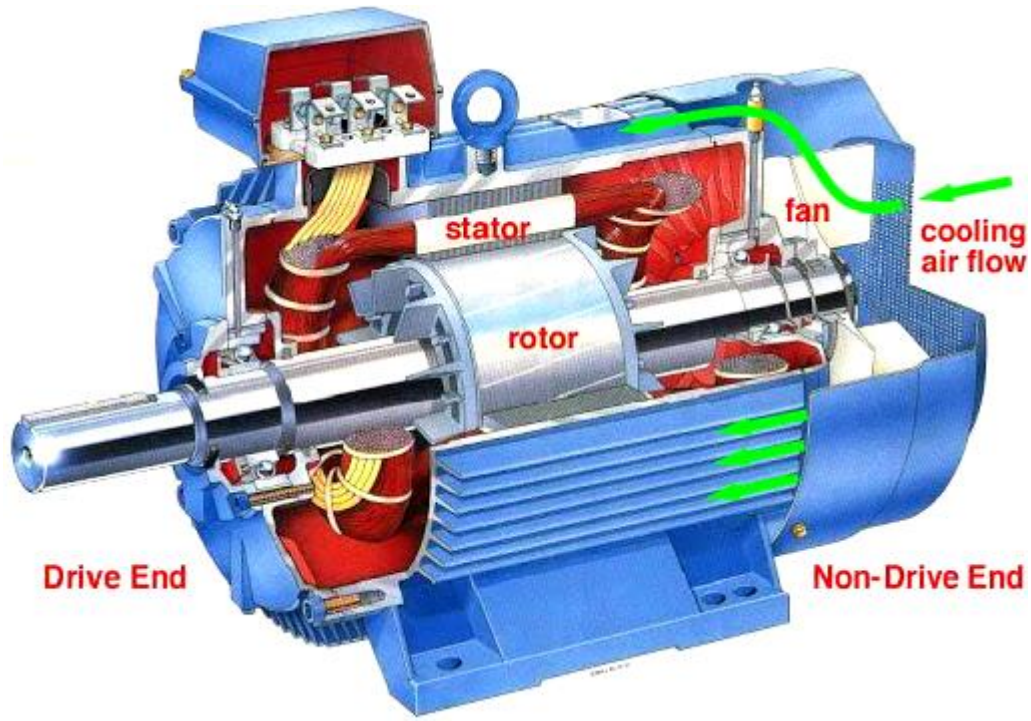
((بسم الله الرّحمن الرّحیم))

وزرات علوم ، تحقیقات وفناوری

دانشگاه فنی وحرفه ای

دانشکده فنـــی وحـــرفه ای محمودآباد

ماشین الکتریکی سه فاز



تهیه کننده:

دکتر حسن زارع

تهیه شده برای دانشجویان رشته برق قدرت

سال تحصیلی۹۹–۱۳۹۸

« فهرست »

عنوان	صفحه
۱. **ماشين هاي القايي الكتريكي(آسنكرون)**	۱
۲. ساختمان موتورهای القایی سه فاز	۱
۳. میدان مغناطیسی دواریاگردان	۲
۴. ولتاژ القاءشده	۸
۵. توزیع نیروی محرکه مغناطیسی(mmf)	۹
۶. هارمونیک های فضائی وضریبهای سیم پیچی	۱۵
۷. عملکرد موتورهای القائی سه فاز در شرایط مختلف	۱۷
۸. بررسی سه حالت موتوری، ژنراتوری، وترمزی درماشین های القائی سه فاز	۲۱
۹. موتورالقائی سه فاز معکوس	۲۳
۱۰. معرفی چند مدار معادل تقریبی و ساده برای موتورهای القایی سه فاز	۲۸
۱۱. آزمایش های بی باری و روتورقفل شده جهت تعیین پارامترهای موتورهای القایی سه فاز	۳۰
۱۲. مشخصه های موتورهای القایی سه فاز	۳۱
۱۳. نحوه پخش توان درماشین های القائی درحالتهای موتوری ژنراتوری و ترمزی	۳۸
۱۴. موتورهای القایی باروتورسیم بندی شده	۴۱
۱۵. موتورهای القایی قفس سنجابی بامیله های عمیق	۴۱
۱۶. روتورهای قفس سنجابی مضاعف(دوبل)	۴۲
۱۷. طبقه بندی موتورهای القایی قفس سنجابی	۴۴

۱۸. کنترل سرعت ۴۶
۱۹. کنترل ولتاژ ۴۶
۲۰. کنترل فرکانس ۴۷
۲۱. عملکرد موتورالقائی تحت فرکانس لغزش ثابت ۵۰
۲۲. کنترل سرعت با تغییر مقاومت روتور ۵۱
۲۳. کنترل سرعت باتغییر تعداد قطبها ۵۳
۲۴. راه اندازی موتورهای القایی ۵۷
۲۵. راه اندازی با مقاومت ظاهری اضافی دراستاتور ۵۹
۲۶. راه اندازی با نصف سیم پیچ استاتور ۵۹
۲۷. راه اندازی ستاره – مثلث ۶۰
۲۸. راه اندازی با اتوترانس ۶۰
۲۹. توقف سریع موتورهای القایی ۶۳
۳۰. ترمز با اعمال فشار مخالف ۶۲
۳۱. ترمز با جریان مستقیم ۶۳
۳۲. تکفاز شدن موتور سه فاز ۶۳
۳۳. مولد القایی ۶۴
۳۴. بهره برداری ازمولدالقایی به طور جداگانه ۶۵
۳۵. موتورالقائی نیم تکه ۷۰
۳۶. بررسی هارمونیک های زمانی ومکانی در موتورهای القایی سه فاز ۷۰

۳۷. ماشین های سنکرون سه فاز ۷۵
۳۸. ساختمان ماشین های سنکرون سه فاز ۷۷
۳۹. ژنراتورسنکرون ۷۸
۴۰. شین بی نهایت ۸۱
۴۱. موتورسنکرون سه فاز ۵۸

۴۲. روش های راه اندازی موتورسنکرون ۸۶
۴۳. مدارمعادل ۸۸
۴۴. تعیین رأکتانس سنکرون ۹۱
۴۵. رأکتانس سنکرون اشباع نشده ۹۲
۴۶. رأکتانس سنکرون اشباع شده ۹۳
۴۷. نمودار فازوری ۹۴
۴۸. مشخصه های توان وگشتاور ۹۵
۴۹. مکان هندسی توان مختلط ۹۸
۵۰. منحنی های توانائی ۹۹
۵۱. کنترل ضریب توان ۱۰۰
۵۲. ژنراتورهای سنکرون مستقل ۱۰۳
۵۳. ماشین های سنکرون قطب برجسته ۱۰۴
۵۴. جریانها و رأکتانس های d و q ۱۰۵
۵۵. روابط توان درماشین های سنکرون قطب برجسته ۱۰۷
۵۶. تعیین X_q و X_d ۱۰۹
۵۷. کنترل سرعت موتورهای سنکرون ۱۱۰
۵۸. کنترل فرکانس ۱۱۰
۵۹. موتورسنکرون خودکنترل ۱۱۳
۶۰. سیستم کنترل باحلقه بسته ۱۱۳
۶۱. کاربرد ماشین های سنکرون سه فاز ۱۱۴

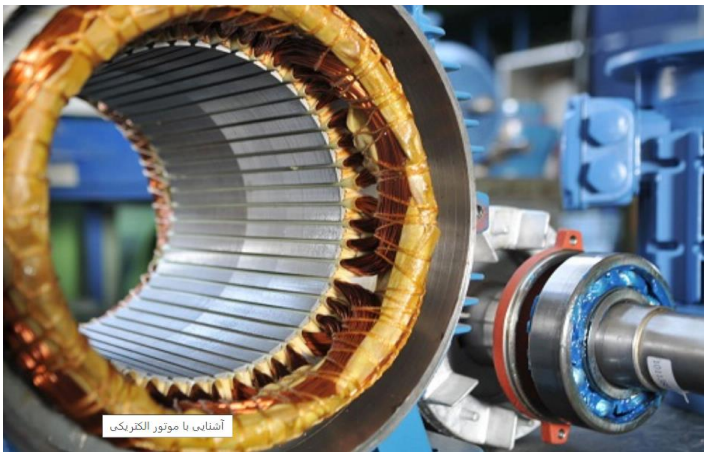
ماشينهاي القايي الكتريكي (آسنكرون)

مقدمه

ماشین های القایی بطور کلی به موتورها و ژنراتورهای القایی گفته میشود .موتورهای القایی یکی از ماشین های پرمصرف در صنایع بوده و حاوی یک قسمت ساکن بنام استاتور و یک قسمت دوار بنام روتور می باشند. روتور بر روی محور نصب بوده و درون استاتور می چرخد و لذا بین روتور و استاتور شکاف هوایی وجود دارد در موتورهای القایی استاتور به شبکه AC وصل شده و در روتور جریان AC به علت عمل القاء برقرار می گردد و بهمین دلیل به آنها موتورهای القایی گفته می شود .موتورهای القایی هنوز آنطور که باید و شاید در صنعت نیروگاهی جای خود را باز نکرده اند و اکثر کتب توجه خود را به موتورهای القایی معطوف می دارند ساختمان ژنراتور القایی نیز شبیه موتورهای القایی است یعنی در آنها نیز روتور و استاتور وجود دارد موتورهای القایی دوار بر سه نوعند :

1. **موتورهای القایی تکفاز**
2. **موتورهای القایی دوفاز**
3. **موتورهای القایی سه فاز**

البته امروزه موتورهای القایی خطی نیز در سیستمهای حمل و نقل کاربرد فراوان دارند .



(b)

((a)

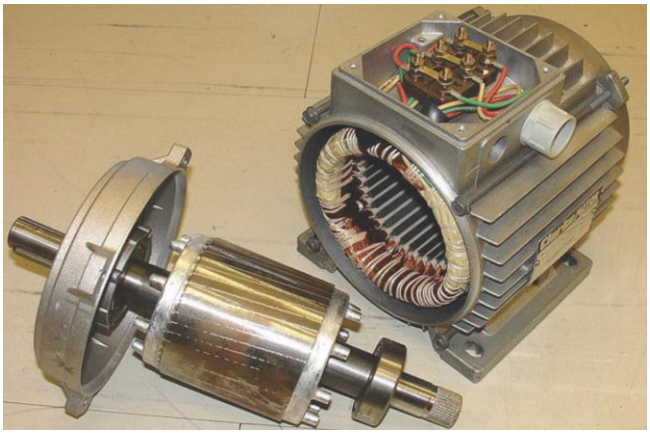
شکل (۵۱)موتور القایی سه فاز (a)شمای خارجی (b) استاتور

ساختمان موتورهاي القايي سه فاز

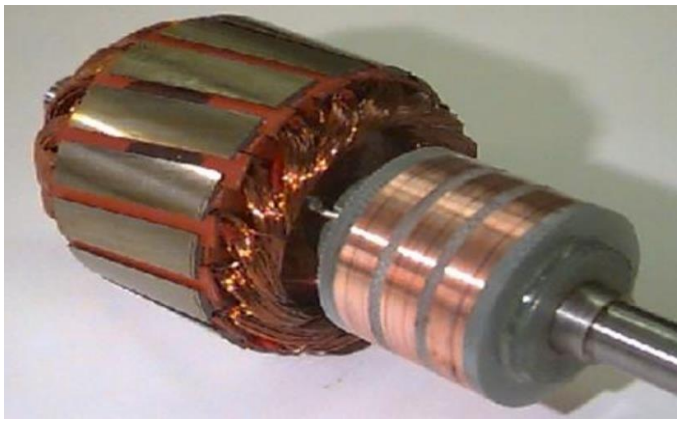
شکل (a-۵۱) تصویر یک موتور القایی سه فاز را نشان میدهد و باید دانست در این موتور شکاف هوایی بین روتور و استاتور یکنواخت است هسته استاتور مورق (لایه لایه) بوده و از فولاد مرغوب تهیه میشود سطح داخلی استاتور حاوی شیارهائی است که سیم پیچی سه فاز درون آنها جاسازی میشود (شکل b-۵۱) . هسته روتور نیز مورق بوده و از مواد فرومغناطیسی مرغوب ساخته میشود سطح خارجی روتور نیز شیاردار است و هادیهای روتور در آن جاسازی میشوند . روتور موتورهای القایی سه فاز از نظر ساختمان بر دو نوعند :

الف : روتور سیم بندی شده که درون شیارهای روتور سیم پیچ مسی یا آلومینیومی جاسازی شده است .

ب : روتور قفسی سنجابی که درون سیارهای روتور میله های آلومینیومی یا مسی تیبیه شده است .
باید دانست در روتور قفس سنجابی میله ها از دو سمت توسط حلقه های انتهایی بهم متصل اند یا بعبارت دیگر میله ها از دو سمت اتصال کوتاه شده اند .
شکل (a-۵۲) یک روتور قفس سنجابی و شکل (b-۵۲) یک روتور سیم بندی شده را نشان میدهد . در روتور سیم بندی شده سیم پیچ روتور شبیه سیم پیچ استاتور بوده و سه فاز میباشد و درون شیارهای روتور تعبیه شده اند .لذا در روتور سیم بندی شده با سه مجموعه سیم پیچ تکفاز مواجه هستیم و لذا شش پایانه برای سیم بندی روتور حاصل می شود .



(a)



(b)

شکل روتور (۵۲) ساختمان روتور(a) روتور قفسه ای (b)روتور سیم پیچی شده

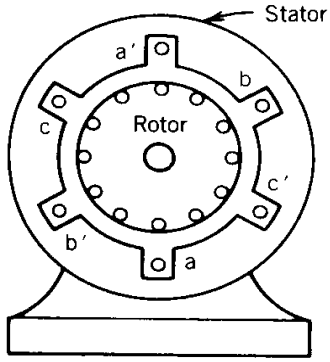
معمولا کارخانه سازنده سه پایانه را درون ماشین بهم متصل ساخته و سه پایانه دیگر را از ماشین خارج میسازد و به سه حلقه لغزان بر روی محور متصل میکند (شکلb-۵۲) بر روی این سه حلقه لغزان سه جاروبک ساکن وجود دارد و توسط این جاروبکها میتوان مدار روتور را به مدار دیگری از قبیل رئوستا جهت کنترل سرعت موتور متصل نمود گفتنی است در موتورهای قفس سنجابی ، دیگر حلقه های لغزان وجود ندارد و هیچگونه پایانه ای از روتور خارج نمیشود پس :
الف : در موتورهای قفس سنجابی فقط سه پایانه مربوط به استاتور از ماشین خارج میشود و به منبع ولتاژ AC وصل میگردد .
ب : در موتورهای با روتور سیم بندی شده شش پایانه از ماشین خارج میشود سه پایانه مربوط به استاتور است که برق AC وصل میشود و سه پایانه مربوط به روتور بوده که به حلقه های لغزان وصل میگردند .

موتورهای قفس سنجابی ارزانتر و چون سخت تر از موتورهایی است که روتور آنها از نوع سیم بندی شده میباشد . سیم پیچی روتور و استاتور در موتورهای القایی که روتور آنها سیم بندی شده است بصورت گسترده و توزیع شده بوده و در کل محیط روتور و استاتور پخش شده اند .علت این امر استفاده اقتصادی از هسته آهن و هادی مسی بوده و درضمن شکل موج mmf بهبود می یابد و لذا گشتاور آرام و نرمی حاصل میشود گفتنی است که سیم پیچی های هر فاز در استاتور و روتور چندین شیار را دربر میگیرند .شکل (a-۵۳) برش یک موتور القایی قفس سنجابی را نشان میدهد سیم پیچهای استاتور اصولا از نوع گسترده یا توزیع شده بوده

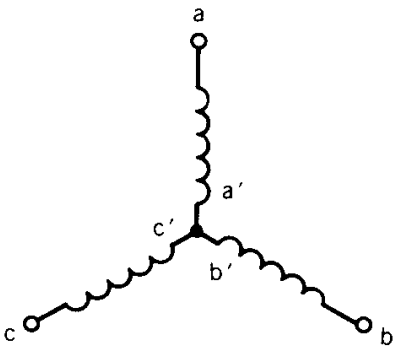
و در طول محیط استاتور پخش میباشند . اما برای سهولت آنها را بصورت سه کلاف متمرکز aa',bb',cc' نشان داده ایم باید دانست :

۱. کلاف متمرکز aa' نمایانگر کلیه سیم پیچی های گسترده یا توزیع شده فاز **a** است .
۲. کلاف متمرکز bb' نشانگر کلیه سیم پیچی های گسترده فاز **b** میباشد .
۳. کلاف متمرکز cc' مبین کلیه سیم پیچی های گسترده فاز **c** میباشد .

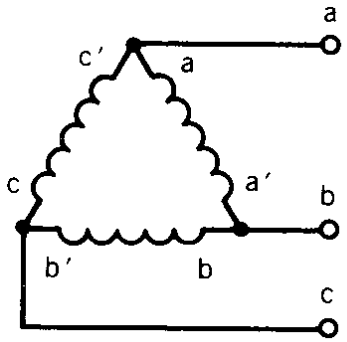
محور مغناطیسی این سه کلاف متمرکز، ۱۲۰ درجه الکتریکی نسبت بهم جابجایی دارند . میدانیم در موتورهای القایی سه فاز، استاتور سه فاز است و میتوان آنرا به دو صورت ستاره و مثلث آرایش داد. شکلهای (**b**-۵۳) و (**c**-۵۳) دو آرایش ستاره و مثلث مربوط به استاتور را نشان میدهد .



شکل (۵۳) (**a**) برش موتور القایی سه فاز



(**b**) اتصال ستاره



(**c**) اتصال مثلث

میدان مغناطیسي گردان یا دوار

شکل (**a**-۵۴) شمای یک استاتور با سه کلاف متمرکز سه فاز را نشان میدهد و محور مغناطیسی کلافها نسبت بهم در فضا و در محیط داخلی استاتور بمیزان ۱۲۰ درجه الکتریکی جابجائی دارند باز متذکر میشویم کلافهای متمرکزی aa',bb',cc' نمایانگر کلیه سیم پیچی های گسترده یا توزیع شده فازهای a,b,c استاتور است در اینجا فرض بر آنست که ماشین دوقطبی است .

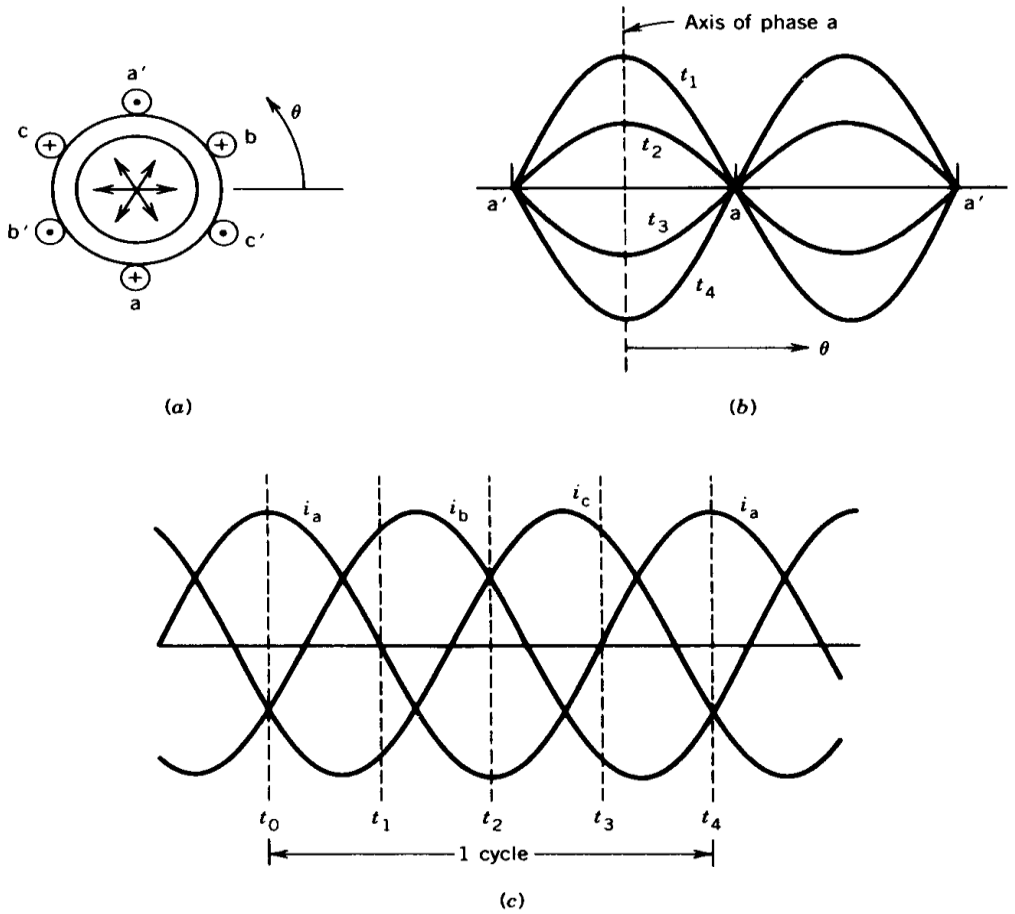
اگر جریان متناوب سینوسی از هر کلاف بگذرد در اینصورت **mmf** ضربانی یا نوسانی حاصل میشود که دامنه و جهت آن به مقدار لحظه ای جریان عبوری از سیم پیچی بستگی دارد . شکل (۲-۵۴) توزیع **mmf** در فضا و در لحظات مختلف را بخاطر عبور جریان **AC** از کلاف متمرکز aa' نشان میدهد کلافهای bb',cc' نیز موجهای **mmf** با توزیع سینوسی پدید می آورند لذا با سه موج **mmf** سینوسی مربوط به کلافهای aa',bb',cc' روبرو هستیم که نسبت بهم در فضا بمیزان ۱۲۰ درجه الکتریکی جابجائی دارند گیریم جریانهای متعادل زیر از سیم پیچ سه فاز استاتور بگذرد و شکل موجهای آن مطابق شکل (۳-۵۴) باشند یعنی :

$$i_a = I_m Cos(\omega t) \qquad (۱۳۶)$$

$$i_b = I_m Cos(\omega t - 120) \qquad (۱۳۷)$$

$$i_c = I_m Cos(\omega t + 120) \qquad (۱۳۸)$$

در اینجا خاطر نشان میسازیم که جهت عبور جریانها از کلافها با علامتهای $(+),(\bullet)$ نشان داده شده اند (شکل **a**-۵۴) .



شکل(۵۴) mmf ضربانی یا نوسانی

گیریم جریانهای فوق از سیم پیچهای هر فاز بگذرد دراینصورت هر فاز موج mmf مربوطه را با توزیع سینوسی در فضا ایجاد میکند و یک نمونه آن مربوط به فاز a در شکل (b-۵۴) آمده است ملاحظه میشود مقدار ماکزیمم موج mmf مربوط به فاز a بر محور مغناطیسی فاز a منطبق است برای فازهای b,c نیز وضع بهمین منوال است . یعنی مقدار ماکزیمم موج mmf مربوط به فاز b بر محور مغناطیسی فاز b منطبق است و برای فاز c نیز مقدار ماکزیمم موج mmf مربوطه بر محور مغناطیسی فاز c قرار دارد لذا موج mmf مربوط به هر فاز را میتوان بصورت یک بردار فضایی نشان داد و این بردارها در امتداد محور مغناطیسی فازها خواهند بود دامنه این بردارها با جریان لحظه ای فازها متناسب است گفتنی است در اثر حضور سه موج mmf در ماشین ، موج mmf منتجه حاصل میگردد که میتوان آنرا به روش ترسیمی یا تحلیلی ارزیابی نمود .

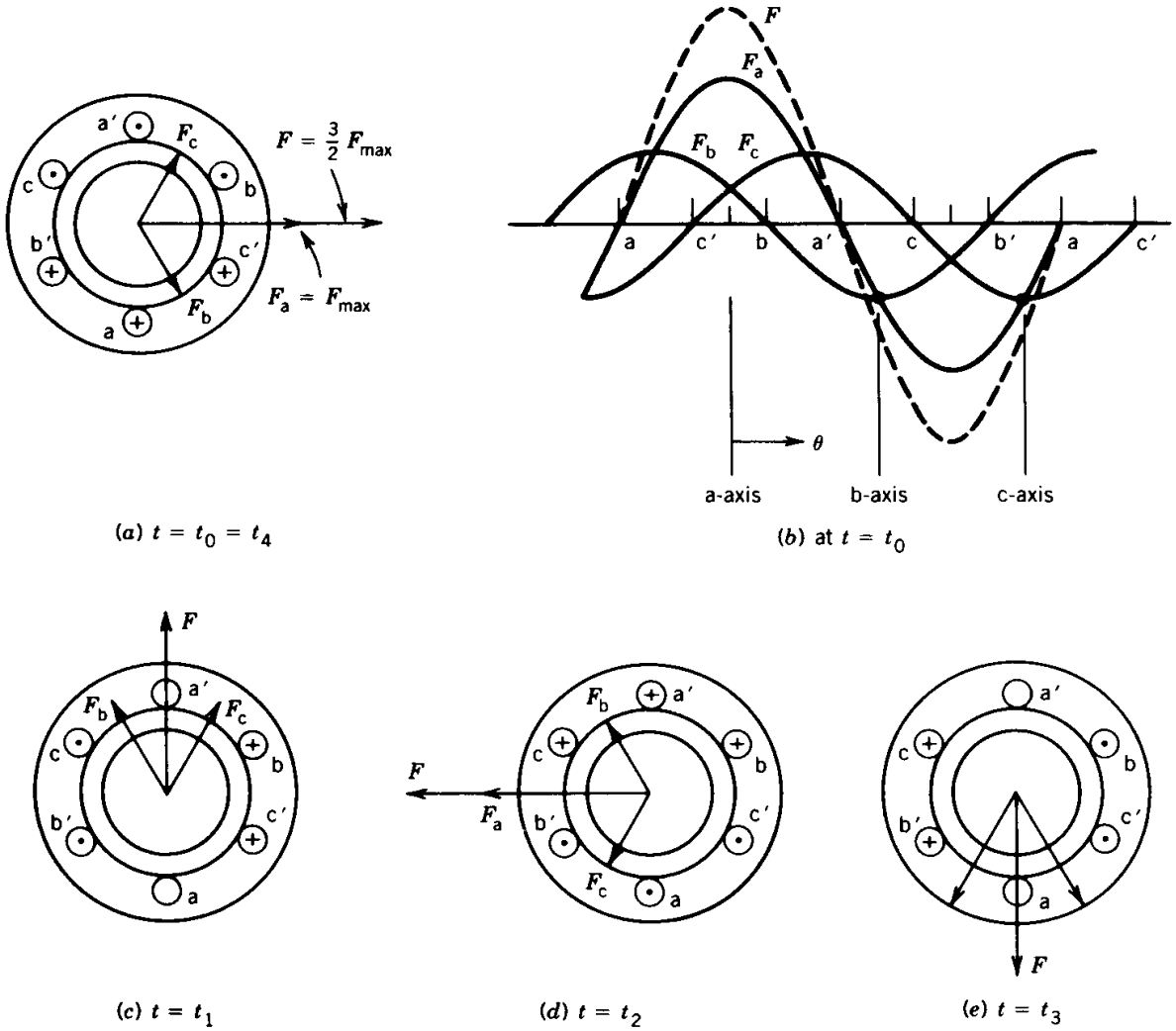
روش ترسیمی

اکنون لحظات مختلفی را بررسی میکنیم و مقدار و جهت موج mmf منتجه را ارزیابی مینمائیم . باتوجه به شکل (c-۵۴) برای لحظه t_0 داریم :

$i_a = I_m$ **(از سیم پیچی فاز a میگذرد)** **(۱۳۹)**

$i_b = -\frac{I_m}{2}$ **(از سیم پیچی فاز b میگذرد)** **(۱۴۰)**

$i_c = -\frac{I_m}{2}$ **(از سیم پیچی فاز c میگذرد)** **(۱۴۱)**



شکل(۵۵)تعیین میدان مغناطیسی به روش ترسیمی

دراینصورت جهت جریانها در کلافها مطابق شکل (۱-۵۵) بوده و توسط علامتهای (+),(•) مشخص شده اند گفتنی است که :

۱. **جریان در فاز a ماکزیمم است لذا mmf حاصله توسط فاز a ماکزیمم است این mmf توسط** $F_a = F_{\max}$ **در امتداد محور مغناطیس فاز a در شکل (a-۵۵) مشخص شده است .**

۲. **mmf حاصله توسط فاز b برابر** $F_b = \frac{F_{\max}}{2}$ **است و در شکل (b-۵۵) نشان داده شده است.**

۳. **mmf حاصله توسط فاز c برابر** $F_c = \frac{F_{\max}}{2}$ **است و در شکل (b-۵۵) آمده است.**

۴. **چون i_b و i_c منفی هستند لذا F_b و F_c در جهت منفی محورهای مغناطیسی مربوطه نشان داده شده اند .(شکل b-۵۵)**

۵. **منتجه این سه mmf در شکل (a-۵۵) نشان داده شده و مقدار mmf منتجه معادل** $3\frac{F_{\max}}{2}$ **است .**

۶. **جهت mmf منتجه در امتداد جهت مثبت محور مغناطیسی فاز a است . (شکل a-۵۵)**

۷. **در لحظه t_0 توزیع mmf منتجه سینوسی بوده و همچون mmf مربوط به فاز a در امتداد محور مغناطیسی فاز a عمل میکند اما دامنه mmf منتجه معادل** $\frac{3}{2}$ **دامنه mmf فاز a است .**

۸. در لحظه t_0 موجهای **mmf** فازهای گوناگون و **mmf** منتجه در شکل (**b**-۵۵) نشان داده شده است . حال مطابق شکل (**c**-۵۴) لحظه t_1 را درنظر میگیریم و داریم :

$$i_a = 0, F_a = 0 \qquad (۱۴۲)$$

$$i_b = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m, F_b = \frac{\sqrt{3}}{2} F_{\max} \qquad (۱۴۳)$$

$$i_c = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m, F_c = -\frac{\sqrt{3}}{2} F_{\max} \qquad (۱۴۴)$$

شکل (**c**-۵۵) بردارهای $F_a = 0, F_b, F_c$ و بردار منتجه را در لحظه t_1 نشان میدهد و مشاهده میشود که :

الف : مقدار بردار نتیجه همان $3F_{\max}/2$ است .

ب : جهت بردار در لحظه t_1 بمیزان ۹۰ درجه در جهت خلاف عقربه ساعت نسبت به لحظه t_0 چرخیده است .

حال لحظات t_2 و t_3 در شکل (**c**-۵۴) را درنظر میگیریم و بسهولت در می یابیم که موجهای **mmf** مطابق شکلهای (**d**-۵۵) و (**e**-۵۵) میشوند .باز مشاهده میشود که مقدار **mmf** منتجه همواره $3\frac{F_{\max}}{2}$ است ولی جهت آن دائما عوض میشود بعبارت دیگر **mmf** منتجه در جهت خلاف عقربه های ساعت می چرخد اگر یک سیکل کامل یا چرخه کامل طی شود دوباره به وضعیت شکل (**a**-۵۵) می رسیم پس در هر سیکل کامل موج **mmf** منتجه یک دور کامل در جهت خلاف عقربه ساعت می چرخد و لذا میدان گردان شکل گرفته است .

