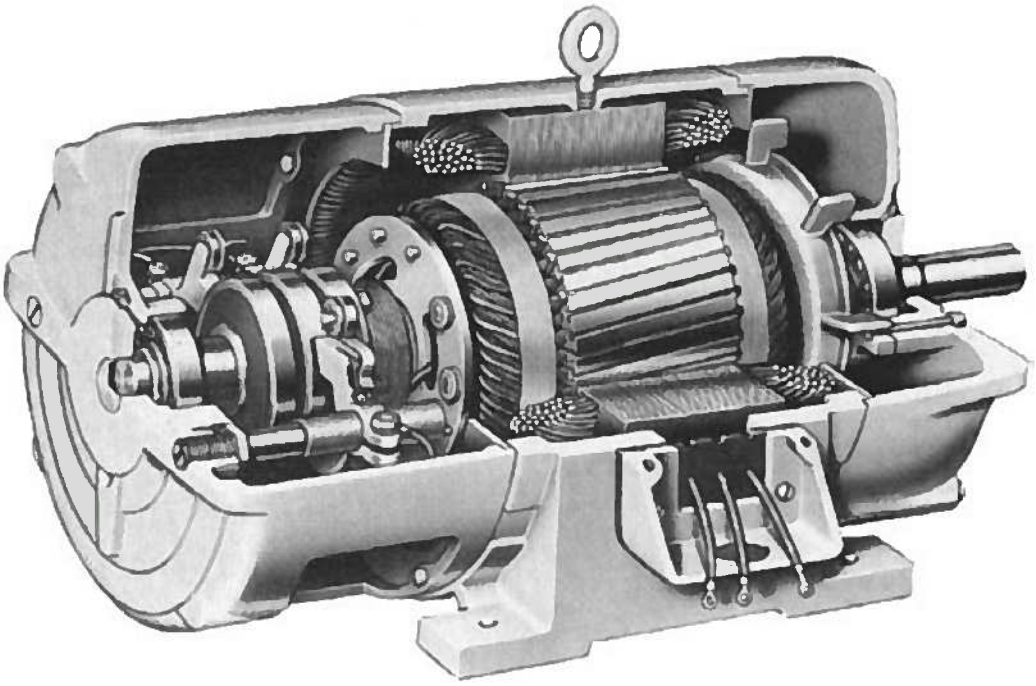
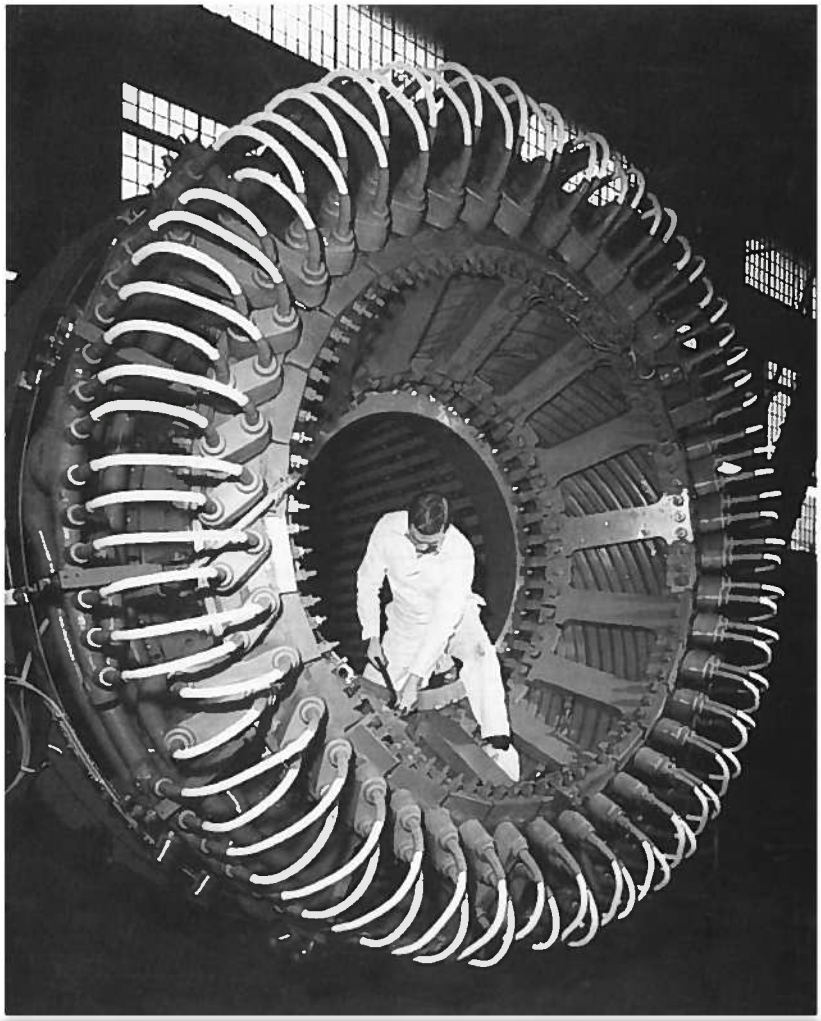
جزوه ماشین های الکتریکی

سه فاز





با گسترش شبکه جریان متناوب و استفاده از برق سه فاز به عنوان برق صنعتی، امروزه قسمت عمده‌ای از موتورهای الکتریکی از نوع جریان متناوب سه فاز هستند. درس ماشین‌های الکتریکی سه‌فاز از واحدهای درسی است که دانشجویان مهندسی برق ملزم به گذراندن آن می باشند که دو واحد درسی را شامل می شود.

این جزوه شامل مطالبی در مورد ماشین‌های سنکرون و آسنکرون سه‌فاز می‌باشد. امیدوارم این موارد برای دانشجویان و علاقه‌مندان به این درس مفید واقع شود.

باتشکر

فصل نخست

ماشین‌هایی که سیم‌پیچ‌های میراکننده دارند را ماشین القایی می‌گویند. این ماشین‌ها بدین جهت القایی‌اند که ولتاژ رتور در اثر القا در سیم‌پیچ های 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.

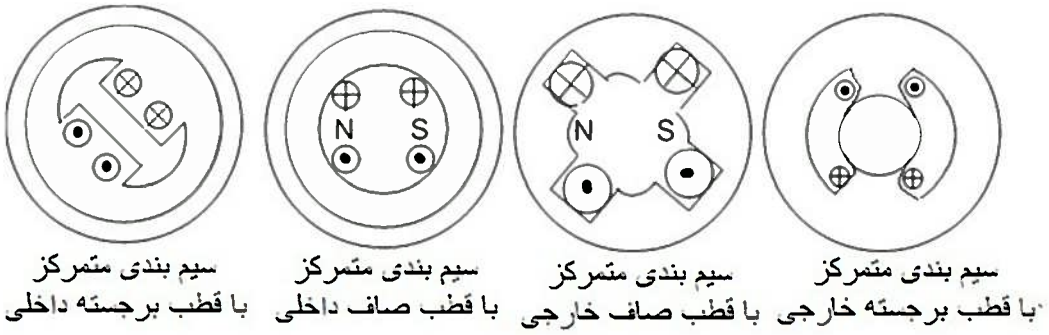
مبانی ماشین‌های متناوب دوار

مفهوم میدان مغناطیسی دوار در ساده‌ترین حالت با در نظر گرفتن یک استاتور توخالی که دارای سه سیم‌پیچ با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه مکانیکی است و جریان هایی با اختلاف زمانی ۱۲۰درجه الکتریکی به آن ها متصل اند و چون این سیم‌پیچی‌ها دارای دو قطب شمال و جنوب می‌باشند آن‌ها را سیم‌پیچی (ماشین‌های) دو قطبی می‌نامند.

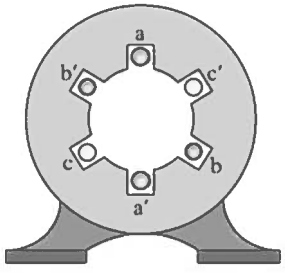
انواع سیم بندی

۱- سیم بندی متمرکز ۲- سیم بندی گسترده (توزیع شده)

۱- سیم بندی 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 قالباً به عنوان سیم‌بندی تحریک استفاده می‌شود و به دو صورت صاف و برجسته می‌باشد.

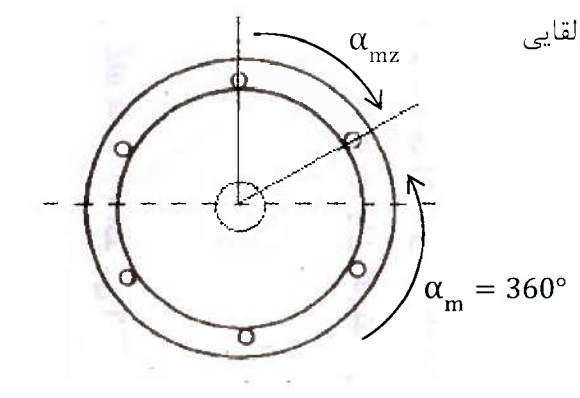


۲- سیم بندی گسترده (توزیع شده): سیم بندی است که درآن هر کلاف به چند زیر کلاف تقسیم شده و در شیارهای مختلف در سطح ماشین توزیع می شود. این سیم بندی راحت‌تر اجرا شده و دارای استحکام بیشتری است. ولی به علت زیاد بودن شیارها دارای هارمونیک‌های شیاری است و سبب ایجاد نویز و نوسان شده و تلفات ماشین را افزایش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



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.

تبدیل رادیان به درجه: $\frac{D}{180°} = \frac{Rad}{\pi}$

۱- زاویه‌ی مکانیکی یا هندسی ماشین: $\alpha_m = 360°$

۲- زاویه مکانیکی یا هندسی دو شیار مجاور (گام شیار مکانیکی): $\alpha_{mz} = \frac{360°}{Z}$

۳- زاویه الکتریکی کل استاتور: $\alpha_e = P \times \alpha m = P \times 360°$

۴- زاویه الکتریکی میان دو شیار مجاور: $\alpha_{ez} = \frac{360P}{Z} = \alpha_{mz}.P$

(نشان دهنده ی میزان اختلاف فاز بین ولتاژهای القایی موجود در دو شیار مجاور هم.)

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

الف: گام قطبی برحسب شیار: $y_p = \frac{Z}{2P}$

ب: گام قطبی برحسب زاویه مکانیکی: $y_p = \frac{\alpha_m}{2P} = \frac{360°}{2P} = \frac{180°}{P}(°m)$

ج: گام قطبی برحسب زاویه الکتریکی: $y_p = \frac{\alpha_e}{2P} = 180(°_e)$

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

سیم بندی کامل $y_w = y_P$

سیم بندی گام کسری $y_w < y_p$

مثال: در یک استاتور قطب صاف ۲۴ شیار و۴ قطب مطلوبست:

الف)زوایای مکانیکی و الکتریکی $\alpha_m = 360°$ $\alpha_e = 360P = 360 \times 2 = 720°$

ب)زوایای الکتریکی و مکانیکی بین دو شیار

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

ج)گام قطبی وگام کلاف

$y_p = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$ ، $y_p = \frac{\alpha_m}{2P} = \frac{360}{4} = 90°$ ، $y_p = \frac{\alpha_e}{2p} = 180°$ ، گام کامل است

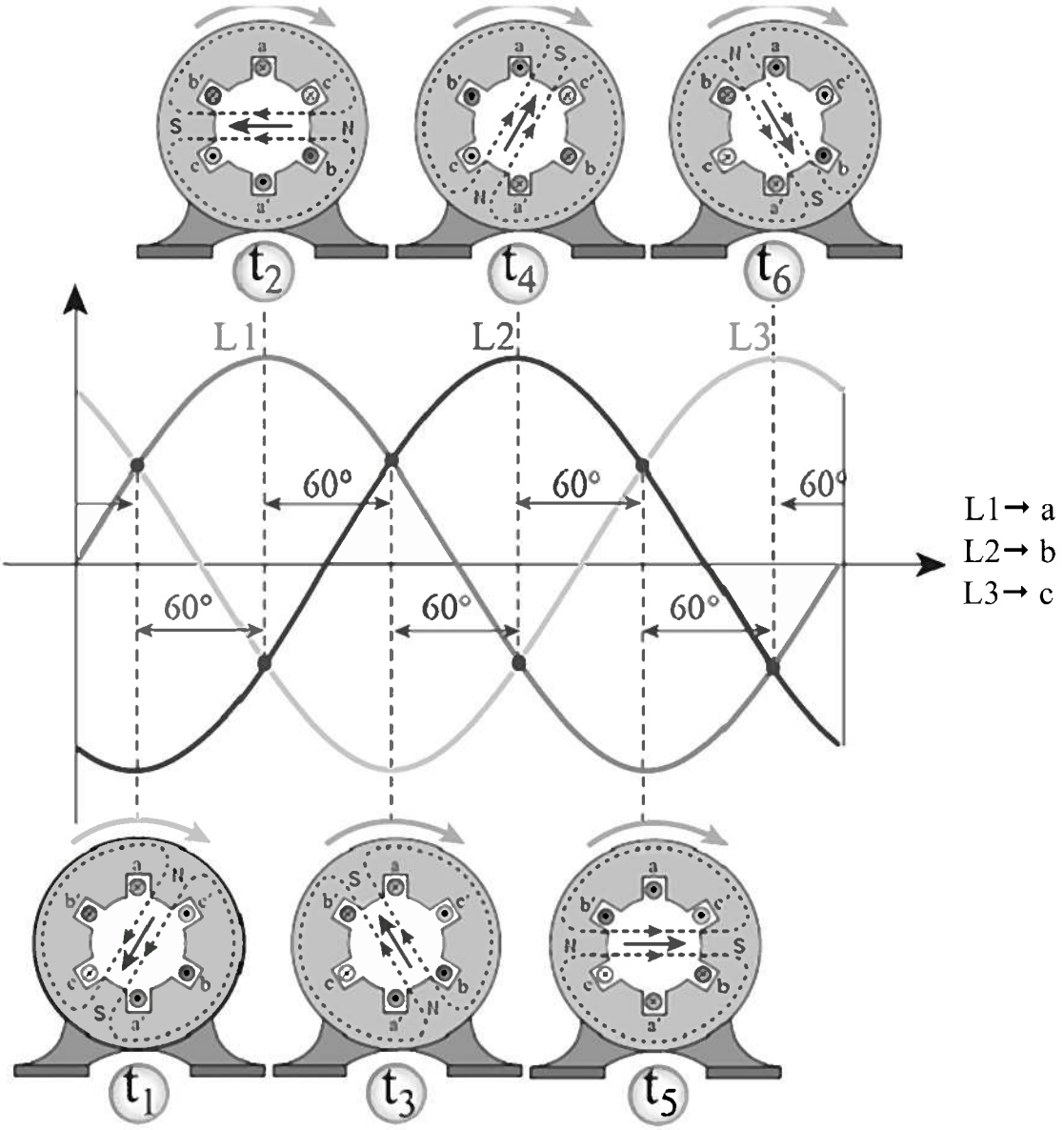
تولید میدان دوار مغناطیسی در ماشین های سه فاز

۱- استفاده ازآهنربای گردان

۲- استفاده از سیستم‌های چند فاز در استاتورهای سیم پیچی چند فاز

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

- روش نخست اثبات از طریق ترسیم:



می‌توان به کمک یک استاتور که دارای سه سیم پیچ با اختلاف مکانی ۱۲۰ درجه متصل به جریان‌های سه فاز با اختلاف زمانی ۱۲۰ درجه میدان دوار مغناطیسی با سرعت n_s ایجاد نمود.

- روش دوم اثبات از طریق فرمول‌های ریاضی:

✍ می‌توان ثابت کرد که تغذیه سیم پیچ چند فاز به وسیله منبع چند فاز می‌تواند چندین میدان ضربانی ایجاد کند که مجموع این میدان‌های ضربانی یک میدان دوار تشکیل می‌دهند.

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

$$i_a = I_m . \sin \omega t$$
$$i_b = I_m . \sin \omega t - 120^\circ$$
$$i_c = I_m . \sin \omega t + 120^\circ$$

✍ نیرو محرکه مغناطیسی $NI = \theta = f$

$$f_a = NI_a \sin \theta$$
$$f_b = NI_b \sin(\theta - 120°)$$
$$f_c = NI_c \sin(\theta + 120°)$$

✍ $$\sin A . \sin B = \frac{1}{2}((\cos A + B) - (\cos A - B))$$

$$f_a = NI_m \sin(\omega t). \sin \theta$$
$$f_b = NI_m \sin(\omega t - 120°). \sin(\theta - 120°)$$
$$f_c = NI_m \sin(\omega t + 120°). \sin(\theta + 120°)$$

$$f_a = \frac{1}{2} NI_m(\cos(\omega t + \theta) - \cos(\omega t - \theta))$$

+

$$f_b = \frac{1}{2} NI_m(\cos(\omega t + \theta - 240°) - \cos(\omega t - \theta))$$

+

$$f_c = \frac{1}{2} NI_m(\cos(\omega t + \theta + 240°) - \cos(\omega t - \theta))$$

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

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

✍ جمله ی $N \sin \theta$ به توزیع سینوسی سیم پیچی ها در محیط استاتور باز می گردد.

با توجه به اثبات بالا می توان نتایج زیر را برداشت کرد:

۱- مشاهده می‌شود که در محیط دایره‌ای به شعاع $\frac{3}{2} f_m$ 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 متقارن تر و ملایم تر است.

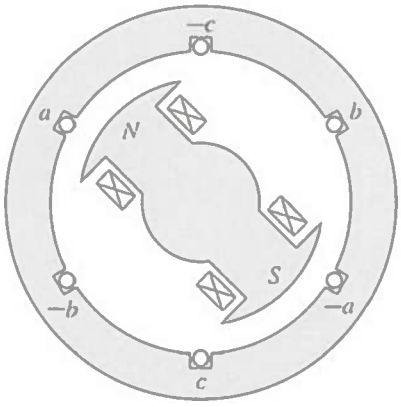
۴-سرعت این میدان که آن را سرعت سنکرون می‌نامند از رابطه ی $n_s = 60\frac{f}{p}$ بر حسب (RPM) یا $n_s = \frac{f}{p}$ بر حسب (RPS) به‌دست می‌آید. برای سرعت زاویه‌ای سنکرون نیز داریم:

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

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

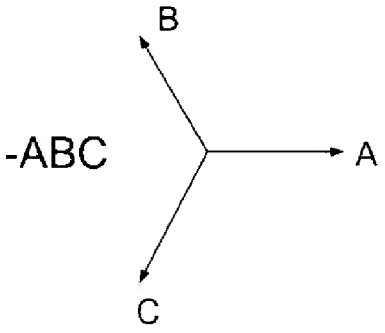
ولتاژ القایی در ماشین های AC

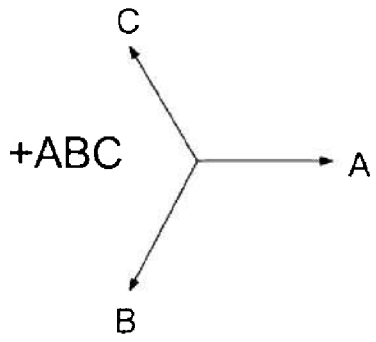
با توجه به شکل اگر رتور به جریان DC متصل شود و توسط یک محور خارجی بچرخد، آنگاه در سیم‌بندی‌های استاتور ولتاژی القا می‌شود که دامنه این ولتاژ ثابت بوده ولی دارای اختلاف فازی برابر 360^o M می‌باشد.



