



وزارت علوم تحقیقات و فن آوری  
دانشگاه فنی و حرفه‌ای ( البرز )  
دانشکده فنی شهید بهشتی کرج

نام درس:

# ماشین‌های الکتریکی ۴

مقطع:

کارشناسی ناپیوسته

تالیف:

علی اکبر جمالو

مدرس:

محمود محمدحسن

## فصل اول

### مبانی ماشین‌های الکتریکی

ماشین‌هایی که سیم‌پیچ‌های میراکننده دارند را ماشین القایی می‌گویند. این ماشین‌ها بدین جهت القایی‌اند که ولتاژ رتور در اثر القا در سیم‌پیچ‌های رتور ایجاد می‌شود نه به وسیله‌ی هدایت الکتریکی. در ضمن برای کار کردن این ماشین‌ها نیازی به جریان DC نیست. اما در ماشین سنکرون جریان به وسیله یک منبع تنظیم جداگانه (exiter) تأمین می‌شود.

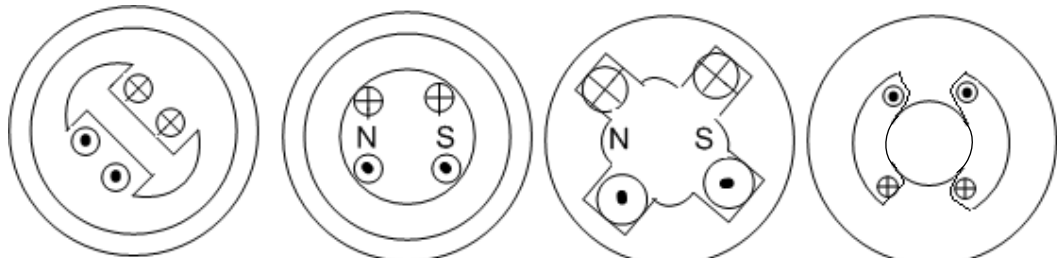
### مبانی ماشین‌های متناوب دوار

مفهوم میدان مغناطیسی دوار در ساده‌ترین حالت با در نظر گرفتن یک استاتور توخالی که دارای سه سیم-پیچ با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه مکانیکی است و جریان‌هایی با اختلاف زمانی ۱۲۰ درجه الکتریکی به آن‌ها متصل‌اند و چون این سیم‌پیچ‌ها دارای دو قطب شمال و جنوب می‌باشند آن‌ها را سیم‌پیچی (ماشین‌های) دو قطبی می‌نامند.

### انواع سیم‌بندی

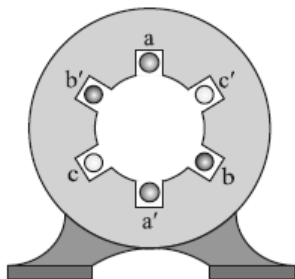
۱- سیم‌بندی متمرکز ۲- سیم‌بندی گسترده (توزیع شده)

۱- سیم‌بندی متمرکز: به سیم‌بندی گفته می‌شود که در آن کل سیم‌بندی‌های یک قطب تنها درون دو شیار و یا در یک محل قرار داشته باشند. این نوع سیم‌بندی غالباً به عنوان سیم‌بندی تحریک استفاده می‌شود و به دو صورت صاف و برجسته می‌باشد.



سیم‌بندی متمرکز با قطب برجسته داخلی      سیم‌بندی متمرکز با قطب صاف داخلی      سیم‌بندی متمرکز با قطب صاف خارجی      سیم‌بندی متمرکز با قطب برجسته خارجی

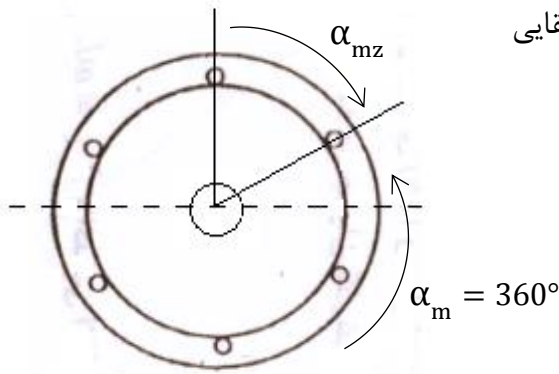
۲- سیم‌بندی گسترده (توزیع شده): سیم‌بندی است که در آن هر کلاف به چند زیر کلاف تقسیم شده و در شیارهای مختلف در سطح ماشین توزیع می‌شود. این سیم‌بندی راحت‌تر اجرا شده و دارای استحکام بیشتری است. ولی به علت زیاد بودن شیارها دارای هارمونیک‌های شیار است و سبب ایجاد نویز و نوسان شده و تلفات ماشین را افزایش می‌دهد. (این سیم‌بندی بیشتر به عنوان آرمیچر استفاده می‌شود).



۴ در بحث ماشین‌های الکتریکی سه‌فاز منظور از ثابت و یا متغیر سرعت میدان زمانی است. ولی منظور از ساکن (ثابت) و یا چرخان بودن نگرش مکانی است.

## تعاریف و روابط خاص

زاویه الکتریکی نشان دهنده اختلاف فاز بین ولتاژ القایی موجود در دو شیار نیز می‌باشد.



$$\frac{D}{180^\circ} = \frac{\text{Rad}}{\pi} \quad \text{تبدیل رادیان به درجه:}$$

۱- زاویه مکانیکی یا هندسی ماشین:

$$\alpha_m = 360^\circ$$

۲- زاویه مکانیکی یا هندسی دو شیار مجاور (گام شیار مکانیکی):

$$\alpha_{mz} = \frac{360^\circ}{Z}$$

۳- زاویه الکتریکی کل استاتور:

$$\alpha_e = P \times \alpha_m = P \times 360$$

۴- زاویه الکتریکی میان دو شیار مجاور (نشان دهنده ی میزان اختلاف فاز بین ولتاژهای القایی موجود در دو شیار مجاور هم).

$$\alpha_{ez} = \frac{360P}{Z} = \alpha_{mz} \cdot P$$

۵- گام قطبی: فاصله میان مرکز دو قطب مجاور غیر هم نام می‌باشد.

$$y_p = \frac{Z}{2P} \quad \text{الف: گام قطبی بر حسب شیار:}$$

$$y_{pm} = \frac{\alpha_m}{2P} = \frac{360^\circ}{2P} = \frac{180^\circ}{P} (\text{m}) \quad \text{ب: گام قطبی بر حسب زاویه مکانیکی:}$$

$$y_{pe} = \frac{\alpha_e}{2P} = 180^\circ (\text{e}) \quad \text{ج: گام قطبی بر حسب زاویه الکتریکی:}$$

۶- گام کلاف (گام جلو): فاصله ی میان دو بازوی یک کلاف.

$$y_w = y_p \quad \text{سیم بندی کامل}$$

$$y_w < y_p \quad \text{سیم بندی گام کسری}$$

مثال: در یک استاتور قطب صاف ۲۴ شیار و ۴ قطب مطلوبست:

$$\alpha_m = 360^\circ, \quad \alpha_e = 360P = 360 \times 2 = 720^\circ \quad \text{الف) زوایای مکانیکی و الکتریکی}$$

ب) زوایای الکتریکی و مکانیکی بین دو شیار

$$\alpha_{ez} = \frac{360P}{Z} = \frac{360 \times 2}{24} = 30^\circ \quad \alpha_{mz} = \frac{360}{24} = 15^\circ$$

ج) گام قطبی و گام کلاف

$$y_p = \frac{\alpha_e}{2P} = 180^\circ, \quad y_p = \frac{\alpha_m}{2P} = \frac{360}{4} = 90^\circ, \quad y_p = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

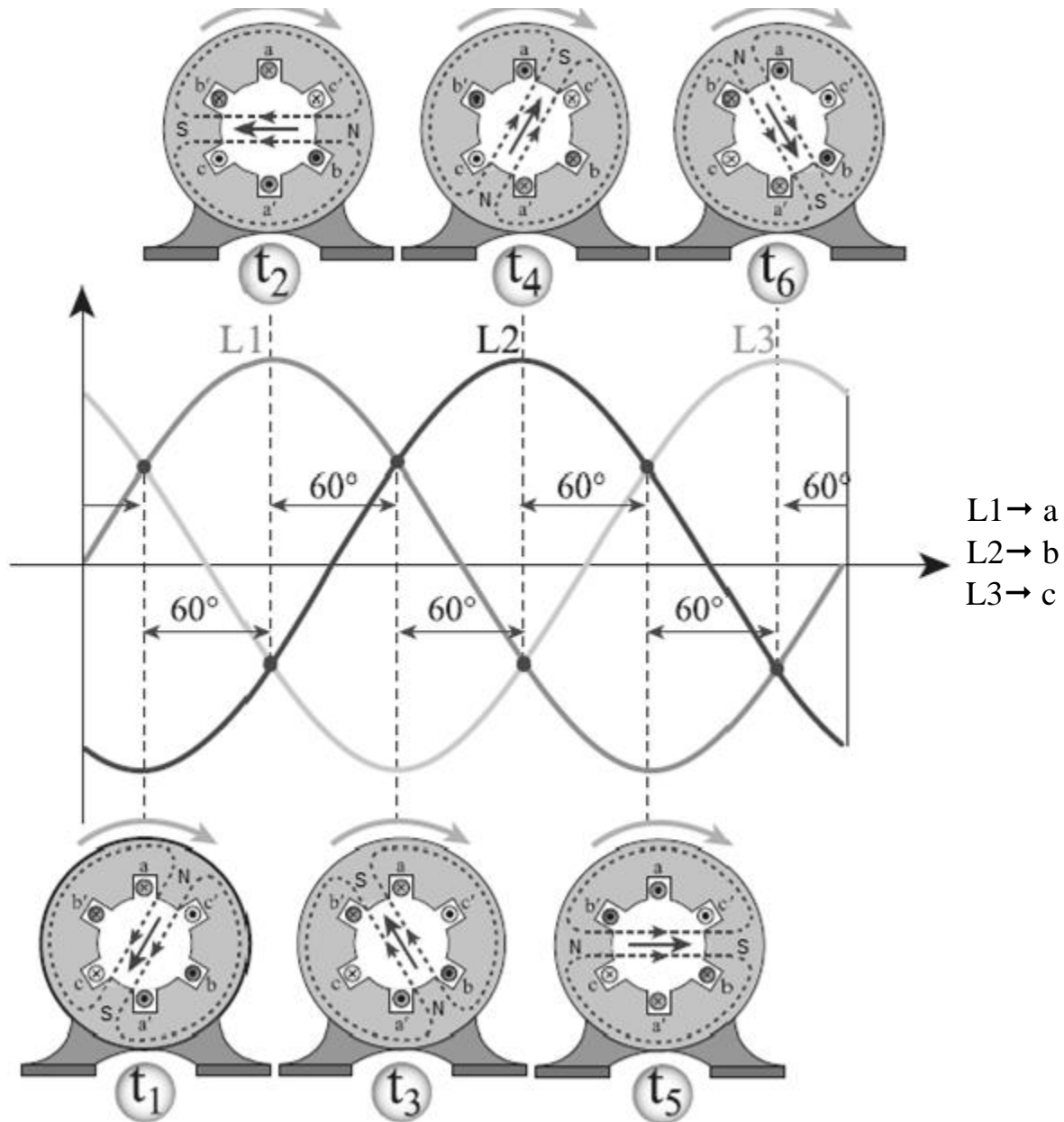
## تولید میدان دوار مغناطیسی در ماشین های سه فاز

۱- استفاده از آهنربای گردان

۲- استفاده از سیستم های چند فاز در استاتورهای سیم پیچی چند فاز

استفاده از سیستم های چند فاز در استاتورهای سیم پیچی چند فاز:

- روش نخست اثبات از طریق ترسیم:



می توان به کمک یک استاتور که دارای سه سیم پیچ با اختلاف فاز مکانی ۱۲۰ درجه متصل به جریان های سه فاز با اختلاف زمانی ۱۲۰ درجه میدان دوار مغناطیسی با سرعت  $n_s$  ایجاد نمود.

- روش دوم اثبات از طریق فرمول های ریاضی:

می توان ثابت کرد که تغذیه سیم پیچ چند فاز به وسیله منبع چند فاز می تواند چندین میدان ضربانی ایجاد کند که مجموع این میدان های ضربانی یک میدان دوار تشکیل می دهند.

جهت بررسی تحلیلی شار، نیروی محرکه الکتریکی هر فاز را به طور جداگانه می‌نویسیم:

$$\begin{aligned}i_a &= I_m \cdot \sin \omega t \\i_b &= I_m \cdot \sin \omega t - 120^\circ \\i_c &= I_m \cdot \sin \omega t + 120^\circ\end{aligned}$$

$$f = NI \quad \text{نیرو محرکه مغناطیسی} \quad \&$$

$$\begin{aligned}f_a &= NI_a \sin \theta \\f_b &= NI_b \sin(\theta - 120^\circ) \\f_c &= NI_c \sin(\theta + 120^\circ)\end{aligned}$$

$$\sin A \cdot \sin B = \frac{1}{2} ((\cos A + B) - (\cos A - B)) \quad \&$$

$$\begin{aligned}f_a &= NI_m \sin(\omega t) \cdot \sin \theta \\f_b &= NI_m \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \sin(\theta - 120^\circ) \\f_c &= NI_m \sin(\omega t + 120^\circ) \cdot \sin(\theta + 120^\circ)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_a &= \frac{1}{2} NI_m (\cos(\omega t + \theta) - \cos(\omega t - \theta)) \\+ \\f_b &= \frac{1}{2} NI_m (\cos(\omega t + \theta - 240^\circ) - \cos(\omega t - \theta)) \\+ \\f_c &= \frac{1}{2} NI_m (\cos(\omega t + \theta + 240^\circ) - \cos(\omega t - \theta))\end{aligned}$$

سه جمله مشترک به علت تشکیل یک سیستم سه فاز با زاویه‌های متقارن جمع‌شان صفر می‌گردد.

$$f = \frac{3}{2} NI_m \cdot \cos(\omega t - \theta)$$

جمله ی  $N \sin \theta$  به توزیع سینوسی سیم‌پیچی‌ها در محیط استاتور باز می‌گردد.

با توجه به اثبات بالا می‌توان نتایج زیر را برداشت کرد:

- ۱- مشاهده می‌شود که در محیط دایره‌ای  $\frac{3}{2} f_m$  نوسان کامل جریان و میدان وجود دارد و این میدان همیشه به صورت یک میدان دوار است.
- ۲- سرعت و دامنه این میدان ثابت است.
- ۳- هر چه تعداد فازها بیشتر شود، دامنه افزایش یافته و چرخش میدان متقارن‌تر و ملایم‌تر است.

۴- سرعت این میدان که آن را سرعت سنکرون می‌نامند از رابطه‌ی  $n_s = 60 \frac{f}{p}$  بر حسب (RPM) یا  $n_s = \frac{f}{p}$

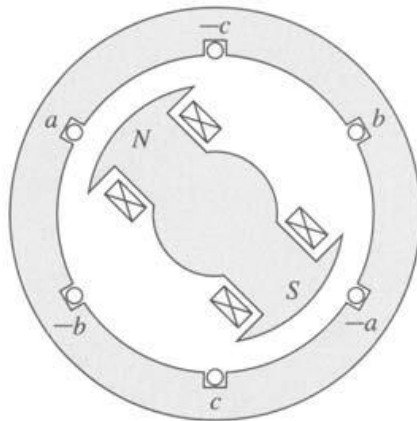
بر حسب (RPS) به دست می‌آید. برای سرعت زاویه‌ای سنکرون نیز داریم:

$$\left. \begin{aligned} \omega_s &= 2\pi \cdot \frac{f}{p} \\ f &= \frac{n_s \cdot p}{60} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_s = \frac{2\pi \cdot n_s}{60}$$

۵- برای تعویض جهت چرخش، باید جای دو فاز از سه فاز را عوض کنیم.

### ولتاژ القایی در ماشین های AC

با توجه به شکل اگر رتور به جریان DC متصل شود و توسط یک محور خارجی بچرخد، آنگاه در سیم‌بندی‌های استاتور ولتاژی القا می‌شود که دامنه این ولتاژ ثابت بوده ولی دارای اختلاف فازی برابر  $360^\circ M$  می‌باشد.



در ماشین های AC سه فاز رابطه‌ی ولتاژ القایی برابر است با:  $E = 4.44 N \cdot \phi_m \cdot n_s$

توالی فازها به شکل زیر است:



در توالی +ABC ولتاژهای خطی به اندازه  $30^\circ$  درجه از ولتاژهای فازی جلوترند یعنی:

$$V_{BA} = \sqrt{3}V_P \angle 30^\circ$$

$$V_{BC} = \sqrt{3}V_P \angle -90^\circ$$

$$V_{CA} = \sqrt{3}V_P \angle -210^\circ$$

و در توالی -ABC ولتاژهای خطی  $30^\circ$  درجه عقب‌تر از فازی هستند.

## توزیع شار در ماشین های سه فاز

برای اینکه چگالی میدان مغناطیسی در ماشین های AC به صورت سینوسی متقارن توزیع شود باید به جای اینکه هر کلاف به صورت تک بوبین پیچیده شود به صورت یک کلاف چند بوبین باشد.  $q$  را تعداد شیار در

$$q = \frac{y_p}{m} = \frac{2p}{m} = \frac{z}{2pm} \Rightarrow qp = \frac{z}{2m}$$

قطب در هر فاز گویند.

مثال: برای یک ماشین ۲۴ شیار ۳ فاز به چند طریق می توان توزیع شار داشت.

$$\begin{cases} q=1 & p=4 \\ q=2 & p=2 \\ q=4 & p=1 \end{cases} \Rightarrow qp = \frac{24}{6} = 4$$

شار قطب  $\varphi$ : در یک ماشین زوج قطبی شار متوسط از روی مقدار متوسط اندوکسیون مغناطیسی و سطح

$$\varphi_{av} = B_{av} \times A \cdot p$$

قطب بدست می آید.

## سیم بندی های یک و دو طبقه

اگر در هر شیار فقط یک بازو مربوط به یک بوبین قرار گیرد سیم بندی را یک طبقه و اگر در هر شیار دو بازو مربوط به دو بوبین مختلف قرار گیرد سیم بندی را دو طبقه گویند. در سیم بندی های دو طبقه به دلیل پخش شدن کلافها در شیارهای مختلف، تهویه بهتر صورت می گیرد در نتیجه راندمان بالاتر است و قدرت موتور نیز افزایش می یابد

$$G_{ph} = t \times P$$

گروه کلاف را می توان به صورت زیر نشان داد که در آن  $t$  تعداد طبقه است.

$$P \cdot B = 2Pm$$

به تعداد هادی های هم نام مجاور یک دیگر، یک کمر بندی فازی گویند.

## شیار شروع فازهای سیم بندی در سیم بندی توزیع شده

اگر فاز A از شیار شماره  $Z_1$  شروع شود آن گاه فاز B از  $Z_1 + \frac{120}{\alpha_{ez}}$  و C از  $Z_1 + \frac{240}{\alpha_{ez}}$  شروع می شوند.

مثال: در یک موتور ۲۴ شیار ۴ قطب اگر فاز A از شیار ۳ شروع شود شروع فازهای C, B را پیدا کنید.

$$\alpha_{ez} = \frac{360P}{z} = \frac{360 \times 2}{24} = 30^\circ \quad B \rightarrow 3 + \frac{120}{30} = 7 \quad C \rightarrow 3 + \frac{240}{30} = 11$$

سیم بندی های توزیع شده دارای سه مزیت اند:

۱- میدان مغناطیسی سینوسی ۲- تهویه بهتر ماشین و بالا بردن راندمان ۳- افزایش استهکام سیم بندی

اما سیم بندی توزیع شده دارای دو عیب عمده نیز هست:

۱- کاهش ولتاژ القایی در سیم پیچ ها ۲- تولید هارمونیک ها

## ضریب پخش سیم‌بندی (Kd)

نسبت ولتاژ القایی در حالت سیم‌بندی توزیع شده به ولتاژ القایی در حالت سیم‌بندی متمرکز را ضریب پخش گویند که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Kd = \frac{\text{جمع فازوری ولتاژها}}{\text{جمع جبری ولتاژها}} = \frac{\text{ولتاژ القایی در سیم بندی توزیع شده}}{\text{ولتاژ القایی در سیم بندی متمرکز}}$$

$$Kd = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha_{ez}}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha_{ez}}{2}\right)}$$

مقدار  $1-kd$  نشان دهنده‌ی میزان درصد کاهش ولتاژ القایی در سیم‌بندی توزیع شده نسبت به متمرکز است. مثلاً اگر  $kd = 93\%$  باشد افت ولتاژ  $0/07\%$  می‌شود.

مثال: در یک استاتور ۲۴ شیار ۴ قطب، ۳ فاز مقدار  $kd$  را حساب کنید.

$$Z = 24 \quad ZP = 4 \Rightarrow q = \frac{yP}{m} = \frac{Z}{2P \cdot m} = \frac{24}{3 \times 4} = 2$$

$$kd = \frac{\sin\left(2 \times \frac{30}{2}\right)}{2 \sin\left(\frac{30}{2}\right)} = \frac{0/5}{0/517} = 0/96 \Rightarrow 1-k = 1-0/96 = 0/04$$

تمرین ۱: در یک استاتور ۳۶ شیار ۶ قطب ۳ فاز:

ابتدا  $Kd$  را بیابید. سپس اگر  $Kp = 1$  باشد با  $kd$  به دست آمده افت ولتاژ چقدر است؟

## سری فوریه

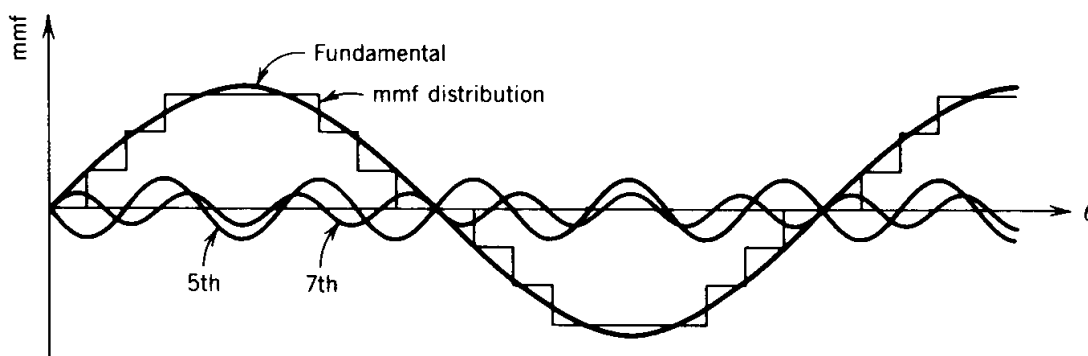
$$f_x = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{n\pi}{L}x\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right)$$

$$a_0 = \int_0^L f_x \cdot dx \quad \text{و} \quad a_n = \int_0^L f_x \left(\cos \frac{n\pi}{L}x\right) dx$$

$$b_n = \int_0^L f_x \left(\sin \frac{n\pi}{L}x\right) dx$$

در سیم بندی متمرکز توزیع چگالی میدان در زیر هر قطب مقدار ثابتی است. اما در سیم‌بندی توزیع شده با توجه به میزان پخش سیم بندی چگالی میدان در سطح زیر هر قطب به صورت پله ای نزدیک به سینوسی خواهد بود. ولی به هر حال غیر سینوسی است و طبق بسط فوریه شکل موج چگالی میدان دارای هارمونیک است، به این هارمونیک ها که در میدان و فوران ماشین وجود دارد هارمونیک مکانی گویند. می‌دانیم که شکل موج ولتاژ القایی در سیم‌بندی‌های ماشین نیز شبیه به شکل موج میدان توزیع شده است. پس در ولتاژ فازی نیز هارمونیک‌هایی وجود دارد که به آن‌ها هارمونیک زمانی گویند.





## دلایل عمده‌ی ایجاد هارمونیک

۱. محدودیت شیارها
۲. منحنی غیرخطی مغناطیسی و اشباع در هسته
۳. توزیع غیر سینوسی چگالی
۴. غیر سینوسی بودن ولتاژ تغذیه
۵. رواج تجهیزات الکترونیک صنعتی

## مضرات هارمونیک ها

۱. تولید ولتاژ القایی غیر سینوسی
۲. ایجاد گشتاورهای مزاحم و پارازیت در موتورها ومولدها
۳. افزایش تلفات آهنی
۴. ایجاد لغزش سروصدا
۵. ایجاد افت ولتاژ

## نکات مهم

۱. هارمونیک های کسینوسی و زوج نداریم. زیرا در رابطه سری فوریه به علت تقارن نیم موج هارمونیک‌های زوج حذف شده و همچنین در توابع فرد،  $a_0$  و  $a_n$  برابر صفر می‌باشند. پس هارمونیک‌های کسینوسی حذف می‌شوند.
۲. از هارمونیک های مرتبه‌ی ۹ به بعد صرف‌نظر می‌کنیم. ( $h=9$ )
۳. برای از بین بردن آثار هارمونیک‌ها باید آن‌ها را خنثی کنیم.
۴. فرکانس هر هارمونیک برابر است با:  $f_n = h \cdot f_1$
۵. هارمونیک های زمانی ۳ و ۹ که مضرب ۳ هستند چون میدان ضربانی تولید می‌کنند مضر نیستند.

