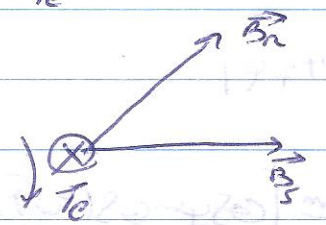
$$T = K \vec{B}_R \times \vec{B}_{net}$$

$$\vec{B}_{net} = \vec{B}_R + \vec{B}_S$$

$$T = K \vec{B}_R \times \vec{B}_S$$



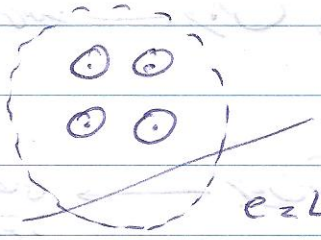
در حالت موتوری میدان استاتور از میدان روتور جلوتر است



در حالت ژنراتوری میدان موتور از میدان استاتور جلوتر است.

انواع ولتاژ القایی: ۱- ولتاژ ترانسفورماتوری: ولتاژی که ناشی از شار عبوری در سیم پیچ القا می‌شود و حرکتی وجود ندارد

۲- ولتاژ سرعتی: ولتاژی که القا شده، ناشی از حرکت سیم در میدان است



سرعت نسبی سیم به میدان

$e = LVB$

$$e = \frac{d\lambda}{dt}$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \\ \lambda_2 = L_{21} i_2 + L_{22} i_2 \end{cases}$$

$$e_1 = \underbrace{L_{11}\frac{di_1}{dt} + L_{12}\frac{di_2}{dt}}_{\text{ولتاژ ترانسفورماتوری}} + \underbrace{i_1\frac{dL_{11}}{dt} + i_2\frac{dL_{12}}{dt}}_{\text{ولتاژ سرعتی}}$$

ولتاژ القا شده در موتور القایی تک فاز در شرایط (ω_r ، $S=1$):

همانطور که گفته شد موتور تک فاز خواهد بود که اندیس آن استاتور و ثانویه آن روتور باشد بنابراین ولتاژ القایی در روتور خواهیم داشت که از نوع ولتاژ ترانسفورمری است. چون موتور تک فاز قفس سنجابی است پس شبیه ترانسفورمری عمل می‌کند که ثانویه آن اتصال کوتاه شده است.

بررسی ولتاژ القا شده در روتور:

حالت اول: تحلیل ماشین القایی سه فاز:

$B_S = B_{max}\cos(\omega t - \theta_e)$

نسبت به مرجع استاتور

میدان در سه فاز میدان مقاوم است

$(\omega t - \theta)$

$(\omega t + \theta)$

زاویه موقعیت روتور + زاویه میدان نسبت به استاتور = زاویه میدان نسبت به روتور

$$\theta = \theta_1 + \omega_r t$$

میدان از دید روتور: $B_R = B_{max}\cos(\omega t - \omega_r t - \theta_1)$

$$\phi = \int \vec{B_R}\, ds = \int_0^{\pi} B_{max}\cos(\omega - \omega_r t + \theta_1)(lr)\, d\theta_1 =$$

$$= -B_{max}(lr)\sin((\omega - \omega_r)t - \theta_1)\Big]_0^{\pi} = 2B_{max}(lr)\sin(\omega - \omega_r)t$$

$$e = \frac{d\phi}{dt} = 2B_{max}(lr)(\omega - \omega_r)\cos(\omega - \omega_r)t$$

ولتاژ القایی ← از نوع ولتاژ ترانسفورمری است

برای حلقه‌های تشکیل روتور $\Rightarrow \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = 2B_{max}lr\cos(\omega - \omega_r)t$

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = -2B_{max}\, lr\,(\omega - \omega_r)\sin(\omega - \omega_r)t$$

دامنه ها هم برابرند ولی فازها با هم متفاوت است

بررسی ولتاژ القا شده در موتور القایی تک فاز: میدان در تک فاز میدان قرار نیست

$$B_s = B_{max}\cos\omega t\cos\theta$$

$$B_R = B_{max}\cos\omega t\cos(\theta_1 + \omega_r t)$$

$$\Phi = \int B_R \cdot ds = \int B_{max}\cos\omega t\cos(\omega_r t + \theta_1)(lr)\,d\theta_1$$

$$\Phi = -B_{max}(lr)\cos\omega t\sin(\omega_r t + \theta_1)\Big]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}$$

$$\Phi = 2B_{max}(lr)\cos\omega t\cos\omega_r t$$

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = 2B_{max}(lr)\left[\omega\sin\omega t\cos\omega_r t - \omega_r\cos\omega t\sin\omega_r t\right]$$

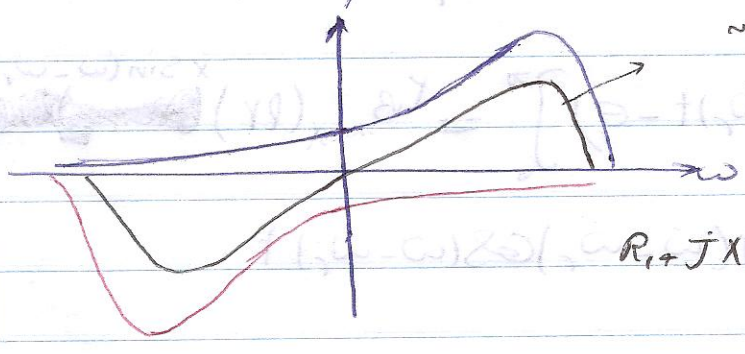
$$\Rightarrow \omega_r = 0 \Rightarrow e = -2B_{max}(lr)\,\omega\sin\omega t$$

* از دیدگاه فاز هم برابرند ولی از دیدگاه دامنه یکسان نیست

$\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}}$

← این ولتاژ از نوع ولتاژ تراکنشوری است چون ولتاژی که می بیند دارای فاز یکسان

ولی دامنه آن یکسان نیست.



شیفته تک فاز

$T \propto V^2$

با صرف نظر کردن از امپدانس نشتی استاتور $R_1 + jX_1$

$$V = E = jX_m I_m$$

معلوم میدان مغناطیسی برآیند

$T \propto$ (دامنه میدان برآیند)^2

فقط در $\omega = \omega_s$ شیفته درست است چون روتور ساکن است و میدان برآیند فوق دارد دیگر در راستای هم نمی بینند.

آیا روتور وقتی هیچ میدان‌های خود و یک وارد را نمی‌بیند؟ نه وقتی که روتور ساکن باشد

مثل هم میبینند ← یکی با سرعت ω_s + دیگری با سرعت ω_s - بنابراین هر چیزی که برای میدان

خود وارد روتور اتفاق می‌افتد برای میدان یک وارد روتور اتفاق می‌افتد

اگر سرعت ω_r کمتر شود یعنی sf_e باشد در این صورت مؤلفه‌ی جریان روتور ناشی از میدان

خود وارد است روتور با فرکانس sf_e خواهد داشت (s را اگر علامت نگذاشتیم منظور s خود وارد است)

نکته: $\omega_r = 0$ دو تا معنی دارد. ← روتور قفل شده ← تا زمانی که روتور قفل باشد آن را می‌بینیم

← شروع راه اندازی ← گذرا است

مؤلفه‌ی جریان روتور ناشی از میدان یک وارد است روتور با فرکانس $(2-s)f_e$ خواهد داشت.

همواره در ماشین‌های القایی سرعت میدان است که روتور با هم برابرند. فقط سرعت روتور

با است که برابر باشد اما سرعت دو تا میدان با هم برابرند $T = K \vec{B}_R \times \vec{B}_{net}$

$T = K \vec{B}_R \times \vec{B}_S$

به این خاطر که نشان دهد ثابت با سرعت دو تا میدان با هم برابر است

* سرعت میدان‌ها در حالت ماندگار با هم برابر است.

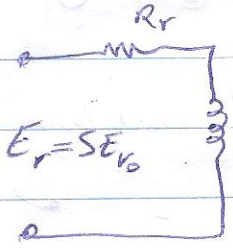
سرعت میدان خود وارد روتور برابر با سرعت میدان خود وارد استاتور خواهد بود

سرعت میدان یک وارد روتور برابر با سرعت میدان یک وارد استاتور خواهد بود. این سرعت

است که مؤلفه‌ی جریان‌های روتور فرکانس عوض نمی‌کند اما میدان‌هایی که این جریان‌ها تولید

می‌باشد سرعتش عوض شده است. اما می‌تواند دامنه میدان‌ها عوض شده باشد.

سؤال: دامنه میدان‌های روتور (یکواردی‌فوروارد) چگونه تغییر می‌کند؟



$$I_r = \frac{E_r}{jsX_{r0} + R_r} \Rightarrow I_r = \frac{E_{r0}}{jX_{r0} + \frac{R_r}{s}}$$

اگر s را کوچکتر از یک شود.

$\uparrow \frac{R_r}{s} \Leftarrow I_r \downarrow \Leftarrow$ جریان روتور کاهش می‌یابد $\Leftarrow$ میدان فوروارد روتور کاهش می‌یابد

طبق قانون لنز میدان روتور میدان عکس‌العمل از میدان استاتور است بنابراین این دو با هم مخالفت می‌کنند. $\Leftarrow$ پس میدان برآیند فوروارد افزایش می‌یابد.

میدان فوروارد استاتور ثابت است چون روتور میدان فوروارد شن کاهش یافته و میدان استاتور و روتور با هم مخالفت هستند بنابراین میدان برآیند فوروارد افزایش یافته.

اگر s را کوچک کنیم از یک

$$I_r = \frac{E_{r0}}{jX_{r0} + \frac{R_r}{2-s}}$$

$\updownarrow \frac{R_r}{2-s} \Leftarrow \uparrow I_r \Leftarrow$ مؤلفه جریان روتور ناشی از بک‌وارد افزایش می‌یابد

$\Leftarrow$ میدان برآیند بک‌وارد کاهش یافته.

فقط در $s=0$ یا سنکرون ($\omega - T$) درست است. چون چرخشی نداریم و روتور میدان فوروارد و بک‌وارد را مثل هم می‌بیند.

نتیجه: تنها در شرایطی می‌توان میدان‌ها را دامنه‌شان را با هم برابر فرض کرد که $s=0$ یا سنکرون باشد

اگر $\alpha_r = 0$ شیار شود میدان فورواردِ از میدان بک وارد بیشتر می‌شود. که این پدیده ضایب

دمپینگ است. (طبیعت ماشین) منجر به این می‌شود که مشخصه $(T-\omega)$ فورواردِ بالاتر

برود. بنابراین تفاضلش بیشتر می‌شود.

* دامنه میدان‌ها را فقط در $\alpha_r = 0$ برابر گرفتیم.

* این که میگفتیم دامنه میدان‌ها، دامنه میدان‌هایی برآیند است میدان‌هایی است که همواره دامنه

میدان فورواردِ و بک وارد برابر است چون در استاتور همواره یک جریان داریم!

$$I = I_m \cos\omega t$$

$$mmf = N_m I_m \cos\omega t \cos\theta = \frac{1}{2} N_m I_m \left[\underbrace{\cos(\omega t + \theta)}_{\text{سیرو}} + \underbrace{\cos(\omega t - \theta)}_{\text{پیشرو}}\right]$$

تک هر شیار اعلی می‌توان همواره میدان استاتور تبدیل می‌شود ۲ موتا میدان فورواردِ و بک وارد

با دامنه‌های برابر. این میدان‌هایی که می‌توانند دامنه‌شان برابر نباشند برآیند میدان‌های فورواردِ

و بک وارد است. عکس العمل میدان روتور منجر به این می‌شود که میدان فورواردِ برآیند بر میدان

بک وارد برآیند غلبه کند. و این پدیده مطلوبی است به این دلیل که منجر به این می‌شود که لغزش در حالت

بیشتر از این چیزی است که از این مشخصه $(T-\omega)$ پیش‌بینی شده است.

* اگر سرعت فان از صفر افزایش پیدا کرد این میدان غالب این میدانی است که فورواردِ است

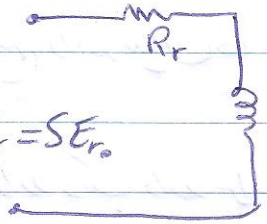
(همین میدان مطلوب). اگر سرعت فان برسد به سرعت سنکرون $(S=0)$ بیشترین میدان

میدان فوق دارد بر میدان یک وارد عمل می‌کند (مقدار کمی صرف می‌شود ← میدان کم دارد)

* مشخصه که بدست آورده‌ایم مشخصه تقریبی نیست.

* برای بدست آوردن مشخصه دقیق باید مدل سازی کنیم به صورت یک مدار معادل.

