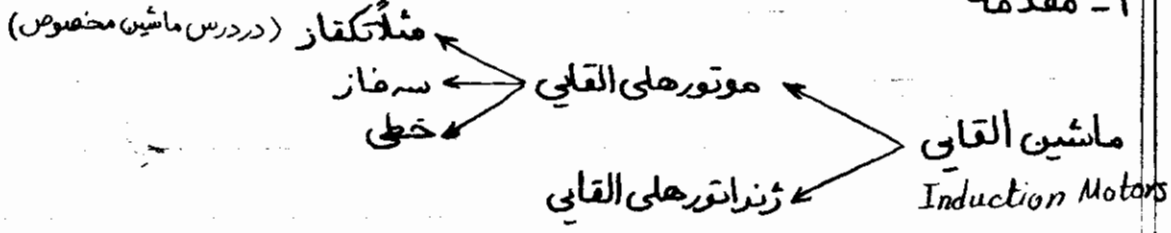
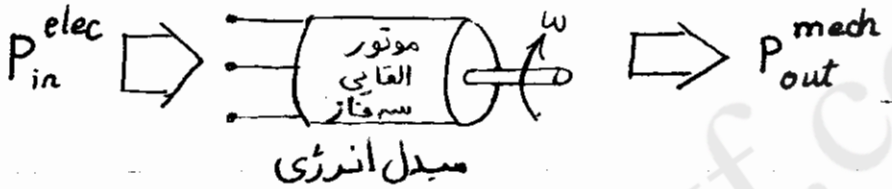
فصل دوم : ماشین های القایی سه فاز

۱- مقدمه



نام دیگر ماشین القایی ، ماشین آسنکرون است.



مدل انرژی

در موتور القایی خطی P_{in}^{elec} مستقیماً به P_{out}^{mech} تبدیل می‌شود و حرکت چرخشی نخواهد بود، بلکه بر روی یک خط حرکت خواهیم داشت. (در این ماشینها حرکت چرخشی به خطی تبدیل نمی‌شود و مستقیماً حرکت خطی را بوجود می آوریم).

ایستا	استاتور	Stator
چرخان	روتور	Rotor

اهمیت و مزایای این موتورها:

- ارزانی
- قابلیت اطمینان بالا
- محکمی و استقامت مکانیکی بالا
- سرعت نسبتاً ثابت

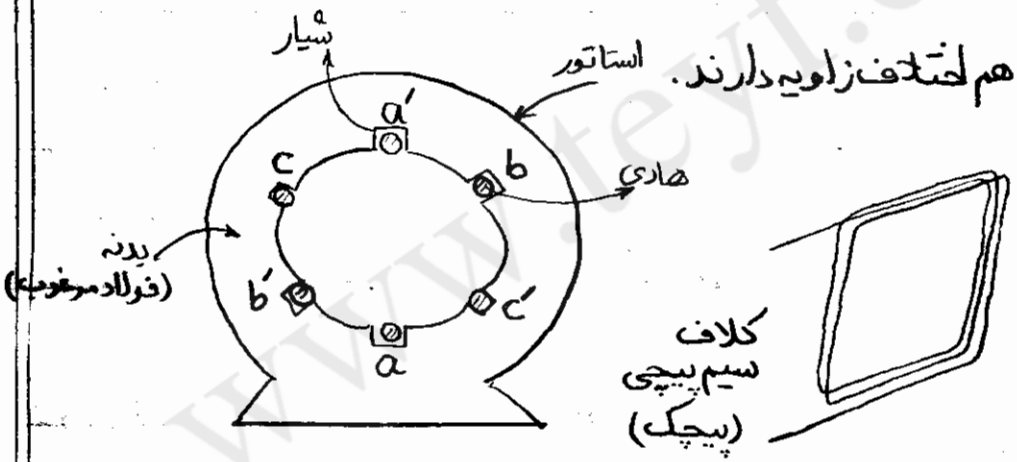
www.teyf.com

ـ بازدهی نسبتاً خوب

۲ـ مقدمه‌ای بر اجزای موتور القایی سه فاز

۲-۱ استاتور

سه ترمینال سه فاز با یکی از انواع اتصالها به شبکه وصل می شوند و اولین وظیفهٔ استاتور این است که بتواند سیم پیچی های سه فاز را در بر بگیرد. برای قرار گرفتن هادی ها در استاتور نیاز به شیار داریم. چون سیستم سه فاز است شیارها از نظر فیزیکی ۱۲۰° با هم اختلاف زاویه دارند.



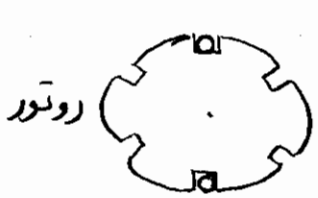
در عمل تعداد شیارها بسیار زیاد است چون تعداد سیم های زیاد را در یک شیار نمی توان قرار داد. لذا برای هر فاز چند شیار وجود دارد.

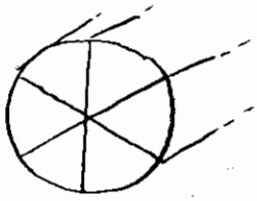
۲-۲ روتور

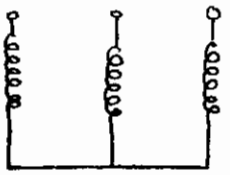
روتور ← سیم پیچی شده
روتور ← قفس سنجابی Squirel cage

در روتور سیم‌پیچی شده، کلافهای فازها با اختلاف ۱۲۰° برروی روتور قرار دارند

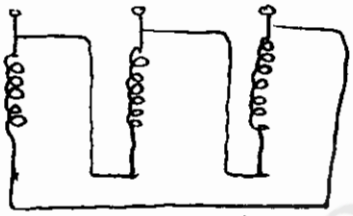
(به جای اینکه در بدنه استاتور قرار بگیرند)







اتصال ستاره



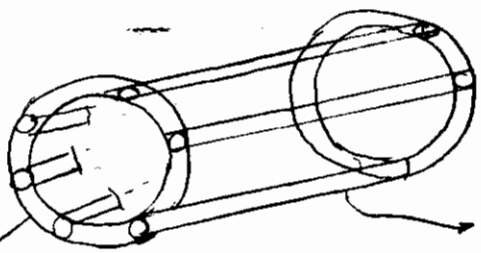
اتصال مثلث

اتصالات در مورد استاتور یا به صورت مثلث است یا به صورت ستاره.

در روتور اتصالات در دو انتها اتصال کوتاه هستند. (در واقع اتصال ستاره است که

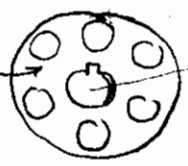
در یک انتها اتصال کوتاه شده است).

در روتور قفس سنجابی به جای استفاده از هادی از میله های هادی استفاده می‌شود.



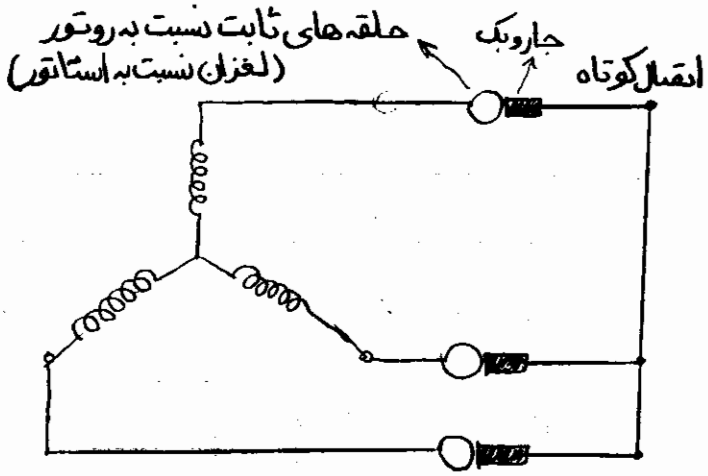
مشاهده می‌کنیم میله ها در دو انتها اتصال کوتاه شده اند و میله ها جای هادی را در

روتور گرفته اند.



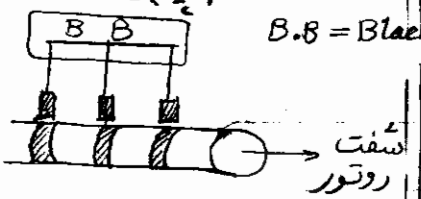
www.tevf.com

حلقه های لغزان: جزئی از اجزای روتور محسوب می شوند. که برای اتصال کوتاه کردن



به کار می روند.

در روتور سیم پیچی شده :

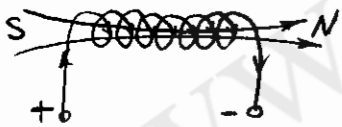


۳ـ میدان مغناطیسی گردان (Rotating Magnetic field) :

انواع میدان های مغناطیسی:

- ثابت — Fixed
- ضربانی (نوسانی) — pulsating
- گردان — Rotating

میدان ثابت :



سیم پیچ مقابل اگر با یک برق dc تغذیه شود، میدان ثابت تولید خواهد شد.

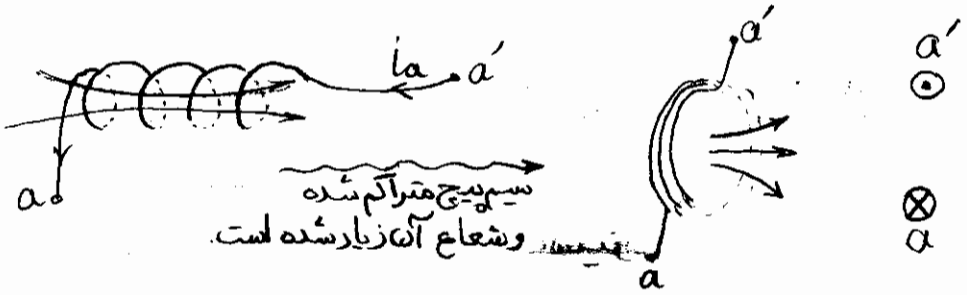
با توجه به اینکه جریان ثابت است، میدان نیز ثابت خواهد بود. (آنچه که در قطب های ماشین dc تولید می شود میدان ثابت است.

۳ـ۱ موج mmf از نوع pulsating :

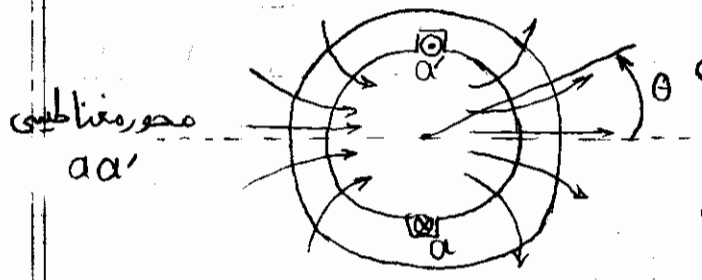
$$mmf = N.i \quad , \quad mmf = N.i_a = N I_m \sin \omega t$$

www.toyf.com

در اینجا جریان با زمان تغییر می کند و میدان تابع زمان خواهد بود.

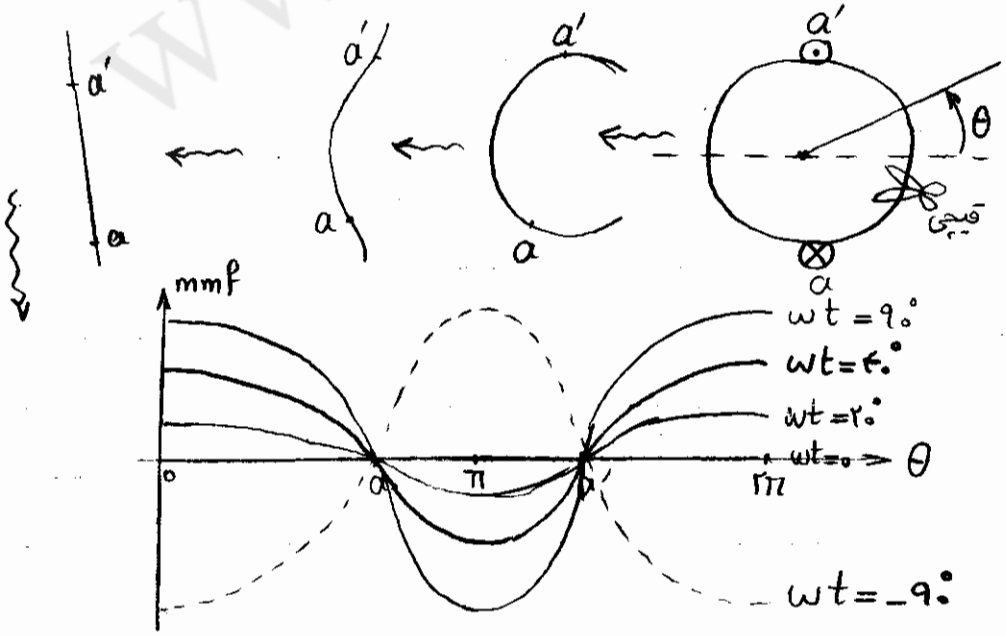


a و a′ در داخل شیارهای بدنهٔ استاتور قرار داده می گیرند.



آنچه که باید به آن توجه داشت این است که mmf تولید شده نه تنها اینکه تابع زمان است بلکه تابع مکان نیز خواهد بود به طوری که حداکثر مقدار mmf در راستای محور مغناطیسی aa′ و حداقل آن در راستای عمود بر این محور است.

$$mmf_a = N.i_a.\cos\theta \longrightarrow mmf_a = N.I_m \sin\omega t.\cos\theta$$



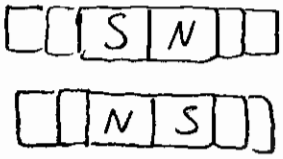
نکات :

- درهرلحظه اززمان mmf دارای یک توزیع کسینوسی درفضای استاتور است.

- (ازدیدگاه مکان) درهرمحلی mmf به صورت سینوسی تغییرمی کند.