## هارمونیک زمانی (شیاری)

به طور کلی اگر مرتبه‌ی هارمونیک‌ها به قرار مقابل باشد:  $h = 6m \pm 1$ ، آنگاه mmf از رابطه‌ی زیر به دست

$$f(\theta, t) = \frac{3}{2} f_m \cos(h\omega t \pm \theta) \quad \text{می آید: (m عدد صحیح است)}$$

در رابطه فوق علامت مثبت و منفی بستگی به جهت چرخش هارمونیک دارد. علامت مثبت در جهت هارمونیک اصلی و علامت منفی خلاف جهت هارمونیک اصلی.

$$m=0 \rightarrow h=1$$

$$m=1 \rightarrow h=5, 7$$

مثال: مطالب فوق را برای یک موتور سه فاز ۴ قطب ۶۰ هرتز محاسبه کنید.

$$m=1 \Rightarrow h=6+1=7, h=6-1=5 \quad \begin{array}{l} h=7 \Rightarrow f_7 = 7 \times 60 = 420 \\ h=5 \Rightarrow f_5 = 5 \times 60 = 300 \end{array} \quad \begin{array}{l} n_s = \frac{60 \times 420}{2} = 12600 \\ n_s = \frac{60 \times 300}{2} = 9000 \end{array}$$

مقادیر به دست آمده از مثال بالا را می‌توان با استفاده از فرمول‌های زیر اینگونه در جدولی خلاصه نمود:

$$f_1(\theta, t) = \frac{3}{2} f_m \cos(\omega t - \theta)$$

$$f_5(\theta, t) = \frac{3}{2} f_m \cos(5\omega t + \theta) \quad n_s(h) = h \times n_{s1} = \frac{60 \times f \times h}{P}$$

$$f_7(\theta, t) = \frac{3}{2} f_m \cos(7\omega t - \theta)$$

شماره هارمونیک	سرعت میدان هارمونیک (RPM)	معادله
1	1800	$\frac{3}{2} f_m \cos(\omega t - \theta)$
3	0	0
5	9000	$\frac{3}{2} f_m \cos(5\omega t + \theta)$
7	12600	$\frac{3}{2} f_m \cos(7\omega t - \theta)$

## هارمونیک مکانی

توزیع ایده‌آل سینوسی mmf موقعی امکان پذیر است که ماشین دارای شیارهای بی‌شمار باشد. در اینجا نیز

$$h = 6m \pm 1 \text{ است ولی سرعت میدان دوار در هارمونیک‌های مکانی برابر } n_s = \frac{60f}{h \times P} \text{ می‌باشد.}$$

تنها روش خنثی سازی هارمونیک‌ها، کوتاه کردن گام سیم پیچی است. در این حالت گام کلایف  $y_w$  به اندازه یک یا چند شیار کوچکتر از گام قطبی گرفته می‌شود. این کوتاهی به اندازه عکس شماره هارمونیک است.

$$y_w = y_p \left(1 - \frac{1}{h}\right) = y_p \times \varepsilon \quad \varepsilon = 1 - \frac{1}{h} \quad \text{(گام کلایف)}$$

مثال: برای حذف هارمونیک ۵ و ۷،  $\varepsilon$  مورد نظر را بیابید.

$$h = 7 \Rightarrow \varepsilon = 1 - \frac{1}{7} = \frac{6}{7}$$

$$h = 5 \Rightarrow \varepsilon = 1 - \frac{1}{5} = \frac{4}{5}$$

### ضریب کوتاهی گام ( $K_p$ )

ضریب کوتاهی گام برابر نسبت ولتاژ القا شده در کلاف با گام کوتاه به نسبت ولتاژ القا شده با گام کامل است.

$$K_p = \frac{\text{نسبت ولتاژ القا شده با گام کوتاه}}{\text{نسبت ولتاژ القا شده با گام کامل}}$$

با کوتاه کردن گام سیم‌بندی، هارمونیک‌ها تا حدودی تضعیف شده، اما دامنه‌ی هارمونیک اصلی نیز کاهش می‌یابد (که این یک عیب است). برای نشان دادن این امر از رابطه‌ی ضریب کوتاهی گام استفاده می‌کنیم:

$$K_p(h) = \sin(90 \times \varepsilon \cdot h)$$

به طور مثال می‌توان گفت یک استاتور دو قطبی که پیچک‌هایی با گام  $\frac{5}{6}$  دارد دارای ضریب کوتاهی ۹۶٪ است. به این مفهوم که ۴٪ ولتاژ آن کاهش یافته است.

مثال: یک استاتور ۲ قطبی پیچک‌هایی با گام  $\frac{5}{6}$  دارد. هارمونیک‌های ۱ تا ۷ را حساب کنید.

$$h = 1 \rightarrow K_p = \sin(90 \times h \times \varepsilon) = \sin\left(90 \times 1 \times \frac{5}{6}\right) = 0.96$$

$$h = 3 \rightarrow K_p = \sin(90 \times h \times \varepsilon) = \sin\left(90 \times 3 \times \frac{5}{6}\right) = -0.707$$

$$h = 5 \rightarrow K_p = \sin(90 \times h \times \varepsilon) = \sin\left(90 \times 5 \times \frac{5}{6}\right) = 0.258$$

$$h = 7 \rightarrow K_p = \sin(90 \times h \times \varepsilon) = \sin\left(90 \times 7 \times \frac{5}{6}\right) = 0.23$$

تمرین ۲: در استاتوری که برای حذف هارمونیک ۵ طراحی شده، ضریب کوتاهی گام را برای هارمونیک‌های ۱ تا ۷ را بیابید.

### ضریب سیم‌پیچی ( $K_w$ )

اگر کلاف‌ها درون چندین شیار توزیع شده باشند و گام آن‌ها کسری یا کوتاه شده باشد ولتاژ القایی درون سیم‌پیچی از هر دو ضریب فوق‌تر تاثیر می‌گیرد، به رابطه زیر دقت کنید.

$$K_w = K_d \times K_p \rightarrow K_w(h) = K_d(h) \times K_p(h)$$

$$K_{dh} = \frac{\sin\left(qh \frac{\alpha_{ez}}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{h\alpha_{ez}}{2}\right)}$$

تمرین ۳: استاتور یک ماشین سه فاز ۴ قطب و ۳۶ شیار جهت حذف هارمونیک ۵ طراحی شده است.

۱. گام سیم پیچی را برای هارمونیک اصلی محاسبه نمایید.

۲. اگر بخواهیم  $K_w$  را برای هارمونیک ۷ داشته باشیم چقدر خواهد بود.

اگر کوتاهی گام بر اساس زاویه الکتریکی داده شود می توان از رابطه مقابل استفاده کرد:  $K_p = \cos\left(\frac{\epsilon_0}{2}\right)$  که در اینجا  $\epsilon_0$  اختلاف میان  $y_{pe}$  و  $y_{we}$  است.

### نتیجه گیری

در ماشین های القایی رابطه ولتاژ القایی در هر فاز به شکل زیر است:  $E = 4.44 K_w \phi w f N$

تمرین ۴: در یک استاتور ۳۶ شیار ۴ قطب سه فاز، اگر به منظور تضعیف هارمونیک های ۵ و ۷ گام سیم-بندی  $150^\circ_e$  انتخاب شود. ضریب سیم بندی و میزان کاهش ولتاژ اصلی را بیابید.

تمرین ۵: در یک استاتور ۲۴ شیار و ۶ قطب و سه فاز که برای حذف هارمونیک ۷ طراحی شده است. گام سیم بندی و سیم پیچی را برای هارمونیک اصلی بدست آورید.

### نمونه سوال

۱- یک استاتور دو قطبی پیچک هایی با گام  $\frac{5}{6}$  دارد. ضریب کوتاهی گام برای هارمونیک های موجود در این ماشین چقدر است؟

۲- برای ساختن یک مولد، یک استاتور ماشین سنکرون ساده دو قطبی با اتصال ستاره به کار رفته است، استاتور دارای سیم پیچی دو طبقه با چهار پیچک به ازای هر فاز است، تعداد کل شیار ۱۲ عدد است و هر پیچک ۱۰ حلقه دارد و گام الکتریکی سیم پیچ ها ۱۵۰ درجه استو رتور با سرعت  $3000 \text{ rpm}$  می چرخد و شار هر قطب ماشین  $0.19 \text{ wb}$  است در این صورت:

الف: گام شیار استاتور به درجه مکانیکی و الکتریکی چقدر است؟

ب: پیچک های استاتور چند شیار امتداد دارند؟

ج: دامنه ی ولتاژ فاز در یک فاز استاتور این ماشین چقدر است؟

د: ولتاژ پایانه های ماشین چقدر است؟  $V_t = \sqrt{3} E_{rms}$

### نمونه تست هایی از این فصل

۱- دلیل اصلی کوتاه کردن گام سیم بندی در ماشین های جریان متناوب چیست؟

(۱) افزایش ولتاژ القایی (۲) تضعیف هارمونیکهای مزاحک (۳) کاهش جریان کار (۴) کاهش جریان راه اندازی

- ۲ - یک موتور القایی سه فاز روتور قفس سنجایی موجود است. اگر از مقاومت اهمی و امپدانس تراوشی سیم های استاتور صرف نظر نماییم، افزایش بار چه اثری در دامنه میدان مغناطیسی دوار استاتور دارد؟
- (۱) دامنه میدان دوار استاتور ثابت می ماند.  
 (۲) دامنه میدان دوار استاتور زیاد می شود.  
 (۳) دامنه میدان دوار استاتور کاهش می یابد.  
 (۴) بستگی به منحنی  $T = f(\omega)$  بار دارد و هر یک از سه حالت دیگر ممکن است.

- ۳ - سرعت چرخش میدان مغناطیسی دوار ماشینهای سه فاز به کدام کمیت بستگی ندارد؟
- (۱) جفت قطب سیم بندی (۲) فرکانس منبع (۳) نسبت ولتاژ به فرکانس (۴) ولتاژ منبع

- ۴ - الکتروموتور سه فاز ۴ قطب با سیم بندی دو طبقه با ۳۶ شیار به منظور حذف هارمونی سوم سیم بندی شده است. گام کلاف در این سیم بندی کدام است؟

- (۱) ۶ (۲) ۷ (۳) ۸ (۴) ۹

- ۵ - ضریب گام برای هارمونیک پنجم با گام  $\frac{5}{6}$  کلافها کدام است؟
- (۱)  $\cos 60$  (۲)  $\cos 15$  (۳)  $\cos 45$  (۴)  $\sin 15$

- ۶ - یک ماشین سه فاز دارای ۲۴ شیار و سیم بندی یک طبقه ۴ جفت قطب است. ضریب پخش سیم بندی هارمونیک اصلی کدام است؟

- (۱) ۰/۸۶۶ (۲) ۰/۹۳۳ (۳) ۰/۹۶۶ (۴) ۱

- ۷ - در ماشینهای جریان متناوب کدام گزینه جزء مسایل به وجود آمده در اثر هارمونیکهای شیار نیست؟
- (۱) ایجاد گشتاورهای پارازیتی در موتورها (۲) ایجاد هارمونیک در ولتاژ تولید شده ژنراتورها  
 (۳) افزایش تلفات هسته در ماشین (۴) افزایش تلفات مکانیکی در ماشین

- ۸ - یک ماشین سه فاز ۲۴ شیار به صورت ۴ قطب سیم بندی شده است. ضریب توزیع سیم پیچی آن تقریباً کدام است؟ ( $\cos 75 = 0/26$ )

- (۱) ۰/۹۵ (۲) ۰/۹۶ (۳) ۰/۹۷ (۴) ۰/۹۸

۹. در یک مولد سه فاز ۴۸ شیار ۴ قطب در مجموع ۹۶۰ هادی موجود می باشد. اگر سیم بندی این مولد به منظور حذف هارمونیک های تسمه ای اجرا شده باشد در فرکانس ۵۰ Hz و با فرض اینکه حداکثر فوران زیرهر قطب ۰/۰۱ و بر باشد ولتاژ القایی فازی این مولد چند ولت خواهد بود؟

$$(\sin \frac{7}{5} = 0/139, \sin 75 = 0/96)$$

- (۱) ۳۵۵/۲ (۲) ۱۷۷/۶ (۳) ۸۸/۸ (۴) ۴۴/۴

## فصل دوم

### ماشین‌های القایی آسنکرون

ماشین‌های القایی آسنکرون معمولاً به عنوان موتور و ماشین سنکرون اغلب به عنوان مولد استفاده می‌شوند.

#### ماشین القایی:



با اتصال ولتاژ به استاتور میدان دوار تشکیل می‌شود که سرعت آن از رابطه  $n_s = 60 \frac{f}{p}$  به دست می‌آید. این میدان سبب گردش رتور می‌شود که سرعت آن نیز از رابطه  $n_r = n_s(1-s)$  قابل محاسبه است.

#### نواحی مختلف کار و لغزش ماشین القایی

۱- لحظه راه‌اندازی:  $\{S=1 \text{ و } n=0\}$  سیم‌پیچ رتور اتصال کوتاه شده ولتاژ در آن القا شده ولی حرکت نداریم.

۲- حالت کار عادی موتور:  $0 < S < 1$  و  $0 < n < n_s$

۳- حالت بی باری:  $S=0$  و  $n_s = n$

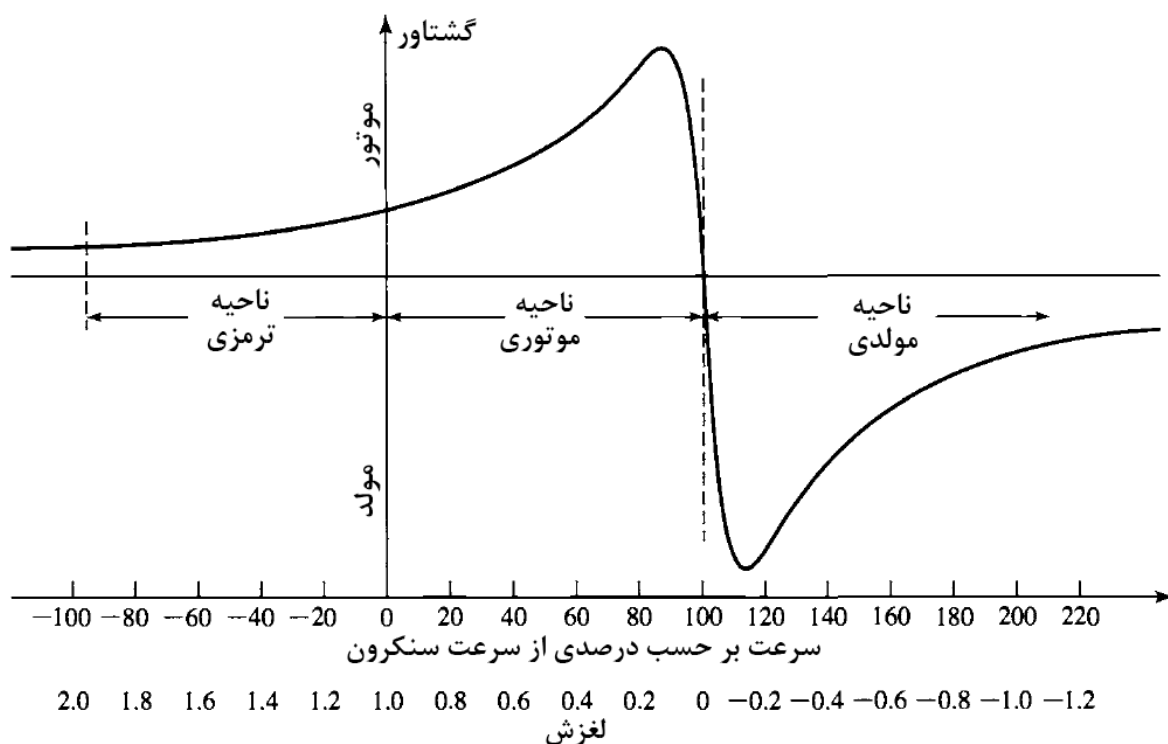
۴- حالت مولدی:  $S < 0$  و  $n > n_s$

۵- حالت ترمزی:  $S > 1$  و  $n < 0$  (یعنی رتور برعکس میدان استاتور بچرخد)

$$n < n_s \rightarrow \Delta n = n_s - n$$

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

سرعت میدان استاتور = سرعت میدان رتور  $\neq$  سرعت رتور



تست: اگر رتور ماشین القایی با سرعت سنکرون گردش کند:

الف: ولتاژ القایی در رتور صفر است.

ب: جریان رتور صفر است.

ج: گشتاور موتور صفر است.

د: همه موارد (گزینه صحیح)

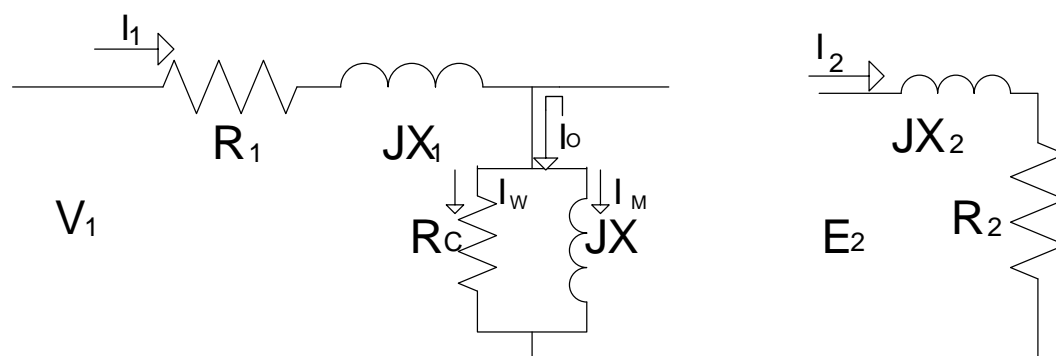
تمرین ۱ - یک موتور القایی سه فاز ۶۰ Hz دارای سرعت ۱۷۵۰ در بار کامل است:

الف) تعداد قطب ها ؟

ب) لغزش نامی؟

ج) سرعت میدان استاتور نسبت به خود استاتور، سرعت محور رتور نسبت به میدان استاتور، سرعت میدان رتور نسبت به میدان استاتور؟

### مدار معادل موتور القایی



مدار معادل الکتریکی استاتور

مدار معادل الکتریکی رتور در حالت سکون

$$\cos\phi = \frac{R_2}{Z_r} \quad I_2 = \frac{E_2}{R_2 + jX_2} \text{ جریان در حالت سکون رتور}$$

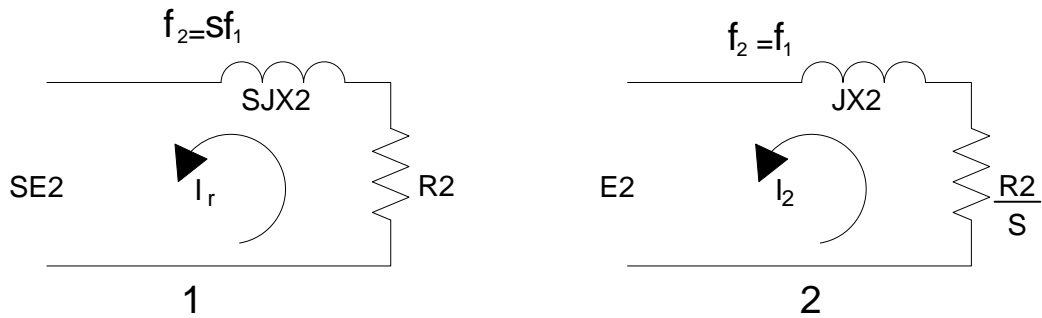
با توجه به شباهت مدار بالا به مدار ترانسفورماتور باید تذکر داد که  $V_1 = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$  می باشد. توجه شود که

مقدار جریان تحریک ( $I_0$ ) در موتور بیشتر از  $I_0$  در ترانسفورماتور است یعنی بین ۳۰ تا ۵۰ درصد جریان نامی موتور می باشد. در صورتی که در ترانس بین ۱ تا ۵ درصد جریان خاص ترانس می باشد. دلیل آن نیز این است که در موتور به علت وجود شکاف هوایی  $X_L$  از  $X_L$  ترانس بزرگ تر است. همچنین به علت اینکه سیم پیچ های استاتور به صورت توزیع شده هستند  $X_{L1}$  باز هم بزرگتر می شود.

جریان بی باری در موتور بسیار بیشتر از ترانسفورماتور معادل است به دلیل:

۱. وجود شکاف هوایی
۲. سیم پیچ توزیع شده
۳. برای غلبه بر استاتیک

## مدار معادل رتور در حالت حرکت



$$\cos \varphi = \frac{R2}{R2 + SJX2} \quad I_r = \frac{SE2}{R2 + SJX2} = \frac{E2}{\frac{R2}{S} + JX2}$$

در مقایسه شکل های ۱ و ۲ می بینیم که:

الف) جریان رتور در هر دو مدار یکسان بوده و هم فاز نیز هست.

ب) فرکانس در شکل ۱،  $Sf_1$  ولی در شکل ۲، برابر  $f_1$  است.

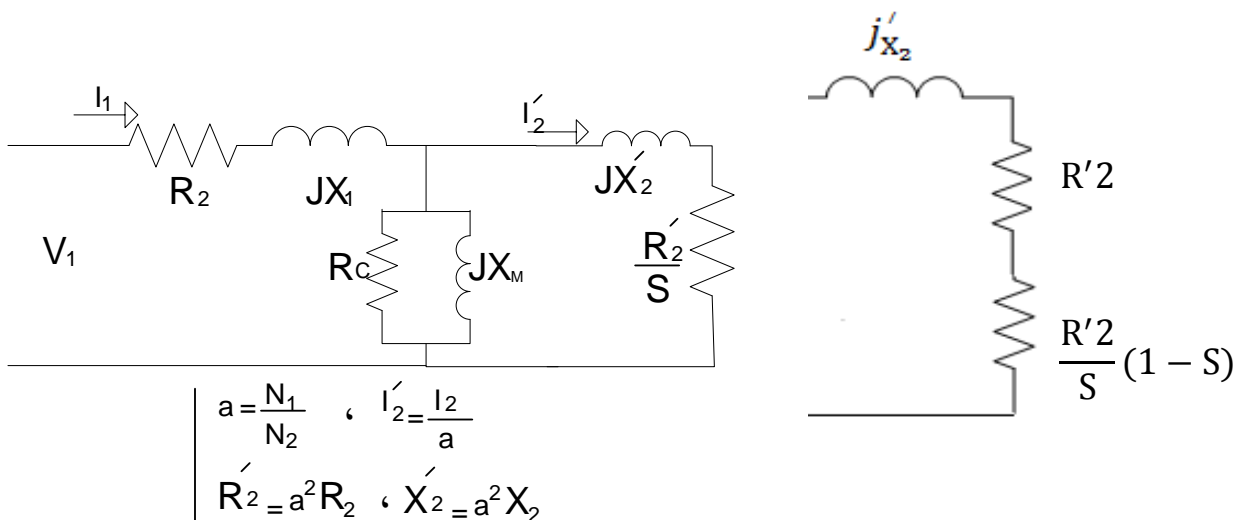
ج) توان مصرفی رتور در شکل ۱ برابر  $P = RI^2$  و در شکل ۲ برابر  $P_{ag} = \frac{R_2}{S} \times I_2^2$  است و هر چقدر  $S$  کوچکتر باشد کارایی موتور بهتر است. زیرا  $P_{ag}$  بسیار بزرگتر از  $P_{jr}$  می شود. پس می توان گفت توان  $P_{ag}$  توان عبوری از شکاف فاصله هوایی است و شامل تلفات سیم پیچی رتور و توان مکانیکی است.

$$P_{jr} = P_{cur} = SP_{ag} = P_{ag} - P_m = RI^2$$

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

مقدار  $X_m$  در موتور نسبت به ترانس کوچکتر است. زیرا ضریب تزویج (کوپلینگ) در موتور کوچکتر است.

## مدار معادل کامل موتور القایی



$$\left| \begin{array}{l} a = \frac{N_1}{N_2} \quad , \quad I'_2 = \frac{I_2}{a} \\ R'_2 = a^2 R_2 \quad , \quad X'_2 = a^2 X_2 \end{array} \right.$$



مثال: یک موتور القایی ۴۶۰ ولت، ۱۵ اسب بخار، ۴ قطب و ۶۰ هرتز مفروض است. در سرعت ۱۷۲۸ دور در دقیقه توان نامی را به بار می دهد. مجموع تلفات تهویه و اصطکاک ۷۵۰ W است. مطلوبست: الف) توان مکانیکی حاصل از ماشین ب) توان عبوری از شکاف هوایی ج) تلفات مسی رتور

$$P_m = P_{out} + P_{fw} = 11040 + 750 = 11790 \text{ w}$$

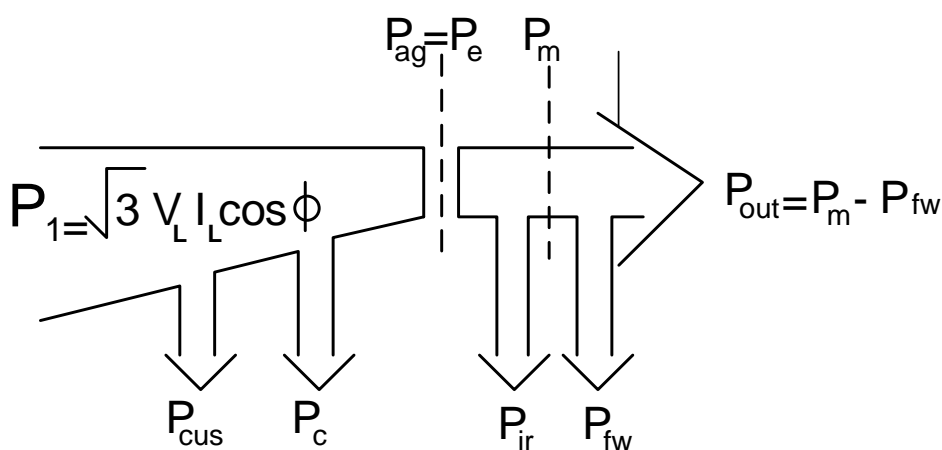
$$P_u = 15 \times 736 = 11040 \text{ w}$$

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

$$P_{ag} = \frac{P_m}{(1 - S)} = \frac{11790}{1 - 0/04} = 12281 \text{ w}$$

$$P_{jr} = SP_{ag} = 0/04 \times 12281 = 491 \text{ w}$$

### نمودار توازن قدرت موتور



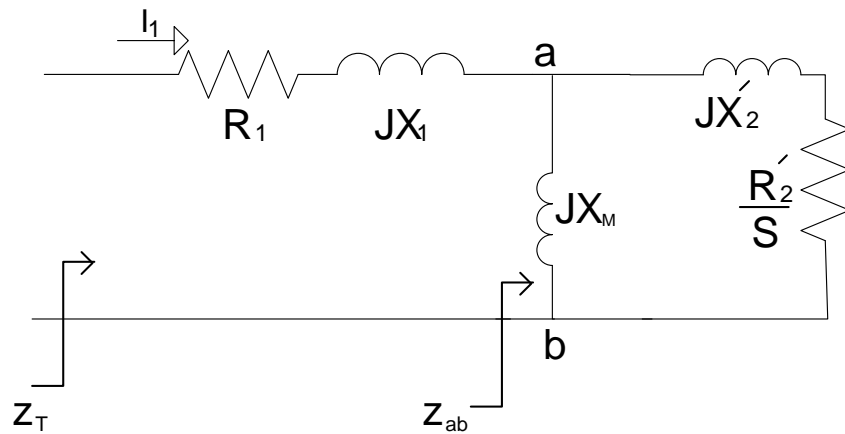
$$P_{ag} = \frac{P_2}{S} I_2^2 \quad P_C = \frac{3V_P^2}{R_C} \quad P_{cus} = 3R_s I_1^2$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_1} \quad \omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \quad \omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}$$

$$T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad T_{ag} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \rightarrow T_{ag} = \frac{P_m}{\omega_r}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_m = (1 - S)P_{ag} \\ n = n_s(1 - S) \\ n_s = \frac{n}{1 - S} \end{array} \right\} \rightarrow \left. \begin{array}{l} \omega_r = \omega_s(1 - S) \\ \omega_s = \frac{\omega_r}{(1 - S)} \end{array} \right\} \rightarrow T_{ag} = \frac{P_m}{\frac{\omega_r}{1 - S}} = \frac{P_m}{\omega_r}$$

## مدار معادل تقریبی موتور القایی IEEE

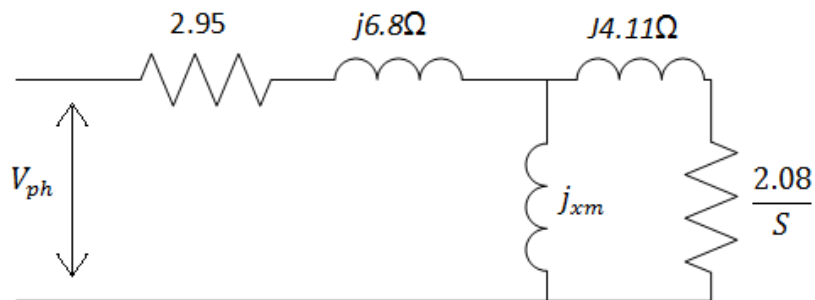


$$Z_t = (R_{ab} + R_1) + j(x_{ab} + x_1)$$

$$Z_{ab} = \frac{jx_m \left( \frac{R'_2}{S} + jx'_2 \right)}{\frac{R'_2}{S} + j(x'_2 + x_m)}$$