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

توالی فازها به شکل زیر است:





✍ درتوالی +ABC ولتاژهای خطی به اندازه ۳۰ 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 ۳۰ 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 راتعداد شیار در قطب در هرفاز گویند. $q=\frac{y_p}{m}=\frac{\frac{z}{2p}}{m}=\frac{z}{2pm}\Rightarrow qp=\frac{z}{2m}$

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

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

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 دوطبقه 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

گروه کلاف را می توان به صورت زیر نشان داد که در آن t تعداد طبقه است. $G_{ph}=t\times P$

به تعداد هادی های هم نام مجاور یک دیگر، یک کمربندی فازی گویند. $P.B=2Pm$

شیار شروع فازهای سیم بندی در سیم بندی توزیع شده

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

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

✍ سیم‌بندی‌های توزیع شده دارای سه مزیت‌اند:۱- سینوسی کردن میدان مغناطیسی ۲-تهویه بهتر ماشین و بالا بردن راندمان ۳- استهکام سیم‌بندی افزایش می‌یابد.

اما سیم‌بندی توزیع شده دارای دو عیب عمده نیز هست: ۱- کاهش ولتاژ القایی در سیم‌پیچ ها ۲- تولید هارمونیک‌ها

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:

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

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

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

مثال: در یک استاتور ۲۴ شیار ۴ قطب مقدار kd را حساب کنید.

$$Z = 24 \qquad ZP = 4 \Rightarrow q = \frac{yp}{m} = \frac{Z}{2P.m} = \frac{24}{3\times 4} = 2$$

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

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

الف) kd را بیابید.

ب) اگر $K_\varphi = 1$ باشد با kd به دست آمده افت ولتاژ چقدر است؟

سری فوریه

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

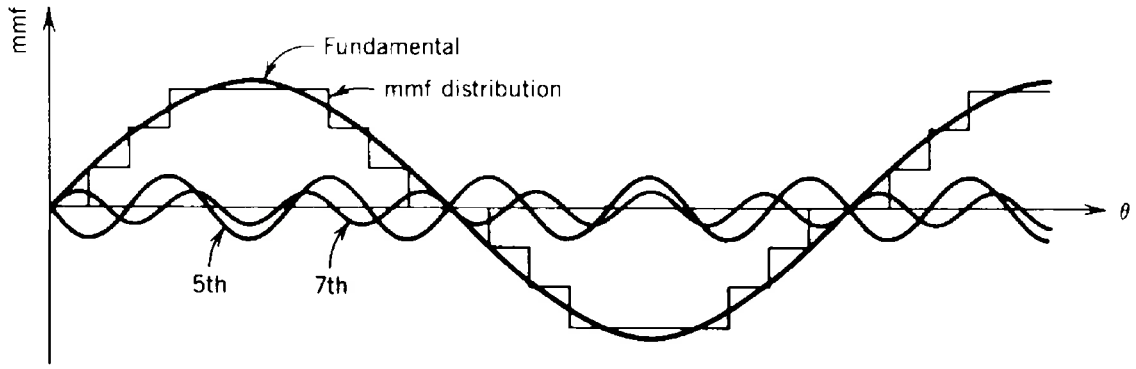
$$a_n = \int_0^L f_x \left(\cos\frac{n\pi}{L}x\right)dx$$

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

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.

هارمونیک



دلایل عمده‌ی ایجاد هارمونیک

۱. محدودیت شیارها
۲. منحنی غیرخطی مغناطیسی و اشباع در هسته
۳. توزیع غیرسینوسی 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_n و a_0 برابر صفر می‌باشند. پس هارمونیک‌های کسینوسی حذف می‌شوند.
۲. از هارمونیک های مرتبه‌ی ۹ به بعد صرف‌نظر می کنیم. (h=9)
۳. برای از بین بردن آثار هارمونیک‌ها باید آن‌ها را خنثی کنیم.
۴. فرکانس هر هارمونیک برابر است با: $f_h=h.f_1$
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 هارمونیک ها به قرار مقابل باشد: $h = 6m \pm 1$، آنگاه mmf از رابطه ی زیر به دست می آید: (m عدد صحیح است)

$$f(0,t) = \frac{3}{2} f_m \cos(h\omega t \pm \theta)$$

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. $m=0 \rightarrow h=1$, $m=1 \rightarrow h=5, h=7$

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

$$m=1 \Rightarrow h=6+1=7, h=6-1=5$$

$$h=7 \Rightarrow f_7 = 7\times 60 = 420 \qquad n_s = \frac{60\times 420}{2} = 12600$$

$$h=5 \Rightarrow f_5 = 5\times 60 = 300 \qquad n_s = \frac{60\times 300}{2} = 9000$$

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

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

$$f_5(\theta,t) = \frac{3}{2} f_m \cos(5\omega t + \theta)$$

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

$$n_{s(h)} = h \times n_{s1} = \frac{60 \times f \times h}{P}$$

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 ایده آل سینوسی mmf موقعی امکان پذیر است که ماشین دارای شیارهای بیشمار باشد. در اینجا نیز $h = 6m \pm 1$ است ولی سرعت میدان دوار در هارمونیک های مکانی برابر $n_s = \frac{60 f}{h \times P}$ می باشد.

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

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

مثال: برای حذف هارمونیک ۵ و۷، ε مورد نظر را بیابید.

$$h=5 \Rightarrow \varepsilon = 1-\frac{1}{5}=\frac{4}{5} \qquad h=7 \Rightarrow \varepsilon = 1-\frac{1}{7}=\frac{6}{7}$$

ضریب کوتاهی گام (Kp)

ضریب کوتاهی گام برابر نسبت ولتاژ القا شده در کلاف با گام کوتاه بر نسبت ولتاژ القا شده با گام کامل می‌باشد.

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

با کوتاه کردن گام سیم‌بندی، هارمونیک‌ها تا حدودی تضعیف می‌شوند اما دامنه‌ی هارمونیک اصلی نیز کاهش می‌یابد (که این یک عیب است). برای نشان دادن این امر از رابطه‌ی ضریب کوتاهی گام استفاده می کنیم: $K_{p(h)} = \sin(90\varepsilon \times h)$

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 که۴٪ ولتاژ آن کاهش یافته است.

مثال: یک استاتور ۲ قطبی پیچک هایی با گام $\frac{5}{6}$ دارد. هارمونیک های ۱تا ۷ را حساب کنید.

$$h=1 \Rightarrow k_p = \sin(90.\varepsilon) = \sin\left(90\times\frac{5}{6}\right) = 0.96$$

$$h=3 \Rightarrow k_p = \sin(90.\varepsilon) = \sin\left(90\times3\times\frac{5}{6}\right) = -0.707$$

$$h=5 \Rightarrow k_p = \sin(90.\varepsilon) = \sin\left(90\times5\times\frac{5}{6}\right) = 0.258$$

$$h=7 \Rightarrow k_p = \sin(90.\varepsilon) = \sin\left(90\times7\times\frac{5}{6}\right) = 0.23$$

تمرین: در استاتوری که برای حذف هارمونیک ۵ طراحی شده است ضریب کوتاهی گام را برای هارمونیک های ۱تا۷را بیابید.

ضریب سیم پیچی (Kw)

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

$$Kw = Kd \times Kp \Rightarrow Kw = Kdh \times Kph$$

$$Kdh = \frac{\sin\left(qh\frac{\alpha_{cz}}{2}\right)}{q\sin\left(\frac{h\alpha_{cz}}{2}\right)} \qquad \varepsilon = 1 - \frac{1}{\mathrm{h}}$$

در $\varepsilon = 1 - \frac{1}{h}$ منظور از h هارمونیک مورد نظر ودر $\mathrm{Kph} = \sin(90\varepsilon \mathrm{h})$ ، h شماره‌های هارمونیک‌ها می‌باشد.

مثال: استاتور یک ماشین سه فاز ۴ قطب و ۳۶ شیار جهت حذف هارمونیک ۵ طراحی شده است. گام سیم پیچی را برای هارمونیک اصلی محاسبه نمایید.

اگر کوتاهی گام بر اساس زاویه الکتریکی داده شود می‌توان از رابطه مقابل استفاده کرد: $K_{\mathrm{P}} = \cos\left(\frac{\varepsilon_0}{2}\right)$ که در اینجا ε_0 اختلاف میان y_{We} و y_{Pe} است.

مثال: در یک استاتور ۳۶ شیار یک سیم‌بندی ۴ قطب سه فاز تعبیه شده است. اگر به منظور تضعیف هارمونیک‌های ۵ و۷ گام سیم‌بندی 150°_{e} انتخاب شود. ضریب سیم‌بندی و میزان کاهش ولتاژ اصلی را بیابید.

نتیجه گیری

در ماشین‌های القایی رابطه ولتاژ القایی در هر فاز به شکل زیر است: $E = 4.44\ Kw\ \varphi mf\ \mathrm{N}$

فصل دوم

ماشین‌های القایی آسنکرون

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

ماشین القایی:

- استاتور: سیم پیچی، هسته
- رتور: سیم پیچی، هسته

با اتصال ولتاژ به استاتور میدان دواری تشکیل می‌شود که سرعت آن از رابطه $n_s = 60\frac{f}{p}$ به‌دست 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: {n=0 و S=1} سیم‌پیچ رتور اتصال کوتاه شده ولتاژ درآن القا شده ولی حرکت نداریم.

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

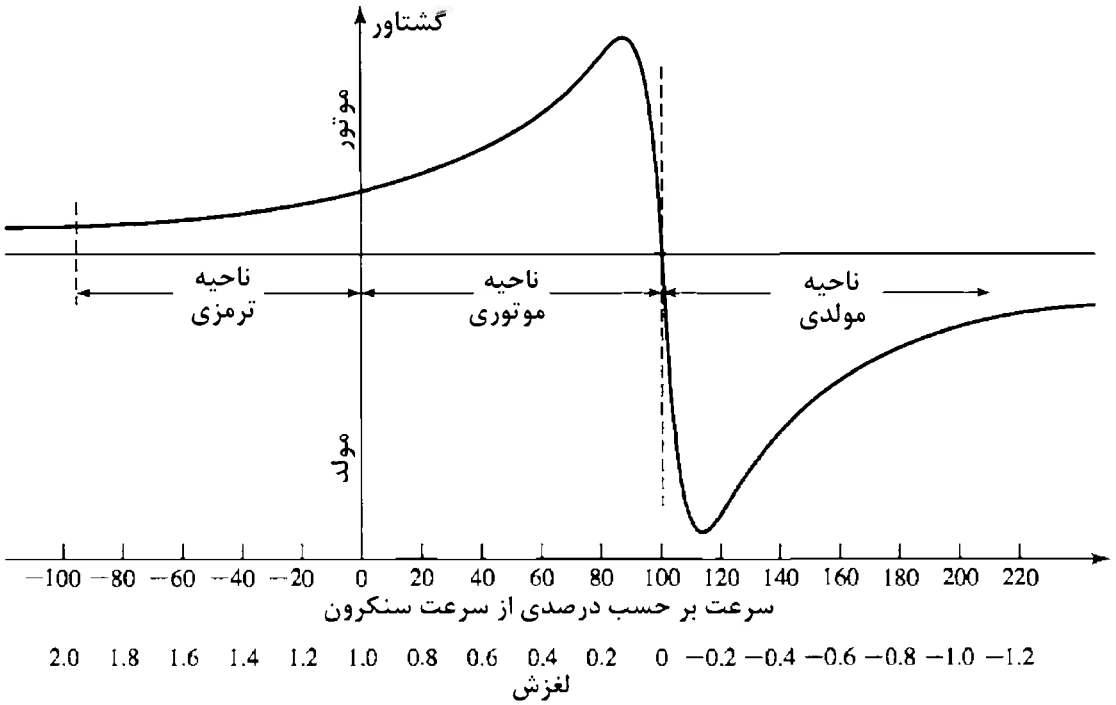
۳- حالت بی باری : $n_s = n$ و S=0

۴- حالت مولدی : $n > n_s$ و $S < 0$

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

$$\%S = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \qquad n < n_s \rightarrow \Delta_n = n_s - n$$

سرعت میدان استاتور = سرعت میدان رتور ≠ 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)

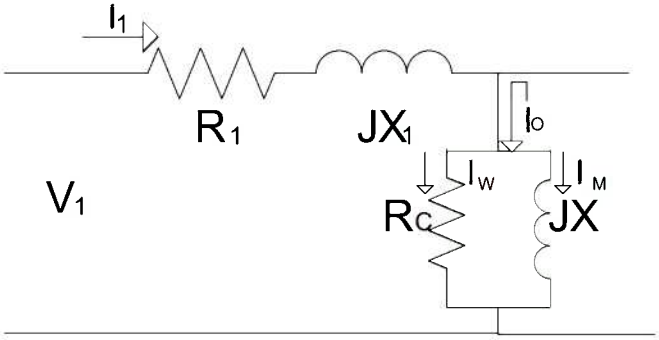
مثال: یک موتور القایی سه فاز ۶۰Hz دارای سرعت ۱۷۵۰ در بار کامل است:

الف) تعداد قطب ها ؟

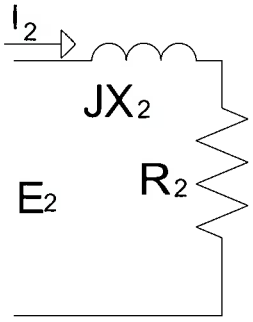
ب) لغزش نامی؟

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
درحالت سکون

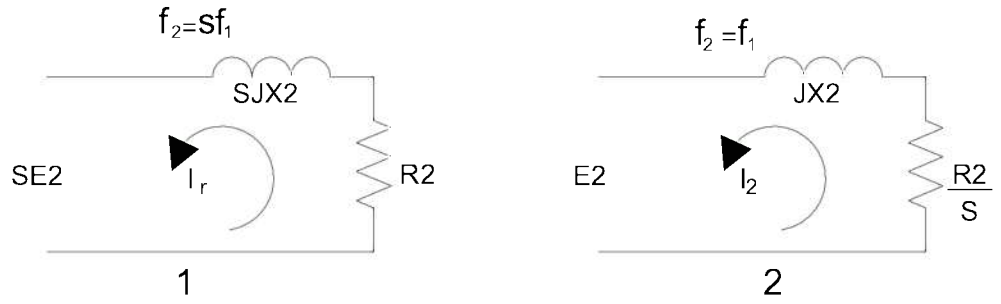
جریان درحالت سکون رتور $I2 = \frac{E2}{R2 + JX2}$ $cos\varphi = \frac{R_2}{Z_r}$

با توجه به شباهت مدار بالا به مدار ترانسفورماتور باید تذکر داد که $V_l = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$ می‌باشد. 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 می‌باشد. 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 سیم‌پیچ‌های استاتور به صورت توزیع شده هستند X_{L1} باز هم بزرگتر می‌شود.

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

۱. وجود شکاف هوایی ۲. سیم‌پیچ توزیع شده

مدار معادل رتور در حالت حرکت



$$\cos\varphi = \frac{R2}{R2 + SJX2} \qquad Ir = \frac{SE2}{R2 + SJX2} = \frac{E2}{\frac{R2}{S} + JX2}$$

در مقایسه شکل های ۱ و۲ می بینیم که:

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

ب) فرکانس در شکل۱، Sf1 ولی درشکل ۲، برابر f_1 است.

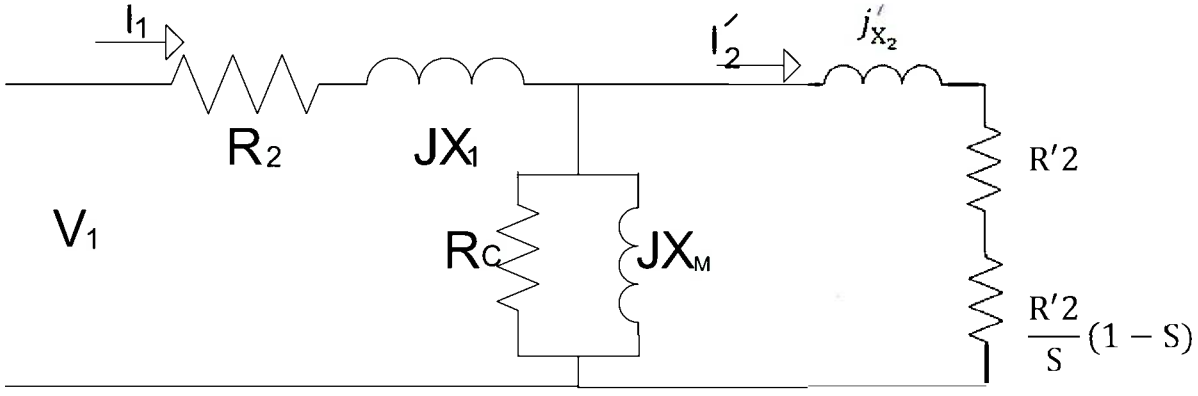
ج) توان مصرفی رتور درشکل ۱ برابر $P = RI^2$ و در شکل ۲ برابر $P_{ag} = \frac{R_2}{S} \times I_2^2$ است و هر چقدر S کوچکتر باشد کارایی موتور بهتر است. زیرا P_{ag} بسیار بزرگتر از P_{jr} می‌شود. پس می‌توان گفت توان P_{ag} توان عبوری از شکاف فاصله هوایی است و شامل تلفات سیم پیچی رتور و توان مکانیکی است.

تلفات مسی رتور $P_{jr} = P_{cur} = SP_{ag} = P_{ag} - P_m = RI^2$ توان مکانیکی ناخالص $P_m = (1-S)P_{ag}$

مقدار X_m در موتور نسبت به ترانس چگونه است؟

کوچکتر. زیرا ضریب تزویج (کوپلینگ) در موتور کوچکتر است.