بحث فوق برای ماشین دوقطبی صادق است . در ماشین **p** قطبی در هر سیکل ، **mmf** منتجه میزان $2/p$ دور کامل می چرخد اگر در ماشین **p** قطبی فرکانس جریانها **f** باشد لذا سرعت دوران میدان گردان برحسب دور در دقیقه **(rpm)** بقرار زیر است:

$$n = \frac{2}{p} f \times 60 = \frac{120 f}{p} \qquad (۱۴۵)$$

به سرعت فوق که همان سرعت دوران میدان گردنده است سرعت سنکرون نیز اطلاق میگردد در تحلیل فوق فرض بر آن بود که :

۱. i_a از کلاف فاز **a** عبور کند.
۲. i_b از کلاف فاز **b** عبور کند.
۳. i_c جریان کلاف فاز **c** است .

به این حالت شرایط توالی مثبت گوئیم و دیدیم جهت چرخشی میدان گردان درجهت خلاف عقربه ساعت است اگر :

الف : i_a از کلاف فاز **a** عبور کند .

ب : i_b از کلاف فاز **c** بگذرد .

ج : i_c جریان کلاف فاز **b** باشد .

دراینصورت شرایط توالی منفی حاصل میشود و جهت چرخش میدان گردان در جهت عقربه ساعت است پس تعویض توالی فاز باعث میشود جهت چرخش **mmf** منتجه عوض شود .

روش تحلیلی

یک ماشین دوقطبی با استاتور سه فاز همچ.ن شکل (a-۵۶) درنظر میگیریم . در این شکل θ زاویه مکانی هر نقطه از فاصله هوایی نسبت به محور مغناطیسی فاز a است در هر لحظه mmf منتجه در امتداد زاویه θ بقرار زیر است :

$$F(\theta)=F_a(\theta)+F_b(\theta)+F_c(\theta) \qquad (۱۴۶)$$

باید دانست در هر لحظه ، سیم پیچی هر فاز mmf مخصوص بخود را تولید می کنند که ماکزیمم آن بر محور همان فاز منطبق است و دامنه هر mmf به جریان لحظه ای همان فرکانس بستگی دارد مشارکت mmf فاز a در امتداد زاویه θ اینچنین است :

$$F_a(\theta)=Ni_aCos(\theta) \qquad (۱۴۷)$$

در رابطه اخیر N تعداد حلقه یا تعداد دور مؤثر فاز a بوده و i_a جریان فاز a است از آنجائیکه محور مغناطیسی فازها نسبت بهم ۱۲۰ درجه الکتریکی جابجایی دارند لذا مشارکت mmf فازهای b,c در امتداد زاویه θ بقرار زیر است :

$$F_b(\theta)=Ni_bCos(\theta-120) \qquad (۱۴۸)$$

$$F_c(\theta)=Ni_cCos(\theta+120) \qquad (۱۴۹)$$

لذا mmf منتجه در امتداد زاویه θ بشرح زیر است :

$$F(\theta)=Ni_aCos(\theta)+Ni_bCos(\theta-120)+Ni_cCos(\theta+120) \qquad (۱۵۰)$$

با جایگزینی مقادیر لحظه ای جریانها داریم :

$$\begin{aligned}F(\theta,t)&=NI_mCos(\omega t)Cos(\theta)\\&+NI_mCos(\omega t-120)Cos(\theta-120)\\&+NI_mCos(\omega t+120)Cos(\theta+120)\end{aligned} \qquad (۱۵۱)$$

از مثلثات بیاد داریم :

$$Cos(A)Cos(B)=\frac{1}{2}\cos(A-B)+\frac{1}{2}\cos(A+B) \qquad (۱۵۲)$$

پس :

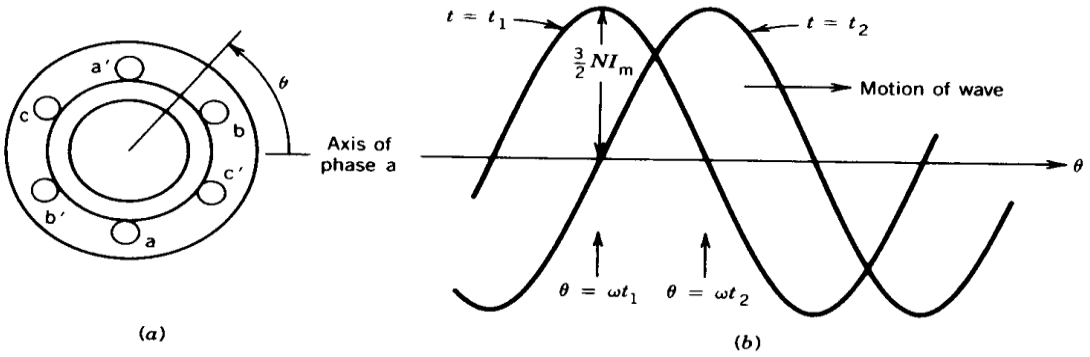
$$\begin{aligned}F(\theta,t)&=\frac{1}{2}NI_mCos(\omega t-\theta)+\frac{1}{2}NI_mCos(\omega t+\theta)\\&+\frac{1}{2}NI_mCos(\omega t-\theta)+\frac{1}{2}NI_mCos(\omega t+\theta-240)\\&+\frac{1}{2}NI_mCos(\omega t-\theta)+\frac{1}{2}NI_mCos(\omega t+\theta+240)\\&=\frac{3}{4}NI_mCos(\omega t-\theta)\end{aligned} \qquad (۱۵۳)$$

از رابطه بالا معلوم میشود که mmf منتجه در شکاف هوایی ماشین شکل میگیرد و با سرعت زاویه ای $\omega=2\pi f$ می چرخد گفتنی است که :

۱. در لحظه t_1 (شکلb-۵۶) mmf منتجه دارای توزیع سینوسی در حول شکاف هوایی بوده و پیک آن در $\theta=\omega t_1$ رخ میدهد .

۲. در لحظه دیرتر t_2 (شکلb-۵۶) mmf منتجه همچنان دارای توزیع سینوسی بوده و پیک آن در $\theta=\omega t_2$ رخ میدهد .

از نکات فوق در میابیم که موج **mmf** در حول شکاف هوایی بمیزان $\omega(t_2 - t_1)$ حرکت و چرخیده است سرعت زاویه ای **mmf** گردان برابر $\omega = 2\pi f$ بوده و برحسب رادیان بر ثانیه بیان میشود . اگر بخواهیم در ماشین **p** قطبی سرعت دوران را برحسب دور در دقیقه بیان کنیم از رابطه (۱۴۵) کمک میگیریم .

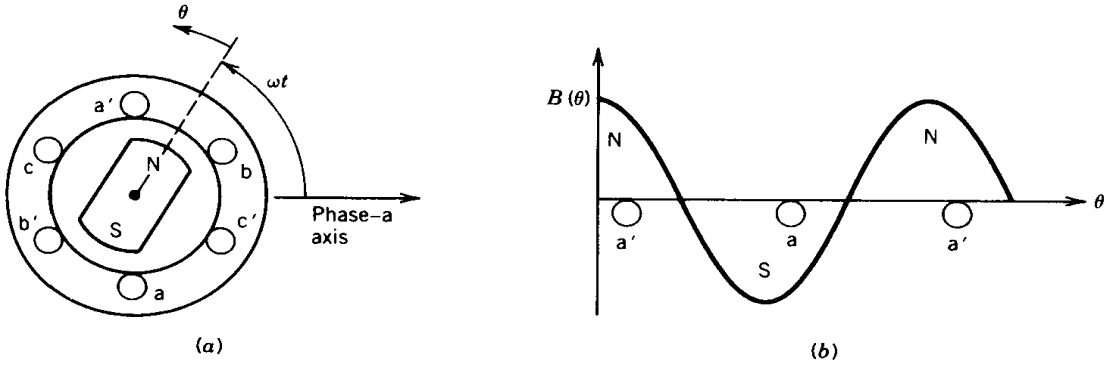


شکل (۵۶) حرکت موج **mmf** منتجه

ولتاژ القاء شده

در بخش قبلی دیدیم سیم پیچی گسترده سه فاز استاتور در صورت عبور جریانهای متعادل سه فاز میدان گردان با توزیع سینوسی در شکاف هوائی حاصل میسازد این امر را میتوان در یک ماشین دوقطبی با دوران یک آهن ربای گردان در شکاف هوائی شبیه نمود (شکل۵۷) میدان گردان در کلافهای aa',bb',cc' طبق قانون فارادی ولتاژ القاء میکند .گیریم توزیع چگالی شار در شکاف هوائی بقرار زیر باشد :

$$B(\theta) = B_{\max} Cos(\theta) \qquad (۱۵۵)$$



شکل(۵۷) توزیع چگالی شار در شکاف هوایی

شار قطب در شکاف هوائی (ϕ_p) اینچنین است :

$$\phi_p = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} B(\theta) l r d\theta = 2 B_{\max} l r \qquad (۱۵۶)$$

l طول محوری استاتور و **r** شعاع داخلی استاتور در شکاف هوائی است .گیریم کلافهای هرفاز با گام کامل پیچیده شده باشد و تعداد دور یا تعداد حلقه کلافها **N** باشد گام کامل بمعنی آنست که لبه کلافها بمیزان ۱۸۰ درجه الکتریکی در طول محیط استاتور از هم فاصله داشته باشند (شکل**a**-۵۷) واضح است که با دوران میدان مغناطیسی ناشی از استاتور که با آهن ربا مدل شده است شار پیوندی یا شار دور متغیری در کلافها حاصل میشود به عنوان مثال میتوان گفت :

۱. شار پیوندی کلاف aa' در $\theta = \omega t$ ماکزیمم بوده و برابر $N\phi_P$ است .

۲. شار پیوندی کلاف aa' در $\omega t = 90^\circ$ صفر است .

بطور کلی شار پیوندی فاز **a** بقرار زیر است :

$$\lambda_a(\omega t) = N\phi_p Cos(\omega t) \qquad (۱۵۷)$$

ولتاژ القاء شده در کلاف aa' مربوط به فاز **a** از قانون فاراده بدست می آید :

$$e_a = -\frac{d\lambda_a}{dt} = \omega N\phi_p Sin(\omega t) = E_{\max} Sin(\omega t) \qquad (۱۵۸)$$

ولتاژهای القاء شده در کلافهای bb', cc' بقرار زیر است :

$$e_b = E_{\max} Sin(\omega t - 120) \qquad (۱۵۹)$$

$$e_c = E_{\max} Sin(\omega t + 120) \qquad (۱۶۰)$$

مقدار مؤثر **(rms)** ولتاژ القا شده در کلافها بقرار زیر است :

$$E_{rms} = \frac{\omega N\phi_p}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N\phi_p = 4.44\, fN\phi_p \qquad (۱۶۱)$$

در روابط بالا **f** فرکانس برحسب هرتز میباشد و ϕ_p شار هر قطب ماشین است .در روابط فوق **N** کل تعداد حلقه های سری کلافهای متمرکز در هر فاز بوده که یک سیم پیچی با گام کامل را تشکیل میدهد . در ماشینهای **AC** واقعی سیم پیچهای هرفاز بصورت توزیع شده و گسترده در شیارهای گوناگون پخش شده اند علت این امر استفاده بهتر از امکانات هسته و هادیهای مسی است و همچنین با این عمل شکل موج **mmf** بهبود می یابد . در چنین شرایطی ولتاژ القاء شده در کلافهای مختلف موجود در شیارهای گوناگون باهم همفاز نمی باشند لذا برای پیدا کردن کل ولتاژ القایی در هر فاز باید ولتاژهای القایی کلافهای متعدد همان فاز را که در شیارهای مختلف جاسازی شده هند جمع فازوری نمود تا به کل ولتاژ القایی در هر فاز دست یابیم . در اینصورت رابطه زیر بدست می آید :

$$E_{rms} = 4.44\, fN_{ph}\phi_p K_w \qquad (۱۶۲)$$

N_{ph} تعداد حلقه های سری در هر فاز بوده و $\mathbf{K_w}$ ضریب سیم پیچی نام دارد . $\mathbf{K_w}$ بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ میباشد .

توزیع نیروی محرکه مغناطیسی (mmf)

یک سیم پیچی **N** حلقه ای یا **N** دوری را درنظر میگیریم که درون دو شیار استاتور ماشین جاسازی شده باشد شکل(**a**-۵۸) اگر جریان **i** از سیم پیچ بگذرد **mmf** در امتداد زاویه **θ** توسط آمپردور محصور شده توسط مسیر خط چین مسدود تعیین میشود (شکل**a**-۵۸)

$$F(\theta) = Ni \qquad (۱۶۳)$$

توزیع **mmf** در شکاف هوائی در شکل (**b**-۵۸) نشان داده شده است گیریم شکاف هوائی یکنواخت بوده و طول آن **g** باشد و از مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) هسته روتور و استاتور چشم پوشی شود در اینصورت توزیع چگالی شار در شکاف هوائی همانند توزیع **mmf** خواهد بود یعنی :

$$B(\theta) = \mu_0 \frac{Ni}{2g} \qquad (۱۶۴)$$

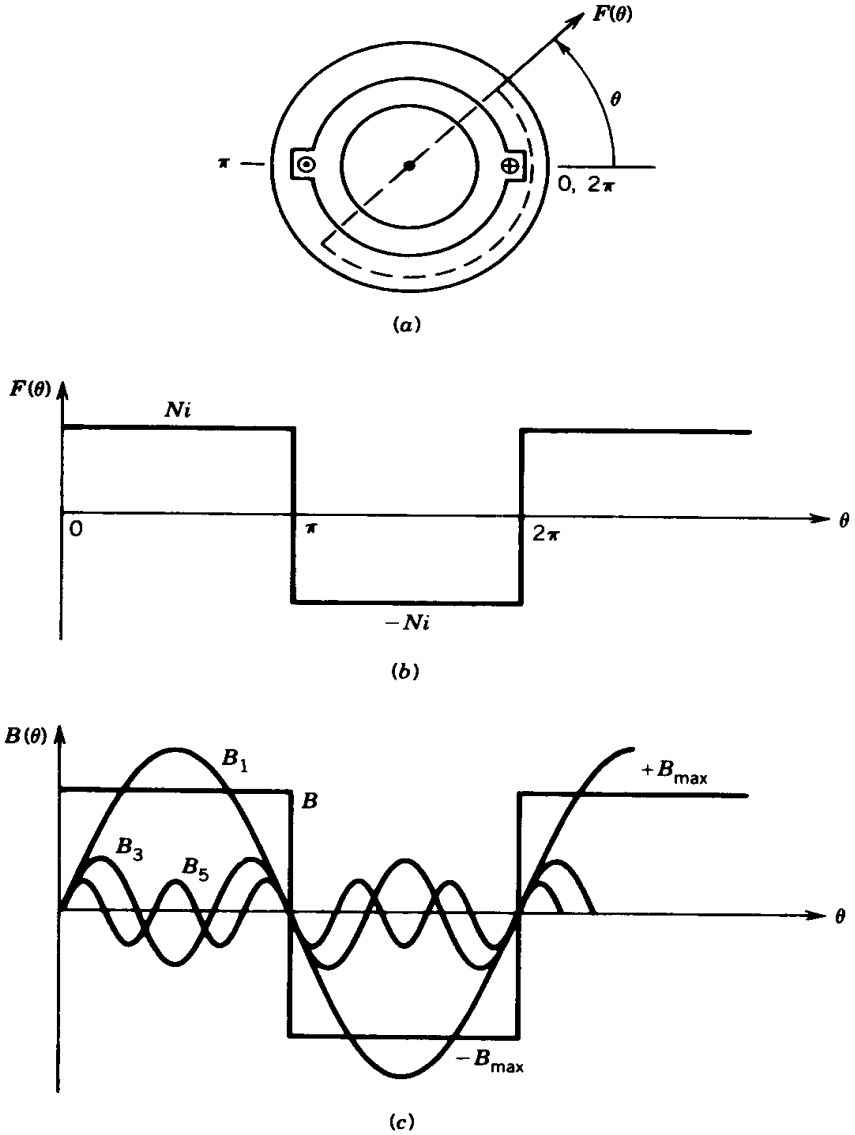
و سایر هارمونیکهای چگالی شار بقرار زیرند :

$$B(\theta) = B_{1(\max)} \sin(\theta) + B_{3(\max)} \sin(3\theta) + B_{5(\max)} \sin(5\theta) + \ldots \qquad (۱۶۵)$$

توزیع چگالی شار موج چهارگوش است و غیرسینوسی میباشد . مؤلفه های هارمونیک اصلی و سایر هارمونیکهای چگالی شار بقرار زیرند :

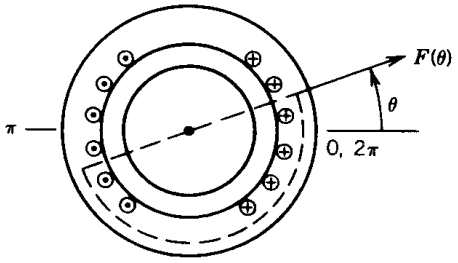
$$= \sum \frac{4B_{\max}}{\pi h} \sin(h\theta) \qquad (۱۶۶) \qquad \mathbf{h=1,3,5,...}$$

در رابطه فوق کلیه هارمونیکهای فرد مشخص شده است در شکل (۵۸-c) هارمونیک اصلی ، هارمونیک سوم و پنجم چگالی شار نشان داده شده است .

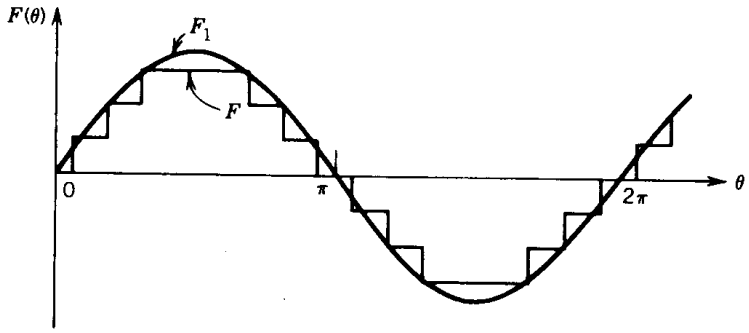


شکل (۵۸) سیم پیچ متمرکز (a) سیم پیچ در دوشیار استاتور(b) توزیع mmf در شکاف هوایی (c) توزیع چگالی شار درشکاف هوایی

هارمونیکهای چگالی شار ولتاژهای هارمونیک دار در سیم پیچ القاء میکنند باید گفت که هارمونیکها را میتوان با توزیع و گسترش سیم پیچ درون شیارهای مختلف کاهش داد در شکل (۵۹-a) یک سیم پیچ توزیع شده یا گسترده را درون ۱۲ شیار نشان میدهد توزیع mmf در اینحالت در شکل (۵۹-b) نشان داده شده است در این شکل مؤلفه هارمونیک اصلی mmf نیز در این شکل نشان داده شده است ملاحظه میشود توزیع mmf در سیستم چند شیاری به موج سینوسی نزدیکتر است



(a)



(b)

شکل(۵۹)سیم پیچ توزیع شده یا گسترده

باید دانست اگر تعداد شیارها بسمت بینهایت میل کند توزیع mmf سینوسی خواهد بود اما ساخت چنین ماشین ایده آلی غیرممکن است. شکل (۶۰) سیم پیچ استاتور یک ماشین سه فاز را نشان می دهد در عمل تعداد شیارها محدود است و سیم پیچ گسترده یا توزیع شده در این شیارها جاسازی شده اند .

شکل (۶۰)کلاف و سیم پیچی در یک ماشین سه فاز

ولتاژهاي القاء شده

برای سیم پیچ متمرکز N حلقه ای یا N دوری ، ولتاژ ، مؤثر القاء شده در هر فاز بقرار زیر است :

$$E = 4.44\, fN\phi \qquad (۱۶۷)$$

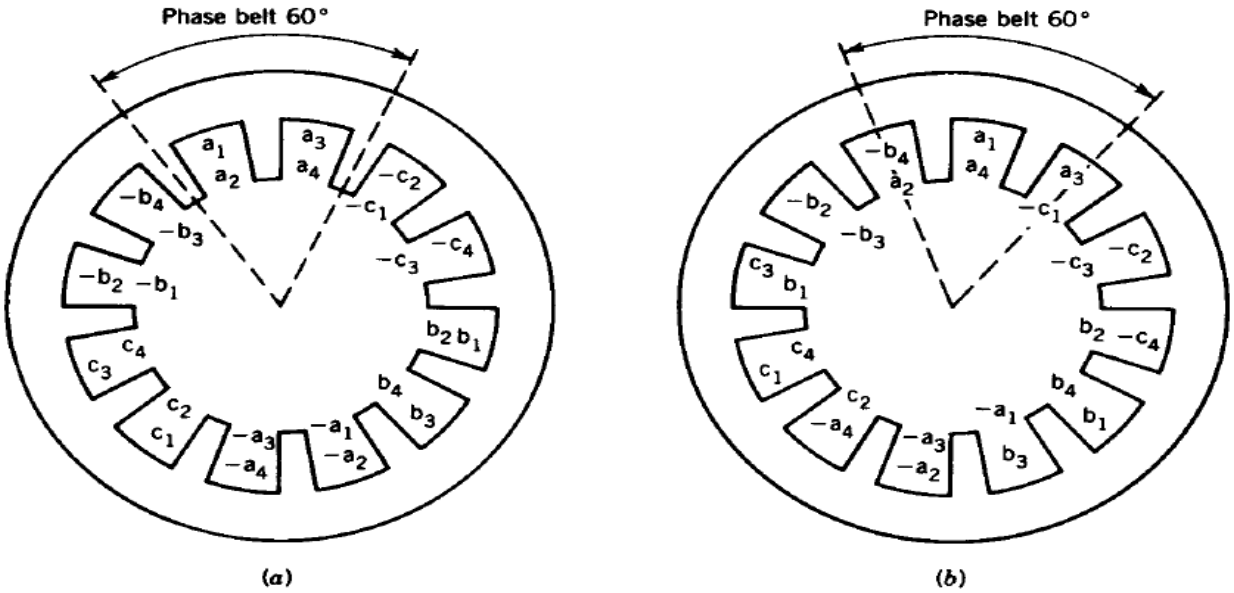
F فرکانس و Φ هارمونیک اصلی شار قطب است اگر سیم پیچ گسترده فرض شود داریم :

$$E = 4.44\, fN\phi K_w \qquad (۱۶۸)$$

باید دانست ولتاژ اخیر از ولتاژ رابطه قبل کمتر است K_w ضریب سیم پیچی نامیده میشود و کوچکتر از یک است مقدار K_w به نحوه سیم پیچی بستگی دارد .

آرایش سیم پیچی

شکل (a-۶۱) سیم پیچی گسترده مربوط به استاتور ماشین سه فازدو قطبی را نشان میدهد این سیم پیچی از نوع دو لایه با گام کامل است در این سیستم در هر شیار دو لبه کلاف جاسازی شده است سیم پیچ دو لایه در اکثر ماشینها بجز موتورهای کوچک مصرف دارد در این سیستم لبه های کلافی که در شیارهای مجاور جاسازی شده اند مربوط به فاز مشابه خواهند بود به عنوان مثال میتوان گفت a_4 , a_3 , a_2 , a_1 تشکیل کمربند فاز a را تشکیل می دهند . در ماشین سه فاز کمربند فاز ۶۰ درجه است در سیستم دولایه یک لبه یک کلاف مانند a_1 در کف شیار و لبه دیگر در بالای شیار دیگر قرار دارد باید دانست دهانه یا گام هر کلاف در شکل (a-۶۱) معادل ۱۸۰ درجه الکتریکی است ولذا سیم پیچی گام کامل شکل گرفته است در اینجا متذکر میشویم از آنجائیکه ماشین دو قطبی است گام قطبی نیز معادل ۱۸۰ درجه الکتریکی میباشد لذا در ماشین دو قطبی گام کامل سیم پیچی معادل گام کامل قطبی خواهد بود شکل (b-۶۱) دهانه یا گام کلاف کمتر از گام کامل قطبی است لذا سیم پیچی با گام کسری یا گام کوتاه شکل گرفته است



شکل(۶۱) سیم پیچ دولایه استاتور(a) گام کامل (b) گام کسری با گام کوتاه

در شکل (b-۶۱) کلاف a_1 , $-a_1$ پنج ششم گام قطبی را طی میکند (۱۵۰درجه الکتریکی). دراینصورت کمربندهای فاز بر روی هم می افتند یا فصل مشترک دارند. بعنوان مثال میتوان دید مه کمربند فازa شامل لبه های مربوط به فازc , b است (شکلb-۶۱) سیم پیچ با گام کوتاه اغلب در ماشینهای سه فاز AC مورد استفاده قرار میگیرد در این سیم پیچها طول سیم بندی کاهش می یابد و لذا در مس صرفه جوئی میکنیم و نیز همانطور که خواهیم دید دامنه برخی از هارمونیکها در توزیع mmf و ولتاژ القایی کاهش می یابد .

ضریب سیم پیچی

نحوه توزیع و گام کلافها بر ولتاژهای القاء شده در سیم پیچ اثر میگذارد در این بخش دو ضریب مورد توجه قرار میگیرد :

1. **ضریب توزیع K_d**
2. **ضریب گام K_p**

ضریب توزیع

در سیم پیچی متمرکز ولتاژهای القا شده در کلافها همفاز بوده و لذا ولتاژ سیم پیچی از جمع جبری ولتاژهای کلافها حاصل میشود . در سیم پیچ توزیع شده یا گسترده ولتاژهای القاء شده در کلافها همفاز نبوده و اختلاف فازی معادل α بین آنها بوجود می آید α زاویه شار نامیده میشود در اینصورت ولتاژ سیم پیچی از جمع فازوری ولتاژهای کلافها حاصل میشود ضریب توزیع (K_d) اینچنین تعریف میشود :

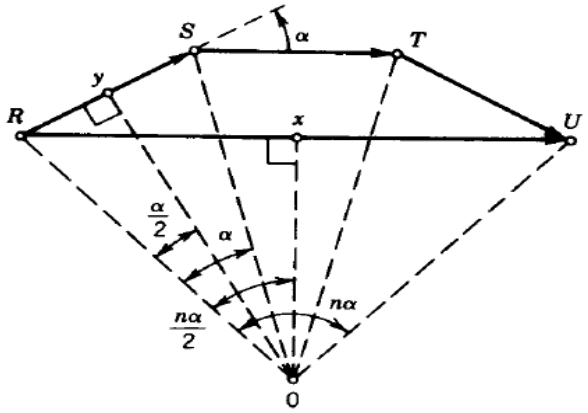
$$K_d = \frac{\text{جمع فازوری ولتاژهای کلاف}}{\text{جمع جبری ولتاژهای کلاف}} \qquad (۱۶۹)$$

α= زاویه بین دو شیار مجاور

n= تعداد شیارها به إزاءهر قطب یا تعداد شیارها به إزاء هر کمربند

گیریم $n=3$ باشد شکل (۶۲) ولتاژهای کلافها را بصورت فازورهای RS , ST , TU نشان میدهد باید دانست این فازورها وتر دایره ای بمرکز O میباشند گفتنی است که زاویه این وترها از دیدگاه مرکز دایره معادل α است . فازور RU معادل جمع فازوری RS , TU , ST است و همان ولتاژ سیم پیچی میباشد . زاویه وتر RU از دیدگاخ مرکز دایره O معادل $n\alpha$ است (دراینحالت خاص $n=3$ است) از رابطه (۱۶۹) و شکل (۶۲) داریم :

$$K_d = \frac{RU}{n(RS)} = \frac{2Rx}{n(2Ry)} = \frac{Rx}{nRy} = \frac{OR\cdot\sin\left(n\alpha/2\right)}{n\cdot OR\cdot\sin\left(\alpha/2\right)} = \frac{\sin\left(n\alpha/2\right)}{n\cdot\sin\left(\alpha/2\right)} \qquad (۱۷۰)$$



شکل(۶۲) ولتاژهای کلاف در سیم پیچ توزیع شده

ضریب گام

در کلافهای با گام کوتاه که دهانه یا گام کلاف کمتر از گام قطبی است ولتاژ القاء شده کمتر از حالت گام کامل است ضریب گام (K_p) را اینچنین تعریف میکنیم :

$$K_p = \frac{\text{ولتاژ القاء شده در کلاف با گام کوتاه}}{\text{ولتاژ القاء شده در کلاف با گام کامل}} \qquad (۱۷۱)$$

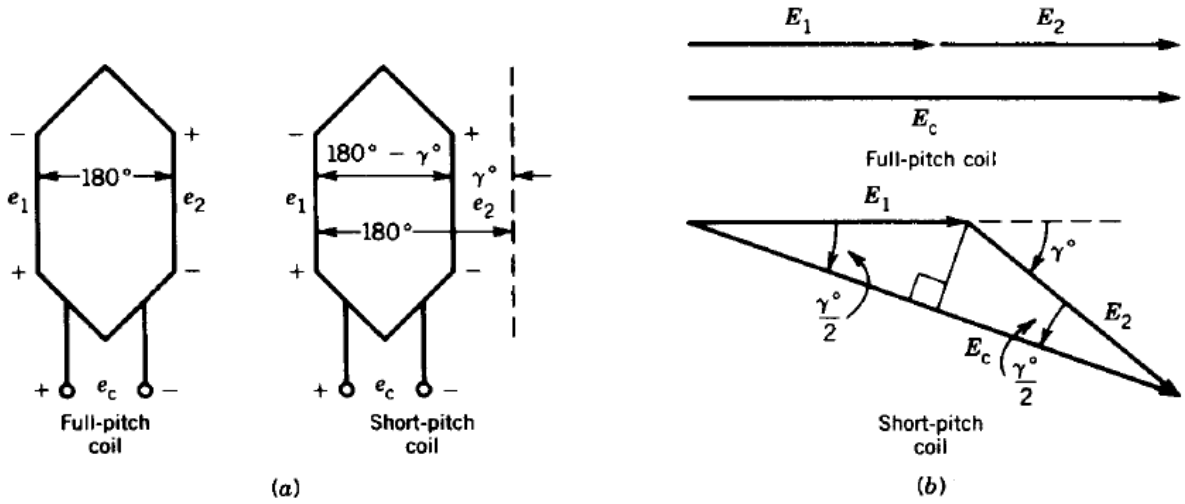
شکل (۶۳) ولتاژهای القایی در کلاف با گام کامل و گام کسری را نشان میدهد گام کلاف در حالت گام کسری یا گام کوتاه معادل $180-\gamma$ است بعبارت دیگر بمیزان γ ازگام کامل کوتاهتراست ولتاژ کلاف بقرار زیر است :

$$e_c=e_1+e_2 \qquad (۱۷۲)$$

برای گام کامل ولتاژهای e_2 , e_1 در زمانی مشابه ماکزیمم میشوند اما در گام کسری هرگاه e_1 ماکزیمم شود ، e_2 ماکزیمم نخواهد بود این امر در نمودار فازوری شکل (b-۶۳) نشان داده شده است در گام کسری یا گام کوتاه E_2 بمیزان γ با E_1 اختلاف فاز دارد گفتنی است که :

۱. E_1 فازور ولتاژ e_1 است .

۲. E_2 فازور ولتاژ e_2 است . گیریم : $E_1=E_2=E$



شکل(۶۳) ولتاژ القا شده در کلاف در گام کامل و گام کسری (گام کوتاه)

از رابطه (۱۷۱) و شکل (b-۶۳) داریم :

$$K_P=\frac{2E\cos\left(y/2\right)}{2E}=Cos\left(y/2\right) \qquad (۱۷۳)$$

ضریب سیم پیچی (K_W)

اگر کلافها درون چندین شیار توزیع شده باشند و گام آنها کسری یا گام کوتاه باشد ولتاژ القایی درون سیم پیچی از هردو ضریب فوق الذکر متأثر میشود پس :

$$K_W=K_d\times K_p \qquad (۱۷۴)$$

مثال (۹) :استاتور یک ماشین سه فاز شامل ۹ شیار به ازاء هر قطب است و شامل سیم پیچ دولایه متعادل سه فاز است گام کلافها کسری یا کوتاه بوده و معادل $\frac{7}{9}$ است بعبارت دیگر دهانه یا گام هر کلاف ۷ شیار میباشد ضریب سیم پیچی را حساب کنید ؟ براحتی داریم :

(زاویه شیار) $\alpha=\frac{180}{2}=90$ (گام کلاف) $=\frac{7}{9}\times 180=140$

گام کلاف کوتاه یا کسری است پس :

$$\gamma=180-140=40$$

تعداد شیارهای هر فاز به ازاء هر قطب بقرار زیر است : $n=\frac{9}{3}=3$

از رابطه (۱۷۰) داریم :

$$K_d = \frac{\sin\left(3 \times 20/2\right)}{3\sin\left(20/2\right)} = 0.9598$$

از رابطه (۱۷۳) داریم :

$$K_p = Cos\left(40/2\right) = 0.9397$$

از رابطه (۱۷۴) داریم :

$$K_W = 0.9598 \times 0.9397 = 0.9019$$

بعلت ضریبهای K_d , K_P ولتاژهای القایی بمیزان ۰/۹۰۱۹ کمتر خواهد شد .