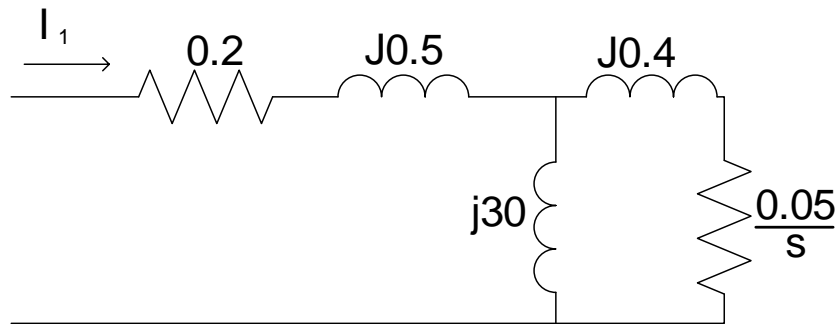
$$I_1 = \frac{V_1}{Z_t}$$

تمرین ۲ - مدار معادل یک فاز موتور القایی ۱۲ قطب، ۴۲۰ ولت، ۵۰ هرتز به صورت زیر است:



اگر جریان دریافتی در حالت بی باری 6.7A و اتصال موتور مثلث شود، مطلوب است:  
جریان ورودی، ضریب توان و جریان معادل روتور در لغزش  $S=3\%$

مثال: یک موتور القایی سه فاز ۴ قطب، ۵۰ هرتز و ۳۸۰ ولت با مدار شکل زیر داریم. مطلوب است:  
الف) جریان استاتور و سرعت روتور در لغزش ۴ درصد ب) گشتاور خروجی و راندمان موتور دربار کامل اگر اتصال موتور ستاره باشد و تلفات ثابت ماشین ۶۰۰w باشد.



$$\text{الف) } Z_t = R_1 + R_{ab} + j(x_1 + x_{ab})$$

$$Z_{ab} = \frac{jx_m \left( \frac{R'_2}{S} + jx'_2 \right)}{\frac{R'_2}{S} + j(x_m + x'_2)} \Rightarrow z_{ab} = \frac{j30 \left( \frac{0/05}{0/04} + j0/4 \right)}{\frac{0/05}{0/04} + j(30 + 0/4)} = \frac{30 \angle 90^\circ \times 1/3 \angle 17/72}{30/4 \angle 87/64}$$

$$Z_{ab} = \frac{39 \angle 107/72}{30/4 \angle 87/64} = 1/28 \angle 20/08 \Omega = 1/2 + j0/43 \Omega$$

$$Z_t = 1/2 + 0/2 + j(0/05 + 0/44) = (1/4 + j0/94) \Omega$$

$$I_1 = \frac{V_p}{Z_t} = \frac{220}{1/4 + j0/94} = \frac{220 \angle 0^\circ}{1/68 \angle 33/88} = 129/95 \angle -31/52 \text{ A}$$

$$n = n_s (1 - S) = 1500(1 - 0/04) = 1440 \text{ RPM} \quad n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ RPM}$$

$$\text{ب) } T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad P_{ag} = 3RabI_1^2 = 1/2 \times 130/95^2 = 20577/48 \text{ w}$$

$$P_{ag} = 3 \times P_{ag} = 62519/9 \text{ w} \quad P_m = (1 - S)P_{ag} = (1 - 0.04) \times 6251/9 = 60019/14 \text{ w}$$

$$P_{out} = P_m - P_{fw.c} = 59262/72 - 600 = 58662/72 \text{ w}$$

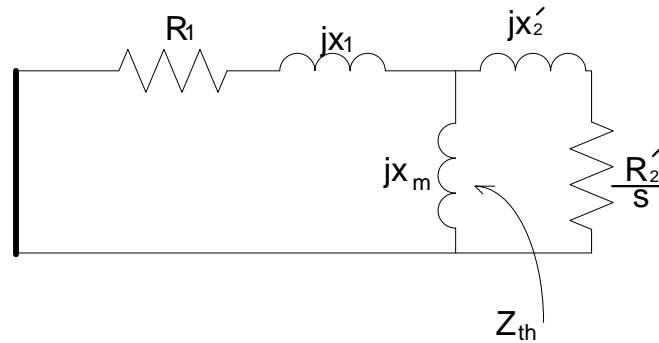
$$\omega_r = \frac{2\pi n}{60} \Rightarrow \omega_r = \frac{2 \times 3/14 \times 1440}{60} = 150/72 \text{ Rad} \quad T_{out} = \frac{58662/72}{150.72} = 389/21 \text{ N.M}$$

$$\theta = \theta_v - \theta_i = 0 - (-33/88) = 33/88^\circ$$

$$P_1 = \sqrt{3}V_t I_L \cos \theta = \sqrt{3} \times 380 \times 130/95 \times \cos 33/88 = 71554/35 \text{ w}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_1} = \frac{59419/10}{71554/35} = 83/01\%$$

## مدار معادل تونی



$$Z_{th} = \frac{jxm(R_1 + jx_1)}{R_1 + j(x_m + x_1)} = R_{th} + jx_{th}$$

$$V_{th} = V_{ph} \left( \frac{jx_m}{R_1 + j(x_m + x_1)} \right) = V_{ph} \left( \frac{x_m}{\sqrt{R_1^2 + (x_m + x_1)^2}} \right)$$

$$U_{th} = \left( \frac{x_m}{x_1 + x_m} \right) V_{ph} \left\{ \begin{array}{l} \ll R_1 \ll x_1 + x_m \end{array} \right.$$

$$R_{th} = \left( \frac{x_m}{x_1 + x_m} \right)^2 \times R_1 \left\{ \begin{array}{l} \ll R_1 \ll x_1 + x_m \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \text{از } R_1 \text{ صرف نظر شده است} \end{array} \right.$$

$$x_{th} = x$$

$$I'_2 = \frac{U_{th}}{\underbrace{\left( R_{th} + \frac{R'_2}{S} \right) + j(x_{th} + x'_2)}_{Z_{eq}}} \quad \longrightarrow \quad I'_2 = \frac{U_{th}}{Z_{eq}}$$

مثال: در مدار مسئله قبل معادل‌های تونن را حساب کنید.

$$Z_{th} = \frac{jxm(R_1 + jx_1)}{R_1 + j(x_m + x_1)}$$

$$Z_{th} = \frac{j30(0/2 + 0/5j)}{0/2 + j(30 + 0/5)} = \frac{30 \angle 90 \times 0/5 \angle 68/19}{30/5 \angle 80/62} = \frac{15/9 \angle 158/19}{30/5 \angle 89} = 0.521 \angle 69/19$$

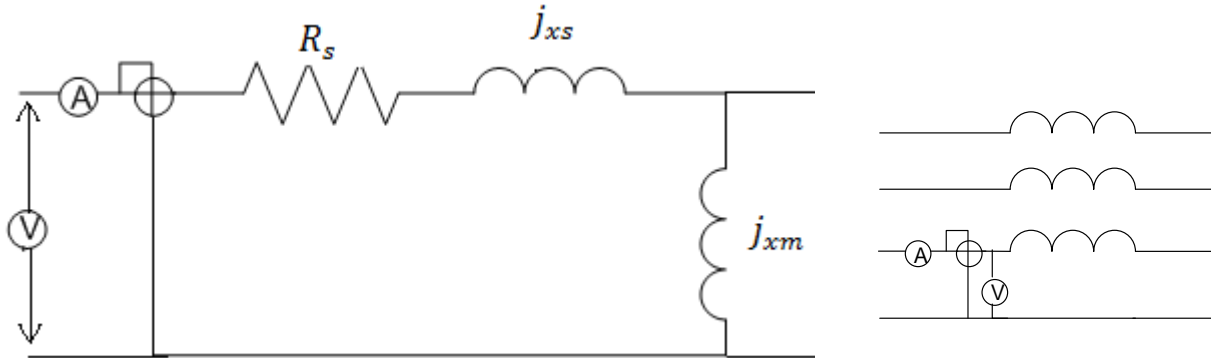
$$U_{th} = U_{ph} \times \left( \frac{jx_m}{R_1 + j(x_m + x_1)} \right) = 220 \left( \frac{j30}{0/2 + j(30 + 0/5)} \right) = 220 \left( \frac{30 \angle 90}{30/5 \angle 89} \right) = 216/39 \angle 1$$

$$I_2 = \frac{V_{th}}{Z_i} = \frac{216/4 \angle 37/7}{1/69 \angle 31/66} = \frac{220 \angle 0}{1/68 \angle 33/88} = 121/7 \angle -31/66 \text{ A}$$

## آزمایش‌های ماشین سه‌فاز

### ۱- آزمایش بی باری: (NLT)

در آزمایش بی‌باری موتور القایی می‌توان جریان تحریک  $I_0$  و تلفات مکانیکی را بدست آورد. در این آزمایش استاتور به شبکه‌ای با ولتاژ و فرکانس نامی متصل است ولی در خروجی باری نداریم.



$$P_{nl} = P_{Rot} + P_{cus}$$

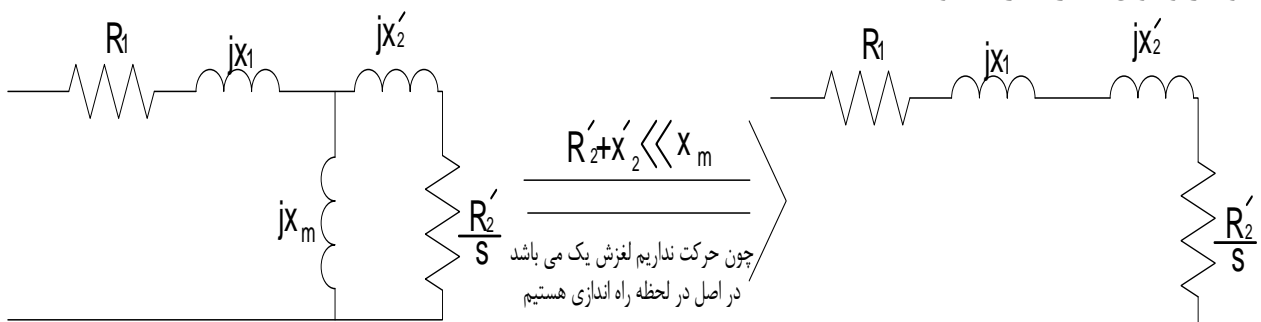
$$P_{Rot} = P_{NL} - 3R_S I_S^2$$

$$\left. \begin{aligned} P_w = P_{NL} & \quad \langle 1 \rangle Z_{NL} = \frac{V_{NL}}{I_{NL}} \\ V_v = V_{NL} = V_{ph} \\ I_{(A)} = I_{NL} & \quad \langle 2 \rangle R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3I_N^2} \end{aligned} \right\} \langle 3 \rangle X_{NL} = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2}$$

$$X_{NL} = X_s + X_m$$

### ۲- آزمایش روتور قفل شده: (BRT)

این آزمایش مشابه آزمایش اتصال کوتاه ترانسفورماتور است و با کمک آن می‌توان به بسیاری از پارامترهای موتور پی برد. در این آزمایش برای جلوگیری از چرخش روتور، آن را قفل یا مسدود می‌نماییم و در شرایط نامی به استاتور ولتاژ اعمال می‌کنیم. این ولتاژ را توسط اتوترانس به تدریج افزایش می‌دهیم تا مقادیر جریان، ولتاژ و توان اندازه‌گیری شوند.



$$X_m = X_{NL} - X_1 \quad \text{از طرفی} \quad X_{BR} = X_1 + X_2'$$

$$\left. \begin{aligned} \langle 1 \rangle Z_{BR} &= \frac{V_{BR}}{I_{BR}} \\ \langle 2 \rangle R_{BR} &= \frac{P_{BR}}{3I_{BR}^2} \end{aligned} \right\} \langle 3 \rangle X_{BR} = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2}$$

نسبتاً خوب تقریب با  $\Rightarrow X_1 = X_2 = \frac{X_{BR}}{2}$

$$R_{BR} = R_1 + R'_2 \quad R'_2 = (R_{BR} - R_1) \Leftarrow X_m = X_{NL}$$

$$R'_2 = (R_{BR} - R_1) \left( \frac{X_m + X_2}{X_m} \right)^2 \quad \text{حالت } X_m \neq X_{NL}$$

### ۳- آزمایش جریان مستقیم (DC)

این آزمایش بلافاصله پس از آزمایش رتور قفل شده صورت می‌گیرد و چرا با اعمال ولتاژ DC به استاتور و اندازه‌گیری جریان عبوری مقاومت  $R_{dc}$  به دست می‌آید که مقدار آن را می‌توان تقریباً برابر  $R_1 \approx R_{dc}$  گرفت. مقدار دقیق آن به علت وجود اثر پوستی در جریان AC از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$R_1 = (1.1-1.3)R_{dc} \quad R_{dc\lambda} = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}} \quad R_{dc\Delta} = \frac{3V_{dc}}{2I_{dc}}$$

### نتایج آزمایش‌های سه‌گانه

$$\begin{aligned} 1) X_s &\cong X'_2 = \frac{X_{BR}}{2} & 2) X_m &= X_{nl} - X_s \\ 3) R_s &\cong R_1 = 1.1R_{dc} \text{ یا } 1.3R_{dc} & 4) R'_2 &= (R_{br} - R_1) \left( \frac{X_m + X_s}{X_m} \right)^2 \end{aligned}$$

☞ رابطه میان توان جریان راه اندازی با آزمایش رتور قفل شده به شرح زیر است:

$$I_{st} = \frac{V_{nl}}{V_{BR}} \times I_{BR} \quad \text{و} \quad P_{st} = \left( \frac{V_{nl}}{V_{BR}} \right)^2 \times P_{BR} \quad \text{و} \quad \frac{I_{st}}{I_{BR}} = \frac{V_{nl}}{V_{br}}$$

مثال: یک موتور القایی ۳ فاز با اتصال ستاره به مشخصات زیر داریم:

$$U_N = 2200$$

$$P_N = 60\text{hp}$$

$$F_N = 60\text{Hz}, 2p = 6$$

$$U_{NL} = 2200\text{v}, P_{NL} = 1600\text{w}, I_{NL} = 4/5\text{A}, F_{NL} = 60\text{Hz} \quad \text{۱- نتایج آزمایش بی باری:}$$

$$V_{BR} = 270, P_{BR} = 9000\text{w} \quad I_{BR} = 25\text{A}, f_{Br} = 15\text{Hz} \quad \text{۲- آزمایش رتور قفل شده:}$$

$$V_{dc} = 28\text{v}, I_{dc} = 5\text{A} \quad \text{۳- آزمایش DC:}$$

الف) تلفات چرخشی،  $P_{out}$  در حالت بی باری را به دست آورید.

ب) پارامترهای مدار معادل تقریبی را به دست آورید.

ج) پارامترهای مدار تونن را محاسبه کنید.

$$R_{dc} = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}} = \frac{28}{2 \times 5} = 2.8$$

(الف)

$$P_{ROT} = P_{NL} - 3R_{NL} I_{NL}^2 = 1600 - 3 \times 2/8(4/5)^2 = 1429/9W$$

(ب)

$$Z_{NL} = \frac{V_{NL}}{I_{NL}} = \frac{2200}{4/5} = 282/27 \Rightarrow R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3I_{NL}^2} = \frac{1600}{3(4/5)^2} = 26/24$$

$$X_{NL} = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2} = \sqrt{282/27^2 - 26/34^2} \Rightarrow X_{NL} = 281$$

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}}{3I_{BR}^2} = \frac{9000}{3(25)^2} = 4/8\Omega \quad Z_{BR} = \frac{V_{BR}}{I_{BR}} = \frac{270}{25} = 6/24\Omega$$

$$X_{BR} = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} = \sqrt{6/2^2 - 4/8^2} = 3/98 \rightarrow X_{BR} = 3/98 \frac{60}{15} = 15/92$$

$$X_{S'} = X'_2 = \frac{15/95}{2} = 7/96 \Rightarrow X_M = X_{NL} - X_1 = 281 - 7/96 = 273/04$$

$$R'_2 = (R_{BR} - R_1) \left( \frac{x_m + x'_2}{x_m} \right) \Rightarrow R'_2 = (4/8 - 2/8) \left( \frac{273/04 + 7/96}{273} \right)^2 \Rightarrow R'_2 = 2/2\Omega$$

(ج)

$$Z_{th} = \frac{jxm(R_1 + jx_1)}{R_1 + j(x_m + x_1)} = R_{th} + jx_{th}$$

$$V_{th} = V_{ph} \left( \frac{jx_m}{R_1 + j(x_m + x_1)} \right)$$

تمرین ۱: نتایج آزمایش بی‌باری ورتو قفل شده و DC به روی یک موتور القایی  $1200\sqrt{3}$  ولت و  $60\text{hp}$ .

$$V_N = 1300\sqrt{3} \quad F_N = 50\text{Hz} \quad \text{و } 6 \text{ قطب با اتصال ستاره به شرح زیر است.}$$

$$P_N = 60\text{hP} \quad \text{6 قطب} \quad \text{مطلوب است:}$$

$$NLT = 1200\text{v}, 50\text{HZ}, 5\text{A}, 1500\text{w}$$

(الف) تلفات چرخشی ماشین.

$$BRT = 160\text{v}, 10\text{HZ}, 28\text{A}, 7500\text{w}$$

(ب) پارامترهای مدار معادل تقریبی.

$$DCT = 20\text{v}, 5\text{A}$$

(ج) پارامترهای مدار معادل تونن.

تمرین ۲: در یک موتور القایی  $480$  ولت، سه فاز،  $4$  قطب،  $50$  هرتز با لغزش  $0.04$  کار می‌کند. مطلوب است:

(الف) سرعت میدان مغناطیسی (ب) سرعت رتور  $n_r$  (ج) سرعت لغزش (د) فرکانس رتور

تمرین ۳: نتایج آزمایش DC، بی‌باری، رتور قفل شده روی یک موتور القایی سه فاز  $7/5\text{HP}$  و  $208\text{V}$  و  $4$  قطب

و  $60$  هرتز با اتصال مثلث به صورت زیر است:

$$NLT: I_A=8.12\text{A} \quad I_B=8.2\text{A} \quad I_C=8.18\text{A} \quad 208\text{V}, 420\text{W}, 60\text{HZ}$$

$$BRT: I_A=28.01\text{A} \quad I_B=28\text{A} \quad I_C=27.6\text{A} \quad 25\text{V}, 920\text{W}, 15\text{HZ}$$

$$DCT: 13.6\text{V} \quad 28\text{A}$$

مطلوب است: (الف) مدار معادل تکفاز این موتور IEEE (ب) تلفات چرخشی موتور

## گشتاور در ماشین‌های القایی سه‌فاز

۱. گشتاور مکانیکی ( $T_{mec}$ )

$$T_{mec} = \frac{m}{\omega s} \times \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \times \frac{R'_2}{s}$$

در لغزش های کم :  $T_{mec} = \frac{m}{\omega s} \times \frac{V_{th}^2}{R'_2} \times s$

در لغزش های زیاد  $T_{mec} = \frac{m}{\omega s} \times \frac{V_{th}^2}{X_{th+X'_2}} \times \frac{R'_2}{s}$

از روابط بالا میتوان گفت هرچه  $R'_2$  بزرگتر باشد گشتاور مکانیکی بزرگتر بوده و بالعکس.

اگر  $T_{load}$  بزرگ تر از  $T_{st}$  باشد موتور راه نمی افتد.

۲. گشتاور راه اندازی ( $T_{st}$ )

$$T_{st} = \frac{m}{\omega s} \times \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + R'_2)^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \times R'_2$$

۳. گشتاور بحرانی ( $T_{max}$ )

$$T_{max} = \frac{\pm m}{2\omega s} \times \frac{V_{th}^2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \pm R_{th}}$$

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

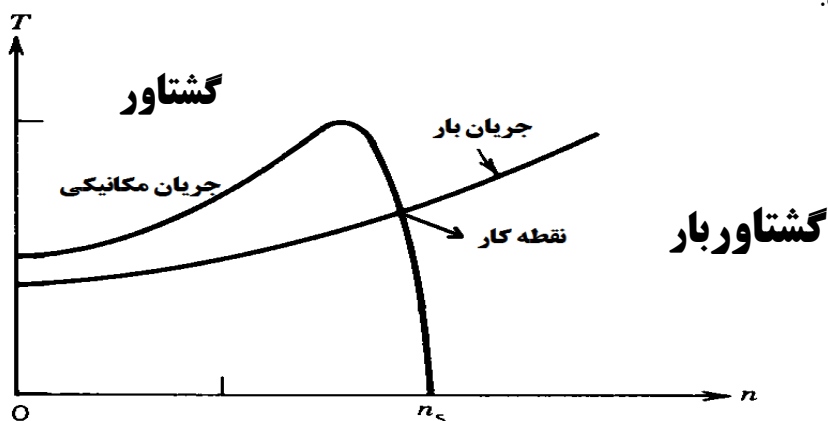
- : حالت ژنراتوری

+ : حالت موتوری

$R'_2$  هیچ تاثیری روی  $T_{max}$  ندارد. و  $T_{max}$  تابع ولتاژ اعمالی است. اگر از  $R_{th}$  و  $X_{th}$  صرف نظر کنیم:

$$S_{max} = \frac{R'_2}{X'_2} = \frac{R_2}{X_2} \rightarrow T_{max} = \frac{m}{2\omega s} \times \frac{(SE_r)^2}{X_2}$$

به محل برخورد منحنی مشخصه بار با منحنی مشخصه موتور نقطه کار گویند و گشتاور این نقطه  $T_{mec}$  و لغزش آن  $s$  است.





گشتاور ماکزیمم موتور القایی هنگامی است که توان مصرف شده در مقاومت  $\frac{R'_2}{s}$  ماکزیمم باشد. برای

$$\text{این کار باید } \frac{R'_2}{s} = Z_{eq} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \leftarrow \frac{R'_2}{s} = Z_{eq}$$

$$\Rightarrow S \rightarrow S_m = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2}}$$

$$\text{رابطه تقریبی } S_m = \frac{R'_2}{X_{th} + X'_2} \text{ شرط } R_{th} \ll (X_{th} + X'_2)$$

$$n_s(1 - S_m) = n_{min} \quad \text{حداقل سرعت پایدار ماشین را با}$$

برای هر قسمت موتور می توان گشتاوری متناظر با توان آن نقطه تعریف کرد.

$$T_{ag} = \frac{P_{ag}}{\omega S} = T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega r} \quad T_{con} = \frac{P_{con}}{\omega r} \quad T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega r}$$

### نسبت گشتاورها

$$\frac{T_{mec}}{T_{st}} = \frac{S(S_m^2 + 1)}{S_m^2 + S^2} \quad \text{مکانیکی به راه اندازی}$$

$$\frac{T_{mec}}{T_{max}} = \frac{2S \times S_m}{S_m^2 + S^2} \rightarrow \frac{T_{mec}}{T_{max}} = \frac{2}{\frac{S}{S_m} + \frac{S_m}{S}} \quad \text{مکانیکی به بحرانی}$$

$$\frac{T_{st}}{T_{max}} = \frac{2S_m}{S_m^2 + 1} \quad \text{راه اندازی به بحرانی}$$

$$\frac{T_{st}}{T_{mec}} = \left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 \times S \quad \text{راه اندازی به مکانیکی}$$

راندمان در ماشین های القایی مانند سایر ماشین ها از رابطه  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$  به دست می آید. اما در ماشین های القایی به نسبت توان خروجی به توان الکترومغناطیس راندمان داخلی می گویند.

$$\eta = (1 - S)100$$

تمرین: معادله جریان در میله های اتصال کوتاه شده رتور یک موتور القایی سه فاز 60Hz به صورت

$$i_r(t) = 50\sqrt{2} \sin(31.4t - 10)$$

الف) سرعت رتور

ب) تلفات مسی رتور

ج) توان گشتاور الکترو مغناطیس

د) توان خروجی در صورتی که تلفات ماشین (Pfw) 1500w باشد.