یادآوری: از ماشین آلات سه فاز * بحث مفهومی *



هدف از مدل سازی ارجاع یکی از روتور یا استاتور

یا از استاتور به روتور. معمول است ارجاع می‌دهیم از روتور به استاتور $\omega_r = (1-s)\omega_s$

به این دلیل که استاتور ساکن است. علاوه تغذیه هم با استاتور متصل است. مدار واقعی روتور

و فرکانس $f_r = sf_e$

$$X_r = L_r\omega_r = 2\pi L_r f_r = 2\pi L_r s f_e = sX_{r_0}$$

ماشین بحث مستقیم دارد با s. چون هرچه سرعت نسبی روتور و میدان بیشتر شود ولتاژی که در روتور القا می‌شود (هرچه سرعت نسبی بیشتر یا فرکانس بیشتر و هم ولتاژ بیشتر می‌شود)

باید دو تا تبدیل انجام بدهیم. باید بر s تقسیم کنیم چرا؟

* از دیدگاه مفهومی هدف مدل سازی از دیدگاه استاتور است. بنابراین از روتور تغییری دهیم به گونه‌ای که از استاتور متوجه این تغییر نشود این تبدیل صحیح است.

روتوری که با سرعت Sf_e است تبدیل می‌کنیم به روتوری با این مشخصات:

روتور ساکن با فرکانس f_e: ادعا می‌کنیم که اگر این کار را انجام دهیم یعنی هم فرکانس و هم سرعت

هر دو را تغییر دهیم به این صورت سرعت میدان روتور تغییری نمی‌کند نسبت به هر ناظری. چرا؟

چون در حالت اول $f_r = Sf_e$ $\quad$ سرعت میدان روتور نسبت به روتور $= \frac{120 f_r}{P} = \frac{120 S f_e}{P} = S\omega_s$

سرعت میدان روتور نسبت به استاتور $=$ سرعت میدان روتور نسبت به روتور $+$ سرعت روتور نسبت به استاتور

$$= (1-S)\omega_s + S\omega_s = \omega_s$$

آنچه که استاتور می‌بیند از روتور، از میدان روتور است. بنابراین باید میدان روتور تغییری نکند

تا سرعت میدان روتور تغییری نکند.

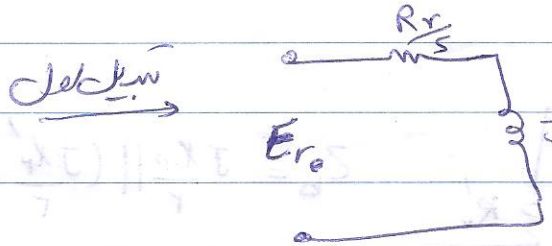
I_r

روش دوم: دامنه میدان روتور هم باید تغییر کند. باید فرکانس آن به جای Sf_e شود f_e بنابراین

آمپر آن تقسیم بر S شود. میدان روتور وابسته به جریان روتور است. بنابراین برای اینکه جریان

روتور دچار تغییر نشود مقاومت را تقسیم بر S می‌کنیم و لذا X را تقسیم بر S می‌کنیم. بنابراین جریان

تغییری نمی‌کند در نتیجه دامنه میدان تغییری نمی‌کند.

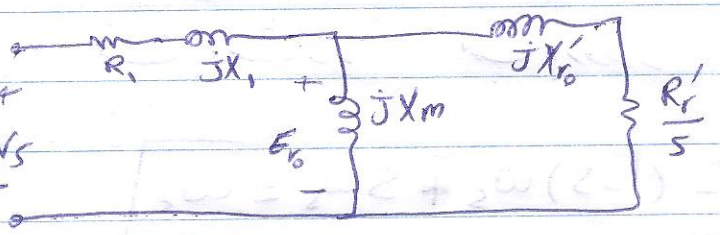


تبدیل دوم: موتوری که ساکن است و تعداد دور N_r دارد باید به جای داده شود به استاتور ساکن با N_s دور.

$$N_r \longrightarrow N_s$$

$$I_r \longrightarrow I_r' = \frac{N_r}{N_s} I_r$$

* این در تبدیل دوم ← دامنه میدان روتور تغییر نکرده، سرعتش هم (میدان روتور) تغییر نکرد چون نه زاویه تغییر کرده نه سرعت خود روتور تغییر کرده. بنابراین می‌توانیم روتور را به دنبال استاتور رسم کرد.



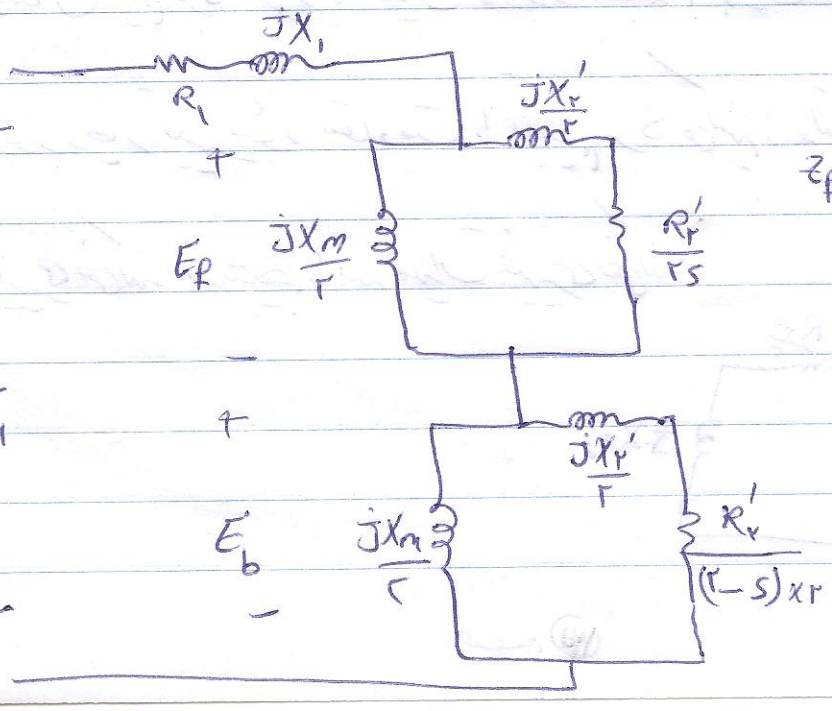
$$R'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 R_r$$

$$X'_{r_0} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 X_{r_0}$$

$$E'_{r_0} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right) E_{r_0}$$

* مدار معادل موتور القایی تک فازه: در اینجا دو سرعت داریم یکی پله و یکی s و دو المانی که s، $1-s$ دارند باید استثنا داشته باشیم نه $\frac{R'_r}{s}$ ، $\frac{R'_r}{1-s}$ باشد.

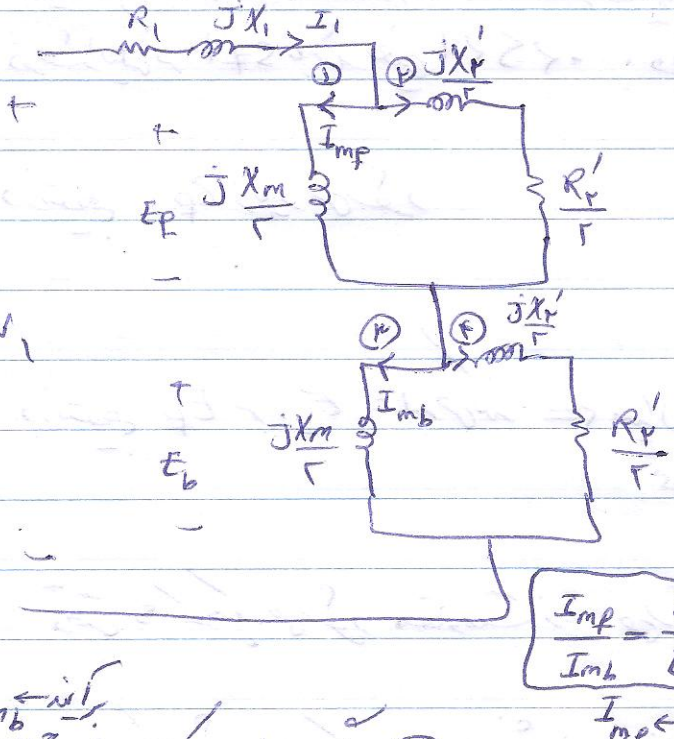
مدار معادل:



$$Z_f = j\frac{X_m}{2} \parallel \left(j\frac{X'_r}{2} + \frac{R'_r}{2s}\right)$$

$$Z_b = j\frac{X_m}{2} \parallel \left(j\frac{X'_r}{2} + \frac{R'_r}{2(2-s)}\right)$$

این مدار معادل در کلیه لحظه‌ها معتبر است.



اگر $s=1$ باشد. $Z_f = Z_b$

$\rightarrow E_f = E_b$

* نکته: E_f و E_b هم‌راستا هم‌جهت هستند

با شنیدن دامنه میدان یک دارد و فوردوارد

نیز همین رابطه را با هم دارند $\leftarrow$ $\frac{I_{mf}}{I_{mb}} = \frac{E_f}{E_b}$

$I_{mb} \leftarrow$ برآیند

$I_{mf} \leftarrow$ برآیند

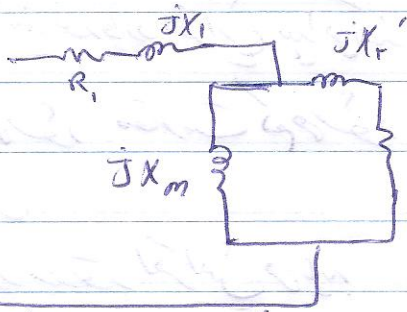
* جریان ① بیانگر میدان فوردوارد

* جریان ③ بیانگر میدان بک‌وارد

* جریان ② بیانگر میدان فوردوارد در روتور

* جریان ④ بیانگر میدان بک‌وارد در روتور

اگر ساده کنیم



مدار یک ترانسفورمر با تانویه انتقال کوتاه

نکته: چون در موتور القایی تک‌فاز در صورتیکه موتور ساکن باشد مشابه یک ترانسفورمر عمل می‌کند اما یک ترانسفورمری که ثانویه‌اش موتور است و روتورش از نوع قفس سنجابی است

پس تانویه‌اش انتقال کوتاه است.

* دامنه میدان‌های استاتور با دامنه میدان‌های روتور هم برابرند.

چون یک جریان بیشتر نداریم.

* نسبت E_f و E_b ها می‌شود نسبت جریان‌ها و نسبت جریان‌ها می‌شود نسبت دامنه‌های میدان‌ها برآیند

* در $s=1$ برآیند میدان های فوق دارد و یک دارد با هم برابر است چون که نسبت $\frac{E_f}{E_b}$ است. بنابراین در مشخصه $(T-\omega)$ گشتاور در $s=1$ صفر خواهد بود.

* در ناحیه که $1 \neq s$ باشد یعنی $1 > s > 0$ ، وقتی که s کم می‌شود $\frac{R_2'}{s}$ زیاد می‌شود

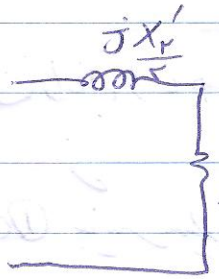
در نتیجه Z_f زیاد می‌شود $\quad E_f = Z_f I_1$

$$E_b = Z_b I_1$$

در نتیجه E_f بر E_b غلبه می‌کند. ⇐ میدان برآیند فوق دارد بر میدان برآیند دارد غلبه می‌کند

تحت راکتانس های ثابت

وقتی s کوچک می‌شود مقاومت زیاد می‌شود در نتیجه

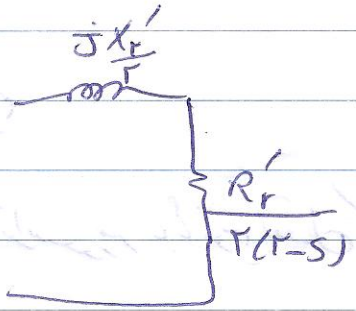


جریان کاهش می‌یابد که جریان نشان دهنده میدان فوق دارد

مقدار است پس در نتیجه میدان فوق دارد مقدار کاهش می‌یابد

⇐ میدان برآیند فوق دارد افزایش پیدا می‌کند.

وقتی s کوچک می‌شود مقاومت کم می‌شود در نتیجه



میدان یک دارد مقدار افزایش می‌یابد

* فقط از رابطه $Z_f = \frac{E_{20}}{jX_{20} + \frac{R_2'}{s}}$ و $I_2 = \frac{E_{20}}{jX_{20} + \frac{R_2'}{2(2-s)}}$ نیز اثبات کردیم.

مقدار القایی تک فازمان تک فاز نیست بلکه دو فاز متقارن هستند از نظر مقدار و در هندسی، مقاومت مغناطیس و الکتریکی لقاعده‌ای که می‌شوند باعث می‌شود که فاز جریان دو هی صفر شود این سیستم می‌شود سیستم متقارن و متعادل.