هارمونیکهای فضائی و ضریبهای سیم پیچی

در روابط (۱۶۷) و (۱۶۸) فرض بر آن بود که ولتاژ القایی سینوسی است اما اگر توزیع چگالی شار سینوسی نباشد ولتاژ القایی در سیم پیچی غیرسینوسی خواهد بود . باید دانست K_d و K_p برای هر هارمونیک متفاوت خواهد بود باید دانست اختلاف فاز ولتاژ هارمونیک hام برای دو کلاف مجاور برابر $h\alpha$ خواهد بود لذا در هارمونیک h داریم :

$$K_{dh} = \frac{\sin\left(nh\alpha/2\right)}{n\sin\left(h\alpha/2\right)} \qquad (۱۷۵)$$

شکل (۶۴) جدول ضریب توان توزیع را رابی تعداد شیارهای مختلف تحت هارمونیکهای گوناگون نشان میدهد در این جدول n تعداد شیارها در هر فاز به ازاء هر قطب میباشد و n=1 سیم پیچ متمرکز را معرفی میسازد . باتوجه به این جدول میتوان گفت که در هارمونیک اصلی k_{d1} بین ۸ تا ۰/۹۵۶ تغییر میکند لذا توزیع سیم پیچی باعث کاهش ولتاژ القایی میگردد اما همین جدول نشان میدهد که سیم پیچی توزیع شده ولتاژهای القاء شده هارمونیک دار را نیز بشدت کاهش میدهد که خود از مزایای سیم پیچی توزیع شده یا گسترده محسوب میشود . گفتنی است که ضریب گام برای هارمونیک h ام بقرار زیر است :

$$K_{ph} = Cos\left(h\gamma/2\right) \qquad (۱۷۶)$$

شکل (۶۴) Kd در ماشین های سه فاز تحت هارمونیک های مختلف

Distribution Factor for Harmonics

n^a	$h = 1$	3	5	7	9	11
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.966	0.707	0.259	0.259	0.707	0.966
3	0.960	0.667	0.218	0.177	0.333	0.177
4	0.958	0.653	0.205	0.158	0.271	0.126
5	0.957	0.647	0.200	0.149	0.247	0.110
6	0.956	0.644	0.197	0.145	0.236	0.102
∞	0.955	0.637	0.191	0.136	0.212	0.087

[a] $n = 1$, concentrated winding; $n > 1$, distributed winding.

شکل (۶۵) جدول ضریب گام را برای هارمونیکهای مختلف نشان میدهد مشاهده میشود که در گامهای کوتاه ولتاژهای القائی هارمونیکهای تضعیف خواهند شد زیرا در گامهای کوتاه K_{ph} کمتر است .

باید دانست گام کسری را میتوان طوری اننتخاب کرد تا هارمونیک خاصی کاملا از بین برود برای از بین رفتن هارمونیک h ام باید :

$$\cos\left(h\gamma/2\right)=0\Rightarrow\left(h\gamma/2\right)=90\circ \qquad (۱۷۷)$$

$$\gamma=\frac{180}{h} \qquad (۱۷۸)$$

شکل(۶۵) **Kp** در ماشین های سه فاز تحت هارمونیک های مختلف

Coil Pitch $(180° - \gamma)^a$	Pitch Factor for Harmonics					
	$h = 1$	3	5	7	9	11
120° or 2/3	0.866	0.000	0.866	0.866	0.866	0.866
144° or 4/5	0.951	0.588	0.000	0.588	0.951	0.951
150° or 5/6	0.966	0.707	0.259	0.259	0.707	0.966
154° or 6/7	0.975	0.782	0.434	0.000	0.434	0.782
160° or 8/9	0.985	0.866	0.643	0.342	0.000	0.342
180° or 1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

[a] $\gamma = 0°$ for full-pitch coil.

بعنوان مثال برای از بین بردن هارمونیک سوم باید : $\gamma=180/3=60\circ$

ضریب سیم پیچی برای هارمونیک **h** ام بقرار زیر است :

$$K_{Wh}=K_{dh}\times K_{ph} \qquad (۱۷۹)$$

عملکرد موتورهاي القايي سه فاز در شرايط مختلف

در این بخش به چند حالت مختلف از عملکرد موتورهای القایی سه فاز اشاره می کنیم

عملکرد موتور در حالت سکون

یک موتور القایی سه فاز با روتور سیم بندی شده را در نظر میگیریم و فرض میکنیم که مدار روتور باز باشد اگر استاتور به برق سه فاز وصل شود میدان گردان در شکاف هوایی شکل میگیرد که با سرعت سنکرون n_s می چرخد (رابطه۱۴۵) . این میدان گردان در روتور و استاتور ولتاژ القاء کرده و فرکانس هردو ولتاژ القایی همان فرکانس شبکه خواهد بود (f_1) از رابطه (۱۶۲) مقدار این ولتاژها بقرار زیر است :

$$E_1=4.44\,f_1N_1\phi_PK_{W1} \qquad (۱۸۰)$$

$$E_2=4.44\,f_1N_2\phi_PK_{W2} \qquad (۱۸۱)$$

پس :

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{N_1}{N_2}\times\frac{K_{W1}}{K_{W2}} \qquad (۱۸۲)$$

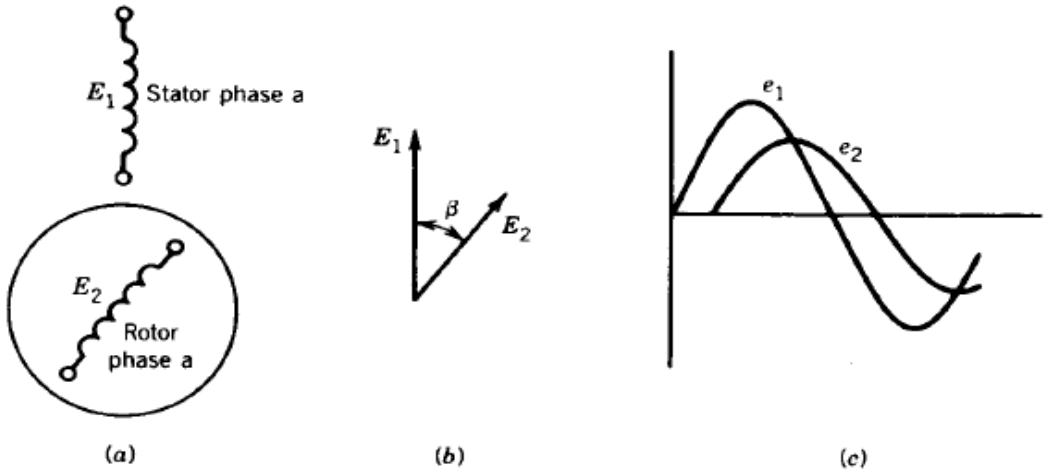
معمولا ضریب های سیم پیچی روتور و استاتور یعنی K_{w2} , K_{w1} باهم یکسانند پس :

$$\frac{E_1}{E_2}\approx\frac{N_1}{N_2}=\text{(نسبت دورها یا نسبت تبدیل)} \qquad (۱۸۳)$$

جابجا کننده فاز (اختلاف فاز دهنده)

اگر روتور را در وضعیتی مستقر سازیم که محور هر فاز استاتور با محور فاز همنام در روتور زاویه **β** سازد (شکل**a**-۶۶) ، دراینصورت ولتاژهای القاء شده در فازهای همنام در روتور و استاتور اختلاف فازی معادل **β** پیدا میکنند (شکلهای **b**-۶۶ و **c**-۶۶) . در شکل (۶۶) فقط فاز **a** نشان داده شده است پس اگر موتور القایی

در وضعیت سکون با شرایط فوق مستقر شود میتواند بصورت یک جابجا کننده فاز یا اختلاف فاز دهنده عمل کند . اگر به طریق مکانیکی و دستی وضعیت روتور را تغییر دهیم میتوان β را از صفر تا ۳۶۰ درجه تنظیم نمود .



شکل(۶۶)جابجا کننده فاز القایی

تنظیم کننده ولتاژ (رگولاتور ولتاژ)

در این سیستم روتور به چرخش درنمی آید و حالت سکون حفظ می گردد . شکل (a-۶۷) یک تنظیم کننده ولتاژ را نشان میدهد . شکل (b-۶۷) نمودار فازوری سیستم را نشان میدهد اگر بطریق مکانیکی یا دستی روتور را بچرخانیم ولتاژ خروجی (V_O) مکان هندسی دایره ای شکل را طی میکند .اگر سیم پیچهای روتور استاتور مشابه باشند لذا E_1 , E_2 یکسان بوده و میتوان V_O را از صفر تا $2V_{in}$ تغییر داد . V_{in} ولتاژ منبع ورودی است . در حقیقت این تنظیم کننده توانسته است V_{in} را به V_O مبدل سازد . این تنظیم کننده ولتاژ از نوع القایی است و دارای مزایای زیر نسبت به اتوترانسفورماتور با خروجی متغیر است :

الف : دائما و بدون وقفه و تغییرات پله ای تنظیم ولتاژ خروجی میسر میشود .

ب : به انشعاب لغزان همچون اتوترانسفورماتور نیاز داریم .

معایب این دستگاه نسبت به اتوترانسفورماتور بقرار زیر است :

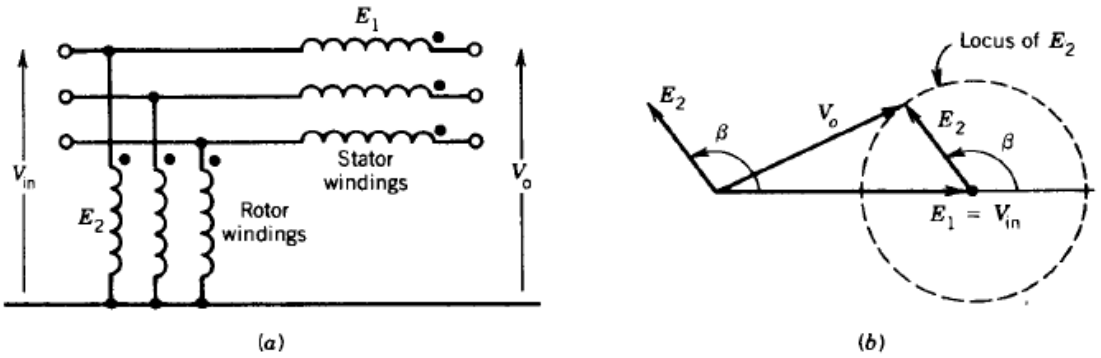
۱. اندوکتانس نشتی آن بیشتر از اتوترانسفورماتور است .
۲. جریان مغناطیس کنندگی آن بیشتر از اتوترانسفورماتور است .
۳. هزینه آن بیشتر از اتوترانسفورماتور میباشد .

عملکرد موتورهاي القايي سه فاز در حالت کار عادي (چرخش)

در تمامی حالات فوق شرایطی فراهم است تا روتور بچرخش نیاید و حالت سکون حفظ گردد . اکنون فرض میکنیم مدار روتور بسته شود (اتصال کوتاه گردد) و استاتور به منبع AC سه فاز وصل شود در اینصورت ولتاژهای القاء شده در روتور باعث برقراری جریانهای القایی در فازهای روتور میشود جریانهای روتور ومیدان گردان استاتور باعث پدید آمدن گشتاور و درنتیجه چرخش محور ماشین میگردد . طبق قانون لنز نیز جهت چرخش محور و روتور باید هم جهت چرخش میدان گردان باشد تا سرعت نسبی بین میدان گردان و سیم

پیچی روتور کم شود . پس از سرعت گیری ، روتور بحالت ماندگار رسیده و تحت سرعت **n** خواهد چرخید . باید دانست **n** همواره از n_s که سرعت سنکرون یا سرعت دوران میدان گردان است کوچکتر میباشد .
اگر $n=n_s$ گردد ولتاژ القایی در روتور حاصل نمی شود . لذا جریان در روتور پدیدار نشده و گشتاور شکل نمی گیرد . از آنجائیکه سرعت دوران محور در موتورهای القایی با سرعت سنکرون مساوی نیست لذا گاهی به این موتورها لفظ موتورهای آسنکرون نیز اطلاق میگردد . اکنون کمیتی بنام لغزش را در اینگونه موتورها معرفی میکنیم و آنرا با **s** نشان میدهیم :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \qquad (۱۸۴)$$



شکل(۶۷) تنظیم کننده ولتاژالقایی (رگولاتور ولتاژ)

در رابطه بالا سرعتها برحسب دور در دقیقه **(rpm)** بیان میشوند اگر صورت و مخرج کسر فوق را در $\frac{2\pi}{60}$ ضرب کنیم در اینصورت سرعتها برحسب رادیان بر ثانیه خواهد بود یعنی :

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

واضح است که **s** موتورهای القایی سه فاز عددی بین صفر و یک است یعنی :

۱. در حالت سکون یا لحظه راه اندازی $n=0$ است و لغزش برابر یک میباشد ($s=1$)
۲. در شرایطی که $n=n_s$ گردد دراینصورت $s=0$ است البته در موتورهای القایی هیچوقت این شرط رخ نمیدهد زیرا در موتورهای القایی در حالت کار عادی $n< n_s$ میباشد .
۳. لغزش در حالت کار عادی موتورهای القایی عددی است اعشاری .
۴. گاهی لغزش بصورت درصد بیان میگردد مثلا لغزش ۰/۰۲ بصورت ۲ درصد معرفی میشود .
۵. گاهی لغزش را برحسب دور در دقیقه بیان میکنند و داریم :

$$(\text{لغزش دور در دقیقه ای}) = n_s - n = sn_s$$

بعبارت دیگر اگر بر روی روتور بنشینیم درمیابیم که روتور پشت میدان گردان می لغزد و سرعت نسبی بین روتور و میدان گردان برابر n_s-n است . گفتنی است که فرکانس ولتاژ جریان القایی در روتور با سرعت نسبی بین روتور و میدان گردان متناسب است و از رابطه (۱۴۵) داریم :

$$f_2 = \frac{p}{120}(n_s - n) = \frac{p}{120} sn_s = sf_1 \qquad (۱۸۵)$$

f_1 فرکانس جریان و ولتاژ استاتور بوده (فرکانس منبع تغذیه) و f_2 فرکانس ولتاژ جریان القایی در روتور است به f_2 فرکانس لغزش نیز گفته میشود ولتاژ القاء شده در روتور در تحت لغزش **s** بقرار زیر است :

$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 \phi_P K_{w2} = 4.44 s f_1 N_2 \phi_P K_{w2} = s E_2 \qquad (۱۸۶)$$

E_2 ولتاژ القاء شده در روتور در حالت سکون بوده و به سختی دیگر فرکانس این ولتاژ برابر f_1 است جریانهای القایی در سیم پیچ سه فاز روتور نیز میدان گردانی پدید می آورند سرعت این میدان گردان نسبت به روتور بشرح زیر است :

$$n_2 = \frac{120 f_2}{p} = \frac{120 s f_1}{p} = s n_s \qquad (۱۸۷)$$

از آنجائیکه روتور با سرعت $(rpm)_n$ می چرخد ، میدان گردان حاصله توسط جریانهای القایی رتور (میدان گردان روتور) در شکاف هوائی با سرعت زیر می چرخد .

$$n + n_2 = (1-s) n_s + s n_s = n_s (rpm)$$

لذا میدان گردان استاتور و میدان گردان روتور هردو با سرعت سنکرون (n_s) در شکاف هوائی می چرخند و درنتیجه نسبت بهم ساکن هستند . تداخل این دو میدان و اثر متقابل آنها برهم ، گشتاور را پدید می آورد . در اینجا متذکر میشویم هرگاه از سرعت موتور نام میبریم منظور همان سرعت روتور یا سرعت محور یا n میباشد (رابطه۱۸۴) . باز یادآوری میکنیم در موتورهای القایی همواره داریم : $n < n_s$

لذا به آنها موتورهای آسنکرون نیز گفته میشود .

مثال (۱۰): یک موتور القایی سه فاز ۴۶۰ ولتی ، ۱۰۰ اسب بخاری ، ۴ قطبی و ۶۰ هرتزی مفروض است و توان اسمی خروجی را در لغزش ۵ درصد (۰/۰۵) تحویل میدهد . مطلوبست :

الف : سرعت سنکرون میدان گردان استاتور و سرعت موتور

ب : سرعت میدان گردان روتور

ج : فرکانس مدار روتور

د : لغزش برحسب rpm یا slip(rpm)

ه : سرعت میدان گردان روتور در حالتهای زیر :

۱. نسبت به روتور
۲. نسبت به استاتور
۳. نسبت به میدان گردان استاتور

و : در شرایط کار عادی (لغزش ۵ درصد) ولتاژ القایی در روتور را حساب کنید . نسبت دورها (نسبت تبدیل) را ۰/۰۵ :۱ بگیرید .

حل :

الف : براحتی داریم :

$$n_s = \frac{120 f}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 rpm$$

$$n = (1-s) n_s = (1-0.05) 1800 = 1710 rpm$$

ب : بسهولت میتوان گفت ۱۸۰۰ دور در دقیقه

ج : براحتی داریم :

$$f_2 = s f_1 = 60 \times 0.05 = 3 HZ$$

د : به آسانی داریم :

$$slip(rpm) = sn_s = 1800 \times 0.05 = 90rpm$$

ه :

۱. **90 rpm**
۲. **1800 rpm**
۳. **0 rpm**

و : گیریم ولتاژ القایی در استاتور معادل ولتاژ اعمال شده به موتور باشد پس :

$$E_{2s} = sE_2 = s\frac{N_2}{N_1}E_1 = 0.05 \times 0.5 \times \frac{460V}{\sqrt{3}} = 6.64V/phase$$

بررسي سه حالت موتوري ، ژنراتوري و ترمز در ماشينهاي القايي سه فاز

ماشینهای القایی در سه حالت کلی زیر میتوانند مورد بهره برداری قرار گیرند :

۱. حالت موتوری
۲. حالت ژنراتوری
۳. حالت ترمز

برای بررسی مفاهیم این سه حالت به شکل (**a**-۶۸) توجه میکنیم که در آن یک ماشین القایی هم محور یک ماشین **DC** است .

حالت موتوري

پایانه های استاتور ماشین القایی را به شبکه سه فاز **AC** وصل میکنیم (شکل**a**-۶۸) . در اینحالت میدان گردان استاتور شکل گرفته عمل القاء در روتور صورت می پذیرد و گشتاور حاصل میشود . روتور در جهت میدان گردان استاتور بچرخش درمی آید و سرعت آن در نهایت **n** است و همواره داریم :

$$n_s < n$$

واضح است که $\mathbf{n_s}$ سرعت سنکرون میدان گردان استاتور است (شکل**b**-۶۸) درحالتی که ماشین القایی بصورت موتور کار میکند بصورت یک محرک اولیه برای ماشین **DC** عمل میکند و ماشین **DC** در حالت ژنراتوری قرار میگیرد .

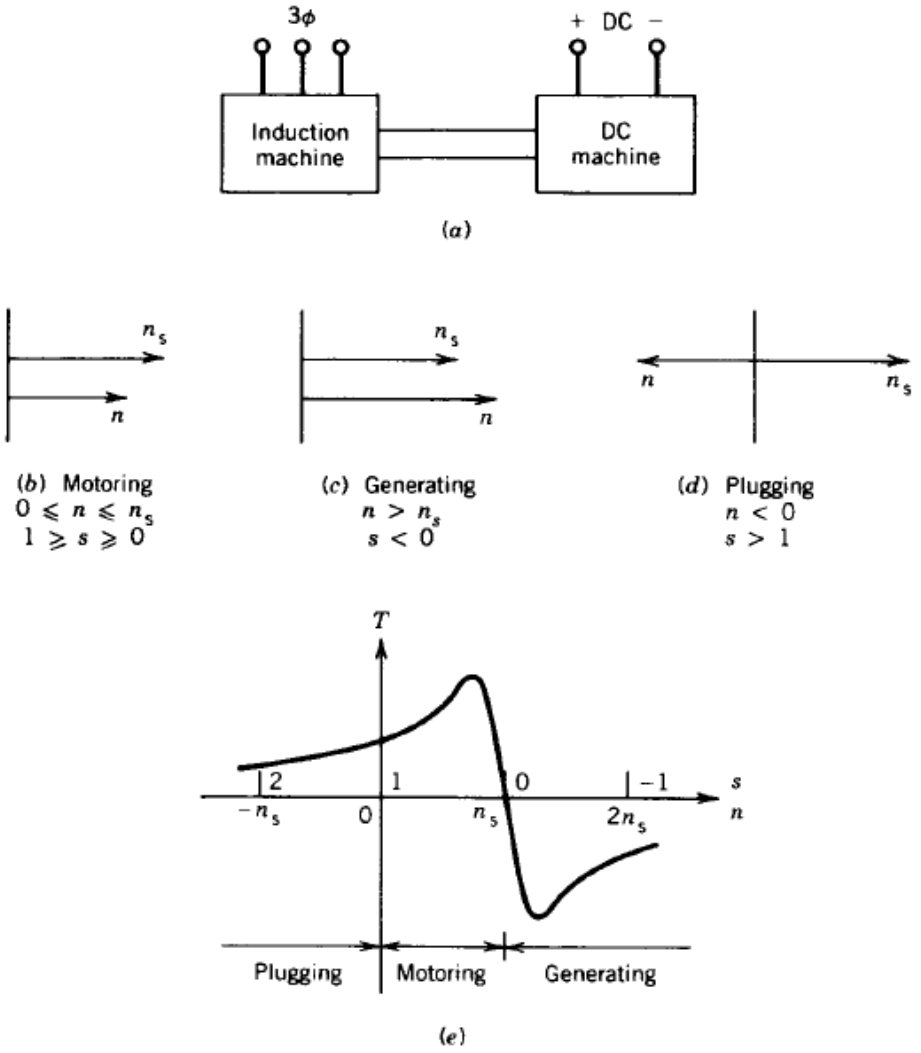
حالت ژنراتوري

دراینحالت پایانه ماشین القایی سه فاز را به شبکه سه فاز وصل کرده و ماشین **DC** را در حالت موتوری بکار می اندازیم . سرعت چرخش موتور **DC** را طوری تنظیم میکنیم که سرعت دوران محور **(n)** از $\mathbf{n_s}$ یا سرعت میدان گردان استاتور ماشین القایی بیشتر گردد اما جهت چرخش محور همان جهت دوران میدان گردان ماشین القایی باشد . دراینحالت ماشین القایی در حالت ژنراتوری کار میکند و به آن ژنراتور القایی یا ژنراتور آسنکرون نیز گفته میشود . شکل (**c**-۶۸) شرایط کار ژنراتور القایی را نشان میدهد .

حالت ترمزی

گیریم محور دو ماشین در شکل (**a**-۶۸) از هم جدا شود و ماشین القایی به شبکه سه فاز وصل گردد و در حالت موتوری کار کند . اگر توالی فاز ولتاژهای اعمالی به استاتور به ناگهان عوض شود و از توالی فاز **abc** به

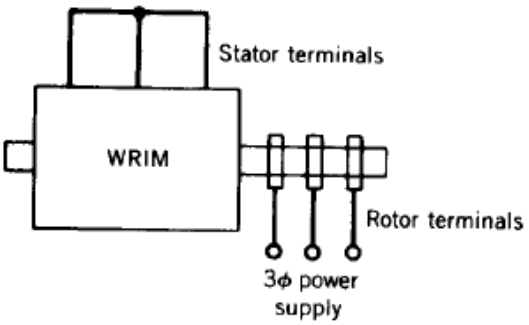
توالی فاز **acb** تغییر ماهیت دهد دراینصورت جهت چرخش میدان گردان استاتور نسبت به جهت چرخش روتور که به دوران خود بخاطر اینرسی ادامه میدهد عوض خواهد شد و حالت ترمز پیش می آید در اینحال نهایتا سرعت روتور صفر شده و در جهت مخالف شروع به دوران میکند و دراینجاست که باید هرچه سریعتر در لحظه سرعت صفر منبع تغذیه از موتور جدا شود . شکل (**d**-۶۸) جهت سرعتها را در حالت ترمز نشان میدهد . شکل (**e**-۶۸) تغییرات گشتاور برحسب لغزش یا سرعت را در سه حالت موتوری ، ژنراتوری و ترمز به نمایش میگذارد .



شکل(۶۸) نمایش حالت های موتوری- ژنراتوری وترمزی در ماشین های القایی

موتور القايي سه فاز معکوس

یک موتور القایی سه فاز با روتور سیم بندی شده را درنظر میگیریم . اکنون منبع تغذیه سه فاز را از طریق حلقه های لغزان به روتور وصل کرده و سیم پیچ سه فاز استاتور را اتصال کوتاه میکنیم . در اینحالت موتور القایی معکوس شکل می گیرد (شکل۶۹) دراینحالت جریانهای سه فاز روتور میدان گردانی پدید می آورند و این میدان گردان در شکاف هوایی شکل میگیرد . این میدان گردان نسبت به روتور با سرعت سنکرون می چرخد اگر روتور ساکن باشد این میدان در شکاف هوایی نیز با سرعت سنکرون میچرخد . لذا در استاتور ولتاژ و جریان القایی پدید می آید و گشتاور حاصل میشود . اگر روتور مجاز به حرکت باشد طبق قانون لنز در جهت خلاف میدان گردان خواهد چرخید تا ولتاژ القایی در استاتور کاهش یابد .



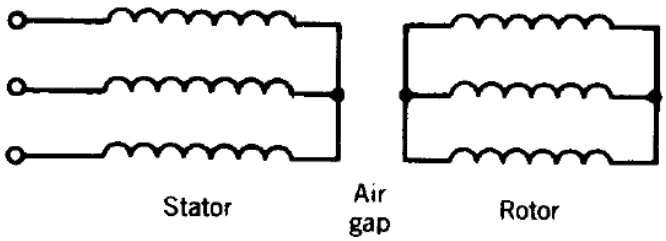
شکل (۶۹) موتور القایی معکوس (روتور از نوع سیم بندی شده **WRIM**)

مدار معادل

در این بخش مدار معادل موتورهای القایی (آسنکرون) سه فاز را مورد بررسی قرار میدهیم . مدار معادل مطرح شده در این بخش مربوط به حالت ماندگار (مانا) بوده و بهکار عادی موتور در سرعت یا لغزشهای مختلف مربوط میشود . در این بحث برای سهولت فرض میشود که روتور از نوع سیم بندی شده است (شکل۷۰) . اگر روتور قفس سنجابی باشد برای سهولت آنرا با یک سیم پیچ سه فاز مدل میکنیم . میدانیم درصورت عبور جریان از استاتور دو میدان گردان در شکاف هوایی شکل می گیرد یعنی :

۱. میدان گردان استاتور که با سرعت n_s (سرعت سنکرون) می چرخد .
۲. میدان گردان روتور که درشکاف هوایی با سرعت n_s دوران میکند .
۳. منتجه دو میدان فوق الذکر نیز در شکاف هوایی با سرعت n_s می چرخد .

باید دانست این میدان منتجه در سیم پیچهای استاتور ولتاژهائی القاء میکند و فرکانس این ولتاژها f_1 است . f_1 فرکانس منبع تغذیه استاتور میباشد .



شکل (۷۰) موتور القایی با روتور سیم بندی شده

باید گفت میدان منتجه در روتور نیز ولتاژ القاء میکند و فرکانس ولتاژ القایی در آن f_2 است . همانطور که قبلا گفته شد به f_2 فرکانس لغزش نیز گفته میشود . اکنون اینطور به نظر می رسد که مدار معادل باید شبیه ترانسفورماتور باشد .

سیم پیچی استاتور

مدل هر فاز استاتور مطابق شکل (a-۷۱) است که :

۱. V_1 ولتاژ فاز در پایانه استاتور است بعبارت دیگر V_1 ولتاژ فاز شبکه تغذیه میباشد و برابر $V_{LL}/\sqrt{3}$ است (V_{LL} ولتاژ خط- خط شبکه تغذیه میباشد)
۲. R_1 مقاومت هر فاز سیم پیچ استاتور است .

۳. L_1 راکتانس نشتی هر فاز سیم پیچ استاتور میباشد .

۴. E_1 ولتاژ القاء در هر فاز استاتور است .

۵. L_m راکتانس مغناطیس کنندگی در هر فاز استاتور میباشد .

۶. R_c مقاومت نشان دهنده تلفات هسته استاتور در هر فاز است .

گفتنی است از آنجائیکه موتورهای سه فاز از نظر ساختمان روتور و استاتور متعادل هستند پس برای تحلیل آنها در شرایط مانا کافی است یک فاز را مورد مطالعه قرار دهیم و لذا برای استاتور مدل تکفاز ارئه شده است .

باتوجه به شکل (a-۷۱) مشاهده میشود که شباهتی بین مدل استاتور و مدل سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور وجود دارد تنها تفاوت در میزان کمیتها و متغیرهاست . بعنوان مثال میتوان گفت بخاطر وجود شکاف هوایی ، جریان تحریک (I_Φ) در موتورها بزرگتر از I_Φ ترانسفورماتورها خواهد بود .

در موتورها I_Φ بین ۳۰ تا ۵۰ درصد جریان اسمی موتور است اما در ترانسفورماتورها I_Φ بین ۱ تا ۵ درصد جریان اسمی است . در موتورها بخاطر وجود شکاف هوایی ، X_1 از راکتانس نشتی اولیه ترانسفورماتور بزرگتر است . یکی دیگر از دلایل بزرگتر بودن X_1 در موتورها آنست که سیم پیچی های استاتور درون شیارهای متعدد گسترده و توزیع شده اند .

مدار روتور

باتوجه به مطالب قبلی درمیابیم که مدار معادل هر فاز روتور مطابق شکل (b-۷۱) است .