معادل سازی میدان ثابت با آهن‌ربا :

معادل سازی میدان ضربانی با آهن‌ربا :

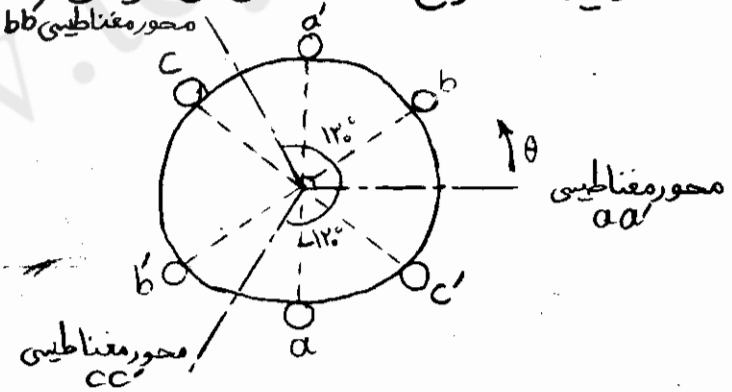


۲-۳ ترکیب سه موج mmf - میدان گردان

$i_a = I_m \cos \omega t$

$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$

$i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$



از لحاظ مکانی سه سیم پیچ اختلاف ۱۲۰° دارند واز لحاظ الکتریکی نیز به همین گونه است.

$$mmf = mmf_a + mmf_b + mmf_c$$

$$= N i_a \cos\theta + N i_b \cos(\theta - 120^\circ) + N i_c \cos(\theta - 240^\circ)$$

www.eyf.com

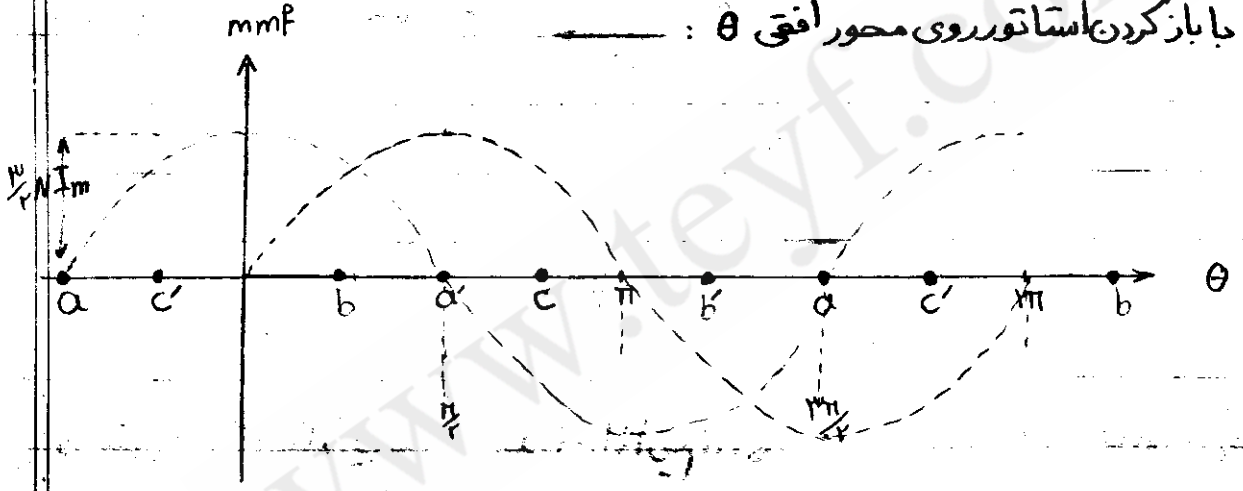
$$\longrightarrow \underset{mmf(\theta,t)}{mmf} = N I_m \cos\omega t \cos\theta + N I_m \cos(\omega t - 120^\circ)\cos(\theta - 120^\circ) +$$
$$+ N I_m \cos(\omega t - 240^\circ)\cos(\theta - 240^\circ)$$

$$= \frac{N}{2} I_m \cos(\omega t - \theta) + \underbrace{\frac{1}{2} N I_m \cos(\omega t + \theta)}_{①} + \underbrace{\frac{1}{2} N I_m \cos(\omega t + \theta - 240^\circ)}_{②}$$
$$+ \frac{1}{2} N I_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} N I_m \cos(\omega t - \theta) + \underbrace{\frac{1}{2} N I_m \cos(\omega t + \theta + 240^\circ)}_{③}$$

$$mmf = \frac{3}{2} N I_m \cos(\omega t - \theta) \qquad \longleftarrow ① + ② + ③ = 0$$

$$\longrightarrow mmf = \frac{\Lambda^3}{2} N I_m \cos(\omega t - \theta)$$

با باز کردن استاتور روی محور افقی θ : ⟵



$\omega t = 0 \longrightarrow mmf(\theta, 0) = \frac{3}{2} N I_m \cos\theta$

$\omega t = \pi/2 \longrightarrow mmf(\theta, \pi/2) = \frac{3}{2} N I_m \sin\theta$

- در هر لحظه mmf دارای یک توزیع سینوسی در فاصلهٔ هوایی است.

- دامنهٔ mmf دارای یک ماکزیمم دامنهٔ ثابتی است.

- در طول زمان موج mmf در امتداد محور θ حرکت می کند.

www.teyf.com

فلذا mmf در حال چرخش است و سرعت این چرخش را ω مشخص می‌کند.

۳-۳ سرعت سنکرون.

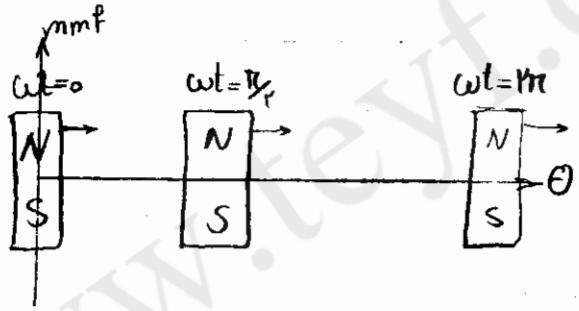
$$mmf(\theta, t) = \frac{3}{2} N I_m \cos(\omega t - \theta)$$

$\omega t = 0 \longrightarrow$ max mmf $\longrightarrow$ در $\theta = 0$

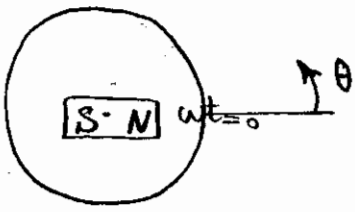
$\omega t = \pi/2 \longrightarrow$ max mmf $\longrightarrow$ در $\theta = \frac{\pi}{2}$

$\omega t = \pi \longrightarrow$ max mmf $\longrightarrow$ در $\theta = \pi$

$\omega t = 2\pi \longrightarrow$ max mmf $\longrightarrow$ در $\theta = 2\pi$



در نتیجه هنگامیکه یک سیکل تغذیه را داریم $0 \leq \omega t \leq 2\pi$ بردار mmf یک دور می‌چرخد.



و یا به عبارت دیگر در ۱ تناوب تغذیه میدان گردان $1\ ^{rev/s}$ و

$f\ ^{rev/s}$ " " " " $f\ ^{c/s = Hz}$ در

$60f\ ^{rpm = rev/min}$ " " " " $f\ ^{Hz}$ در

cycle — c/s — sec

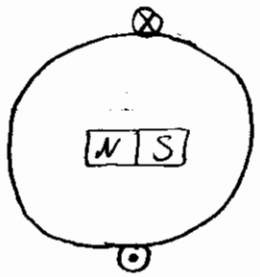
reverse per minute

در ماشین دوقطبی $n = 60f$ سرعت میدان گردان را مشخص می کند.

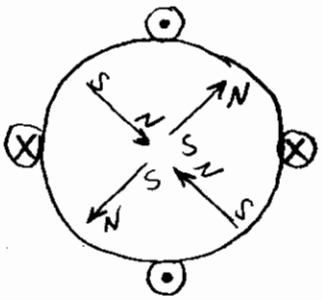
به عنوان مثال : $f=50^{Hz} \longrightarrow n = 3000\ rpm$

منظور از ماشین دوقطبی تعداد قطبهای در حال چرخش آهن ربا است.

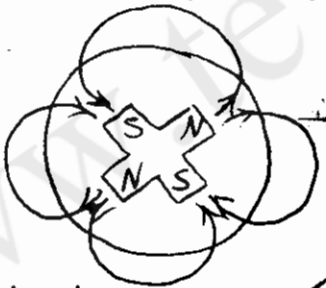
سیستم دوقطبی:



مربوط به یک فاز :



(هر فاز در ۴ شیار قرار می گیرد و جهت جریانها مطابق شکل است).

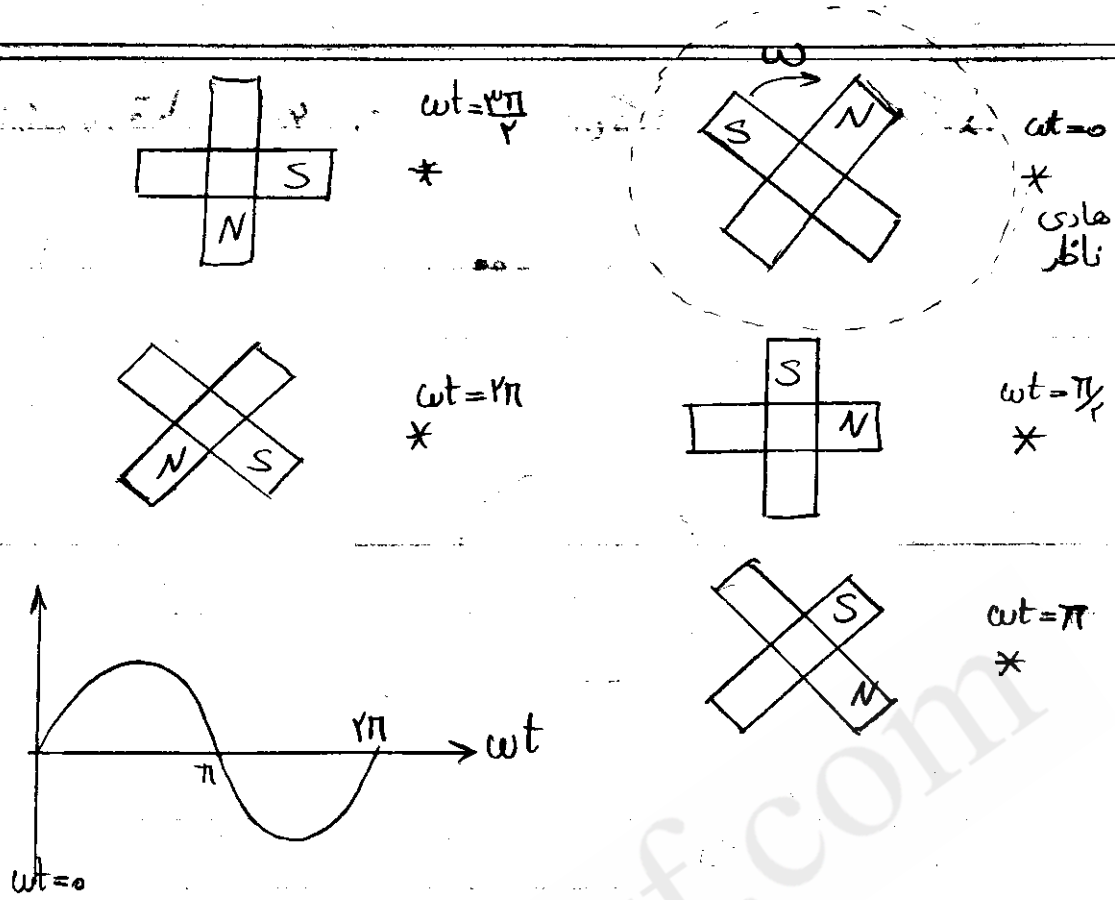


میدان ۴ قطبی ثابت

در واقع آنچه که بوجود می آید یک سیستم ۴ قطبی است. لذا اگر سیم بندی ساخاز را به شکل بالا داشته باشیم میدان ۴ قطبی فوق شروع به چرخش خواهد کرد و یک میدان ۴ قطبی گردان داریم.

حال یک های ناظر بر روی استاتور را در نظر می گیریم :

www.teyf.com



حال اگر یک سیکل برثانیه تغذیه استاتور انجام شود، سرعت میدان گردان

$\frac{1}{2}$ rev/s خواهد بود و اگر f هرتز تغذیه استاتور انجام شود، سرعت میدان گردان

$\frac{f}{2}$ rev/s خواهد بود و نهایتاً:

سرعت میدان گردان در یک ماشین ۴ قطبی $n=\left(\frac{۶۰f}{۲}\right)$ rpm

سرعت میدان گردان در یک ماشین P قطبی از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$n=\frac{۶۰f}{(P/۲)} \quad (rpm)$$

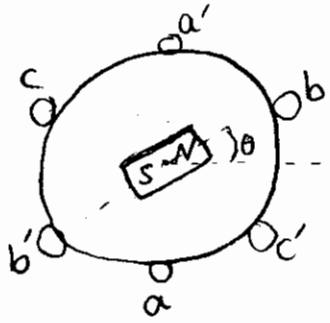
این سرعت میدان گردان، سرعت سنکرون نامیده می‌شود. این بدان معنی است که (همزمان)

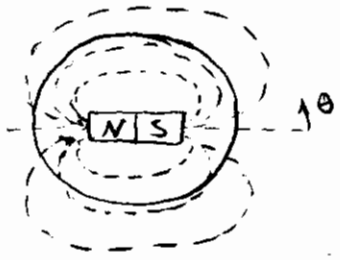
میدان گردان همزمان با فرکانس شبکه (تغذیه) تغییر می‌کند. لذا سرعت و فرکانس

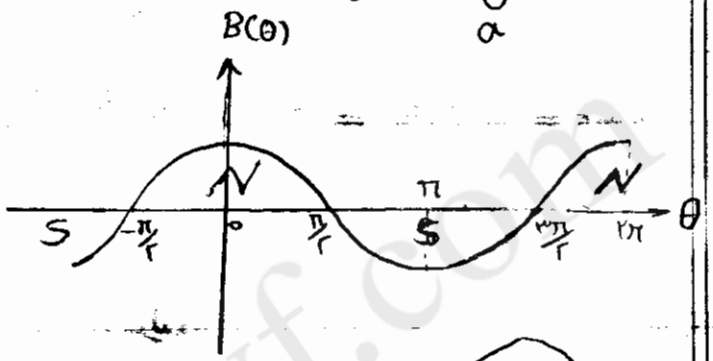
معادل یکدیگر خواهند بود.