یادآوری: ماشین القایی سه فاز

سؤال: از دیدگاه مفهومی چرا گشتاور در زمان حیات موتور یک مقدار یکتا احداث می‌کند؟

$$T = \frac{P_{mech}}{\omega_r} = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$$

هنگامی ماکزیمم می‌شود که مقاومت متقابل بین آن و روتور کمترین باشد

$\omega_s \longrightarrow$ مزیت: مخرجش تابع از سرعت روتور نیست.

$$T = K \vec{B}_R \times \vec{B}_s = K \vec{B}_R \times \vec{B}_{net}$$

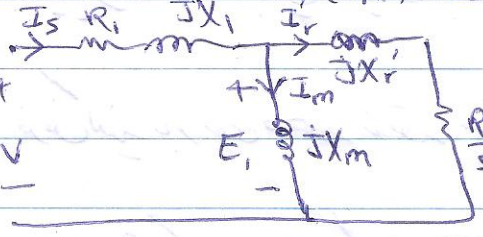
گشتاور ثابت طرح ماشین

$$\vec{B}_{net} = \vec{B}_R + \vec{B}_s$$

* گشتاور هست برهمکنش میدان استاتور با میدان روتور یا میدان روتور با میدان برآیند

در موتور القایی سه فاز میدان $\vec{B}_{net}$ تقریباً دامنه ثابتی دارد.

* جریان مولد $\vec{B}_{net}$، جریان مغناطیس کنندگی است (I_m)



جریان مولد $\vec{B}_R$، جریان روتور است (I'_r)

جریان مولد $\vec{B}_s$، جریان استاتور است (I_s)

* می‌توان تقریباً از امپدانس $R_1 + jX_1$ صرف نظر کرد در نتیجه دو سر jX_m ولتاژ و جریان مغناطیس کنندگی ثابت بوده و دامنه میدان برآیند $\vec{B}_{net}$ نیز با تغییرات سرعت روتور ثابت می‌ماند.

سؤال: آیا این تقریب در تراستور معمول است یا ماشین القایی؟

در ترانس معمول است چون X_1 در القایی بیشتر از X_1 در ترانس

راکتانس $= \frac{1}{\text{راکتانس}}$ X_m در القایی کمتر از X_m در ترانس

چون در ماشین القایی قسمتی از مسیر شار مغناطیس از هوا میگذرد و بنابراین رلوکتانس مغناطیس بسیار بیشتر و در ترانس کمتر است.

* بین میدان برآیند، میدان استاتور، میدان روتور، در القایی سه فاز این میدانی که می‌توان تقریباً ثابت فرض میدان برآیند است. (نسبت به یکدیگر)

* سرعت میدان های برآیند، استاتور، روتور، سرعت سنکرون است در القایی سه فاز تنها می‌تواند دامنه میدان ها و اندازه بین میدان ها تغییر کند.

سؤال: آیا در القایی تک فاز هم این مطلب درست است؟

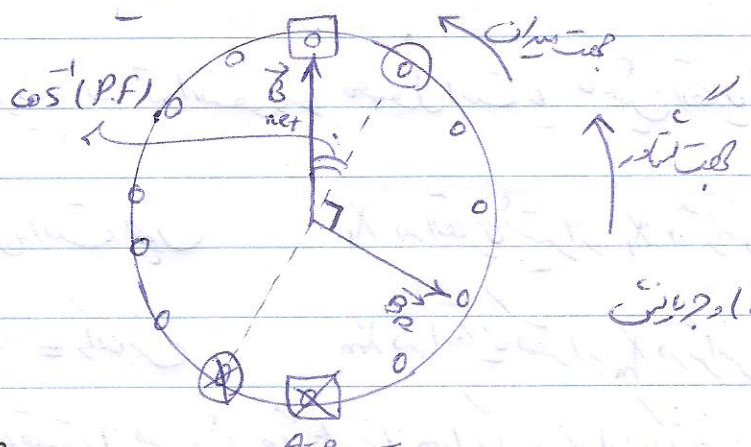
در القایی تک فاز این کار را نمی‌توان کرد چون، به صرف نظر کردن از $R_1 + jX_1$ و مقاومت رفت و برگشت، جمع دو تا ولتاژ ثابت است ولی نمی‌توان گفت e_2 و e_b ثابت است چون می‌تواند تغییر کند. بنابراین میدان برآیند نه مقدار دامنش و نه یک واردش در اینجا دامنه‌اش ثابت نیست

فرض کنید بار سمت محور روتور القایی سه فاز نداشته باشیم (شرایط بی باری) ؟

سرعت تردیک سرعت سنکرون خواهد بود اگر شاهد باد و اصطکاک وجود دارد ($S \neq 0$)

$$S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

فرض کنید در یک لحظه از زمان توسط یک عکس از میدان ها بگیریم.

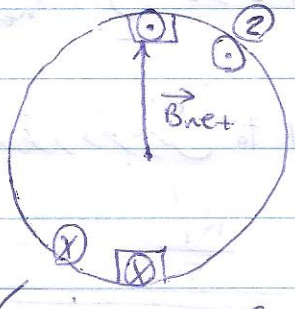


* زاویه بین میدان روتور (B_R) و جریانش 90° درجه است *

سؤال: در این لحظه از زمان کدام یک از حلقه‌های روتور ولتاژ بیشتری القا می‌شود؟

$$E = LvB$$

لحظه‌ای که ولتاژ القایی بیشتر



ولتاژ القایی بیشتر جون میدان گذرنده بیشتر است.

$\vec{B}_{net}$: راضه این بیشتر به زمان ثابت است.

* راضه $\vec{B}_{net}$ ثابت است پس ولتاژی که القا می‌شود از نوع ترانسفورمری نیست بلکه ولتاژ سینوسی است

* اندوکتاژ و جریان هم‌فاز باشند ولتاژ و جریان در یک حلقه از زمان ماکزیمم می‌شود

اما مدار روتور یک مدار اهمی سلفی است بنابراین در این حلقه‌ای که ولتاژ ماکزیمم است

جریان ماکزیمم نیست جریان روی سیم‌های (2) ماکزیمم است

$$\vec{B}_{net} = B_{max}\cos(\omega t - \theta)$$

$$\Phi = k\int_0^{\pi} B_{max}\cos(\omega t-\theta)\,d\theta = -kB_{max}\sin(\omega t-\theta)\Big]_0^{\pi}$$

$$= 2kB_{max}\sin\omega t \longrightarrow e = \frac{d\Phi}{dt} = 2B_{max}\omega\cos\omega t$$

در لحظه $t=0$ و در $\theta=0$ بیشترین B را داریم.

در سیم‌های روتور نیز هم جریان برقرار است اما ما ادعا می‌کنیم که میدان برآیند همین است چرا؟

وقتی که میدان استاتور را رسم می‌کردیم در میدان‌های استاتور در لحظه‌ای که جریان فاز a ماکزیمم است

تعیین کننده میدان برآیند همون هادی است در لحظه دیگر که جریان فاز b ماکزیمم است

تعیین کننده میدان برآیند همون هادی است.

* زاویه بین $\vec{B}_2$ و $\vec{B}_{net}$ بین 90° تا 180° است.

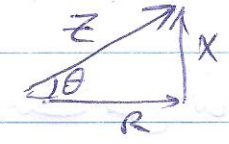
$\delta = 90 + \theta$

$\downarrow$

$\cos^{-1}(P.F)$

پس تقدم

زاویه بین میدان روتور و جریان 90° است.



$$\cos\theta = \frac{\frac{R_r'}{s}}{\sqrt{\left(\frac{R_r'}{s}\right)^2 + X_r'^2}}$$

فرض می‌کنیم سرعت روتور را زیاد کنیم، سرعت سنکرون کاهش می‌یابد

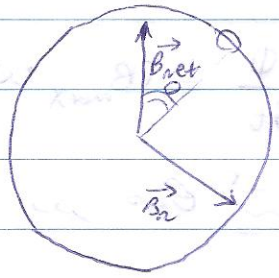
$$T = K |\vec{B}_R| |\vec{B}_{net}| \sin\delta$$

$$\delta = 90 + \theta \longrightarrow \sin\delta = \sin(90+\theta) = \cos\theta$$

مثبت قدرت روتور

حال فرض کنید سرعت روتور را زیاد کنیم سرعت روتور از حالت بدون بار کمتر خواهد شد.

* و تا زمانی که سرعت در روتور به جایی که سرعت آن با ω_s برابر می‌شود



نیست از موضع بی باری است.

از آنجا که سرعت نسبی بین هادی های روتور و میدان $\vec{B}_{net}$ نیرو ایجاد کرده و باعث چرخش روتور

نیز بیشتر خواهد شد. $E = LBv$

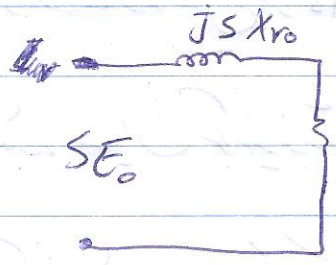
سرعت نسبی سیم و میدان

$$I_r = \frac{E_{r0}}{\frac{R_r}{S} + jX_{r0}}$$

وقتی که بار می‌گذاریم سرعت روتور کم می‌شود اما S زیاد می‌شود.

$$\uparrow S \Rightarrow \frac{R_r}{S} \downarrow \Rightarrow I_r \uparrow$$

$\vec{B}_r$ نسبت به حالت قبل بیشتر می‌شود چون I_r بیشتر شده است.



وقتی که S زیاد می‌شود طبیعت سلفی بیشتر می‌شود.

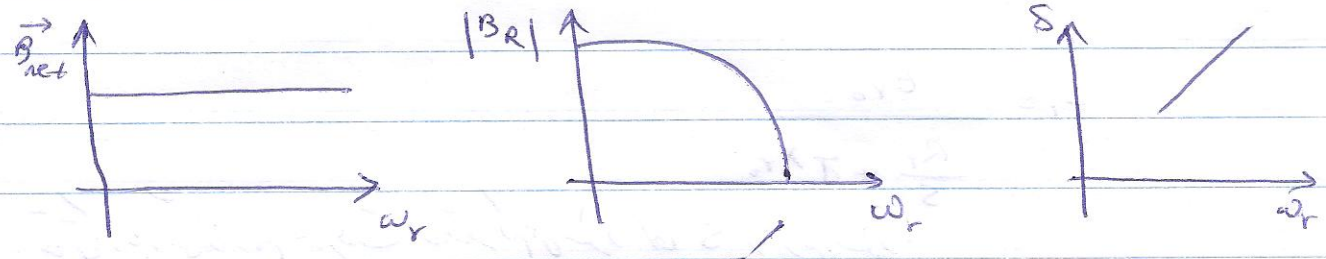
$$T = K\,|B_r|\,|B_{net}|\,\frac{\sin\delta}{\cos\theta}$$

(ثابت: $|B_r|$، $|B_{net}|$ — ↑ $\sin\delta$ — ↓ $\cos\theta$)

* $\cos\theta$ هرچه به صفر می‌شود پس بزرگ می‌شود افزایش می‌یابد هرچه به سلفی شدن پیش برویم θ زیاد می‌شود کاهش می‌یابد *

هرچه خاصیت سلفی بیشتر شود θ نیز زیاد می‌شود اما $\sin\delta$ کوچک خواهد شد.

* دلیل این که گشتاور یک مقدار پیک پیدا می‌کند هم همین است که دو تا عامل داریم در گشتاور که در جهت مخالف هم عمل می‌کنند. هرچه بار گذاری کنیم در روتور از آنجایی که جریان القایی پیدا می‌کند در نتیجه میدان روتور $\vec{B}_r$ افزایش می‌کند گشتاور را زیاد اما از آنجا که روتور طبیعت سلفی‌اش بیشتر می‌شود میل دارد گشتاور را کم کند یک نقطه است که نقطه بهینه است در اونجا گشتاور ماکزیمم است. دیاگرام به شکل زیر است.

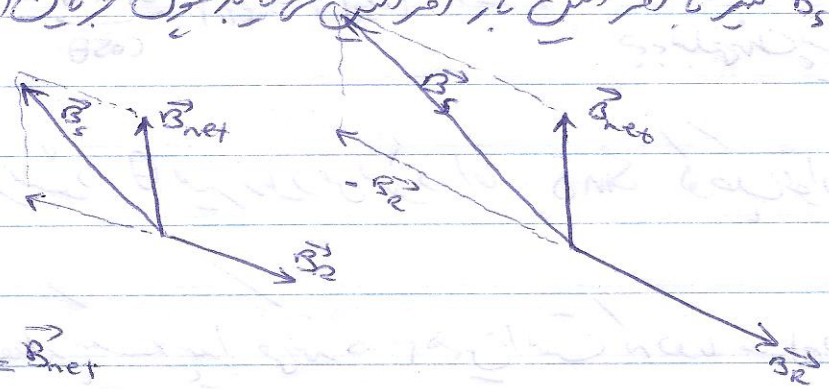


* هرچه سرعت کمتر $\vec{B}_R$ بیشتر است

* تکفاز: وقتی که میدان فوق وارد روتور کوچک شود میدان برآیند فقط دارد بزرگ می‌شود. چون زاویه بین میدان روتور و استاتور بیش از ۹۰ درجه است. چون بیش از ۹۰ است پس میدان روتور کوچک شبیه میدان برآیند بزرگ می‌شود. اگر زاویه کوچک‌تر از ۹۰ باشد هرکدام کوچک شبیه برآیندشون هم کوچک می‌شود.