مدار معادل کامل موتور القایی



$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad ، \quad I'_2 = \frac{I_2}{a}$$

$$R'_2 = a^2 R_2 \quad ، \quad X'_2 = a^2 X_2$$

مثال: یک موتور القایی ۴۶۰ ولت، ۱۵اسب 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

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

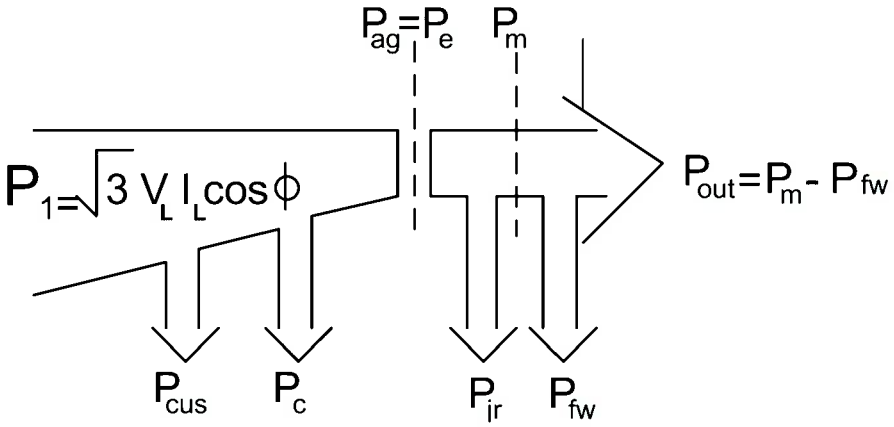
$$P_u = 15 \times 736 = 11040w$$

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

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

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

نمودار توازن موتور



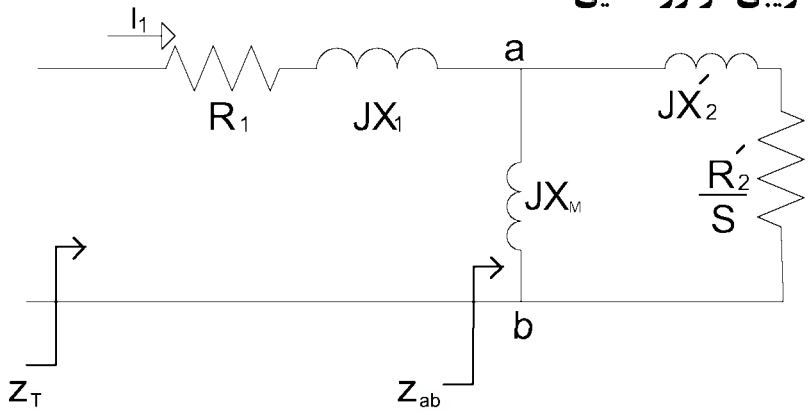
$$P_{ag} = \frac{P_2}{S} I_2{}^2 \qquad P_C = \frac{3V_P{}^2}{R_C} \qquad P_{cus} = 3R_s I_1{}^2$$

$$\eta = \frac{Pout}{p_i} \qquad \omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \qquad \omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}$$

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

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

مدار معادل تقریبی موتور القایی IEEE

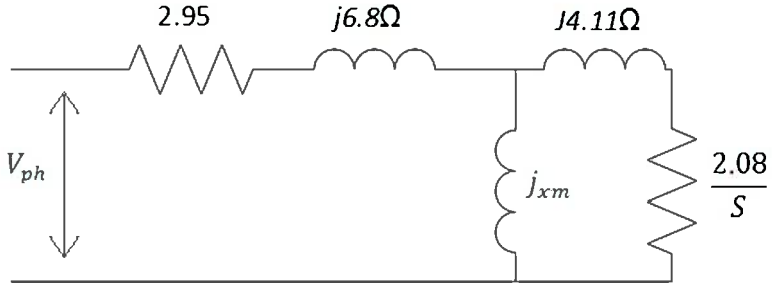


$$Z_t = (R_{ab} + R_1) + j(xab + x_1)$$

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

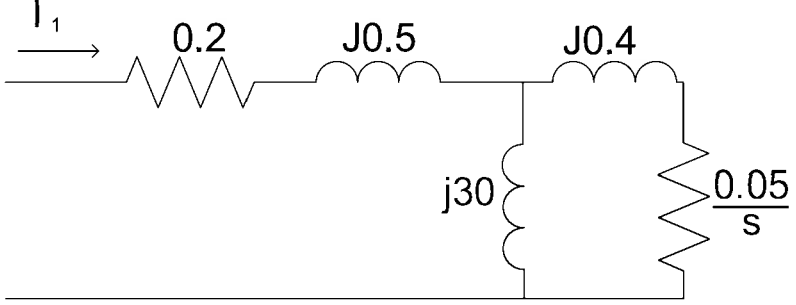
$$Il = \frac{V_l}{Zt}$$

تمرین: مدار معادل یک فاز موتور القایی ۱۲قطب، ۴۲۰ولت، 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 موتور 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.



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

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

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

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

$$I_1 = \frac{V_p}{Z_t} = \frac{220}{1/4 + j0/94} = \frac{220\angle 0}{1/68\angle 33/88} = 130/95\angle -33/88\ A$$

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

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

$$P_{ag} = 3 \times P_{ag} = 61732\ w \qquad P_m = (1 - S)P_{ag} = (1 - 0.04) \times 61732 = 59262/72\ w$$

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

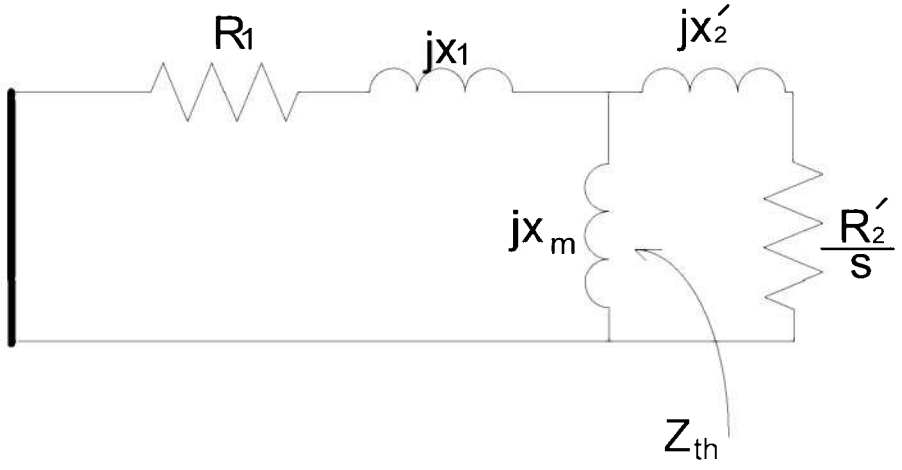
$$\omega_r = \frac{2\pi n}{60} \Rightarrow \omega_r = \frac{2 \times 3/14 \times 1440}{60} = 150/72\ Rad \qquad T_{out} = \frac{58662/72}{150.72} = 389/21\ N.M$$

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

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

$$\eta = \frac{p_{out}}{P_i} = \frac{58662/72}{71554/35} = 81/98\%$$

مدار معادل توننs



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

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

$$\left.\begin{aligned} U_{th} &= \left(\frac{x_m}{x_1 + x_m}\right)V_{ph} \Leftarrow R_1 << x_1 + x_m \\ R_{th} &= \left(\frac{x_m}{x_1 + x_m}\right)^2 \times R_1 \Leftarrow R_1 << x_1 + x_m \\ x_{th} &= x \end{aligned}\right\} \text{از } R_1 \text{ صرف نظر شده است}$$

$$I'_2 = \frac{U_{th}}{\left(R_{th} + \frac{R'_2}{S}\right) + j(x_{th} + x'_2)}$$

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

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

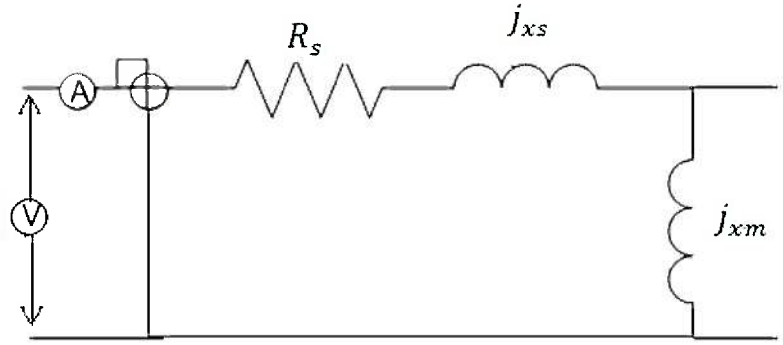
$$Z_{th} = \frac{j30(0/2 + 0/5j)}{0/2 + j(30 + 0/5)} = \frac{30\angle 90 \times 0/53\angle 68/19}{30/5\angle 80/62} = \frac{15/9\angle 158/19}{30/5\angle 89} = 952\angle 69/79$$

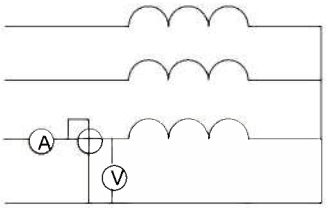
$$U_{th} = U_{ph} \times \left(\frac{jx_m}{R_1 + j(x_m + x_1)}\right) = 220\left(\frac{j30}{0/2 + j(3040/5)}\right) = 220\left(\frac{30\angle 90}{30/5\angle 89}\right) = 216/39\angle 1$$

آزمایش‌های ماشین سه‌فاز

۱- آزمایش بی باری: (NLT)

در آزمایش بی‌باری موتور القایی می‌توان جریان تحریک I0 و تلفات مکانیکی را بدست آورد. در این آزمایش استاتور به شبکه‌ای با ولتاژ و فرکانس نامی متصل است ولی در خروجی باری نداریم.





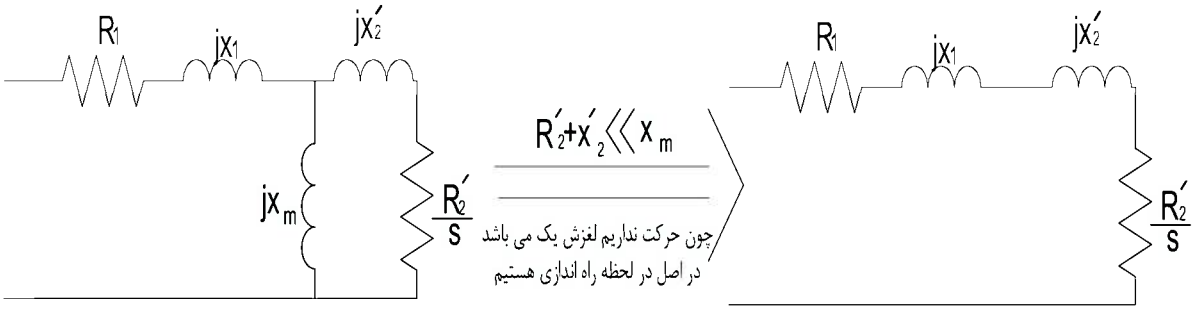
$$\left.\begin{aligned} P_W &= P_{NL} \quad \langle 1\rangle\ Z_{NL} = \frac{V_{NL}}{I_{NL}} \\ V_V &= V_{NL} = V_{ph} \\ I_{(A)} &= I_{NL} \quad \langle 2\rangle\ R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3I_N^2} \end{aligned}\right\} \quad \langle 3\rangle\ X_{NL} = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2}$$

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

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

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.



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

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

$$\Rightarrow x_1=x_2=\frac{X_{BR}}{2}\quad \text{با تقریب نسبتاخوب}$$

$$R_{BR}=R_1+R'_2 \qquad R'_2=(R_{BR}-R_1)\Leftarrow x_m=x_{NL}$$

$$R'_2=(R_{BR}-R_1)\left(\frac{x_m+x_2}{x_m}\right)^2 \quad x_m\neq x_{NL} \text{ حالت}$$

۳- آزمایش جریان مستقیم (DC)

این آزمایش بلافاصله پس از آزمایش روتور قفل شده صورت می‌گیرد و با اعمال ولتاژ DC به استاتور و اندازه‌گیری جریان عبوری مقاومت R_{dc} به دست می‌آیدکه مقدار آن را می‌توان تقریبا برابر R_1($R_1\approx R_{dc}$) گرفت. مقدار دقیق آن به علت وجود اثر پوستی در جریان AC از رابطه زیر بدست می آید.

$$R_1=(1.1-1.3)R_{dc} \qquad P_{dc\lambda}=\frac{Vdc}{2Idc} \qquad P_{dc\Delta}=\frac{3Vdc}{2Idc}$$

نتایج آزمایش‌های سه‌گانه

$$1.\ X_s\cong x'_2=\frac{x_{BR}}{2} \qquad 2.X_m=X_{nl}-X_s$$

$$3.R_s\cong R_1=1.1R_{dc}\ \text{یا}\ 1.3R_{dc} \qquad 4.\ R'_2=(R_{br}-R_1)(\frac{X_m+X_s}{X_m})^2$$

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

$$I_{st}=\frac{V_m}{V_{br}}\times I_{br} \quad \text{و} \quad P_{st}=(\frac{V_n}{V_{br}})^2\times P_{br} \quad \text{و} \quad \frac{I_{st}}{I_{br}}=\frac{V_n}{V_{br}}$$

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

$U_N = 2200$

$P_N = 60hp$

$F_N = 60H_z, 2p = 6$

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

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

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

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.

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

ب)

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

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

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

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

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

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

ج)

$$V_{th} = \left(\frac{X_m}{x_1 + x_m}\right)V_{ph} = \left(\frac{273/04}{7/96 + 273/09}\right) \times \frac{2200}{\sqrt{3}} = V_{th} = 1143\,v$$

$$R_{th} = \left(\frac{X_m}{x_1 + x_m}\right)^2 \times R_1 = 2/63\Omega \qquad x_{th} = x_1 = 7/96\Omega$$

تمرین: نتایج آزمایش بی‌باری ورتو قفل شده و DC به روی یک موتور القایی $1200\sqrt{3}$ ولت و ۶۰hp، ۵۰hz و ۶ قطب با اتصال ستاره به شرح زیر است.

$V_N = 1300\sqrt{3} \quad F_N = 50Hz$

$P_N = 60hP \qquad$ قطب 6

مطلوب است:

NLT : 1200 V, 50 Hz, 5 A, 1500 W

BRT : 160 V, 10 Hz, 25 A, 7500 W

DCT : $20 v_o$ 5A

الف) تلفات چرخشی ماشین.

ب) پارامترهای مدار معادل تقریبی.

ج)پارامتر های مدار معادل تونن.

$P_{ROT} = 350 \quad X_{BR} = 5 \ , \ 25 \quad R'_2 = 2/24$

تمرین: در یک موتور القایی ۴۸۰ولت، سه فاز،۴قطب،۵۰هرتز با لغزش ۰/۰۴کار می کند. مطلوبست:

الف) سرعت میدان مغناطیسی

ب) سرعت رتورn_r

ج) سرعت لغزش

د) فرکانس رتور

تمرین: نتایج آزمایش DC، بی باری، رتور قفل شده روی یک موتور القایی سه فاز ۷/۵HP و۲۰۸v و۴ قطب و۶۰ هرتز با اتصال مثلث به صورت زیر است:

NLT:I_A=8.12A I_B=8.2A I_C=8.18A 208V 420W 60HZ
BRT:I_A=280.1A I_B=28A I_C=27.6A 25V 920W 15HZ
DCT:13.6V 28A

مطلوبست:

الف) مدار معادل تکفاز این موتورIEEE

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})

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

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

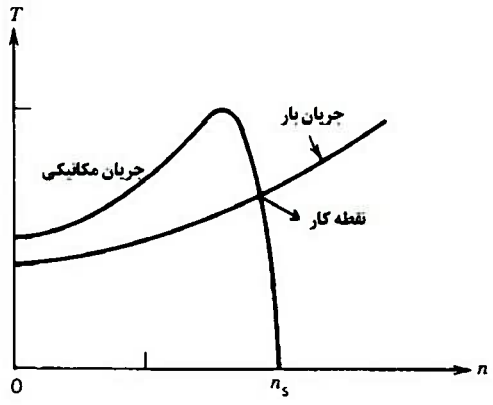
\- : حالت ژنراتوری

\+ : 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 این کار باید $\frac{R'_2}{S} = Z_{eq} \Leftarrow \frac{R'_2}{s} = z_{eq} = \sqrt{R_{th}^{\ 2} + (X_{th} + X'_2)^2}$ پس در نتیجه:

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

رابطه تقریبی $S_m = \frac{R'_2}{X_{th} + X'_{th}}$ شرط $R_{th} \langle\langle X_{th} + X'_2$

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

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

$$T_{ag} = \frac{P_{ag}}{\omega s} \qquad T_{con} = \frac{P_{con}}{\omega r} \qquad T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega r}$$

نسبت گشتاورها

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

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

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

راه اندازی به مکانیکی $\frac{T_{st}}{T_{mec}} = \left(\frac{Is}{In}\right)^2 \times S$

راندمان در ماشین‌های القایی مانند سایر ماشین‌ها از رابطه $\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$ به‌دست می‌آید. اما در ماشین‌های القایی به نسبت توان خروجی به توان الکترومغناطیس راندمان داخلی می‌گویند.