۴- ولتاژ القاشده در استاتور (E_s)

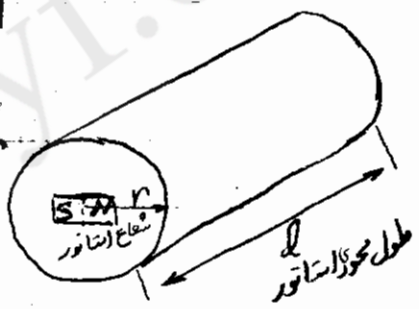
$$B(\theta) = B_{max} \cdot \cos\theta$$







سطح جانبی استاتور $= l \cdot (2\pi r)$

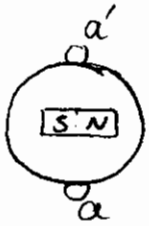


سطح مقابل یک قطب $= A_p = l\pi r$

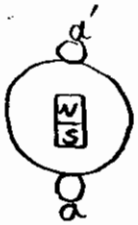
شار مربوط به یک قطب $\Phi_p = B_{av} \cdot A_p$

$$\longrightarrow \Phi_p = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi/2}^{\pi/2} B(\theta)\cdot d\theta \cdot A_p$$

$$\longrightarrow \Phi_p = \frac{2}{\pi} B_{max} \cdot l\pi r = 2B_{max} \cdot l \cdot r$$



For $\omega t = 0$: شار در برگیرنده $= N\Phi_p$



For $\omega t = \pi/2$: شار در برگیرنده $= 0$

$$\longrightarrow \underset{\text{فاز A}}{\text{شار در برگیرندهٔ}} = \lambda_a = N\Phi_p \cos\omega t$$

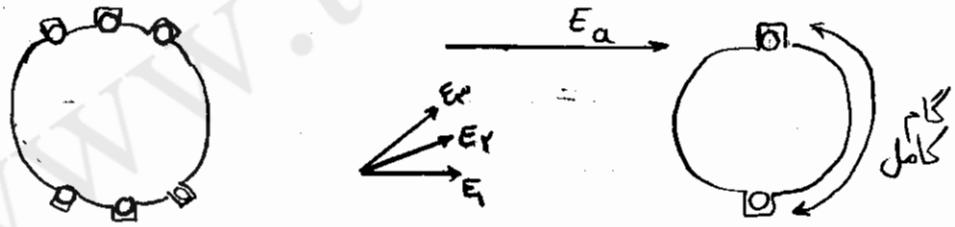
$$e_a = -\frac{d\lambda_a}{dt} \longrightarrow e_a = \underbrace{\omega N \Phi_p}_{E_{max}} \sin\omega t$$

$$\longrightarrow \begin{cases} e_a = E_{max}\cdot \sin\omega t \\ e_b = E_{max}\cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_c = E_{max}\cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

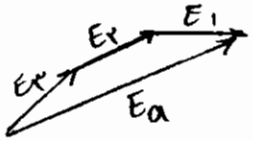
$$E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = 4.44 N_{ph} \Phi_p f$$

(N_{ph}: تعداد کل حلقه‌های فاز (در یک شیار)؛ Φ_p: شار مربوط به یک قطب)

ازنظر تئوری تمام کلاف‌های یک فاز در یک شیار قرار دارند ولذا در رابطهٔ بالا N_{ph} بیانگر این امر است. امّا در عمل این امر امکان پذیر نیست و رابطه بالا باید اصلاح گردد:



همچنین خواهیم دید که اگر تمام کلاف‌ها در یک شیار قرار داشته باشند شکل موج mmf سینوسی نخواهد شد و به همین علت در جهت بهبود این امر، کلاف‌ها را در چند شیار قرار می‌دهیم. با توجه به اینکه کلاف‌ها در حالت بالا سری با هم قرار گرفته‌اند لذا



E_1 ، E_2 ، E_3 باید با هم جمع شوند.

www.teyf.com

با توجه به اینکه طول E_a حاصل در چند شیار کوچکتر از E_a یک شیار است، لذا مفهوم ضریب سیم پیچی مطرح می‌شود:

Winding factor

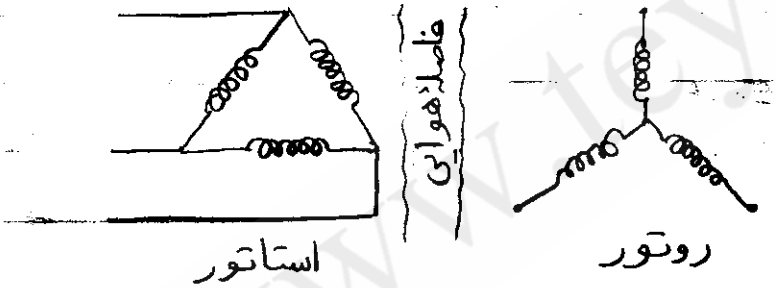
K_W = ضریب سیم پیچی

$$\longrightarrow E_{rms} = 4.44 \cdot N_{ph} \cdot \Phi_p \cdot f \cdot K_W \quad , \quad 0.85 < K_W < 0.95$$

هرچه تعداد شیارها بیشتر می‌شود، سیمها (کلافها) بازتر شده و K_W کمتر می‌شود.

۵- عملکرد موتور در حالت سکون

۵-۱ نسبت تبدیل



$$E_{(1)} = 4.44 \, N_1 \cdot \Phi_p \, f_1 \cdot K_{W_1}$$

اولیه - استاتور

فرض کنیم روتور مدار باز باشد (این شرط برای این است که روتور نچرخد و ساکن بماند)

چون تغییرات شار در استاتور داریم لذا در سیم پیچی روتور ولتاژ القاخواهد شد:

$$E_{(2)} = 4.44 \cdot N_2 \cdot \Phi_p \cdot (f_2) \, K_{W_2}$$

ثانویه - روتور

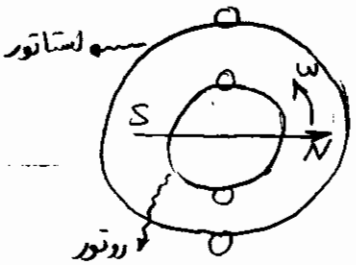
f_1

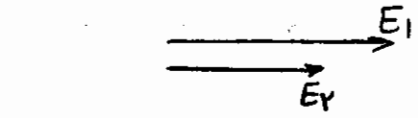
در حالت سکون : $f_2 = f_1$

نسبت تبدیل $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 . K_{W1}}{N_2 . K_{W2}}$

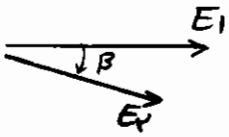
نسبت تبدیل موتور القایی $\frac{K_{W1}}{K_{W2}} \simeq 1 \longrightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$

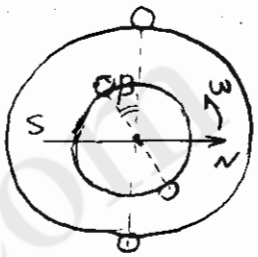
۵-۲ جابجایی فاز





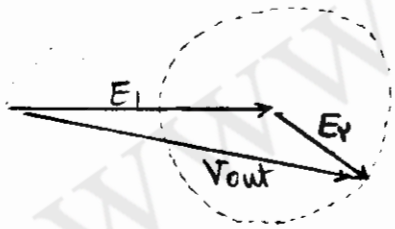
=

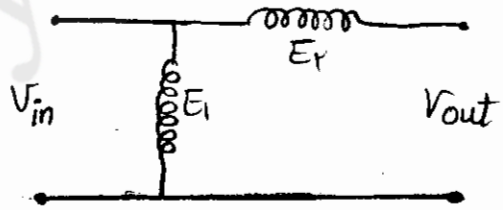




۵-۳ رگولاتور ولتاژ القایی Induction Voltage Regulator

E_1 و E_2 باهم سری شده اند :





می بینیم که دامنهٔ ولتاژ خروجی نیز مانند فاز آن درحال تغییر است. تقریباً دستگاهی مشابه دستگاه بالا دیده ایم که همان اتوترانس بود.

مقایسه نسبت به اتوترانسفورماتور :

* در اتوترانس شیفت فاز نداشتیم ولی در اینجا داریم.

www.teyf.com

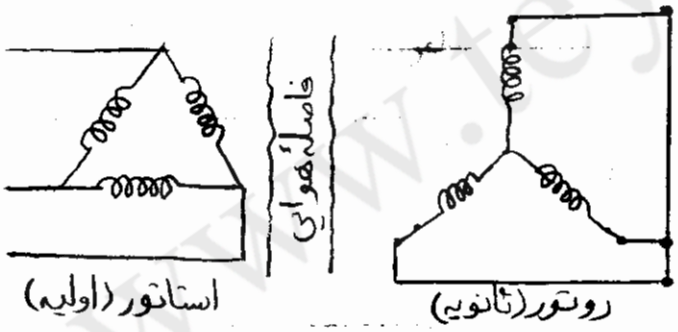
* در اتوترانس تغییرات ولتاژ پله ای بود ولی در اینجا تغییرات ولتاژ پیوسته است.

* جریان مغناطیس کننده در اینجا بیشتر از اتوترانس است چون فاصلهٔ هوایی در اینجا باعث این امر می‌شود.

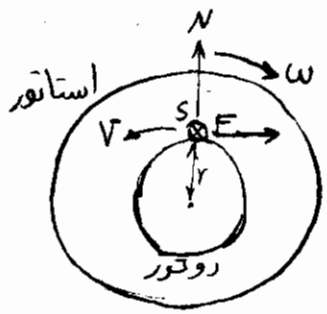
* و به علت وجود فاصلهٔ هوایی نیز اندوکتانس نشتی بیشتر از اتوترانس است.

* چنین دستگاهی دارای هزینهٔ بیشتری از اتوترانس است. لذا در عمل از این دستگاه استفاده نمی‌شود.

۶- عملکرد موتور القایی سه فاز در حالت کار عادی



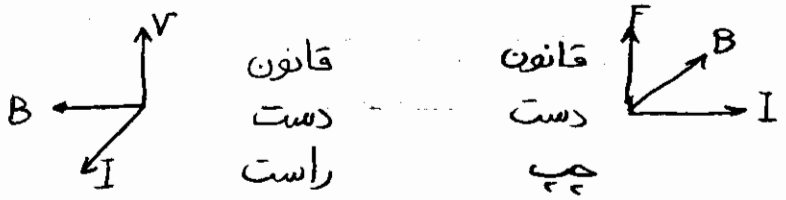
حال چون روتور را اتصال کوتاه کرده ایم علاوه بر القا ولتاژ، چون مسیر جریان بسته است، در روتور جریانی نیز القا می‌شود.



بنابر قانون دست راست اگر یک هادی در داخل میدانی حرکت کند در آن جریان بوجود می‌آید. حال در اینجا خود میدان

حرکت می‌کند. بنابراین از دید ناظری که بر روی میدان گردان سوار است، اگر میدان در جهت عقربه های ساعت می چرخد، هادی در جهت خلاف آن خواهد چرخید.

لذا بنابر قانون دست راست جریان هادی به سمت داخل صفحه خواهد بود.



بنابر قانون دست چپ اگر این یک هادی در داخل میدان جریان عبور کند، به آن نیرو وارد خواهد شد. لذا نیروی F طبق این قانون به هادی روی روتور وارد می‌شود. لذا

* روتور هم جهت با میدان گردان ولی با سرعت کمتر از سرعت میدان گردان (سرعت سنکرون) می‌چرخد. به همین دلیل به آن موتور آسنکرون گفته می‌شود.

حال ببینیم چرا روتور نمی‌تواند با سرعت سنکرون بچرخد؟ چون اگر هادی با همان سرعت سنکرون بچرخد دیگر تغییرات میدان را احساس نخواهد کرد و در نتیجه نیروی به آن وارد نمی‌شود. در واقع روتور در هر لحظه دارای لغزش است.

۷- لغزش S (Slip)

۱-۷- تعریف لغزش همان نسبت اختلاف دو سرعت به سرعت سنکرون است:

$$S=\frac{n_s-n_r}{n_s} \quad [rpm]$$

1 rpm 2π rad/min

n rpm $2n\pi$ rad/min

n rpw $\omega=\frac{2n\pi}{60}$ rad/s

$$\longrightarrow \quad S=\frac{\omega_s-\omega_r}{\omega_s} \quad [rad/s]$$

۷-۲ حدود تغییرات لغزش (درحالت موتور)

حالت راه اندازی یا سکون : در این حالت سرعت روتور صفر است. $n_r=0$

$$\longrightarrow \quad S=\frac{n_s-0}{n_s}=1$$

با توجه به اینکه در نهایت سرعت روتور می تواند نزدیک به سرعت سنکرون بشود لذا :

$$n_r \longrightarrow n_s \longrightarrow \quad 0<S\leqslant 1 \quad , \quad 0\leqslant n_r<n_s$$

۷-۳ درصد لغزش

$$S\,\%=\frac{n_s-n_r}{n_s}\times 100$$

۷-۴ لغزش rpm یا rad/s .

$$S=n_s-n_r$$

۷-۵ ولتاژ و فرکانس روتور

درحالت سکون $S=1$, $f_1=f_2$

$$n_s=\frac{60f}{(P/2)} \quad ,$$

برفرض درحالت $n_s=n_r$ باشیم :

$$\xrightarrow{S=0} \quad f_2=0$$

$$\longrightarrow \quad f_2=sf_1$$

در نتیجه سرعت روتور میزان فرکانس الکتریکی در روتور را تعیین می کند.

www.teyf.com

رابطه بالا بیان می‌کند که هرچه s کوچکتر باشد (روتور) شدت تغییرات میدان استاتور را کمتر احساس می‌کند

$E_{2S} = 4{,}44 N_2 \phi_P f_2 k_{W_2}$ ← درحالت سکون

$f_2 = s f_1$

$f_1 = 1$

ولتاژ القاشده در روتور درحالت سکون ← $= E_2 = 4{,}44 N_2 \phi_P f_1 k_{W_2}$

$E_{2S} = sE_2$ ، E_{2S} ولتاژ القاشده در روتور درحالت لغزش s

۶-۷ سرعت میدان گردان ناشی ازجریان روتور

سرعت میدان گردان استاتور $n_S = \frac{60f}{(P/2)} = \frac{120 f_1}{P}$

هنگامیکه ازهادی‌های روتور جریانی عبور می‌کند همانند استاتور، میدان گردانی نیز توسط روتور تولید می‌شود.