* $\vec{B}_s$ نیز با افزایش بار افزایش می‌یابد چون جریان استاتور نیز زیاد می‌شود

$\vec{B}_s \propto I_s$



$$\vec{B}_R + \vec{B}_s = \vec{B}_{net}$$

$$\vec{B}_s = \vec{B}_{net} - \vec{B}_R$$

$$T = k|\vec{B}_R||\vec{B}_s| \sin \delta_{sr}$$

* δ_{sr}: زاویه بین میدان استاتور و روتور

* δ_{sr} زیاد می‌شود در نتیجه $\sin \delta_{sr}$ کم می‌شود

نکته: $\vec{B}_{net}$ زاویه‌ای نسبت به بازگیری ثابت است ← هر سه میدان $\vec{B}_R$ ، $\vec{B}_S$ و $\vec{B}_{net}$ زاویه‌شان نسبت به

زمان ثابت است.

مهم* در القایی تک‌فاز $\vec{B}_{net}$ (چه فوروارد، چه بکوارد) نسبت به بازگیری ثابت نیستند

در القایی چندفاز وقتی $\vec{B}_{net}$ ثابت بودند نسبت به بازگیری، $\vec{B}_R$ و زاویه $\vec{B}_R$ و $\vec{B}_{net}$ تغییری نکند

$$T = k|\vec{B}_{net}||\vec{B}_R|\sin\delta \qquad \delta = 90 + \theta$$

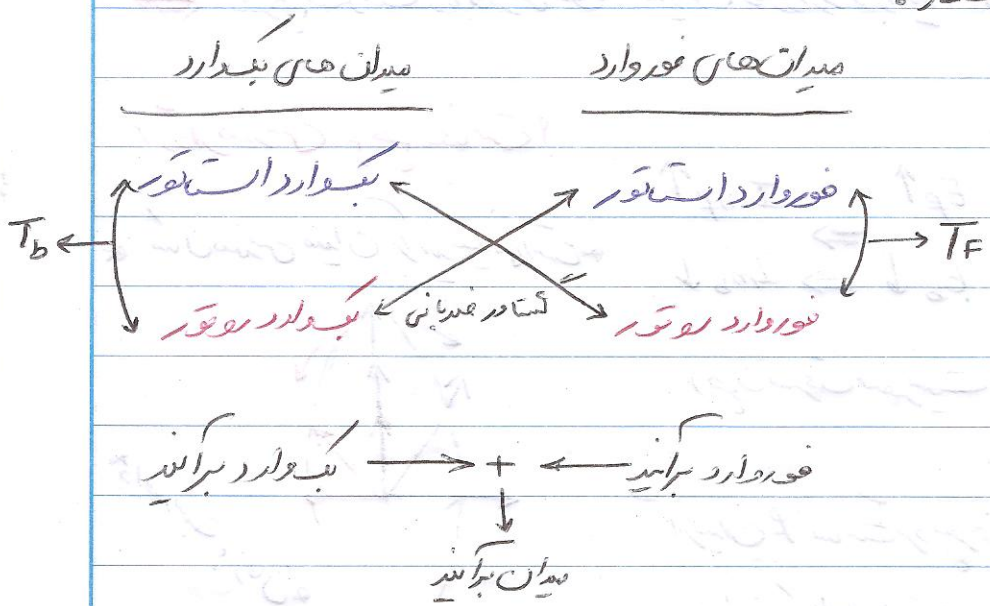
($|\vec{B}_{net}|$: ثابت)

$$T \propto |I_R| \cdot PF$$

($|I_R|$: تابع لختی، PF: تابع لختی و روتور)

سؤال ۲:

* میدان‌های موجود در موتور القایی تک‌فاز:



* گشتاور خمیدگی مقدار متوسطش صفر و مؤلفه نوسانش قابل است.

* با تغییر بار دامنه میدان‌های فوروارد استاتور و بکوارد استاتور نسبت به یکدیگر ثابت هستند چون در استاتور (یک فازیش تر نداریم) هر مقدار جریانی که در آن جاری می‌شود (I_S) است.

این I_S دامنه میدان فورواردش و بکواردش، نصف برابر $\frac{N_S I_m}{2}$ است.

$I_S = I_m \sin\omega t$ ← تک جریان

$$mmF = N_S I_m \sin\omega t \cos\theta = \frac{N_S I_m}{2}\left[\underbrace{\sin(\omega t + \theta)}_{\text{بکوارد استاتور}} + \underbrace{\sin(\omega t - \theta)}_{\text{فوروارد استاتور}}\right]$$

* راهنه نسبت به بار الکتریکی ثابت نیست بلکه راهنه‌ها نسبت به یکدیگر (فوروارد و بک وارد) ثابت است

① هرچه سرعت زیاد شود (بار الکتریکی کم شود یا $S^+ \downarrow$) در این صورت راهنه میدان فوروارد روتور کاهش می‌یابد و از طرفی ضریب قدرت فوروارد روتور افزایش می‌یابد بنابراین میدان فوروارد برآیند افزایش می‌یابد

② در مورد میدان بک وارد ← راهنه‌ی میدان بک وارد روتور افزایش می‌یابد و از طرفی ضریب قدرت بک وارد روتور کاهش می‌یابد ← میدان بک وارد برآیند کاهش می‌یابد

①② هرچه سرعت زیادتر می‌شود میدان فوروارد (برآیند) بر میدان بک وارد برآیند غالب می‌شود

از نظر هندسی به چه معناست؟

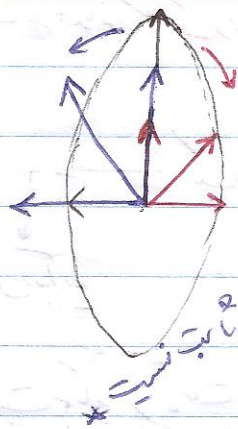
$S\downarrow \Rightarrow Z_f \uparrow \Rightarrow E_f \uparrow \Rightarrow I_{rm_f} \uparrow$

$Z_b \downarrow \Rightarrow E_b \downarrow \Rightarrow I_{rm_b} \downarrow$

* مکان هندسی میدان برآیند بیضی است

(چون سرعت مغرضیت میدان f بر میدان b غالب است)

$\vec{B}_{net_b}$ $\vec{B}_{net_f}$



اگر میدان f سرعت کرد چه چند

میدان بک وارد باید سرعت کرد می‌چه چند

یعنی میدان ← به دایره نزدیک‌تر شود ← راهنه $f > b$ ← هرچه S کوچکتر شود

بک وارد فوروارد

بک وارد نداشته باشیم

* در نحله راه اندازی چون راهنه میدان‌ها با هم برابر است ← برآیند یک حفله می‌شود ← میدان دوار نداریم

- در حالت پایه آن یک دایره است.

- در $1 > S > 0$ مکان هندسی یک بیضی است ← میدان دوار است اگر چه راهنه آن نسبت به زمان ثابت نیست

نکته آزمایشگاهی ۲: هرچی R_r ↑ در راه اندازی با I راه اندازی روتور و $\cos\varphi$ ↑ و میدان می‌آیند پایین

بیشترین مقدار گشتاور راه اندازی در $s=1$ است.

$R_r \uparrow \quad I_r \downarrow \quad \cos\varphi \uparrow$

یک نقطه‌ای است که بیشترین گشتاور است (بیشینه) ← مقدار گشتاور

* استخراج مدار معادل موتور القایی تک فاز با استفاده از مؤلفه‌های متقارن: (مهم) ← امتحانی

ابتدا روش تحلیل موتور القایی ۲ فاز متقارن (ساخت متقارن) و نامتقارن (تغذیه نامتقارن) را بررسی می‌کنیم. اگر بتوانیم چنین موتوری را تحلیل کنیم موتور القایی تک فاز نیز قابل تحلیل است.

به طور کلی ما تنها موتور القایی ۲ فاز نامتقارن است که یک فاز آنرا با جریان صفر در نظر می‌گیریم.

به جای آنکه V_a و V_b را اعمال کنیم که متقارن نباشند (مقدار دامنه‌هایشان برابر نباشد یا اختلاف فاز غیر از 90° دهم نباشد)

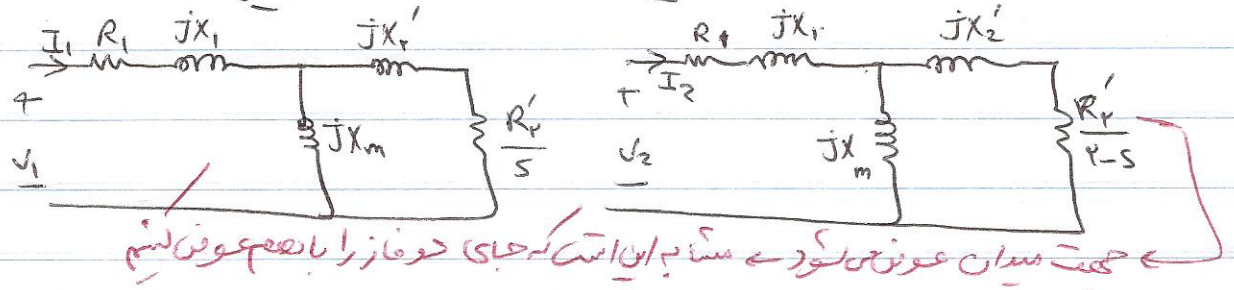
$\begin{cases} V_a \\ V_b \end{cases}$ ⟶ دو ولتاژ set متقارن اعمال می‌کنیم ⟶ $\begin{cases} V_1 = -jV_1 \\ V_2 = +jV_2 \end{cases}$

یک ماشین القایی متقارن تغذیه متقارن

$$\begin{cases} V_a = V_1 + V_2 \\ V_b = -jV_1 + jV_2 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} V_1 = \dfrac{V_a + jV_b}{2} \\ V_2 = \dfrac{V_a - jV_b}{2} \end{cases}$$

یک ماشین القایی متقارن تغذیه متقارن

وقتی V_a و V_b متقارن نیستند ← می‌خواهیم ۲ ولتاژ متقارن بدست بیاوریم (V_1 و V_2)



جهت میدان عوض می‌شود ← مشابه این است که جای دو فاز را با هم عوض کنیم

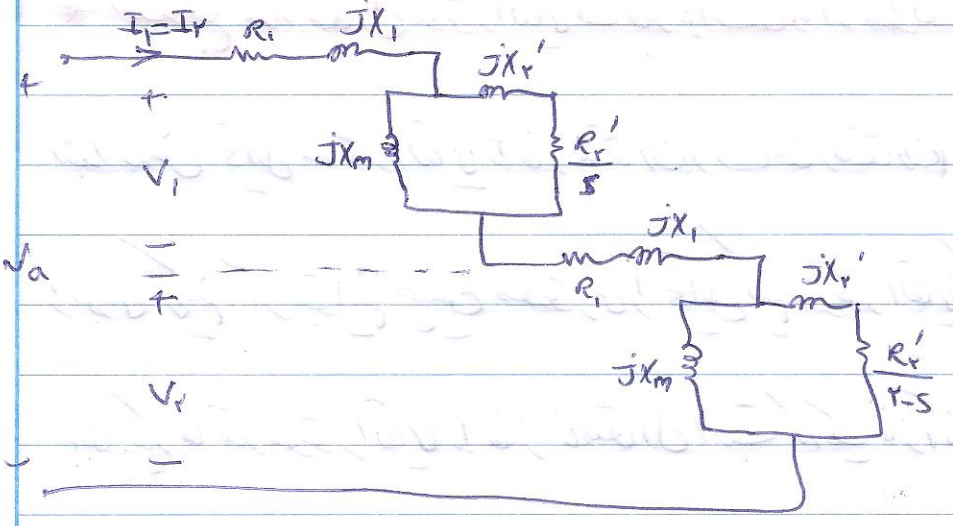
V_a $\begin{pmatrix} V_1 \\ -jV_1 \end{pmatrix} \rightarrow I_1$

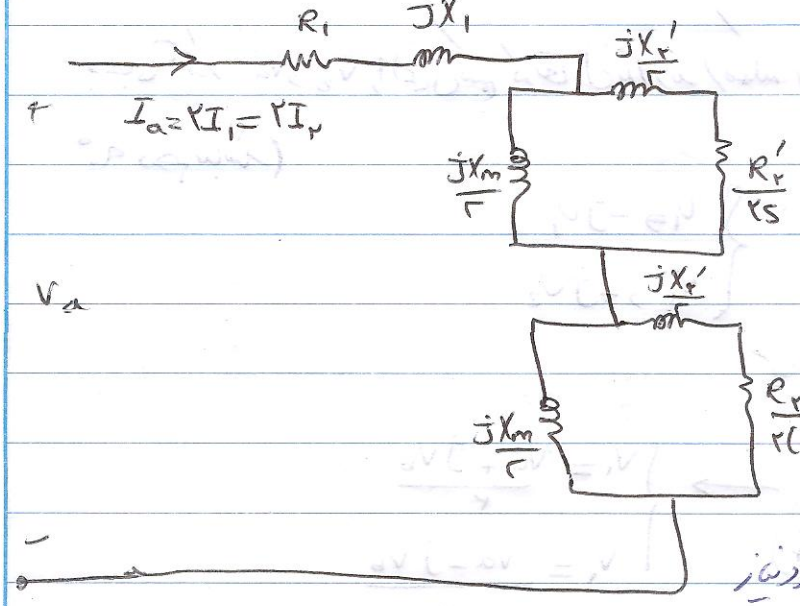
$V_b \rightarrow \begin{pmatrix} V_2 \\ jV_2 \end{pmatrix} \rightarrow I_2$

$\rightarrow \begin{cases} I_a = I_1 + I_2 \\ I_b = -jI_1 + jI_2 \end{cases}$

در تک فاز $I_b = 0$ است $\leftarrow$ $\boxed{I_1 = I_2}$ ② $\leftarrow$ $I_a = 2I_1 = 2I_2$

طبق رابطه $I_1 = I_2$ و $V_a = V_1 + V_2$ می‌توان دو مدار را سری در نظر گرفت.