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

تمرین: معادله جریان در میله‌های اتصال کوتاه شده رتور یک موتور القایی سه فاز ۶ قطب، $60Hz$ به صورت $i_r(t) = 50\sqrt{2}\sin(31.4t - 10)$ اگر مقاومت اهمی هر فاز رتور ۰/۱ اهم باشد، مطلوب است:

الف) سرعت رتور

ب) تلفات مسی رتور

ج) توان گشتاور الکترو مغناطیس

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

هـ) راندمان داخلی ماشین

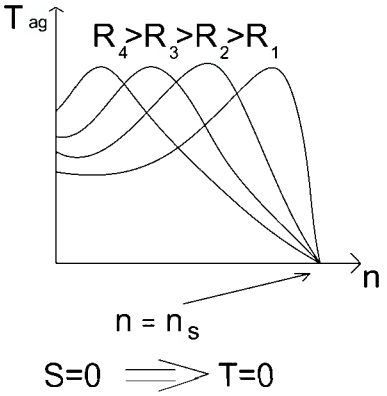
تمرین: یک موتور دو قطب که به شبکه 60Hz متصل است در سرعت 3000 RPM دارای گشتاور حداکثر است که مقدار آن برابر 28.5N.m است:

الف) گشتاور راه اندازی

ب) گشتاور موتور در سرعت 2400 RPM

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

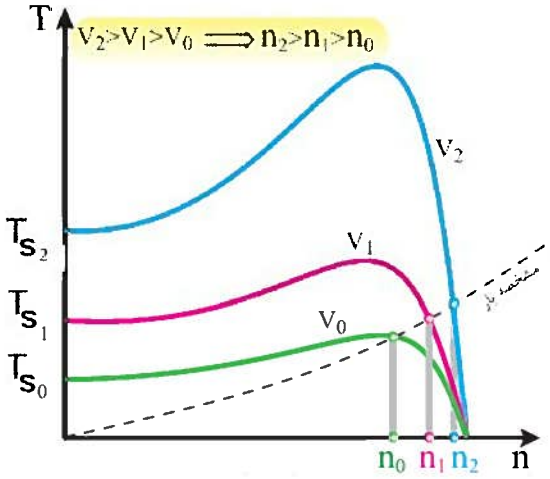
با توجه به روابط گشتاور موتور القایی می توان گفت دو عامل مقاومت اهمی رتور و ولتاژ تغذیه در مقدار گشتاور تاثیر دارند. اگر مقاومت اهمی رتور زیاد شود به علت کم شدن اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان رتور توان حقیقی رتور بالارفته و گشتاور راه اندازی زیاد می‌شود. در منحنی‌های شکل زیر تاثیر مقاومت اهمی رتور را می‌بینیم.



می‌بینیم که با افزایش مقاومت راه اندازی رتور گشتاور راه اندازی نیز افزایش می‌یابد ولی باعث بالا رفتن تلفات می‌شود و راندمان را کم می‌کند. تغییر R رتور هیچ تأثیری بر گشتاور ماکزیمم ندارد. با توجه به منحنی‌های به‌دست آمده نتیجه می‌گیریم در بارهای بزرگ بهتر است R رتور بزرگ باشد. همچنین برای داشتن حداکثر گشتاور راه اندازی باید $S_m=1$ باشد و $\cos = \frac{\sqrt{2}}{2}$ باشد.

از آن جایی که ولتاژ ورودی تأثیر مستقیم بر ولتاژ رتور دارد در شکل زیر می‌توان تأثیر آن‌را بر گشتاور راه اندازی مشاهده کرد.

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



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

$$\frac{T_S}{T} = (\frac{I_S}{I_n})^2 \times S \quad I_S = \frac{V_{ph}}{V_{BR}} \propto I_{BR}$$

تمرین: یک موتور القایی ۴۶۰v، 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. تلفات چرخشی ۱۷۰۰ W.

مطلوبست: الف) اگر موتور به ولتاژ اسمی وصل شود جریان راه اندازی را پیدا کنید.

ب) گشتاور الکترومغناطیسی در لحظه راه اندازی چقدر است.

ج) لغزش در شرایط اسمی.

د) جریان نامی با توجه به مدل تقریبی.

هـ) 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؟ $R_1 = 0.25\Omega \quad R'_2 = 0.2\Omega \quad X_1 = X'_2 = 0.5\Omega \quad X_m = 30\Omega$

تمرین: یک موتور ۴۶۰ولت ،۶۰هرتز،۴قطب محفوض است و رتور آن از نوع قفسه سنجابی است سرعت اسمی رتور 1710RPM است .جریان راه اندازی ۴ برابر جریان نامی است:

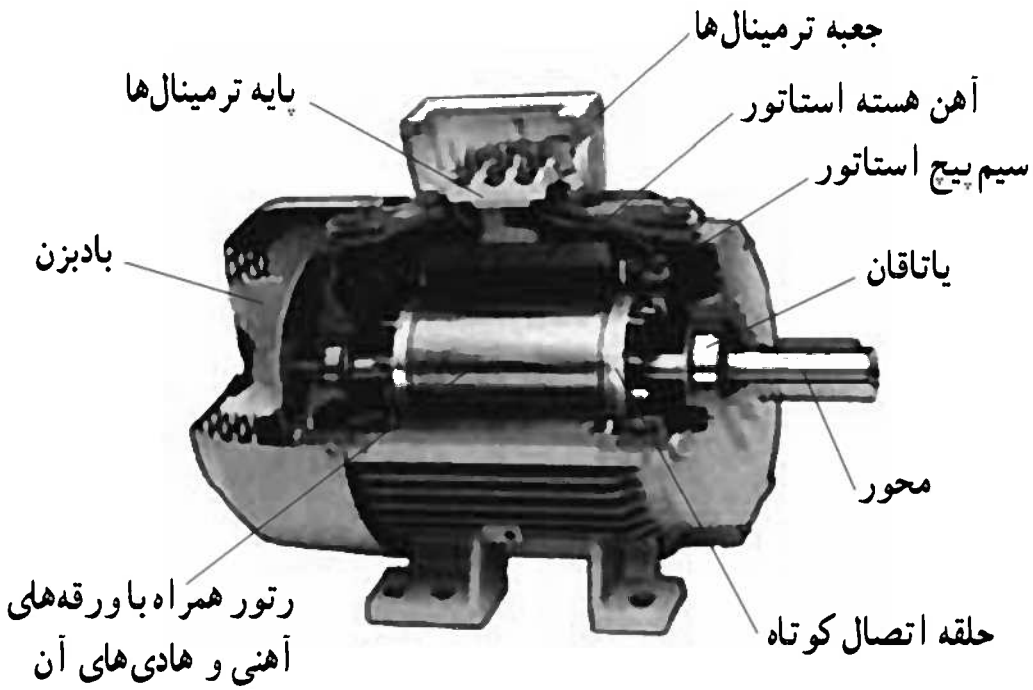
الف) گشتاور راه اندازی چند درصد گشتاور نامی است؟

ب) در چه سرعت ولغزشی گشتاور ماگزیمم رخ می دهد؟

ج) T_{max}چند درصد گشتاور اسمی است؟

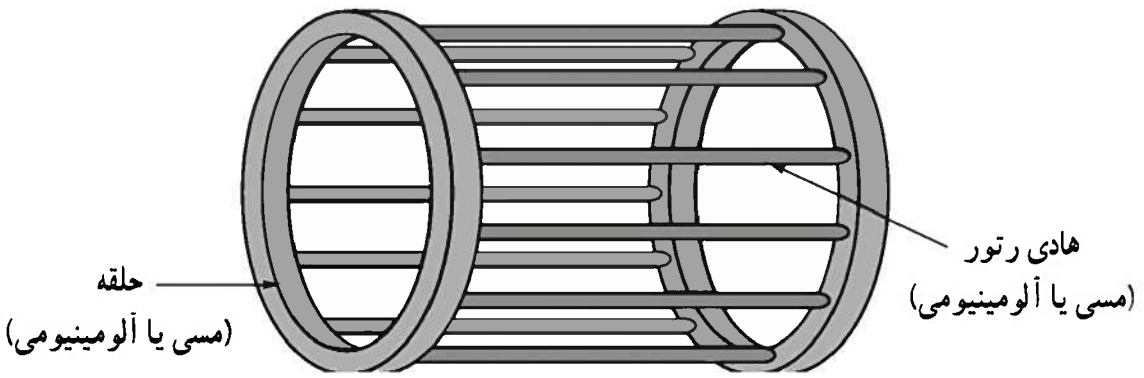
موتورهای القایی با رتور قفس سنجابی (رتور اتصال کوتاه)

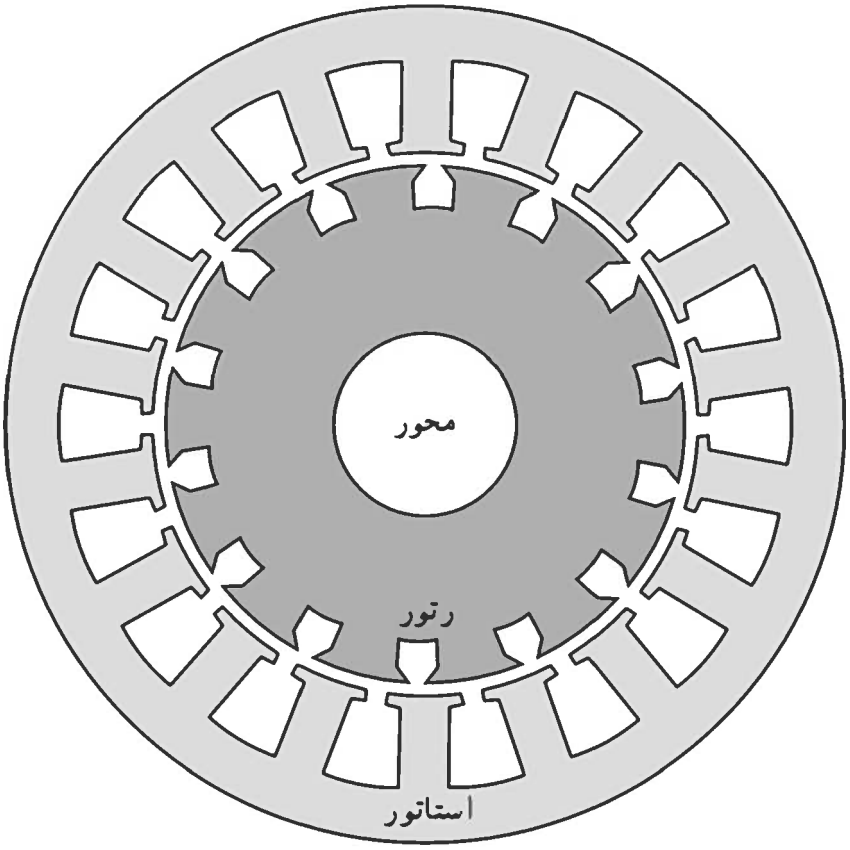
الف)ساختمان و اصول کار موتور القایی با رتور قفسی



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 مداری بسته به‌دست 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 موتورالقایی 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 حدأکثر 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.

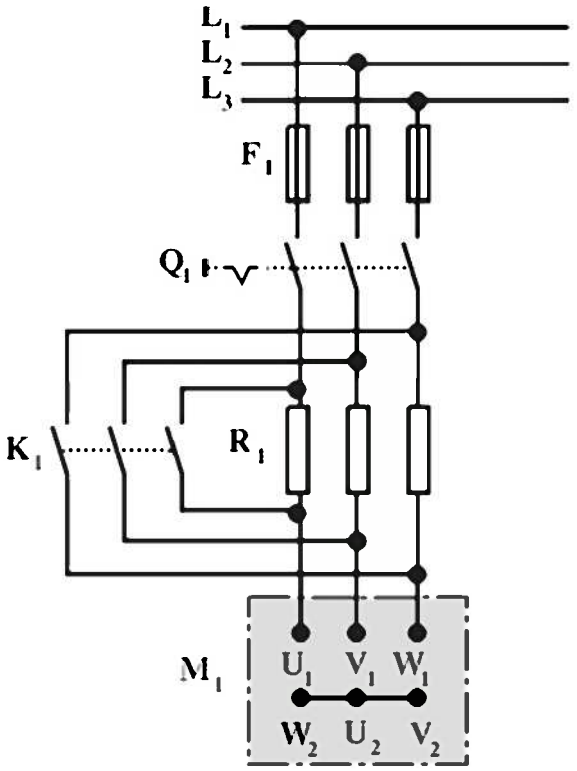
روش‌های راه‌اندازی موتورهای قفسی

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

در همه ی روش های بالا ولتاژ ترمینال موتور را کاهش می‌دهیم. لازم به ذکر است که روش‌های استاتوری فقط در بی باری 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 راه اندازی نشود.

استفاده از مقاومت راه انداز در مدار استاتور

در این روش به منظور کاهش ولتاژ استاتور در هنگام راه اندازی از مقاومت های اهمی در مسیر استاتور استفاده می‌شود. شکل صفحه بعد این نوع راه اندازی را نشان می‌دهد.



در این مدار پس از وصل کلید S که موتور در ابتدای راه اندازی است کلید K قطع است و مقاومت های R در مدار استاتور قرار می‌گیرند و با مقاومت سیم‌پیچی استاتور سری شده و باعث افت ولتاژ های 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 مقاومت‌ها از چوک یا راکتور استفاده می‌کنند که البته در این روش ضریب قدرت کاهش میابد و همچنین هزینه آن بیشتر خواهد شد.

استفاده از اتوترانسفورماتور

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

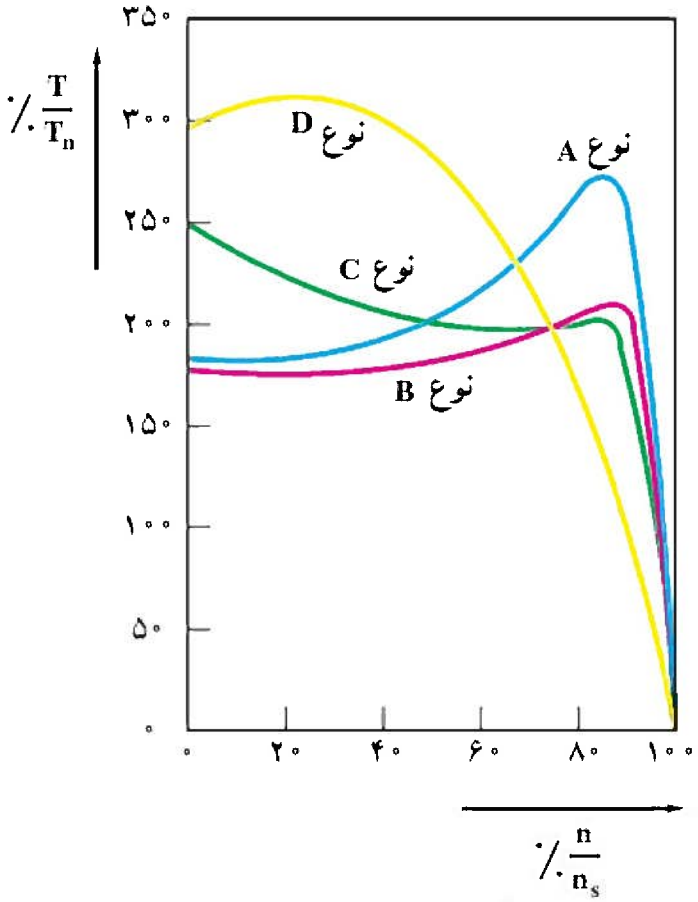
استفاده از راه اندازی ستاره- مثلث

همان طور که می دانیم 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 راه اندازی 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 راه اندازی $\frac{1}{3}$ حالت مثلث خواهد بود. استفاده از این روش در موتورهایی که ولتاژ فاز آن‌ها کمتر از ولتاژ شبکه باشد امکان پذیر نیست. زیرا این موتورها را نمی‌توان به صورت مثلث در مدار متصل نمود. از بین روش‌های گفته شده برای راه‌اندازی این روش مرسوم ترین نوع راه اندازی موتورهای القایی می‌باشد.

د) انواع رتور های قفسی

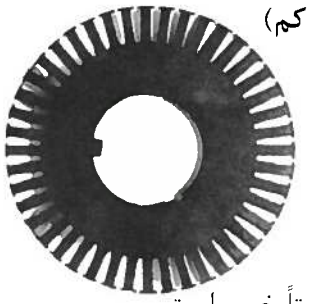
از آنجایی که رفتار موتورهای القایی با مقاومت القایی (X2) و اهمی (R2) رتور وابسته است، لذا در ساخت رتورهای قفسی شرایط مختلفی را در نظر می‌گیرند و بر این اساس رتورهای قفسی مختلفی ساخته می‌شود. به عنوان مثال با افزایش مقاومت اهمی رتور به اندازه مقاومت القایی آن جریان راه‌اندازی کاهش و گشتاور راه‌اندازی افزایش میابد. 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 میابد. از طرفی با افزایش مقاومت اهمی تلفات بیشتری در زمان کار عادی حاصل خواهد شد و به همین دلیل به‌جای به‌کار 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 ــ دور ۴ نمونه مشابه رتور قفسی ا ستاندارد

الف)نوع A: با شیارهای بزرگ و نزدیک به سطح (رتور با امپدانس 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.

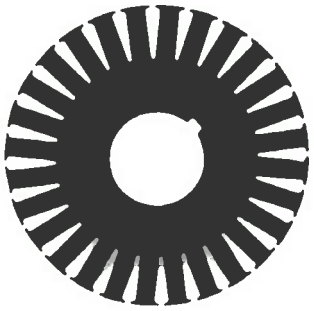
۳. در شرایط کار عادی لغزش کم است.

۴. مقاومت رتور کم است و لذا در لغزش کم (۰/۰۱۵ > S > ۰/۰۰۵) 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)



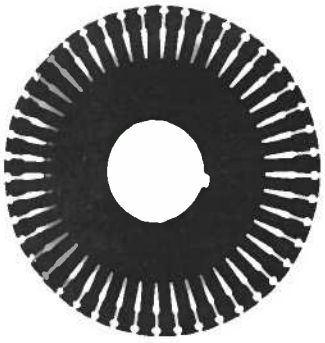
در این موتورها می‌توان به نکات زیر توجه نمود:

۱. گشتاور راه اندازی این موتورها شبیه موتورهای کلاس A است.

۲. جریان راه اندازی در این موتورها ۷۵ درصد موتورهای کلاس A است.

ج)نوع C: رتور دو قفسی (رتور با امپدانس دوگانه)

در این موتورها داریم:



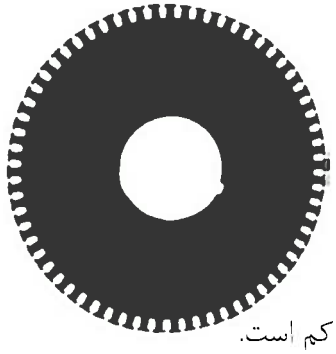
۱. گشتاور راه‌اندازی این موتورها زیاد است.

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 وB بوده و بازده نسبت به کلاس های 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 در صد بوده و لذا بازه این ماشین ها کم است.

۷. در این موتورها تلفات اهمی رتور نسبتاً زیاد است لذا موتورها حجیم و گران هستند.

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

رتور های 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 مقاوت اهمی بیشتری است وگشتاور راه‌اندازی بزرگتری حاصل می‌شود.

با افزایش سرعت رتور و کاهش لغزش مقاوت 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 می شود 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.