ه) راندمان داخلی ماشین

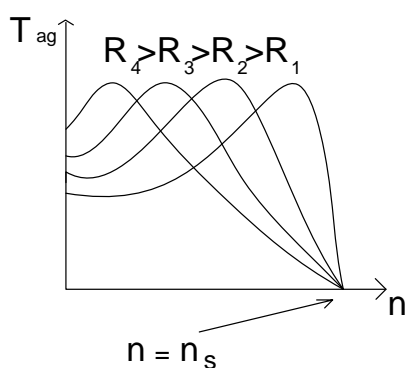
تمرین ۳ - یک موتور دو قطب که به شبکه 60Hz متصل است در سرعت 3000 RPM دارای گشتاور حداکثر است که مقدار آن برابر 28.5N.m است:

الف) گشتاور راه اندازی

ب) گشتاور موتور در سرعت 2400 RPM

ج) در چه نقاطی بر حسب لغزش، گشتاور نصف گشتاور حداکثر است؟

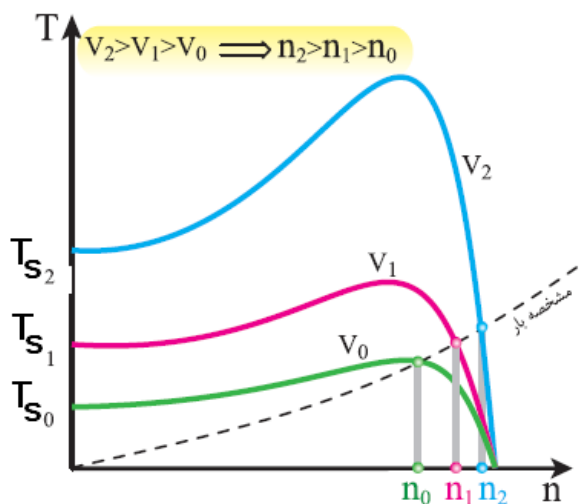
با توجه به روابط گشتاور موتور القایی می توان گفت دو عامل مقاومت اهمی رتور و ولتاژ تغذیه در مقدار گشتاور تاثیر دارند. اگر مقاومت اهمی رتور زیاد شود به علت کم شدن اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان رتور توان حقیقی رتور بالا رفته و گشتاور راه اندازی زیاد می شود. در منحنی های شکل زیر تاثیر مقاومت اهمی رتور را می بینیم.



$$S=0 \implies T=0$$

می بینیم که با افزایش مقاومت راه اندازی رتور گشتاور راه اندازی نیز افزایش می یابد ولی باعث بالا رفتن تلفات می شود و راندمان را کم می کند. تغییر R رتور هیچ تاثیری بر گشتاور ماکزیمم ندارد. با توجه به منحنی های به دست آمده نتیجه می گیریم در بارهای بزرگ بهتر است R رتور بزرگ باشد. همچنین برای داشتن حداکثر گشتاور راه اندازی باید  $S_m=1$  باشد و

$$\cos \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ باشد.}$$



از آن جایی که ولتاژ ورودی تاثیر مستقیم بر ولتاژ رتور دارد در شکل زیر می توان تاثیر آن را بر گشتاور راه اندازی مشاهده کرد.

$$\frac{T_{ag1}}{T_{ag2}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2$$

در موتورهای القایی دو رابطه زیر با تقریب نیز صادق اند:

$$\frac{T_s}{T} = \left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 \times S \quad I_s = \frac{V_{ph}}{V_{BR}} \propto I_{BR}$$

تمرین ۴ - یک موتور القایی ۴،۴۶۰۷، ۴ قطبی، ۶۰Hz مفروض است و سرعت اسمی آن ۱۷۴۰RPM می باشد. سایر مشخصات موتور که از نوع روتور سیم پیچی شده است به قرار زیر است.

$$R_1 = 0.25\Omega \quad R'_2 = 0.2\Omega \quad X_1 = X'_2 = 0.5\Omega \quad X_m = 30\Omega \quad 1700 \text{ W چرخشی}$$

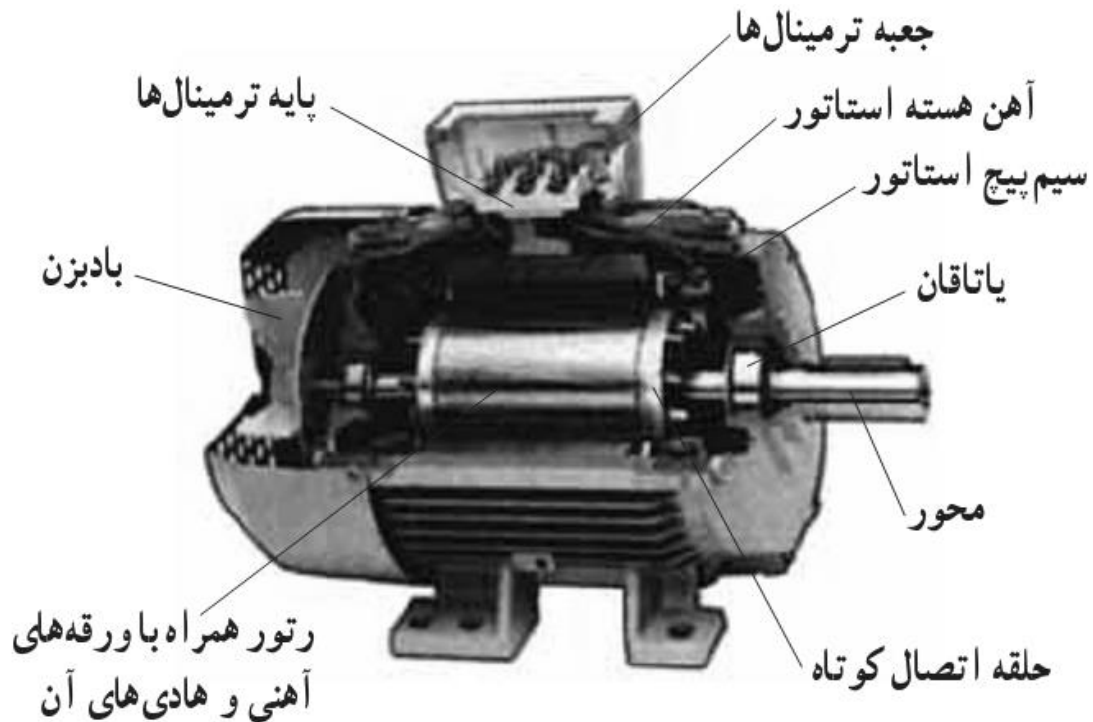
مطلوبست:

- الف) اگر موتور به ولتاژ اسمی وصل شود جریان راه اندازی را پیدا کنید.  
 ب) گشتاور راه اندازی در لحظه راه اندازی چقدر است.  
 ج) لغزش در شرایط اسمی.  
 د) جریان نامی با توجه به مدل تقریبی.  
 ه) نسبت جریان راه اندازی به جریان نامی.  
 و) ضریب توان در شرایط اسمی  
 ز) گشتاور اسمی  
 ح) بازده کلی و بازده ایده آل ( $T_{ag}$ )  
 ط) در چه لغزشی گشتاور ماکزیمم می شود.  
 ی) گشتاور ماکزیمم چقدر است.  
 ک) اگر بخواهیم  $T_m$  در لحظه راه اندازی رخ دهد به هر فاز روتور از طریق حلقه‌های لرزان چه مقدار مقاومت باید اضافه کنیم؟

- تمرین ۵ - در یک موتور ۴۶۰ ولت، ۶۰ هرتز، ۴ قطب رتور قفسه سنجابی، سرعت اسمی رتور ۱۷۱۰ RPM است. اگر جریان راه اندازی ۴ برابر جریان نامی باشد:  
 الف) گشتاور راه اندازی چند درصد گشتاور نامی است؟  
 ب) در چه سرعت و لغزشی گشتاور ماکزیمم رخ می دهد؟  
 ج)  $T_{max}$  چند درصد گشتاور اسمی است؟

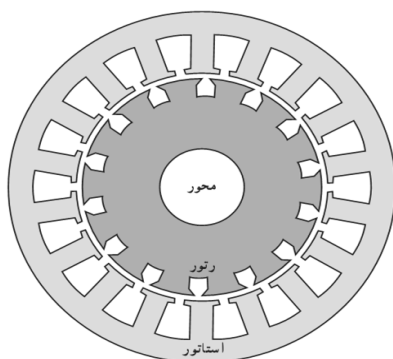
## موتورهای القایی با رتور قفسی سنجابی (رتور اتصال کوتاه)

الف) ساختمان و اصول کار موتور القایی با رتور قفسی

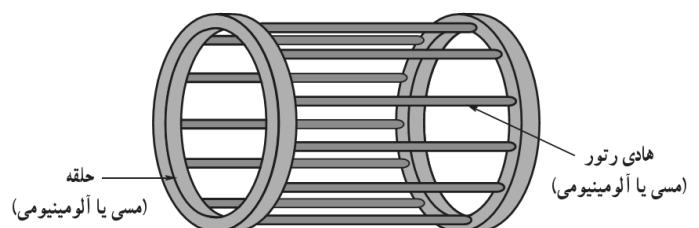


برشی از ساختمان موتور القایی رتور قفسی

در این موتور سیم پیچی استاتور در داخل شیارهای هسته‌ی استاتور قرار می‌گیرد و رتور این نوع رتورها محوری فولادی دارد که بر روی آن یک هسته مورق قرار دارد. در اطراف این هسته مغناطیسی استوانه‌ای شکل سوراخ‌هایی قرار دارد که آن‌ها را با میله آلومینیومی یا مسی پر می‌کنند. ابتدا و انتهای این میله‌ها توسط حلقه‌های همجنس به هم وصل می‌شوند تا مدارهای بسته به دست آید. این مدار بسته را سیم پیچی رتور گویند. هسته‌های آهنی استاتور و رتور را جهت کاهش تلفات ناشی از جریان گردابی مورق می‌نمایند. در شکل زیر یک نمونه مدار رتور قفسی همراه با مقطع هسته‌ی استاتور و رتور نمایش داده شده است.



نمایش مدار مغناطیسی موتور القایی رتور قفسی



طرز کار این نوع موتورها به این صورت است که در ابتدای راه اندازی موتور مانند یک ترانسفورماتور عمل می‌کند و میدان دوار موجود در استاتور باعث ایجاد فوران متغیری در رتور می‌گردد و به همین دلیل ولتاژ القایی در رتور پدید می‌آید. چون مسیر هادی‌های رتور بسته است لذا این ولتاژ باعث ایجاد جریان القایی در رتور خواهد شد. این جریان القایی نیز ایجاد یک میدان مغناطیسی می‌کند که بر اساس قانون، با عامل به وجود آورنده‌اش یعنی میدان استاتور مخالفت می‌کند. این مخالفت باعث می‌شود تا رتور در جهت حرکت میدان به حرکت در آید تا خطوط کمتری از میدان را قطع کند و همین امر مبنای ایجاد گشتاور در موتور القایی است. حال فرض کنید که رتور با سرعت سنکرون همراه با میدان استاتور به چرخش درآید در این صورت فلویی توسط هادی‌های رتور قطع نمی‌شود و ولتاژی نیز در رتور القا نمی‌گردد. لذا گشتاوری نیز تولید نخواهد شد. به همین جهت در موتورهای آسنکرون همیشه سرعت رتور کمتر از سرعت میدان دوار می‌باشد و هر چه اختلاف این سرعت‌ها بیشتر باشد (لغزش بیشتر)، گشتاور ایجاد شده نیز بیشتر خواهد شد.

### ب) عملکرد موتور القایی قفسی زیر بار

در زمان راه اندازی چون لغزش برابر یک می‌باشد لذا مقادیر ولتاژ مقاومت القا جریان رتور دارای حداکثر مقدار خود هستند و چون مقاومت اهمی رتور کوچک است، لذا جریان راه‌انداز بزرگی به وجود می‌آید. اما به دلیل کوچک بودن مقاومت اهمی و وجود خاصیت القایی گشتاور راه انداز، افزایش چندانی نخواهد داشت و حتی ممکن است از گشتاور نامی نیز کوچکتر باشد. با راه‌اندازی موتور افزایش سرعت آن نقطه کار ماشین روی مشخصه گشتاور-دور شروع به حرکت می‌کند تا گشتاور تولیدی با گشتاور بار مکانیکی به تعادل برسند. در این صورت نقطه کار موتور ثابت خواهد ماند. بنابراین با افزایش بار مکانیکی سرعت موتور کاهش خواهد یافت. عموماً نقطه کار این ماشین‌ها را طوری انتخاب می‌کنند که موتور سرعتی در حدود سرعت سنکرون داشته باشد و در این نواحی منحنی کار یا مشخصه گشتاور-دور یا گشتاور-لغزش تقریباً خطی است.

در حوالی بار نامی کاهش سرعت موتور های القایی مانند موتورهای جریان مستقیم شنت نسبتاً کم است و به همین جهت تغییرات سرعت موتور القایی را گاهی ((رفتار شنتی)) نیز می‌گویند.

### ج) راه اندازی موتورهای القایی رتور قفسی

در موتورهای القایی قفسی جریان راه اندازی مقدار زیادی دارد لذا جهت راه‌اندازی این موتورها باید از روش‌های خاصی استفاده نمود تا جریان راه‌اندازی مشکل زیادی ایجاد نکند. کاهش جریان راه‌اندازی این موتورها تنها از طریق کاهش ولتاژ استاتور میسر می‌باشد. به همین جهت اگر ولتاژ راه‌اندازی را کاهش ندهیم، در این صورت مجبور به استفاده از رله‌ها و کلیدهای با جریان بیشتر هستیم و ممکن است سیم بندی استاتور در اثر این جریان زیاد آسیب ببیند.

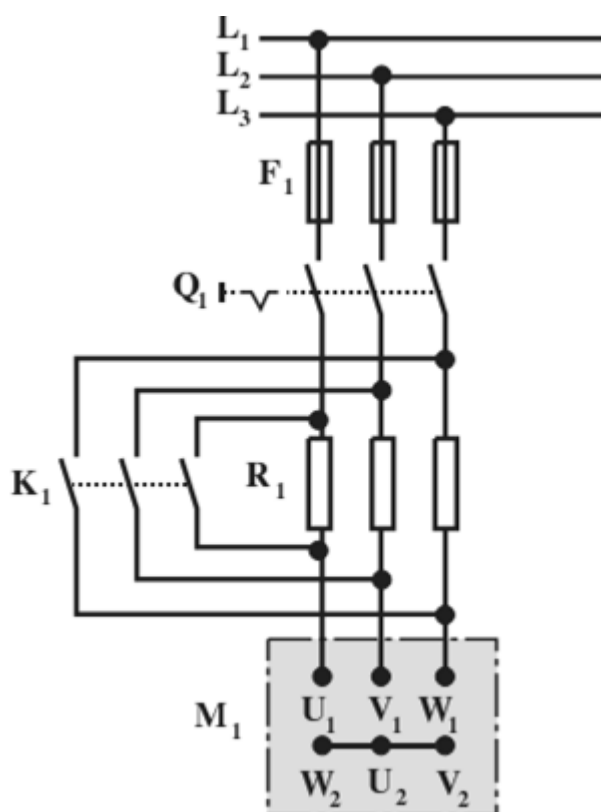
## روش‌های راه‌اندازی موتورهای قفسی

- (۱) روش راه‌انداز مستقیم
- (۲) استفاده از مقاومت راه‌انداز در مدار استاتور
- (۳) استفاده از اتوترانسفورماتور
- (۴) استفاده از راه‌اندازی ستاره-مثلث
- (۵) روش راه‌اندازی نرم (با کمک مدارات الکترونیک صنعتی)

در تمامی روش‌های بالا ولتاژ ترمینال موتور را کاهش می‌دهیم. لازم به ذکر است که روش‌های استاتوری فقط در بی‌باری یا بارهای کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل این مسأله آن است که طبق رابطه گشتاور در حالت راه‌اندازی یا حالت کار، گشتاور متناسب با مجذور ولتاژ است. بنابراین با کاهش ولتاژ استاتور گشتاور تولیدی بسیار کم خواهد شد و در این حال ممکن است موتور القایی قادر به راه‌اندازی نشود.

### استفاده از مقاومت راه‌انداز در مدار استاتور

در این روش به منظور کاهش ولتاژ استاتور در هنگام راه‌اندازی از مقاومت‌های اهمی در مسیر استاتور استفاده می‌شود. شکل صفحه بعد این نوع راه‌اندازی را نشان می‌دهد.



در این مدار پس از وصل کلید S که موتور در ابتدای راه‌اندازی است کلید K قطع است و مقاومت‌های R در مدار استاتور قرار می‌گیرند و با مقاومت سیم‌پیچی استاتور سری شده و باعث افت ولتاژهای ترمینال‌های استاتور خواهند شد. با افزایش سرعت موتور و رسیدن به سرعت مطلوب کلید K بسته شده مقاومت‌ها از

مدار خارج خواهند شد. در این روش جهت جلوگیری از به هدر رفتن انرژی به صورت حرارت در مقاومتهای راه‌انداز به جای این مقاومتهای از چوک یا راکتور استفاده می‌کنند که البته در این روش ضریب قدرت کاهش می‌یابد و همچنین هزینه آن بیشتر خواهد شد.

### استفاده از اتوترانسفورماتور

با استفاده از یک اتوترانسفورماتور با ولتاژ خروجی متغیر، ولتاژ اتوترانسفورماتور را در هنگام راه‌اندازی کاهش می‌دهند. از این روش در موتورهای پرقدرت یا موتورهای با ولتاژ بالا استفاده می‌کنند.

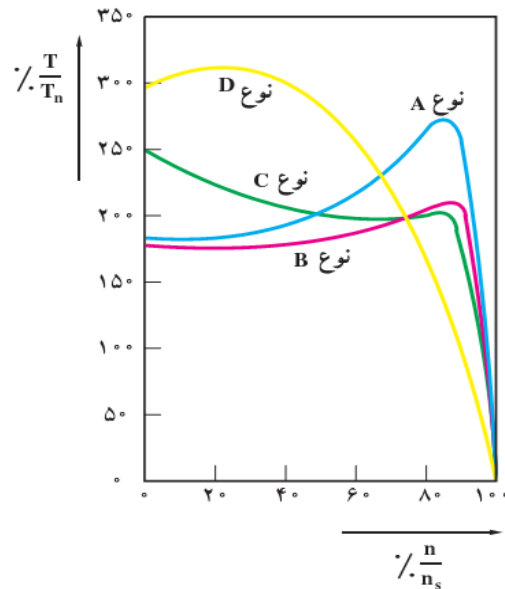
### استفاده از راه‌اندازی ستاره- مثلث

همان طور که می‌دانیم ولتاژ خطی  $\sqrt{3}$  برابر ولتاژ فاز می‌باشد. بنابراین در موتورهایی که ولتاژ هر فاز آن برابر ولتاژ شبکه باشد، در ابتدای راه‌اندازی استاتور را به صورت ستاره وصل می‌کنند و پس از راه‌اندازی اتصال را به مثلث تبدیل می‌کنند. به این ترتیب جریان فازی و ولتاژ فازی هر کدام  $\sqrt{3}$  برابر کاهش یافته و نتیجه قدرت و گشتاور راه‌اندازی  $\frac{1}{3}$  حالت مثلث خواهد بود. استفاده از این روش در موتورهایی که ولتاژ فاز آن‌ها کمتر از ولتاژ شبکه باشد امکان‌پذیر نیست. زیرا این موتورها را نمی‌توان به صورت مثلث در مدار متصل نمود. از بین روش‌های گفته شده برای راه‌اندازی این روش مرسوم‌ترین نوع راه‌اندازی موتورهای القایی می‌باشد.

### د) انواع رتورهای قفسی

از آنجایی که رفتار موتورهای القایی با مقاومت القایی (X2) و اهمی (R2) رتور وابسته است، لذا در ساخت رتورهای قفسی شرایط مختلفی را در نظر می‌گیرند و بر این اساس رتورهای قفسی مختلفی ساخته می‌شود. به عنوان مثال با افزایش مقاومت اهمی رتور به اندازه مقاومت القایی آن جریان راه‌اندازی کاهش و گشتاور راه‌اندازی افزایش می‌یابد. به همین علت به جای آلومینیوم خالص از آلیاژ آلومینیوم استفاده می‌کنند تا مقاومت اهمی رتور افزایش یابد. با افزایش مقاومت اهمی رتور اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان رتور کاهش و توان حقیقی رتور و گشتاور راه‌اندازی افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش مقاومت اهمی تلفات بیشتری در زمان کار عادی حاصل خواهد شد و به همین دلیل به جای به کار بردن آلومینیوم با ناخالصی بیشتر می‌توان با تغییر شکل و ابعاد میله‌ها و عمق شیارهای رتور مقاومت اهمی و القایی مورد نظر را به دست آورد.

سازندگان طبق استاندارد NEMA موتورهای قفسی را در چهار کلاس A و B و C و D می‌سازند. شکل زیر مشخصه گشتاور-سرعت را در این چهار کلاس نشان می‌دهد. تفاوت عمده در طراحی موتورهای خطی در این چهار کلاس همان نحوه تغییر مقاومت مدار رتور است.



مشخصه گشتاور - دور ۴ نمونه مشابه رتور قفسی استاندارد

### الف) نوع A: با شیارهای بزرگ و نزدیک به سطح (رتور با امیدانس کم)



موتورهایی که در این کلاس طراحی می‌شوند دارای خواص زیر می‌باشند:

۱. گشتاور راه اندازی آن‌ها عادی است.
۲. جریان راه اندازی آن‌ها زیاد است.
۳. در شرایط کار عادی لغزش کم است.
۴. مقاومت رتور کم است و لذا در لغزش کم ( $0/015 < S < 0/005$ ) بازده نسبتاً خوب است.
۵. از این موتورها در بارهایی که نیاز به گشتاور راه اندازی کوچک دارند استفاده می‌شود.
۶. این موتورها در ولتاژهای کمتر از ولتاژ نامی راه اندازی می‌شوند.

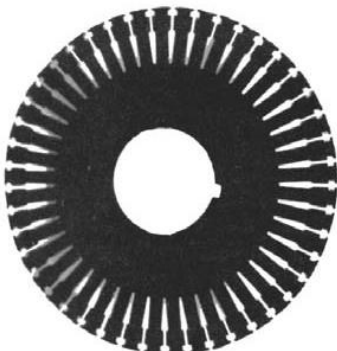
### ب) نوع B: با شیارهای بزرگ و عمیق (رتور با راکتانس زیاد)



در این موتورها می‌توان به نکات زیر توجه نمود:

۱. گشتاور راه اندازی این موتورها شبیه موتوره‌های کلاس A است.
۲. جریان راه اندازی در این موتورها ۷۵ درصد موتوره‌های کلاس A است.

### ج) نوع C: رتور دو قفسی (رتور با امیدانس دوگانه)

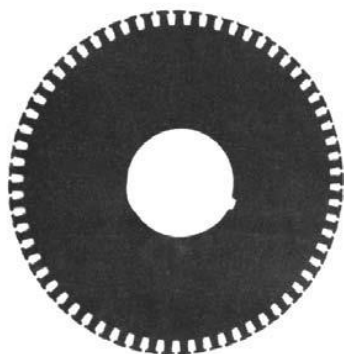


در این موتورها داریم:

۱. گشتاور راه‌اندازی این موتورها زیاد است.
۲. جریان راه اندازی این موتورها نسبتاً کم است.
۳. مقاومت رتور بیش از کلاس B است و در شرایط نامی لغزش این گونه موتورها بیش از کلاس‌های A و B بوده و بازده نسبت به کلاس‌های A و B کمتر است.



## د) نوع D: با شیارهای کوچک نزدیک به سطح (رتور با مقاومت زیاد)



این موتورها دارای خواص زیر می باشند:

۱. گشتاور راه اندازی این موتورها زیاد است.
۲. جریان راه اندازی این موتورها کم است.
۳. در شرایط کار عادی لغزش نسبتاً بزرگ است.
۴. در این موتورها میله‌های رتور قفسی مسی نبوده بلکه برنزی است.
۵. در این موتورها گشتاور ماکزیمم در لغزش ۵۰ درصد حاصل می‌شود.
۶. لغزش نامی این موتورها بین ۸ تا ۱۵ درصد بوده و لذا بازه این ماشین‌ها کم است.
۷. در این موتورها تلفات اهمی رتور نسبتاً زیاد است لذا موتورهای حجیم و گران هستند.

## توضیحی در مورد نوع C: رتور دو قفسی (رتور با امپدانس دوگانه)

رتورهای قفسی کلاس C دارای دو سری میله‌های آلومینیومی هستند که دو قفس را تشکیل می‌دهند. میله‌های با سطح مقطع بیشتر در قسمت پایین قرار گرفته و کاملاً در داخل آهن رتور محصور شده‌اند. اما میله‌های با سطح مقطع کمتر در قسمت بالاتر و در مجاورت محیط خارجی استوانه رتور تعبیه‌اند.

این نوع ساختمان باعث می‌شود که قفس داخلی به دلیل آن‌که به طور کامل توسط آهن رتور احاطه شده مقاومت القایی بزرگتری داشته باشد. در حالی که میله‌های قفس خارجی که عملاً فقط از سه طرف به وسیله آهن رتور محصور شده‌اند، خاصیت القایی کمتری از خود نشان داده و مقاومت القایی آن‌ها کوچک‌تر از قفس داخلی است. همچنین قفس خارجی به دلیل سطح مقطع کمتر میله‌ها مقاومت اهمی بیشتری دارد.

بنابراین هنگام راه اندازی که رتور متوقف است لغزش برابر واحد و فرکانس جریان رتور برابر فرکانس شبکه است. در این فرکانس مقاومت القایی بزرگ قفس داخلی مانع از عبور جریان از آن است و قسمت عمده جریان رتور از قفس خارجی می‌گذرد که دارای مقاومت اهمی بیشتری است و گشتاور راه‌اندازی بزرگتری حاصل می‌شود.

با افزایش سرعت رتور و کاهش لغزش مقاومت القایی قفس داخلی کاهش یافته و چون مقاومت آن نیز کوچک است بیشتر جریان رتور از قفس داخلی می‌گذرد. یعنی عملاً با افزایش سرعت رتور مقاومت اهمی آن کاهش یافته و فقط در زمان راه‌اندازی مقاومت اهمی زیادتر ظاهر می‌شود تا گشتاور راه اندازی مناسبی به دست آید و در زمان کار عادی مقاومت اهمی کم به معنای تلفات کمتر و قابل قبول خواهد بود. در موتورهای القایی با رتور دو قفسی به دلیل سطح زیاد شیارها، فوران پراکندگی بیشتر است و هنگام کار در نقطه نامی ضریب قدرت و ضریب بهره نسبتاً کمی دارند.

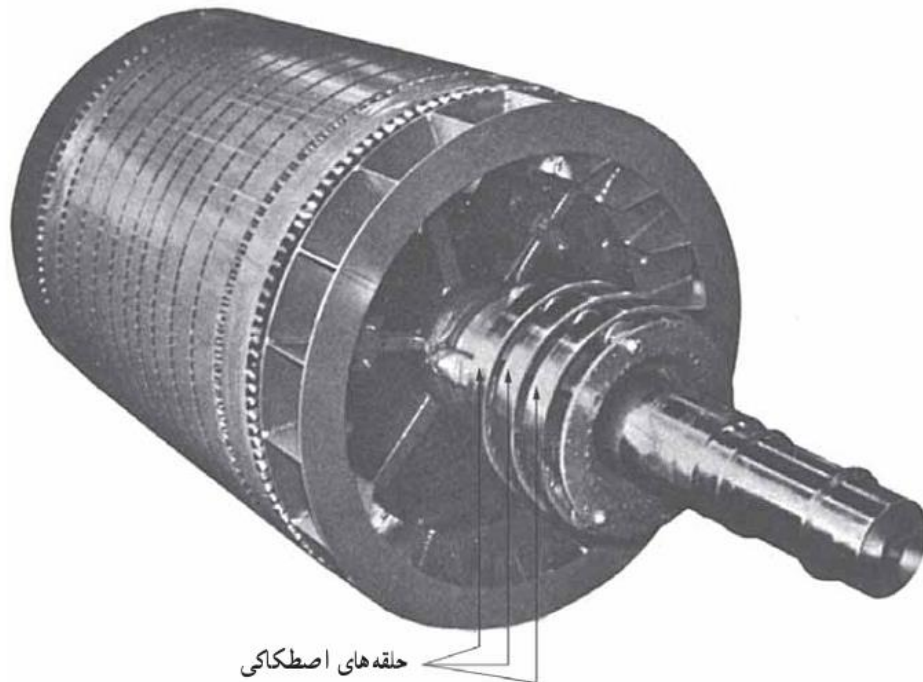
## ه) کاربردهای موتور القایی با رتور قفسی

از موتورهای القایی به دلیل سادگی ساختمان و هزینه ساخت و نگهداری آنها استفاده زیادی می‌شود. این موتورها در توان‌های مختلفی ساخته می‌شوند. ماشین‌های ابزار، بالابرها، کوچک و متوسط، بادبزن‌ها، هواکش‌ها و .... از این موتورها استفاده می‌کنند.