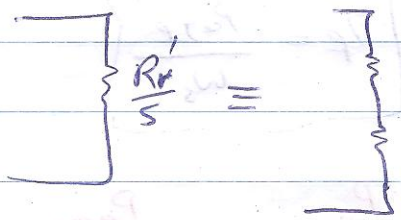
* امپدانس‌ها را $\frac{1}{2}$ کردیم و جریان را ۲ برابر $\leftarrow$ V_a تغییر نکند

و چون $I_a = 2I_1$ را به دست آوردیم

ارزش این است که I_a که جریان خارج مورد نیاز است و جریانی است که در واقعیت وجود دارد

استخراج روابط گشتاور توان الکتریکی و مکانیکی:

توانی که تلف می‌شود



تلف مکانیکی

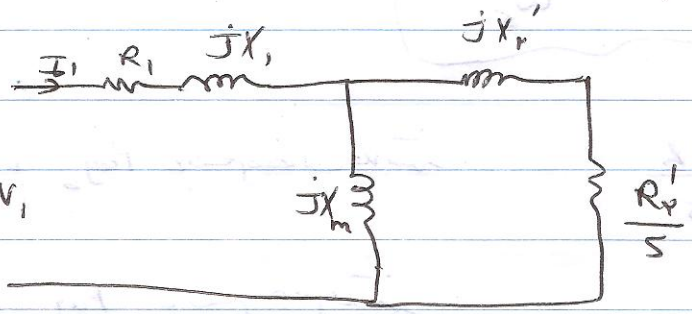
توان الکتریکی مصرف می‌شود

مدار معادل ماشین سه فاز:

$$\frac{R_r'}{s} \equiv P_{ag}$$

$$P_{mech} = (1-s)P_{ag} \Rightarrow P_{mech} \equiv \frac{(1-s)}{s} R_r'$$

$$P_{cu_{rot}} \equiv R_r' \qquad T = \frac{P_{mech}}{\omega_{rot}} = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$$

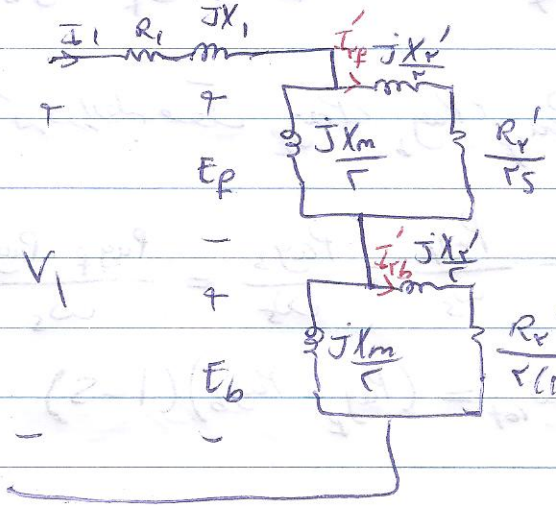


معادله توان استاتور: $R_e(V_1 I_1^*) = R_1 I_1 + \frac{R_r'}{s} I_r'$

معادله توان مکانیکی: $R_e(V_1 I_1^*) = R_1 I_1 + R_r' I_r' + T\omega_r$ (P_{mech})

$$T\omega_r + R_r' I_r' = \frac{R_r'}{s} I_r'$$

$$T = \frac{\frac{R_r'}{s} I_r'(1-s)}{\omega_r} = \frac{\frac{R_r'}{s} I_r'}{\omega_s}$$



تعریف موتور القایی تک‌فاز:

$T_f \longrightarrow P_{ag_f} = \frac{R_r'}{2s} I_{rf}'$ (موازی سنکرون)

$Z_f = R_f + jX_f \longrightarrow \boxed{P_{ag_f} = R_f I_1'^2}$

$$T_f = \frac{P_{mech_f}}{\omega_{rot}} = \frac{P_{ag_f}}{\omega_s}$$

$$\frac{R_2'}{2S} = \frac{R_2'}{2} + \frac{R_2'}{2}\left(\frac{1-S}{S}\right)$$

P_{ag_f} P_{cur_f} P_{mech_f}

$$T_f = \frac{P_{ag_f}}{\omega_s}$$

$$T_b = \frac{P_{mech_b}}{\omega_{rot}}$$

$$\frac{P_{ag_b}}{\frac{R_2'}{2(2-S)}} = \frac{P_{cur_b}}{\frac{R_2'}{2}} + \frac{P_{mech_b}}{\frac{R_2'}{2}\left(\frac{S-1}{2-S}\right)}$$

$$P_{mech_b} = (S-1)\,P_{ag_b}$$

$$T_b = \frac{(S-1)P_{ag_b}}{(1-S)\omega_s} \Rightarrow T_b = \frac{-P_{ag_b}}{\omega_s}$$

$T_b = \frac{-P_{ag_b}}{\omega_s}$ P_{mech_b} و P_{ag_b} به هم وابسته هستند.

$T = T_f + T_b$ P_{mech_f} و P_{ag_f} به هم وابسته هستند.

سوال امتحانی: ثابت کنید اگر بخواهیم از رابطه $T = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$ برای حالتی که روتور آن تک‌فاز است استفاده کنیم باید قرار دهیم $P_{ag} = P_{ag_f} - P_{ag_b}$ ولی اگر بخواهیم توان مکانیکی خروجی را بیابیم:

$$P_{mech} = P_{ag} - P_{cur_b} - P_{cur_f} \qquad P_{ag} = P_{ag_f} + P_{ag_b}$$

که در رابطه فوق P_{cur_b}، P_{cur_f}، P_{ag_b}، P_{ag_f} مثبت هستند.

اثبات: $T = T_f + T_b = \frac{P_{mech_f}}{\omega_{rot}} + \frac{P_{mech_b}}{\omega_{rot}} = \frac{P_{ag_f}}{\omega_s} - \frac{P_{ag_b}}{\omega_s} = \frac{P_{ag_f} - P_{ag_b}}{\omega_s}$

ب) $P_{mech} = T \cdot \omega_{rot} = (T_f + T_b)\,\omega_{rot} = (P_{ag_f} - P_{ag_b})(1-S)$

$$\frac{R_2'}{2S} = \frac{R_2'}{2} + \frac{R_2'}{2}\left(\frac{1-S}{S}\right) \qquad P_{curf} = S P_{agf}$$

$$\frac{R_2'}{2(2-S)} = \frac{R_2'}{2} + \frac{R_2}{2}\left(\frac{S-1}{2-S}\right) \qquad P_{curb} = (2-S) P_{agb}$$

$$P_{mech} + P_{curf} + P_{curb} = (P_{agf} - P_{agb})(1-S) + S P_{agf} + (2-S) P_{agb}$$

$$P_{mech} + P_{curf} + P_{curb} = P_{agf}(1-S+S) + P_{agb}(-1+S+2-S)$$

$$\Rightarrow P_{mech} + P_{curf} + P_{curb} = \overbrace{P_{agf} + P_{agb}}^{P_{ag}}$$

مثال: یک موتور القایی تکفاز $2.2\,kV$، $60\,Hz$، $110\,V$، دارای مشخصات زیر است معکوس نسبت دامنه میدان

$R_1 = 2.02\,\Omega$

$R_2 = 2.79\,\Omega$

$R_2' = 4.12\,\Omega$

$X_2' = 2.12\,\Omega$

$X_m = 66.8\,\Omega$

بردار مستقیم ، دامنه میدان معکوس اگر حرکت کند ($S = 0.05$)

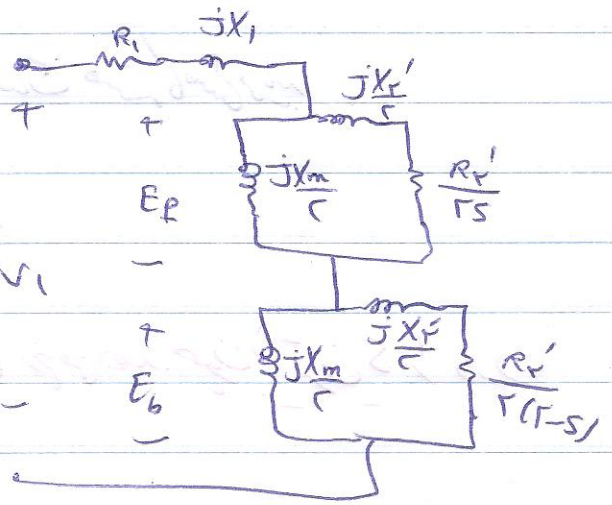
چون فکر کنید است که دامنه یکدیگر میدان از سه میدان برآیند

مشکل نسبت دامنه میدان بردار مستقیم است تقریباً برابر دامنه میدان بردار معکوس

است تقریباً برابر یک است

تذکر: نسبت دامنه میدان بردار مستقیم برآیند ، دامنه میدان بردار معکوس برآیند برابر است با:

$$\frac{I_{mf}}{I_{mb}} = \frac{E_f}{E_b}$$



$$\begin{cases} E_f = Z_f I_1 \\ E_b = Z_b I_1 \end{cases}$$

$$Z_f = j\frac{X_m}{2} \,||\, \left(j\frac{X_2'}{2} + \frac{R_2'}{2S}\right)$$

$$Z_b = j\frac{X_m}{2} \,||\, \left(j\frac{X_2'}{2} + \frac{R_2'}{2(2-S)}\right)$$

الف) $s=1 \Rightarrow Z_f = Z_b \rightarrow E_f = E_b \Rightarrow \boxed{I_{mf} = I_{mb}}$

ب) در $s=0.05$ ، $|Z_f|$ و $|Z_b|$ را محاسبه کرده و مقایسه می‌کنیم.

ج) $\frac{I'_{2f}}{I'_{2b}} = ?$

$$I'_{2f} = I_1 \times \frac{j\frac{X_m}{2}}{\frac{R'_2}{2s} + j\left(\frac{X'_2}{2} + \frac{X_m}{2}\right)}$$

$$I'_{2b} = I_1 \times \frac{j\frac{X_m}{2}}{\frac{R'_2}{2(2-s)} + j\left(\frac{X_m}{2} + \frac{X'_2}{2}\right)}$$

$$\Rightarrow \frac{I'_{2f}}{I'_{2b}} = \frac{\frac{R'_2}{2(2-s)} + j\left(\frac{X_m}{2} + \frac{X'_2}{2}\right)}{\frac{R'_2}{2s} + j\left(\frac{X_m}{2} + \frac{X'_2}{2}\right)}$$

$0<s<1 \leftarrow \frac{R_2}{s}\uparrow \leftarrow I'_{2f}$ دامنه میدان کمتر دارد موتور بیشتر از دامنه میدان عقب‌رو دارد موتور می‌شود.

چرا تلفات موتور را ثابت می‌گیریم؟

چون با افزایش سرعت، تلفات باد و اصطکاک افزایش می‌یابد از طرفی با افزایش سرعت s کاهش می‌یابد و در نتیجه P_e کاهش می‌یابد ← تلفات هسته کاهش می‌یابد

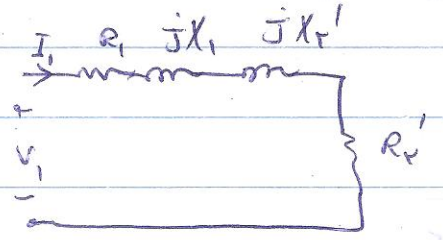
بنابراین تلفات موتور را ثابت فرض می‌کنیم.