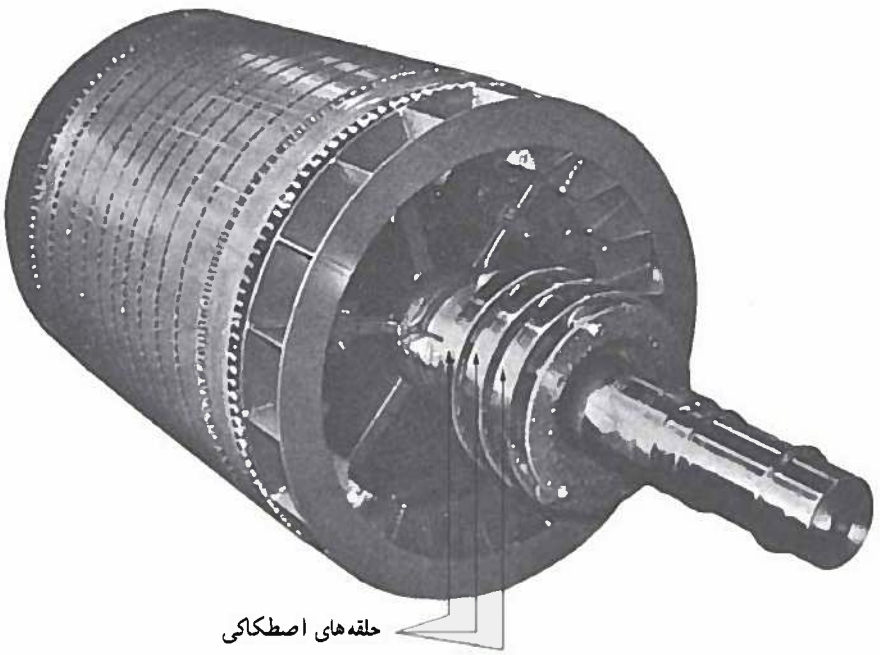
ه)کاربردهای موتور القایی با رتور قفسی

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، بالابرهای کوچک و متوسط، بادبزن‌ها، هواکش‌ها و .... از این موتورها استفاده می‌کنند.

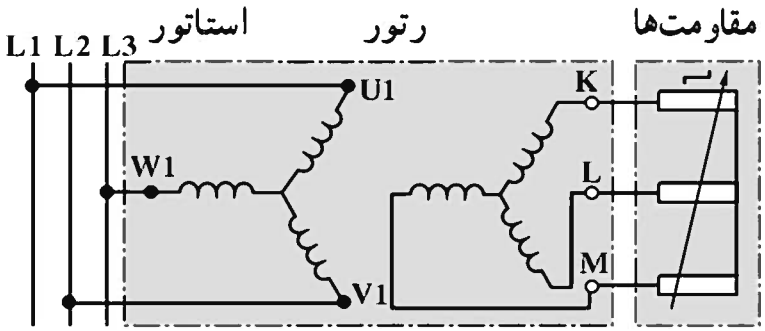
موتورهای القایی رتور سیم پیچی شده یا رتور رینگی

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

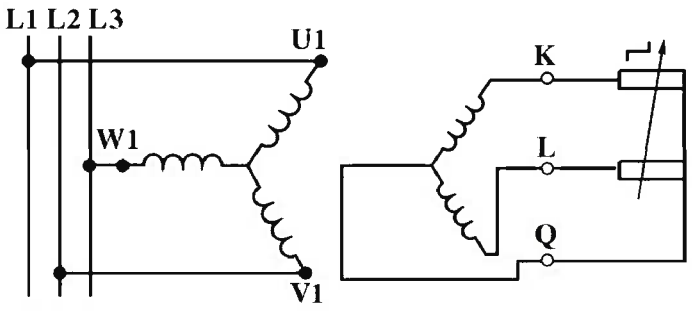
در این موتورها استاتور همانند استاتور موتورهای قفسی می‌باشد و تنها تفاوت آن‌ها در رتور می‌باشد. در رتورهای سیم بندی شده به جای مفتول‌های آلمینیومی همانند استاتور از یک سیم پیچی سه فاز استفاده می‌شود و از طریق سه حلقه فلزی و ذغال در دسترس استفاده کننده قرار می‌گیرد. شکل صفحه بعد یک نمونه رتورسیم پیچی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



چگونگی نمایش موتور القایی رتور سیم‌پیچی شده



نمایش رتور سیم‌پیچی شده دو فاز برای موتور القایی سه فاز

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.

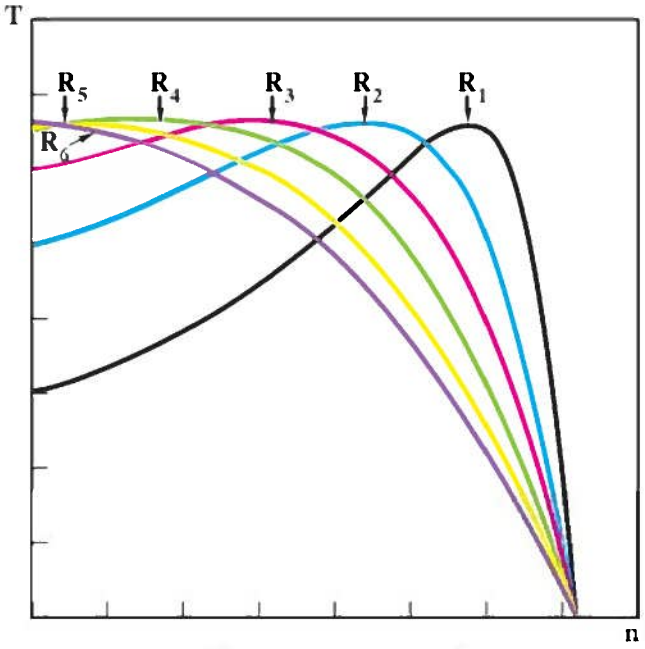
ب)عملکرد موتور القایی رتور سیم پیچی شده زیر بار

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 $T = KE_2^2 \frac{SR_2}{R_2^2 + (SX_2)^2}$ برای بارهای با گشتاور معین افزایش R2 موجب افزایش لغزش خواهد شد. لغزش به معنای تغییر سرعت موتور است و بنابراین با تغییر مقاومت R2 سرعت موتور را می‌توان کنترل نمود.

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

در این موتورها می‌توان به هر فاز رتور از طریق حلقه های لغزان رئوستا متصل نمود. در این صورت جریان راه‌اندازی در رتور کاهش می‌ابد و طبق رابطه گشتاور راه اندازی افزایش خواهد یافت. حال می‌دانیم که گشتاور ماکزیمم در لغزشی اتفاق می‌افتد که مقاومت‌های اهمی و القایی با یکدیگر مساوی باشند. بنابراین با افزایش مقاومت R2 گشتاور راه اندازی بیشتر خواهد شد. مشخصه گشتاور – دور با تغییر مقاومت R2 تغییر خواهند نمود و این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است. در این شکل مقدار مقاومت R1 مقاومت سیم‌پیچی رتور فرض شده و با افزایش آن مشخصه جدیدی به دست می‌آید. 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 ــ 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

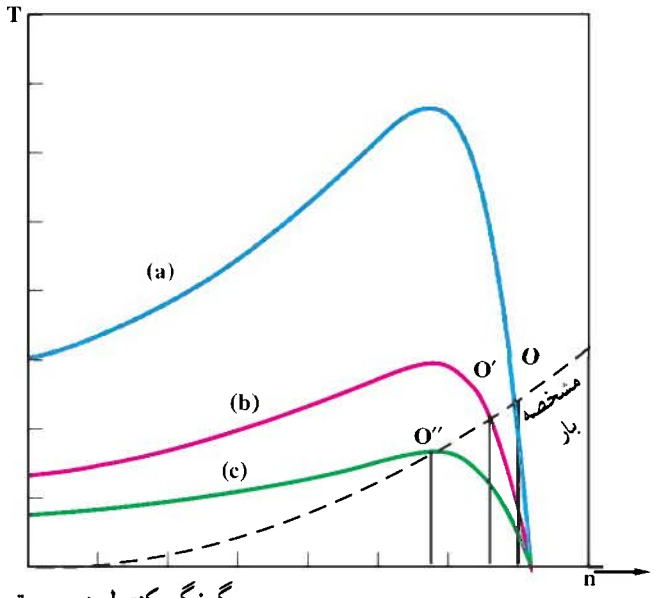
از موتورهای القایی رتور سیم پیچی شده معمولاً در قدرت‌های بالاتر از ۵ کیلو وات استفاده می‌شود. به عنوان پمپ‌های بزرگ آب‌رسانی، ماشین‌های سنگ شکن، بالابرهای صنعتی و مواردی که موتور باید زیر بار راه اندازی شود از این موتورها استفاده می‌کنند. همچنین به دلیل وجود جرقه در حلقه های این موتور در صنایع شیمیایی 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 میابد. 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 می‌دهد. از طرف دیگر نقطه کار یک موتور تابع مشخصات بار آن می‌باشد و این نقطه کار از تقاطع مشخصه گشتاور – دور و بار به دست می‌آید. با تغییر ولتاژ یک موتور القایی تمام نقاط مشخصه گشتاور – دور آن متناسب با مجذور ولتاژ جابه‌جا می‌شوند. 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.



a ــ مشخصه موتور با ولتاژ بیش از ولتاژ نامی
b ــ مشخصه موتور در ولتاژ نامی
c ــ مشخصه موتور با ولتاژ کمتر از ولتاژ نامی

چگونگی کنترل دور موتور القایی با تغییر ولتاژ

بنابراین با تغییر ولتاژ، دور تا حدودی قابل تنظیم است.

کنترل فرکانس

بر اساس رابطه $n_s=\frac{60f}{p}$ سرعت میدان دوار با فرکانس تناسب مستقیم دارد. 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 می‌کند. فرکانس منبع تغذیه را می‌توان توسط مبدل‌های فرکانس تغییر داد. هر چند این تجهیزات نسبتاً پرهزینه هستند اما در مواقعی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

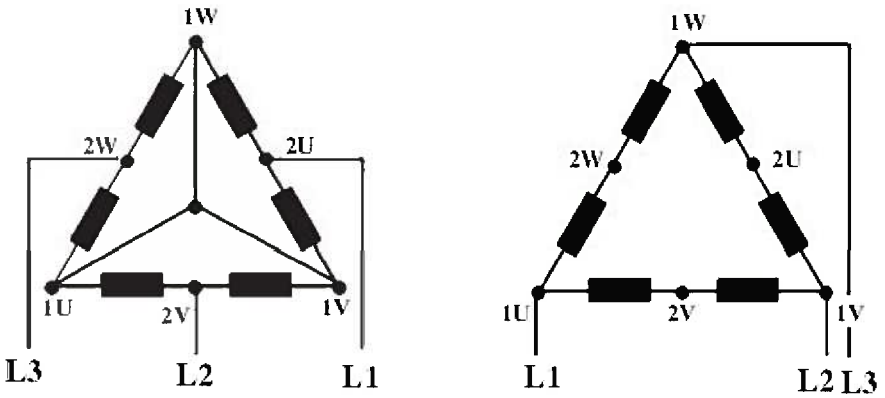
کنترل جفت قطب

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

اتصال دالاندر

اتصال دالاندر یا سیم پیچی توزیع شده در استاتور حالت خاصی از کنترل دور موتور القایی با تغییر تعداد قطب‌های سیم بندی است که در آن سیم پیچی هر فاز استاتور به دو نیم سیم پیچ تقسیم می‌شود. در اثر تغییر اتصال نیم سیم پیچ‌های هر فاز از اتصال سری به موازی تعداد قطب ها نصف و سرعت دو برابر می‌شود. به این ترتیب فقط به کمک یک سیم پیچی می‌توان دو سرعت مختلف را به دست آورد و در دو حالت تمام سیم پیچ‌ها و تمام شیارها فعال بوده و نسبت به موتور با سیم پیچ‌های مجزا از ظرفیت بیشتری برخوردار است. دو حالت اتصالات موتور القایی نشان داده در شکل صفحه بعد مثلث – ستاره دوبل (Δ / YY) نامیده می‌شوند. در اتصال سری دو نیم سیم پیچ اتصال موتور به صورت مثلث و در اتصال موازی نیم سیم پیچ‌ها اتصال موتور

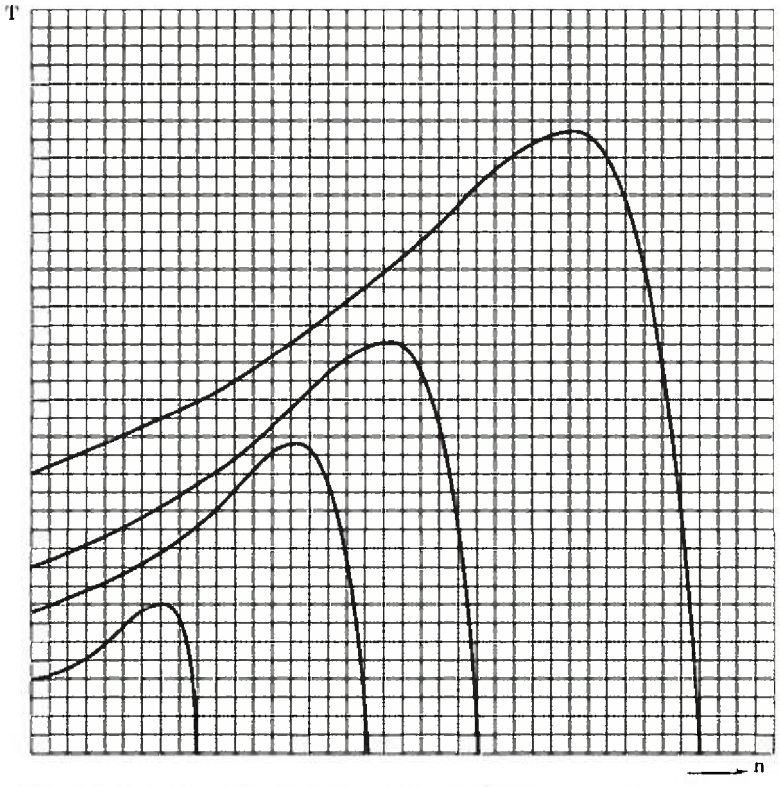
به صورت ستاره است که باعث می‌شود با دو برابر شدن سرعت قدرت موتور نیز تقریباً ۱/۵ برابر شود و گشتاور تقریبا ثابت باقی بماند. بنابراین از اتصال دالاندر برای محرک‌های با گشتاور ثابت استفاده می‌کنند.



نمایش چگونگی تغییر قطب‌ها با اتصال دالاندر

کنترل همزمان ولتاژ و فرکانس

همان طور که می‌دانیم 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 تغییری خواهد کرد و نهایتاً مشخصه گشتاور – دور مطابق شکل زیرتغییر کرده نقطه جدید این مشخصه را قطع خواهد کرد.



تغییر مشخصه‌های گشتاور ــ دور موتور القایی با کنترل همزمان ولتاژ و فرکانس

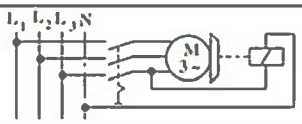
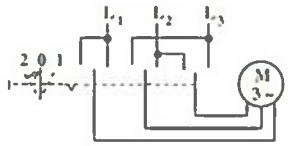
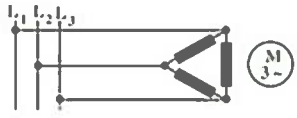
روش‌های ترمز کردن موتور القایی

در موتورهای القایی روشهای مختلفی جهت ترمز کردن پیشنهاد شده است.جدول ۱-۶ انواع مختلف این ترمز ها را به اختصار بیان می‌کند.

در ترمزهای با فشار فنر، ترمزهای زیر سنکرون و جریان مستقیم انرژی جنبشی موتور کاملاً به حرارت تبدیل می‌شود. در ترمز فوق سنکرون موتور در ناحیه مولدی کار خواهد کرد و انرژی موتور به شبکه باز گردانده می‌شود. البته این روش قادر به توقف کامل بار نمی‌شود. در موتورهای دو سرعته با ترمز فشار فنر سیستم ترمز باید روی سرعت کمتر عمل کند و از طریق سرعت کمتر رتور متوقف شود تا انرژی جنبشی کمتری به حرارت تبدیل شود.در ترمز با جریان مخالف انرژی تلف شده هنگام ترمز بسیار زیاد است چرا که لغزش موتور یکباره به حوالی ۰/۰۲۰۰ می‌رسد.

از میان روش‌های پیشنهادی مناسب‌ترین روش ترمز فوق سنکرون است و نامناسب ترین روش ترمز موتورهای القایی هستند.

جدول ۱ــ۳ــ روش‌های ترمز بارهای صنعتی متصل به موتورهای القایی

ترمز با مغناطیس الکتریکی (اعمال ترمز با فشار فنر)	نیروی ترمزی توسط فنر : وقتی سیم‌پیچ تحریک، وصل می‌شود ترمز آزاد می‌شود. کاربرد : ماشین‌های ابزار و بالابرها	
ترمز جریان مخالف	نیروی ترمز از طریق خود موتور ظاهر می‌شود، زیرا در اثر تغییر محل اتصال در فاز جهت میدان دوار عوض می‌شود و در نتیجه جهت گردش موتور نیز تغییر می‌کند. پس از این‌که دستگاه به حالت سکون درآمد، باید مدار فوراً قطع شود. در غیر این صورت دستگاه در خلاف جهت اولیه می‌چرخد. برای این کار یک رله خودکار لازم است. کاربرد : اره‌های نواری	
ترمز فوق سنکرون	موتور از ماشین کار رها می‌شود و در اثر شتاب به‌صورت مولد القایی درمی‌آید و برای موتورهایی که در آن‌ها بر نیروی وزن غلبه می‌شود قابل استفاده است. کاربرد : موتورهای با تغییر قطب مثلاً در بالابرها و آسانسورها هنگام پایین آمدن	
ترمز زیر سنکرون	موتورهای القایی با رتور سیم‌پیچی با مقاومت زیاد رتور در مدار و به‌صورت موتور بکفاز به شبکه وصل می‌شود و یک گشتاور ترمزی ظاهر می‌شود که پس از سکون موتور از بین می‌رود. کاربرد : بالابرها	
ترمز با جریان مستقیم	سیم‌پیچ استاتور را به یک ولتاژ پایین جریان مستقیم وصل می‌کنند که با ادامه حرکت رتور جریان ترمزکننده در آن القا می‌شود. کاربرد : ماشین‌های ابزار و وسایل نقلیه	

شین بی‌نهایت

ژنراتورهای سنکرون سه فاز عمدتاً به سیستم قدرت متصل‌اند و مشترکاً بار مصرف کنندها را تأمین می‌کنند. در این صورت اصطلاحاً می‌گویند ژنراتورها به شین بی‌نهایت وصل‌اند. از آن‌جا که تعداد ژنراتورها بسیار زیاد و خود ژنراتورها بزرگ و حجیم‌اند لذا ولتاژ و فرکانس شین بی‌نهایت دارای تغییراتی به سمت صفر است و تقریباً ثابت است. شین بی‌نهایت را شبکه به هم‌پیوسته نیز می‌گویند.