باز میگوییم که چون سیستم سه فاز متعادل است کافی است یکفاز آنرا مورد بررسی قرار دهیم باید دانست :

۱. E_2 ولتاژ القاء شده در هر فاز روتور در حالت سکون است (تحت فرکانس f_1)

۲. R_2 مقاومت هر فاز روتور است .

۳. L_2 راکتانس نشتی هرفاز روتور میباشد .

فرکانس مدار روتور دیگر f_1 نبوده و برابر f_2 است و میدانیم : $f_2 = sf_1$

باتوجه به شکل (b-۷۱) جریان هر فاز روتور بقرار زیر است :

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} \qquad (۱۸۸)$$

توان مصرف شده در مدار روتور یا تلفات مسی روتور بقرار زیر است : $P_2 = I_2{}^2 R_2$ (۱۸۹)

رابطه (۱۸۸) را اینچنین می نویسیم :

$$I_2 = \frac{E_2}{(R_2/s) + jX_2} \qquad (۱۹۰)$$

باتوجه به رابطه (۱۹۰) مدار معادل هرفاز روتور مطابق شکل (c-۷۱) خواهد بود . اکنون دو مدار معادل نشان داده شده در شکلهای (b-۷۱) و (c-۷۱) را مقایسه میکنیم :

الف : جریان روتور (I_2) در هر مدار از نظر مقدار یکسان بوده و همفاز نیز میباشند .

ب : در شکل (b-۷۱) فرکانس I_2 برابر f_2 و در شکل (c-۷۱) فرکانس I_2 معادل f_1 است .

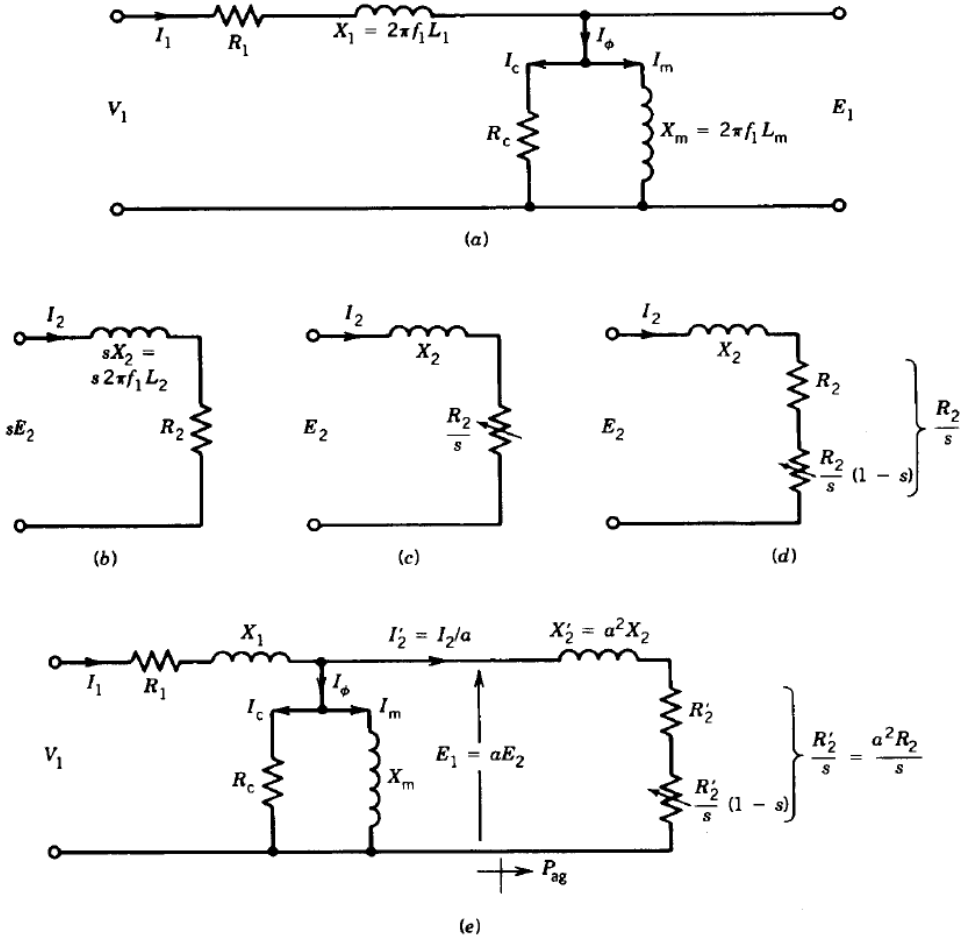
ج : راکتانس در مدار شکل (۲-۷۱) برابر $s.X_2$ و در شکل (c-۷۱) معادل X_2 است .

د : مقاومت در شکل (b-۷۱) معادل R_2 و در شکل (c-۷۱) برابر R_2/s است .

ه : ولتاژ القاء شده در روتور در شکل (۲-۷۱) برابر E_2s و در شکل (c-۷۱) معادل E_2 است .

و : توان در مدار شکل (b-۷۱) از رابطه (۱۸۹) بدست می آید اما د شکل (c-۷۱) از رابطه زیر بدست می آید :

$$P = I_2^{\,2}\frac{R_2}{s} = \frac{P_2}{s} \qquad (۱۹۱)$$



شکل (۷۱) نحوه پیدا کردن مدار معادل موتور القایی سه فاز

معمولا موتورها در لغزش کوچک کار می کنند پس :

$$\mathbf{P}_{((۱۹۱)\text{ معادله})} > \mathbf{P}_{((۱۸۹)\text{ معادله})}$$

گفتنی است فرکانس در مدار شکل (c-۷۱) معادل فرکانس استاتور (f_1) و فرکانس در مدار شکل (b-۷۱) برابر f_2 است . پس شکل (c-۷۱) مدار معادل روتور از دیدگاه استاتور است . لذا توان P ذکر شده در معادله (۱۹۱) که بزرگتر از P در رابطه (۱۸۹) است ، همان توان عبوری از شکاف هوایی بوده که وارد روتور میشود . بخشی از P در رابطه (۱۹۱) توان مورد نیاز رابطه (۱۸۹) را تأ مین میکند و بخشی دیگر به توان مکانیکی تبدیل میشود . رابطه (۱۹۱) را اینچنین می نویسیم :

$$P = P_{ag} = I_2^{\,2}\left[R_2 + \frac{R_2}{s}(1-s)\right] \qquad (۱۹۲)$$
$$= I_2^{\,2}\frac{R_2}{s}$$

P_{ag} توان عبوری از شکاف هوایی است که وارد روتور می گردد .گفتنی است که تمامی توانهای فوق الذکر مربوط به یکفاز ماشینی است (مدل تکفاز) . از بحث فوق نتیجه میشود که مدل رتور از دیدگاه استاتور

میتواند مطابق شکل (d-۷۱) باشد و فرکانس این مدل همان f_1 است . رابطه (۱۹۲) از دو قسمت تشکیل شده است.

۱. قسمت اول که همان رابطه (۱۸۹) بوده و نمایانگر تلفات اهمی یا مسی روتور است $\left(R_2 {I_2}^2\right)$

۲. قسمت دوم یا $R_2 {I_2}^2 \left(1-s\right)/s$ که توان مکانیکی حاصله نام دارد .

بسهولت داریم :

$$P_{mech} = {I_2}^2 \frac{R_2}{s}(1-s) \qquad (۱۹۳)$$

$$= (1-s)P_{ag} = \frac{1-s}{s} P_2 \qquad (۱۹۴)$$

و :

$$P_2 = {I_2}^2 R_2 = sP_{ag} \qquad (۱۹۵)$$

پس :

$$P_{ag}:P_2:P_{mech}=1:s:1-s \qquad (۱۹۶)$$

از گفتار بالا نتیجه میشود که عملکرد مناسب موتور القایی در لغزشی کم حاصل میشود زیرا در لغزش کوچک بخش اعظم P_{ag} به P_{mech} تبدیل میشود اگر لغزش زیاد باشد بخش کمی از P_{ag} به P_{mech} تبدیل شده و بخش اعظم P_{ag} بصورت گرما در روتور هدر میرود لذا ممکن است در این شرایط سیم پیچی روتور آسیب ببیند گفتنی است در حالت کار عادی بخشی از P_{mech} بصورت اصطکاک و تهویه هدر میرود و مابقی بصورت توان خروجی بر روی محور ظاهر میشود .

مدار معادل کامل

باتوجه به نکات فوق الذکر میتوان گفت :

۱. شکل (a-۷۱) مدار معادل هر فاز استاتور را در فرکانس f_1 نشان میدهد .

۲. شکلهای (c-۷۱) و (d-۷۱) مدار معادل هر فاز روتور را از دیدگاه استاتور تحت فرکانس f_1 نشان میدهد

لذا میتوان مدار معادل روتور را به مدار معادل استاتور ملحق نمود و به مدار معادل موتور دست یافت البته این مدار معادل مربوط به هر فاز موتور است در مدارهای معادل روتور و استاتور ، E_2 , E_1 باتوجه به نسبت دورها یا نسبت حلقه ها $\left(a = \frac{N_1}{N_2}\right)$ بهم مربوط میشوند لذا مدارمعادل کامل موتور همچون شکل (e-۷۱) خواهد بود

باید دانست :

۱. این مدار معادل برای یکفاز (معمولا فاز a) معتبر است .

۲. در این مدار معادل کلیه کمیتها (X,R) مربوط به هر فاز میباشند .

۳. در این مدار معادل کلیه کمیتها به سمت استاتور ارجاع داده شده است .

۴. فرکانس این مدار f_1 بوده که معادل فرکانس منبع تغذیه استاتور است .

۵. این مدار معادل شباهت زیادی به مدار معادل ترانسفورماتور دارد .

مثال (۱۱): یک موتور القایی سه فاز ۴۶۰ ولتی و ۴ قطبی و ۶۰ هرتزی مفروض است در سرعت ۱۷۲۸ دور در دقیقه توان اسمی را به بار متصل به محور تحویل میدهد مجموع تلفات تهویه و اصطکاک ۷۵۰ وات است . مطلوبست :

الف : توان مکانیکی حاصله توسط ماشین

ب : توان عبوری از شکاف هوایی

ج : تلفات مسی روتور

حل الف : توان خروجی که بر روی محور ظاهر میشود بقرار زیر است :

$$P_{out} = 15 \times 746 = 11190W$$

توان مکانیکی حاصله بقرار زیر است : $P_m = P_{out} + P_{f,w}$

باید دانست $P_{f,w}$ مجموع تلفات تهویه و اصطکاک است پس : $P_m = 11190 + 750 = 11940W$

ب : بسهولت داریم :

$$n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800rpm$$

$$s = \frac{1800 - 1728}{1800} = 0.04$$

$$P_{ag} = \frac{11940}{1 - 0.04} = 12437.5W$$

ج : براحتی داریم :

$$P_2 = 0.04 \times 12437.5 = 497.5W$$

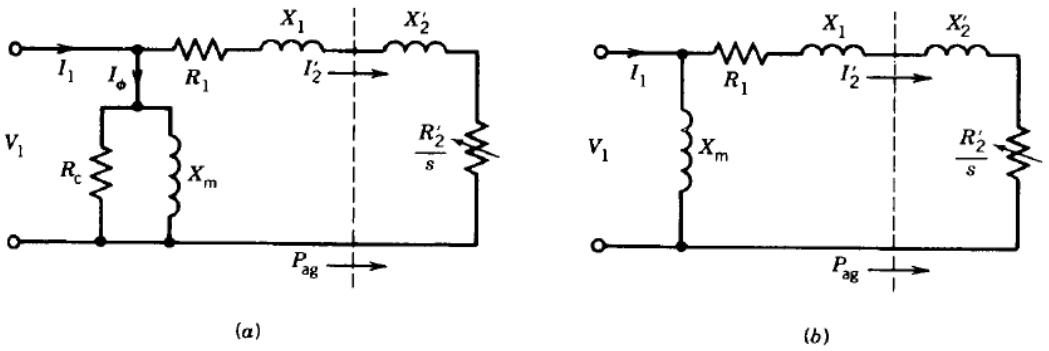
معرفي چند مدار معادل تقريبي و ساده براي موتورهاي القايي سه فاز

مدار معادل نشان داده شده در شکل (e-۷۱) یک مدل نسبتا کامل و جامع است و برای هر فاز در حالت ماندگار صادق میباشد . این مدار در حقیقت یک مدار RL بوده که نسبتا پیچیده نیز می باشد لذا برای تحلیل موتورها مدارهای ساده تری نیز پیشنهاد شده است .

مدار معادل تقريبي

در شکل (e-۷۱) اگر از افت ولتاژ در X_1 , R_1 چشم پوشی شود و E_1 و V_1 را تقریبا مساوی بگیریم دراینصورت میتوان شاخه های موازی که به شاخه های مغناطیس کنندگی موسومند را به ابتدای مدار معادل منتقل نمود و به شکل (a-۷۲) دست یافت . می بینیم تحلیل این مدار RL بسیار ساده است باید دانست اگر V_1 و f_1 ثابت باشند تلفات هسته استاتور که توسط R_C مدل میشود عددی ثابت خواهد بود . در شرایط بی باری که موتور بار مکانیکی خاصی را نمی چرخاند سرعت موتور (سرعت محور) خیلی به سرعت سنکرون نزدیک است لذا در شرایط بی باری لغزش بسیار کم و فرکانس روتور نیز بسیار ناچیز است و درنتیجه میتوان از تلفات هسته روتور چشم پوشی نمود در سرعتهای کمتر (لغزش بیشتر) فرکانس روتور f_2 افزونتر میشود و تلفات هسته روتور زیاد میگردد . اما عمدتا موتورها در لغزش کم کار میکنند و لذا f_2 عددیست کوچک . بهمین منظور در تحلیل موتورها عمدتا از تلفات هسته روتور صرفنظر میگردد . گفتنی است در صورتیکه V_1

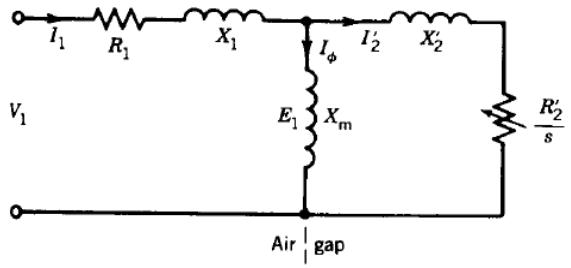
و f_1 ثابت باشند مجموع تلفات هسته استاتور ، تلفات تهویه و تلفات اصطکاک معمولا عددی ثابت است و در سرعتهای گوناگون آنچنان تغییر نمی کند لذا میتوان کل این سه تلفات را یک کاسه کرده و به آن تلفات ثابت ماشین یا تلفات چرخشی اطلاق میکنیم (P_{rot}) دراینصورت میتوان R_C را از مدار معادل حذف نمود و به شکل (b-۷۲) رسید .



شکل (۷۲) مدارهای معادل تقریبی

مدار معادل پیشنهادي IEEE

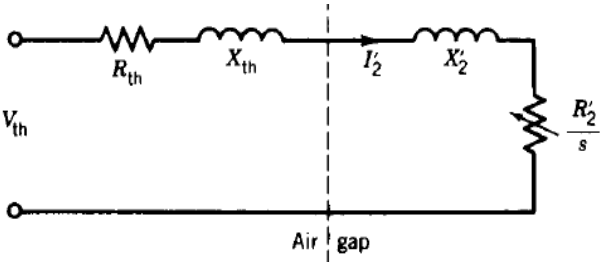
در موتورهای القایی سه فاز بخاطر وجود شکاف هوایی بین روتور و استاتور جریان تحریک (I_Φ) زیاد است و حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد جریان اسمی را شامل میشود . همچنین راکتانس نشتی استاتور X_1 نیز عددی نسبتا زیاد است درچنین شرایطی انجمن مهندسین برق و الکترونیک امریکا (IEEE) پیشنهاد مینماید که بردن X_m به ابتدای مدار معادل کار آنچنان پسندیده ای نیست و بهتر است از مدار معادل شکل (۷۳) یاری گرفته شود . در مدار IEEE نیز از R_c خبری نیست و تلفات هسته استاتور با تلفات تهویه و اصطکاک بصورت یک کاسه در نظر گرفته میشود .



شکل(۷۳) مدار معادل IEEE

مدار معادل تونن

برای سهولت محاسبات در مدار معادل IEEE بهتر است از روش تونن استفاده گردد بعبارت دیگر بجای استفاده از V_1 , R_1 , X_1, X_m میتوان از V_{th} , R_{th} , X_{th} استفاده نمود (شکل۷۴)



شکل(۷۴) مدار معادل تونن

باید دانست :

$$V_{th} = \frac{X_m}{\left[R_1^{\,2} + (X_1 + X_m)^2\right]^{\frac{1}{2}}} V_1 \qquad (۱۹۷)$$

اگر $R_1^{\,2} << (X_1 + X_m)^2$ باشد که معمولا نیز همینطور است داریم :

$$V_{th} \approx \frac{X_m}{X_1 + X_m} V_1$$
$$= K_{th} V_1$$

امپدانس تونن بقرار زیر است :

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

اگر $R_1^{\,2} << (X_1 + X_m)^2$ باشد داریم :

$$R_{th} \approx \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m}\right)^2 R_1 = K_{th}^{\,2} R_1 \qquad (۱۹۸)$$

اما معمولا $X_1 << X_m$ است پس :

$$X_{th} \approx X_1 \qquad (۱۹۹)$$

پس بطور کلی میتوان برای موتورهای القایی سه فاز مدلهای متفاوتی ارائه داد و باید دانست این مدلها برای هر فاز موتور معتبر است . این مدلها که در حالت ماندگار معتبرند بقرار زیرند :

الف : مدل دقیق یا مدل **T** (شکل **e**-۷۱)

ب : مدل تقریبی یا مدل **L** (شکل **a**-۷۲)

ج : مدل تقریبی یا مدل **L** ساده (شکل **b**-۷۲)

د : مدل **IEEE** (شکل۷۳)

ه : مدل تونن مربوط به مدل **IEEE** (شکل۷۴)

آزمایشهای بی باری و روتور قفل شده جهت تعیین پارامترهای موتور القایی سه فاز

پارامترهای مدار معادل موتور القایی سه فاز از قبیل R_C و X_m و X_2 و X_1 و R_2 و R_1 از آزمایشهای زیر حاصل میشوند :

الف : آزمایشهای بی باری (**NLT**)

ب : آزمایشهای روتور قفل شده یا روتور مسدود شده (**BRT** یا **LRT**)

ج : آزمایش **DC** بر روی سیم پیچ استاتور

آزمایشهای بی باری (**NLT**) در موتورهای القایی شبیه آزمایش بی باری یا مدار باز در ترانسفورماتورها است در این آزمایش میتوان به اطلاعاتی درباره جریان تحریک (I_Φ) در موتور و تلفات چرخشی (P_{ROT}) پی برد . در این آزمایش استاتور به شبکه ای با ولتاژ فرکانس اسمی وصل میشود و هیچگونه بار مکانیکی به محور اعمال نمی شود دراینصورت توان ورودی به موتور مجموع تلفات هسته استاتور تلفات تهویه و اصطکاک (P_{ROT}) و تلفات مسی روتور و استاتور خواهد بود . در بی باری تلفات مسی روتور ناچیز است . لذا در بی باری

توان ورودی معادل مجموع تلفات مسی استاتور و P_{ROT} است . P_{ROT} تلفات چرخشی موتور بوده و بقرار زیر است :

P_{Rot} = تلفات هسته استاتور+تلفات اصطکاک و تهویه

پس از انجام آزمایش بی باری میتوان به P_{ROT} پی برد اما P_{ROT} در تمامی شرایط حتی شرایط بارداری معادل P_{ROT} در شرایط بی باری در نظر میگیریم و به آن تلفات ثابت ماشین نیز اطلاق میکنیم .

از آزمایش روتور قفل شدخ که مشابه آزمایش اتصال کوتاه در ترانسفورماتور است میتوان به بسیاری از پارامترهای موتور پی برد در این آزمایش روتور را قفل یا مسدود میکنیم تا نچرخد با استاتور باید ولتاژی اعمال گردد بنحوی که شرایط کار عادی روتور از قبیل جریان و فرکانس فراهم شود بعنوان مثال در شرایط کار عادی انتظار داریم که جریان و فرکانس روتور کم باشد لذا باید به استاتور ولتاژ کمی اعمال شود تا جریان کمی برای روتور حاصل شود از آنجائیکه در حالت روتور قفل شده فرکانس روتور و استاتور مشابه است و میخواهیم فرکانس روتور کم باشد لذا فرکانس منبع تغذیه استاتور نیز باید نسبت به فرکانس اسمی کاهش یابد طبق استاندارد IEEE فرکانس منبع تغذیه در این آزمایش ۲۵٪ فرکانس اسمی است در این آزمایش میتوان به راکتانس نشتی ماشین پی برد .

از آنجائیکه این راکتانسها در فرکانس اسمی حاصل نمیشود لذا پس از بدست آوردن آنها باید با یک تناسب ساده مقدار راکتانسها را درفرکانس اسمی (f_1) حساب نمود گفتنی است در ماشینهای با قدرت کمتر از ۲۰ اسب بخار اثر فرکانس در آزمایش روتور قفل شده آنچنان مشهود نیست و میتوان این آزمایش را با فرکانس اسمی انجام داد .

جهت پیدا کردن مقاومت استاتور (R_1) از آزمایش DC که معرف خوانندگان عزیز است استفاده میشود .

مشخصه هاي موتورهاي القايي سه فاز

در بخش قبل راجع به مدار معادل موتور القایی سه فاز بحث کردیم این مدار معادل ما را یاری میدهد تا به مشخصه های ماشین پی ببریم بعنوان مثال میتوان باتوجه به مدار معادل در حالت مانا به بازده ، ضریب توان ، گشتاور راه انداز ، گشتاور ماکزیمم که به گشتاور پرتگاهی موسوم است و بسیاری از مشخصه های دیگر دست یابیم . گشتاور مکانیکی حاصله توسط هر فاز موتور اینچنین بدست می آید :

$$P_{mech} = T_{mech}\omega_{mech} = {I_2}^2 \frac{R_2}{s}(1-s) \qquad (۲۰۰)$$

که :

$$\omega_{mech} = \frac{2\pi n}{60}$$

n سرعت موتور برحسب دور در دقیقه **(rpm)** است رابطه سرعت مکانیکی با سرعت سنکرون بقرار زیر است

$$\omega_{mech} = (1-s)\omega_{syn} = \frac{n_{syn}}{60} 2\pi(1-s) \qquad (۲۰۱)$$

باید دانست :

$$\omega_{syn} = \frac{120\,f}{60P} \times 2\pi = \frac{4\pi f}{6} \qquad (۲۰۲)$$

از روابط (۱۹۲) و (۲۰۰) و (۲۰۱) داریم :

$$T_{mech}\omega_{syn} = I_2{}^2 \frac{R_2}{s} = P_{ag} \qquad (۲۰۳)$$

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_{syn}} P_{ag} = \frac{1}{\omega_{syn}} I_2{}^2 \frac{R_2}{s} \qquad (۲۰۴)$$

$$= \frac{1}{\omega_{syn}} I'_2{}^2 \frac{R'_2}{s} \qquad (۲۰۵)$$

از مدار معادل تونن (شکل۷۴) و معادله (۲۰۵) داریم :

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_{syn}} \frac{V_{th}{}^2}{\left(R_{th} + R'_2/s\right)^2 + \left(X_{th} + X'_2\right)^2} \frac{R'_2}{s} \qquad (۲۰۶)$$

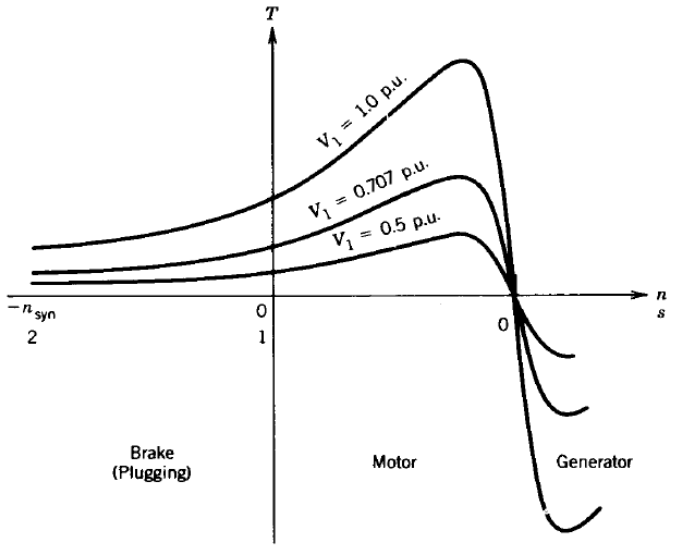
اگر از مدار شکل (۷۲) برای محاسبه $\mathbf{I_2}$ استفاده شود دراینصورت باید در معادله (۲۰۶) تغییرات زیر را انجام داد تا گشتاور مکانیکی حاصل شود .

۱. **بجای $\mathbf{V_{th}}$ از $\mathbf{V_1}$ استفاده شود**
۲. **بجای $\mathbf{R_{th}}$ باید $\mathbf{R_1}$ جایگزین گردد**
۳. **بجای $\mathbf{X_{th}}$ باید از $\mathbf{X_1}$ استفاده گردد**

باید دانست اگر گشتاور مکانیکی توسط مدار معادل شکل (۷۲) محاسبه شود در اینصورت ۵٪ با گشتاور محاسبه شده توسط مدلهای شکل (۷۳) و (۷۴) تفاوت خواهد داشت رابطه (۲۰۶) مربوط به هر فاز موتور است لذا اگر این رابطه سه برابر شود کل گشتاور حاصله توسط موتور بدست می آید

شکل(۷۵)تغییرات گشتاور برحسب سرعت یا لغزش را نشان می دهد در شرایط لغزش کم داریم :

$$R_{th} + \frac{R'_2}{s} >> X_{th} + X'_2 \quad \text{و} \quad \frac{R'_2}{s} >> R_{th}$$



شکل (۷۵) تغییرات گشتاور موتور القایی سه فاز برحسب سرعت یا لغزش در تحت ولتاژهای مختلف

پس :

$$T_{mech} \approx \frac{1}{\omega_{syn}} \frac{V_{th}{}^2}{R'_2} s \qquad (۲۰۷)$$

رابطه اخیر نشان میدهد که در لغزش کم تغییرات گشتاور نسبت به لغزش خطی است و در شکل (۷۵) این تغییرات خطی در حول سرعت سنکرون مشهود است اگر لغزش زیاد باشد داریم :

$$R_{th} + \frac{R_2'}{s} << X_{th} + X_2'$$

و :

$$T_{mech} \approx \frac{1}{\omega_{syn}} \frac{V_{th}^{\ 2}}{\left(X_{th} + X_2'\right)} \frac{R_2'}{s} \qquad (۲۰۸)$$

می بینیم در این ناحیه گشتاور با معکوس لغزش متناسب است و این امر در شکل (۷۵) در حول **s = 1** مشهود است از رابطه (۲۰۶) در میابیم که گشتاور با مجذور $\mathbf{V_{th}}$ و درنتیجه $\mathbf{V_1}$ متناسب است. شکل (۷۵) منحنی گشتاور سرعت یا گشتاور لغزش را در تحت ولتاژهای گوناگون نشان میدهد و این منحنیها مشخصه های گشتاور سرعت یا گشتاور لغزش نیز گفته میشود به این مشخصه ها به اختصار مشخصه **T-n** یا مشخصه **T- s** نیز اطلاق میشود . برای پی بردن به گشتاور ماکزیمم اینچنین عمل میکنیم :

$$dT/ds = 0$$

با توجه به رابطه (۲۰۶) در اعمال شرط فوق داریم :

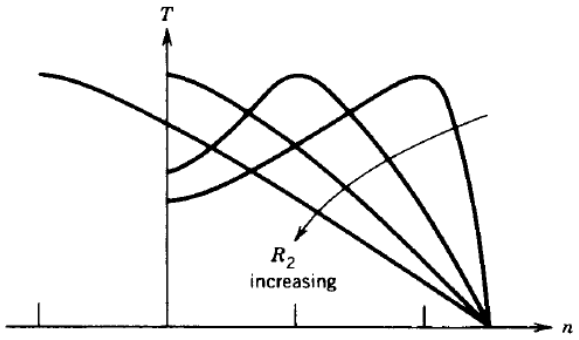
$$\frac{R_2'}{sT_{\max}} = \left[R_{th}^{\ 2} + \left(X_{th} + X_2'\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۲۰۹)$$

بسهولت داریم :

$$sT_{\max} = \frac{R_2'}{\left[R_{th}^{\ 2} + \left(X_{th} + X_2'\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \qquad (۲۱۰)$$

از معادلات (۲۰۶) و (۲۱۰) داریم :

$$T_{\max} = \frac{1}{2\omega_{syn}} \frac{V_{th}^{\ 2}}{R_{th} + \left[R_{th}^{\ 2} + \left(X_{th} + X_2'\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \qquad (۲۱۱)$$



شکل (۷۶) اثر تغییرات مقاومت روتور بر مشخصه گشتاور سرعت یا لغزش

در روابط اخیر $\mathbf{T_{max}}$ قله مشخصه گشتاور سرعت یا گشتاور لغزش تحت ولتاژی مفروض بوده و $\mathbf{S_{Tmax}}$ لغزشی است که تحت آن $\mathbf{T_{max}}$ رخ میدهد دقت کنید که $\mathbf{T_{max}}$ در رابطه (۲۱۱) مربوط به هر فاز موتور برای پیدا کردن کل گشتاور ماکزیمم باید رابطه (۲۱۱) سه برابر نمود . باتوجه به نکات فوق در میابیم که :

الف : $\mathbf{S_{Tmax}}$ تابعی از مقاومت روتور است .

ب : T_{max} تابعی از مقاومت روتور نمی باشد

لذا اگر مقاومت روتور را تغییر دهیم مشخصه هایی همچون شکل (۷۶) حاصل میشود . این امر در موتورهای با روتور سیم بندی شده میسر است زیرا از طریق حلقه های لغزان میتوان به هر فاز روتور رئوستای متغیر اضافه نمود و مقاومت روتور را تغییر داد . معمولا رسم برآنست که مقاومت رئوستا را طوری تنظیم میکنند که گشتاور ماکزیمم (T_{max}) در لحظه راه اندازی رخ میدهد تا موتور با گشتاور قابل ملاخظه ای شتاب گیرد پس از افزایش سرعت، رئوستا را بتدریج از مدار خارج میکنند اگر مقاومت استاتور (R_1) کوچک باشد لذا R_{th} نیز

$$S_{T\max} \approx \frac{R_2'}{X_{th} + X_2'} \qquad (۲۱۲)$$

ناچیز شده و از روابط (۲۱۰) و (۲۱۱) داریم :

$$T_{\max} \approx \frac{1}{2\omega_{syn}} \frac{{V_{th}}^2}{X_{th} + X_2'} \qquad (۲۱۳)$$

از روابط (۲۰۶) و (۲۱۱) داریم :

$$\frac{T_{\max}}{T} = \frac{\left(R_{th} + R_2'/s\right)^2 + \left(X_{th} + X_2'\right)^2}{\left(R_{th} + R_2'/s_{T\max}\right)^2 + \left(X_{th} + X_2'\right)^2} \frac{s}{s_{T\max}} \qquad (۲۱۴)$$

اگر R_1 و درنتیجه R_{th} ناچیز باشند داریم :

$$\frac{T_{\max}}{T} \approx \frac{\left(R_2'/s\right) + \left(X_{th} + X_2'\right)^2}{\left(R_2'/s_{T\max}\right)^2 + \left(X_{th} + X_2'\right)^2} \frac{s}{s_{T\max}} \qquad (۲۱۵)$$

از معادل (۲۱۲) و (۲۱۵) داریم :

$$\frac{T_{\max}}{T} = \frac{\left(R_2'/s\right)^2 + \left(R_2'/s_{T\max}\right)^2}{2\left(R_2'/s_{T\max}\right)^2} \times \frac{s}{s_{T\max}} \qquad (۲۱۶)$$

$$= \frac{{s_{T\max}}^2 + s^2}{2 s_{T\max} s}$$

باید دانست گشتاور T در لغزش s و گشتاور T_{max} در لغزشی s_{Tmax} رخ میدهد درحقیقت رابطه (۲۱۸) گشتاور موتور را در شرایطی خاص با گشتاور ماکزیمم مقایسه میکند .