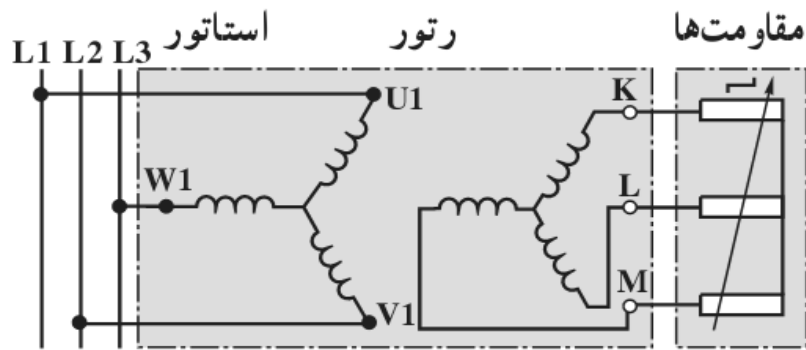
## موتورهای القایی رتور سیم پیچی شده یا رتور رینگ

### الف) ساختمان و اصول کار موتور القایی با رتور سیم پیچی شده

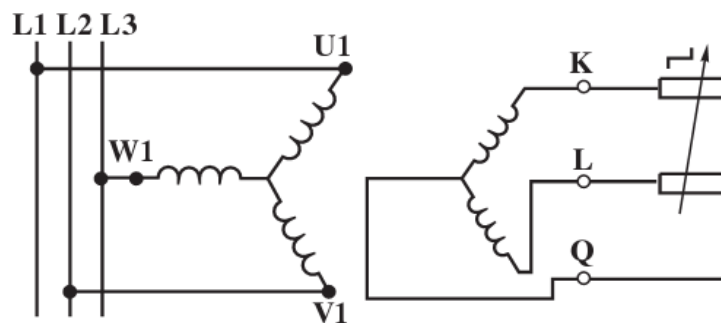
در این موتورها استاتور همانند استاتور موتورهای قفسی می‌باشد و تنها تفاوت آنها در رتور می‌باشد. در رتورهای سیم بندی شده به جای مفتول‌های آلومینیومی همانند استاتور از یک سیم پیچی سه فاز استفاده می‌شود و از طریق سه حلقه فلزی و ذغال در دسترس استفاده کننده قرار می‌گیرد. شکل صفحه بعد یک نمونه رتور سیم پیچی شده را نشان می‌دهد.



بر روی محور رتور هسته مغناطیسی و رینگ‌ها نصب شده اند و سیم پیچ‌های رتور در داخل استاتور قرار می‌گیرند. سیم پیچی معمولاً دارای اتصال ستاره بوده و سه خروجی آن به سه حلقه لغزان وصل می‌شود. این حلقه های لغزان از طریق زغال‌ها می‌توانند به مقاومت‌های متغیری وصل شوند که به عنوان راه انداز یا کنترل سرعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. گاهی در موتورهای پر قدرت در رتور از سیم بندی دو فاز استفاده می‌شود. مدارهای الکتریکی موتورهای القایی با رتور سه فاز و رتور دو فاز در شکل زیر رسم شده است. طرز کار موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی مانند موتورهای رتور قفسی می‌باشد. با این تفاوت که می‌توان حلقه های لغزنده را اتصال کوتاه نموده و یا از طریق مقاومت آنها را به یکدیگر متصل کرد.



چگونگی نمایش موتور القایی رتور سیم پیچی شده



نمایش رتور سیم پیچی شده دو فاز برای موتور القایی سه فاز

### ب) عملکرد موتور القایی رتور سیم پیچی شده زیر بار

چنانچه حلقه های سیم پیچی را به یکدیگر اتصال کوتاه کنیم رفتار این موتور همانند رفتار موتور قفسی بوده و چنانچه حلقه های لغزنده را از طریق مقاومت های متغیر متصل کنیم، در این حالت اضافه کردن مقاومت به مدار رتور در هنگام کار موجب افزایش لغزش می شود. یعنی طبق رابطه گشتاور

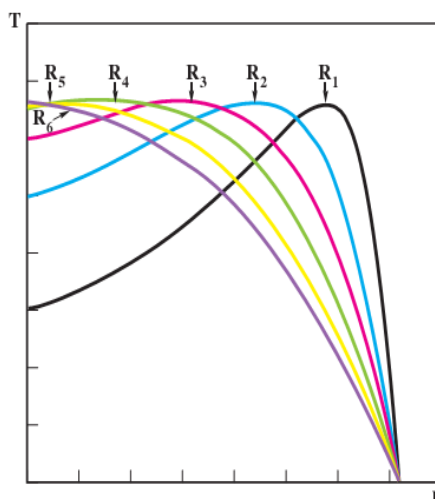
$$T = KE_r \frac{SR_r}{R_r + (SX_r)^2}$$

برای بارهای با گشتاور معین افزایش  $R_2$  موجب افزایش لغزش خواهد شد. لغزش به معنای تغییر سرعت موتور است و بنابراین با تغییر مقاومت  $R_2$  سرعت موتور را می توان کنترل نمود.

### ج) راه اندازی موتورهای القایی رتور سیم پیچی شده یا راه اندازی رتوری

در این موتورها به هر فاز رتور از طریق حلقه های لغزان رتور متصل می شود. در این صورت جریان راه-اندازی در رتور کاهش می یابد و طبق رابطه گشتاور راه اندازی افزایش خواهد یافت. حال می دانیم که گشتاور ماکزیمم در لغزشی اتفاق می افتد که مقاومت های اهمی و القایی با یکدیگر مساوی باشند. بنابراین با افزایش مقاومت  $R_2$  گشتاور راه اندازی بیشتر خواهد شد. مشخصه گشتاور - دور با تغییر مقاومت  $R_2$  تغییر خواهند نمود و این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است. در این شکل مقدار مقاومت  $R_1$  مقاومت سیم پیچی رتور فرض شده و با افزایش آن مشخصه جدیدی به دست می آید. در حالتی که مقاومت رتور را افزایش دهیم تا مقدار آن به اندازه مقاومت القایی رتور برسد، در این حالت بیشترین گشتاور راه اندازی را خواهیم داشت.

$$R_1 < R_2 < R_3 < R_4 < R_5 < R_6$$



تغییر مشخصه گشتاور - دور موتور القایی با تغییر مقاومت اهمی مدار رتور

تفاوت مهم ماشین‌های القایی با رتور قفسی و رتور سیم پیچی شده در این است که موتورهای قفسی را نمی‌توان زیر بار راه اندازی کرد. در صورتی که موتورهای رتور سیم پیچی شده در زیر بار می‌توانند راه اندازی شوند. در هنگام راه اندازی این موتورها می‌توان به روش دستی یا اتوماتیک مقاومت‌های راه انداز را از مدار خارج نمود.

### ج) کاربرد موتورهای القایی با رتور سیم پیچی شده

از موتورهای القایی رتور سیم پیچی شده معمولاً در قدرت‌های بالاتر از ۵ کیلو وات استفاده می‌شود. به عنوان پمپ‌های بزرگ آب‌رسانی، ماشین‌های سنگ شکن، بالابرهای صنعتی و مواردی که موتور باید زیر بار راه اندازی شود از این موتورها استفاده می‌کنند. همچنین به دلیل وجود جرقه در حلقه‌های این موتور در صنایع شیمیایی و مواردی که احتمال آتش سوزی وجود دارد از این موتورها استفاده نمی‌کنند.

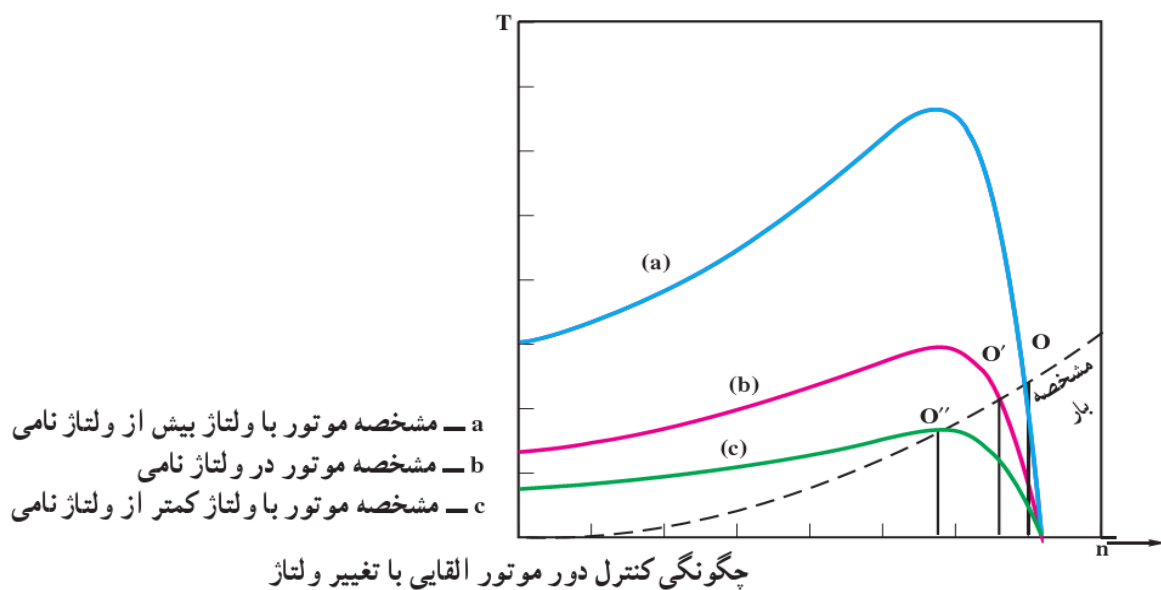
### کنترل سرعت موتورهای القایی

اگر موتور القایی سه فاز به شبکه‌ای با ولتاژ و فرکانس ثابت وصل شود در این صورت پس از راه‌اندازی در سرعتی حوالی سرعت سنکرون خواهد چرخید. گفتنی است با افزایش گشتاور بار، سرعت به میزان کم کاهش می‌یابد. لذا این موتورها معمولاً از نوع موتورهای سرعت ثابت فرض می‌شوند. اما در برخی صنایع لازم است سرعت موتور در یک محدوده و طیف نسبتاً وسیعی تغییر کند. موتورهای dc برای مواردی که کنترل سرعت مورد نیاز است مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. اما موتورهای dc گران بوده و به تعمیرات و نگهداری زیادی نیاز دارند. ولی موتورهای القایی به ویژه نوع قفسی آن ارزان و مستحکم بوده و کموتاتور نیز ندارند و برای سرعت‌های زیاد بسیار مناسبند. امروزه با پیشرفت علم و الکترونیک قدرت و پیدایش کنترل کننده‌های جامد، کنترل سرعت یا کنترل دور موتورهای القایی رو به تکامل است. اما این کنترل کننده‌ها نسبتاً گران بوده و به آسانی در دسترس همگان قرار نمی‌گیرند.

در این بخش چند روش کنترل سرعت موتورهای القایی شرح داده می شود.

## کنترل ولتاژ

همان طور که می دانیم گشتاور یک موتور القایی با مجذور ولتاژ متناسب است و تغییرات ولتاژ مشخصه گشتاور- دور یا گشتاور - لغزش موتور را تغییر می دهد. از طرف دیگر نقطه کار یک موتور تابع مشخصات بار آن می باشد و این نقطه کار از تقاطع مشخصه گشتاور - دور و بار به دست می آید. با تغییر ولتاژ یک موتور القایی تمام نقاط مشخصه گشتاور - دور آن متناسب با مجذور ولتاژ جابه جا می شوند. در این صورت مشخصه بار، مشخصه گشتاور - دور جدید را در نقطه جدیدی قطع خواهد کرد. این مطلب در شکل صفحه بعد نشان داده شده است. بنابراین با تغییر ولتاژ، دور تا حدودی قابل تنظیم است



## کنترل فرکانس

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

سرعت میدان دوار با فرکانس متناسب مستقیم دارد زیرا

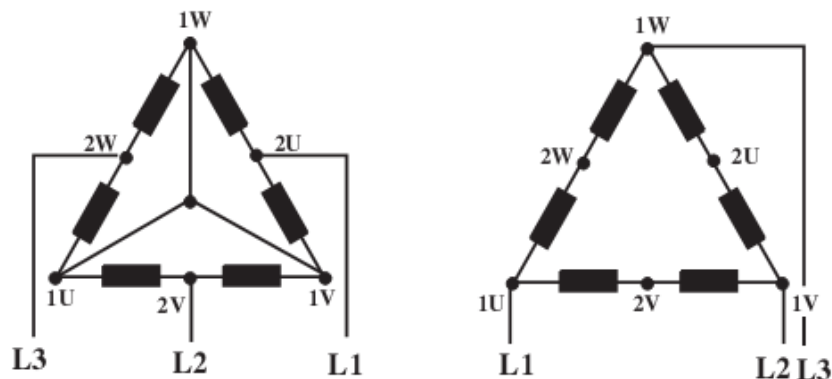
یعنی می توان دور موتور القایی را با تغییر فرکانس منبع تغذیه تغییر داد. اما باید توجه داشت که تغییرات فرکانس نیز همچون تغییرات ولتاژ باعث تغییر در مدار مغناطیسی ماشین و میدان دوار شده و در کار عادی آن مشکلاتی ایجاد می کند. فرکانس منبع تغذیه را می توان توسط مبدل های فرکانس تغییر داد. هر چند این تجهیزات نسبتاً پرهزینه هستند اما در مواقعی مورد استفاده قرار می گیرند.

## کنترل جفت قطب

با تغییر دادن تعداد قطب ها می توان سرعت میدان دوار را تغییر داد و با افزایش قطب ها سرعت میدان کمتر خواهد شد. اما در این حالت نمی توان تغییرات پیوسته در سرعت ایجاد کرد. اما از این روش استفاده زیادی می گردد. یکی از روش های متداول روش اتصال دالاندر است که به آن اشاره می کنیم.

## اتصال دالاندر

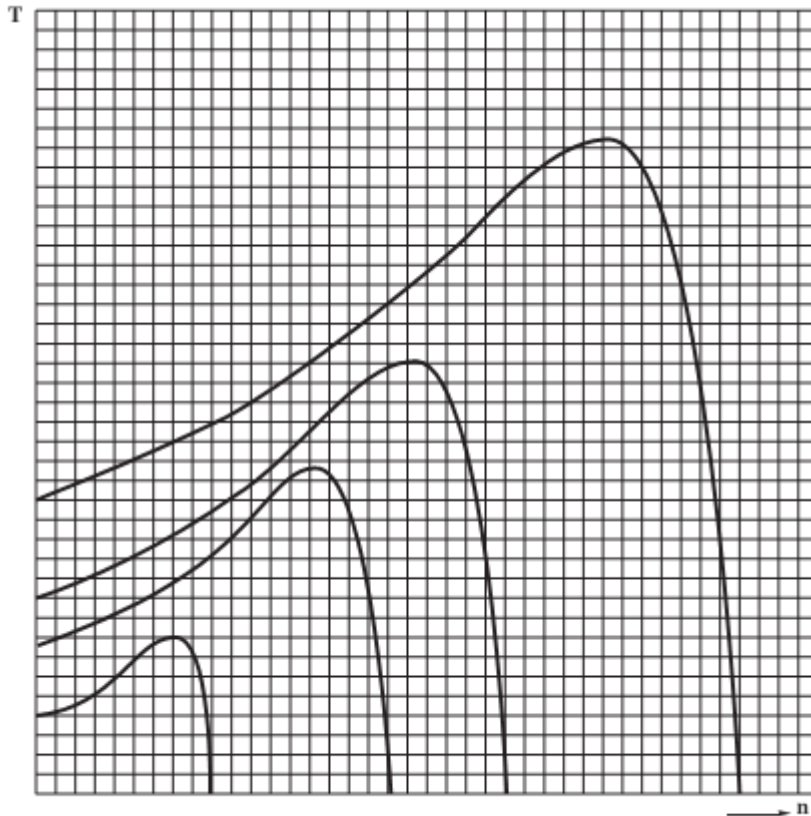
اتصال دالاندر یا سیم‌پیچی توزیع شده در استاتور خاصه از کنترل دور موتور القایی با تغییر تعداد قطب‌های سیم‌بندی است که در آن سیم‌پیچی هر فاز استاتور به دو نیم سیم‌پیچ تقسیم می‌شود. در اثر تغییر اتصال نیم سیم‌پیچ‌های هر فاز از اتصال سری به موازی تعداد قطب‌ها نصف و سرعت دو برابر می‌شود. به این ترتیب فقط به کمک یک سیم‌پیچی می‌توان دو سرعت مختلف را به دست آورد و در دو حالت تمام سیم‌پیچ‌ها و تمام شیارها فعال بوده و نسبت به موتور با سیم‌پیچ‌های مجزا از ظرفیت بیشتری برخوردار است. دو حالت اتصالات موتور القایی نشان داده در شکل زیر مثلث - ستاره دابل (YY / Δ) نامیده می‌شوند. در اتصال سری دو نیم سیم‌پیچ اتصال موتور به صورت مثلث و در اتصال موازی نیم سیم‌پیچ‌ها اتصال موتور به صورت ستاره است که باعث می‌شود با دو برابر شدن سرعت قدرت موتور نیز تقریباً ۱/۵ برابر شود و گشتاور تقریباً ثابت باقی بماند. بنابراین از اتصال دالاندر برای محرک‌های با گشتاور ثابت استفاده می‌کنند.



نمایش چگونگی تغییر قطب‌ها با اتصال دالاندر

## کنترل همزمان ولتاژ و فرکانس

ثابت می‌شود، فلوی به وجود آمده، با ولتاژ نسبت مستقیم و با فرکانس نسبت عکس دارد. (چرا؟) تحقیق کنید.) لذا اگر همزمان با افزایش ولتاژ، افزایش فرکانس متناسبی داشته باشیم در این صورت فلوی ایجاد شده تغییر خواهد کرد و در نهایت، مشخصه گشتاور - دور مطابق شکل زیر تغییر کرده نقطه جدید این مشخصه را قطع خواهد کرد.



تغییر مشخصه های گشتاور - دور موتور القایی با کنترل همزمان ولتاژ و فرکانس

جدول ۱-۳- روش های ترمز بارهای صنعتی متصل به موتورهای القایی

	<p>نیروی ترمزی توسط فنر: وقتی سیم پیچ تحریک، وصل می شود ترمز آزاد می شود. کاربرد: ماشین های ابزار و بالابرها</p>	<p>ترمز با مغناطیس الکتریکی (اعمال ترمز با فشار فنر)</p>
	<p>نیروی ترمز از طریق خود موتور ظاهر می شود، زیرا در اثر تغییر محل اتصال در فاز جهت میدان دوار عوض می شود و در نتیجه جهت گردش موتور نیز تغییر می کند. پس از این که دستگاه به حالت سکون درآمد، باید مدار فوراً قطع شود. در غیر این صورت دستگاه در خلاف جهت اولیه می چرخد. برای این کار یک رله خودکار لازم است. کاربرد: اردهای نواری</p>	<p>ترمز جریان مخالف</p>
	<p>موتور از ماشین کاررها می شود و در اثر شتاب به صورت مولد القایی درمی آید و برای موتورهایی که در آنها بر نیروی وزن غلبه می شود قابل استفاده است. کاربرد: موتورهای با تغییر قطب مثلاً در بالابرها و آسانسورها هنگام پایین آمدن</p>	<p>ترمز فوق سنکرون</p>
	<p>موتورهای القایی با رتور سیم پیچی با مقاومت زیاد رتور در مدار و به صورت موتور یکفاز به شبکه وصل می شود و یک گشتاور ترمزی ظاهر می شود که پس از سکون موتور از بین می رود. کاربرد: بالابرها</p>	<p>ترمز زیر سنکرون</p>
	<p>سیم پیچ استاتور را به یک ولتاژ پایین جریان مستقیم وصل می کنند که با ادامه حرکت رتور جریان ترمزکننده در آن القا می شود. کاربرد: ماشین های ابزار و وسایل نقلیه</p>	<p>ترمز با جریان مستقیم</p>

## روش‌های ترمز کردن موتور القایی

در موتورهای القایی روش‌های مختلفی جهت ترمز کردن پیشنهاد شده است. جدول ۱ - ۳ انواع مختلف این ترمزها را به اختصار بیان می‌کند.  
از میان روش‌های پیشنهادی، ترمز فوق سنکرون مناسب‌ترین و ترمز با جریان مخالف نامناسب‌ترین روش ترمز در موتورهای القایی هستند.

### نمونه تست‌هایی از این فصل

۱ - علت استفاده از توره‌های دو قفسی (قفسی دابل) در موتورهای القایی کدام است؟

- (۱) افزایش گشتاور راه اندازی  
(۲) بهبود وضعیت کار نامی  
(۳) بهبود شرایط راه اندازی و کارنامی  
(۴) کاهش لرزش‌های ماشین

۲ - بیشترین ضریب بهره ماشین‌های الکتریکی جریان متناوب در کدام حالت اتفاق می‌افتد؟

- (۱) بارنامی  
(۲) بی باری  
(۳) راه اندازی  
(۴) هیچکدام

۳ - یک موتور سه فاز القایی تحت ولتاژ  $380\text{V}$  و فرکانس  $50\text{Hz}$  و قدرت  $3\text{kw}$  دارای گشتاور راه اندازی  $60\text{ N.m}$  می‌باشد. گشتاور راه اندازی موتور در ولتاژ  $220\text{V}$  چند  $\text{N.m}$  است؟

- (۱)  $20$   
(۲)  $15$   
(۳)  $40$   
(۴)  $25$

۴ - یک موتور آسنکرون ۶ قطب در فرکانس  $50\text{Hz}$  توان  $10\text{kw}$  از شبکه دریافت کرده و با  $950$  دور در دقیقه می‌چرخد اگر تلفات استاتور آن  $1\text{kw}$  باشد تلفات نسی رتور چند وات است در صورتی که راندمان  $80\%$  درصد باشد؟

- (۱)  $450$   
(۲)  $500$   
(۳)  $1000$   
(۴)  $550$

۵ - در یک موتور القایی سه فاز ۲ قطب متصل به شبکه  $50\text{Hz}$  لغزش بار نامی  $S=0.05$  است. سرعت رتور این ماشین در بارنامی چند دور بر دقیقه است؟

- (۱)  $1375$   
(۲)  $1425$   
(۳)  $2750$   
(۴)  $2850$

۶ - یک موتور سه فاز آسنکرون سه فاز چهار قطب  $50\text{هرتس}$   $380$  ولت  $1350$  دور با راندمان  $0.80$  و ضریب قدرت  $0.8$  توان منتقل شده به رتور  $10\text{kw}$  است توان تبدیل شده در رتور چند کیلو وات است؟

- (۱)  $9$   
(۲)  $10$   
(۳)  $8$   
(۴)  $6/4$

۷ - قرار دادن مقاومت اضافی در مدار رتور ماشین القایی سه فاز با رتور سیم پیچی شده کدام کمیت را افزایش می‌دهد؟

- (۱) گشتاور حداکثر  
(۲) گشتاور راه اندازی  
(۳) راندمان (بازده)  
(۴) سرعت



۸ - درمقایسه موتور القایی روتور سیم پیچی شده با موتور قفسی می توان گفت:موتور روتور سیم پیچی شده جریان راه اندازی.....و گشتاور راه اندازی .....دارد؟

(۱) کم ، زیاد (۲) کم ، کم (۳) زیاد ، زیاد (۴) زیاد ، کم

۹ - یک موتور القایی با دور سنکرون ۷۵۰ دور بر دقیقه در موقع راه اندازی دارای مقاومت اهمی ۰/۱۸ و مقاومت القایی ۰/۹ اهم است گشتاور ماکزیمم ین موتور در چه سرعتی اتفاق می افتد؟

(۱) ۶۵۰ (۲) ۶۰۰ (۳) ۷۳۵ (۴) ۷۵۰

۱۰ - یک موتور القایی ۸ قطب در شبکه ۳۸۰ ولت،  $50 \text{ Hz}$  بار مکانیکی را با توان ۱۲۰۰ وات با سرعت ۶۷۵ دور بر دقیقه به گردش می آورد اگر تلفات مکانیکی آن ۱۵۰ وات باشد توان الکترومغناطیسی آن چند وات است؟

(۱) ۱۵۰۰ (۲) ۱۴۵۰ (۳) ۱۳۵۰ (۴) ۱۰۵۰

۱۱ - رتور یک موتور القایی رتور سیم پیچی در حالت راه اندازی دارای مقاومت اهمی هر فاز ۰/۴ اهم و مقاومت القایی هر فاز ۲ اهم می باشد چه مقاومت راه اندازی به مقاومت رتور اضافه کنیم تا گشتاور راه اندازی آن برابر گشتاور ماکزیمم شود؟

(۱) ۶/۱ (۲) ۱/۲ (۳) ۱ (۴) ۰/۸

۱۲ - یک موتور القایی سه فاز ۶ قطب ۵۰ هرتز با ضریب توان ۰/۸ از شبکه سه فاز با اتصال ستاره جریان ۴۰ آمپر دریافت می کند مقاومت اهمی هر فاز استاتور ۰/۵ اهم و تلفات هسته آن ۶۰۰ وات است سرعت گردش موتور ۹۴۰ دور بر دقیقه و ولتاژ خطی شبکه  $\sqrt{3} \times 200$  ولت است اندازه تلفات رتور چند وات است؟

(۱) ۳۰۰۰ (۲) ۲۴۰۰ (۳) ۱۱۵۲ (۴) ۹۷۲

۱۳ - مزیت مهم موتورهای القایی نسبت به موتورهای جریان مستقیم .....و.....می باشد؟

(۱) امکانات تنظیم سرعت - گشتاور (۲) سادگی ساختمان تحمل اضافه بار (۳) امکانات افزایش راندمان - کاهش تلفات (۴) گسترده بودن محدوده تنظیم سرعت - گشتاور

۱۴ - برای تنظیم سرعت موتور القایی سه فاز صنعتی امروزه استفاده از کدام دستگاه بیشتری رایج است؟

(۱) مبدل ولتاژ (۲) مبدل فرکانس (۳) اتو ترانسفورماتور متغیر (۴) مبدل ولتاژ و فرکانس

۱۵ - یک موتور القایی سه فاز ۶ قطب یا ضریب توان ۰/۸، از شبکه سه فاز با اتصال ستاره جریان ۴۰ آمپر دریافت می کند مقاومت اهمی هر فاز استاتور ۰/۵ اهم و تلفات هسته آن ۶۰۰ وات است سرعت گردش موتور  $940 \text{ r.p.m}$  و ولتاژ خطی شبکه  $\sqrt{3} \times 200$  ولت است اندازه تلفات رتور چند وات است؟

(۱) ۱۰۰۸ (۲) ۲۴۰۰ (۳) ۱۱۵۲ (۴) ۹۷۲

۱۶ - لغزش یک موتور سه فاز ۰/۰۱ (درصد) است موقعیت کاری موتور کدام است؟

(۱) در حال راه اندازی (۲) در بار نامی (۳) نصف بار نامی (۴) در حالت بی باری

## فصل سوم

### ماشین های سنکرون

#### مقدمه

در فصل دوم با ماشین های آسنکرون آشنا شدیم. در این فصل ماشین هایی مورد بحث قرار می گیرند که تحت سرعت ثابتی به نام سرعت سنکرون می چرخند و جزء ماشین های جریان متناوب محسوب می شوند. در این ماشین ها بر خلاف ماشین های القایی میدان گردان شکاف هوایی و رتور با یک سرعت که همان سرعت سنکرون است می چرخند. ماشین های سنکرون سه فاز بر دو نوع هستند:

۱. ژنراتورهای سنکرون سه فاز یا آلترناتورها

۲. موتورهای سنکرون سه فاز

امروزه ژنراتورهای سنکرون سه فاز اصلی ترین جزء شبکه های برق می باشند و ژنراتورهای عظیم در نیروگاه ها و وظیفه تولید انرژی الکتریکی را به عهده دارند. موتورهای سنکرون نیز در مواردی به کار می روند که به سرعت ثابت نیاز داشته باشیم.

یکی از مزایای عمده موتورهای سنکرون این است که می توانند از شبکه توان راکتیو دریافت و به شبکه توان راکتیو تزریق کنند. در این فصل درباره ساختمان و طرز کار ماشینهای سنکرون بحث می کنیم.