سرعت میدان گردان روتور $= n_2 = \frac{60 f_2}{(P/2)} = \frac{120 s f_1}{P}$

$\longrightarrow n_2 = s n_S$

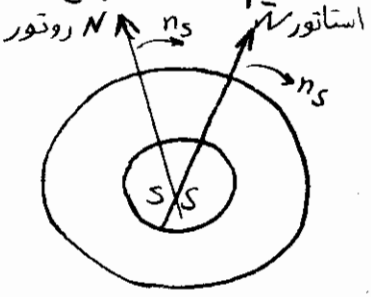
$s = \frac{n_S - n_r}{n_S}$ $\longrightarrow n_r = (1-s) n_S$

$n_2 + n_r = s n_S + (1-s) n_S = n_S$

درنتیجه سرعت میدان گردان روتور نسبت به ناظر ساکن در استاتور همان سرعت سنکرون

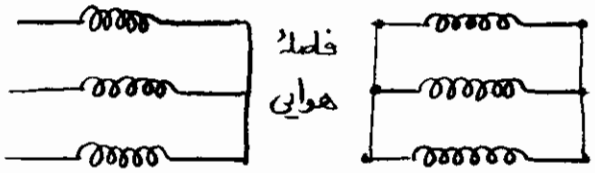
www.tejf.com

است. پس در این موتور دو میدان داریم که هر دو با یک سرعت می چرخند

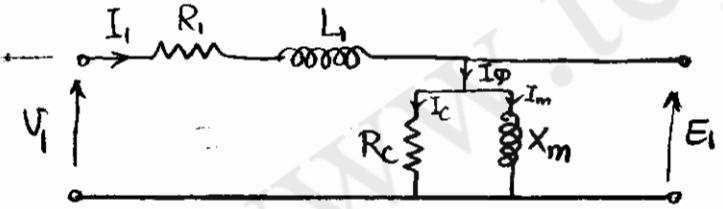


۸- موتور القایی سه فاز معکوس ؟

۹- مدار معادل



۹-۱ مدار استاتور :



V_1 : ولتاژ مربوط به یک فاز استاتور که در حالت مثلث همان ولتاژ خط است.

R_1 : مقاومت هر فاز سیم پیچ استاتور است.

L_1 : اندوکتانس نشتی هر فاز سیم پیچ استاتور است.

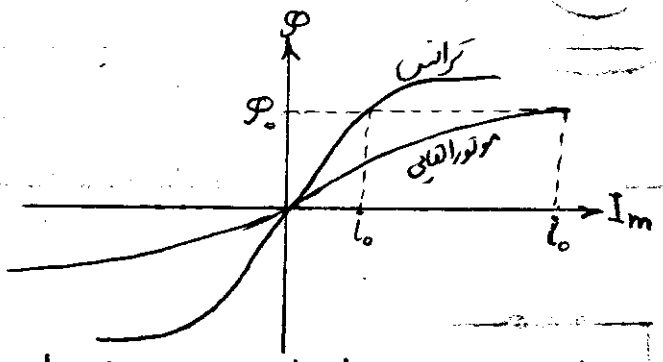
L_m : اندوکتانس مغناطیس کننده در هر فاز استاتور است.

www.teyf.com

R_0 : مقاومت معادل تلفات هسته در هر فاز سیم پیچ استاتور است.

E_1 : ولتاژ القا شدهٔ حاصل از میدان گردان در استاتور.

جریان تحریک :



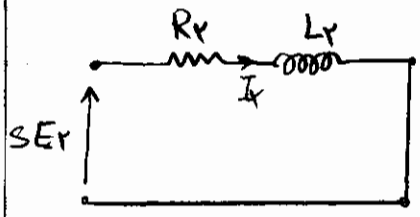
* مشاهده می‌کنیم که جریان تحریک در موتور القایی در مقایسه با ترانس خیلی بیشتر است و لذا در مدار معادل شاخه I_m را نمی‌توان حذف کرد. جریان تحریک در موتور القایی حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد جریان نامی است.

* از آنجائیکه شیب نمودار نشان دهندهٔ L_m است مشاهده می‌کنیم L_m در موتور کوچکتر از ترانس است. چون رلوکتانس در موتور القایی بزرگتر از ترانس است.

* X_1 (سارنشتی) در موتور بیشتر از ترانس است چون :

۱- فاصلهٔ هوایی در موتور بیشتر است. ۲- توزیع سیم پیچی ها در بیش از یک شیار که باعث می‌شود سیم ها تمام شار را نتوانند در برگیرند.

۲-۹ مدار معادل روتور



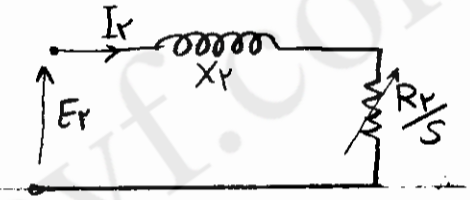
ولتاژ القا شده در روتور برابر sE_2 است. فرکانس روتور برابر $sf_1=f_2$

$$\longrightarrow L_2\omega_2=L_2.2\pi f_2=L_2.2\pi sf_1=sX_2$$

راکتانس نشتی هر فاز روتور در حالت سکون : $X_2=L_2.2\pi f_1$

$$\longrightarrow I_2=\frac{sE_2}{R_2+jsX_2} \quad , \quad \text{تلفات مس روتور} : P_2=R_2I_2^2$$

$$\div s \longrightarrow I_2=\frac{E_2}{\frac{R_2}{s}+jX_2}$$



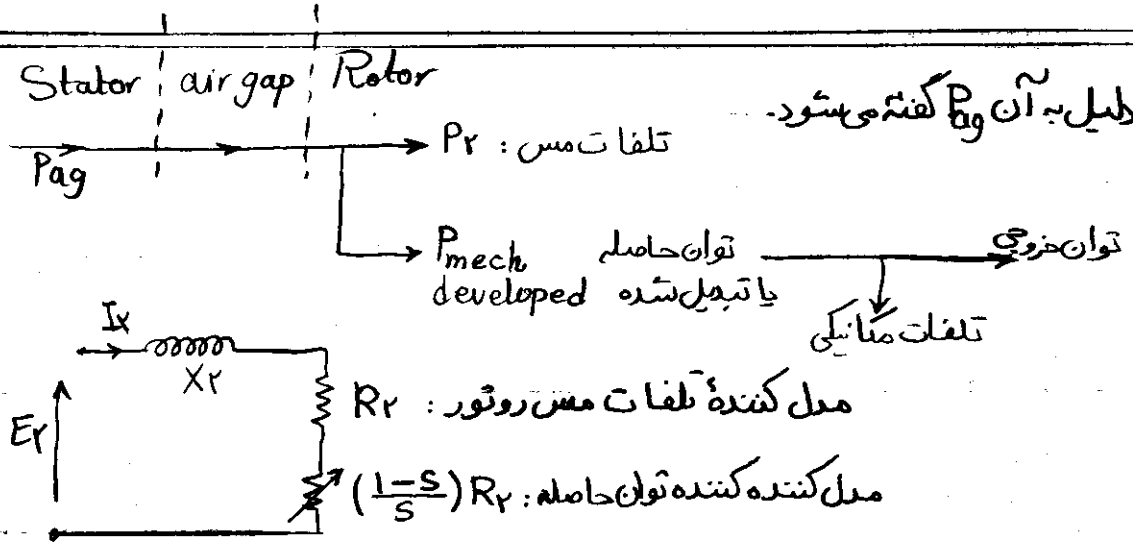
$\frac{R_2}{s}$ مقاومت متغیر است. چون s تغییر می‌کند.

$$\longrightarrow X_2=2\pi f_1L_1$$

با توجه به X_2 می‌توان فهمید که فرکانس مدار f_1 است. در نتیجه با عمل تقسیم بر s، فرکانس روتور و استاتور را برابر کرده‌ایم و حال می‌توانیم آنها را به هم وصل کنیم. مدار معادل بالا از دیدگاه استاتور است.

$$\text{توان مصرفی در مدار روتور از دید استاتور} = P_{\underset{\text{air gap}}{(ag)}}=\frac{R_2}{s}(I_2)^2$$

چنین توان مصرفی از طریق خاصلهٔ هوایی از استاتور به روتور منتقل شده است و به همین

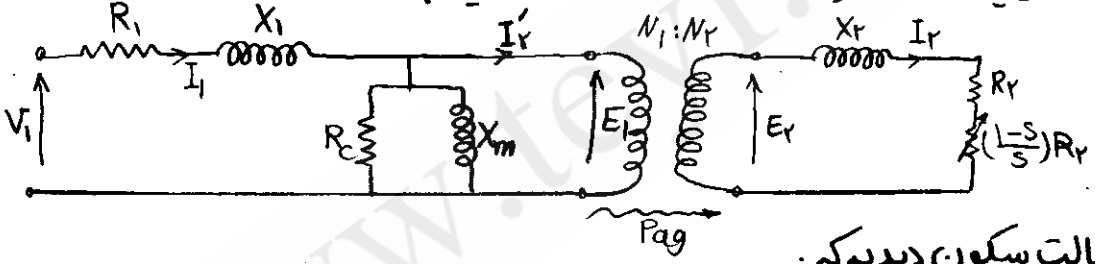


دلیل به آن P_{ag} گفته می‌شود.

$$\longrightarrow P_{mech} = (1-S)\,P_{ag} \quad , \quad P_{۲} = S P_{ag}$$

در نتیجه هرچه S کوچکتر باشد توان مکانیکی بیشتری منتقل می‌شود.

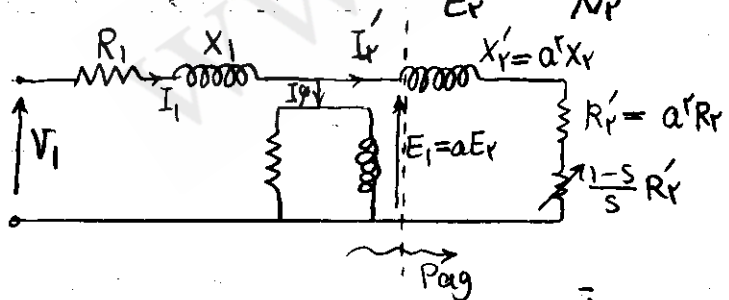
۳-۹ ترکیب مدارها (مدار معادل T موتور القایی)



در حالت سکون دیدیم که :

$$\frac{E_1}{E_۲} = \frac{N_1}{N_۲}$$

با انتقال پارامترهای ثانویه به اولیه (همانند ترانس) :



* مدار معادل بدست آمده مربوط به یک فاز القایی موتور است و لذا تمام پارامترهای آن مربوط به یک فاز است. در این هوا رفرکانس برابر فرکانس تغذیه است.

$$P_{ag} = \frac{R'_۲}{S} I'^{۲}_{۲} \quad , \quad P_{۲} = S P_{ag} \quad , \quad P_{mech} = (1-S) P_{ag}$$

www.tevt.com

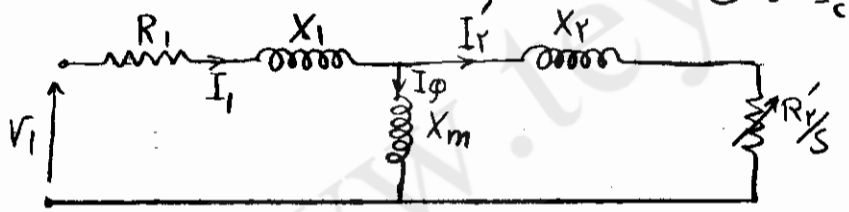
۱۰- مدارهای معادل ساده شده

۱-۱۰ مدار معادل تقریبی L و L ساده.

با توجه به اینکه X_1 موتور بزرگتر از ترانس است لذا افت ولتاژ دوسر X_1 بیشتر از ترانس است.

همچنین چون X_m موتور کوچکتر از ترانس است لذا جریان عبوری از آن بیشتر از ترانس خواهد بود. درنتیجه نمی توانیم شاخه X_m را به اول مدار بیاوریم (مدار معادل L) و اگر این کار را انجام دهیم خطای بزرگی را مرتکب می شویم.

۲-۱۰ مدار معادل پیشنهادی IEEE :



درمقایسه با مدارهای قبلی می بینیم که R_c حذف شده است. چون فرکانس f_1 ثابت است اگر V_1 ثابت باشد، شار ثابت بوده و درنتیجه تلفات هسته مقدار ثابتی خواهد داشت.

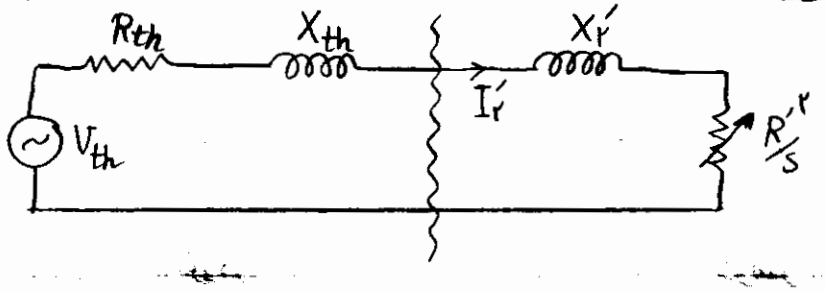
$$\left.\begin{matrix} V_1 = cte \\ f_1 = cte \end{matrix}\right\} \longrightarrow P_{Core} = cte$$

$$\left.\begin{matrix} n = cte \longrightarrow P_{f\&w} = cte \\ \text{تلفات مکانیکی} \quad \text{تهویه و اصطکاک} \end{matrix}\right\} \text{تلفات ثابت}$$

$$\longrightarrow P_{out} = P_{mech} - P_{core} - P_{f\&w}$$

چون فرکانس روتور کمتر از استاتور است لذا تلفات هستهٔ روتور قابل صرفنظر کردن است.