فصل سوم

ماشین های سنکرون

مقدمه

در فصل دوم با ماشین‌های آسنکرون آشنا شدیم. در این فصل ماشین‌هایی مورد بحث قرار می‌گیرند که تحت سرعت ثابتی به نام سرعت سنکرون می‌چرخند و جزء ماشین‌های جریان متناوب محسوب می‌شوند. در این ماشین‌ها بر خلاف ماشین‌های القایی میدان گردان شکاف هوایی و رتور با یک سرعت که همان سرعت سنکرون است می چرخند. ماشین‌های سنکرون سه فاز بر دو نوع هستند:

۱. ژنراتورهای سنکرون سه فاز یا آلترناتورها

۲. موتورهای سنکرون سه فاز

امروزه ژنراتورهای سنکرون سه فاز اصلی‌ترین جزء شبکه‌های برق می‌باشند و ژنراتورهای عظیم در نیروگاه‌ها وظیفه تولید انرژی الکتریکی را به عهده دارند. موتورهای سنکرون نیز در مواردی به کار می‌روند که به سرعت ثابت نیاز داشته باشیم.

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

ساختمان ماشین‌های سنکرون سه فاز

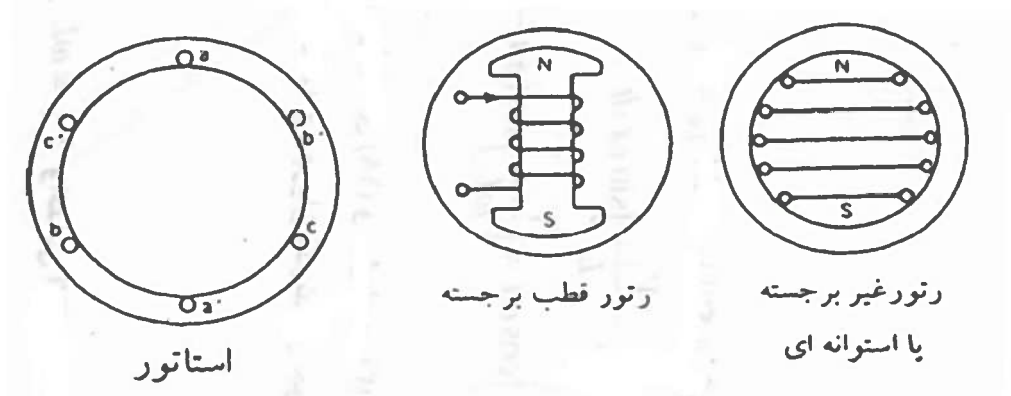
استاتور ماشین‌های سنکرون سه فاز حاوی سیم‌پیچی سه فازی است که درون شیارهای استاتور جاسازی شده و در طول محیط آن پخش و توزیع گردیده‌اند. یعنی استاتور ماشین‌های سنکرون سه فاز شبیه ماشین‌های القایی سه فاز است. استاتور در ژنراتور بار را تغذیه می‌کند و در موتور سنکرون به شبکه وصل می‌شود تا جریان به درون رتور وارد شود. در هر دو حالت جریان استاتور یک جریان AC است. به سیم‌پیچی استاتور، سیم‌پیچی آرمیچر نیز گفته می شود و این امر بر خلاف ماشین‌های DC است. سیم‌پیچی استاتور یا آرمیچر در ماشین‌های سنکرون طوری طراحی می‌شوند 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 عمدتا 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.

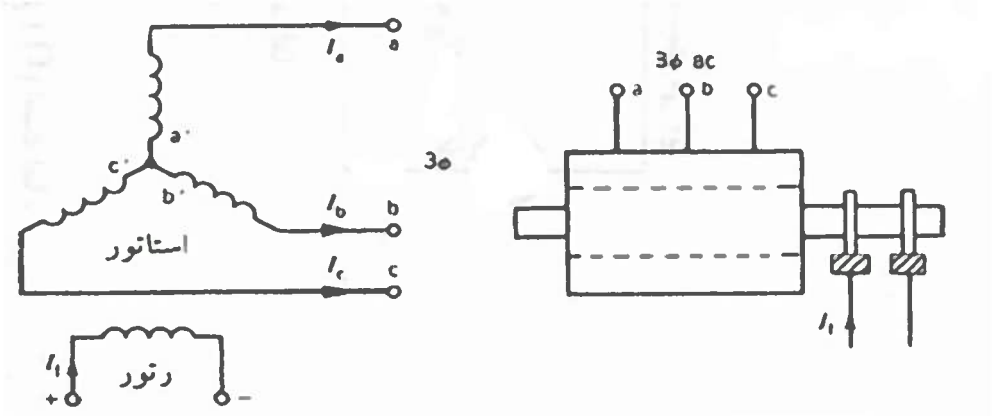
در شکل ۱-۳ شمای استاتور و دو نوع رتور ماشین‌های سنکرون نشان داده شده است.



شکل ۱-۳ شمای استاتور و دو نوع رتور ماشین سنکرون

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.

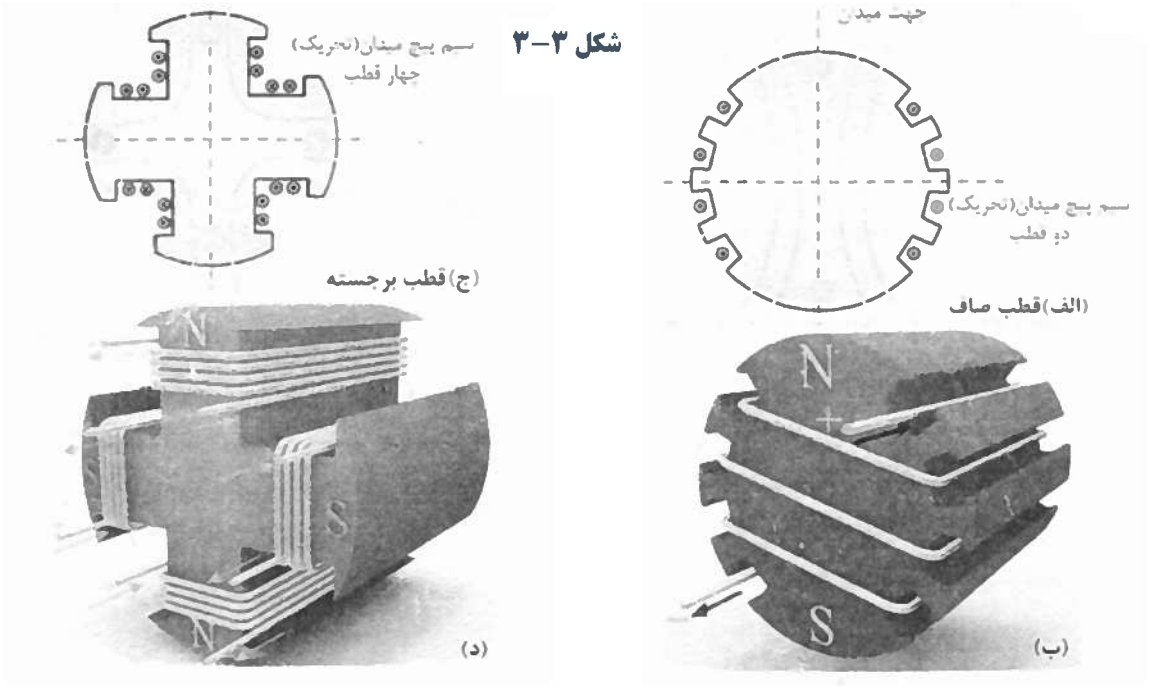
شکل ۲-۳ شمای بیرون ماشین سنکرون نشان داده شده است. سه پایانه از استاتور خارج می‌شوند که به سیستم سه فاز استاتور متصل است. تغذیه جریان DC تحریک مربوط به رتور نیز از طریق حلقه‌های لغزان بر روی محور ماشین انجام می‌شود. در این شکل وضعیت سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور و سیم‌پیچ رتور نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ شمای خارجی و سیم‌پیچهای ماشین سنکرون

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 الکترومغنطیسی تبدیل می‌شود. اتصال سیم‌پیچ‌های میدان (تحریک) به منبع جریان مستقیم از طریق دو عدد رینگ و زغال صورت می‌گیرد.



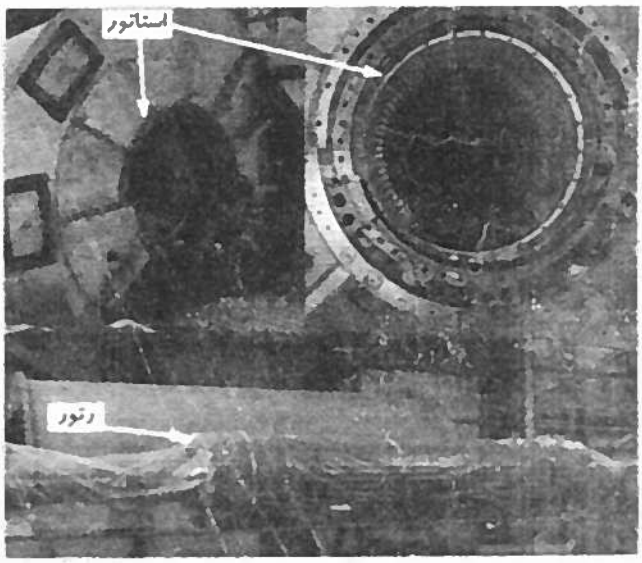
شکل ۳-۳

انواع رتور ماشین سنکرون

رتور با قطب صاف یا استوانه‌ای

این رتورها مانند شکل (۳-۳- الف و ب) به‌صورت 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 به‌صورت 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 ۴-۳ تصویر استاتور و رتور یک توربوژنراتور را نشان می‌دهد.

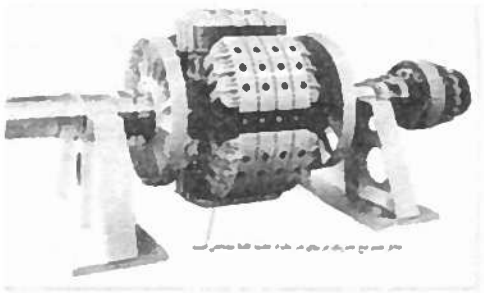


شکل ۴–۳ رتور و استاتور یک توربوژنراتور

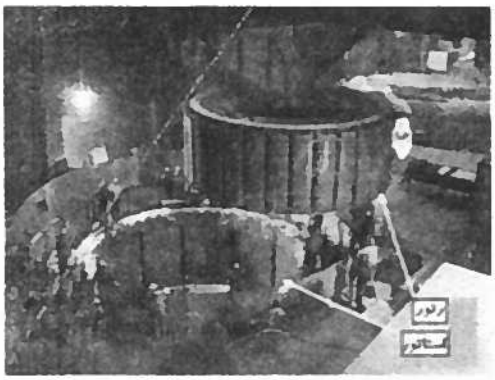
رتور با قطب برجسته

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 ۵-۳ نشان داده شده است. رتور مولد نیروگاه‌های آبی و دیزل ژنراتورها این‌گونه ساخته می‌شوند. در شکل ۶-۳ رتور مولد نیروگاه‌های آبی در حال نصب نشان داده شده است.



شکل ۵–۳ رتور قطب برجسته (آشکار)

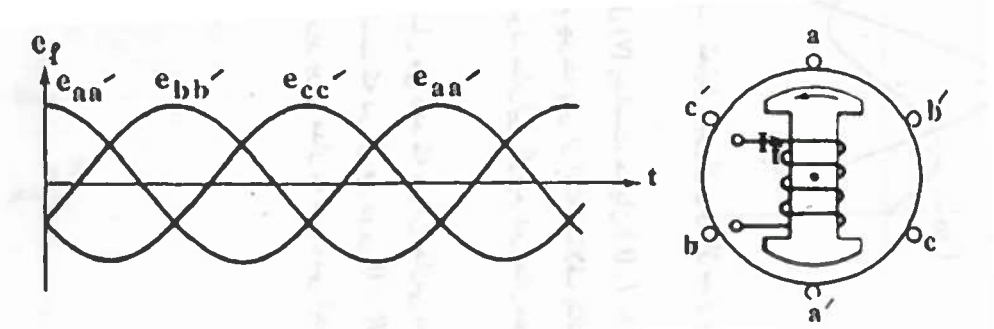


شکل ۶–۳ رتور نیروگاد آبی سد شهید عباسپور در حال قرارگیری در استاتور

ژنراتور سنکرون

شکل ۷-۳را در نظر بگیرید. فرض کنید که جریان dc از سیم‌پیچ 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 سیم‌پیچ‌های سه فاز آرمیچر (aa' وbb' وcc' در شکل ۳-۷) ولتاژ القا می‌کند. این سه ولتاژ در شکل ۳-۷ 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.



شکل ۷-۳ ولتاژ تحریک در ژنراتور سنکرون سه فاز

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

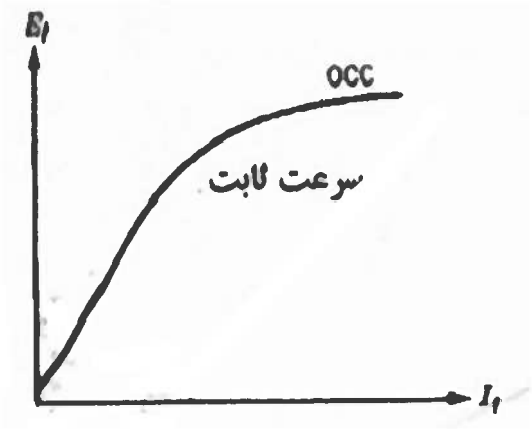
$$n_s = \frac{۶۰f}{p}$$

در این فرمول ns سرعت رتور (سرعت سنکرون) بر حسب دور در دقیقه بوده و p تعداد جفت قطب‌های رتور است. مقدار موثر ولتاژ تحریک (Ef) از رابطه‌ی زیر به دست می آید:

$$Ef=4/44\ \Phi f\, n\, k_w$$

در فرمول بالا Φf شار هر قطب ناشی از جریان تحریک (If) می باشد. N تعداد حلقه‌ها یا دورها در هر فاز بوده وk_w ضریب سیم‌پیچی نام دارد. بنابراین طبق روابط بالا داریم:

$$Ef \approx \alpha\, n\Phi f$$



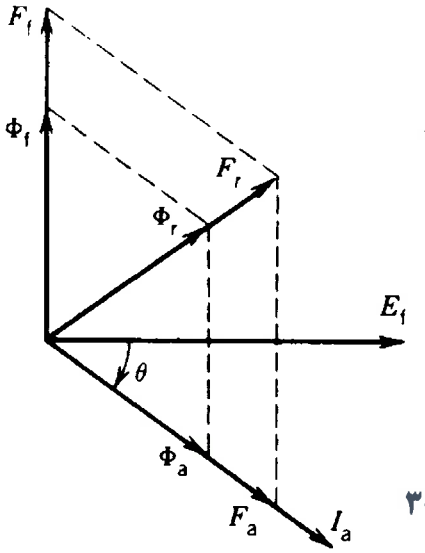
شکل ۸-۳

طبق این رابطه ولتاژ تحریک (Ef) با شار تحریک و سرعت متناسب است. واضح است که شار تحریک (Φf) نیز با جریان تحریک (If) تناسب دارد. تغییرات ولتاژ تحریک برحسب جریان تحریک تحت سرعت ثابت در شکل مقابل(۸-۳) نشان داده شده است.

ولتاژ القایی مربوط به $If=۰$ به دلیل پدیده‌ی پسماند می‌باشد. در ابتدا تغییرات Ef بر حسب If خطی است. پس از عبور از مرحله تغییرات خطی اگر If زیاد شود Φf دیگر با If رابطه خطی ندارد و لذا طبق منحنی شکل ۸-۳ ، Ef 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 شوندگی است. اگر پایانه‌های

استاتور ژنراتور سنکرون به بار سه فاز متصل شود جریان‌های Ia وIb وIc برقرار می‌گردند. فرکانس این جریان‌ها با Ef یکسان است. این سه جریان نیز میدان گردانی در شکاف هوایی به وجود می‌آورند. لذا منتجه 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 Φf شار حاصله توسط جریان تحریک If وΦa ناشی از جریان استاتورIa حاصل شود. به Φa شار عکس العمل آرمیچر نیز گفته می‌شود. پس:

شار منتجه در شکاف هوایی (با صرف نظر از اشباع)$= r = \Phi f + \Phi a$



شکل ۹-۳

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

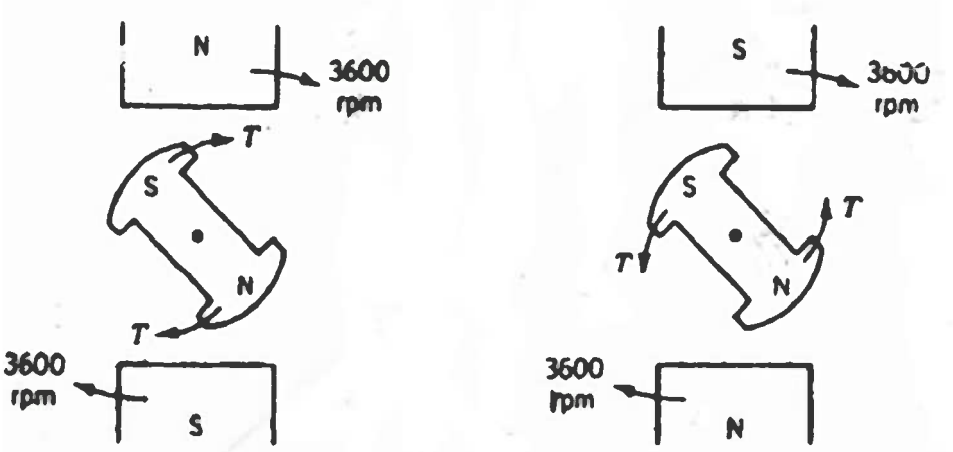
ولتاژ تحریک Ef به دلیل اصل فاراده از Φf به میزان ۹۰ درجه عقب می‌افتد. فرض کنید جریان استاتورIa از Ef به میزان θ درجه عقب باشد. mmf مربوط به Ia که با Ea نشان داده می‌شود شار Φa را تولید می‌کند و همگی در امتداد Ia نشان داده شده‌اند. بنابراین Fr یا mmf منتجه به قرار روبه‌رو است: $Fr=Ff+Fa$

اگر از اشباع صرف نظر شود در این صورت Φr نیز منتجه Φf وΦa خواهد بود و Φr را با Fr تولید می‌نماید.