#### شین بی نهایت

ژنراتورهای سنکرون سه فاز عمدتاً به سیستم قدرت متصل اند و مشترکاً بار مصرف کنندگان را تأمین می کنند. در این صورت اصطلاحاً می گویند ژنراتورها به شین بی نهایت وصل اند. از آن جا که تعداد ژنراتورها بسیار زیاد و خود ژنراتورها بزرگ و حجیم اند لذا ولتاژ و فرکانس شین بی نهایت دارای تغییراتی به سمت صفر است و تقریباً ثابت است. شین بی نهایت را شبکه به هم پیوسته نیز می گویند.

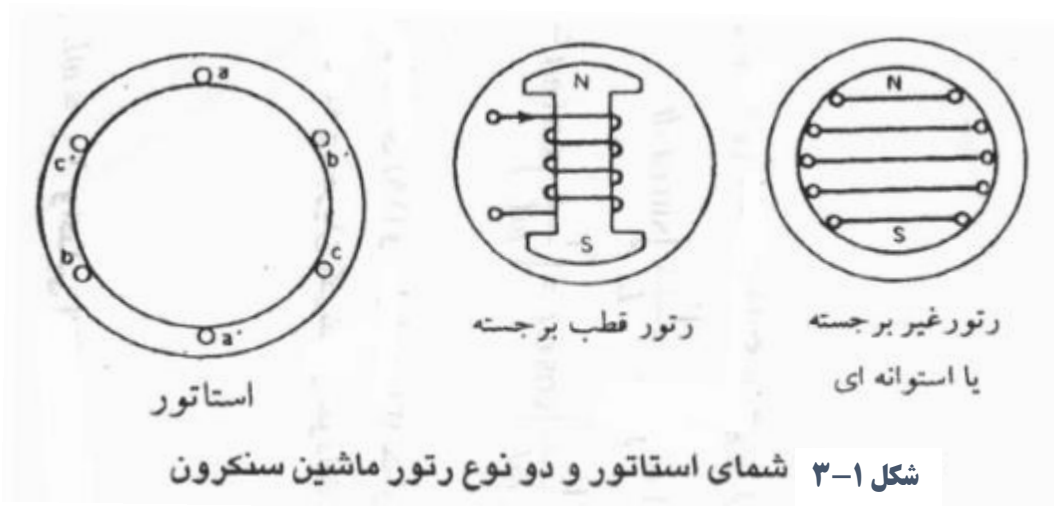
#### ساختمان ماشین های سنکرون سه فاز

استاتور ماشین های سنکرون سه فاز حاوی سیم پیچی سه فازی است که درون شیارهای استاتور جاسازی شده و در طول محیط آن پخش و توزیع گردیده اند. یعنی استاتور ماشین های سنکرون سه فاز شبیه ماشین های القایی سه فاز است. استاتور در ژنراتور بار را تغذیه می کند و در موتور سنکرون به شبکه وصل می شود تا جریان به درون رتور وارد شود. در هر دو حالت جریان استاتور یک جریان AC است. به سیم پیچی استاتور، سیم پیچی آرمیچر نیز گفته می شود و این امر بر خلاف ماشین های DC است. سیم پیچی استاتور یا آرمیچر در ماشین های سنکرون طوری طراحی می شوند که جریان و ولتاژ زیادی را تحمل نمایند.

رتور ماشین‌های سنکرون حاوی سیم‌پیچ تحریک یا سیم‌پیچ میدان است و این سیم‌پیچی توسط جریان DC تحریک می‌گردد. در ماشین‌های سنکرون رتور بر دو نوع است:

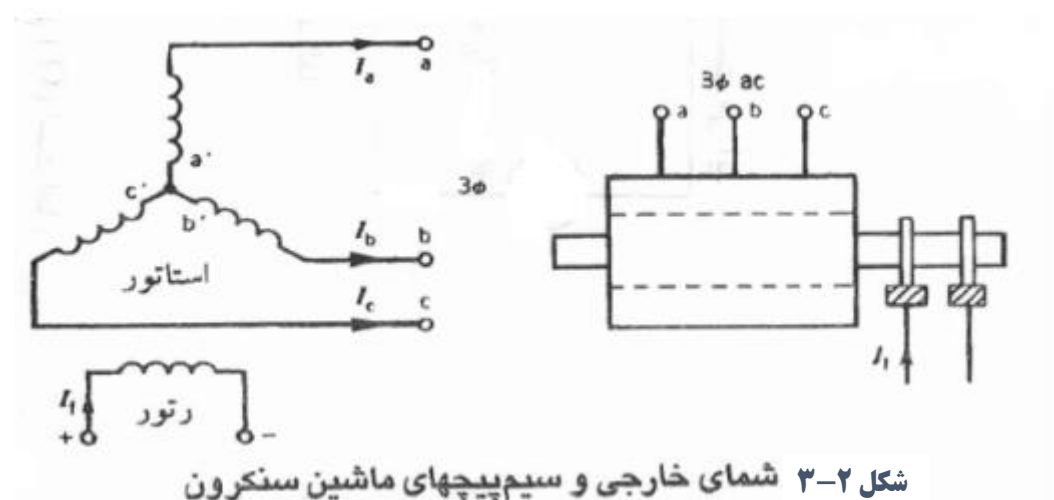
- ۱- رتور قطب برجسته: این رتورها عمدتاً در ماشین‌هایی به کار می‌روند که سرعت سنکرون آن‌ها کم است.
- ۲- رتور استوانه‌ای یا غیر برجسته: این رتورها عمدتاً در ماشین‌هایی به کار می‌روند که سرعت سنکرون آن‌ها زیاد است.

در شکل ۳-۱ شمای استاتور و دو نوع رتور ماشین‌های سنکرون نشان داده شده است.



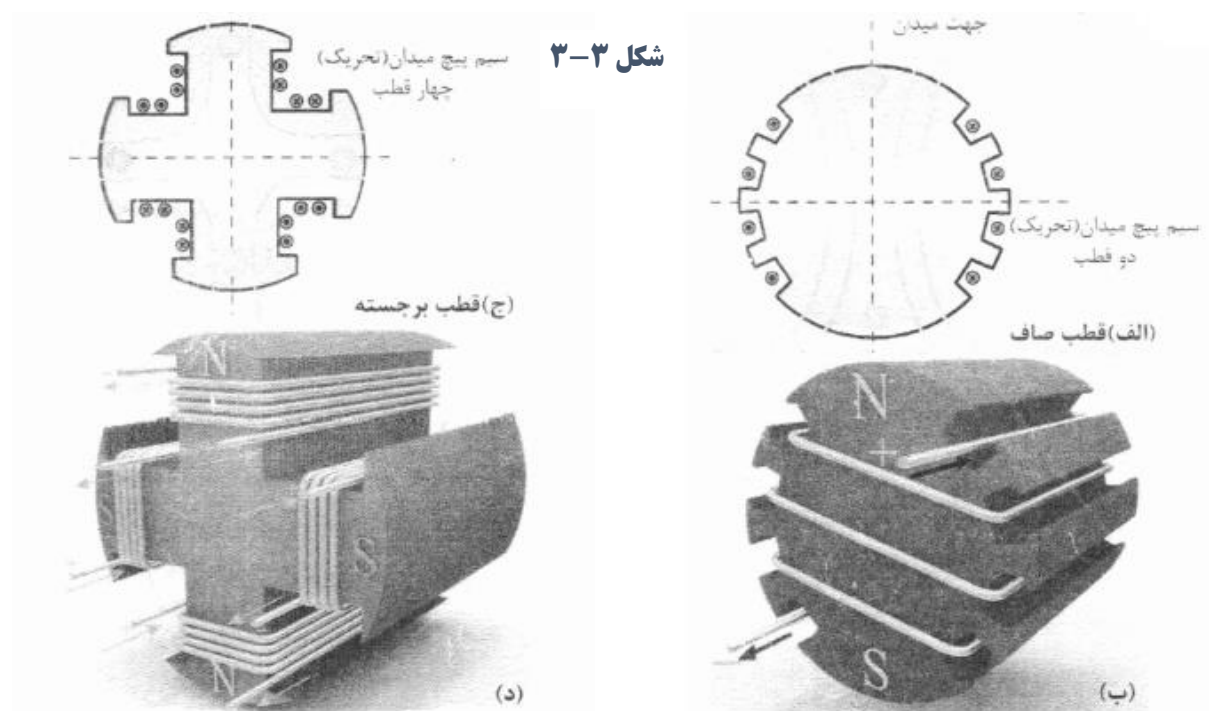
در رتور با قطب‌های برجسته، برجستگی قطب‌ها مشهود است و قطب‌ها توسط سیم‌پیچ تحریک یا سیم پیچ میدان تحریک می‌شوند. واضح است که در این نوع ماشین‌ها شکاف هوایی غیر یکنواخت است. در زیر قطب‌ها شکاف هوایی کم و در میان قطب‌ها شکاف هوایی زیاد است. در رتورهای استوانه‌ای یا غیر برجسته شکاف هوایی کاملاً یکنواخت است و رتور به صورت یک استوانه نسبتاً کامل ساخته می‌شود.

شکل ۳-۲ شمای بیرون ماشین سنکرون نشان داده شده است. سه پایانه از استاتور خارج می‌شوند که به سیستم سه فاز استاتور متصل است. تغذیه جریان DC تحریک مربوط به رتور نیز از طریق حلقه‌های لغزان بر روی محور ماشین انجام می‌شود. در این شکل وضعیت سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور و سیم‌پیچ رتور نشان داده شده است.



## رتور

در رتور مولد سنکرون به کمک سیم‌پیچ‌ها، آهنربای الکترومغناطیسی دائم ایجاد می‌شود تا با چرخش آن بتوان میدان دوار تولید کرد. شکل زیر طرح واره‌ی ایجاد میدان مغناطیسی دو قطبی و چهار قطبی را با سیم‌پیچ‌های رتور ماشین سنکرون نشان می‌دهد. در رتور ماشین سنکرون برای داشتن هسته‌ی مغناطیسی، ورقه‌های آهنی سیلیس‌دار را روی هم قرار می‌دهند تا هسته مناسبی برای عبور میدان مغناطیسی ایجاد گردد. سپس با قرار دادن سیم‌پیچ‌ها در این هسته و اتصال آن‌ها به منبع جریان مستقیم، رتور ماشین به آهنربای دائم الکترومغناطیسی تبدیل می‌شود. اتصال سیم‌پیچ‌های میدان (تحریک) به منبع جریان مستقیم از طریق دو عدد رینگ و زغال صورت می‌گیرد.



## انواع رتور ماشین سنکرون

### رتور با قطب صاف یا استوانه‌ای

این رتورها مانند شکل (۳-۳ الف و ب) به صورت استوانه‌ای ساخته می‌شوند و با توجه به اینکه هیچ برجستگی در سطح استوانه وجود ندارد به آن رتور با قطب صاف یا پنهان نیز گفته می‌شود. غالباً رتورهای با بیش از دو قطب به صورت قطب صاف ساخته نمی‌شوند.

رتورهای با قطب صاف در مولدهای دو قطبی با سرعت‌های زیاد استفاده می‌شوند. طول این رتورها نسبت به قطر آن بیشتر و متناسب با سرعت زیاد ساخته می‌شوند. سیم‌پیچ‌های تحریک در سطح خارجی استوانه و به موازات محور ماشین در داخل شیارهای رتور تعبیه شده و بر روی استوانه رتور قرار می‌گیرند. شکل ۳-۴ تصویر استاتور و رتور یک توربوژنراتور را نشان می‌دهد.



### رتور با قطب برجسته

رتور مولدهای با تعداد قطب زیاد و سرعت کم، معمولاً از نوع قطب برجسته هستند. طول این رتورها به نسبت قطر آن کمتر است و متناسب با سرعت‌های کم ساخته می‌شوند. ساختمان رتور قطب برجسته و چگونگی قرارگیری سیم‌پیچ‌های تحریک بر روی آن در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. رتور مولد نیروگاه‌های آبی و دیزل ژنراتورها این گونه ساخته می‌شوند.



شکل ۳-۴ - رتور و استاتور یک توربو ژنراتور

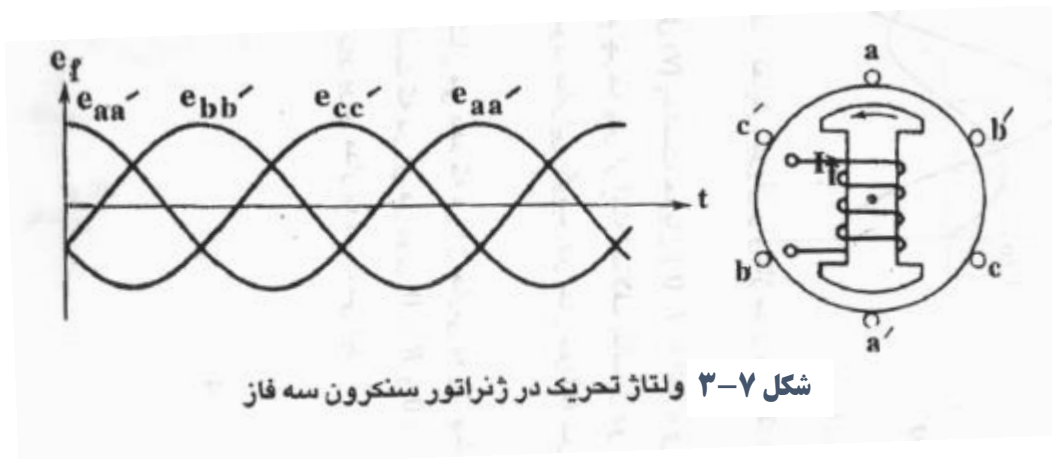


شکل ۳-۵ - رتور قطب برجسته

## ژنراتور سنکرون

شکل ۷-۳ را در نظر بگیرید. فرض کنید که جریان dc از سیم پیچ تحریک (رتور) عبور کند. در این صورت شاری با توزیع سینوسی در شکاف هوایی ایجاد می‌شود. حال اگر رتور توسط یک محرک به چرخش درآید، یک میدان گردان در شکاف هوایی ایجاد می‌شود. به این میدان، میدان تحریک نیز گفته می‌شود.

این میدان در سیم پیچ‌های سه فاز آرمیچر ( $aa'$  و  $bb'$  و  $cc'$  در شکل ۷-۳) ولتاژ القا می‌کند. این سه ولتاژ در شکل ۷-۳ نشان داده شده‌اند. این ولتاژها از نظر دامنه یکسان ولی با هم ۱۲۰ درجه الکتریکی اختلاف فاز دارند. به این ولتاژها، ولتاژ داخلی یا ولتاژ تحریک نیز گفته می‌شود.



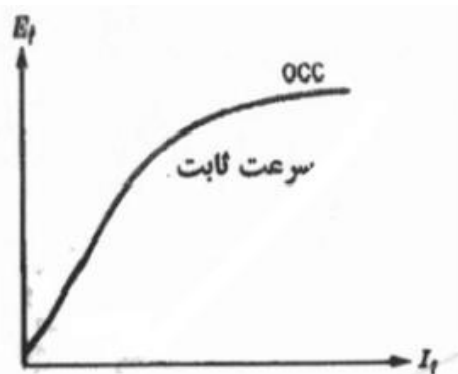
سرعت رتور (سرعت سنکرون) و فرکانس ولتاژهای القایی طبق رابطه‌ی زیر به هم مربوط می‌شوند:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

در این فرمول  $n_s$  سرعت رتور (سرعت سنکرون) بر حسب دور در دقیقه بوده و  $p$  تعداد جفت قطب‌های رتور است. مقدار موثر ولتاژ تحریک ( $E_f$ ) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$E_f = 4/44 \phi f N K_w$$

در فرمول بالا  $\Phi f$  شار هر قطب ناشی از جریان تحریک ( $I_f$ ) می‌باشد.  $N$  تعداد حلقه‌ها یا دورها در هر فاز بوده و  $k_w$  ضریب سیم پیچی نام دارد. بنابراین طبق روابط بالا داریم:



$$E_f \approx a N \Phi f$$

طبق این رابطه ولتاژ تحریک ( $E_f$ ) با شار تحریک و سرعت متناسب است. واضح است که شار تحریک ( $\Phi f$ ) نیز با جریان تحریک ( $I_f$ ) متناسب دارد. تغییرات ولتاژ تحریک بر حسب جریان تحریک تحت سرعت ثابت در شکل مقابل (۸-۳) نشان داده شده است.

ولتاژ القایی مربوط به  $I_f = 0$  به دلیل پدیده‌ی پسماند می‌باشد. در ابتدا تغییرات  $E_f$  بر حسب  $I_f$  خطی است. پس از عبور از مرحله تغییرات خطی اگر  $I_f$  زیاد شود  $\Phi_f$  دیگر با  $I_f$  رابطه خطی ندارد و لذا طبق منحنی شکل ۳-۸،  $E_f$  نیز تقریباً ثابت می‌شود و ماشین به حالت اشباع می‌رود. به منحنی فوق مشخصه مدار باز ژنراتور سنکرون سه فاز نیز گفته می‌شود. نام دیگر این منحنی، مشخصه مغناطیس شونده‌گی است. اگر پایانه‌های استاتور ژنراتور سنکرون به بار سه فاز متصل شود جریان‌های  $I_a$  و  $I_b$  و  $I_c$  برقرار می‌گردند. فرکانس این جریان‌ها با  $E_f$  یکسان است. این سه جریان نیز میدان گردانی در شکاف هوایی به وجود می‌-

آورند. لذا نتیجه شار در شکاف هوایی از مجموع دو شار گردان رتور و

استاتور حاصل می‌گردد. سرعت چرخش این دو شار یکسان بوده و همان سرعت سنکرون است. فرض کنید  $\Phi_f$  شار حاصله توسط جریان تحریک  $I_f$  و  $\Phi_a$  ناشی از جریان استاتور  $I_a$  حاصل شود. به  $\Phi_a$  شار عکس العمل آرمیچر نیز گفته می‌شود. پس:

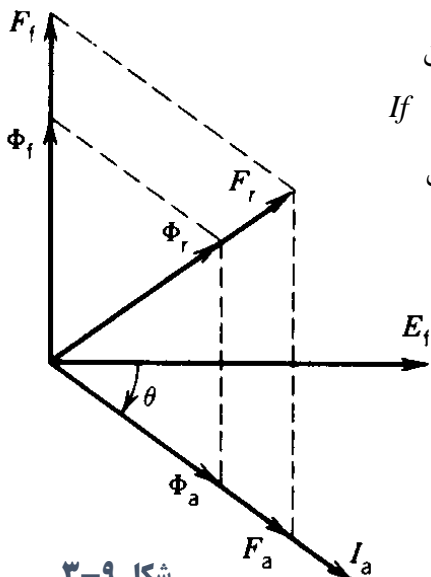
شار منتهی در شکاف هوایی (با صرف نظر از اشباع) برابر است با

$$\Phi_r = \Phi_f + \Phi_a$$

$$\Phi_a = \Phi_{al} + \Phi_{ar}$$

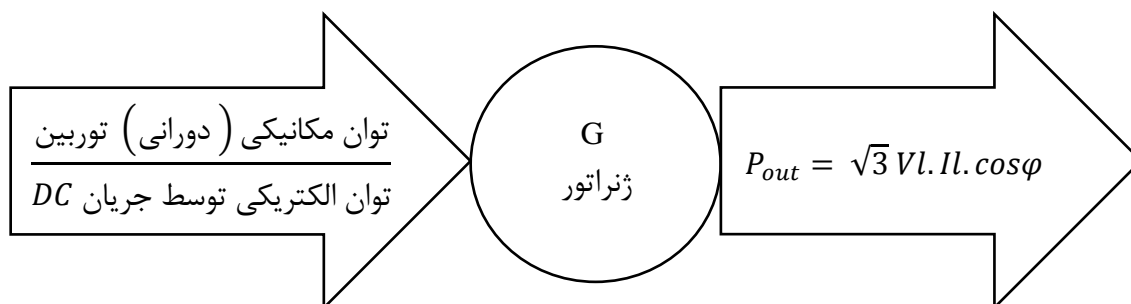
شکل ۳-۹ نمودار فازوری فضایی این سه شار را نشان می‌دهد.  $mmf$  مربوط به رتور ( $F_f$ ) که در اثر جریان تحریک  $I_f$  حاصل می‌شود شار  $\Phi_f$  را تولید می‌کند و همگی در یک امتداد نشان داده شده‌اند.

ولتاژ تحریک  $E_f$  به دلیل اصل فاراده از  $\Phi_f$  به میزان  $90^\circ$  درجه عقب می‌افتد. فرض کنید جریان استاتور  $I_a$  از  $E_f$  به میزان  $\theta$  درجه عقب باشد.  $mmf$  مربوط به  $I_a$  که با  $E_a$  نشان داده می‌شود شار  $\Phi_a$  را تولید می‌کند و همگی در امتداد  $I_a$  نشان داده شده‌اند. بنابراین  $F_r$  یا  $mmf$  منتهی به قرار روبه‌رو است:  $F_r = F_f + F_a$  اگر از اشباع صرف نظر شود در این صورت  $\Phi_r$  منتهی  $\Phi_f$  و  $\Phi_a$  خواهد بود و  $\Phi_r$  را با  $F_r$  تولید می‌نماید.



شکل ۳-۹

### نمودار توازن توان در ژنراتور های سنکرون



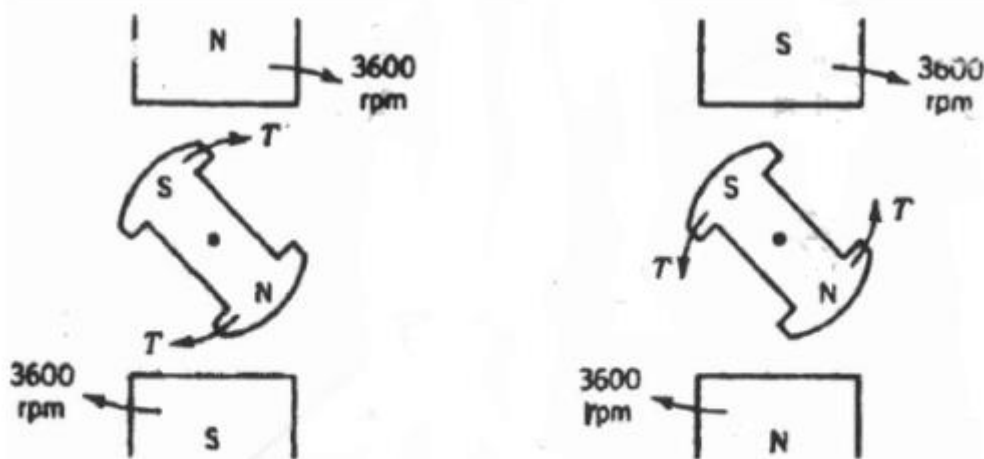
$$\Delta p = P_{cus} + P_{jr} + P_{mis} + P_{fe}$$

$$P_{cus} = 3RI_s^2, \quad P_{jr} = RI_f^2$$

## موتور سنکرون سه فاز

همان طور که در بحث موتورهای DC و موتورهای القایی دیدیم با اتصال این موتورها به شبکه آن‌ها چرخش خود را آغاز می‌کنند. به عبارت دیگر این موتورها خود راه انداز هستند. اما موتورهای سنکرون سه فاز خود راه انداز نیستند. به عبارت دیگر اگر استاتور موتور که شبیه استاتور ژنراتور سنکرون می‌باشد به شبکه برق سه فاز وصل شود و جریان تحریک نیز وارد مدار رتور گردد، باز موتور راه اندازی نمی‌شود بلکه ارتعاش پیدا می‌کند. این امر را می‌توان چنین توجیه کرد:

فرض کنید استاتور یک موتور سنکرون سه فاز دوقطبی به شبکه سه فاز ۶۰ هرتزی متصل شود. در این صورت استاتور یک میدان گردان ایجاد می‌کند که با سرعت ۳۶۰۰ دور در دقیقه می‌چرخد. میدان گردان استاتور را با یک آهنربای دو قطبی چرخان مطابق شکل مدل سازی می‌کنیم.



شکل ۱۰-۳ گشتاور اعمال شده به رتور در زمان راه‌اندازی

فرض کنید در ابتدای راه اندازی وضعیت رتور مطابق شکل بالا باشد. در این صورت به رتور گشتاور T اعمال شده و جهت این گشتاور همان جهت عقربه ساعت است. این گشتاور به دلیل وجود قطب‌های غیر هم نام استاتور و رتور به وجود می‌آید. لذا رتور در جهت میدان گردان به چرخش در می‌آید. در حالت دوم یعنی  $t=t_1$  میدان استاتور نیم دور چرخیده است. در این شرایط میدان گشتاوری در جهت خلاف عقربه ساعت به رتور اعمال می‌کند. بنابراین با توجه به حالت‌های گفته شده گشتاور اعمال شده به رتور در طی یک دور کامل چرخش میدان گردان استاتور صفر خواهد بود. در نتیجه در موتورهای سنکرون گشتاور راه اندازی حاصل نخواهد شد. گفتنی است که سرعت چرخش میدان گردان استاتور آن قدر سریع است که رتور نمی‌تواند خود را با آن هماهنگ کند و در نتیجه ارتعاشاتی در رتور پدید می‌آید.

برای راه اندازی موتورهای سنکرون سه فاز از دو روش استفاده می‌شود:

۱. استفاده از مبدل فرکانس یا منبع تغذیه با فرکانس متغیر
۲. راه‌اندازی موتور سنکرون به صورت موتور القایی (آسنکرون)



## راه اندازی به کمک منبع تغذیه با فرکانس متغیر (مبدل فرکانس)

مبدل فرکانس قادر است موتور سنکرون را از حالت سکون خارج کرده و به سرعت مطلوب برساند. توسط این سیستم در مرحله راه اندازی فرکانس منبع تغذیه کم است و بنابراین میدان گردان استاتور با سرعت کمی می چرخد. در نتیجه قطب های رتور قادر به تعقیب قطب های استاتور است. سپس با افزایش تدریجی فرکانس سرعت موتور به حد مطلوب خواهد رسید. در موتورهای سنکرون برای کنترل سرعت از چنین سیستمی استفاده می شود.

## راه اندازی به صورت موتور القایی سه فاز

چنانچه مبدل فرکانس در دسترس نباشد یا احتیاج به کنترل سرعت نداشته باشیم از این روش استفاده می شود. در این روش یک سیم پیچ اضافی شبیه قفس سنجابی موتور القایی بر روی رتور نصب می شود. این سیم پیچ ها به نام سیم پیچ های میراکننده معروف اند. در این روش برای راه اندازی سیم پیچ تحریک، رتور را با جریان  $I_f$  تحریک نمی کنیم و سیم پیچ سه فاز استاتور را به برق AC سه فاز وصل می کنیم. موتور به صورت موتور القایی راه اندازی می شود. بنابراین به دلیل وجود سیم پیچ های میراکننده گشتاور راه اندازی وجود می آید و پس از سرعت گرفتن موتور به شرایطی می رسیم که سرعت رتور به سرعت سنکرون میدان گردان استاتور می رسد. در این حالت جریان DC مدار تحریک برقرار می شود و قطب های رتور و استاتور یکدیگر را تعقیب می کنند. یعنی رتور و استاتور به یکدیگر قفل شده و رتور با سرعت سنکرون به دوران ادامه خواهد داد. در این شرایط چون سرعت میدان گردان استاتور و سرعت دوران رتور یکسان است لذا جریان القایی در سیم پیچ میراکننده وجود نخواهد داشت و عملاً در ماشین کاری انجام نخواهد داد. چنانچه به دلیل تغییرات بار بر روی محور موتور یا شرایط دیگر گذرا، سرعت سنکرون رتور تغییر کند، در این صورت در سیم پیچ مستهلک کننده جریان القا شده و این جریان گشتاوری حاصل می کند تا سرعت سنکرون مجدداً برقرار شود به همین دلیل این سیم پیچ را سیم پیچ میراکننده می نامند.