جریان استاتور

از مدل شکل (۷۳) امپدانس ورودی را بدست می آوریم :

$$Z_1 = R_1 + jX_1 + jX_m // \left(R_2'/s + jX_2'\right)$$

$$= R_1 + jX_1 + jX_m // Z_2'$$

$$= R_1 + jX_1 + \frac{jX_m\left(R_2'/s + jX_2'\right)}{R_2'/s + j\left(X_m + X_2'\right)} \qquad (۲۱۷)$$

$$= |Z_1| \angle \theta_1$$

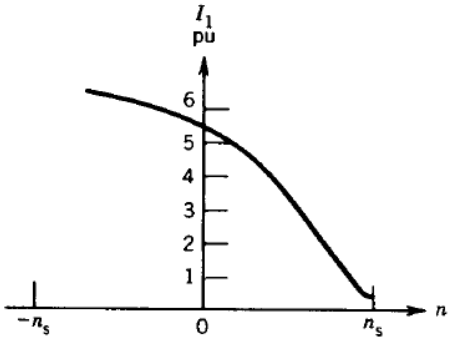
جریان استاتور بقرار زیر است :

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = I_\phi + I_2'$$

میدانیم محدوده لغزش موتور اینچنین است :

$$0 < s \le 1$$

اگر فرض کنیم سرعت موتور همان سرعت سنکرون باشد در اینصورت **s = 0** بوده و R_2'/s بینهایت میشود درنتیجه $I_2' = 0$ خواهد شد (شکل۷۷)



شکل (۷۷) تغییرات جریان استاتور بر حسب سرعت

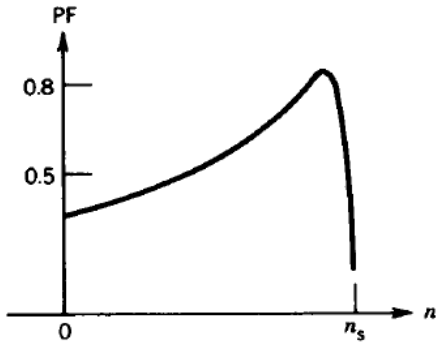
پس :

$$I_1 = I_\phi$$

هرچه لغزش بیشتر شود دراینصورت $R_2'/s + jX_2'$ کمتر شده لذا I_1, I_2' زیاد میشود (شکل۷۳) در لحظه راه اندازی (**s = 1**) جریان استاتور که به جریان راه اندازی معروف است ۵ تا ۸ برابر جریان اسمی خواهد بود . (شکل۷۷) تغییرات جریان استاتور بر حسب سرعت را نشان میدهد جریان در این شکل در سیستم یکایی بیان شده است و جریان مبنا همان جریان اسمی موتور است .

ضریب توان ورودي

باتوجه به شکل (۷۳) در می یابیم که با تغییر لغزش موتور امپدانسهای گوناگون از خود بروز میدهد و لذا زاویه بین V_1 , I_1 تغییر میکند شکل (۷۸) تغییرات ضریب توان (**PF**) برحسب سرعت را برای موتور القایی سه فاز نشان میدهد .



شکل(۷۸) تغییرات ضریب توان برحسب سرعت

بازده (بهره)

برای پیدا کردن بازده در موتورهای القایی سه فاز باید به تلفات ماشین پی برد و بهتر است به نمودار پخش توان در موتور توجه کرد (شکل۷۹) . در یک موتور القایی سه فاز توان ورودی به ماشین بقرار زیر است :

ورودی ماشین بقرار زیر است :

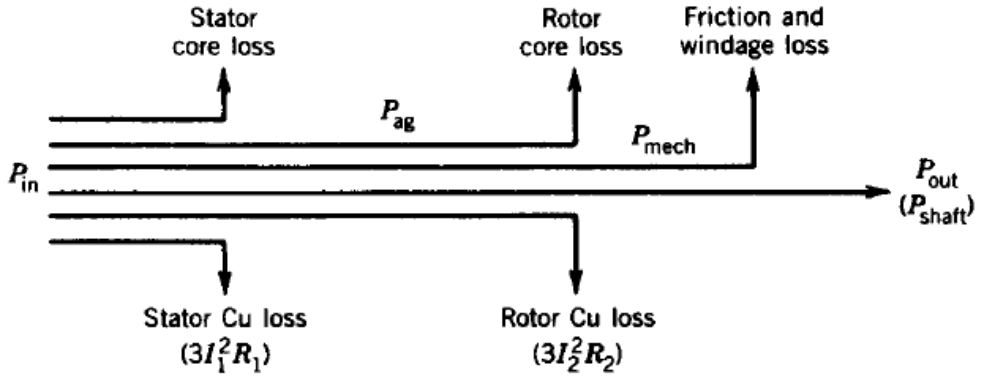
$$P_{in} = 3V_1 I_1 Cos\theta_1 \qquad (۲۱۸)$$

تلفات اهمی یا مسی استاتور بشرح زیر است :

$$P_1 = 3I_1^{\,2}R_1 \qquad (۲۱۹)$$

$\mathbf{R_1}$ مقاومت **AC** هر فاز استاتور با درنظر گرفتن اثر پوستی در درجه حرارت و فرکانس مورد نظر میباشد . استاتور حاوی تلفات هسته نیز میباشد که مجموع تلفات هیسترزیس و جریلن گردابی است لذا پس از آنکه توان ورودی تلفات استاتور اعم از تلفات هسته و تلفات مسی را تأمین نمود مابقی از فاصله فاصله هوایی می گذرد (شکل ۷۹) . به توان عبوری از فاصله هوایی $\mathbf{P_{ag}}$ اطلاق میکنیم بخشی از $\mathbf{P_{ag}}$ بصورت گرما و تلفات مسی در روتور هدر میرود یعنی :

$$P_2 = 3I_2^{\,2}R_2 \qquad (۲۲۰)$$



شکل(۷۹) نمودار پخش توان در موتور های القایی

$\mathbf{R_2}$ مقاومت **AC** هر فاز روتور است . در ماشینهای روتور سیم بندی شده $\mathbf{R_2}$ مجموع مقاومت هر فاز روتور و مقاومت هر فاز رئوستای متصل به آنست . باید دانست بخش ناچیزی از $\mathbf{P_{ag}}$ صرف تلفات هسته روتور میشود البته از آنجائیکه فرکانس روتور در شرایط عادی کم است تلفات هسته روتور ناچیز میباشد و میتوان در شرایط کار عادی از آن صرفنظر نمود .

پس از آنکه $\mathbf{P_{ag}}$ تلفات روتور را تأمین نمود الباقی به توان مکانیکی ($\mathbf{P_{mech}}$) تبدیل میشود بخشی از توان مکانیکی صرف تلفات اصطکاک و تهویه شده و مابقی بصورت توان مکانیکی خروجی ($\mathbf{P_{out}}$) بر روی محور ظاهر میشود $\mathbf{P_{out}}$ توان مکانیکی مفید نیز نام دارد . بسهولت میتوان بازده را اینچنین تعریف کرد :

$$\text{(بازده)}\, Eff = \frac{P_{out}}{P_{in}} \qquad (۲۲۱)$$

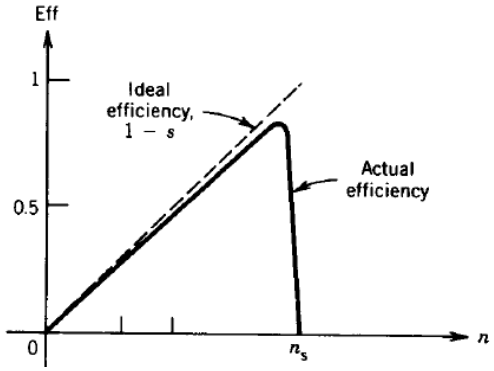
بازده تابع لغزشی یا **s** است اگر از کل تلفات بجز تلفات مسی روتور صرفنظر کنیم داریم :

$$P_{ag} = P_{in}$$
$$P_2 = sP_{ag}$$
$$P_{out} = P_{mech} = P_{ag}(1-s)$$

لذا بازده ایده آل اینچنین تعریف میشود :

$$Eff_{(ideal)} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - s \qquad (۲۲۲)$$

(بازده ایده آل)به بازده ایده آل گاهی بازده داخلی نیز گفته میشود زیرا در این بازده نسبت توان خروجی و توان عبوری از فاصله هوایی مطرح است .شکل (۸۰) تغییرات بازده برحسب سرعت را برای موتورهای القایی نشان میدهد و در این شکل بازده ایده آل یا بازده داخلی نیز رسم شده است .



شکل(۸۰) تغییرات بازده بر حسب سرعت در موتورهای القایی سه فاز

واضح است که درصورت نیاز به بازده زیاد ، موتور باید در حوالی سرعت سنکرون کار کند و لذا موتورها عمدتا طوری طراحی میشوند که درحالت کار عادی دارای لغزش کوچک باشند همچنین ملاحظه میشود درصورت درنظر گرفتن کل تلفات، بازده واقعی از بازده ایده آل کمتر است معمولا بازده موتورهای القایی سه فاز در شرایط اسمی حدود ۹۵٪ است .

نحوه پخش توان در ماشینهای القایی در حالتهای موتوری و ژنراتوری و ترمز

در بخش قبل دیدیم که ماشین القایی میتواند بصورت موتور یا ژنراتور کار کند و درضمن در مرحله ترمز نیز مورد بهره برداری قرار گیرد . شکل (a-۸۱) نمودار پخش توان را در موتورهای القایی نشان میدهد و در حالت موتوری داریم : $0 < s \leq 1$

مشاهده میشود که :

الف : توان الکتریکی از شبکه وارد موتور میشود

ب : بخشی از توان الکتریکی صرف تلفات اهمی یا مسی استاتور میگردد (P_{cu1})

ج : تفاوت P_{elec} و P_{cu1} از شکاف هوایی عبور کرده و وارد روتور میشود . P_{ag}

د : بخشی از P_{ag} صرف تلفات مسی روتور میشود (P_{cu2})

ه : تفاوت P_{ag} و P_{cu2} به توان مکانیکی تبدیل میشود

و : بخشی از توان مکانیکی صرف تلفات چرخشی P_{rot} میشود .

ز : تفاوت P_{mech} و P_{rot} بصورت توان مکانیکی مفید بر روی محور ظاهر میشود (P_{out} یا P_{shaft})

گفتنی است که :

P_{rot}=تلفات ثابت =مقداری ثابت = تلفات تهویه + تلفات اصطکاک + تلفات هسته استاتور

شکل (۲-۸۱) نمودار پخش توان در حالت ژنراتوری را نشان میدهد و داریم : $s < 0$

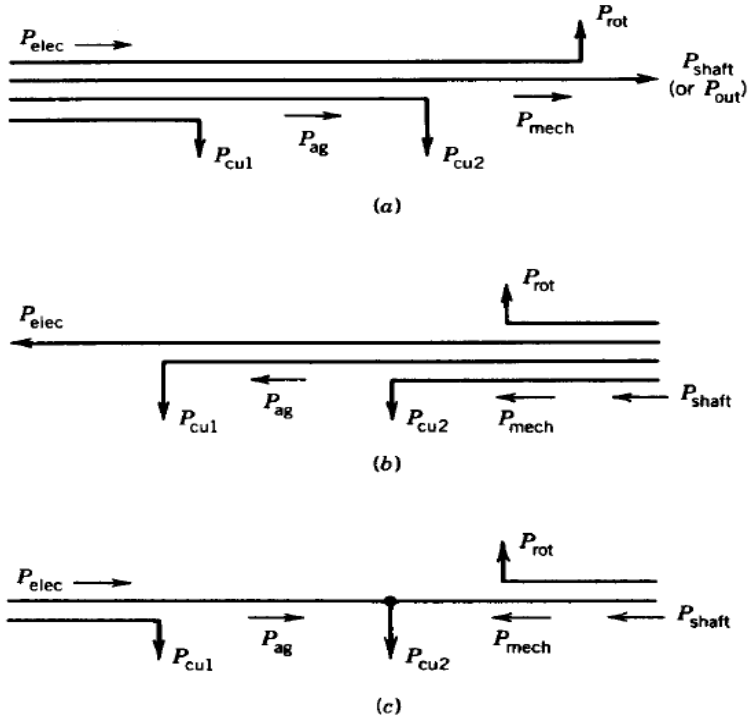
مشاهده میشود که :

۱. **توان ورودی به سیستم توان مکانیکی اعمالی به محور است (P_{shaft})**
۲. **بخشی از P_{shaft} صرف تلفات چرخشی می گردد .**
۳. **ما به التفاوت P_{shaft} و P_{rot} به P_{mech} موسوم است .**
۴. **بخشی از P_{mech} صرف تأمین تلفات مسی روتور میگردد .**

۵. مابقی P_{mech} از شکاف هوایی عبور میکند و به استاتور میرود .

۶. بخشی از P_{ag} صرف تأمین تلفات مسی استاتور میگردد .

۷. مابقی P_{ag} بصورت توان الکتریکی به شبکه تزریق میشود



شکل(۸۱) نمودار پخش توان برای ماشین های القایی (a) موتور القایی (b) ژنراتور القایی (c)ترمزی

در اینجا یادآوری میکنیم در حالت ژنراتوری نیز P_{rot} از مجموع تلفات هسته استاتور و اصطکاک و تهویه حاصل میشود و بعنوان تلفات ثلبت تلقی می گردد گفتنی است :

الف : P_{mech} در حالت موتوری مبین تبدیل توان الکتریکی به مکانیکی است .

ب : P_{mech} در حالت ژنراتوری مبین تبدیل توان مکانیکی به الکتریکی میباشد .

از دیدگاه مدار معادل شکل (e-۷۱) داریم :

الف : در حالت موتوری $(1-s)R_2/s$ مثبت است .

ب : در حالت ژنراتوری $(1-s)R_2/s$ منفی است .

لذا در حالت ژنراتوری $(1-s)R_2/s$ بعنوان یک منبع انرژی عمل میکند اما در حالت موتوری $R_2(1-s)/s$ بعنوان یک مصرف کننده انرژی عمل میکند .

شکل (c-۸۱) نمودار پخش توان را در حالت ترمز نشان میدهد . درحالت ترمز رتور در جهت خلاف میدان گردان میچرخد و داریم : $s>1$

در اینحالت دو توان ورودی به سیستم اعمال می گردد . (شکلc-۸۱)

۱. توان ورودی از شبکه به استاتور (P_{elec})

۲. توان ورودی مکانیکی اعمالی به محور (P_{shaft})

گفتنی است که :

الف : بخشی از P_{elec} صرف تلفات مسی استاتور میشود (P_{cu1})

ب : مابقی P_{elec} از شکاف هوائی رد شده و به P_{ag} موسوم است .

ج : P_{ag} به روتور می ریزد و بخشی از تلفات مسی روتور را تأمین میکند . (P_{cu2})

د : بخشی از P_{shaft} صرف تلفات چرخشی میگردد

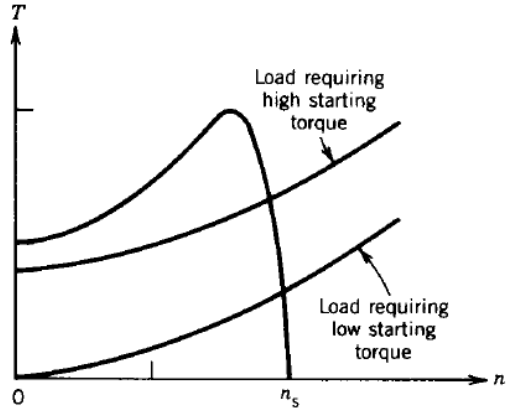
ه : مابقی P_{shaft} به P_{mech} موسوم است .

و : P_{mech} نیز بخشی دیگر از تلافت مسی روتور را تأمین میکند (P_{cu2})

در حالت ترمز از دو سمت توان به روتور می ریزد و تلفات مسی روتور (P_{cu2}) زیاد است . باتوجه به مدار معادل شکل (e-۷۱) مقدار $(1-s)R_2/s$ منفی است و این مقاومت بعنوان یک منبع انرژی عمل میکند که تلفات اهمی یا مسی روتور را در حالت ترمز همانند حالت ژنراتوری تأمین کند .

اثر مقاومت روتور

در موتورهای القایی سه فاز قفس سنجابی متداول عمدتا در شرایط اسمی با لغزش کوچک و جریان اسمی کم روبرو هستیم . بازده و ضریب توان اینگونه موتورها در شرایط اسمی نسبتا قابل ملاحظه است . در اینگونه موتورها در لحظه راه اندازی با گشتاور و ضریب توان کم مواجه بوده ، اما جریان در لحظه راه اندازی نسبتا زیاد است . اگر بار مکانیکی گشتاور راه اندازی قابل ملاحظه ای طلب کند (شکل۸۲) دراینصورت شتاب موتور آرام بوده و جریان زیادی درطول مدت سرعت گیری از شبکه می کشد و بنابراین مسأله حرارتی جدی خواهد بود . مقاومت روتور بر روی عملکرد موتور اثر قابل ملاحظه ای دارد . در شرایط کار عادی که لغزش کم است مقاومت روتور نیز باید کم باشد تا بازده خوبی حاصل شو . در لحظه راه اندازی مقاومت روتور باید زیاد باشد تا گشتاور راه انداز و ضریب توان قابل ملاحظه گردد و جریان راه اندازی کم شود . موتورهای القایی که مقاومت روتور آنها ثابت است باید طوری طراحی شوند که مصالحه ای بین شرایط راه اندازی و کار عادی پیش آید. اما موتورهای القایی دیگری نیز وجود دارد که مقاومت روتور آنها متغیر است . در زیر به توضیح آنها می پردازیم :



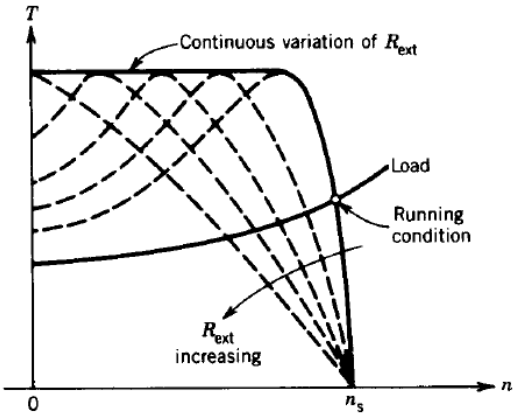
شکل(۸۲) مشخصه گشتاور سرعت موتور همراه با دو گشتاور بار مختلف

موتورهاي القايي با روتور سيم بندي شده

در این موتورها میتوان به هر فاز از طریق حلقه های لغزان رئوستا متصل نمود . معادله (۲۱۰) نشان میدهد که لغزش متناظر با گشتاور ماکزیمم به مقاومت روتور بستگی دارد یعنی :

$$s_{T\max} \propto (R_{W2} + R_{ext}) \qquad (۲۲۳)$$

R_{w2} مقاومت هر فاز روتور و R_{ext} مقاومت هر فاز رئوستای متصل به روتور است اگر به گشتاور راه انداز زیاد نیاز داشته باشیم میتوان R_{ext} را طوری تنظیم نمود که گشتاور ماکزیمم در لحظه راه اندازی رخ دهد (S_{Tmax}) در ضمن شتاب گیری موتور ، بتدریج R_{ext} را از مدار خارج میسازیم تا بالاخره به نقطه کار عادی ماشین برسیم شکل (۸۳) اثر تغییر R_{ext} را بر روی گشتاور ماشین نشان میدهد نقطه کار ماشین از محل تلاقی گشتاور ماشین و گشتاور بار حاصل میشود . باید دانست قله منحنی گشتاور موتور (T_{max}) به مقاومت روتور بستگی ندارد و عددیست ثابت ، اما S_{Tmax} با تغییر مقاومت روتور جابجا میشود . در خاتمه راه اندازی و مرحله کار عادی ماشین ، R_{ext} از مدار بیرون میرود و روتور با مقاومت کم خود بکار ادامه میدهد . لذا ماشین با لغزش کم و بازده زیاد به گردش ادامه خواهد داد .



شکل (۸۳) اثر مقاومت روتور بر روی گشتاور ماکزیمم (T_{max})و جابجایی آن

باتوجه به شکل (۸۳) میتوان به نقاط تلاقی متفاوتی دست یافت منظور از نقاط تلاقی محل برخورد منحنی گشتاور ماشین و گشتاور بار است . لذا با تغییر R_{ext} میتوان به سرعتهای گوناگون دست یافت . این روش یکی از روشهای کنترل سرعت در موتورهای القایی است .

موتورهاي القايي قفس سنجابي با ميله هاي عميق :

می دانی درحالت سکون (راه اندازی) فرکانس روتور بقرار زیر است :

$f_2 = f_1 =$ (فرکانس شبکه)

فرکانس روتور در حالت چرخش محور بقرار زیر است : $f_2 = sf_1$

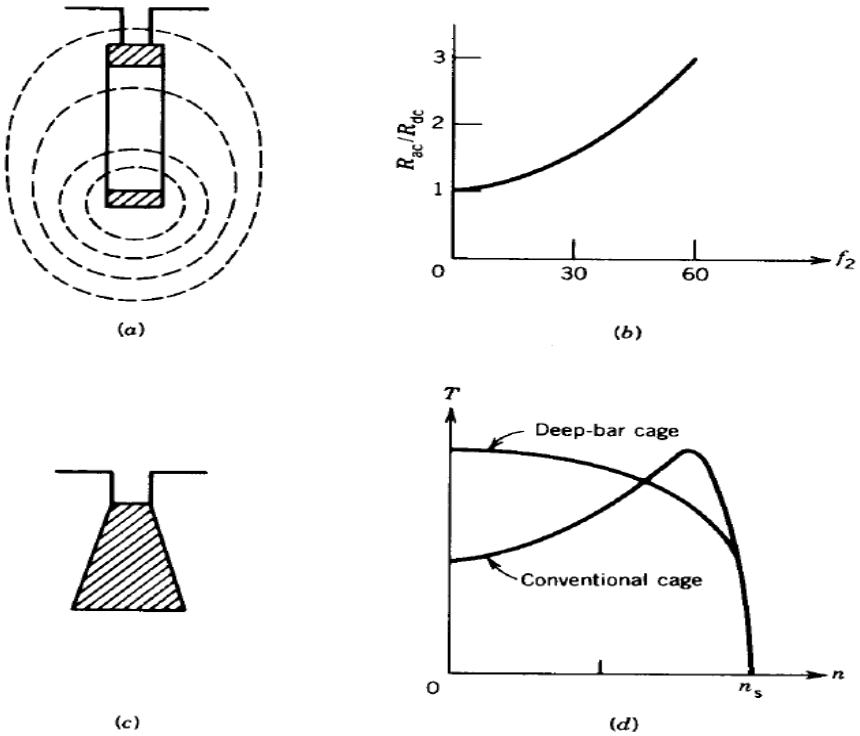
اگر f_1=60Hz باشد و لغزش کم باشد دراینصورت f_2 حدود یک تا سه هرتز خواهد بود . از این خاصیت یعنی تغییرات f_2 از لحظه راه اندازی تا شرایط کار عادی میتوان استفاده کرد تا مقاومت روتور بطور اتوماتیک تغییر کند. میله های روتور را میتوان طوری طراحی کرد که مقاومت مؤثر آنها در فرکانس ۶۰ هرتز چندین برابر مقاومت مؤثر میله ها در فرکانس ۳ هرتز باشد . این امر بخاطر پیده اثر پوستی امکانپذیر است.

شکل (۸۴-a) یک میله عمیق نازک مربوط به روتور قفس سنجابی را که درون شیار قرار گرفته نشان میدهد . در این شکل شار نشتی شیار که توسط جریان میله پدید می آید نشان داده شده است. پرواضح است که اندوکتانس لایه های تحتانی میله عمیق بیش از اندوکتانس لایه های فوقانی خواهد بود . علت این امر آنست

که شار پیوندی بیشتر لایه های تحتانی را دربر میگیرد . نتیجه آنکه جریان در لایه های تحتانی با راکتانس زیاد، کمتر از جریان در لایه های فوقانی با راکتانس کم است.

این بدان معنی است که جریان بیشتر از قسمتهای فوقانی میله عمیق میگذرد. این امر سبب میشود که مقاومت مؤثر میله افزایش یابد. عدم یکنواختی توزیع جریان در میله عمیق در فرکانس های بالا مشهودتر است. لذا در لحظه راه اندازی با عدم یکنواختی قابل ملاحظه ای در توزیع جریان روبرو هستیم . درهنگام کار عادی (لغزش کم) فرکانس روتور حدود یک تا سه هرتز است دراینصورت مقاومت مؤثر ($\mathbf{R_{ac}}$) میله عمیق خیلی نزدیک به مقاومت **DC** خواهد شد. یعنی در اینحالت توزیع جریان در میله تقریبا یکنواخت است .

شکل (**b**-۸۴) تغییرات $\frac{R_{ac}}{R_{dc}}$ برحسب فرکانس روتور را نشا ن میدهد . البته میتوان میله ها را طوری طراحی کرد که تغییرات $\frac{R_{ac}}{R_{dc}}$ نسبت به فرکانس قابل ملاحظه تر باشد . نمونه ای از این شیارها و میله ها در شکل (**c**-۸۴) آمده است. اگر میله های عمیق به نحوی مناسب طراحی شوند دراینصورت به منحنی های گشتاور سرعتی همچون شکل (**d**-۸۴) می رسیم. در این شکل دو مشخصه مربوط به روتور قفس سنجابی معمولی و قفس سنجابی با میله های عمیق جهت مقایسه نشان داده شده است .



شکل(۸۴) روتور با میله های عمیق و مشخصه های مربوطه

روتورهاي قفس سنجابي مضاعف (دوبل)

اگر بخواهیم گشتاور راه انداز زیاد و جریان راه انداز کم باشد، میتوان از روتورهای قفس سنجابی مضاعف استفاده کرد. روتورهای قفس سنجابی مضاعف از دو قفس تشکیل شده اند :

۱. قفس بیرونی یا قفس خارجی یا قفس فوقانی

۲. قفس درونی یا قفس داخلی یا قفس تحتانی

شکل (a-۸۵) شمای میله های این دو قفس را در یک شیار نشان میدهد و باید گفت میله های هردو قفس از دو انتها بوسیله حلقه های انتهائی اتصال کوتاه شده اند . لازم به ذکر است که :

۱. سطح مقطع قفس بیرونی از سطح مقطع قفس درونی کمتر است .

۲. مقاومت ویژه ماده قفس بیرونی از مقاومت ویژه ماده قفس درونی بیشتر است .

۳. باتوجه به بندهای (۱ و ۲) مقاومت قفس بیرونی از مقاومت قفس درونی بیشتر است .

۴. با باریک کردن شیار بین دو قفس، راکتانس نشتی قفس درونی نسبت به قفس بیرونی بیشتر می شود .

درلحظه راه اندازی بخش اعظم جریان روتور از قفس بیرونی می گذرد ، لذا مقاومت مؤثر روتور افزایش می یابد. در شرایط کار عادی که فرکانس روتور کم است، راکتانس قابل صرفنظر کردن است و جریان از هردو قفس موازی می گذرد درحقیقت مقاومت روتور برابر مقاومت معادل دو قفس موازی است . لذا دوباره با یک سیستم با مقاومت متغیر روبرو هستیم . باید گفت در موتورهای قفس سنجابی با میله های عمیق یا قفس سنجابی مضاعف ، مقاومت مؤثر و راکتانس نشتی روتور با فرکانس تغییر میکند . شکل (b-۸۵) مدار معادل موتور القائی قفس سنجابی مضاعف را نشان میدهد که :

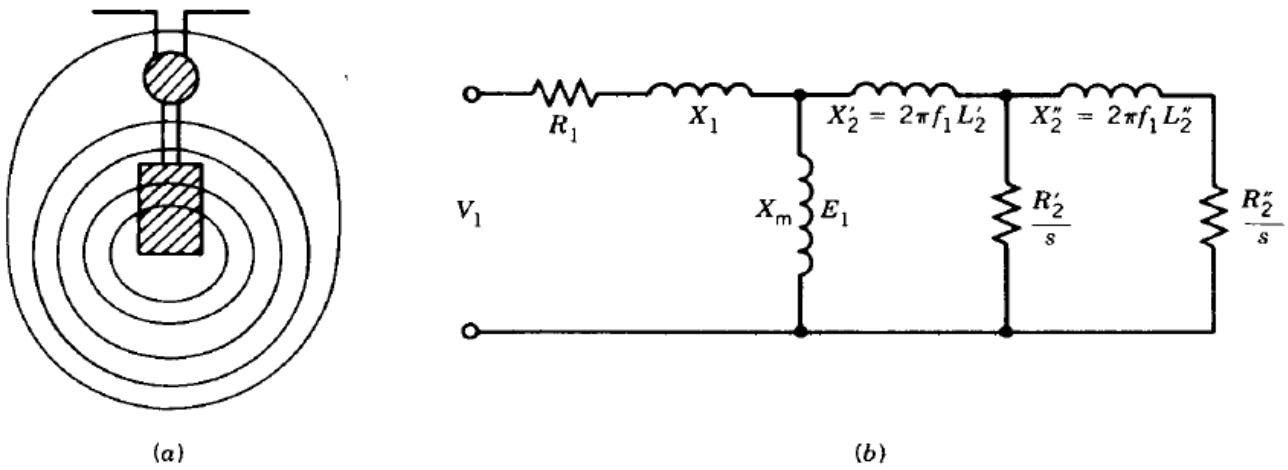
۱. L_2' اندوکتانس نشتی هر فاز قفس بیرونی است .

۲. L_2'' اندوکتانس نشتی هرفاز قفس درونی میباشد .

۳. R_2' مقاومت هر فاز قفس خارجی است .

۴. R_2'' مقاومت هر فاز قفس داخلی است .

کمیتهای فوق تابع فرکانس روتور هستند . موتورهای قفس سنجابی با میله های عمیق یا قفس سنجابی مضاعف را میتوان طوری طراحی نمود که در شرایط راه اندازی و کار عادی عملکرد خوبی داشته باشند . این امتیاز از تغییر مقاومت روتور ناشی میشود . البته این تغییر مقاومت همانند روتورهای سیم بندی شده قابل انعطاف نمی باشد . باید دانست اگر شرایط راه اندازی خیلی حاد باشد بهتر است از روتور سیم بندی شده استفاده شود .