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=t1 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 منبه 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 راه‌اندازی فرکانس منبع تغذیه کم است و بنابراین میدان گردان استاتور با سرعت کمی می‌چرخد. در نتیجه قطب‌های رتور قادر به تعقیب قطب‌های استاتور است. سپس با افزایش تدریجی فرکانس سرعت موتور به حد مطلوب خواهد رسید. در موتورهای سنکرون برای کنترل سرعت از چنین سیستمی استفاده می‌شود.

راه‌اندازی به صورت موتور القایی سه فاز

چنانچه مبدل فرکانس در دسترس نباشد یا احتیاج به کنترل سرعت نداشته باشیم از این روش استفاده می‌شود. در این روش یک سیم پیچ اضافی شبیه قفس سنجابی موتور القایی بر روی رتور نصب می‌شود. این

سیم پیچ‌ها به نام سیم‌پیچ‌های میراکننده معروف‌اند. در این روش برای راه‌اندازی سیم‌پیچ تحریک، رتور را با جریان *If* تحریک نمی‌کنیم و سیم‌پیچ سه فاز استاتور را به برق AC سه فاز وصل می‌کنیم. موتور به صورت موتور القایی راه اندازی می شود. بنابراین به دلیل وجود سیم‌پیچ‌های میرا کننده گشتاور راه‌اندازی وجود می‌آید و پس از سرعت گرفتن موتور به شرایطی می‌رسیم که سرعت رتور به سرعت سنکرون میدان گردان استاتور می‌رسد. در این حالت جریان DC مدار تحریک برقرار می‌شود و قطب‌های رتور و استاتور یکدیگر را تعقیب می‌کنند. 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 سیم‌پیچ میرا کننده 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 سیم‌پیچ مستهلک کننده جریان القا شده و این جریان گشتاوری حاصل می‌کند تا سرعت سنکرون مجدداً برقرار شود به همین دلیل این سیم‌پیچ را سیم‌پیچ میرا کننده می‌نامند.

مدار معادل ماشین سنکرون

در این بخش مدار معادل ماشین های سنکرون با رتور استوانه‌ای را بررسی کرده و در ابتدا توجه خود را بیشتر به مدل ژنراتور سنکرون معطوف می‌داریم. این مدار معادل مربوط به حالت ماندگار می‌باشد. از آن‌جایی که ماشین‌های سنکرون سه فاز عمدتاً در حالت متعادل مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، لذا مدل ارائه شده بر مبنای یکفاز(معمولا فاز a) استوار است. جریان *If* (تحریک) در شکاف هوایی ماشین شار Qf را می‌سازد. جریان Ia در استاتور شار Qa را پدید می‌آورد. Qa از دو بخش تشکیل می‌شود.

۱-Qal یا شار نشتی که فقط سیم پیچی استاتور را دور می‌زند و در بر می‌گیرد و سیم پیچی تحریک رتور را در بر نمی‌گیرد.

۲-Qal که به شار عکس العمل آرمیچر موسوم بوده و در شکاف هوایی شکل می‌گیرد و سیم پیچ تحریک رتور را نیز در بر می‌گیرد.

Qar بخش اعظم Qa وQal بخش کوچکی از Qa را تشکیل می‌دهد. همچنین شار منتجه در شکاف هوایی Qr نیز از دو مؤلفه تشکیل شده است:

۱- Qfبه دلیل میدان رتور

۲-Qarبه دلیل عکی العمل آرمیچر

گفتنی است:

۱- Qf در استاتور ولتاژ را القا میکند.

۲- Qarنیز در استاتور ولتاژ را القا میکند.

جمع دو ولتاژ القایی Ef وEar به نام ولتاژ منتجه Er معروف است واین ولتاژ توسط شار منتجه Qr حاصل شده است. همان طور که گفتیم Ef همان ولتاژ تحریک است و از آزمایش مدار باز (شکل ۸-۳) به دست می‌آید.

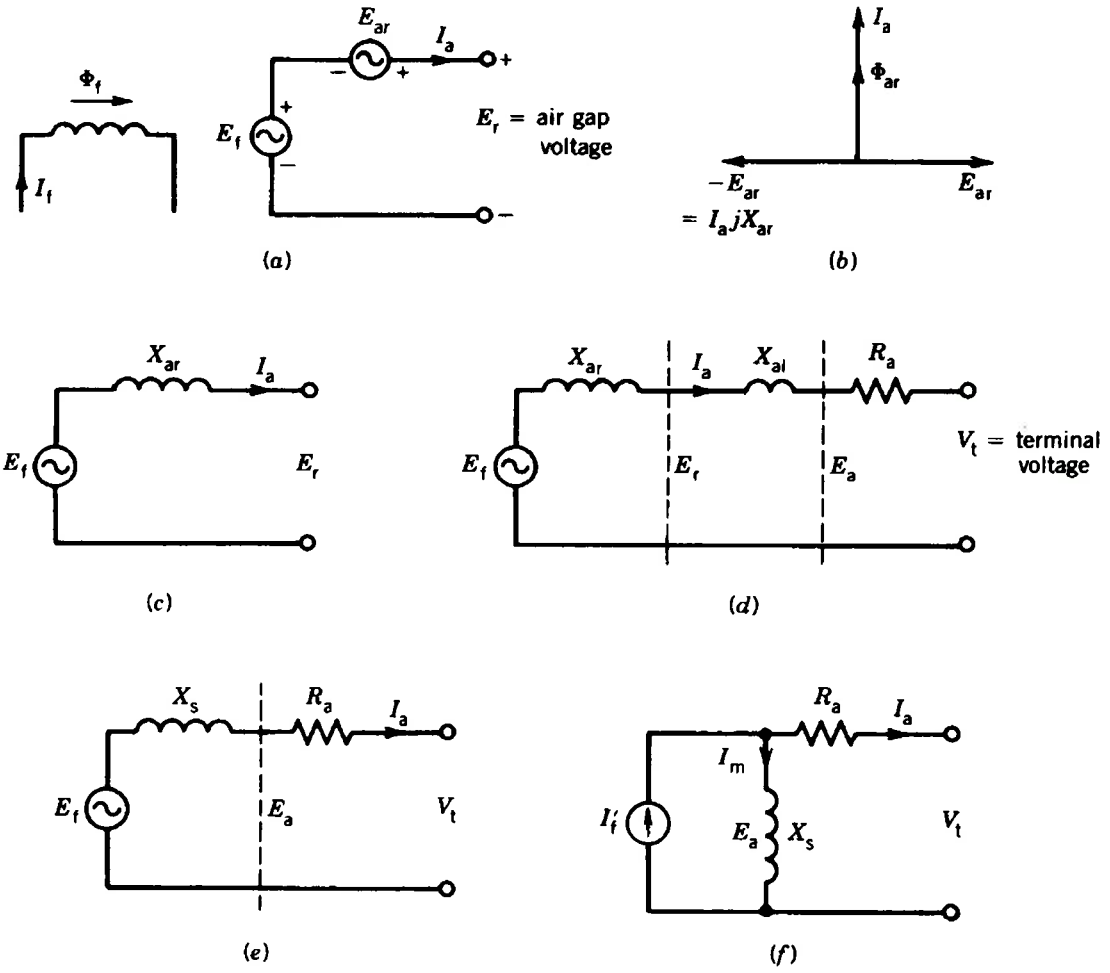
ولتاژ عکس العمل آرمیچر است وبه Qar ودر نتیجه Ia بستگی دارد. به ولتاژ Er علاوه بر ولتاژ منتجه، ولتاژ شکاف هوایی نیز گفته می‌شود. با توجه به شکل a-۱۱-۳ داریم:

$$Er = Ear + Ef \qquad Ef = -Ear + Er$$

از نمودار فازوری شکل b-۱۱-۳ داریم:

-Ear ازQar، ۹۰ درجه عقب تر است.

- Ja ۹۰ درجه ازEar – عقب تر است.



شکل ۱۱ -۳ مدار معادل ژنراتور سنکرون سه‌فاز با رتور استوانه‌ای

لذا ولتاژ (Ear -) را می‌توان با افت ولتاژ در دو سر Xar به ازای عبور جریان Ia مدل نمود. بنابر این داریم:

$$Ef = IaXar + Er$$

Xar به نام راکتانس عکس العمل آرمیچر یا راکتانس مغناطیس کنندگی مرسوم است ودر شکل (c-۱۱-۳) نشان داده شده است. اگر مقاومت استاتور و راکتانس نشتی Xar برای مدل سازی شار نشتی به مدار معادل افزوده شود ، در این صورت مدار معادل شکل (d-۶-۷) حاصل میشود گفتنی است که این مدار معادل برای فاز a معتبر است. برای فازهای b، c نیز به مدارهای مشابهی همچون شکل (d-۱۱-۳) میرسیم، اما کمیتهای ولتاژ و جریان به میزان ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه نسبت به شکل(d-۱۱-۳) ختلاف فاز دارند (سیستم سه فاز متعادل).

باید دانست در این مدل مقاومت موثر بوده و۱/۶ برابر مقاومت DC سیم پیچ استاتور میباشد. در مقاومت موثر، اثر پوستی ودرجه حرارت خود را نمایان می سازند.لذا مدار معادل نهایی مطابق شکل (e-۱۱-۳) خواهد بود.
باید دانست:

$$Xs = Xar + Xal$$ (راکتانس سنکرون)

$$Za = Ra + jXs$$ (امپدانس سنکرون)

مدار معادل شکل (e-۱۱-۳) به نام مدار معادل تونن ژنراتور سنکرون معروف است. (f-۱۱-۳) مدر معادل نورتن ژنراتور سنکرون را نشان میدهد. در مدار نورتن داریم: $I'_f = \frac{E_f}{X_s}$

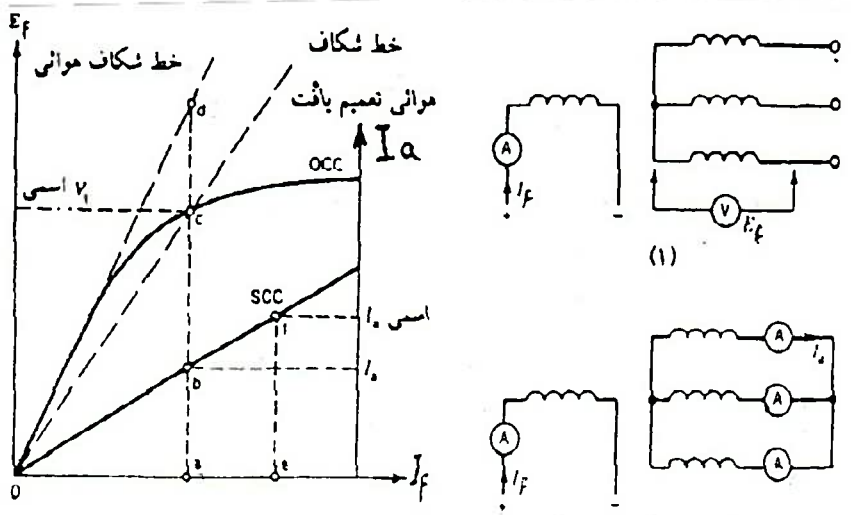
اما: $|I'_f| = \frac{X_{ar}}{X_s} nI_f$

برای اثبات این رابطه به کتاب ماشین‌های الکتریکی تالیف سلمون رجوع شود. بدانید: $n = \frac{\sqrt{۲}}{۳}\frac{N_{re}}{N_{se}}$
که در رابطه بالا N_{re} تعداد حلقه های موثر سیم پیچی تحریک و N_{se} ، تعداد حلقه های موثر سیم پیچی استاتور (فاز a) می‌باشد.
باز متذکر میشویم که کلیه مدارهای معادل فوق مربوط به ژنراتور سنکرون سه فاز با رتور استوانه ای است.

تعیین راکتانس سنکرون(Xs)

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

در این صورت می‌توان به مشخصه مدار باز یا OCC ژنراتور دست یافت(شکل ۳-۱۲-۳). این منحنی تغییرات Ef بر حسب *If* است. همانتور که در ابتدای این فصل گفتیم اثر اشباع، خود را در این منحنی مشخصه نمایان می‌سازد. خطی که بر قسمت خطی این منحنی (منحنیOCC) مماس می‌شود، خط شکاف هوایی نام دارد.
گفتنی است اگر از اشباع صرف‌نظر شود، Ef بر طبق این خط تغییر خواهد کرد. همانطور که می‌بینید در آزمایش اتصال کوتاه منحنی مشخصه‌خطی‌است.زیرا در این‌حالت‌با اشباع روبه‌رومی‌شویم. چون شارشکاف‌هوایی کم‌می‌باشد.



شکل ۱۲-۳ ۱ـآزمایش مدار بازیابی باری ۲ـآزمایش اتصال کوتاه ۳ـمشخصه‌ها

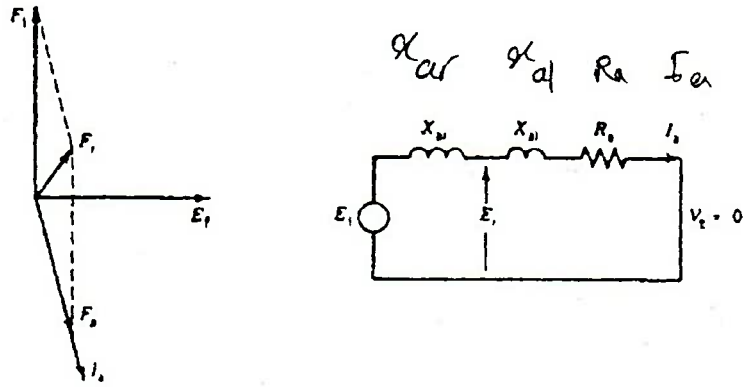
آزمایش اتصال کوتاه در این آزمایش با مدار شکل (۲-۱۲-۳) روبرو هستیم. فرض کنید پایانه های ژنراتور سنکرون سه فاز اتصال کوتاه شده باشند و ماشین تحت سرعت سنکرون چرخوانده شود. حال جریان مدار تحریک (*If*) را تغییر می‌دهیم و تغییرات Ia بر حسب *If* را رسم می‌کنیم.(شکل۲-۱۲-۳).

باید دانست:

$$Ia = \frac{\text{مجموع اعداد سه آمپر متر در شکل (۲-۱۲-۳)}}{۳} \text{ = متوسط جریان‌ها}$$

تغییرات *Ia* بر حسب *If* 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 (۱-۱۳-۳) است. عمدتاً داریم: $Ra << Xs$

پس *Ia* تقریبا به میزان ۹۰ درجه از Ef عقب است. لذا عکس العمل آرمیچر Fa تقریبا در جهت مخالف Ff (میدان تحریک) قرار می‌گیرد و شار منتجه در شکاف هوایی (Fr) خیلی کم است.(شکل ۲-۱۳-۳). لذا اگر *Ia* و*If* زیاد باشند اشباع حاصل نمی‌شود.



شکل ۱۳-۳ ،عملکرد ژنراتورسنکرون در شرایط اتصال کوتاه

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 Ra چشم پوشی کنیم، داریم:

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

راکتانس سنکرون اشباع شده

قبل از وصل ژنراتور سنکرون به شین بی‌نهایت یا شبکه، Ef را در حد ولتاژ اسمی ماشین تنظیم می‌کنیم. از شکل (۳-۱۲-۳) این ولتاژ با Eca نشان داده شده که معادل ولتاژ اسمی پایانه ماشین یا Vt است. مشاهده می‌شود که در این شرایط مسأله اشباع، خود را نمایان می‌سازد. حال اگر جریان تحریک (*If*) تغییر کند، Ef نیز تغییر می‌کند. اما دیگر این تغییرات در راستای قسمت خطی مشخصه OCC نخواهد بود، بلکه تغییرات Ef 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: ازمدار معادل شکل (d-۱۱-۳) داریم:

$$Er = Vt + la\,(Ra + jXal)$$

اگر از افت ولتاژ های دو سرRa و Xa صرف نظر کنیم داریم:

$$Er = Vt$$

از آنجایی که Vt ثابت است ولتاژ شکاف هوایی نیز اساساً ثابت می‌ماند و در قبال تغییرات *If* از خود واکنشی نشان نمی‌دهد. این امر نشان دهنده آن است که شار در شکاف هوایی یا اشباع مغناطیسی در قبال تغییرات *If* تقریباً ثابت می‌ماند و لذا بسیار منطقی است که فرض کنیم EF 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 Ra چشم پوشی کنیم داریم :

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

مثال: یک ژنراتور سنکرون 14kv، 10mVA مفروض است و سیم پیچ های آن بصورت ستاره بسته شده است. سایر مشخصات به شرح مقابل است:*If*= 200A . ولتاژ پایانه در آزمایش مدار باز14KV، ولتاژ خط شکاف هوایی 18KV و جریان اتصال کوتاه 490A است. مقدار 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 (a-۱۴-۳) و (b-۱۴-۳) 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 *Ia* در موتور از طرف شبکه به سمت ماشین و در ژنراتور از طرف ماشین به سمت شبکه است.