مدار معادل تونن IEEE:

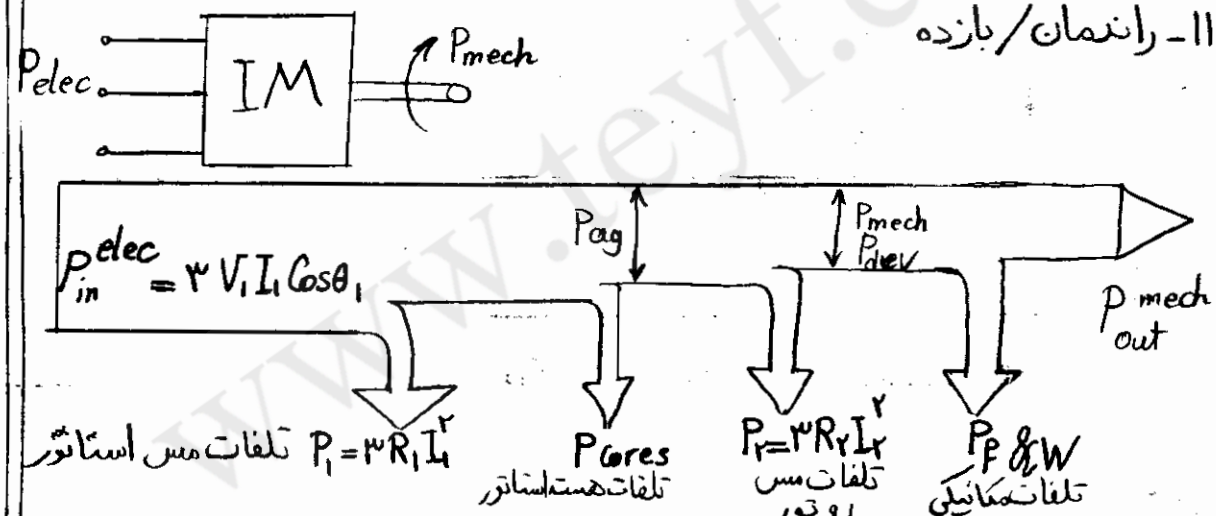


$$V_{th} = V_1 \cdot \frac{jX_m}{R_1 + j(X_m + X_1)} \simeq V_1 \cdot \frac{X_m}{X_m + X_1} \quad , \quad R_1 \ll X_m + X_1$$

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$

$$R_1 \ll X_m + X_1 \\ X_1 \ll X_m \longrightarrow R_{th} = R_1 \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m}\right)^{?} \quad , \quad X_{th} = \frac{X_1 X_m}{X_1 + X_m} \simeq X_1$$

۱۱- راندمان / بازده



$$\longrightarrow P_{rotating}^{\text{چرخشی}} = P_{F\&W} + P_{core}$$

$$T_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$$

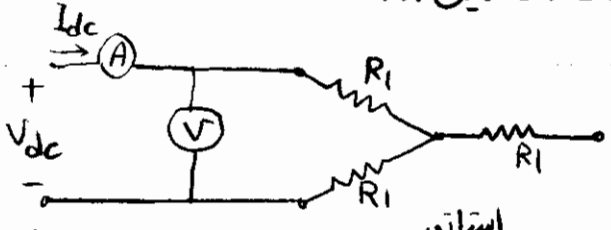
$$T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_r}$$

www.teyf.com

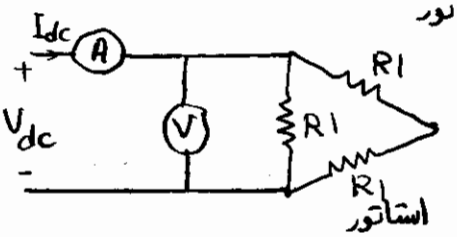
۱۲- تعیین/تخمین پارامترهای مدار معادل

هدف : X_m , X'_2 X_1 R'_2 R_1

۱-۱۲ آزمایش DC ... هدف : تخمین R1



$$R_{1dc} = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}}$$

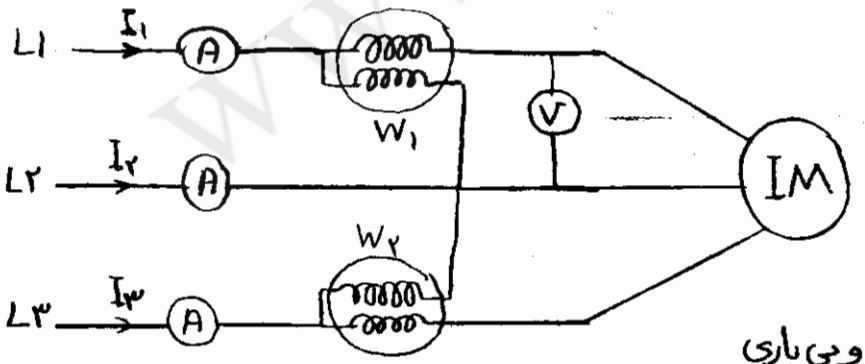


$$R_{1dc} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$$

$$R_1 = 1{,}3\ R_{1dc}$$

چون جریان dc و ثابت است X_1 دیده نمی‌شود و چون میدان ثابت است روتور دیده نمی‌شود.

۲-۱۲ آزمایش بی باری



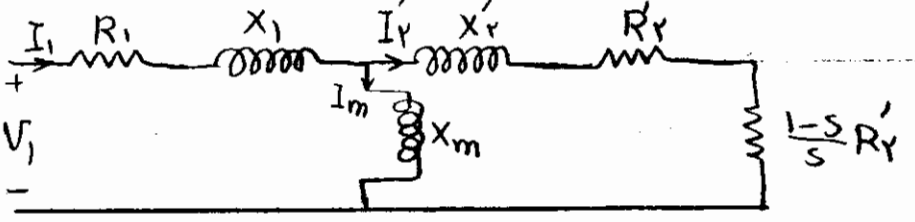
هدف : تلفات چرخشی

شرایط آزمایش :

ولتاژ و فرکانس نامی و بی باری

بخاطر تلفات هسته

$$P_{in} = P_1 + P_{core} + P_2 + P_{f\&W} + P_{out}^{0}$$



در وضعیت بی باری سرعت روتور بسرعت سنکرون نزدیک می شود. $n_r \longrightarrow n_s$ ، $s \longrightarrow 0$

در نتیجه مقاومت $\frac{1-s}{s} R_2'$ بسیار بزرگ شده و I_2' به سمت صفر میل می کند. در نتیجه

تلفات مس روتور به صفر میل می کند. $I_2' \longrightarrow 0$ ، $R_2 I_2'^2 \longrightarrow 0$ ، $P_2 \longrightarrow 0$

از دیدگاه این آزمایش معادل آزمایش مدار باز ترانس است. چون ثانویه مدار باز شده ترانس

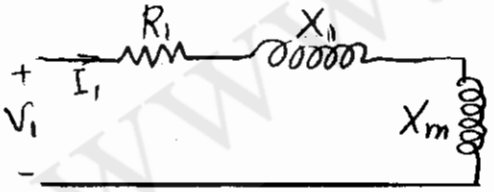
است. $P_{rotating} = P_{core} + P_{f\&w}$

$\longrightarrow P_{in} = P_1 + P_{rotating}$

$P_1 = 3R_1 I_1^2$

P_{in} را واتمترها مشخص می کنند.

P_1 برابر $3R_1 I_1^2$ است که R_1 از آزمایش dc و I_1 از آمپرمتر بدست می آید. در اینجا بهتر است که $I_1 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}$ (نکته آزمایشگاهی). پس تلفات چرخشی بدست می آید.



معمولاً: $R_1 \ll X_1 + X_m$

$\longrightarrow Z_{NL} \simeq X_1 + X_m$ ← ولتاژ اندازه گیری شده تقسیم بر جریان اندازه گیری شده.

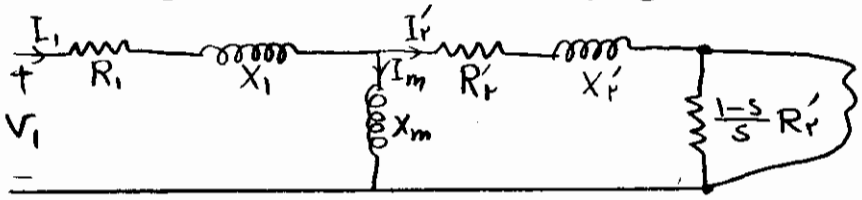
۳-۱۲ آزمایش روتور قفل شده Locked Rotor / Blocked Rotor Test.

هدف: پارامترهای باقیمانده:

شرایط آزمایش: $n_r = 0$ ، اعمال ولتاژی به استاتور جهت عبور جریان اسمی.

www.teyf.com

مدار آزمایش همان مدار آزمایش بی باری است با این تفاوت که در این حالت روتور قفل شده



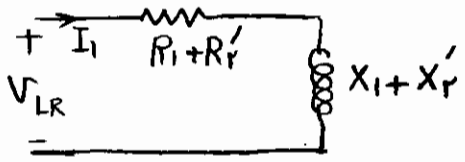
است.

اتصال کوتاه ثانویه ⟵ $\frac{1-s}{s}R'_2 = 0$ ⟵ $s=1$ ⟵ $n_2 = 0$

بنابراین این آزمایش مشابه آزمایش اتصال کوتاه ترانس است.

⟵ $I_\varphi \ll I'_2$

بنابراین مدار معادل به شکل مقابل



دری آید: $P_{in} = 3(R_1 + R'_2) I_1^2$ (R_{LR})

P_{in} از واتمترها بدست می آید. جریان نامی I_1 از آمپرمترها خوانده می شود و لذا آنچه که بدست می آید R_{LR} است.

$$Z_{LR} = \frac{|V_{LR}|}{I_1} \longrightarrow X_{LR} = \sqrt{Z_{LR}^2 - R_{LR}^2}$$

⟵ $\begin{cases} R_{LR} = R_1 + R'_2 \\ X_{LR} = X_1 + X'_2 \end{cases}$

آزمایش در فرکانس ۵۰Hz نمی تواند انجام شود:

$n_2 = 0 \longrightarrow s = 1$

⟵ $f_1 = f_2$

در شرایط نامی: $f_2 = sf_1$

s حدود چند درصد است.

نوع روتور	X_1	X'_2
روتور سیم پیچی شده	$\frac{1}{2}X_{LR}$	$\frac{1}{2}X_{LR}$
نوع قفس سنجابی: کلاس A	$\frac{1}{2}X_{LR}$	$\frac{1}{2}X_{LR}$
کلاس B	$0.4X_{LR}$	$0.6X_{LR}$
کلاس C	$0.3X_{LR}$	$0.7X_{LR}$
کلاس D	$\frac{1}{2}X_{LR}$	$\frac{1}{2}X_{LR}$

f_{test} = فرکانس آزمایش (تغذیه استاتور) = $\frac{1}{4}$ فرکانس نامی.

www.teyf.com

$$\hat{X}_{LR}=\frac{P_1}{P_{test}}X_{LR}=\frac{P_1}{P_{test}}(X_1+X'_2)=\hat{X}_1+\hat{X}'_2$$

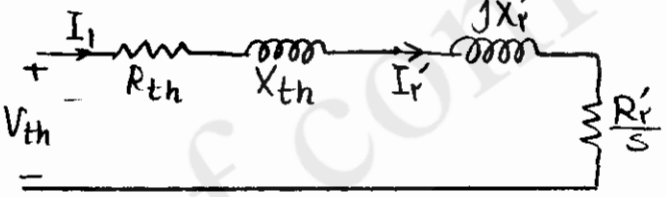
اگر آزمایش در فرکانس نامی انجام نشود باید $\hat{X}_{LR}$ محاسبه شود.

۱۳- منحنی مشخصه‌های موتور القایی

۱-۱۳ رابطهٔ گشتاور (T-n) یا (T-S)

$$T_{mech}=\frac{P_{mech}}{\omega_r}=\frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s}\quad,\quad P_{ag}=\frac{R'_2}{s}I'^2_2$$

$$\longrightarrow T_{mech}=\frac{3R'_2I'^2_2}{s\omega_s}$$

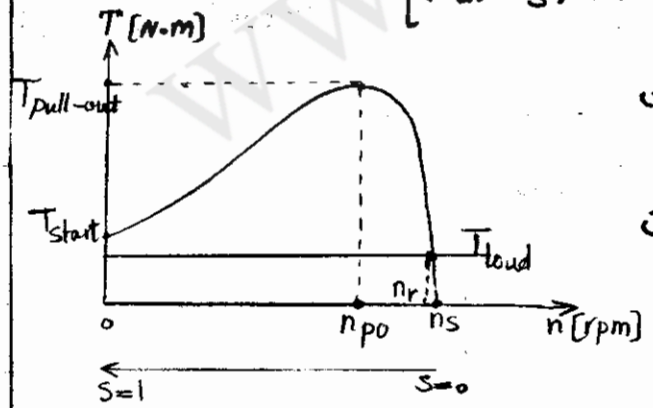


$$|I'_2|=\frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th}+\frac{R'_2}{s})^2+(X_{th}+X'_2)^2}}$$

$$\longrightarrow T_{mech}=\frac{3V_{th}^2\cdot\frac{R'_2}{s}}{\omega_s\left[(R_{th}+\frac{R'_2}{s})^2+(X_{th}+X'_2)^2\right]}$$

یک رابطهٔ مهم کاربردی در موتورهای القایی:

محل تقاطع منحنی مشخصه بار و منحنی گشتاور سرعت موتور، نشان‌دهنده سرعت چرخش روتور است.



$$n_r\longrightarrow n_s\quad,\quad s\longrightarrow 0$$

$$\longrightarrow T_{mech}=\frac{3V_{th}^2\frac{R'_2}{s}}{\omega_s(\frac{R'_2}{s})^2}\longrightarrow T_{mech}\simeq\frac{3V_{th}^2}{\omega_sR'_2}s$$

www.icyf.com

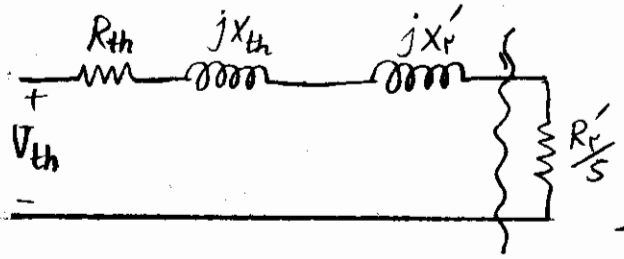
رابطهٔ تقریبی فوق نشان می‌دهد وقتی که $s \to 0$ آن‌گاه رابطهٔ سرعت - گشتاور یک رابطهٔ کنگوری

$$\frac{T_{load\,1}}{T_{load\,2}} = \frac{S_1}{S_2}$$

تقریباً خطی است.