شکل(۸۵) روتور قفس سنجابی مضاعف و مدار معادل موتور القایی سه فاز

طبقه بندي موتورهاي القايي قفس سنجابي

معمولا در صنعت با بارهای مکانیکی گوناگون روبرو هستیم برای ایجاد محیطی مناسب برای راه اندازی و کار عادی این بارهای مکانیکی ، انواع طرحهای مختلف از موتورهای قفس سنجابس به بازار عرضه شده است . سازندگان طبق استاندارد NEMA ، موتورهای قفس سنجابی را در چهار کلاس A,B,C,D می سازند . شکل (۸۶) مشخصه گشتاور سرعت را در این چهار کلاس نشان می دهد تفاوت عمده در طراحی موتورهای قفس سنجابی در این چهار کلاس همان نحوه تغییر مقاومت مدار روتور است .

موتورهاي كلاس A

موتورهائی که در این کلاس طراحی میشوند دارای خواص زیرند :

۱. گشتاور راه اندازی آنها عادی است .
۲. جریان راه اندازی آنها زیاد است .
۳. در شرایط کار عادی لغزش کم است .
۴. مقاومت روتور کم است و لذا در لغزش کم ($0.005 < S < 0.015$) بازده نسبتا خوب است .
۵. از این موتورها در شرایطی که گشتاور بار به گشتاور راه انداز کم نیاز دارد استفاده میشود . اینگونه بارها سریعا شتاب می گیرند و مسأله حرارتی پیش نمی آید .
۶. در ماشینهای بزرگ کلاس A ماشین را تحت ولتاژ کمتر از ولتاژ اسمی راه اندازی می کنند .
۷. مشخصه گشتاور سرعت این موتورها در شکل (۸۶) نشان داده شده است .

موتورهاي كلاس B

مشخصه گشتاور سرعت این موتورها در شکل (۸۶) آمده است در این موتورها میتوان به نکات زیر توجه کرد

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

علت کاهش جریان راه اندازی نحوه طراحی میله های عمیق یا قفس مضاعف با راکتانسهای نشتی زیاد است . باید دانست که راکتانس نشتی زیاد گشتاور ماکزیمم را کاهش میدهد . لغزش و بازده در شرایط اسمی در اینگونه موتورها تقریبا مشابه کلاس A است . موتورهای کلاس B کاربرد وسیعی در صنعت دارند .

موتورهاي كلاس C

مشخصه گشتاور سرعت این موتورها در شکل (۸۶) آمده است . در این موتورها داریم :

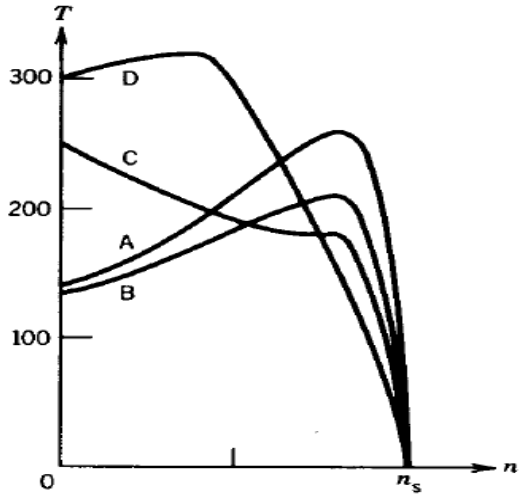
۱. گشتاور راه اندازی این موتورها زیاد است .
۲. جریان راه اندازی این موتورها نسبتا کم است .

در این موتورها از روتور قفس سنجابی مضاعف استفاده میشود و مقاومت روتور بیش از کلاس **B** است در شرایط اسمی لغزش اینگونه موتورها بیش از کلاسهای **A,B** بوده و بازده نسبت به کلاسهای **A,B** کمتر است .

موتورهاي کلاس D

مشخصه گشتاور سرعت این موتورها در شکل (۸۶) نشان داده شده است . این موتورها دارای خواص زیرند :

۱. گشتاور راه اندازی این موتورها زیاد است .
۲. جریان راه اندازی این موتورها کم است .
۳. در شرایط کار عادی لغزش نسبتا بزرگ است .
۴. در این موتورها میله های روتور قفس سنجابی مسی نبوده بلکه برنزی است .
۵. در این موتورها گشتاور ماکزیمم در لغزش ۵۰ درصد حاصل میشود .
۶. لغزش اسمی این موتورها بین ۸ تا ۱۵ درصد بوده و لذا بازده این ماشینها کم است .
۷. در این موتورها ، تلفات اهمی روتور نسبتا زیاد است لذا موتورها حجیم و گران هستند .



شکل(۸۶) مشخصه های گشتاور سرعت موتورهای کلاس **D, C, B, A**

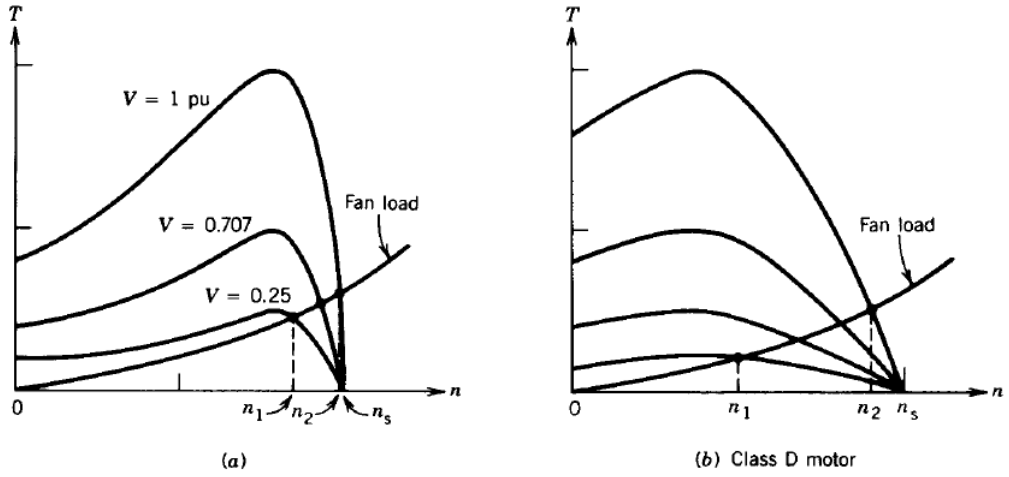
کنترل سرعت :

اگر موتور القائی سه فاز به شبکه ای با ولتاژ و فرکانس ثابت وصل شود دراینصورت پس از راه اندازی در سرعتی حوالی سرعت سنکرون خواهد چرخید . گفتنی است با افزایش گشتاور بار سرعت به میزان کم کاهش می یابد لذا این موتورها تقریبا از نوع موتورهای سرعت ثابت فرض میشوند . اما در برخی از صنایع لازم است که سرعت موتور در یک محدوده و طیف نسبتا وسیعی تغییر کند . موتورهای **DC** بطور سنتی برای مواردیکه کنترل سرعت مورد نیاز است مورد بهره برداری قرار می گیرند . اما موتورهای **DC** گران بوده و به تعمیرات و نگهداری در زمینه کموتاتور و جاروبک نیاز دارد . ولی برعکس موتورهای القائی بویژه نوع قفس سنجابی آن ارزان و جون سخت بوده و کموتاتور نیز ندارد و لذا برای سرعتهای زیاد بسیار مناسب اند .

امروزه با پیشرفت علم الکترونیک قدرت و پیدایش کنترل کننده های حالت جامد ، کنترل سرعت یا کنترل دور موتورهای القائی رو به تکامل است . اما این کنترل کننده ها نسبتا گران بوده و زمان می طلبد تا بصورت ارزان در دسترس عموم قرار بگیرد .

کنترل ولتاژ

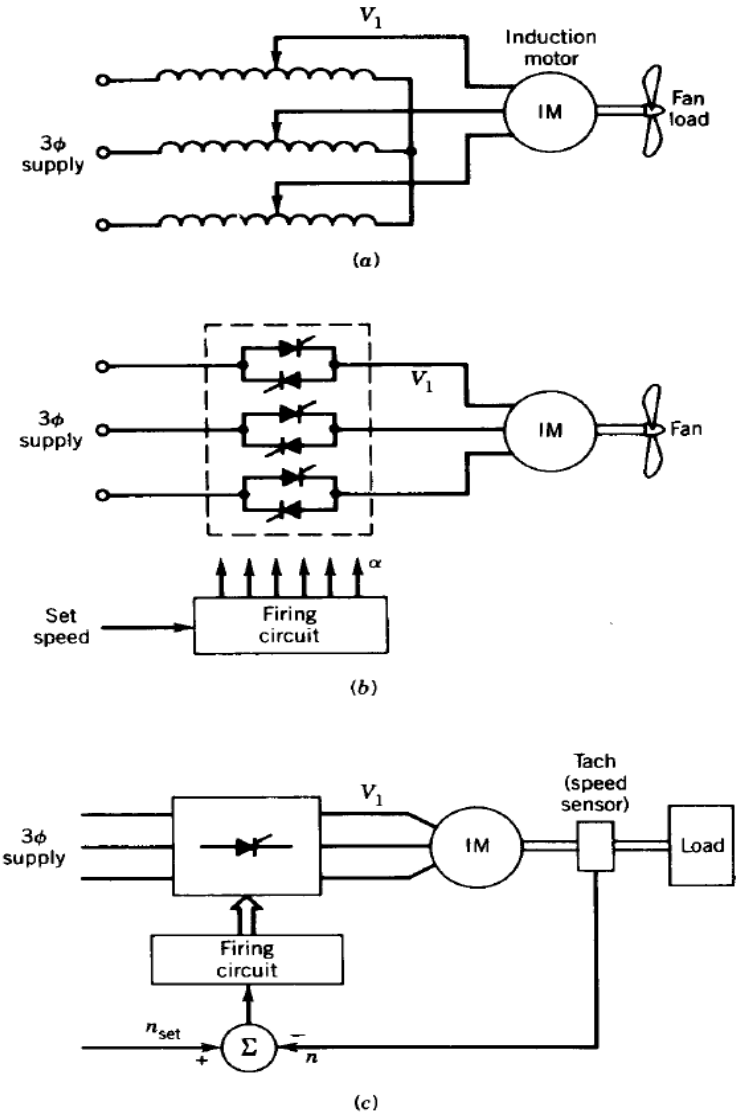
از مباحث قبل دریافتیم که گشتاور موتور القایی سه فاز با مجذور ولتاژ متناسب است . شکل (a-۸۷) مشخصه های گشتاور سرعت موتور القایی سه فاز را تحت ولتاژهای گوناگون نشان میدهد . بار این موتور یک پنکه است . باتوجه به شکل (a-۸۷) با تغییر ولتاژ اعمال به استاتور میتوان پنکه را در سرعتهای n_1 تا n_2 چرخاند . شکل (b-۸۷) مشخصه های گشتاور سرعت یک موتور کلاس D قفس سنجابی را تحت ولتاژهای گوناگون نشان می دهد و مشاهده میشود در طیف وسیعی کنترل سرعت امکانپذیر است . در این دو شکل محل تلاقی مشخصه های گشتاور سرعت و گشتاور بار ، نقطه کار را مشخص می سازد .



شکل(۸۷) اثر تغییر ولتاژ بر مشخصه گشتاور سرعت

تغییر ولتاژ پایانه استاتور میتواند توسط اتوترانسفورماتور با خروجی متغیر انجام گیرد . (شکلa-۸۸)
یکی دیگر از روشهای تغییر ولتاژ استفاده از کنترل کننده های حالت جامد یا الکترونیکی است (شکلb-۸۸)
اتوترانسفورماتور به ماشین ولتاژ سینوسی اعمال میکند اما کنترل کننده های حالت جامد ولتاژ غیرسینوسی برای موتور فراهم مینمایند . در ماشینهای کوچک میتوان مستقیما آنرا به کنترل کننده حالت جامد که یک کنترل کننده تریستوری است متصل نمود . اما در موتورهای بزرگ بین کنترل کننده تریستوری و موتور باید صافی قرار داد . زیرا در غیراینصورت جریانهای با هارمونیک بالا در خط تغذیه موتور براه می افتد . در کنترل کننده تریستوری (شکلb-۸۸) سیگنال فرمان برای سرعت خاص از پیش تنظیم شده ای ، تریستورها را در زاویه خاص α روشن مینماید تا ولتاژ مفروضی برای پایانه موتور حاصل گردد . به α زاویه آتش گفته میشود . اگر سیگنال فرمان سرعت عوض شود زاویه آتش تریستورها تغییر کرده و ولتاژ جدیدی به موتور اعمال میگردد درنتیجه به سرعت جدیدی می رسیم . اگر کنترل سرعت دقیق در مدنظر باشد ، سیستم کنترل حلقه باز (شکلb-۸۸) در برخی از کاربردها ارضاء کننده نیست .

شکل (c-۸۸) یک سیستم کنترل ولتاژ تریستوری با حلقه بسته را نشان میدهد گیریم به عللی سرعت موتور افت کند، در اینصورت تفاضل بین سرعت مرجع و سرعت واقعی موتور باعث تغییر زاویه آتش تریستورها (α) می گردد و درنتیجه ولتاژ پایانه ماشین افزایش می یابد . این امر باعث فزونی گشتاور شده و سرعت به مقدار قبل از اغتشاش خواهد رسید .



شکل(۸۸) نحوه اعمال ولتاژ به استاتور (a) از طریق اتو ترانس(b) توسط کنترل کننده حالت جامد (تریستوری) با حلقه باز(a) توسط کنترل کننده حالت جامد (تریستور) با حلقه بسته

کنترل فرکانس

می دانیم سرعت سنکرون بقرار زیر است و سرعت موتور در حوالی سرعت سنکرون می باشد .

$$n_s = \frac{120\,f}{P}$$

یکی از راههای تغییر n_s و درنتیجه n ، تغییر فرکانس منبع تغذیه است . لذا به یک تغییر دهنده فرکانس در سر راه موتور نیاز داریم . شکل (۸۹) نمودار جعبه ای یک سیستم کنترل حلقه باز را نشان میدهد که فرکانس منبع تغذیه موتور را تغییر خواهد داد . این سیستم شامل یک یکسو ساز کنترل شده AC/DC بوده و از

عناصر نیمه هادی تشکیل شده است . علاوه بر یکسو ساز ، این سیستم حاوی یک اینورتور DC/AC میباشد و اینورتور نیز از عناصر نیمه هادی تشکیل گردیده است . بطور خلاصه داریم :

۱. یکسو ساز ولتاژ سه فاز AC را به ولتاژ DC تبدیل میکند .

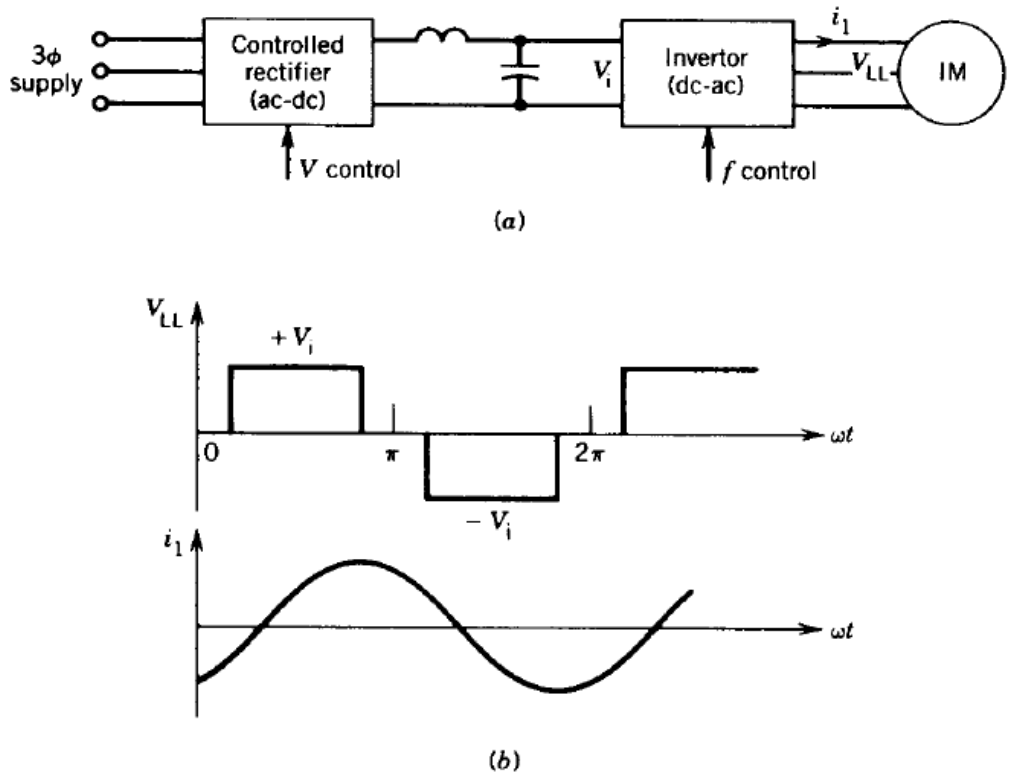
۲. اینورتور ولتاژ DC را به ولتاژ AC با فرکانس جدید تبدیل مینماید .

بسهولت داریم :

$$\phi_P \propto \frac{E}{f} \qquad (۲۲۴)$$

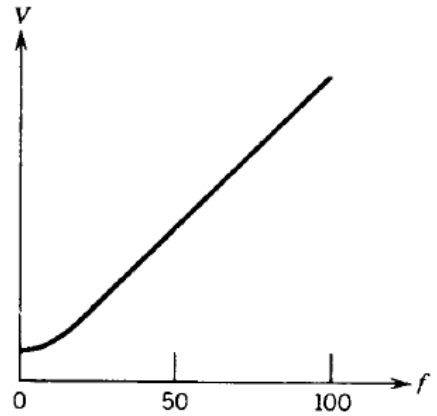
اگر در شکل (۷۳) از افت ولتاژ در دوسر X_1 , R_1 صرفنظر کنیم دراینصورت $V_1 \approx E_1$ شده و داریم :

$$\phi_p \propto \frac{V}{f} \qquad (۲۲۵)$$



شکل(۸۹) مدار کنترل حلقه باز جهت کنترل سرعت موتور القایی(ولتاژ و فرکانس قابل تغییر

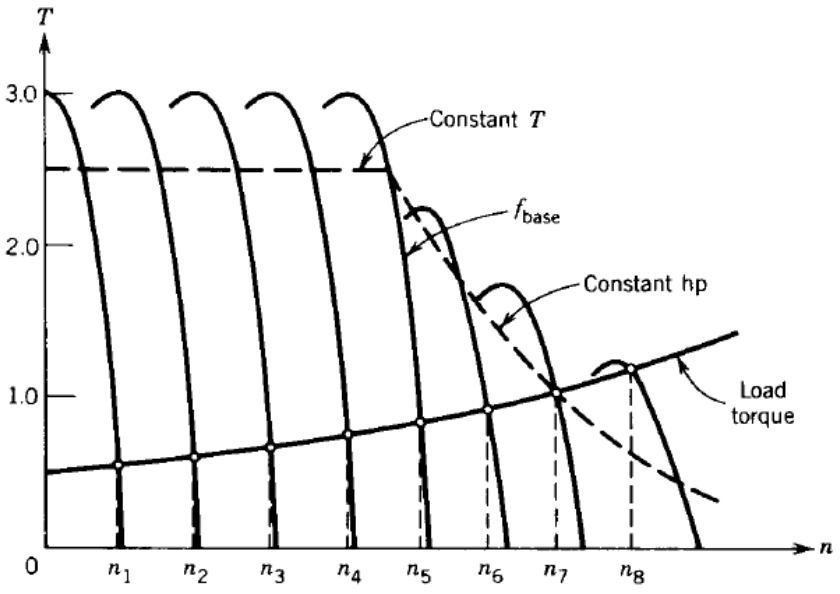
لذا برای پرهیز از اشباع زیاد در سیستم مغناطیسی باید ولتاژ پایانه موتور متناسب با فرکانس تغییر نماید . این نحوه کنترل را $\frac{V}{f}$ ثابت نام نهاده اند . در اینجا باید گفت در فرکانسهای پائین افت ولتاژ در دو سر R_1, X_1 در شکل (۷۳) در مقابل V_1 قابل صرفنظر نیست و لذا دیگر رابطه (۲۲۵) معتبر نمی باشد . لذا برای تأمین و برقراری چگالی شار مشابه ، نسبت $\frac{V}{f}$ در فرکانسهای پائین افزایش داده میشود . شکل (۹۰) تغییرات مورد نیاز ولتاژ برحسب فرکانس را نشان میدهد .



شکل(۹۰) ولتاژ مورد نیاز در قبال تغییرات فرکانس جهت تامین چگالی شار ثابت در شکاف هوایی

در شکل (۸۹) ولتاژ موتور را میتوان تغییر داد ، بشرطی که ولتاژ ورودی به اینورتور تغییر کند . تغییر V_i بوسیله تغییر زاویه آتش یکسوساز کنترل شده امکانپذیر است . گفتنی است اگر ولتاژ خروجی اینورتور بتواند توسط خود اینورتور تغییر کند (اینورتورهای PWM یا مدولاسیون پهنای پالس) ، دراینصورت یکسوساز کنترل شده را میتوان با یکسوساز دیود جایگزین نمود . دراینحالت V_i ثابت مانده و خروجی اینورتور توسط خود اینورتور تغییر میکند . شکل (۹۱) مشخصه گشتاور سرعت موتور القایی سه فاز را تحت فرکانس های متغیر نشان میدهد . در فرکانس مبنا ، ولتاژ پایانه موتور حداکثر مقداریست که توسط اینورتور حاصل میشود. در فرکانسهای زیر شار شکاف هوائی با تغییر V_1 نسبت به f_1 ثابت نگه داشته میشود. لذا در ناحیه زیر فرکانس گشتاور ماکزیمم ثابت باقی می ماند . در ناحیه فرکانسهای بیش از f_{base} دیگر V_1 را نمیتوان متناسب با فرکانس افزایش داد . دراینحالت شار در شکاف هوائی کاهش یافته و درنتیجه گشتاور ماکزیمم کاهش می یابد . عملکرد در این ناحیه مترادف به سیستم کنترل تضعیف میدان در موتورهایDC است . در این ناحیه توان ثابت میسر خواهد بود . بطور کلی باید گفت :

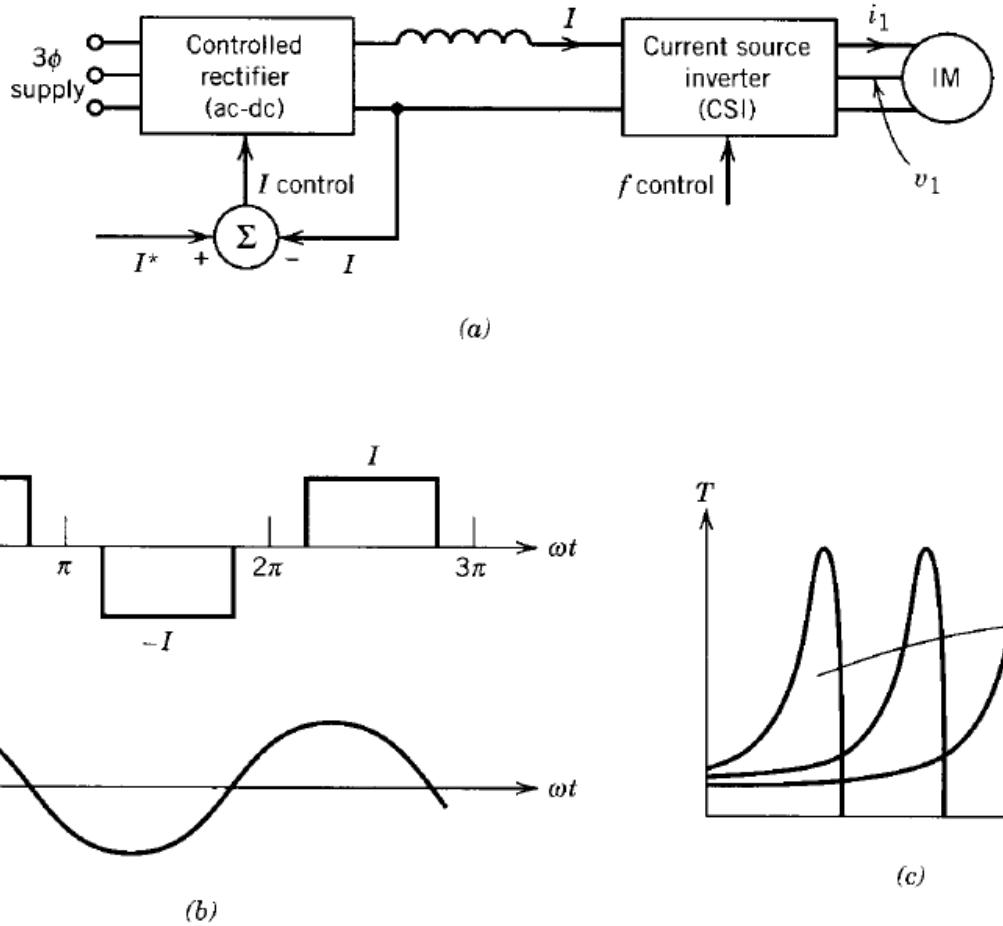
۱. **از فرکانس صفر تا f_{base} ناحیه گشتاور ثابت میسر می گردد .**
۲. **از فرکانس f_{base} به بالا ناحیه توان ثابت ممکن میشود .**



شکل(۹۱) ولتاژ مورد نیاز در قبال تغییرات فرکانس جهت تامین چگالی شار ثابت در شکاف هوایی

در شکل (۹۱) گشتاور بار نیز نشان داده شده و باید گفت سرعتهای n_1 تا n_8 خیلی به سرعتهای سنکرون مربوطه نزدیک هستند لذا در این روش کنترل سرعت ، لغزش عموما کوچک است و بازده بسیار بالاست . اینورتور شکل (۸۹) یک اینورتور منبع ولتاژ محسوب میشود و به آن اینورتور ولتاژ یا VSI می گویند . در این سیستم ولتاژ خط- خط در پایانه موتور یک موج شبه چهار گوش با پهنا یا عرض ۱۲۰ درجه است . باید گفت بخاطر اندوکتانس موتور جریان موتور اساسا میتواند بصورت یک جریان سینوسی محسوب شود .

شکل(b-۸۹) ولتاژ خط- خط موتور و شکل (c-۸۹) جریان موتور را نشان میدهند . البته اینورتورهای منبع جریان نیز وجود دارند که ما فعلا وارد جزئیات مار و نحوه کار آنها نمی شویم . از این اینورتورهای منبع جریان جهت کنترل سرعت موتورهای القایی نیز استفاده میشود . نمودار جعبه ای چنین سیستم کنترل در شکل (۹۴) نشان داده شده است و این سیستم کنترل از نوع حلقه باز است . در این سیستم جریان ورودی به اینورتور توسط یکسوساز کنترل میشود . همانطور که از شکل (b-۹۲) پیداست جریان ورودی به موتور موج شبه چهارگوشی است که پهنا یا عرض ۱۲۰ درجه است . باید دانست ولتاژ پایانه موتور اساسا میتواند یک موج سینوسی محسوب شود (شکل c-۹۲) . مشخصه های گشتاور سرعت موتورهائی که توسط اینورتور جریان تغذیه میشوند مطابق شکل (c-۹۲) است . مشاهده میشود شیب این منحنی ها در حوالی سرعت سنکرون خیلی تند است .



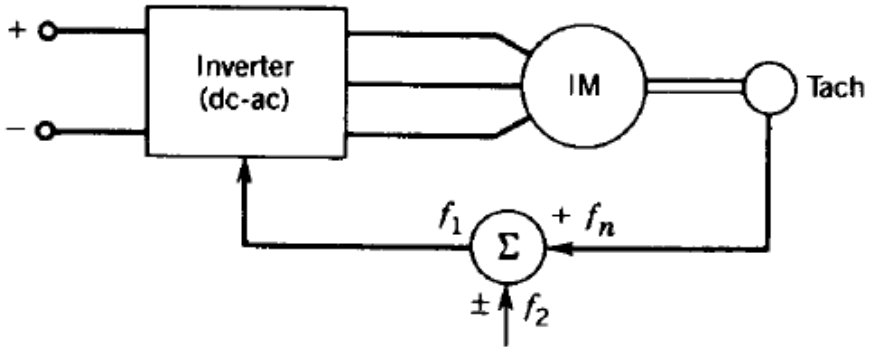
شکل(۹۲) موتور القایی سه فاز که توسط اینورتر جریان تغذیه می شود

عملکرد موتور القايي سه فاز تحت فرکانس لغزش ثابت

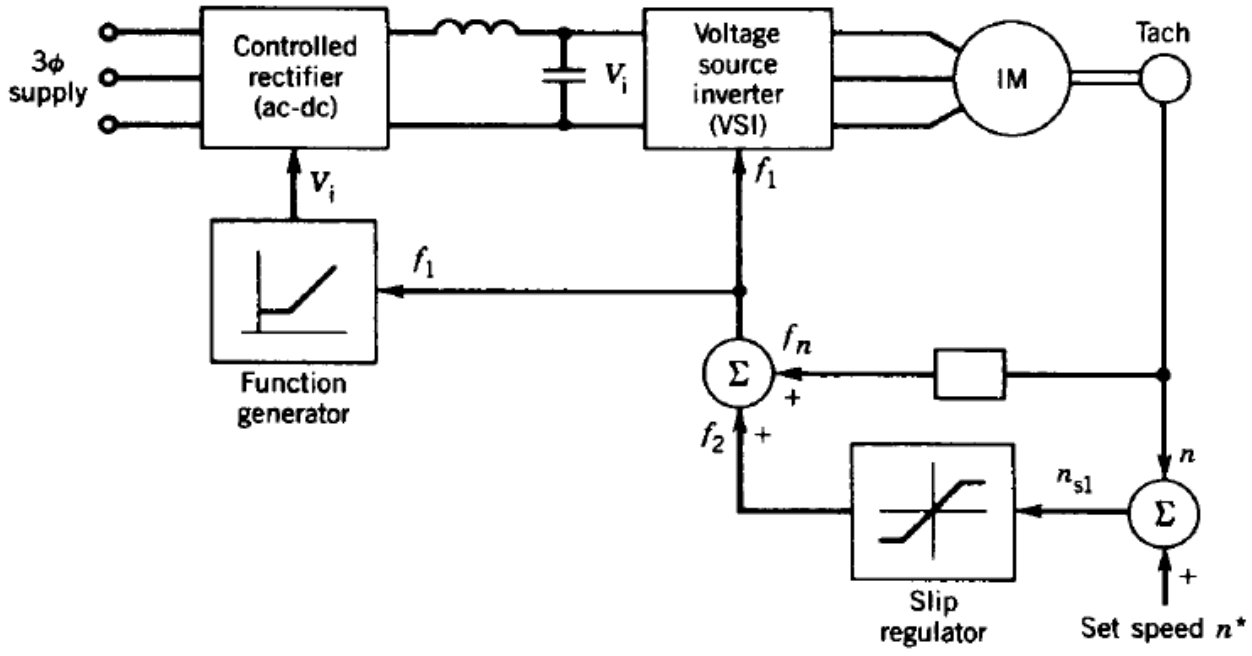
جهت عملکرد پربازده موتور، مطلوب آنست که در تحت فرکانس لغزش ثابت یا کنترل شده ای کار کند . فرکانس لغزش درحقیقت همان فرکانس روتور است بازده و ضریب توان بالا موقعی حاصل میشود که فرکانس لغزش (f_2) کمتر از f_{2b} باشد باید دانست f_{2b} فرکانس روتور درهنگام پدید آمدن گشتاور ماکزیمم است . به f_{2b} فرکانس فروپاشی یا پرتگاهی گفته میشود. نمودار جعبه ای شکل (۹۳) را درنظر می گیریم . سیگنال f_n نمایانگر فرکانس متناظر با سرعت روتور است . به زیگنال f_n زیگنال f_2 که نمایانگر فرکانس لغزش یا فرکانس روتور است افزوده میشود. البته گاهی f_2 از f_n کسر می گردد . باید دانست در حالت موتوری f_n با f_2 جمع میشود و تفریق f_2 از f_n به حالت ترمز مربوط میشود. بطور کلی داریم :

$$f_1 = f_n \pm f_2 \qquad (۲۲۶)$$

در رابطه اخیر f_1 فرکانس استاتور می باشد باید گفت در تحت هر سرعت f_2 نمایانگر فرکانس مدار روتور یا فرکانس لغزشی است .