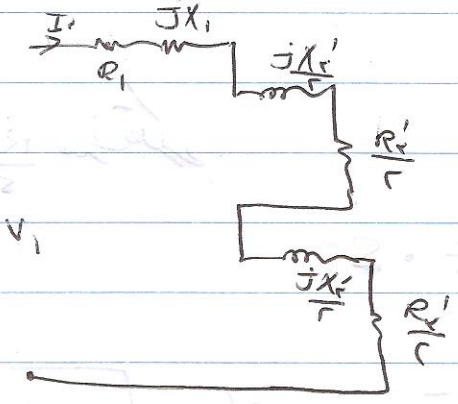
کم‌شین‌ترین تلفات موتور در ناحیه ترمزی رخ می‌دهد. چون بیشترین s را دارد.

مدار معادل تقریبی :

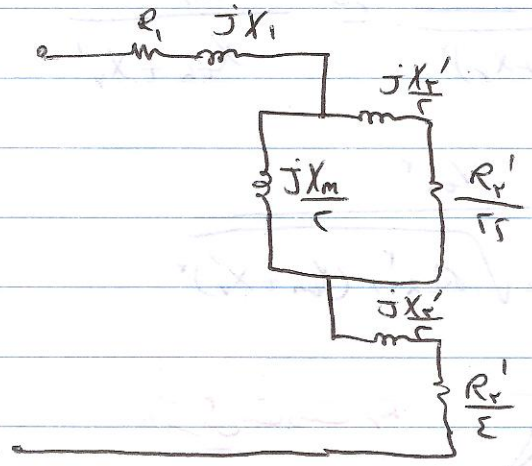
۱) شرایط اتصال کوتاه (روتور قفل شده) ($S=1$) :

X_m مقدار بزرگی نسبت به R_2', X_2'





۲) شرایط اتصال کار نامی (لغزش کوچک)



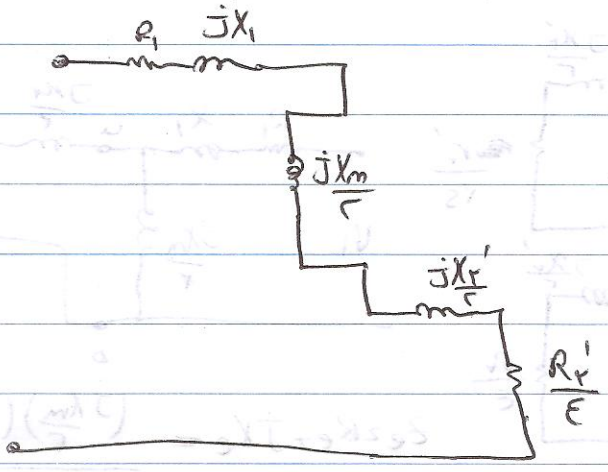
لغزش کوچک ← $\frac{R_2'}{2S}$ زیاد می‌شود و می‌تواند از $\frac{jX_m}{2}$ صرف نظر کرد.

$\frac{jX_m}{2}$ صرف نظر $\Rightarrow Z_b \uparrow$

$\frac{R_2'}{2(2-S)} \subset \frac{R_2'}{4} \Rightarrow Z_b \downarrow$

تقریب خوبی

۳) آزمایش بی‌باری ($S=0$) :



شاخه الکتریکی مغناطیسی (قوی)

شاخه مغناطیسی تقریباً خط می‌شود به صورتی که

این مطلب برای اتصال ستاره درست است.

(در این اتصال صرف نظر می‌شود)

تحقیق اثر تغییر مقاومت روتور روی مشخصه ($\omega - T$) موتور القایی سه‌فاز: ← آزمایش

سه‌فاز ⇒ $T = \frac{3}{\omega_s}\frac{R_2'}{s} \cdot I_2'^2$ $\qquad I_2'^2 = \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{th} + X_2')^2}$

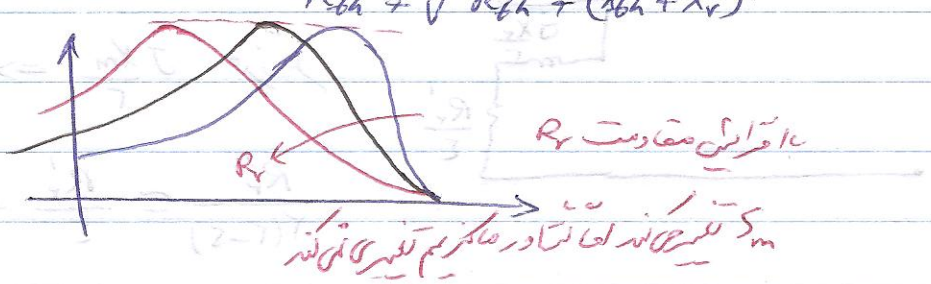
متوقف از X_2' ، X_{th} ، R_{th} نسبت $\frac{R_2'}{s}$ صرف نظر کرد.

$$T = \frac{3}{\omega_s}\cdot\frac{V_{th}^2}{R_2'}\cdot s$$

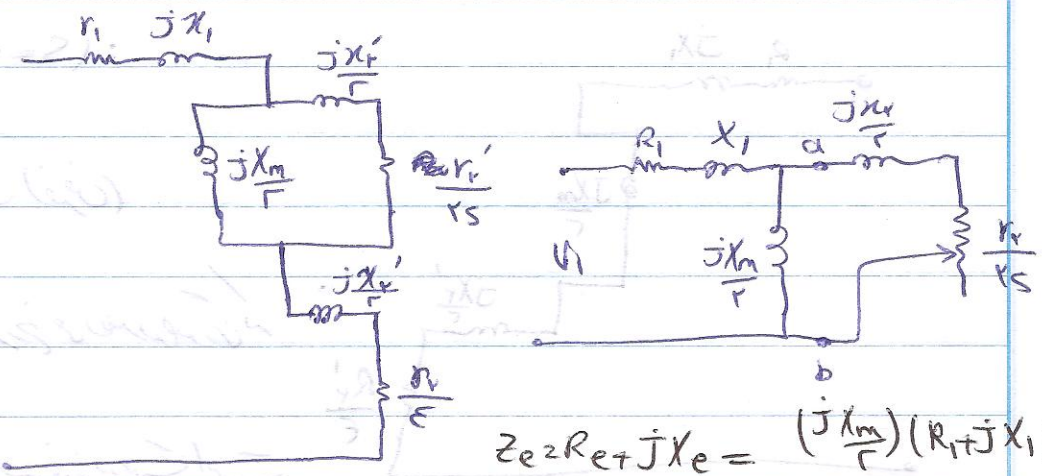
ضعیف حداکثر توان $\qquad \frac{R_2'}{s_m} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2')^2}$

$$\Rightarrow s_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2')^2}} \simeq \frac{R_2'}{X_{th} + X_2'}$$

$$T_m = \frac{3}{2\omega_s}\cdot\frac{V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2')^2}}$$



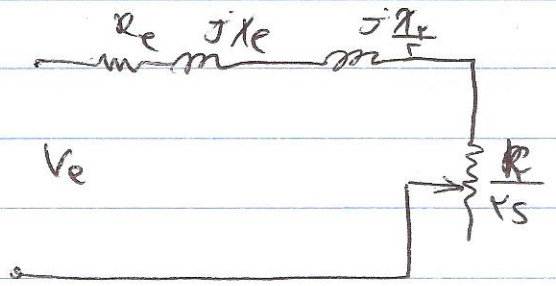
سه‌فاز ⇒



$$\begin{cases} R_1 = r_1 + \frac{r_2'}{4} \\ X_1 = x_1 + \frac{x_2'}{2} \end{cases}$$

$$Z_e = R_e + jX_e = \frac{(j\frac{X_m}{2})(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + \frac{X_m}{2})}$$

$$V_e = \frac{(j\frac{X_m}{2})V_1}{R_1 + j(X_1 + \frac{X_m}{2})} = \frac{1}{2}\frac{X_m V_1}{X_1 + \frac{X_m}{2}}$$



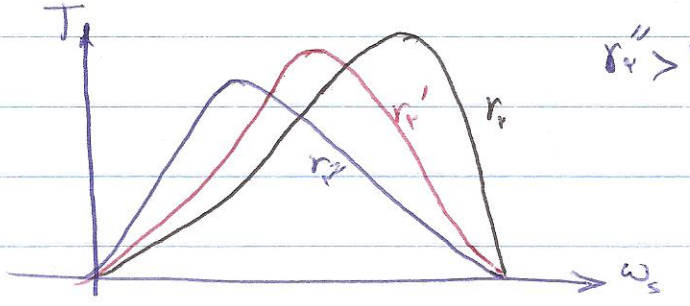
حضیه حداکثر توان داریم $\frac{r_r}{2S_{mT}} = \sqrt{R_e^2 + \left(X_e + \frac{X_r}{2}\right)^2}$

با افزایش مقاومت r_r $\Rightarrow S_{mT} = \frac{r_r}{2\sqrt{R_e^2 + \left(X_e + \frac{X_r}{2}\right)^2}}$

S_{mT} تغییر می‌کند.

با افزایش مقاومت r_r $T_{e.m} = \frac{V_e^2}{2\pi n_s} = \frac{1}{2\left(R_e + \sqrt{R_e^2 + \left(X_e + \frac{X_r}{2}\right)^2}\right)}$

گشتاور ماکزیمم کم می‌شود



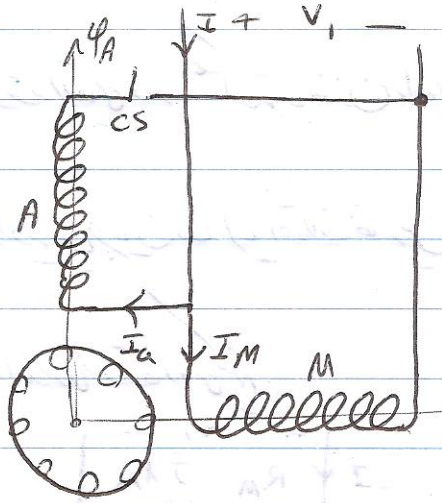
$r_r'' > r_r' > r_r$

روش‌های راه‌اندازی موتور القایی تک‌فاز:

موتورهای القایی تک‌فاز در سرعت صفر ($s=1$) گشتاور راه‌انداز ندارند برای اینکه بتوانیم گشتاور راه‌انداز ایجاد کنیم موتور را متعادل می‌کنیم، موتور دوفاز متعادل و ولی با تغذیه نامتعادل چون اختلاف فاز بین جریان‌های دو فاز کمتر از $90°$ خواهد بود.

۱- روش‌های فاز شکسته Split Phase :

۱-الف) Resistor Split Phase

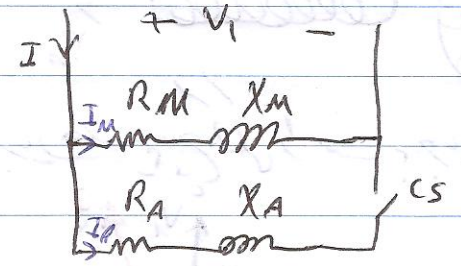


برای ایجاد اختلاف فاز بین جریان سیم‌پیچ اصلی و فلی مقاومت سیم‌پیچ کمکی بیشتر از سیم‌پیچ اصلی و راکتانس سیم‌پیچ اصلی بیشتر از سیم‌پیچ کمکی است. اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان فاز کمکی کمتر از اختلاف فاز ولتاژ و جریان سیم‌پیچ اصلی است.

$R_A > R_M$ ← سطح مقطع کوچک‌تر است ← مقاومت بیشتر ← تلفات بیشتر ← منفی‌تر

$X_M > X_A$ ← تعداد دور M بیشتر از A است

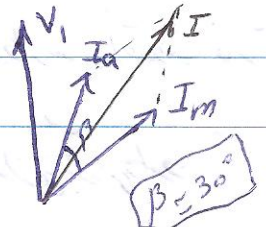
$$\frac{R_A}{X_A} > \frac{R_M}{X_M}$$



اختلاف فاز جریان سیم‌پیچ کمکی و اصلی در این روش حدوداً $30°$ است که این اختلاف فاز هم ایجاد گشتاور راه‌انداز می‌کند.

$$\alpha_a = tg^{-1}\frac{X_a}{R_a}$$

$$\alpha_m = tg^{-1}\frac{X_m}{R_m}$$



$\alpha_a < \alpha_m$

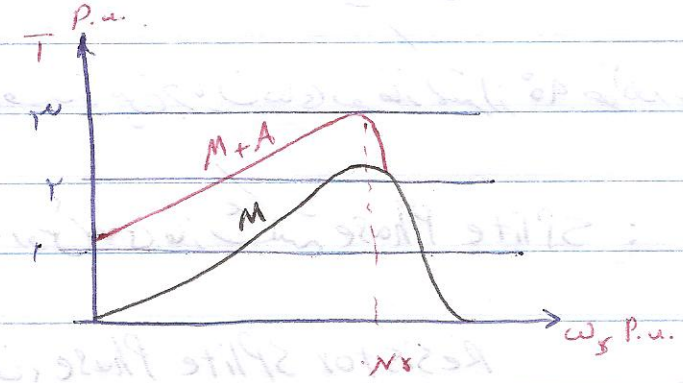
پس فاز I_a نسبت به V_1

cs (کلید گریز از مرکز) که در سرعت موتور بین ۷۰٪ و ۸۰٪ سرعت سنکرون، سیم پیچ کمکی Auxiliary

را از مدار خارج می‌کند.