۲-۱۲ گشتاور حداکثر Pull-out Torque

یک راه ریاضی برای محاسبهٔ گشتاور حداکثر مشتق‌گیری از رابطهٔ گشتاور نسبت به s و بدست آوردن s در حالت ماکزیمم گشتاور است.



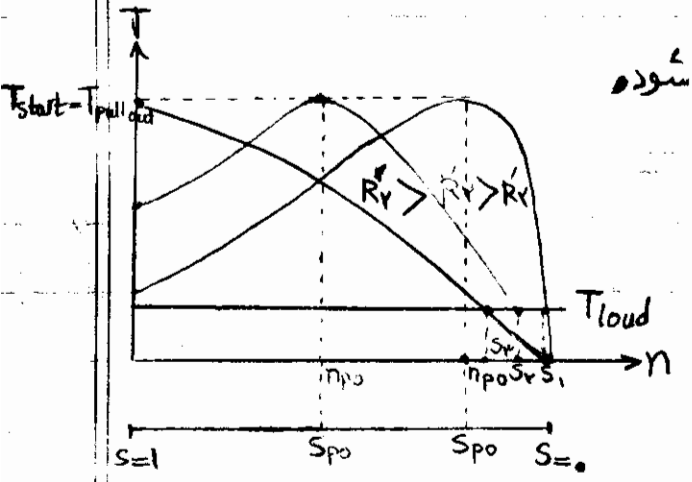
راه دیگر اعمال شرط حداکثر انتقال توان در مدارهای الکتریکی است:

$$\longrightarrow \frac{R'_2}{s_{po}} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2}$$

$$\longrightarrow s_{po} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2}} \quad , \quad T_{po} = \frac{3V_{th}^2}{2\omega_s \left[R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2}\right]}$$

$R_{th} \ll X_{th} + X'_2 \xrightarrow{\text{روابط تقریبی}} s_{po} \simeq \frac{R'_2}{X_{th} + X'_2}$, $T_{po} \simeq \frac{1}{2\omega_s} \cdot \frac{3V_{th}^2}{X_{th} + X'_2}$

فرض کنیم به ازای یک R'_2 ثابت منحنی گشتاور سرعت را رسم کرده‌ایم. حال R'_2 تغییر می‌کند.



(مثلاً افزایش می‌یابد) در این صورت s_{po} زیاد می‌شود.

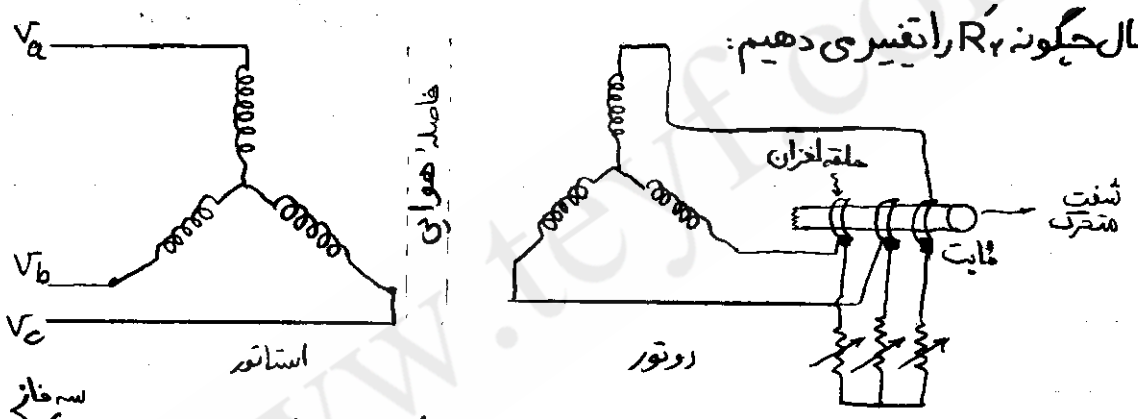
ولی T_{po} تغییری نمی‌کند چون به R'_2 بستگی ندارد.

www.teyf.com

نکته ای که مطرح می شود این است که برای اینکه در لحظه وصل برق موتور شروع به کار بکند، T_{load} باید همواره کوچکتر از T_{start} باشد. در غیر این صورت موتور نمی چرخد.

نکته دیگر این است که مشاهده می کنیم برای یک بار خاص با T_{load} با تغییر R'_2 می توان آن را با سرعتهای مختلفی به چرخش در آورد و این یک نوع کنترل سرعت است. یعنی اگر R'_2 را تغییر بدهیم می توانیم سرعت چرخش بار را تغییر دهیم.

حال چگونه R'_2 را تغییر می دهیم:

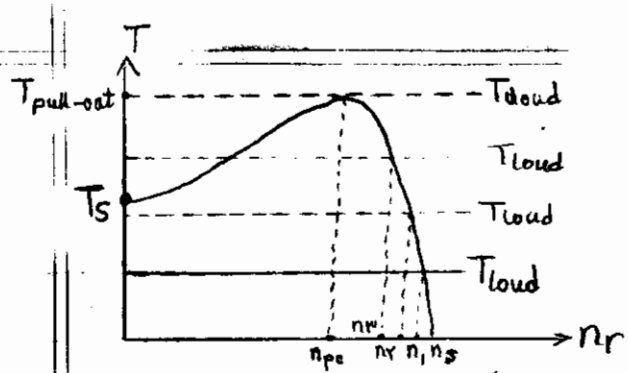


در واقع مقاومتهای سیم پیچی ثابت هستند و تغییر R'_2 توسط مقاومتهای متغیر خارجی صورت می پذیرد.

$$T = \frac{3V_{th}^2 \cdot S}{\omega_s \cdot R'_2}$$

$$\left.\begin{aligned} T_1 = T_{load} &= \frac{3V_{th}^2 \cdot S_1}{\omega_s \cdot R'_{21}} \\ T_2 = T_{load} &= \frac{3V_{th}^2 \cdot S_2}{\omega_s \cdot R'_{22}} \end{aligned}\right\} \longrightarrow \text{رابطه کنکوری} \quad \frac{S_1}{R'_{21}} = \frac{S_2}{R'_{22}}$$

حداقل سرعت در حالت دائم:



فرض می‌کنیم موتوری با مشخصه گشتاور-سرعت روبرو داریم. حال آن را به یک بار مکانیکی وصل می‌کنیم. حال بار را زیاد می‌کنیم. با افزایش بار مشاهده می‌کنیم سرعت کمتر می‌شود. این وضعیت نهایتاً تا $T_{pull-out}$ می‌تواند ادامه پیدا کند. حال اگر بار را از این مقدار بیشتر کنیم دو منحنی دیگر همدیگر را قطع نمی‌کنند و در نتیجه سرعت موتور کم شده و می‌ایستد. لذا محدوده سرعت موتور بین n_S و n_{po} است. در واقع سرعت pull-out حداقل سرعتی است که به ازای آن ماشین می‌تواند بچرخد بدون آنکه به حالت سکون سوق داده شود.

۳-۱۳ گشتاور راه اندازی:

در لحظه وصل کلید موتور به برق سرعت روتور صفر است: $n_r = 0$, $S = 1$

$$\text{گشتاور راه اندازی} = T_S = T\big|_{s=1} = \frac{3V_{th}^2 \cdot R_2'}{\omega_S\left[(R_{th}+R_2')^2+(X_{th}+X_2')^2\right]}$$

$$\longrightarrow T_S = \frac{3V_{th}^2 \cdot R_2'}{\omega_S\left[(R_{th}+R_2')^2+(X_{th}+X_2')^2\right]}$$

افزایش R_2' باعث

$$\Sigma F = ma$$
$$\Sigma T = J\alpha \longrightarrow T - T_{load} = J\alpha$$

www.teyf.com

در لحظهٔ راه اندازی $T_{load} - T$ مقداری مثبت است و لذا شتاب بوجود آمده و بار دور گرفته

و سرعت آن افزایش می‌یابد و مرتباً $T - T_{load}$ افزایش یافته و α نیز افزایش می‌یابد

تا نهایتاً $T - T_{load}$ صفر شود که در این نقطه ماشین با سرعت معینی می چرخد :

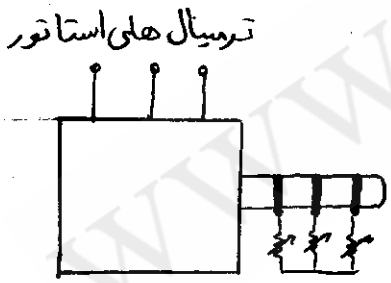
$$T - T_{load} > 0 \longrightarrow \alpha > 0$$
$$T - T_{load} = 0 \longrightarrow \alpha = 0$$

حال فرض کنیم T_{load} بزرگتر از T_s باشد در نتیجه در هنگام راه اندازی $T_{load} - T$ منفی

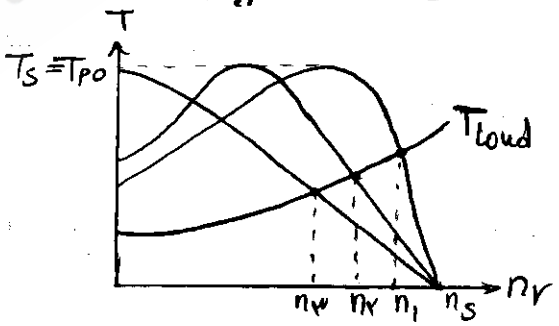
بوده و بار دور نمی گیرد. بنابراین باید T_{load} را کمتر از T_s بگیریم تا ماشین دور بگیرد.

۱۴ـ مقاومت روتور و دسته‌بندی موتورها.

۱-۱۴ موتور القایی با روتور سیم‌پیچی شده :



$$P_{mech} = (1-S)\, P_{ag}$$



مشخصهٔ بار بالا با توان دوم سرعت تغییر می‌کند. (معمولاً پمپها و فن‌ها که با موتور القایی

کار می‌کنند از این نوع هستند). مقاومت روتور را طوری تغییر می‌دهیم که گشتاور راه اندازی

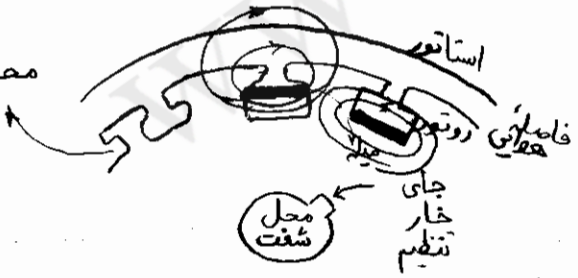
بیشتری داشته باشیم. دلیل این است که در موقع راه اندازی جریان زیادی از شبکه کشیده

می‌شود و اگر گشتاور راه اندازی را بیشتر کنیم (با تغییر مقاومت) این جریان کمتر می‌شود. امّا از طرفی در حالت $T_m = T_s$ سرعت موتور خیلی کمتر از سرعت سنکرون است و این مطلوب نیست. لذا در ابتدای راه‌اندازی مقاومت را زیاد می‌کنیم تا جریان کمتری کشیده شود، سپس پس از راه اندازی مقاومت را کم می‌کنیم تا سرعت چرخش بیشتر شود. در عمل سیستمهای سوئیچینگ الکترونیک صنعتی چنین کاری را انجام می‌دهند.

۲-۱۴ موتور القایی قفس سنجابی با میله‌های عمیق:

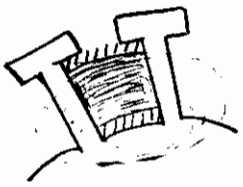
Deep Bar Squiral Cage IM (Induction Motor)

در اینجا دیگر مقاومتی برای تغییر وجود ندارد. در حالت کار دائم s حدود ۰/۱ و در هنگام راه‌اندازی حدود ۱ است. ($f_2 = sf_1$) (فرکانس روتور). از این پدیده استفاده شده و میله‌های روتور را عمیق درست می‌کنند.



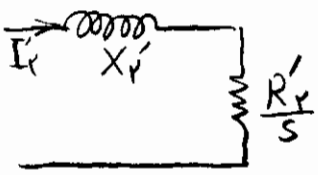
در این موتور فضای خالی بین میله‌ها با یک ماده فرومغناطیس پر شود تا مسیر برای عبور شار بسته شود. خود این ماده به صورت کی مورق ساخته می‌شود. همچنین به دلایل فنی خار و میله‌ها زاویه‌دار در موتور قرار می‌گیرند.

X'_2 چیست؟ با توجه به محل قرارگیری میله‌ها می‌توان پی به وجود شار نشتی برد که این شار نشتی وجود X'_2 را تأئید می‌کند. مشاهده می‌کنیم که هرچه میله‌ها در شیارها عمیق‌تر قرار بگیرند مقدار شار نشتی بیشتری شود.



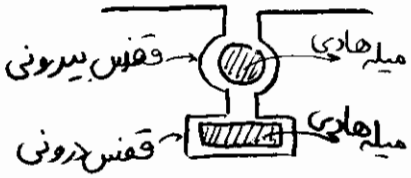
در هنگام راه اندازی با توجه به اینکه فرکانس بالا است شار نشتی در قسمت های داخلی روتور بیشتر بوده و در نتیجه جریان عبوری از های به طور یکنواخت از آن عبور نمی کند. بلکه مقدار بیشتری از آن از لایه بیرونی (بالایی) و مقدار کمی از آن از قسمت پائینی می گذرد. یعنی جگالی جریان تغییر پیدا کرده است و این به مفهوم تغییر مقاومت است. پس به این شیوه مقاومت R'_2 تغییری یابد (افزایش می‌یابد) و باعث کم شدن جریان راه اندازی خواهد شد.