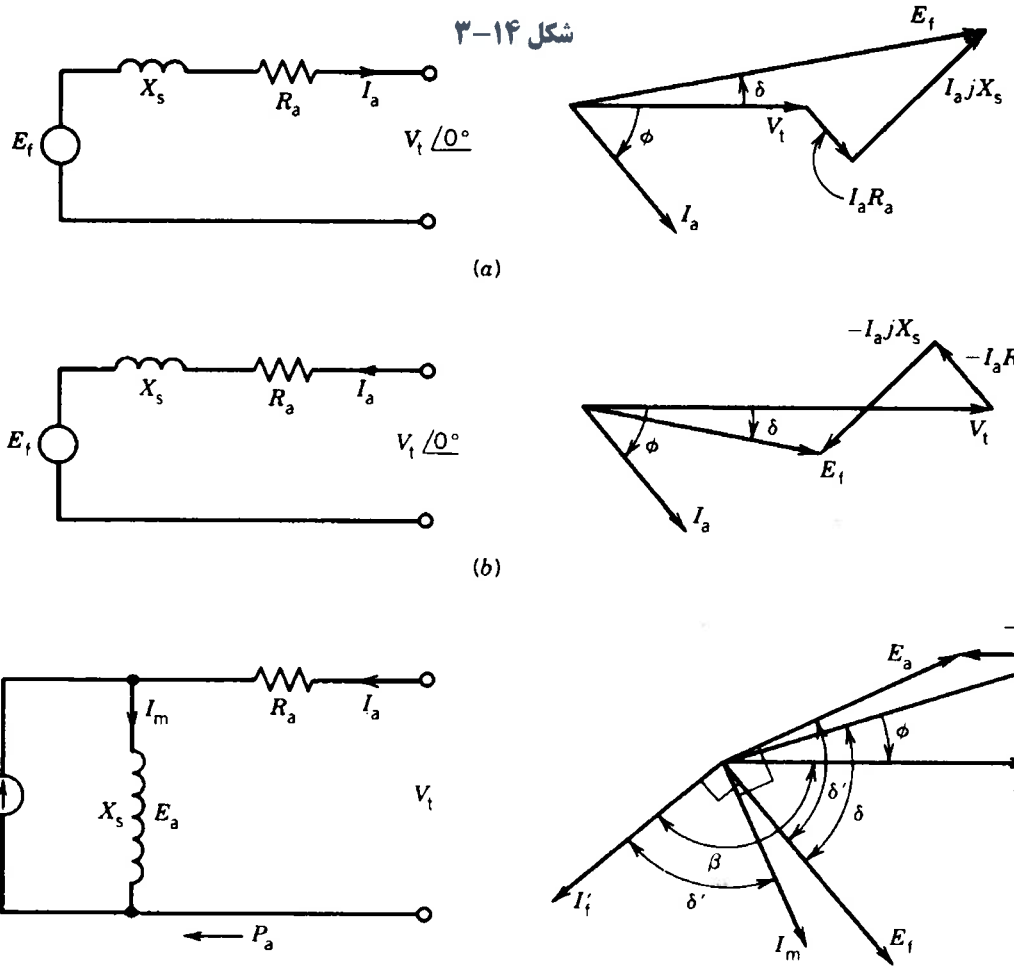
۳- این مدارهای معادل مربوط به فاز a در ماشین هستند. زیرا سیستم را سه فاز متعادل در نظر گرفته‌ایم و تحلیل یک فاز کافی است.

۴-ولتاژ پایانه ماشین‌ها (Vt) 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 c-۱۴-۳ 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 (a-۱۴-۳) داریم:

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

$$Vt = Ef + IaRa + IjXs$$

$$Ef = Vt< . - IaRa - IjX5 - Et \ < - \ d$$

مشخصه های توان و گشتاور

معمولا 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 وAC 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 (۱۵-۳) 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:

$$V_t = |V_t| \angle 0°$$

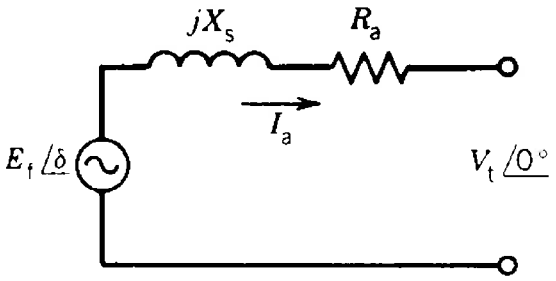
$$E_f = |E_f| \angle \delta$$

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

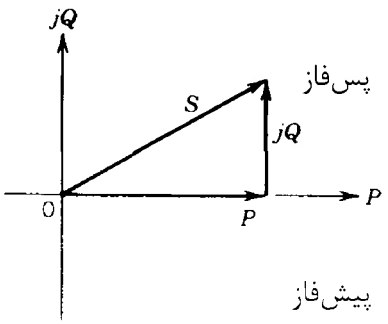
توان مختلط مربوط به هر فاز در پایانه ماشین به قرار زیر است:

$$S = V_T . I_a^*$$

در اینجا از مزدوج جریان استفاده شده است و باید دانست فرض بر آن است که توان راکتیو پس‌فاز مثبت و توان راکتیو پیش‌فاز منفی اختیار می‌شود. شکل (۱۳-۷) مثلث توان را برای حالت پس‌فاز 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

$$I_a^* = \left|\frac{E_f - V_t}{Z_s}\right|^* = \frac{E_f^*}{Z_s^*} - \frac{V_t^*}{Z_s^*}$$

$$= \frac{|E_f|\angle -\delta}{|Z_s|\angle -\theta_s} - \frac{|V_t|\angle 0}{|Z_s|\angle -\theta_s}$$

$$= \frac{|E_f|}{|Z_s|}\angle \theta_s - \delta - \frac{|V_t|}{|Z_s|}\angle \theta_s$$

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:

$$P = \frac{|V_t||E_f|}{|Z_s|}\cos(\theta s - \delta) - \frac{|V_T|^2}{Z_s}\cos\theta s \ (\frac{\text{watt}}{\text{phase}})$$

$$Q = \frac{|V_t||E_f|}{|Z_s|}\sin(\theta s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{Z_s}\sin\theta s \ (\frac{\text{VAR}}{\text{phase}})$$

δ = زاویه میان Ef و Vt

اگر از Ra صرف نظر شود در این صورت :

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

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

$$P_{3ph} = \frac{3|Vt||Ef|}{|Xs|}\sin\delta = P_{max} \times \sin\delta \ \text{(watts)}$$

$$P_{max} = \frac{3|Vt||Ef|}{|Xs|}$$

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

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:

$$T = \frac{P_{3ph}}{\omega s}$$

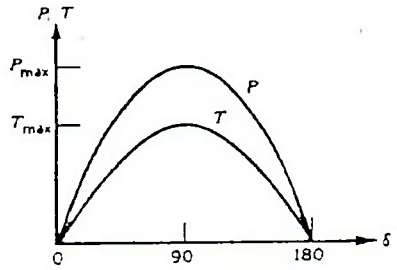
مشاهده می‌شود که توان و گشتاور تابع سینوسی زاویه δ است(شکل ۱۷-۳). لذا به زاویه δ زاویه توان یا زاویه گشتاور نیز اطلاق می‌شود. باید دانست گشتاور فوق در ژنراتور سنکرون همان گشتاور الکترو مغناطیسی است و پر واضح است که با گشتاور اعمال شده به محور از طریق توربین برابر است. اما جهت این دو گشتاور متضاد یکدیگر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

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

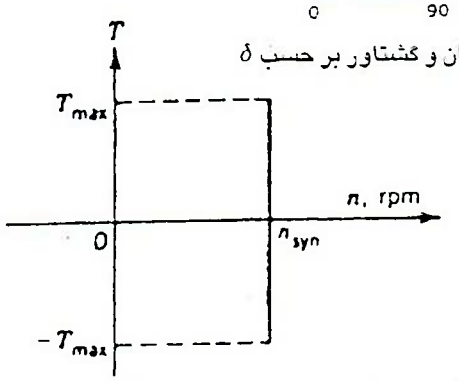
$$T = T_{max} \sin\delta \, N \cdot m$$

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

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



شکل ۱۷–۳ تغییرات توان و گشتاور بر حسب δ



شکل ۱۸–۳ مشخصه گشتاور-سرعت

این دو کمیت یعنی P_{max} و T_{max} حد پایدری ایستا (ایستاتیک) ژنراتور سنکرون می‌باشند. اگر زاویه δ در ژنراتور بیش از ۹۰ درجه گردد، ژنراتور سنکرونیزم خود را از دست می‌دهد و ناپایدار می‌شود. توجه کنید که δ =90 مربوط به شرایط P_{max} و T_{max} است. به P_{max} و T_{max} توان پرتگاهی وگشتاور پرتگاهی نیز گفته می‌شود. منحنی‌های شکل(۱۷-۳) را می‌توان برای موتورهای سنکرون در نظر گرفت. چون درحالت‌موتوری δ 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 $\delta = 90°$ 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 این‌گونه ماشین‌ها مطابق شکل (۱۸-۳) است. حال بیایید با توجه به مدار معادل نورتن موتور سنکرون رابطه‌ای برای گشتاور به‌دست آوریم. شکل(c-۱۴-۳) را در نظر می‌گیریم. توان مختلط در شکاف هوایی به قرار زیراست:

$$S_a = I_a E_a^*$$

فرضاً:
$$I_a = |I_a| \angle 0°$$

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

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

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

از دو معادله بالا برای توان ظاهری داریم:

$$S_a = |X_s| \times |I_a^2| \angle -90° + |X_s| \times |I_a| \times |I_f'| \angle -90° - \beta \ \ (VA)$$

از رابطه قبل توان اکتیو شکاف هوایی به دست می‌آید:

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

$$P_a = -\omega L_s I_a I_f' \sin\beta \ \ (w)$$

$$\omega = 2\pi f$$

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 :

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

داریم:

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

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 δ 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_{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 (a-۱۹-۳) مدار معادل

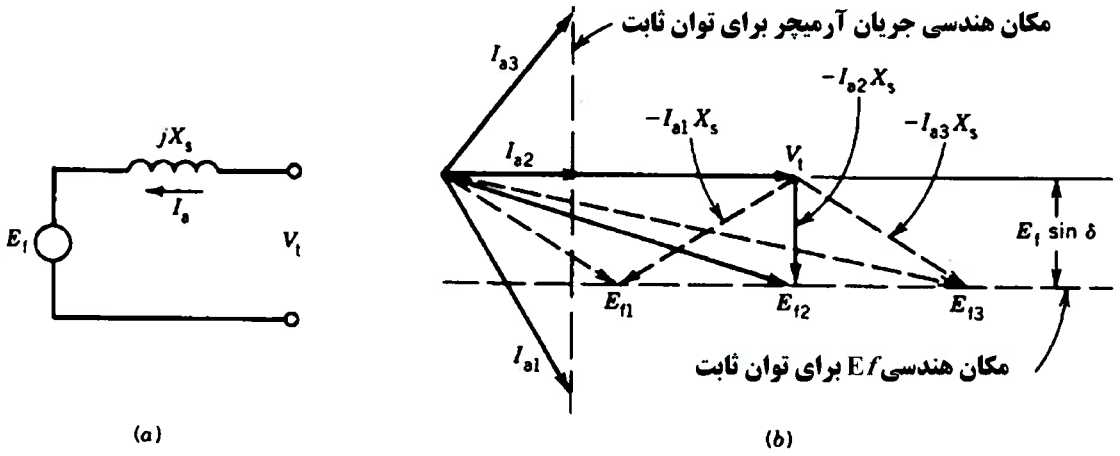
موتور را نشان می‌دهد و فرض بر آن است که مقاومت استاتور ناچیز است. در شکل (b-۱۹-۳) نمودار موتور رسم شده است. برای موتور سه فاز اکتیو به قرار زیر است:

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

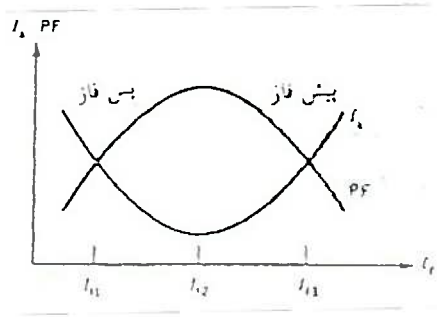
از آنجایی که V_t ثبات است لذا برای آنکه موتور تحت شرایط توان اکتیو ثابت مورد بهره برداری قرار گیرد،

باید عددی ثابت = $I_a \cos \Phi$

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 (b-۱۹-۳)) شکل (b-۱۹-۳) برای سه جریان مختلف استاتور رسم شده است.



شکل ۱۹-۳ مشخصه‌های ضریب توان



(c)

a- مدل معادل

b- نمودار فازوری

c- تغییرات I_a ضریب توان بر حسب I_f

این سه جریان به قرار زیر هستند:

پس‌فاز نسبت به V_1 و $I_a = I_{a1}$

هم‌فاز V_1 و $I_a = I_{a2}$

پیش‌فاز نسبت به V_1 و $I_a = I_{a3}$

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 (b-۱۹-۳) سه ولتاژ E_{f1} و E_{f2} و E_{f3} نیز رسم شده است. به طور کلی برای موتور سنکرون داریم:

$$E_f = v_t - JI_aX_a$$

توان اکتیو را می‌توان چنین نیز نوشت :

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

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 برروی خط عمودی یا مکان هندسی مربوط قرار دارد(شکل ۳-۱۹-b) تغییر جریان I_a باعث می‌شود که زاویه ضریب توان موتور (Φ) نیز تغییر کند. Φ زاویه جریان استاتور (I_a) و ولتاژ (V_t) است. برای مثال می‌توان گفت اگر جریان تحریک I_{f1} باشد دراین صورت ولتاژ درون ماشین E_{f1} بوده و جریان استاتور I_{a1} است (شکل ۳-۱۹-b) در این صورت ماشین درشرایط 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) دراین صورت جریان استاتور I_{a2} بوده و مشاهده می‌شود ضریب توان واحد برای موتور حاصل می‌شود. زیرا I_{a1} با V_T هم‌فاز 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) دراین 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.

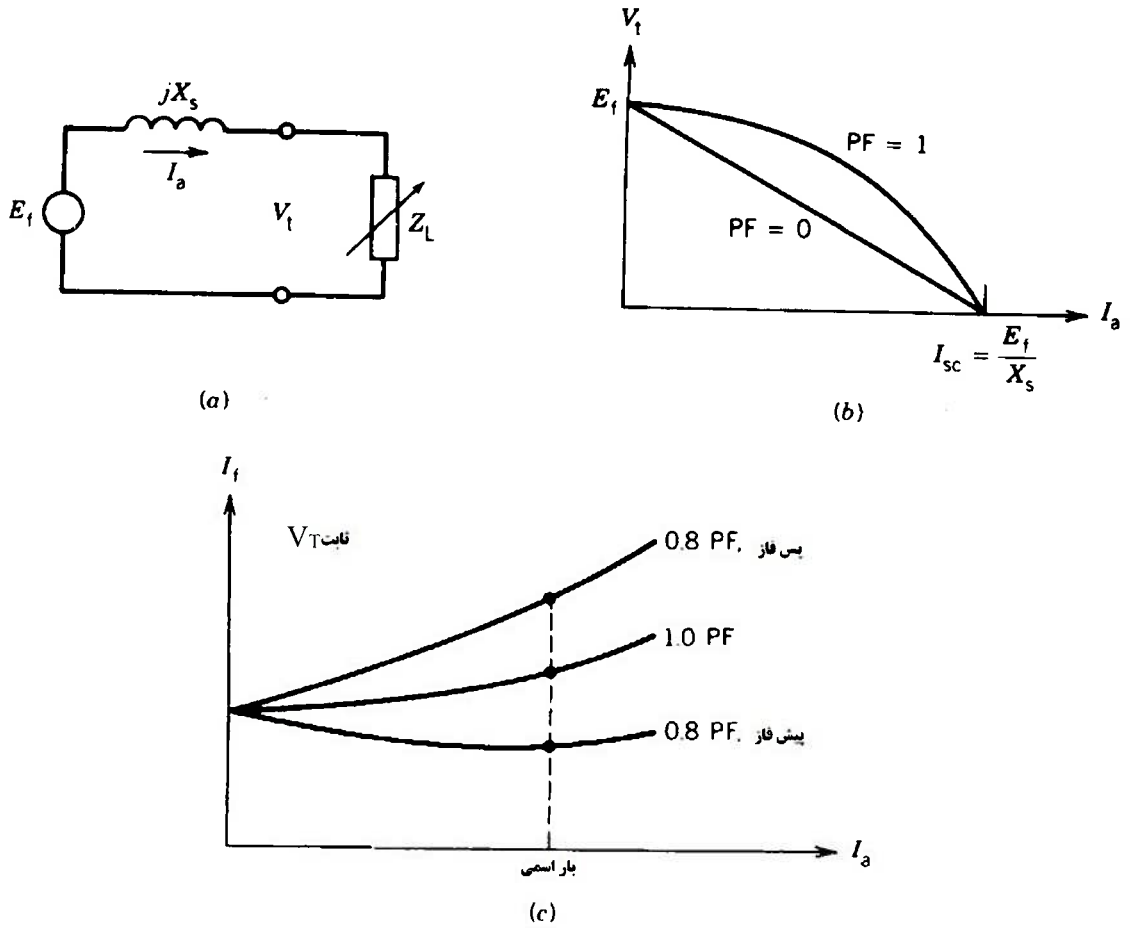
اگر موتور سنکرون در حالت بی باری مورد استفاده قرار گیرد (توان اکتیو صفر) در این صورت با تغییر جریان تحریک می‌توان آن را به صورت یک خازن و یا یک سلف مورد بهره‌برداری قرار داد.

در شرایط فوق تحریک و زیر تحریک ضریب توان موتور بی بار صفر است. موتورهای سنکرون بی بار را کندانسور سنکرون می‌نامند و برای تنظیم ولتاژ انتهای خطوط انتقال انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ژنراتورهای سنکرون مستقل

همان طور 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 دست یابی به مشخصه پایانه ژنراتورهای مستقل (تغییرات V_T بر حسب I_a)، مدار معادل شکل (a-۲۰-۳) را در نظر می‌گیریم که در آن از مقاومت استاتور (آرمیچر) صرف نظر شده است. در حالت بی‌باری یا مدار باز داریم:

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



شکل ۲۰-۳ 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

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 نگه‌داشتن 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.

کاربرد ماشینهای سنکرون سه فاز

۱- ژنراتورهای سنکرون سه فاز در نیروگاه‌های انرژی الکتریکی تولید می‌کنند.

۲- موتورهای سنکرون در کارخانجاتی که به سرعت ثابت نیاز است مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳- ضریب توان موتورهای سنکرون با تغییر جریان تحریک قابل تغییر است. لذا می‌توان از آن در حالت فوق تحریک مانند خازن استفاده کرد و به شبکه توان راکتیو (Q) تزریق نمود.

۴- موتورهای سنکرون بی‌بار کندانسور سنکرون نام دارند که هم می‌توانند Q از شبکه بگیرند و هم Q به شبکه تزریق کنند. از کندانسورهای سنکرون برای تنظیم ولتاژ خطوط انتقال استفاده می‌شود.

در حالت اتصال کوتاه داریم:

۵- به دلیل بالا بودن هزینه ساخت موتورهای سنکرون، استفاده از آن‌ها در سرعت‌های بالا یا سرعت‌های متوسط با توان کمتر از ۵۰ اسب بخار مناسب نمی‌باشد.

۶- در سیستم‌های کنترل سرعت امروزه موتورهای سنکرون که توسط سیستم‌های الکترونیکی کنترل می‌شوند مورد توجه قرار گرفته‌اند.

منابع

P.C. Sen
Bim Bahra