## مدار معادل ماشین سنکرون

در این بخش مدار معادل ماشین های سنکرون با رتور استوانه ای را بررسی کرده و در ابتدا توجه خود را بیشتر به مدل ژنراتور سنکرون معطوف می داریم. این مدار معادل مربوط به حالت ماندگار می باشد. از آن جایی که ماشین های سنکرون سه فاز عمدتاً در حالت متعادل مورد بهره برداری قرار می گیرند، لذا مدل ارائه شده بر مبنای یکفاز (معمولاً فاز  $a$ ) استوار است. جریان  $I_f$  (تحریک) در شکاف هوایی ماشین شار  $\varphi_f$  را می سازد. جریان  $I_a$  در استاتور شار  $\varphi_a$  را پدید می آورد.  $\varphi_a$  از دو بخش تشکیل می شود.

۱-  $\varphi_{al}$  یا شار ناشی که فقط سیم پیچی استاتور را دور می زند و در بر می گیرد و سیم پیچی تحریک رتور را در بر نمی گیرد.

۲-  $\varphi_{ar}$  که به شار عکس العمل آرمیچر موسوم بوده و در شکاف هوایی شکل می گیرد و سیم پیچ تحریک رتور را نیز در بر می گیرد.



لذا ولتاژ (- Ear) را می‌توان با افت ولتاژ در دو سر  $X_{ar}$  به ازای عبور جریان  $I_a$  مدل نمود. بنابر این داریم:

$$E_f = I_a X_{ar} + E_r$$

$X_{ar}$  به نام راکتانس عکس العمل آرمیچر یا راکتانس مغناطیس‌کنندگی مرسوم است و در شکل (۳-۱۱-۳) نشان داده شده است. اگر مقاومت استاتور و راکتانس ناشی  $X_{ar}$  برای مدل سازی شار ناشی به مدار معادل افزوده شود، در این صورت مدار معادل شکل (۳-۱۱-۴) حاصل می‌شود گفتنی است که این مدار معادل برای فاز  $a$  معتبر است. برای فازهای  $b$ ،  $c$  نیز به مدارهای مشابهی همچون شکل (۳-۱۱-۴) می‌رسیم، اما کمیت‌های ولتاژ و جریان به میزان  $120^\circ$  و  $240^\circ$  درجه نسبت به شکل (۳-۱۱-۴) اختلاف فاز دارند (سیستم سه فاز متعادل).

باید دانست در این مدل مقاومت موثر بوده و  $1/6$  برابر مقاومت DC سیم پیچ استاتور می‌باشد. در مقاومت موثر، اثر پوستی و درجه حرارت خود را نمایان می‌سازند. لذا مدار معادل نهایی مطابق شکل (۳-۱۱-۵) خواهد بود. باید دانست:

$$X_s = X_{ar} + X_{al} \text{ (راکتانس سنکرون)}$$

$$Z_a = R_a + jX_s \text{ (امپدانس سنکرون)}$$

مدار معادل شکل (۳-۱۱-۵) به نام مدار معادل تونن ژنراتور سنکرون معروف است. (۳-۱۱-۶) مدار معادل

$$I'_f = \frac{E_f}{X_s} \text{ : نورتن ژنراتور سنکرون را نشان می‌دهد. در مدار نورتن داریم:}$$

$$|I'_f| = \frac{X_{ar}}{X_s} n I_f \text{ : اما}$$

برای اثبات این رابطه به کتاب ماشین‌های الکتریکی تالیف سلمون رجوع شود. بدانید:  $n = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{N_{re}}{N_{se}}$  که در رابطه بالا  $N_{re}$  تعداد حلقه‌های موثر سیم پیچی تحریک و  $N_{se}$ ، تعداد حلقه‌های موثر سیم پیچی استاتور (فاز  $a$ ) می‌باشد.

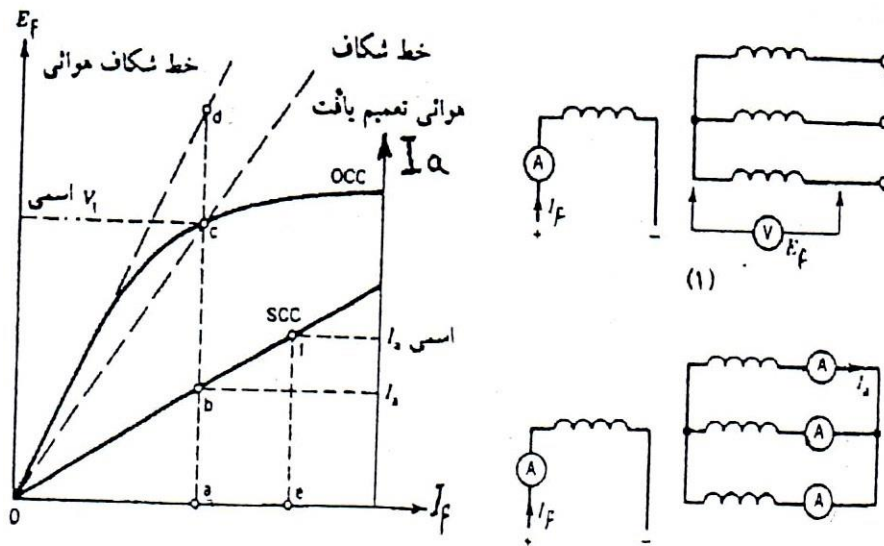
باز متذکر می‌شویم که کلیه مدارهای معادل فوق مربوط به ژنراتور سنکرون سه فاز با رتور استوانه‌ای است.

### تعیین راکتانس سنکرون ( $X_s$ )

فرض کنید ژنراتور سنکرون سه فاز در حالت مدار باز (بی باری) تحت سرعت سنکرون چرخانده شود، (شکل ۳-۱۲-۱). حال با تغییر جریان تحریک ( $I_f$ ) میتوان ولتاژ پایانه ( $V$ ) و در نتیجه  $E_f$  را اندازه‌گیری کرد زیرا

$$V = E_f \text{ در بی باری داریم:}$$

در این صورت می‌توان به مشخصه مدار باز یا OCC ژنراتور دست یافت (شکل ۳-۱۲-۳). این منحنی تغییرات  $E_f$  بر حسب  $I_f$  است. همانطور که در ابتدای این فصل گفتیم اثر اشباع، خود را در این منحنی مشخصه نمایان می‌سازد. خطی که بر قسمت خطی این منحنی (منحنی OCC) مماس می‌شود، خط شکاف هوایی نام دارد. گفتنی است اگر از اشباع صرف نظر شود،  $E_f$  بر طبق این خط تغییر خواهد کرد. همانطور که می‌بینید در آزمایش اتصال کوتاه منحنی مشخصه خطی است. زیرا در این حالت با اشباع روبه‌رو نمی‌شویم. چون شار شکاف هوایی کم می‌باشد.



شکل ۱۲-۳. ۱- آزمایش مدار بازیابی باری ۲- آزمایش اتصال کوتاه ۳- مشخصه‌ها

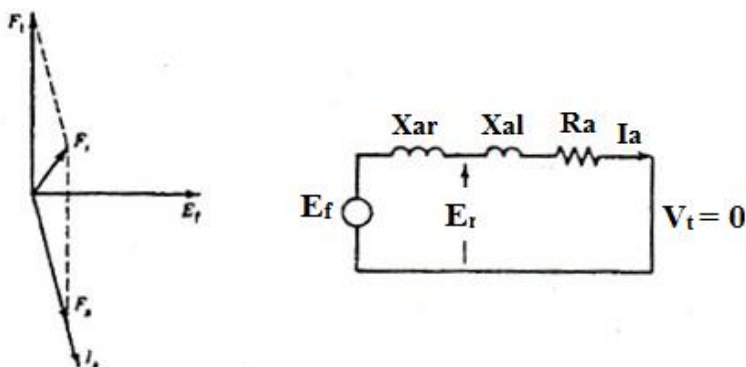
آزمایش اتصال کوتاه در این آزمایش با مدار شکل (۱۲-۳-۱) روبرو هستیم. فرض کنید پایانه های ژنراتور سنکرون سه فاز اتصال کوتاه شده باشند و ماشین تحت سرعت سنکرون چرخانده شود. حال جریان مدار تحریک ( $I_f$ ) را تغییر می‌دهیم و تغییرات  $I_a$  بر حسب  $I_f$  را رسم می‌کنیم. (شکل ۱۲-۳-۲). باید دانست:

$$I_a = \frac{\text{مجموع اعداد سه آمپر متر در شکل (12-3-1)}}{3} = \text{متوسط آمپرمترها}$$

تغییرات  $I_a$  بر حسب  $I_f$  به نام مشخصه اتصال کوتاه معروف است (SCC). این مشخصه تغییرات جریان آرمیچر را بر حسب جریان تحریک در شرایط اتصال کوتاه نشان می‌دهد. مشخصه SCC خطی است، زیرا در شرایط اتصال کوتاه شار شکاف هوایی کم است. این موضوع را می‌توان این چنین توجیه کرد: مدار معادل ژنراتور در شرایط اتصال کوتاه مطابق شکل (۱۳-۳-۱) است. عمدتاً داریم:

$$R_a \ll X_s$$

پس  $I_a$  تقریباً به میزان  $90^\circ$  درجه از  $E_f$  عقب است. لذا عکس العمل آرمیچر  $F_a$  تقریباً در جهت مخالف  $F_f$  (میدان تحریک) قرار می‌گیرد و شار منتهی در شکاف هوایی ( $F_r$ ) خیلی کم است. (شکل ۱۳-۲-۳). لذا اگر  $I_a$  و  $I_f$  زیاد باشند اشباع حاصل نمی‌شود.



شکل ۱۳-۳. عملکرد ژنراتور سنکرون در شرایط اتصال کوتاه

## راکتانس سنکرون اشباع شده

قبل از وصل ژنراتور سنکرون به شین بی‌نهایت یا شبکه،  $E_f$  را در حد ولتاژ اسمی ماشین تنظیم می‌کنیم. از شکل (۳-۱۲-۳) این ولتاژ با  $E_{ca}$  نشان داده شده که معادل ولتاژ اسمی پایانه ماشین یا  $V_t$  است. مشاهده می‌شود که در این شرایط مسأله اشباع، خود را نمایان می‌سازد. حال اگر جریان تحریک ( $I_f$ ) تغییر کند،  $E_f$  نیز تغییر می‌کند. اما دیگر این تغییرات در راستای قسمت خطی مشخصه OCC نخواهد بود، بلکه تغییرات  $E_f$  در راستای خط  $oc$  در صورت می‌گیرد (شکل ۳-۱۲-۳). خط  $oc$  را خط شکاف هوایی تعمیم یافته می‌نامند. این خط در حقیقت اثر اشباع را مدل سازی می‌نماید. این موضوع را می‌توان این چنین توجیه کرد:

از مدار معادل شکل (۳-۱۱-d) داریم:

$$E_r = V_t + I_a (R_a + jX_a I_a)$$

اگر از افت ولتاژهای دو سر  $R_a$  و  $X_a$  صرف نظر کنیم داریم:

$$E_r = V_t$$

از آنجایی که  $V_t$  ثابت است ولتاژ شکاف هوایی نیز اساساً ثابت می‌ماند و در قبال تغییرات  $I_f$  از خود واکنشی نشان نمی‌دهد. این امر نشان دهنده آن است که شار در شکاف هوایی یا اشباع مغناطیسی در قبال تغییرات  $I_f$  تقریباً ثابت می‌ماند و لذا بسیار منطقی است که فرض کنیم  $E_f$  در راستای خط  $oc$  در شکل (۳-۱۲-۳) تغییر می‌کند. پس به طور خلاصه اثر اشباع را نیز با خط شکاف هوایی تعمیم یافته مدل می‌نماییم. به سهولت از شکل (۳-۱۲-۳) داریم:

$$Z_{s(sat)} = \frac{E_{ca}}{I_{ba}} = R_a + jX_{s(sat)}$$

اگر از  $R_a$  چشم پوشی کنیم داریم :

$$X_{s(sat)} \approx \frac{E_{ca}}{I_{ba}}$$

$$x_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2}$$

اگر از  $R_a$  چشم پوشی نکنیم، داریم :

## راکتانس سنکرون اشباع نشده

این راکتانس از قسمت خطی منحنی OCC قابل استحصال است. از شکل (۳-۱۲-۳) داریم:

$$Z_{s(unsat)} = \frac{E_{da}}{I_{ba}} = R_a + jX_{s(unsat)}$$

اگر از  $R_a$  چشم پوشی کنیم، داریم:

$$X_{s(unsat)} \approx \frac{E_{da}}{I_{ba}}$$

$$x_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2}$$

اگر از  $R_a$  چشم پوشی نکنیم، داریم :

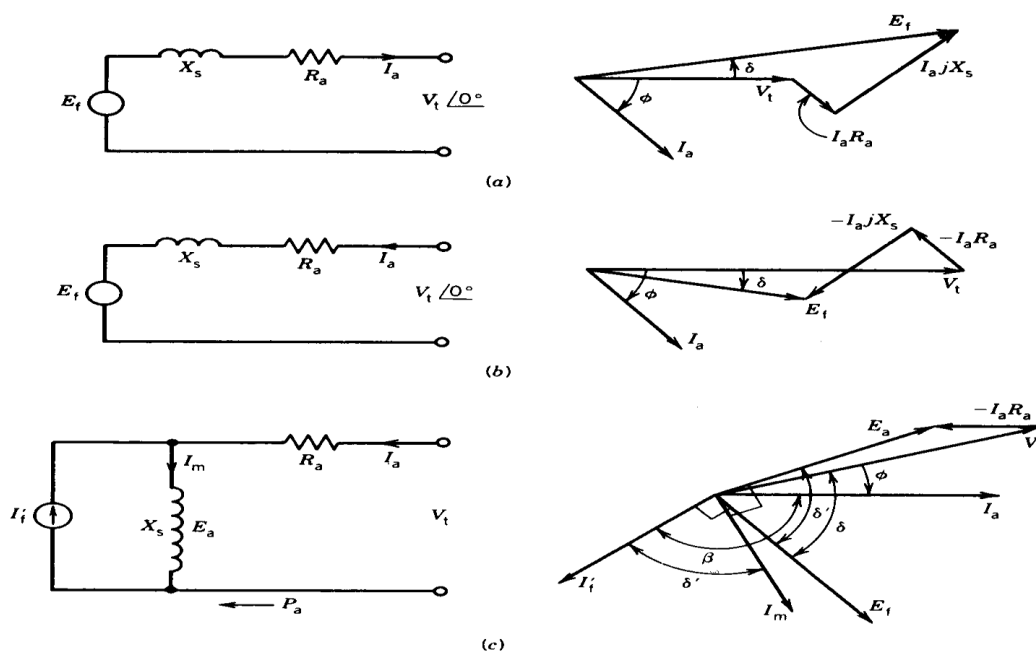
مثال: یک ژنراتور سنکرون 14kv، 10mVA مفروض است و سیم‌پیچ‌های آن به صورت ستاره بسته شده است. سایر مشخصات به شرح مقابل است:  $I_f = 200A$  ولتاژ پایانه در آزمایش مدار باز 14KV، ولتاژ خط شکاف هوایی 18KV و جریان اتصال کوتاه 490A است. مقدار مقاومت هر فاز استاتور آرمیچر 0.7 اهم است.

الف) راکتانس سنکرون sat و unsat  
ب) مقدار Ef در ضریب توان 0/8 پس فاز

## نمودار فازوری

شکل‌های (۳-۱۴-a) و (۳-۱۴-b) مدار معادل ژنراتور سنکرون سه فاز و موتور سنکرون سه فاز را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها نمودارهای فازوری مربوطه نیز نشان داده شده‌اند. باید دانست:

- ۱- این مدارهای معادل مربوط به ماشین‌های با روتور استوانه‌ای هستند.
- ۲- جهت جریان  $I_a$  در موتور از طرف شبکه به سمت ماشین و در ژنراتور از طرف ماشین به سمت شبکه است.
- ۳- این مدارهای معادل مربوط به فاز a در ماشین هستند. زیرا سیستم را سه فاز متعادل در نظر گرفته‌ایم و تحلیل یک فاز کافی است.
- ۴- ولتاژ پایانه ماشین‌ها ( $V_t$ ) به عنوان فازور مرجع در نظر گرفته شده‌اند.
- ۵- این مدارهای معادل همان مدار معادل نورتون ژنراتور و موتور هستند.
- ۶- مدار معادل نورتون ژنراتور را قبلاً دیدیم. حال با توجه به شکل ۳-۱۴-c مدار معادل نورتون موتور سنکرون را معرفی می‌کنیم. در این شکل نمودار فازوری مدار نورتون نیز نشان داده شده است.



شکل ۱۴ - ۳

A - مدار معادل تکفاز ژنراتور سنکرون سه فاز با رتور استوانه‌ای و نمودار فازوری مربوطه.

B - مدار معادل تکفاز موتور سنکرون سه فاز با رتور استوانه‌ای و نمودار فازوری مربوطه.

C - مدار معادل نورتن موتور سنکرون و نمودار فازوری مربوطه.

برای ژنراتور سنکرون با توجه به مدار معادل شکل (۳-۱۴-a) داریم:

باید دانست که  $V_t$  ولتاژ شبکه بوده و به بار متصل به ژنراتور اعمال می‌شود و به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. شکل (۳-۱۴-a) مربوط به حالتی است که بار ژنراتور پس‌ساز است. یا به عبارت دیگر  $I_a$  از  $V_t$  عقب افتاده است. برای موتور سنکرون با توجه به مدار معادل شکل (۳-۱۴-b) داریم:

$$V_t = E_f + I_a \cdot R_a + I_a j X_s$$

$$E_f = V_t \angle 0 - R_a \cdot I_a - I_a j X_s = |E_f| \angle -\delta$$

### مشخصه های توان و گشتاور

معمولاً ژنراتورهای سنکرون به شبکه بی‌نهایت با ولتاژ ثابتی متصل‌اند و تحت سرعت ثابت سنکرون چرخانده می‌شوند. البته باید در نظر داشت همواره محدودیتی برای توان منتقل شده از ژنراتور به شبکه وجود دارد. برای موتورهای سنکرون سه فاز نیز وضع به همین شکل است. یعنی موتورها به شبکه‌ای سه فاز و AC وصل می‌شوند و تحت سرعت ثابت سنکرون می‌چرخند، اما در موتورها با محدودیت گشتاور بار روبه‌رو هستیم. زیرا ممکن است گشتاور بار آن قدر زیاد شود که دیگر موتور قادر به چرخش در سرعت سنکرون نباشد و اصطلاحاً می‌گوییم سنکرونیزم خود را از دست داده است. در این بخش روابط تحلیلی برای ماشین‌های سنکرون از نقطه نظر گشتاور ارائه می‌دهیم و متذکر می‌شویم این روابط در حالت ماندگار (مانا) صادقند. شکل (۳-۱۵) را در نظر می‌گیریم که در آن مدار معادل یک ژنراتور سنکرون با رتور استوانه‌ای (غیر برجسته) را نشان می‌دهد و همانطور که می‌دانیم این مدار معادل مربوط به هر فاز ژنراتور می‌گردد. فرضاً ولتاژ پایانه ماشین (شبکه بی‌نهایت) فازور مرجع باشد. پس:

$$V_t = |V_t| \angle 0^\circ$$

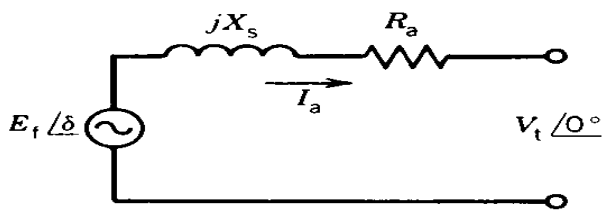
$$E_f = |E_f| \angle \delta$$

$$Z_s = R_a + jX_s = |Z_s| \angle \theta_s$$

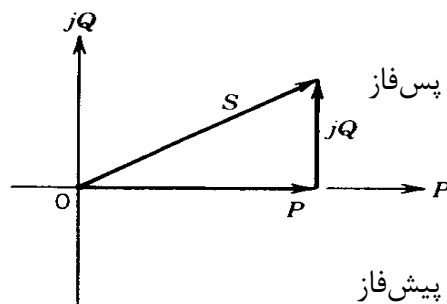
توان مختلط مربوط به هر فاز در پایانه ماشین به قرار زیر است:

$$S = V_T \cdot I_a^*$$

در اینجا از مزدوج جریان استفاده شده است و باید دانست فرض بر آن است که توان راکتیو پس‌ساز مثبت و توان راکتیو پیش‌ساز منفی اختیار می‌شود. شکل (۳-۱۶) مثلث توان را برای حالت پس‌ساز نشان می‌دهد. در این مثلث P توان اکتیو و S توان مختلط است. قدر مطلق S را توان ظاهری گویند.



شکل ۱۵-۳ مدار هر فاز ژنراتور سنکرون با رتور استوانه‌ای



شکل ۱۶-۳ توان مختلط از شکل ۱۵-۳

$$\begin{aligned}
 I_a^* &= \left| \frac{E_f - V_t}{Z_s} \right|^* = \frac{E_f^*}{Z_s^*} - \frac{V_t^*}{Z_s^*} \\
 &= \frac{|E_f| \angle -\delta}{|Z_s| \angle -\theta_s} - \frac{|V_t| \angle 0}{|Z_s| \angle -\theta_s} \\
 &= \frac{|E_f|}{|Z_s|} \angle \theta_s - \delta - \frac{|V_t|}{|Z_s|} \angle \theta_s
 \end{aligned}$$

از دو معادله قبل داریم:

$$S = \frac{|V_t||E_f|}{|Z_s|} \angle \theta_s - \delta - \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \angle \theta_s \text{ VA/phase}$$

توان اکتیو و راکتیو هر فاز از قسمت حقیقی و موهومی رابطه اخیر به دست می آید:

$$P = \frac{|V_t||E_f|}{|Z_s|} \cos(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{Z_s} \cos \theta_s \quad \left( \frac{\text{watt}}{\text{phase}} \right)$$

$$Q = \frac{|V_t||E_f|}{|Z_s|} \sin(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{Z_s} \sin \theta_s \quad \left( \frac{\text{VAR}}{\text{phase}} \right)$$

$\delta$  زاویه بین  $V_t$  و  $E_f$  می‌باشد.

$$Z_s = X_s \quad \theta_s = 90^\circ$$

اگر از  $R_a$  صرف نظر شود در این صورت:

در این صورت از روابط بالا برای ژنراتور سنکرون سه فاز داریم:

$$P_{3\text{ph}} = \frac{3|V_t||E_f|}{|X_s|} \sin \delta = P_{\text{max}} \times \sin \delta \text{ (watts)}$$

$$P_{\text{max}} = \frac{3|V_t||E_f|}{|X_s|}$$

$$Q_{3\text{ph}} = \frac{3|V_t||E_f|}{|X_s|} \cos \delta - \frac{3|V_t|^2}{|X_s|} \text{ (VAR)}$$



$$T = \frac{3}{\omega_{syn}} \frac{|V_t||E_f|}{X_s} \sin \delta$$

$$T = T_{max} \sin \delta \text{ N} \cdot \text{m}$$

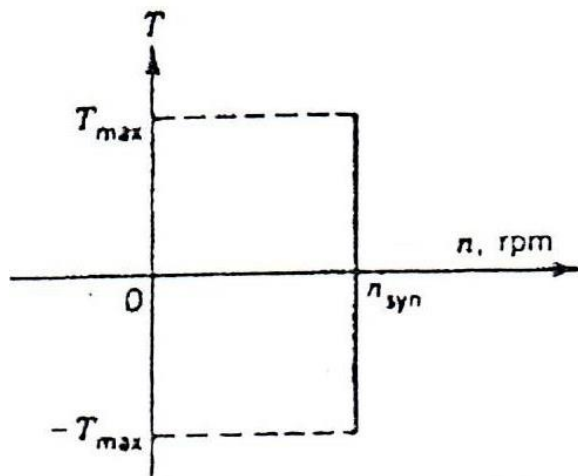
$$T_{max} = \frac{3}{\omega_{syn}} \frac{|V_t||E_f|}{X_s} = \frac{P_{max}}{\omega_{syn}}$$

$$\omega_{syn} = \frac{n_{syn}}{60} 2\pi$$

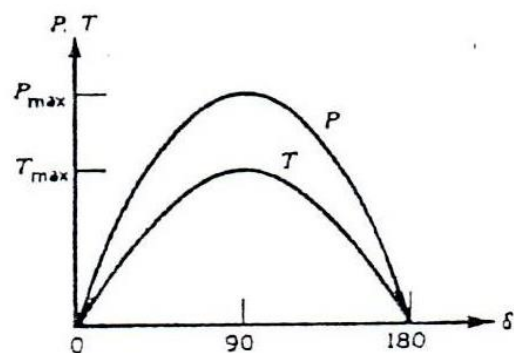
از آنجایی که از تلفات استاتور (آرمیچر) صرف نظر شده است، لذا توان در پایانه ماشین هم اندازه توان شکاف هوایی خواهد بود. گشتاور حاصله توسط ژنراتور به قرار زیر است:

$$T = \frac{P_{3ph}}{\omega_s}$$

مشاهده می‌شود که توان و گشتاور تابع سینوسی زاویه  $\delta$  است (شکل ۱۷-۳). لذا به زاویه  $\delta$  زاویه توان یا زاویه گشتاور نیز اطلاق می‌شود. باید دانست گشتاور فوق در ژنراتور سنکرون همان گشتاور الکترو مغناطیسی است و پر واضح است که با گشتاور اعمال شده به محور از طریق توربین برابر است. اما جهت این دو گشتاور متضاد یکدیگر می‌باشند. بار ژنراتور را می‌توان آرام آرام افزود تا آن که به  $T_{max}$  و  $P_{max}$  برسیم.