نکته: دلیل اینکه در موتور القایی جریان راه اندازی زیاد است این است که در لحظه راه اندازی $s=1$ است و با توجه به مدار معادل جریان بیشتر خواهد شد.



۳-۱۴ روتور قفس سنجابی دوبل Double Cage IM

در این موتور برای بالبودی



www.tevf.com

وضعیت در هر شیار دو میله قرار می‌دهیم. میله‌ها از یک جنس انتخاب نمی‌شوند.

میله‌ٔ بیرونی $A\downarrow$, $\rho\uparrow \longrightarrow R\uparrow$, $X'_2\downarrow$

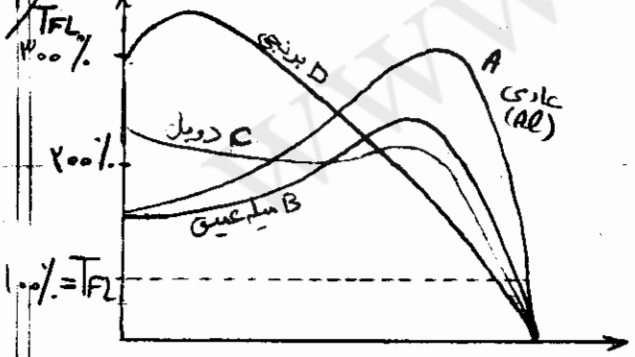
میله‌ٔ درونی $A\uparrow$, $\rho\downarrow \longrightarrow R\downarrow$, $X'_2\uparrow$

در لحظهٔ راه اندازی چون فرکانس با لااست X'_2 غالب خواهد بود و چون در قفس درونی X'_2 بیشتر است جریان به ناچار از قفس بیرونی عبور می‌کند. از طرفی در قفس بیرونی مقاومت اهمی بیشتر است و این باعث می‌شود جریان راه اندازی به مقدار مطلوب خود برسد. پس از زمان راه اندازی، جریان به طور مساوی در دو قفس پخش می‌شود.

۱۴-۴ طبقه بندی موتورهای القایی :

Natural Electrical Manufactures Association (NEMA)

International Electrotechnical Commission (IEC)



مشاهده می‌کنیم که تقریباً در تمام موتورها گشتاور ماکزیمم چند برابر گشتاور نامی است.

۱۵- روشهای کنترل سرعت IM

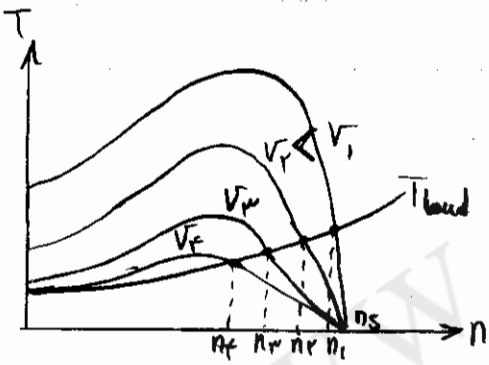
هدف چرخاندن یک بار در سرعتهای متفاوت. مزیت یک ماشین dc کنترل سرعت مناسب آن.

وعیبش گرانی آن است. در ماشین القایی سرعت ثابت (عیب) ولی ارزانتر است.

۱-۱۵ تغییر تعداد قطبها Pole changing

$$n_s = \frac{60f}{P/2}$$

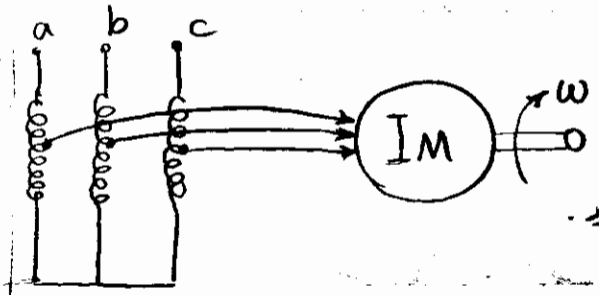
با توجه به رابطهٔ مقابل اگر به روشی بتوانیم تعداد قطبها را عوض کنیم سرعت سنکرون و در نتیجه سرعت نقطهٔ کار تغییر می‌یابد. مشکلی که وجود دارد این است که تعداد قطبها را می‌توانیم (فقط) به صورت زوج زوج تغییر دهیم. لذا تغییرات پله‌ای بزرگی در سرعت خواهیم داشت.



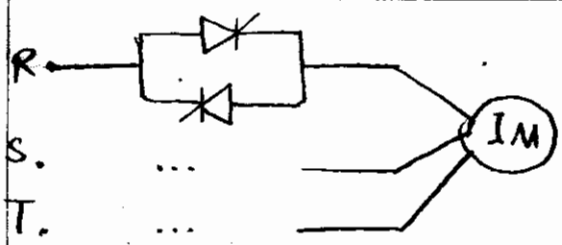
۲-۱۵ روش تغییر ولتاژ استاتور

$$T \propto (V_{th})^2$$

مشاهده می‌کنیم که با کاهش ولتاژ مشخصهٔ موتور عیناً به پائین انتقال می‌یابد و به این ترتیب سرعت تغییر می‌کند. نکته‌ای که مطرح می‌شود این است که افت ولتاژ شدید حتی برای مدت زمان بسیار کوتاه باعث می‌شود که موتور به حالت ایست کامل درآید. در عمل تغییر ولتاژ توسط یک اتوترانس انجام می‌شود.



www.teyf.com



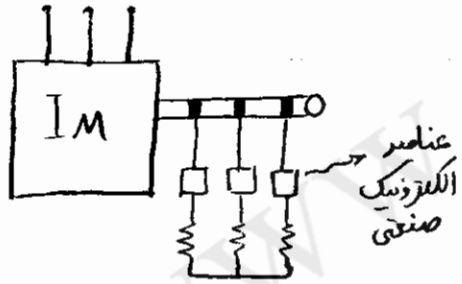
روشهای امروزی ونوین تغییرولتاژ توسط عناصر الکترونیک قدرت و... انجام می گیرد.

۳-۱۵ تغییرفرکانس خط

$$\Delta n_s = \frac{۶۰\Delta f}{P/۲}$$

به کمک اینورترهای سه فازی توان تغییرات فرکانس خط را داشت که منجر به کنترل سرعت ماشین القایی خواهدشد. ازمهمترین اینورترها، اینورترهای PWM هستند.

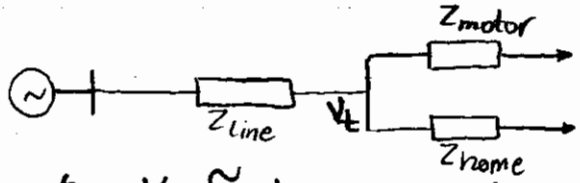
۴-۱۵ روش تغییرمقاومت روتور



در روشهای نوین تغییرمقاومت روتور به کمک عناصر الکترونیک می باشد.

۱۶- راه اندازی موتورهای القایی

درهنگام راه اندازی $n_r = ۰$ و $S = ۱$ استودرنتیجه امپدانس دیده شده ازطرف استاتور حداقل $Z \to Z_{min}$ خواهدشد



باتوجه به اینکه V_t ثابت است لذا وقتی Z_{motor} کم می شود جریان آن شاخه بیشتر

خواهدشد.

۱-۱۶ کدراه اندازی

کدراه اندازی (NEMA)	KVA/hp min – max
A	۰ – ۳,۱۵
B	۳,۱۵ – ۳,۵۵
⋮	⋮
F	۵,۰۰ – ۵,۶
⋮	⋮
W	۲۲,۴ به بالا

هرکد نشان می دهدکه موتور درهنگام راه اندازی به ازای هراسب بخار آن چند KVA ازشبکه نیاز دارد.

مثال: جریان راه اندازی یک موتورالقایی ۳فاز، ۱۵اسب بخار، ۲۰۸ولت باکد راه اندازی F چقدر است؟

max ⟶ ۵,۶ KVA/hp

$\longrightarrow S_{start} = 15hp \times 5.6 = 84\ KVA$

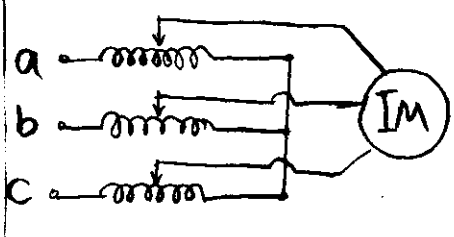
$I_{start} = \frac{S_{start}}{\sqrt{3}\,V_L} = \frac{84\ KVA}{\sqrt{3} \times 208} = 233\ A$ جریان لحظه‌ای راه اندازی

$I_{FL} = \frac{S_{FL}}{\sqrt{3}\,V_L} = \frac{15 \times 746}{\sqrt{3} \times 208} = 31\ A$ جریان نامی

۲-۱۶ راه اندازی به کمک مقاومت متغیر روتور

باافزایش مقاومت روتور توسط یک رئوستا، R'_2 و درنتیجه $\frac{R'_2}{s}$ افزایش می یابد

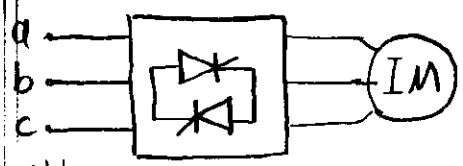
۳-۱۶ راه اندازی با ولتاژ کاهش یافته Reduced Voltage



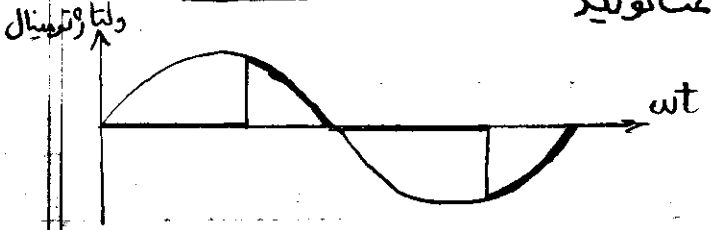
A) درهنگام راه اندازی ولتاژ را کم می کنیم تا جریان راه اندازی

کمتر شود که با توجه به شکل دستی انجام می‌شود .

B) راه اندازی توسط برشگر سه فاز



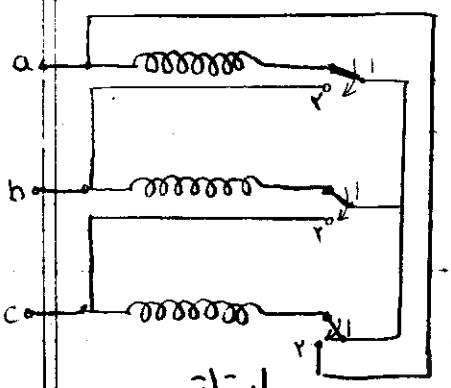
دادن شکل موج مقابل به موتور القایی باعث تولید



میدان گردان خواهد شد .

نکته : با کم شدن جریان راه اندازی گشتاور راه اندازی نیز کم خواهد شد.

c) راه اندازی ستاره مثلث



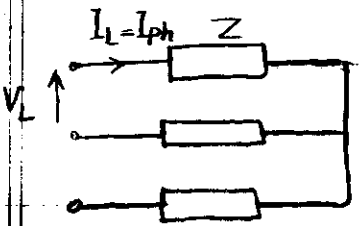
استاتور

I) اتصال ستاره

II) $n_r = 0.8\ n_{FL}$

III) اتصال مثلث

در ابتدا کلید در وضعیت ۱ قرار می‌گیرد. در این حالت استاتور اتصال ستاره دارد . بعد از اینکه موتور راه اندازی شد و دور گرفت، هنگامی که سرعت به $0.8\ n_{FL}$ رسید کلیدها به وضعیت ۲ رفته و استاتور اتصال مثلث می‌گیرد . این روش برای ولتاژهای بیش از $3\ kV$ مناسب نیست. چون در حالت مثلث ولتاژ زیادی روی استاتور می‌افتد و باید از نظر عایق‌بندی نکات ایمنی رعایت شود که هزینه‌ٔ بالایی را متقبل می‌شود.

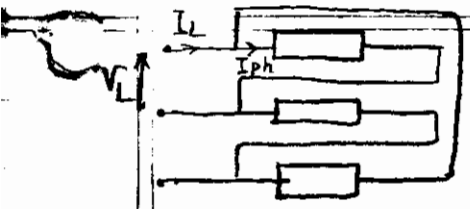


$$I_{ph} = I_L$$

$$V_{ph} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

$$I_{st\lambda} = \frac{V_L}{\sqrt{3}\cdot Z}$$

www.teyf.com



$$I_L = \sqrt{3}\, I_{ph}$$

$$V_{ph} = V_L$$

$$I_{st\,\Delta} = \sqrt{3}\, I_{ph} = \sqrt{3}\,\frac{V_{ph}}{Z} = \frac{\sqrt{3}V_L}{Z}$$

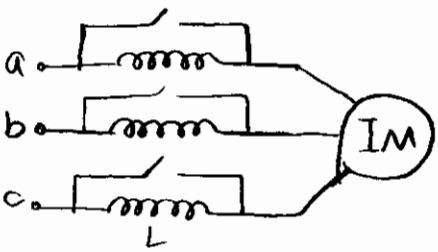
مشاهده می کنیم که جریان راه اندازی کاهش یافته $\longrightarrow \frac{I_{st\,\lambda}}{I_{st\,\Delta}} = \frac{1}{3}$

$$T_{s\,\lambda} \propto (V_{ph})^2 = \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)^2$$

$$T_{s\,\Delta} \propto (V_{ph})^2 = V_L^2$$

$\longrightarrow \frac{T_{s\lambda}}{T_{s\Delta}} = \frac{1}{3}$ است. وهمان طورکه انتظار داریم گشتاور راه اندازی هم به همان نسبت کم شده است. (این روش بیشتر در صنعت استفاده می شود)

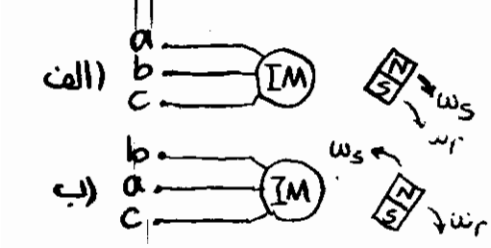
D) راه اندازی از طریق القاگرها



در این روش در هنگام راه اندازی کلیدها باز بوده و سلف ها در مدار قرار می گیرند و پس از راه اندازی کلیدها بسته می شوند. تفاوت این روش با روش C این است که در روش C به دو سر هر سیم پیچی نیاز مندیم ولی در این روش فقط سر بیرونی هر سیم پیچ را نیاز داریم.