* در موتور القایی دو فاز (متعادل و متقارن) جریان های فازها با هم اختلاف فاز ۹۰° دارند ولی

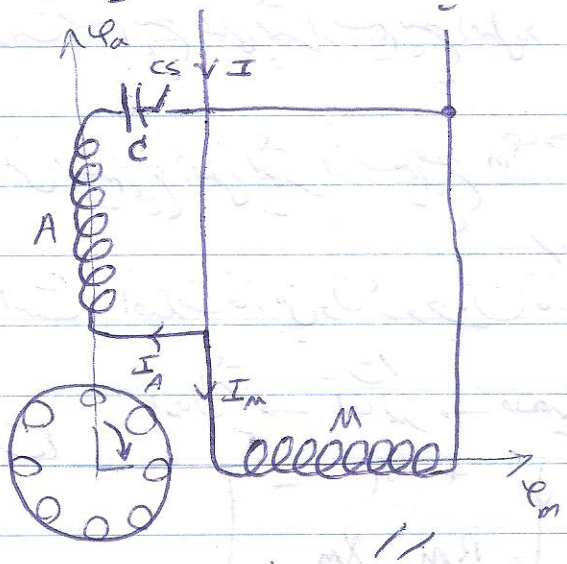
در تکفاز اختلاف فاز کمتر از ۹۰ است

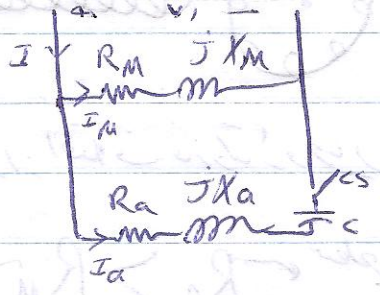


۱ـ ب) موتور القایی فاز شکافته یا خازن راه انداز:

برای این که زاویه بین جریان ها (یا اختلاف فاز بین جریان سیم پیچ اصلی و کمکی) را به ۹۰° برسانیم از یک خازن

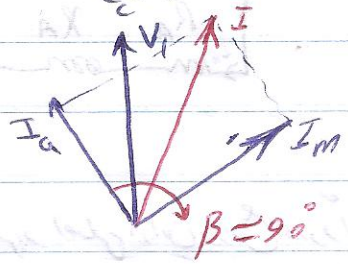
سری در راه اندازی استفاده می‌کنیم.





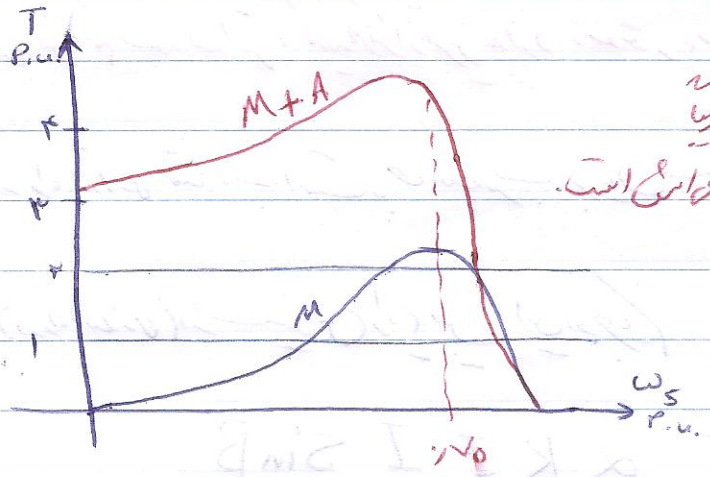
با انتخاب یک خازن مناسب می‌توان زاویه فاز جریان سیم پیچ کمکی را نسبت به جریان سیم پیچ اصلی

۹۰° جلو انداخت.



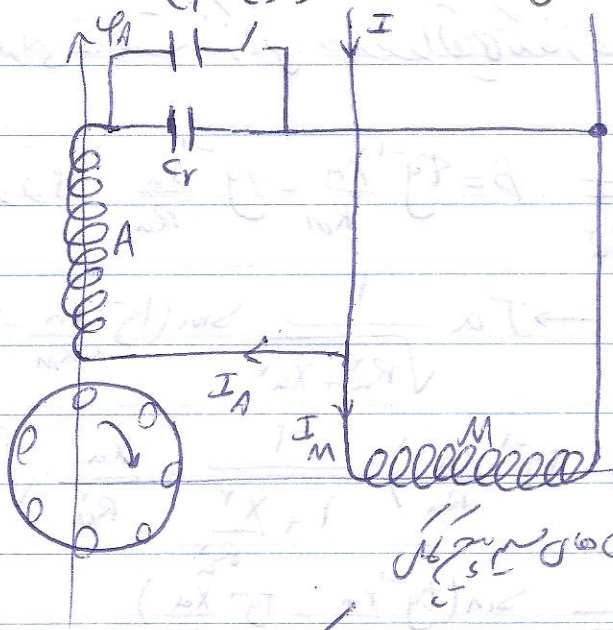
چون در سیم پیچ اصلی و کمکی ۹۰° دارند اختلاف فاز ۹۰° جریان ها یک میدان مغناطیسی دوار در استاتور

ایجاد خواهد کرد. استاتور راه اندازی چنین موتوری دارد.



گشتاور راه اندازی تقریباً ۳٫۵ برابر مقدار نامی است.

۱-ج) موتور القایی فاز شکسته با خازن دائمی و خازن راه انداز:



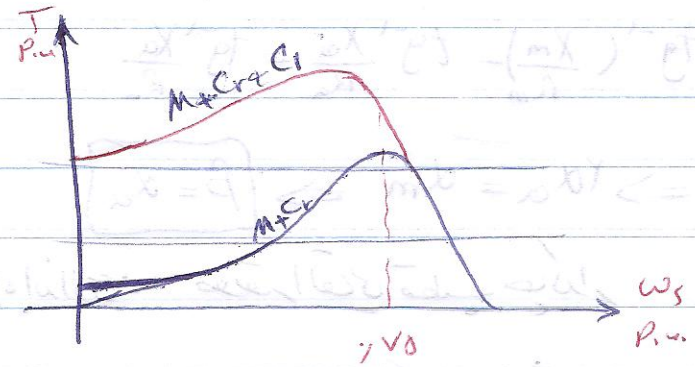
در راه اندازی $C_1 + C_2$ به بزرگ

در حالت کار دائم C_2 به کوچک

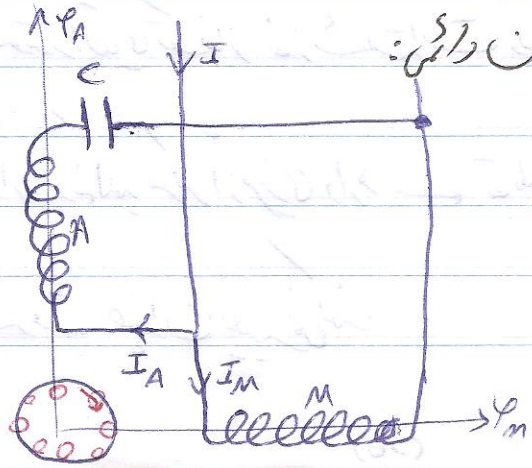
$C_1 \gg C_2$

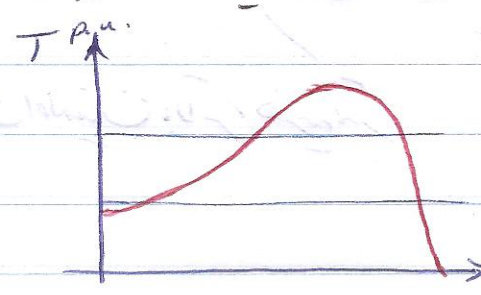
به دلیل اینکه زاویه اختلاف فاز جریان های سیم پیچ کمتر

و اصلی نزدیک به ۹۰ است و مشابه موتور القایی دو فاز کار می کند



۱-د) موتور القایی فاز شکسته با خازن دائمی:





* از لحاظ عملکرد نرم‌تر، کم سر و صداتر، گشتاور کمتری از شبکه می‌گیرد و موتور با موتور القایی دو فاز تبدیل می‌شود

نکته: گشتاور در راه‌اندازی مناسب است با حاصلضرب جریان سیم‌پیچ اصلی در راه‌اندازی در جریان

سیم‌پیچ کمکی (در راه‌اندازی) در سینوس زاویه بین این دو جریان

$$T_{start} \alpha K I_m I_a \sin\beta$$

شکل) طراحی مقاومت فاز کمکی موتور القایی تک‌فاز خازن‌دار از نوع مقاومتی به نحوی که T_{start}

I_m ثابت $\quad I_a = \frac{V_1}{\sqrt{R_a^2 + X_a^2}} \quad \beta = tg^{-1}\frac{X_m}{R_m} - tg^{-1}\frac{X_a}{R_a}$ حداکثر شود؟

$$T \alpha K I_m I_a \sin\beta \rightarrow T \alpha \frac{1}{\sqrt{R_a^2 + X_a^2}} \sin\left(tg^{-1}\frac{X_m}{R_m} - tg^{-1}\frac{X_a}{R_a}\right)$$

مشتق می‌گیریم $\Rightarrow$ $\cos\left(\left(tg^{-1}\frac{X_m}{R_m}\right) - tg^{-1}\frac{X_a}{R_a}\right) \frac{1}{1+\frac{X^2}{R_a^2}} \cdot \frac{X_a}{R_a^2}\sqrt{R_a^2+X_a^2} =$

$$= \frac{2R_a}{2\sqrt{X_a^2+R_a^2}} \sin\left(tg^{-1}\frac{X_m}{R_m} - tg^{-1}\frac{X_a}{R_a}\right)$$

$$\Rightarrow tg^{-1}\left(\frac{X_m}{R_m}\right) - tg^{-1}\frac{X_a}{R_a} = tg^{-1}\frac{X_a}{R_a}$$

$$\Rightarrow 2\alpha_a = \alpha_m \Rightarrow \boxed{\beta = \alpha_a}$$

روش دوم راه‌اندازی: موتور القایی قطب چاکدار

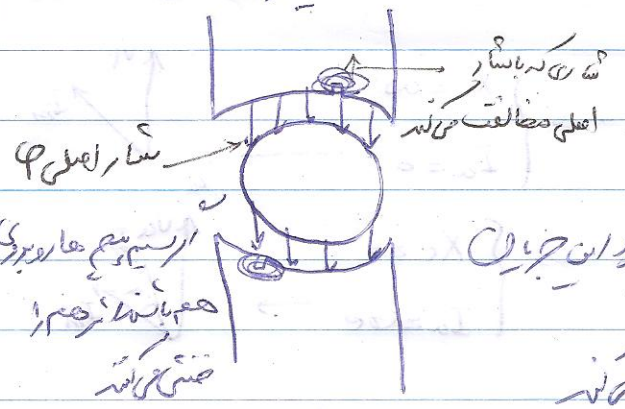
* روتور مثل موتور القایی تک‌فاز خازن‌دار است ولی در استاتور حلقه‌های اتصال کوتاه نیز داریم

* زمانی وجود دارد که گشتاور کمتری از شبکه می‌گیرد قابلیت اطمینان بالاتر، هزینه کمتر

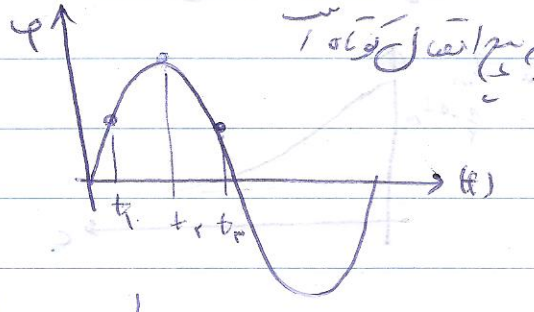
تغییر در سرعت چندان تغییر نمی‌کند

ایراد: نشت در راه اندازی آن می تواند به گرمای شدید راه اندازی موتورهای تغییر باشد

تحلیل: شکار متغیر با زمان القای ولتاژ می کند



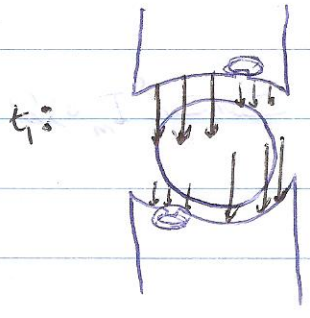
∴ مسیر برای عبور جریان دارد این جریان جاری می شود این جریان طبق قانون لنز با عامل به وجود آورنده خود مخالفت می کند