شکل(۹۳) کنترل فرکانس (f2) سیستم از نوع حلقه باز



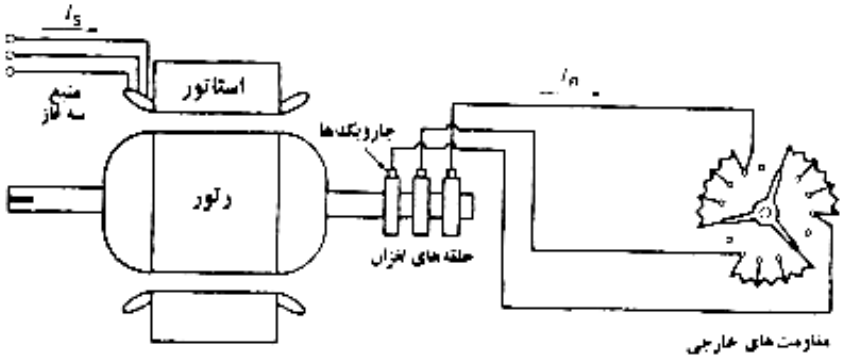
شکل (۹۴) سیستم کنترل حلقه بسته جهت تنظیم فرکانس لغزش و عملکرد موتور با v/f ثابت

کنترل سرعت با تغییر مقاومت روتور

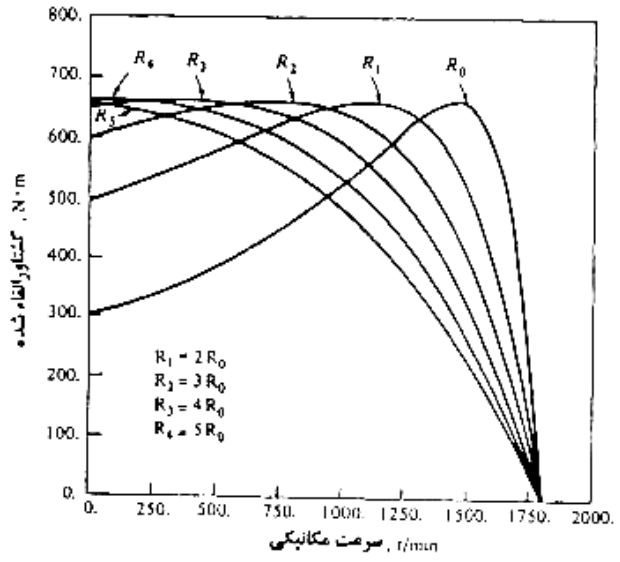
در موتور القائی روتور سیم پیچی شده ، هادیهای روتور از جنس سیم لاکی است که درون شیارهای روتور به گونه ای مشابه سیم پیچی استاتور قرار می گیرند . سیم پیچی روتور حتما سه فاز و معمولا بصورت ستاره متصل می شود و باید برای تعداد قطب یکسان با استاتور پیچیده شود . مقاومتهای خارجی را میتوان از طریق حلقه های لغزان و جاروبکها به سیم پیچی روتور مطابق شکل (۹۵) متصل ساخت . لازم به گفتن است که برای داشتن تقارن کامل بین سه فاز روتور ، سه مقاومت متغیر خارجی از نظر مکانیکی قفل میشوند تا در هر موقعیت اندازه های مساوی داشته باشند .اکنون با تغییر مقاومت روتور نه تنها لغزش خارج کننده تغییر میکند بلکه تحت گشتاور بار مفروضی میتوان لغزش را تغییر داد . با تقریب خوب میتوان گفت :

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{R_{21}}{R_{22}} \qquad (۲۲۷)$$

یعنی نسبت لغزشها در دو حالت مختلف متناسب با مقاومت روتور در این دو حالت است . شکل (۹۶) اثر تغییر مقاومت روتور بر روی منحنی گشتاور- لغزش را نشا ن می دهد از این شکل به روشنی درمی یابید که با تغییر مقاومت روتور میتوان سرعت موتور را تحت بار مفروض تغییر داد . بطور کلی نقاط قوت و ضعف موتور حلقه لغزان را اینچنین میتوان خلاصه نمود .



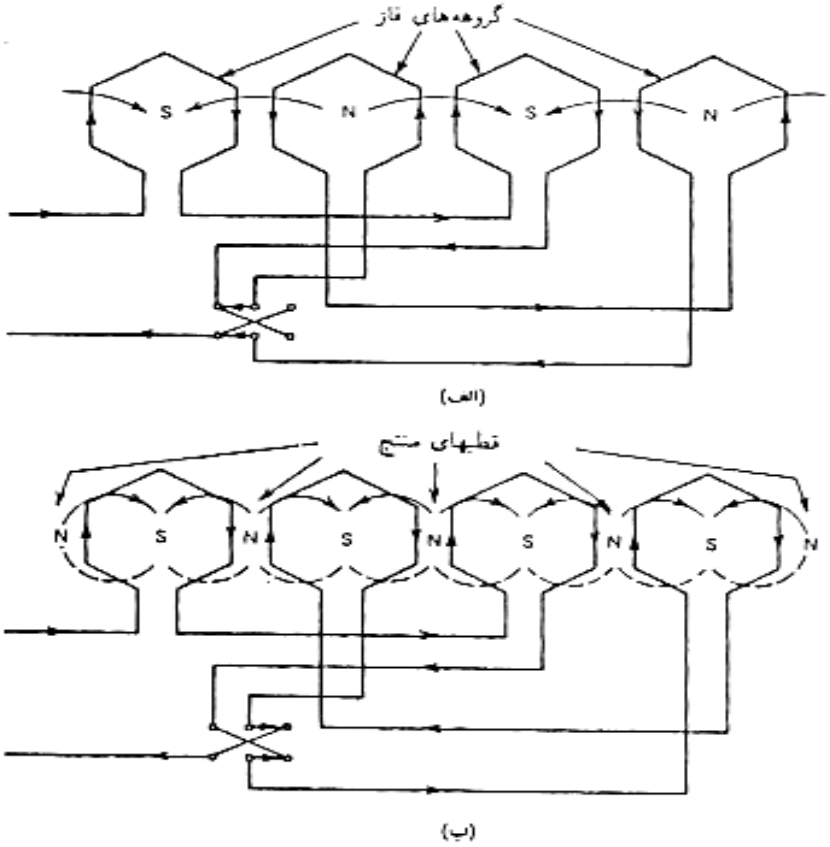
شکل (۹۵) موتور القایی حلقه لغزان با مقاومت های خارجی روتور



شکل (۹۶) کنترل سرعت با تغییر مقاومت روتور در ماشین حلقه لغزان

کنترل سرعت با تغییر تعداد قطب

روشهای استاتور چند سیم پیچه ، سیم بندی قطب پشت سرهم و تعدیل دامنه قطب ، سه راه اصلی جهت تغییر تعداد قطبهای استاتور یک ماشین القایی هستند . قطبهای استاتور در یک ماشین القایی توسط آرایش مناسب هادیهای سیم پیچی بوجود می آیند .در این ماشین برخلاف ماشینهای جریان مستقیم ، قطبها قابل دیدن نیستند . بنابراین یک استاتور با تعداد استانداردی از شیارها ممکن است برای دو ، چهار ، شش و یا هشت قطب ، تنها با عوض کردن اتصالات انتهایی کلافها پیچیده شود. اگر دو سیم پیچی کاملا مستقل روی استاتور ، یکی برای چهار قطب و دیگری برای شش قطب پیچیده شود دراینصورت تحت فرکانس تغذیه ۵۰ هرتز به ترتیب سرعت سنکرون ۱۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه را بوجود می آورند. البته توجه دارید که سیم پیچی که استفاده نمیشود باید توسط کلیدی کاملا باز و یا حداقل بصورت ستاره رها شده باشد ، درغیر اینصورت به دلیل عمل ترانسفورمری، ولتاژی در سیم پیچ بلا استفاده بوجود می آید که درنتیجه زیاد گرم شدن دستگاه را به دلیل جاری شدن جریانهای گردشی به دنبال خواهد داشت . لازمه این روش تغییر تعداد قطب استاتور بزرگ تر است تا بتوان سیم بندی اضافه را در ماشین جای داد که درنتیجه هزینه ابتدایی ماشین بالا خواهد رفت . در روش سیم پیچی قطب پشت سرهم که یک روش کنترل سرعت قدیمی است از این حقیقت استفاه میشود که تعداد قطبهای استاتور یک ماشین جریان متناوب را براحتی میتوان به نسبت یک به دو تنها با تغییر اتصالات انتهایی کلافها افزایش داد . معمولا در موتور یک سرعته گروههای کلاف طوری بهم متصل می گردند که بر روی محیط داخلی استاتور یک در میان قطبهای شمال و جنوب توسط کلافها بوجود می آیند . شکل (۹۷) این مطلب را برای فاز a یک ماشین چهارقطبی نشان می دهد



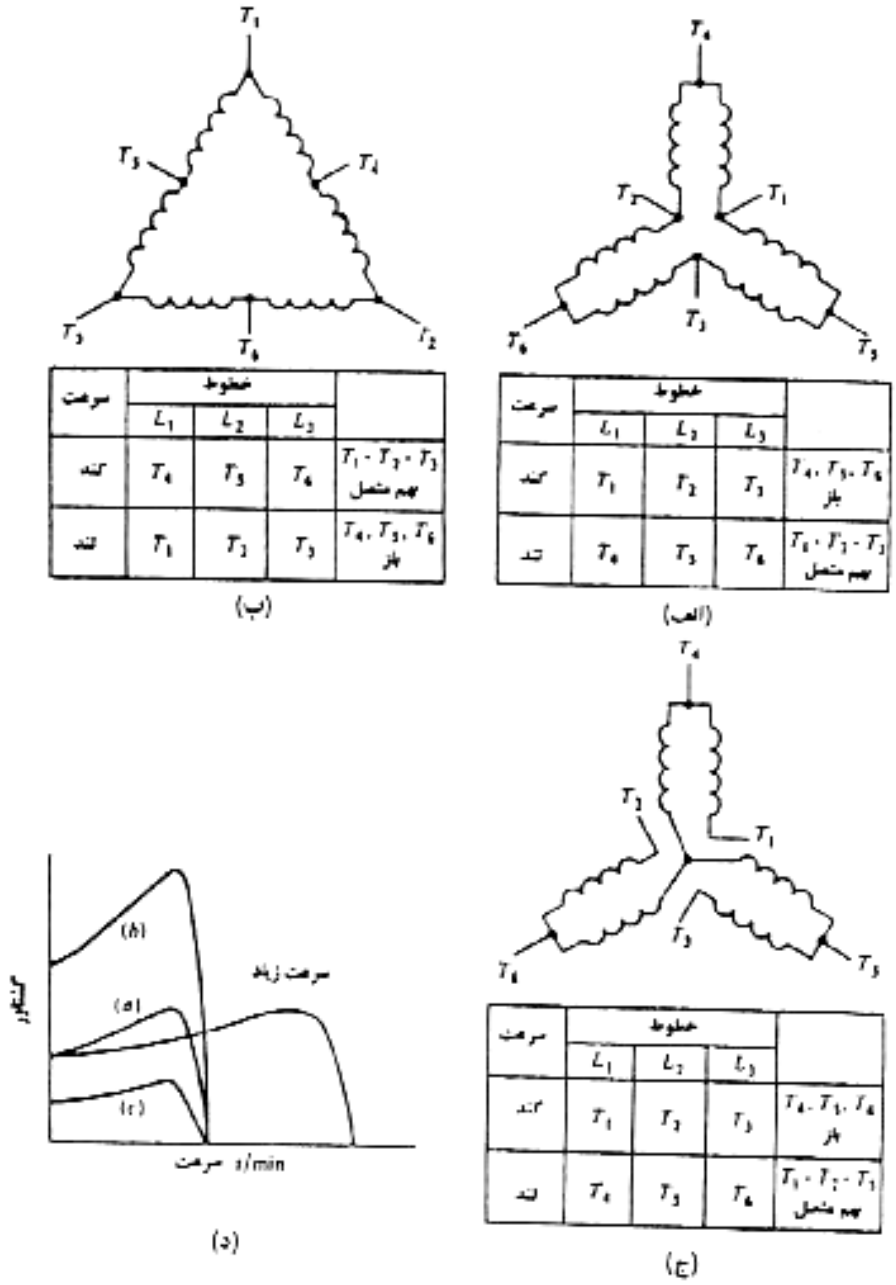
شکل (۹۷) تغییر اتصالات جهت افزایش تعداد قطبهای استاتور

اکنون اگر تنها اتصالات انتهایی این کلافها را مطابق شکل (۹۷) عوض نمایید ، کلافهایی پشت سرهم با میدان یکسان خواهید داشت . بطور مثال با این عمل میدان مغناطیسی هر چهار گروه کلاف ، از استاتور خارج میشوند و بنابراین هرکدام یک قطب جنوب خواهد بود .فوران مغناطیسی این ماشین باید از طریق فضای بین این چهار گروه کلاف به استاتور برگردد که درنتیجه چهار قطب مغناطیسی شمال در این بین بوجود خواهد آمد به این ترتیب تعداد قطبهای استاتور به نسبت یک به دو افزایش می یابد که درنتیجه سرعت ماشین دو به یک کاهش پیدا میکند . گام قطب را در سیم پیچهای با تعداد قطب متغیر ، معمولا یا بسیار کوتاه یا بسیار بلند انتخاب می کنند .

روتور موتوری است که سرعت آن باید توسط تغییر قطب کنترل شود تقریبا همیشه قفس سنجابی است زیرا که این نوع روتور بطور خودکار برای هر تعداد قطب روی استاتور تنظیم می گردد . با ترکیب دو روش استاتور دو سیم پیچه و سیم پیچی قطب پشت سر هم، میتوان موتورهای چهار سرعته مثلا با سرعتهای ۴۷۵/۷۱۵/۹۵۰/۱۴۲۵ دور در دقیقه ساخت. از اینجا کاملا روشن است که کنترل سرعت پیوسته آنگونه که درمورد موتور القایی با تغییر تعداد قطب به ثمر نخواهد نشست. بعنوان مثال ، موتور چهار سرعته بالا میتواند در بی باری با سرعت ۹۹۰ دور در دقیقه بچرخد و در بار کامل سرعت به ۹۵۰ دور در دقیقه برسد. برای این موتور ، کمترین سرعت بعدی در بار کامل ۷۱۵ دور در دقیقه است و موتور نمیتواند بین این دو سرعت عمل نماید مگر آنکه شدیدا بار اضافه بر روی آن اعمال شود . از طرف دیگر موتورهای شانت با دامنه سرعت بین ۱۴۲۵ تا ۴۷۵ دور در دقیقه که سرعت آنها بطور پیوسته قابل کنترل است بسیار معمولند . زمانیکه موتور القایی چند فاز برای بهره برداری دو سرعته با استفاده از روش سیم پیچی قطب پشت سرهم ساخته میشود سه نوع موتور دو سرعته استاندارد برحسب آرایش سیم پیچهای استاتور بدست خواهد آمد .

۱. موتور توان ثابت که از آن معمولا برای ماشینهای ابزار مانند ماشین تراش ، اره ، رنده و ... استفاده میشود . دراین کاربرد سرعت پایین تر لازم است تا گشتاور بار را براند و گشتاور با وارون سرعت متناسب است . بعنوان مثال یک موتور چهارکیلو وات ، ۵۰ هرتز در سرعتهای نامی بالا و پایین ۱۴۲۵ و ۷۱۲ دور در دقیقه به ترتیب گشتاور خروجی ۲۷ و ۵۴ نیوتن متر را حاصل می نماید . نحوه اتصالات موتور در شکل (الف-۹۸) به نمایش درآمده است .
۲. موتور گشتاور ثابت که اغلب برای کاربردهایی مانند نقاله ها و پمپهای با حرکت تناوبی لازم است ، گشتاور برای هردو سرعت یکسان است و بنابراین توان خروجی این موتور با سرعت زیاد دو برابر توان خروجی با سرعت کم خواهد بود (شکل ب-۹۸) .
۳. موتور توان متغیر- گشتاور متغیر که برای بادبزنها و پمپهای گریز از مرکز بجای پمپهای حرکت متناوب استفاده میشود . در این نوع موتور گشتاور متناسب با سرعت است . بنابراین توان در سرعت زیاد چهار برابر توان در سرعت کم خواهد بود (شکل ج-۹۸) .

روش تعدیل دامنه قطب برای تغییر تعداد قطب ، روش دیگری است که در سال ۱۹۵۷ میلادی در انگلستان اختراع گردید . در این روش تعداد قطبها را با نسبتی متفاوت از یک به دو میتوان تغییر داد .

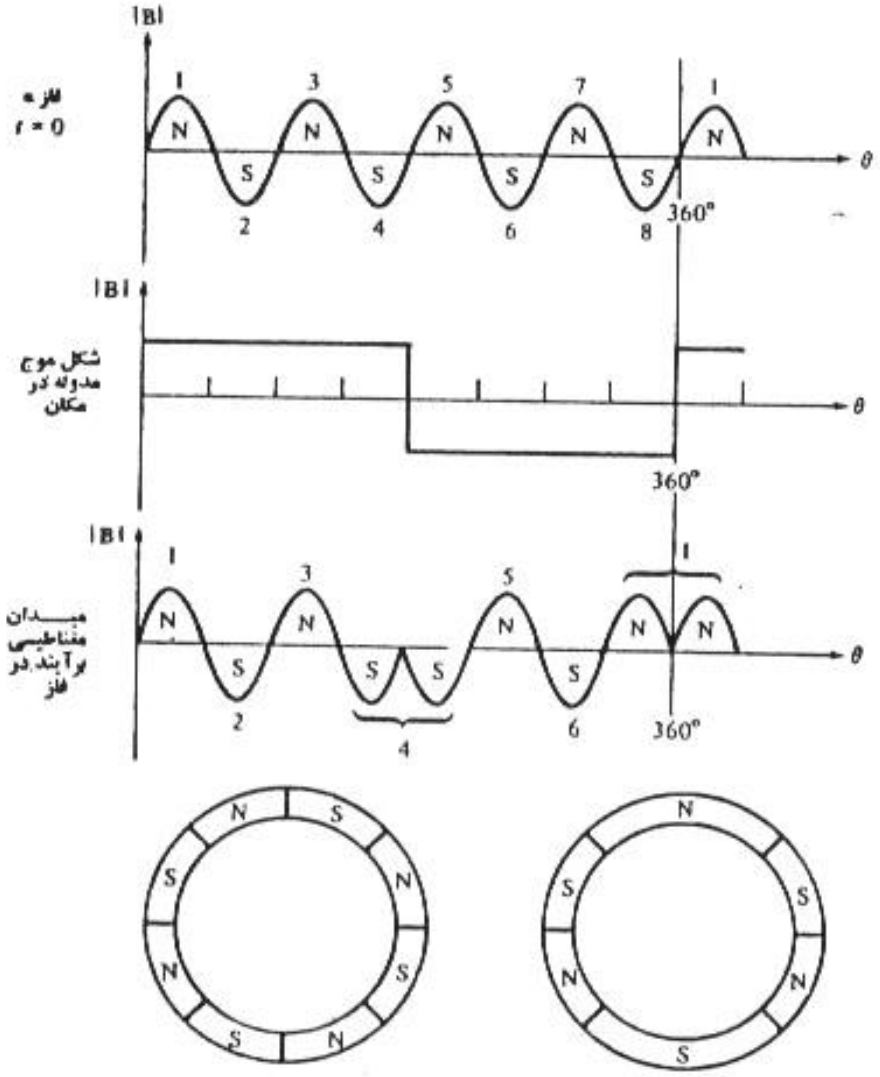


شکل(۹۸) نحوه اتصالات کلافهای استاتور برای تغییر تعداد قطب (الف) توان ثابت (ب) گشتاور ثابت (ج) گشتاور متغیر- توان متغیر

تئوری این روش بر این اساس است که خروجی برآیند از ترکیب دو موج سینوسی با فرکانسهای متفاوت، همنه هایی با فرکانس مساوی مجموع و تفاضل دو فرکانس اصلی خواهد داشت .

$$Cos(\omega_1 t)Cos(\omega_2 t) = \frac{1}{2}Cos(\omega_1 + \omega_2)t + \frac{1}{2}Cos(\omega_1 - \omega_2)t \qquad (۲۲۸)$$

در روش تعدیل دامنه قطب همین اصل، با توزیع فضایی موجهای ن م م استاتور ماشین اعمال میشود . اگر سیم پیچی ماشینی که P قطبی است با K کلیدزنی در اتصالهای گروههای کلاف یکفاز تعدیل شود دراینصورت دو موج با تعداد قطبهای P+K و P-K حاصل میگردند . درعمل ، تابع تعدیل گر تاحدی ناهنجار یعنی یک موج مستطیلی با دامنه یک است و این تعدیل با وارونگی اتصالهای نیمی از گروه کلافهای قطب درهر سیم پیچ فاز انجام میشود .



شکل(۹۹) تعدیل دامنه قطب فاز a استاتور یک ماشین القایی هشت قطب

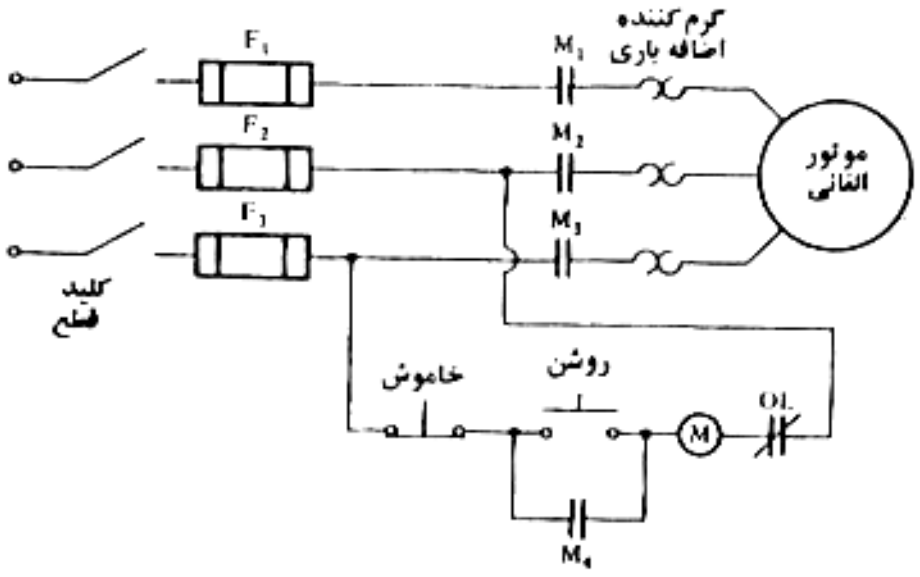
بعنوان مثال در شکل (۹۹) ملاحظه می نمایید که با این شیوه تعداد قطبهای اصلی ماشین از عدد ۸ به عدد (۲-۸) یعنی ۶ و یا (۲+۸) یعنی ۱۰ عدد میتواند تغییر پیدا کند .

کدام سرعت همزمان جامه عمل می پوشد؟ برای پی بردن به آن باید میدان سیم پیچهای دو فاز دیگر بحساب آیند . میدان شش قطب نسبت به تابع تعدیل گر ، تابع کسینوسی و میدان ده قطب منفی تابع کسینوسی است . تابع تعدیل گر ، ۳۶۰ درجه مکانیکی گسترش دارد .تابعهای تعدیل گر دو فاز دیگر نسبت به این تعدیل گر ، به ترتیب ۱۲۰ درجه مکانیکی پس فاز و پیش فاز است . برای میدان شش قطبی ، این جابجایی برابر ۳۶۰ درجه الکتریکی است . یعنی همنه های شش قطبی میدانهای سه سیم پیچ فاز در فضا همفازند اما در زمان همفاز نیستند . سه میدان شش قطب با جریانهای سه سیم پیچ فاز متناسبند و اگر این جریانها متعادل باشند (یا اگر ماشین اتصال ستاره شده باشد) مجموع لحظه ای آنها صفر است پس مجموع همنه های شش قطبی محرکه های مغناطیسی سه فاز ، به میدان کل برابر صفر منجر می گردد . از سوی دیگر ن م م فاز ده قطبی ، ۶۰۰ درجه الکتریکی از هم فاصله دارند بنابراین اگر توالی فاز میدان هشت قطبی abc باشد میدان ده قطب با توالی abc خواهد بود .

برای جلوگیری از گردش وارونه موتور هنگامیکه به ده قطب تعدیل میشود دوتا از پایانه ها باید وارونه گردند درعین حال ، اتصالهای کلافهای چهار قطب در هر فاز وارونه میشوند . پیش از کشف این روش ، برای داشتن دو سرعت که به نسبت دو بر یک نبودند، می بایست دو سیم پیچ جداگانه در موتور وجود می داشت . این روش موجب کاهش زیادی در اندازه و بهای موتور شده است .

راه اندازي موتورهاي القايي

برای راه اندازی موتورهای القایی از دو روش وصل مستقیم به شبکه و اعمال ولتاژ کاهش یافته استفاده میشود موتور القایی با موتور سیم پیچی شده را میتوان با مقاومتهای مناسب که به کلافهای روتور متصل می شوند مستقیما به منبع تغذیه وصل نمود . این مقاومتها همانگونه که از قبل هم میدانید نقش افزایش گشتاور راه اندازی و کاهش جریان راه اندازی را ایفا می کنند و با سرعت گرفتن موتور بتدریج از مدار خارج میشوند .
موتور القایی چند فاز با وصل مستقیم به شبکه ممکن است جریان راه اندازی بین ۵ تا ۱۰ برابر مقدار نامی را از منبع بکشد . در موتورهای قفس سنجابی بدلیل محکمی ساختار ، این جریان بالا در یک مدت کوتاه صدمه ای به خود موتور وارد نمی کند اما ممکن است افت ولتاژ غیرقابل قبولی در شبکه تغذیه محلی بوجود آورد . نمونه بارز و معمول آن کم نور شدن چراغهای منزل درهنگام راه افتادن موتور یخچال است . اگر شبکه محلی قوی باشد یعنی مقاومت ظاهری منبع بسیار کوچک باشد ، موتورهای القایی چند مگاواتی را نیز میتوان با اتصال مستقیم به شبکه راه اندازی کرد . بطور کلی برای موتورهای بزرگتر از پنج کیلووات برای کاهش جریان تازشی راه اندازی ، بهتر است احتیاط نمود و هرکجا که ممکن باشد ، موتور باید از بار جدا شود زیرا کاهش گشتاور بار و لنگر لختی ، مدت دور گرفتن موتور را کوتاه میکند . البته اندازه موتور به تنهایی روش راه اندازی را معلوم نمی سازد ، ظرفیت منبع تغذیه ، خطوط تغذیه گر موتورها ، سایر دستگاههای تغذیه شده توسط منبع و ماهیت بار همگی بر انتخاب نوع راه اندازی اثر می گذارند .



شکل(۱۰۰) راه انداز مغناطیسی موتور القایی سه فاز با وصل مستقیم به شبکه همراه با مدار کنترل

یک نمونه از مدار راه انداز مغناطیسی خودکار موتور القایی تحت ولتاژ کامل در شکل (۱۰۰) به نمایش درآمده است . در این راه انداز بعضی نکات ایمنی مانند حفاظت در برابر اتصال کوتاه ، اضافه بار و کاهش ولتاژ درنظر گرفته شده است .

کار با اینگونه راه اندازها بسیار ساده است . هرگاه کلید اصلی سه پل برای اعمال ولتاژ کامل به موتور و مدار کنترل متصل بین خط L_2 , L_1 بسته شود و دکمه روشن فشار داده شود مراحل زیر بطور خودکار انجام می شوند :

۱. با فشار دکمه روشن ، مدار با خط L_1 از میان دکمه معمولا بسته ایست ، سیم پیچ M سه اتصال معمولا بسته اضافه باری OL_3 , OL_2 , OL_1 به خط L_2 کامل می گردد .

۲. با برق دار شدن سیم پیچ رله M ، اتصالهای آن M_4 , M_3 , M_2 , M_1 بسته میشوند . M_4 که اتصال نگه دارنده نامیده میشود به بهره دار اجازه میدهد تا انگشت خود را از روی دکمه روشن بردارد بدون آنکه رله M بی برق شود .

۳. با بسته شدن اتصالهای M_3 , M_2 , M_1 ولتاژ کامل خط به پایانه های T_3 , T_2 , T_1 موتور اعمال میگردد . بنابراین موتور روشن میشود و شتاب می گیرد .

۴. سه رله اضافه باری OL معمولا با گرما عمل میکنند مگر در مورد موتورهای بزرگ که ممکن است مغناطیسی بسته باشند . این رله ها با یک تأخیر زمانی عمل می کنند و بنابراین دوره راه اندازی عادی موتور اثر چندانی بر آنها ندارد . اگر پس از راه اندازی ، موتور تحت اضافه باری قرار بگیرد به گونه ای که جریان خط تقریبا ۱۲۵٪ جریان نامی شود یک عدد یا بیشتر ، از این رله ها گرم میشود و اتصالهای اضافه باری مربوط به مدار کنترل باز می گردند و بنابراین رله M را قطع می نمایند . قطع M همان اثر فشار دادن دکمه خاموش را دارد . دراینصورت هر چهار اتصال M باز میشوند و موتور را از شبکه جدا می سازند . قبل از دوباره روشن کردن موتور ، رله های گرمایی باید خنک و بطور دستی دوباره آماده گردند تا اتصالهای آنها دوباره بسته شوند

۵. اگر ولتاژ خط به زیر ۹۰٪ مقدار نامی کاهش یابد و یا کلا قطع شود رله M نمیتواند اتصالهای خود را نگه دارد و این نیز سبب قطع شدن موتور از شبکه می گردد . حفاظت در برابر کاهش ولتاژ یکی از خصوصیات باارزش راه اندازهای مغناطیسی است زیرا از دوباره راه اندازی موتور جلوگیری میکند مگر آنکه بهره بردار دوباره دکمه روشن را فشار دهد . از این ویژگی در بهره برداری از ماشینهای ابزار استفاده میشود .

۶. اگر دکمه خاموش را فشار دهید ، واضح است که مدار رله M قطع می گردد و تمام اتصالها باز میشوند که دراینصورت ماشین به حالت سکون باز خواهد گشت .