۱۷ـ توقف موتورهای القایی

۱-۱۷ توقف با اعمال فشار مخالف (Plugging)



اگر به طور ناگهانی جای دوفاز را عوض کنیم، جهت سرعت روتور تغییری نمی کند ولی جهت چرخش میدان گردان عوض می شود.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

(الف)

$$S = \frac{-n_s - n_r}{-n_s} = \frac{n_s + n_r}{n_s} \quad , \; S > 1$$

(ب)

www.teyf.com

مشاهده می کنیم با این کار لغزش بزرگتر از یک می شود.

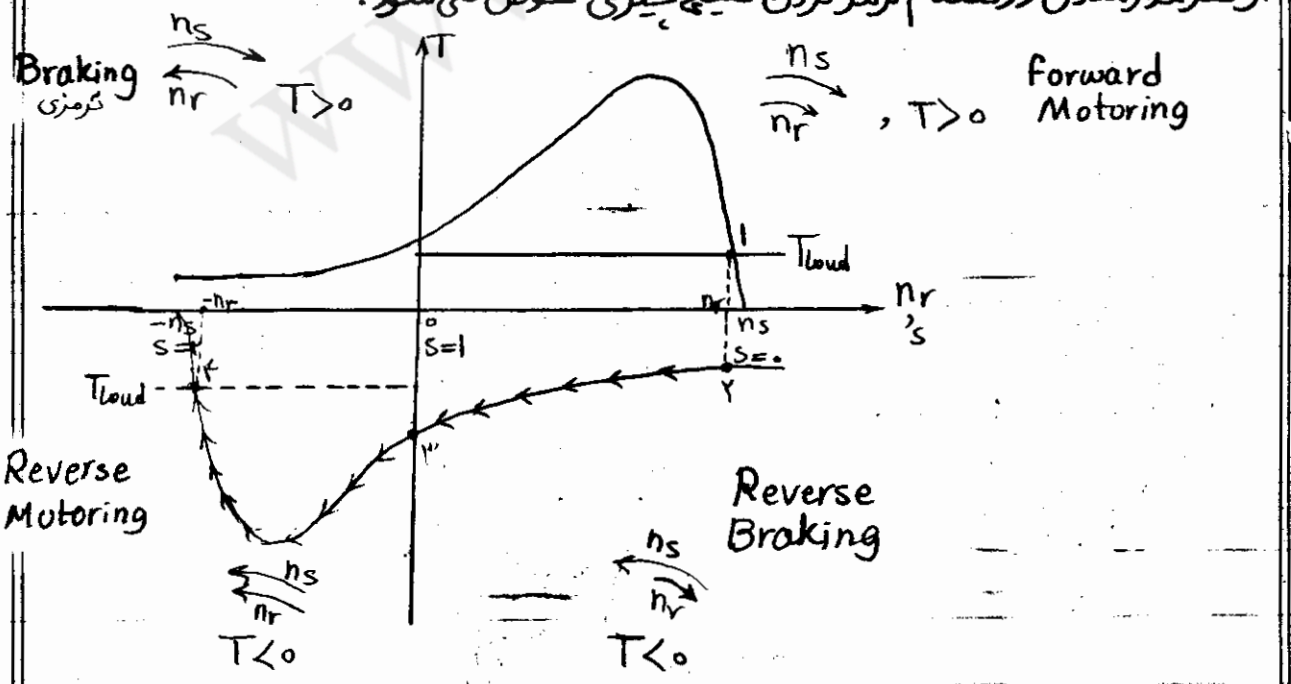
$$T_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s} < 0$$

درنتیجه جهت گشتاور عوض می شود (گشتاور منفی) و این باعث می شود دور موتور کم شده و به سرعت صفر می رسد و سپس در جهت دیگر شروع به چرخش می کند. لذا نیاز است که در این روش هنگامی که سرعت موتور صفر شد برق را قطع کنیم.

$$f_r = sf_1 \quad , \quad s>1$$

مشاهده می کنیم که با این کار فرکانس روتور از فرکانس استاتور (50^{Hz}) نیز بیشتر می شود و این باعث گرم شدن روتور خواهد شد. لذا از این روش فقط در موتورهای القایی سیم پیچی شده استفاده می کنیم چون انتقال گرما به بیرون از موتور در این نوع موتورها راحت تر است.

از نظر مدار معادل در هنگام ترمز کردن هیچ چیزی عوض نمی شود.

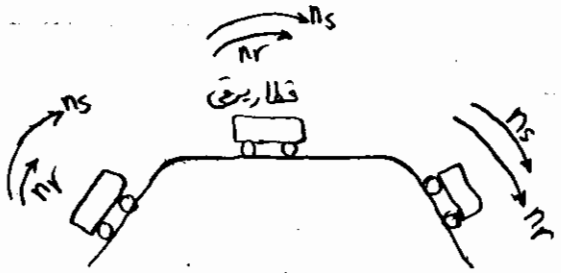


www.tcyf.com

پس از تعویض دوفاز به حالت ۲ می رویم و سپس سرعت صفر شده و به حالت ۳ می رسیم. اگر برق

را قطع نکنیم موتور دور گرفته و به حالت ۴ خواهیم رسید که حالتی نامطلوب است.

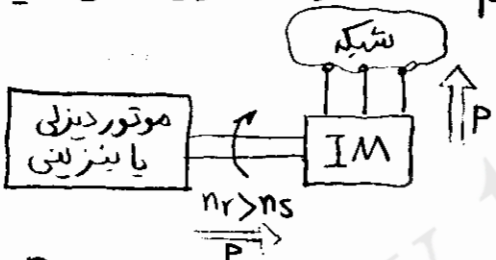
۱۸- ژنراتور القایی



در قطار برقی در هنگام سرازیری اگر قطار را

رها کنیم n_r بیشتر از n_s خواهد شد. (همین طور در آسانسور هنگام پائین آمدن). در این

حالت قطار به شبکه انرژی خواهد داد. از این مفهوم استفاده کرده و ژنراتور را می سازیم:



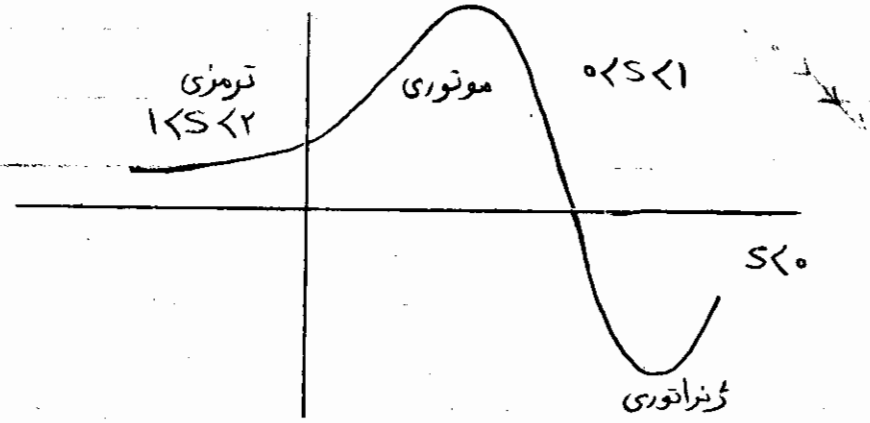
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad , n_r > n_s \longrightarrow s < 0$$

$$\longrightarrow P_{mech} = (1-S) P_{ag} = (1-S) \frac{R'_r}{S} . I'^2_r < 0$$

به این ترتیب توانی که به موتور القایی به عنوان ژنراتور القایی داده می شود به شبکه منتقل خواهد شد.

در نیروگاههای بادی چون سرعت باد متغیر است تنها ژنراتورهای القایی این تغییر سرعت را می توانند

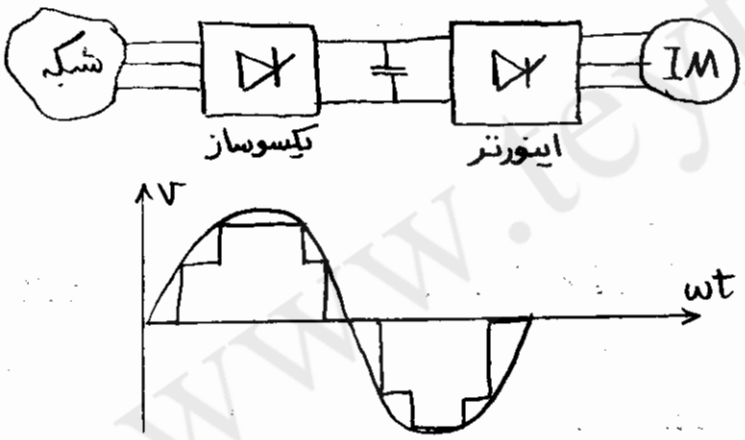
تحمل کنند و لذا این ژنراتورها در نیروگاههای بادی کاربرد دارند.



اشکالی که ژنراتور القایی دارد این است که چون موتور القایی نمی‌تواند توان راکتیو تولید کند ولذا هنگامی که به شبکه توان اکتیو می دهد باید توان راکتیو را دریافت کند. درحالیکه ژنراتور سنکرون خودی تواند توان راکتیو را تولید کند و به همین دلیل در نیروگاهها از ژنراتور سنکرون استفاده می شود.

۱۹- هارمونیک های فضایی و زمانی Time & space Harmonics

۱-۱۹ اثر هارمونیک های زمانی بر مشخصهٔ T-n

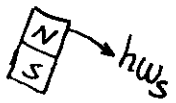


از آنجائیکه شکل موج V کاملاً سینوسی نیست لذا دارای هارمونیک هاخواهد بود که شامل هارمونیک اصلی، هارمونیک های مضارب ۳، هارمونیک های مضارب غیر ۳ است.

هارمونیک اصلی میدان گردان با سرعت w_s ایجاد می کند. هارمونیک های مضارب ۳ چون همفاز هستند و در یک جهت قرار می گیرند نمی توانند میدان گردان ایجاد کنند. هارمونیک های مضارب

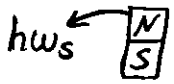
غیر۳ شامل دوسری $h=6m+1$ و $h=6m-1$ هستند. این هارمونیک های میدان گردان

تولید خواهند کرد.



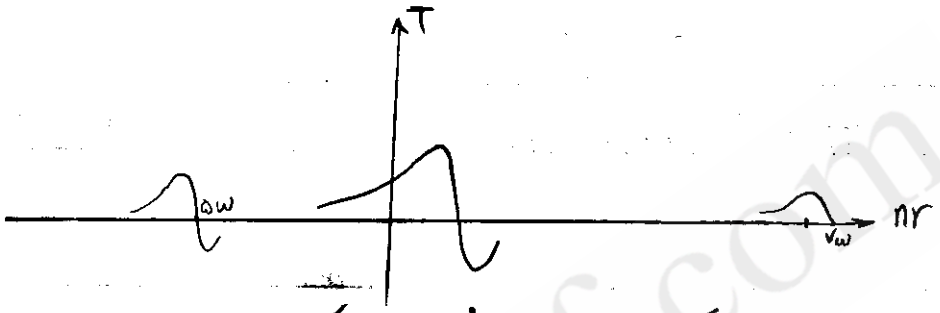
$h=6m+1$

$m=1,2,\dots$,



$h=6m-1$

به ازای $m=1$ دو میدان گردان با سرعت های $7\omega_s$ و $5\omega_s$- تولید خواهند شد.



مشاهده می کنیم که هارمونیک های زوجی تأثیری در عملکرد سیستم نخواهند داشت چون ناحیه کار ما (نقطه کار) در ناحیه هارمونیک اصلی (ناحیه وسط) است.

۲-۱۹ اثر هارمونیک های مکانی (فضائی) بر مشخصه T-n

— توزیع سیم پیچی استاتور به دلیل محدود بودن تعداد شیارها دارای اعوجاج است.

— رلوکتانس فاصله هوایی به علت وجود شیارهای استاتور و روتور یکسان نیست.

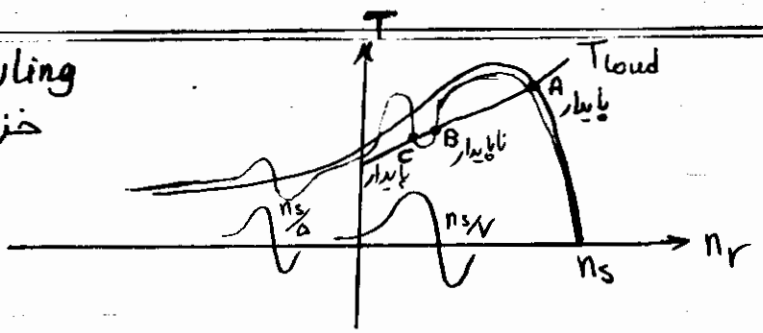
در نتیجه mmf فاصله هوایی غیر سینوسی خواهد بود و هارمونیک ها ایجاد خواهند شد.

هارمونیک اصلی $\Leftarrow$ n_s

$h=6m+1$ $\Leftarrow$ $\frac{n_s}{h}$ راستگرد

$h=6m-1$ $\Leftarrow$ $\frac{n_s}{h}$ چپگرد

Crawling
خزش.



مشاهده می کنیم سه نقطهٔ کار وجود می آید که یکی از آنها ناپایدار است و A و C پایدار هستند اگر موتور به نقطهٔ کار C برود سرعت بسیار کمی خواهیم داشت که به این پدیده خزش گفته می شود. برای خارج شدن از این حالت باید بار را کمی سنگین کنیم و بعد به حالت قبل برگردانیم.

www.teyf.com