در لحظه t_1: شکار دارد افزایش می یابد. جریانی در سیم پیچ القا می شود تا به آن

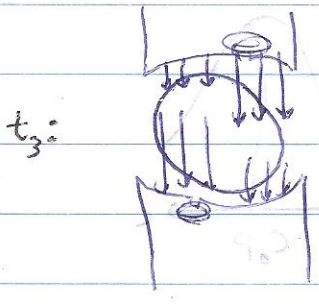
به گونه ای عمل کند با عامل به وجود آمدن خود

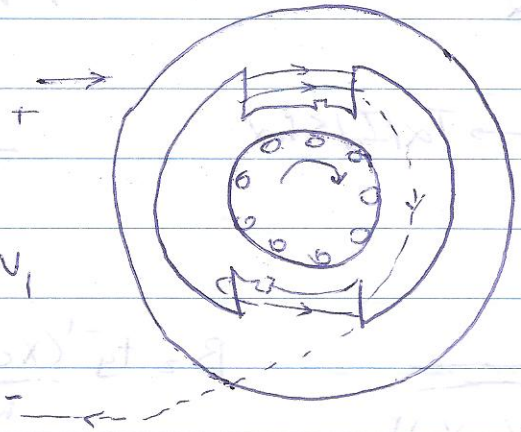
مخالفت کند در نتیجه شار اصلی را کم می کند

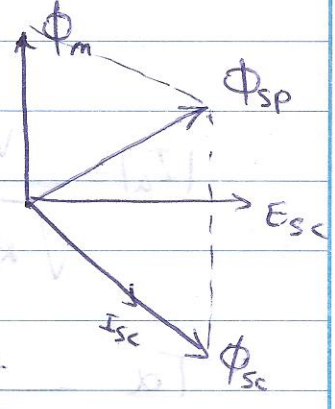


در لحظه t_2: حلقه اتصال کوتاه است

در لحظه t_3: همدیگر را تقویت می کنند





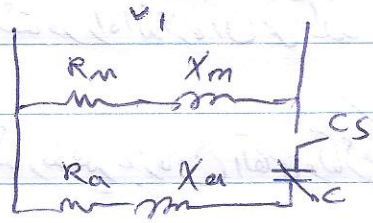


$$E_{sc} = -N\frac{d\Phi_m}{dt}$$

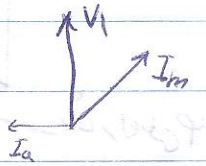
Φ_{sc} و I_{sc} باهم هم فاز از جریان اتصال کوتاه تولید می شوند

$$\Phi_m + \Phi_{sc} = \Phi_{sp}$$

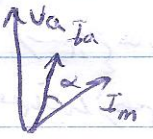
موتور القایی Split Phase خازنی یا خازن راه انداز:



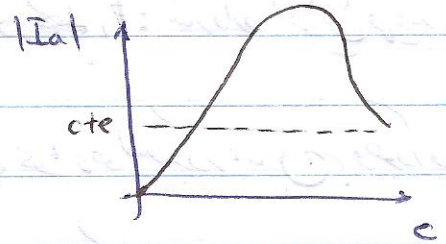
if $C=0 \rightarrow \begin{cases} X_C=\infty \\ I_a=0 \end{cases} \rightarrow$

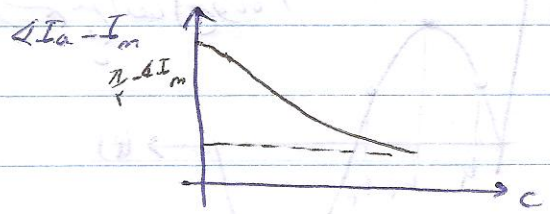


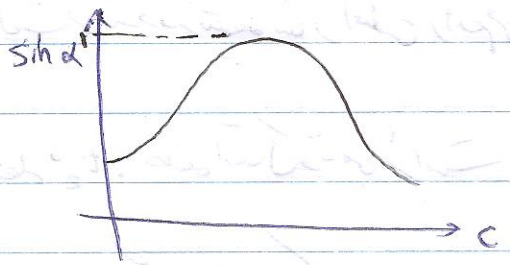
if $C=\infty \rightarrow \begin{cases} X_C=0 \\ I_a=Cte \end{cases} \rightarrow$



$\frac{R_m}{R_a} \ll 1$ ، $\frac{X_m}{X_a} \gg 1$ پس جریان I_m تاثیری از I_a ندارد چون



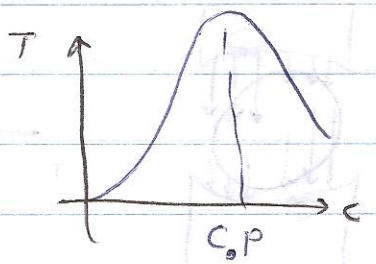




لذا زاویه I_m ثابت است

$T \propto |I_m||I_a| \sin\alpha$

$|I_m| \rightarrow cte \rightarrow T \propto |I_a| \sin\alpha$



$$|I_a| = \frac{V_1}{\sqrt{R_a^2 + (X_a - X_c)^2}}$$

$$\beta = tg^{-1}\frac{(X_c - X_a)}{R_a} + tg^{-1}\frac{X_m}{R_m}$$

$$T \propto \frac{V_1}{\sqrt{R_a^2 + (X_a - X_c)^2}} \sin\left(tg^{-1}\left(\frac{X_c - X_a}{R_a}\right) + tg^{-1}\frac{X_m}{R_m}\right)$$

$$\Rightarrow \cos\left(tg^{-1}\frac{X_c-X_a}{R_a}+tg^{-1}\frac{X_m}{R_m}\right)\cdot\frac{1}{1+\left(\frac{X_c-X_a}{R_a}\right)^2}\cdot\frac{1}{R_a}\sqrt{R_a^2+(X_a-X_c)^2}$$

$$=\sin\left(tg^{-1}\frac{X_c-X_a}{R_a}+tg^{-1}\frac{X_m}{R_m}\right)\cdot\frac{-2(X_a-X_c)}{2\sqrt{R_a^2+(X_a-X_c)^2}}$$

$$\Rightarrow tg\left(\tan^{-1}\frac{X_a-X_a}{R_a}+\tan^{-1}\frac{X_m}{R_m}\right)=\frac{R_a}{X_c-X_a}$$

$$\tan(A+B)=\frac{\tan A+\tan B}{1-\tan A\tan B}$$

$$\frac{\frac{X_c-X_a}{R_a}+\frac{X_m}{R_m}}{1-\left(\frac{X_m}{R_m}\right)\left(\frac{X_c-X_a}{R_a}\right)}=\frac{R_a}{X_c-X_a}$$

$$\Rightarrow \frac{(X_c-X_a)^2}{R_a}+\frac{X_m}{R_m}(X_c-X_a)=R_a-\left(\frac{X_m}{R_m}\right)(X_c-X_a)$$

$$2\frac{X_m}{R_m}=\frac{R}{X_c-X_a}-\frac{X_c-X_a}{R_a}$$

$$2\tan\alpha_m=\cot\alpha_a-\tan\alpha_a \Rightarrow \tan\alpha_a=x$$

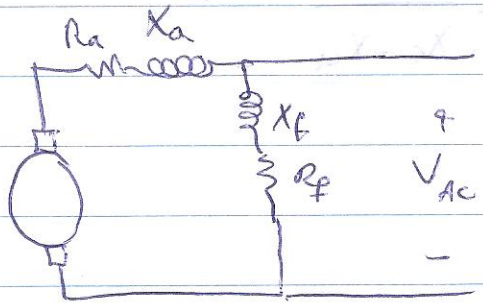
$$x^2+2\tan\alpha_m x-1=0 \Rightarrow \tan\alpha_a=\sqrt{\frac{1-\sin\alpha_m}{1+\sin\alpha_m}}$$

موتور DC سری با تغذیه AC نیز کار می‌کند

$$T = k\varphi I_a \qquad \varphi \propto I_f = I_a$$

$$T = k_f I_a^2$$

موتور DC شنت با تغذیه AC:



$$T = k\varphi I_a \qquad \varphi \propto I_f$$

$$\Rightarrow T = k_c I_f I_a$$

$$\Rightarrow T(t) = k_c I_f(t) I_a(t) \qquad I_f(t) = I_{fm}\sin\omega t$$

$$I_a(t) = I_{am}\sin(\omega t + \varphi)$$

$$T(t) = k_c (I_{fm}\sin\omega t)(I_{am}\sin(\omega t + \varphi))$$

$$T(t) = k_c \frac{I_{fm} I_{am}}{2}\left[\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)\right]$$

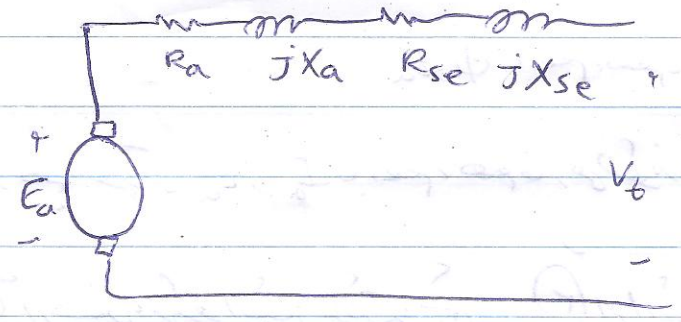
در شتاب یک موتور DC و یک موتور فرعی متغیر با زمان دارد هر چه اختلاف فاز زمانی بین جریان میدان و آرمیچر بیشتر شود شتاب متوسط کاهش می‌یابد

در موتور DC شنت I_{fm} کوچک است چون که اندوکتانس سیم پیچ شنت خیلی بزرگ است

در نتیجه زاویه φ کوچک خواهد بود اختلاف فاز زمانی بین جریان آرمیچر و جریان I_{fm} زیاد است پس استفاده از موتور DC شنت در تغذیه AC مناسب نیست.

* موتور DC سری مشکل اختلاف فازبین جریان I_{fm} و I_{am} وجود ندارد چون جریان

هردو یکی است.



$$T = K_c (I_{am} \sin \omega t)^2$$

$$T = \frac{1}{2} K_c I_{am}^2 (1 - \cos 2\omega t)$$

موتور DC سری نیز دارای نوسان در اثر تابع زمان است.

* برای اینکه نوسان کاهش یابد باید جریان I_{am} افزایش یابد برای اینکار راکتانس X_a و X_{se} را باید کم کنیم یا L_a و L_{se} را باید کم کرد $\leftarrow$ N_a و N_{se} را کم کرد

* تعداد سیم‌های سوزنی آرمیچر را زیاد کنیم (تعداد سیم‌های اسلاتی را کم کنیم) در این صورت راکتانس کم می‌شود.

* هسته استاتور در معرض فرکانس متغیر بوده حالا در معرض فرکانس 50 Hz یا 60 Hz خواهد بود

* باید هسته استاتور و روتور مورق شود برای اینکه تلفات هسته زیاد نشود

* L_f ذاتاً زیاد است اما L_a و L_{se} ذاتاً کم هستند.

* در تغذیه DC تلفات هسته فقط در روتور است در استاتور تلفات نداریم

* در تغذیه AC تلفات هسته هم در روتور و هم در استاتور وجود دارد

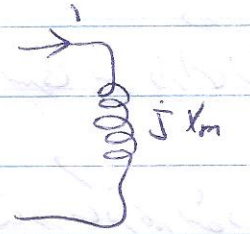
پس راندمان در DC بهتر از راندمان در AC است.

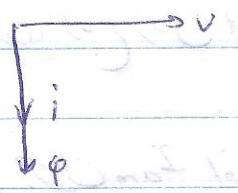
$$\bar{V}_t = \bar{E}_a + (R_a + R_{se})\bar{I}_a + j(X_a + X_{se})\bar{I}_a$$

$\bar{E}_a = k\bar{\varphi}\omega$ ← بعد از Φ و E_a بعد از

$\varphi \propto I_a$ در چه صورتی E_a و I_a با هم هم فاز می‌شوند؟

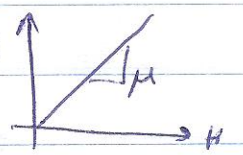
① اگر حلقه آهنی و اثر هیسترزیس نداشته باشیم ② اگر اثر آهنی نداشته باشیم

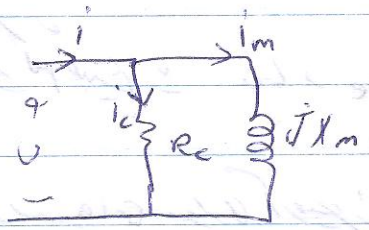


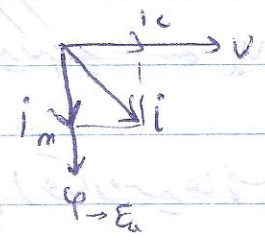


$$L_m = \frac{N^2}{R_m}$$

$$R = \frac{\ell}{\mu A}$$







حالتی را بررسی هیسترزیس داشته باشیم

I_a از E_a جلوتر است.

اگر هیسترزیس نداشته باشیم.