شکل ۱۸-۳ - مشخصه گشتاور سرعت



شکل ۱۷-۳ - تغییرات توان و گشتاور بر حسب  $\delta$

این دو کمیت یعنی  $P_{max}$  و  $T_{max}$  حد پایداری ایستا (ایستاتیک) ژنراتور سنکرون می‌باشند. اگر زاویه  $\delta$  در ژنراتور بیش از  $90^\circ$  درجه گردد، ژنراتور سنکرونیزم خود را از دست می‌دهد و ناپایدار می‌شود. توجه کنید که  $\delta = 90^\circ$  مربوط به شرایط  $P_{max}$  و  $T_{max}$  است. به  $P_{max}$  و  $T_{max}$  توان پرتگاهی و گشتاور پرتگاهی نیز گفته می‌شود. منحنی‌های شکل (۱۷-۳) را می‌توان برای موتورهای سنکرون در نظر گرفت. چون در حالت موتوری  $\delta$  منفی است، لذا این منحنی‌ها در ربع سوم مختصات مورد توجه قرار می‌گیرند. در حالت موتوری نیز مسأله  $P_{max}$  و  $T_{max}$  و از دست رفتن سنکرونیزم روتور در  $\delta = 90^\circ$  مطرح است. در ماشین‌های سنکرون (اعم از ژنراتور و موتور) از آنجایی که در حالت پایدار در بارهای گوناگون سرعت همواره معادل سرعت سنکرون

است، لذا مشخصه گشتاور سرعت این گونه ماشین‌ها مطابق شکل (۳-۱۸) است. حال بیایید با توجه به مدار معادل نورتن موتور سنکرون رابطه‌ای برای گشتاور به دست آوریم. شکل (۳-۱۴-ع) را در نظر می‌گیریم. توان مختلط در شکاف هوایی به قرار زیر است:

$$S_a = I_a E_a^*$$

$$I_a = |I_a| \angle 0^\circ \quad \text{فرضاً:}$$

$$E_a = jX_s I_m = jX_s (I_a + I_f')$$

داریم:

$$E_a = |X_s| \times |I_a| \angle 90^\circ + |X_s| \times |I_f'| \angle 90^\circ + \beta$$

$$E_a^* = |X_s| \times |I_a| \angle -90^\circ + |X_s| \times |I_f'| \angle -90^\circ - \beta$$

از دو معادله بالا برای توان ظاهری داریم:

$$S_a = |X_s| \times |I_a|^2 \angle -90^\circ + |X_s| \times |I_a| \times |I_f'| \angle -90^\circ - \beta \quad (\text{VA})$$

از رابطه قبل توان اکتیو شکاف هوایی به دست می‌آید:

$$P_a = \text{Re} |S_a| = X_s I_a^2 \cos(-90^\circ) + |X_s| \times |I_a| \times |I_f'| \cos(-90^\circ - \beta)$$

$$P_a = -\omega L_s I_a I_f' \sin \beta \quad (\text{w})$$

$$\omega = 2\pi f$$

برای توان راکتیو نیز داریم:

$$Q = -X_s I_a^2 + |X_s| \times |I_a| \times |I_f'| \cos(\beta)$$

گشتاور حاصله به قرار زیر است :

$$T = \frac{3P_a}{\omega_{\text{syn}}}$$

داریم:

$$\omega_{\text{syn}} = \frac{\omega_{\text{syn}}}{60} = \frac{120f}{p} \times \frac{2\pi}{60} = \frac{4\pi f}{p} = \frac{2}{p} \omega$$

از دو رابطه قبل برای گشتاور موتور سنکرون داریم:

$$T = -\frac{3P}{2} L_s I_a I_f' \sin \beta$$

تمرین: یک ماشین سنکرون سه فاز، ۴قطب، 60Hz، 208 v و 5KVA مفروض است و سیم پیچ های آن ستاره است. Ra ناچیز است و  $X_s = 8$  است. اگر ماشین به صورت ژنراتوری بهره برداری شود و توان اسمی را تحت ضریب توان ۰/۸ پس فاز تحویل دهد، الف) Ef و  $\delta$  را پیدا کنید و نمودار فازوری را رسم کنید. ب) اگر جریان تحریک 20٪ زیاد شود ولی توان مکانیکی ورودی از طریق توربین ثابت بماند، جریان استاتور، ضریب توان و توان اکتیو ژنراتور را بیابید. ج) حد پایداری یا  $P_{\text{max}}$  را پیدا کنید و مقدار جریان استاتور و ضریب توان را بیابید.

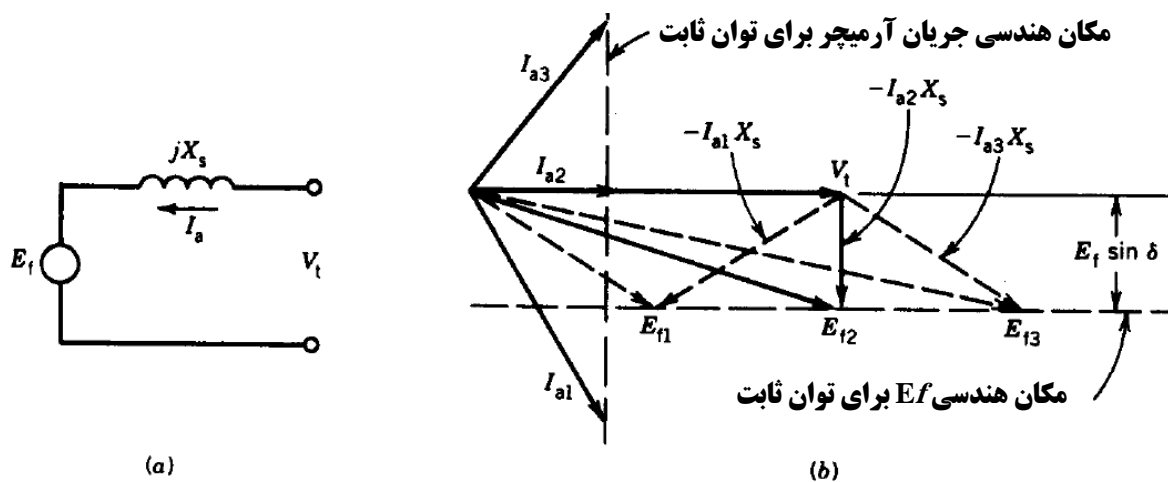
## کنترل ضریب توان

یکی از مزایای عمده موتورهای سنکرون سه فاز آن است که ضریب توان را می‌توان با تغییر جریان تحریک ( $I_f$ ) کنترل نمود. به سخنی دیگر تغییر جریان تحریک باعث می‌گردد که جریان موتور از حالت پس‌فاز به حالت پیش‌فاز برود (و بالعکس). این امر را می‌توان توسط نمودار فازوری توجیه نمود. فرضاً موتور سنکرونی به شبکه بی‌نهایت وصل باشد و توان اکتیو آن ثابت باشد (بار موتور ثابت است)، شکل (۳-۱۹-a) مدار معادل موتور را نشان می‌دهد و فرض بر آن است که مقاومت استاتور ناچیز است. در شکل (۳-۱۹-b) نمودار موتور رسم شده است. برای موتور سه فاز اکتیو به قرار زیر است:

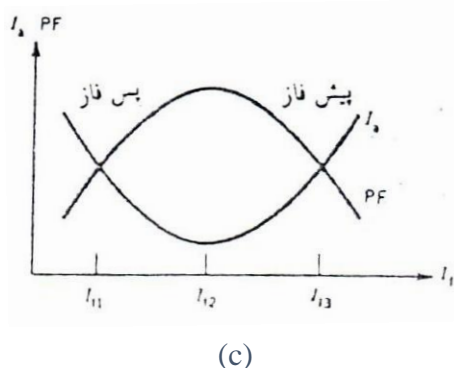
$$P = 3V_t I_a \cos \Phi$$

از آنجایی که  $V_t$  ثابت است لذا برای آنکه موتور تحت شرایط توان اکتیو ثابت مورد بهره‌برداری قرار گیرد، باید عددی ثابت باشد  $I_a \cos \Phi =$

به عبارت دیگر مؤلفه‌ای از  $I_a$  که همفاز  $V_t$  است باید همواره ثابت باقی بماند. لذا مکان هندسی  $I_a$  خط عمودی است که از نقطه مربوط به ضریب توان واحد می‌گذرد (از نوک فازور  $I_{a2}$  در شکل (۳-۱۹-b)) در شکل (۳-۱۹-b) برای سه جریان مختلف استاتور رسم شده است.



شکل ۳-۱۹ مشخصه‌های ضریب توان



a- مدل معادل

b- نمودار فازوری

c- تغییرات  $I_a$  ضریب توان بر حسب  $I_f$

این سه جریان به قرار زیر هستند:

$$I_a = I_{a1} V_1 \text{ به نسبت}$$

$$I_a = I_{a2} V_1 \text{ هم‌فاز}$$

$$I_a = I_{a3} V_1 \text{ به نسبت}$$

برای این سه جریان سه ولتاژ  $E_{f1}$  و  $E_{f2}$  و  $E_{f3}$  حاصل می‌شود. این سه ولتاژ متناظر با سه جریان تحریک  $I_{f1}$  و  $I_{f2}$  و  $I_{f3}$  است. در شکل (۳-۱۹-b) سه ولتاژ  $E_{f1}$  و  $E_{f2}$  و  $E_{f3}$  نیز رسم شده است. به طور کلی برای موتور سنکرون داریم:

$$E_f = v_t - I_a X_s$$

توان اکتیو را می‌توان چنین نیز نوشت:

$$P = 3 \frac{V_T E_f}{X_s} \sin \delta$$

اگر بخواهیم توان اکتیو ثابت بماند باید: عددی ثابت  $E_t \sin \delta =$

لذا مکان هندسی  $E_f$  و در نتیجه  $I_f$  نیز خطی مستقیم است. این خط مستقیم موازی  $V_t$  بوده و در شکل (۳-۱۹-b) نشان داده شده است.

به طور خلاصه می‌توان گفت اگر جریان تحریک ( $I_f$ ) تغییر کند  $E_f$  تغییر می‌کند. اما نوک فازور  $E_f$  طبق رابطه جریان  $I_a$  تغییر می‌کند اما همواره نوک فازور  $I_a$  بر روی خط عمودی یا مکان هندسی مربوط قرار دارد (شکل ۳-۱۹-b) تغییر جریان  $I_a$  باعث می‌شود که زاویه ضریب توان موتور ( $\Phi$ ) نیز تغییر کند.  $\Phi$  زاویه جریان استاتور ( $I_a$ ) و ولتاژ ( $V_t$ ) است. برای مثال می‌توان گفت اگر جریان تحریک  $I_{f1}$  باشد در این صورت ولتاژ درون ماشین  $E_{f1}$  بوده و جریان استاتور  $I_{a1}$  است (شکل ۳-۱۹-b) در این صورت ماشین در شرایط پس‌فاز کار می‌کند. زیرا  $I_{a1}$  از  $V_t$  عقب افتاده است. این حالت را حالت زیر تحریک موتور سنکرون می‌نامند. اگر جریان تحریک  $I_{f2}$  طوری باشد که  $E_{f2}$  را در ماشین تولید کند (شکل ۳-۱۹-b) در این صورت جریان استاتور  $I_{a2}$  بوده و مشاهده می‌شود ضریب توان واحد برای موتور حاصل می‌شود. زیرا  $I_{a1}$  با  $V_t$  هم فاز می‌شود. به این شرایط حالت تحریک عادی یا تحریک نرمال اطلاق می‌گردد.

اگر جریان تحریک  $I_{f2}$  طوری باشد که  $E_{f1}$  را در ماشین تولید کند (شکل ۳-۱۹-b) در این صورت جریان استاتور  $I_{f2}$  بوده و مشاهده می‌شود موتور در تحت ضریب توان پیش‌فاز کار می‌کند. زیرا  $I_{a1}$  از  $V_t$  جلو می‌افتد. به این شرایط حالت فوق تحریک اطلاق می‌شود. با تغییر جریان تحریک موتور سنکرون تحت توان اکتیو ثابت می‌تواند ضریب توان‌های مختلف از خود بروز دهد. باید گفت:

- ۱- در حالت زیر تحریک موتور از شبکه P، Q می‌کشد (حالت پس‌فاز).
- ۲- در حالت فوق تحریک موتور از شبکه P می‌کشد ولی Q به شبکه تزریق می‌کند (حالت پیش‌فاز).
- ۳- در حالت تحریک عادی یا تحریک نرمال موتور فقط P از شبکه می‌کشد (ضریب توان واحد).

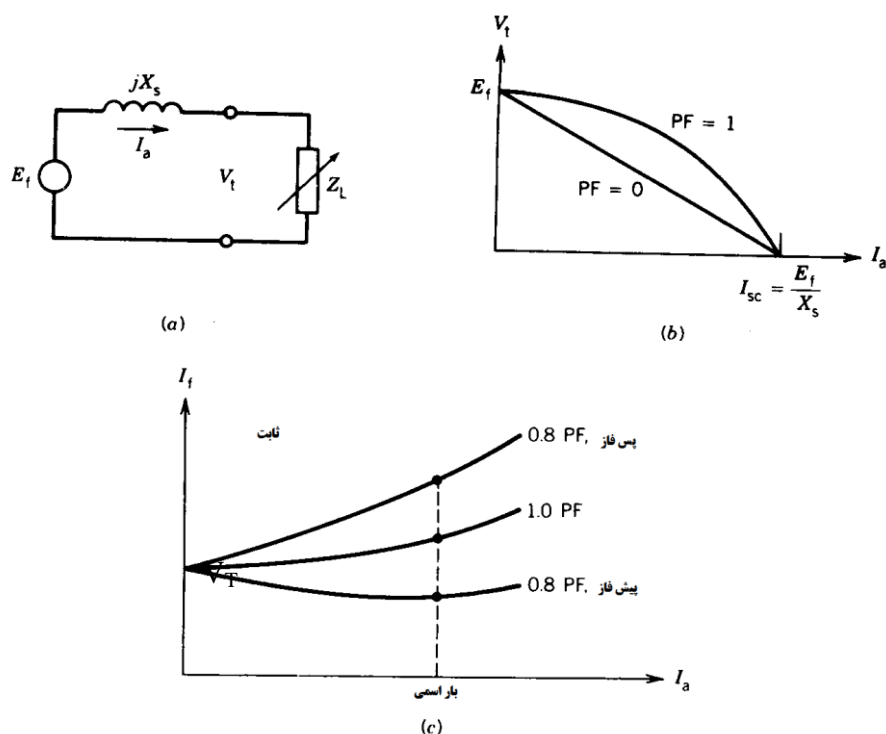
شکل (۳-۱۹-c) تغییرات جریان استاتور و ضریب توان موتور را بر حسب جریان تحریک ( $I_t$ ) تحت توان اکتیو ثابت نشان می‌دهد. باید گفت:

- ۱- منحنی تغییرات جریان استاتور ( $I_a$ ) بر حسب جریان تحریک ( $I_f$ ) به منحنی V معروف است زیرا شبیه حرف V است.

۲- منحنی تغییرات ضریب توان (PF) بر حسب جریان تحریک ( $I_f$ ) به منحنی  $V$  وارونه معروف است. از این مزیت موتور سنکرون می‌توان استفاده کرد و ضریب توان کارخانجات را بهبود بخشید. زیرا در حالت فوق تحریک موتور همانند خازن عمل می‌کند و می‌تواند  $Q$  به شبکه تزریق کند. اگر موتور سنکرون در حالت بی‌باری مورد استفاده قرار گیرد (توان اکتیو صفر) در این صورت با تغییر جریان تحریک می‌توان آن را به صورت یک خازن و یا یک سلف مورد بهره‌برداری قرار داد. در شرایط فوق تحریک و زیر تحریک ضریب توان موتور بی‌بار صفر است. موتورهای سنکرون بی‌بار را کندانسور سنکرون می‌نامند و برای تنظیم ولتاژ انتهای خطوط انتقال انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### ژنراتورهای سنکرون مستقل

همان‌طور که قبلاً گفتیم، ژنراتورهای سنکرون عمدتاً به شبکه بی‌نهایت وصل می‌باشند و شبکه به هم پیوسته را تغذیه می‌کنند. اما ژنراتورهای کوچکی هم یافت می‌شوند که بار محلی و مستقلی را تغذیه می‌نمایند. مثال بارز در این رابطه ژنراتورهای اضطراری در کارخانجات، ادارات، بیمارستان‌ها و غیره است. در این گونه ژنراتورها، موتور دیزل اغلب جهت چرخاندن محور به کار می‌رود و محور را تحت سرعت ثابت سنکرون به چرخش در می‌آورد. با تغییر بار ژنراتور مستقل، ولتاژ پایانه ( $V_T$ ) آن تغییر می‌کند. بر روی این ژنراتورها معمولاً تنظیم‌کننده ولتاژ اتوماتیک (AVR) نصب می‌شود تا جریان تحریک را جهت حصول به  $V_T$  ثابت، کنترل نماید. برای دست‌یابی به مشخصه پایانه ژنراتورهای مستقل (تغییرات  $V_T$  بر حسب  $I_a$ )، مدار معادل شکل (۳-۲۰-ا) را در نظر می‌گیریم که در آن از مقاومت استاتور (آرمیچر) صرف نظر شده است. در حالت بی‌باری یا مدار باز داریم:



شکل ۳-۲۰ - مشخصه‌های ژنراتور سنکرون مستقل

(a) مدار معادل -b تغییرات  $V_T$  بر حسب  $I_a$  تحت  $I_f$  ثابت -c تغییرات  $I_f$  بر حسب  $I_a$  تحت  $V_T$  ثابت

$$E_T = V_T, \quad I_a = 0$$

اگر جریان بار بین صفر و  $\frac{E_f}{X_s}$  تغییر کند، در این صورت ولتاژ پایانه ( $V_T$ ) بین  $E_f$  و صفر تغییر خواهد نمود. لذا اگر جریان تحریک ( $I_f$ ) در ازای تغییرات جریان بار، ثابت بماند، ولتاژ پایانه ( $V_T$ ) در محدوده وسیعی تغییر خواهد کرد و تنظیم ولتاژ مطلوبی حاصل نمی‌گردد. برای بار اندوکتیو (یا سلفی) داریم:

$$Z_L = X_L$$

$$V_T = E_f - I_a X_s = I_{sc} X_s - I_a X_s = X_s (I_{sc} - I_a)$$

این رابطه تغییرات خطی  $V_T$  بر حسب  $I_a$  را نمایان می‌سازد.

برای بار مقاومتی داریم:

$$I_a = \frac{E_f}{\sqrt{R_L^2 + X_s^2}} = \frac{X_s I_{sc}}{\sqrt{R_L^2 + X_s^2}}$$

$$V_T = I_a R_L$$

از روابط بالا داریم:

$$\frac{V_t^2}{(X_s I_{sc})^2} + \frac{I_a^2}{I_{sc}^2} = 1$$

معادله بالا یک ربع بیضی را نشان می‌دهد. این دو رابطه در شکل (b-۲۰-۳) رسم شده‌اند. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که تحت ضریب توان‌های کم اگر  $I_a$  زیاد شود، ولتاژ پایانه به شدت سقوط می‌کند. برای ثابت نگه داشتن  $V_T$  در بارهای مختلف، جریان تحریک را تغییر می‌دهیم و در نتیجه  $E_f$  را کنترل می‌نماییم. شکل (c-۲۰-۳) تغییرات جریان تحریک مورد نیاز جهت ثابت نگه داشتن  $V_T$  در ازای جریان‌های مختلف استاتور را نشان می‌دهد. تنظیم کننده ولتاژ اتوماتیک (AVR) ولتاژ پایانه ژنراتور را حس کرده و جریان تحریک ( $I_f$ ) را طوری تغییر می‌دهد تا ولتاژ پایانه ماشین ثابت نگه داشته شود.

### ماشین‌های سنکرون قطب برجسته

ماشین‌های سنکرون چند قطبی و کم سرعت حاوی قطب‌های برجسته هستند. در این ماشین‌ها سرعت سنکرون کم است و با شکاف هوایی غیریکنواخت روبه‌رو هستیم. لذا عکس‌العمل آرمیچر یا mmf آرمیچر شار بیشتری در امتداد محور قطب‌ها که به محور مستقیم یا محور d معروف است، تولید می‌کند. علت این امر آن است که طول شکاف هوایی در این امتداد بسیار کم است. پرواضح است که عکس‌العمل آرمیچر یا mmf آرمیچر شار کمتری در امتداد محور متعامد که به محور عرضی یا محور q معروف است، تولید می‌کند. زیرا طول شکاف هوایی در این امتداد نسبتاً زیاد است. در ماشین‌های با رتور استوانه‌ای که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، شار در کلیه نقاط شکاف هوایی یکسان است. زیرا در این ماشین‌ها شکاف هوایی یکنواخت می‌باشد. در نتیجه راکتانس  $X_{ar}$  که مدل عکس‌العمل آرمیچر در ماشین‌های با رتور استوانه‌ای، دیگر جهت مدل‌سازی عکس‌العمل آرمیچر در ماشین‌های قطب برجسته قابل قبول نخواهد بود. در اینجا از بحث دربارهٔ تئوری این ماشین اجتناب می‌نماییم.



۶ - در یک مولد سنکرون ولتاژ فازی در باری با جریان ۱۰۰ آمپر و ضریب قدرت  $0.8$  پس فاز  $220$  ولت است. اگر آرمیچر دارای  $R_a=0$  و  $X_s=1\Omega$  باشد نیروی محرکه القایی فازی چند ولت است؟

(۱) ۳۰۵ (۲) ۳۰۰ (۳) ۲۸ (۴) ۲۹۱

۷ - یک مولد سنکرون با سیم پیچی ۴ قطب توسط محرک دیزلی به حرکت در می‌آید. سرعت چرخش دیزل مولد چند R.P.M باشد تا ولتاژ القایی در آن دارای فرکانس  $60\text{ Hz}$  باشد؟

(۱) ۳۶۰۰ (۲) ۱۸۰۰ (۳) ۱۵۰۰ (۴) ۹۰۰

۸. یک مولد سنکرون با یک شبکه بی نهایت موازی شده است برای تغییر میزان توان اکتیو تحویلی آن به شبکه کدام کمیت را می توان تغییر داد؟

- (۱) جریان تحریک (۲) انرژی مکانیکی ورودی  
(۳) انرژی مکانیکی ورودی یا جریان تحریک (۴) انرژی مکانیکی ورودی و جریان تحریک با هم

۹ - یک مولد سنکرون با اتصال ستاره در جریان تحریک نامی دارای ولتاژ خط بی باری  $200\sqrt{3}$  ولت و جریان اتصال کوتاه  $200$  آمپر است. اگر با اعمال ولتاژ  $DC$  با دامنه  $12$  ولت به دو سر آن جریان  $20$  آمپر از مدار عبور راکتانس سنکرون آن چند اهم است؟

(۱)  $0.16$  (۲)  $0.18$  (۳)  $0.4$  (۴)  $0.95$

۱۰ - یک مولد جریان متناوب  $200$  ولت  $50$  هرتس در آزمایش اتصال کوتاه دارای جریان  $20$  آمپر است اگر در همین شرایط اتصال کوتاه را باز کنیم ولتاژ دو سر مدار  $10$  ولت اندازه گیری می‌شود اگر راکتانس سنکرون خیلی بزرگتر از مقاومت اهمی سیم پیچ‌ها باشد مقدار آن چند اهم است؟

(۱)  $0.15$  (۲)  $14$  (۳)  $8$  (۴)  $10$

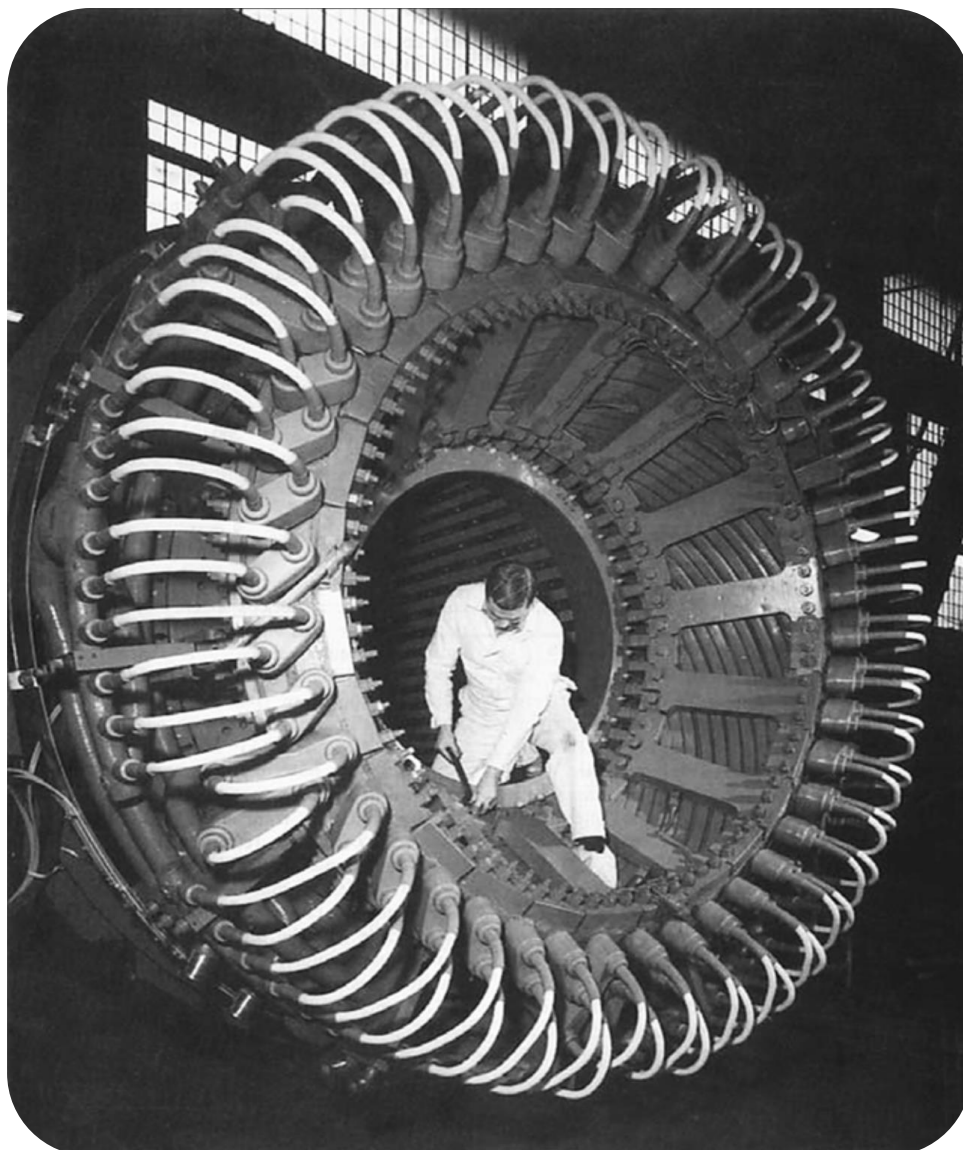
۱۱ - در یک موتور سنکرون ولتاژ ترمینال برابر  $110\sqrt{3}$  و جریان خط ماشین  $10A$  می باشد اگر اتصال ماشین بصورت ستاره بوده و  $Z_s=j\sqrt{2}\Omega$  و ضریب قدرت موتور نیز  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  پس فاز باشد زاویه گشتاور ماشین چند درجه خواهد بود؟

(۱)  $+5/8$  (۲)  $25/6$  (۳)  $-5/7$  (۴)  $-25/6$

منابع

P.C. Sen  
Bim Bahra  
A.J. Chapman





با گسترش جریان متناوب و استفاده از برق سه فاز به عنوان برق صنعتی، امروزه قسمت عمده ایی از موتور های الکتریکی از نوع جریان متناوب سه فاز هستند. درس ماشین های الکتریکی سه فاز از واحد های درسی است که دانشجویان برق ملزم به گذراندن آن می باشند که دو واحد درسی را شامل می شود. این جزوه شامل مطالبی از ماشین های سنکرون و آسنکرون سه فاز می باشد. امیدوارم این مطالب برای دانشجویان و علاقه مندان به این درس مفید واقع شود.

باتشکر

استاد جمالو