حفاظت در برابر اتصال کوتاه موتور توسط فیوزها فراهم می گردد . اگر یک اتصال کوتاه ناگهانی در موتور رخ دهد و سبب عبور جریانی با چندین برابر مقدار نامی شود فیوزها می سوزند و موتور را با جداسازی از منبع تغذیه از سوختن نجات می دهند . البته این فیوزها نباید در هنگام راه اندازی عادی موتور بسوزند بنابراین آنها طوری طراحی میشوند که قبل از سوختن ، چندین برابر جریان نامی را از خود عبور دهند . این بدان معنی است که این فیوزها در هنگام اتصالی از طریق مقاومت بالا و یا اضافه باری شدید موتور را حفاظت نمی کنند . موقعیتهایی وجود دارند که اعمال ولتاژ کاهش یافته برای راه اندازی حتی در مورد موتور کوچک و متوسط لازم است . مانند زمانی که در یک مجتمع ، موتوری از بقیه موتورها بطور قابل ملاحظه ای بزرگ تر باشند .

بنابراین اگر چندین موتور 1KW و یک موتور 10KW همگی از یک منبع تغذیه شوند ، معمول است که ولتاژ کاهش یافته در مورد موتور بزرگتر اعمال شود . همچنین بنابر قاعده سرانگشتی ، موتوری که برای راه اندازی نیاز به مدت طولانی دارد معمولا با ولتاژ کاهش یافته روشن میشود . اگرچه اغلب در این موارد از یک موتور القایی حلقه لغزان با اعمال ولتاژ کامل استفاده می گردد . باید بخاطر سپرد که هدف اصلی از کاهش ولتاژ در راه اندازی ، کاهش جریان راه اندازی است اگرچه گاهی اوقات ممکن است هدف کاهش گشتاور راه اندازی هم باشد . چهار روش برای کاهش جریان راه اندازی موجودند که همگی آنها تحت گروه بندی کلی راه اندازی با ولتاژ کاهش یافته قرار می گیرند .

راه اندازي با مقاومت ظاهري اضافي در استاتور

در این روش مقاومت و یا القاگری بین پایانه های موتور و منبع تغذیه قرار می گیرد . در لحظه راه اندازی ، مقاومت ظاهری اضافی سبب افت ولتاژ میشود و بنابراین تنها کسری X از ولتاژ منبع تغذیه در پایانه موتور ظاهر می گردد . درنتیجه جریان راه اندازی X برابر و گشتاور راه اندازی X^2 برابر خواهد شد . این روش بسیار شبیه راه اندازی موتورهای جریان مستقیم با مقاومت اضافی در مدار آرمیچر است با این تفاوت که در موتورهای DC گشتاور راه اندازی X برابر میشود .

همچنین باید بخاطر داشت که ولتاژ موتور جریان متنائب ، تفاوت فیزوری بین ولتاژ خط و ولتاژ دو سر مقاومت و یا القاءگر است . به دلیل ضریب توان بسیار پائین موتور القایی در راه اندازی ، مقاومت زیادی در مقایسه با موتور DC با ضریب توان یک در راه اندازی موتور آسنکرون لازم است . از اینرو معمولا بجای مقاومت از القاءگر استفاده میشود . البته القاءگرها گران ترند اما باید توجه داشت که تلفات انرژی آنها بسیار کمتر است .

راه اندازي با نصف سيم پيچ استاتور

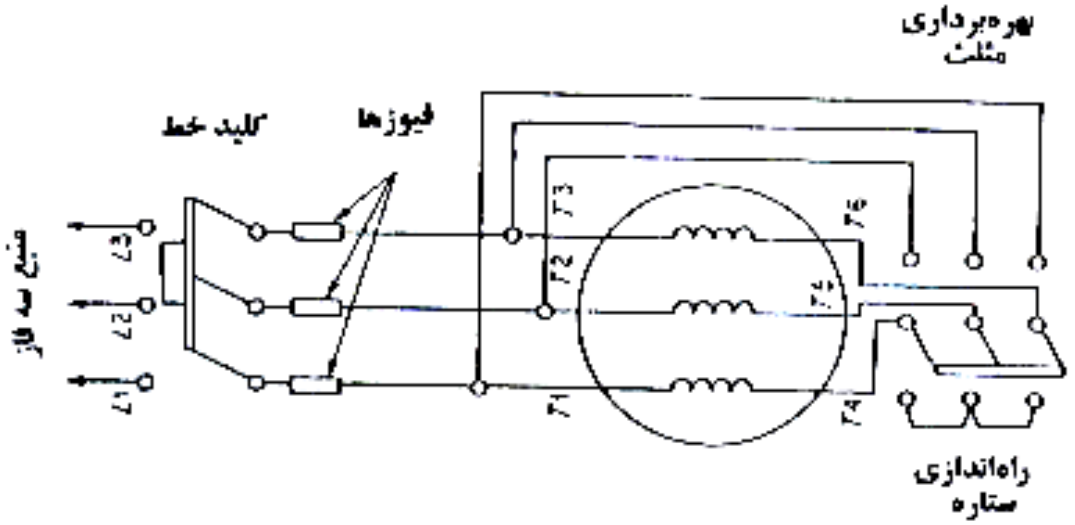
بعضی موتورهای القایی چندفاز با دو گروه یکسان سیم پیچی سه فاز ساخته میشوند . در اینصورت بین دو مقدار نامی برای ولتاژ مثلا ۴۴۰/۲۲۰ ولت حق انتخاب خواهیم داشت . در ولتاژ پایین و بالا دو گروه کلاف به ترتیب موازی و سری باهم متصل می گردند . اگر موتور دو ولتاژه برای بهره برداری ولتاژ پایین متصل شده باشد دراینصورت میتوان از راه اندازی با نصف سیم پیچ استاتور سود جست .

به دلیل این حقیقت که در ابتدا تنها یک سیم پیچ برای حصول میدان گردان برق دار میشود مقاومت ظاهری سیم پیچ استاتور ، بزرگتر از حالتی است که دو سیم پیچ موازی شده باشند و بنابراین جریان راه اندازی تقریبا به $\frac{1}{2}$ و گشتاور راه اندازی تقریبا به $\frac{1}{4}$ کاهش می یابد . بعد از سرعت گرفتن موتور ، سیم پیچ دیگر هم متصل میشود و دراینصورت در حال کار عادی هر سیم پیچ نصف جریان خط را از خود عبور خواهد داد .

راه انداز ستاره– مثلــث

یکی از روشهای متداول زمانی که موتور بررای کار در حالت مثلث طراحی شده باشد استفاده از راه انداز ستاره– مثلث است . مطابق شکل (۱۰۱) با استفاده از کلید سه تیغه دوطرفه ، ابتدا استاتور بصورت ستاره در

می آید و ولتاژ کامل به پایانه های موتور اعمال می گردد . دراینصورت ولتاژ فاز $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ولتاژ خط است . چون در لحظه راه اندازی موتور مانند یک ترانس اتصال کوتاه عمل میکند و درحقیقت یک مقاومت ظاهری سه فاز است ، جریان فاز نیز $\frac{1}{\sqrt{3}}$ زمانی که ولتاژ کامل خط به هر فاز اعمال می گشت (اتصال مثلث) خواهد شد . هنگامیکه موتور بصورت مثلث وصل شده باشد جریان خط $\sqrt{3}$ برابر جریان فاز است بنابراین راه اندازی موتور بطریق ستاره ، جریان راه اندازی خط $\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$ یا $\frac{1}{3}$ جریان خط نسبت به زمانی که اتصال مثلث باشد خواهد بود . بعلاوه گشتاور راه اندازی متناسب با مجذور ولتاژ فاز است و بنابراین گشتاور حالت ستاره نیز $\frac{1}{3}$ گشتاور راه اندازی حالت مثلث است .



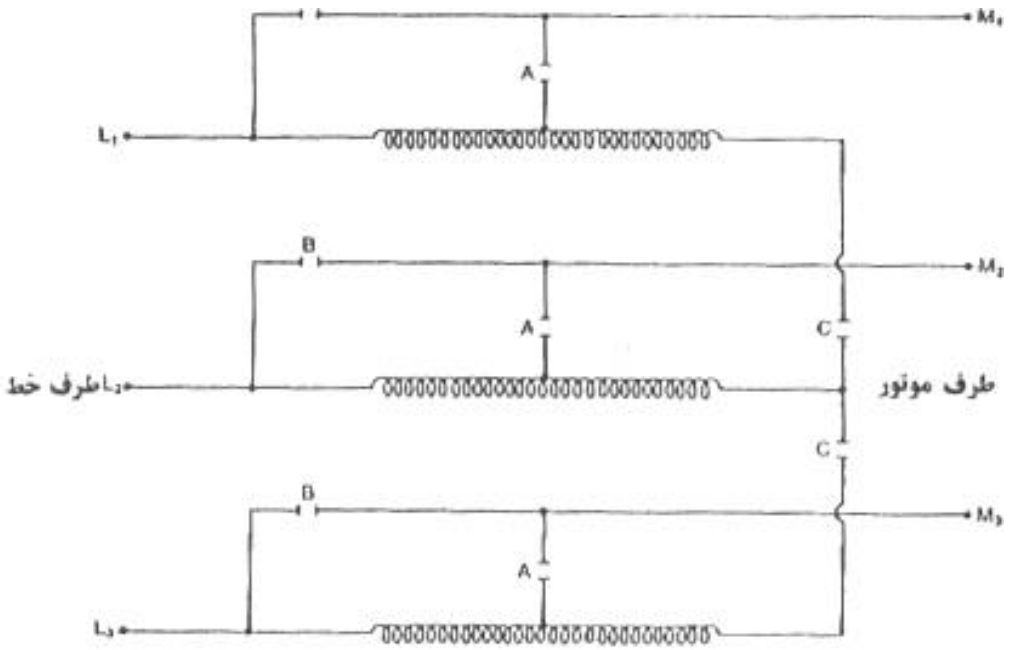
شکل(۱۰۱) روش راه اندازی با کلید ستاره- مثلث

هنگامیکه موتور تقریبا به ۸۰٪ سرعت نامی اش رسید یک اتصال مخصوص (یا توسط همان کلید سه تیغه دوطرفه) سیم پیچها را برای کار دائم بصورت مثلث در مدار قرار میدهند . راه انداز ستاره- مثلث ارزان است و بنابراین با ولتاژهای خط کمتر از ۳۳۰۰ ولت ، زیاد بکار گرفته میشود در ولتاژهای بالاتر بدلیل آنکه سیم پیچی استاتور مثلث شکل تعداد دور بیشتری نسبت به ستاره شکل لازم دارد و بنابراین موتور گران درمی آید دیگر از راه انداز ستاره- مثلث استفاده نمی شود .

راه اندازي با اتوترانس

در راه اندازی موتورهای بزرگ برای کاهش جریان راه اندازی از اتوترانسها استفاده میشود . اتوترانس ممکن است دارای یک یا چند سر ثابت باشد که در زمان دور گرفتن موتور بترتیب مورد استفاده واقع میشوند شکل (۱۰۲) کسری X از ولتاژ تغذیه در موقع راه اندازی توسط اتوترانس به پایه های استاتور اعمال میشود کاهش ولتاژ اعمالی کاهش جریان راه اندازی به داخل موتور را بدنبال دارد باتوجه به اینکه نسبت جریانها در اتوترانس به نسبت وارون ولتاژهاست بنابراین جریان خط در طرف شبکه X برابر آن در طرف موتور است از

اینرو جریان راه اندازی در سمت شبکه X^2 برابر آن نسبت به زمانی است که موتور مستقیما با شبکه راه اندازی میشد . در راه اندازی گشتاور متناسب با مجذور ولتاژ است و بنابراین گشتاور راه اندازی نیز X^2 برابر آن نسبت به وصل مستقیم به شبکه است . X برای موتورهای تا ۴۰ کیلووات معمولا ۶۵/. و ۸۰/. و برای موتورهای بالاتر از ۴۰ کیلووات تا چندصد کیلووات معمولا ۵/. ، ۶۵/. و ۸۰/. انتخاب میگردد . در استفاده از اتوترانس برای راه اندازی موتور القایی دو حالت گذرای مدار باز (که در هنگام رفتن از ولتاژ کاهش یافته به ولتاژ کامل خط ولتاژ از موتور قطع میشود) و گذرای مدار کوتاه (که در هنگام رفتن از ولتاژ کاهش یافته به کامل ولتاژ از موتور قطع نمی گردد) امکانپذیر است . بعنوان مثال در شکل (۱۰۲) در هنگام ولتاژ کاهش یافته به موتور اتصالهای A,C برای هر دو حالت بسته میشوند درهنگام برداشتن ولتاژ کاهش یافته و اعمال ولتاژ کامل به موتور اتصالهای A,C باز و اتصال B در گذرای مدار باز بسته میشوند درحالیکه در گذرای مدار کوتاه اتصال C باز و اتصال B بسته و سپس اتصال A باز میشود البته هزینه دستگاههای کنترلی در حالت گذرای مدار کوتاه از هزینه آن در حالت گذرای مدار باز بیشتر است .



شکل(۱۰۲) راه اندازی با اتوترانس

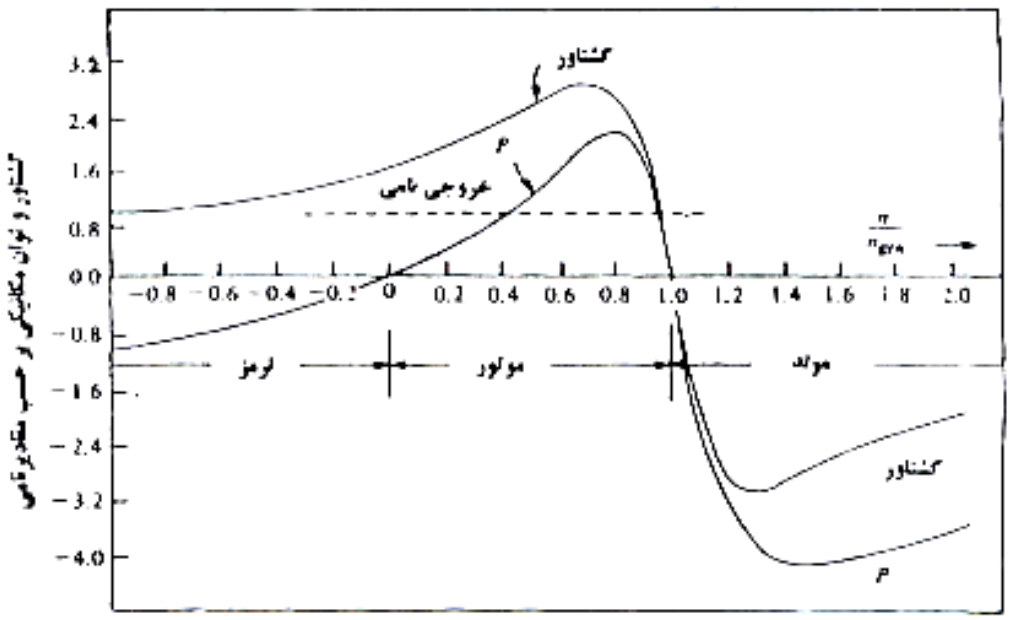
در اینجا میتوان گفت که اگر ولتاژ اعمالی به ۵۷/۷٪ ولتاژ خط کاهش یابد هم جریان و هم گشتاور راه اندازی به $\frac{1}{3}$ مقدار آن در زمان ولتاژ کاهش می یابد این درست همان شرایط راه انداز ستاره- مثلث است البته روش ستاره- مثلث تنها این نسبت را داراست و فقط درصورتیکه شش پایانه سیم پیچها از ماشین بیرون آمده باشند میتواند مورد استفاده قرار گیرد . در پایان باید گفت که اغلب برای پایین آوردن هزینه بجای بکار گرفتن اتوترانس سه فاز از دو اتوترانس بصورت مثلث باز برای راه اندازی موتورهای القایی استفاده میشود .

توقف سریع موتورهاي القايي

همانگونه که در بخش قبلی گفته شد اگر دکمه خاموش (stop) فشار داده شود ماشین مرحله متوقف شدن را طی میکند تا بالاخره بایستد . در موتورهای بزرگ چون لنگر لختی ماشین زیاد است لذا مدتی طول میکشد تا توقف کامل موتور حاصل شود اگر دوران ماشین برای مدتی ادامه یابد و این دوران برای وسایل جنبی یا افراد خطراتی را بدنبال داشته باشد در اینصورت دوران اضافی تا رسیدن به حالت سکون مجاز نیست . دراینحالت باید از روشی استفاده شود که توقف روتور بسرعت و بطور ناگهانی رخ دهد .

ترمز با اعمال فشار مخالف

یکی از روش هایی که میتوان برای توقف سریع موتور القایی از آن استفاده نمود روش اعمال فشار مخالف (plugging) است . این روش را میتوان به خودرویی تشبیه کرد که هنگام حرکت به جلو ناگهان راننده دنده عقب بگیرد دراینصورت جعبه دنده خودرو از بین میرود ولی موتور آن سالم میماند اعمال فشار مخالف را اینگونه انجام میدهند که در شرایطی که بخواهید ماشین توقف نماید قطباورد دو پایانه از سه پایانه آرمیچر (استاتور) را عوض می نمایید درحقیقت با جابجایی دو پایانه جهت چرخش میدان گردان وارون جهت چرخش روتور میشود و سرعت دوران بشدت کاهش می یابد . مطابق شکل (۱۰۳) در مدت زمان اعمال فشار مخالف موتور در ناحیه ترمزی عمل میکند ماشین انرژی جنبشی اجزاء درحال چرخش را جذب میکند و به اینصورت سرعت کاهش می یابد . توان مربوطه نیز کاملا بصورت گرما در روتور به هدر میرود متأسفانه روتور در اینحالت نیز به دریافت توان از استاتور ادامه میدهد که بصورت گرما به هدر خواهد رفت درنتیجه ترمز با روش اعمال فشار مخالف تلفات RI^2 را در روتور سبب میگردد که مقدارش از این تلفات در حالت روتور قفل شده بزرگتر است .



شکل(۱۰۳)منحنی گشتاور –لغزش ماشین القایی با نمایش نواحی ترمزی-موتوری-مولدی

بهمین دلیل باید با استفاده مکرر این روش بر روی موتور اجتناب نمود زیرا که دمای بالای روتور ممکن است میله های روتور را جذب نماید یا سبب اضافه گرم شدن سیم پیچ استاتور گردد بعنوان یک قاعده باید بخاطر سپرد که در مدت اعمال فشار مخالف (سرعت نامی تا توقف کامل) سه برابر انرژی جنبشی ابتدایی تمام قسمتهای دوار گرما در روتور ایجاد خواهد شد برای شتاب و یا توقف سریع بارهای سنگین استفاده از موتورهای روتور سیم پیچی شده توصیه میشود زیرا که بیشتر انرژی گرمایی جذب شده در مدار روتور توسط مقاومتهای خارجی به هدر خواهد رفت .

ترمز با جریان مستقیم

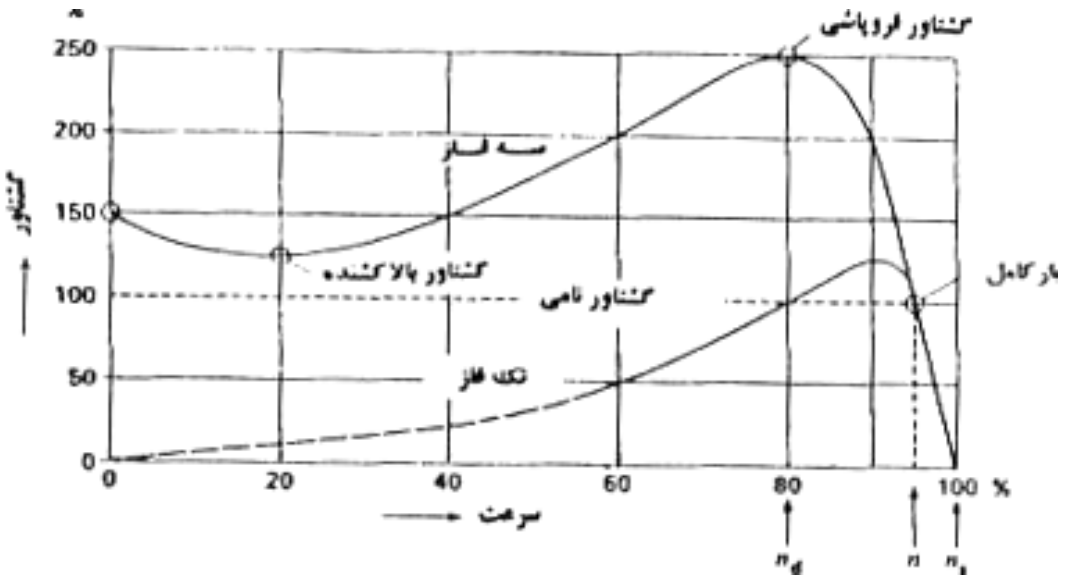
یکی دیگر از روشهای موجود برای توقف سریع موتورهای القایی ترمز با جریان مستقیم است موتور القایی و بار سنگین آن را میتوان با بگردش درآوردن جریان مستقیم در هر دو پایانه سیم پیچ استاتور سریعا متوقف نمود جریان مستقیم قطبهای ساکن شمال و جنوب را بر روی استاتور بوجود می آورد تعداد این قطبها مساوی تعداد قطبهای استاتور در شرایط عادی است ازاینرو در یک موتور القایی سه فاز چهارقطبی بدون توجه به آنکه منبع جریان مستقیم چگونه به پایانه ها متصل شده است چهار قطب DC بوجود خواهد آمد با عبور روتور از میدان ساکن حاصل از جریان مستقیم ولتاژی متناوب در میله های روتور القاء میشود این ولتاژ جریان متناوبی را بوجود می آورد و انرژی جنبشی قسمتهای دوار بصورت گرما RI^2 در روتور به هدر خواهد رفت . با بهدر رفتن تمام انرژی جنبشی بصورت گرما در روتور موتور به توقف کامل میرسد مزیت ترمز جریان مستقیم آنست که از روش اعمال فشار مخالف گرمای کمتری بوجود می آورد بطور مؤثر میتوان ادعا کرد که انرژی تلف شده در روتور تنها مساوی انرژی جنبشی ابتدایی توده های دوار و نه سه برابر آن (درحالت فشار مخالف) است . انرژی هدر رفته در روتور مستقل از اندازه جریان مستقیم است اما جریان DC کوچکتر زمان توقف را افزایش میدهد و درنتیجه خیز دمای روتور مقداری کاهش می یابد معمولا درعمل از جریان مستقیم به اندازه دو یا سه برابر مقدار نامی استفاده میشود درصورتیکه استاتور زیاد گرم نشود از مقادیر بزرگتری نیز میتوان استفاده کرد . گشتاور ترمزی متناسب با مجذور جریان مستقیم ترمزی است .

تکفاز شدن یک موتور سه فاز

اگر ناگهان یک پایانه از یک موتور سه فاز قطع شود و یا آنکه در حال کار یک فیوز بسوزد ماشین بصورت تکفاز به دوران ادامه خواهد داد جریان کشیده شده از دو پایانه دیگر تقریبا دو برابر میشود و موتور شروع به اضافه گرم شدن خواهد کرد البته رله های گرمایی محافظ موتور سرانجام مدارشکن را باز میکنند و بنابراین موتور از خط جدا خواهد شد .

منحنی گشتاور- سرعت موتور سه فتز زمانیکه موتور بصورت تکفاز مورد بهره برداری قرار گیرد بشدت تحت تأثیر قرار خواهد گرفت ازجمله گشتاور بیشینه که به حدود ۴۰٪ مقدار اصلی کاهش می یابد و موتور توانایی تولید گشتاور راه اندازی را از دست می دهد درنتیجه امکان ایستادن موتور سه فاز با بار کامل زمانیکه یکی از خطوط ناگهان باز میشود بسیار زیاد است شکل (۱۰۴) یک نمونه از منحنی های گشتاور- سرعت یک موتور

سه فاز را در حالت کار عادی و در حال تکفاز کار کردن نشان میدهد . از روی این شکل ملاحظه می نمایید که منحنی ها تا حدود ۵۰٪ گشتاور بیشینه بر روی هم منطبق هستند .



شکل(۱۰۴) منحنی گشتاور-سرعت نمونه برای موتور سه فاز در حالت کار عادی وتک فاز

مولد القايي (آسنکرون)

یک ترن الکتریکی که توسط یک موتور القایی رانده میشود را تصور نمایید هنگامیکه ترن از ریل شیبدار بالا میرود موتور با سرعت اندکی کمتر از سرعت سنکرون می چرخد و گشتاور کافی جهت غلبه بر اصطکاک بر نیروی جاذبه بوجود می آورد در نوک تپه و سطوح هموار نیروی جاذبه اثری ندارد و موتور تنها باید بر اصطکاک ریلها و جریان هوا غلبه نماید در اینحالت موتور تقریبا بی بار است و خیلی نزدیک به سرعت سنکرون کار میکند. درصورت رسیدن ترن به سراشیبی چه رخ میدهد؟ نیروی جاذبه ترن را شتاب میدهد و سرعت آن (حتی بدون موتور) ممکن است براحتی از سرعت در سطح هموار فراتر رود .

با جفت بودن موتور به چرخها سرعت موتور به بالاتر از سرعت سنکرون افزایش می یابد همین که سرعت موتور از سرعت سنکرون بالاتر رود ماشین برای مخالفت با افزایش سرعت ضد گشتاوری ایجاد میکند این ضدگشتاور همان اثر ترمز کردن را دارد اما اکنون بجای آنکه انرژی بصورت گرما از دست رود توان ترمزی مکانیکی چرخها را میتوان به خطوط تغذیه به شکل انرژی الکتریکی برگرداند بنابراین موتور آسنکرونی که با سرعت بالاتر از سرعت سنکرون به گردش ادامه دهد همانند یک مولد عمل خواهد کرد . این مولد انرژی مکانیکی دریافتی از چرخها را به انرژی الکتریکی تبدیل می نماید و از طریق استاتور به بیرون انتقال می دهد چنین ماشینی یک مولد القایی نامیده میشود گرچه از موتور القایی بندرت برای راندن ترنها استفاده میشود اما چندین کاربرد صنعتی وجود دارد که سبب افزایش سرعت موتور به بالاتر از سرعت سنکرون میشود بعنوان نمونه در جرثقیل در مدت زمان پایین آوردن بار موتور توان مکانیکی بار را دریافت میکند و به خطوط تغذیه برمی گرداند با متصل کردن یک ماشین قفس سنجابی سه فاز جفت شده با یک موتور بنزینی یا پروانه بادی به شبکه براحتی میتوان از ماشین بعنوان یک مولد القایی بهره گرفت همینکه سرعت موتور بنزینی

فراتر از سرعت سنکرون شود ماشین القایی یک منبع تغذیه میشود و توان حقیقی را به سیستم الکتریکی متصل به آن تحویل میدهد . اگرچه این مولد می بایست جهت تولید میدان مغناطیسی لازم توان واکنشی از شبکه جذب نماید درصورت استفاده از ماشین القایی در سیستم قدرت بادی از آن بیشتر برای تأمین توان اضافی برای بارهایی در یک ناحیه دوردست که با خط انتقال ضعیف تغذیه میشود سود می جویند .

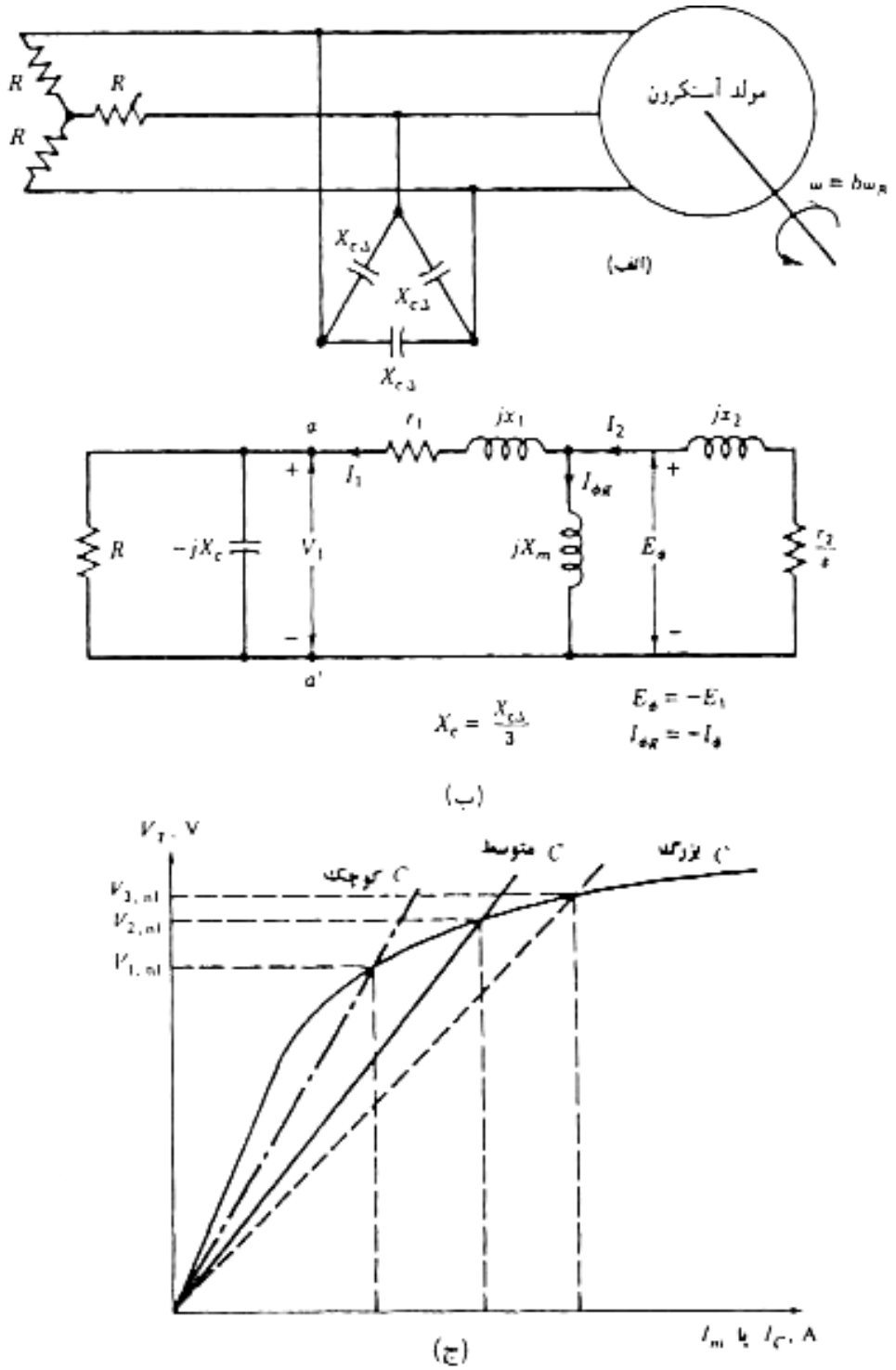
برتریهای آن در این کاربرد اینست که محکم و نسبتا ارزانند و موتور یا آسیاب بادی که مولد را میراند لازم نیست درست در سرعت همزمان کار کند هرچند ماشین باید بالای سرعت همزمان رانده شود و پیشرانه مکانیکی باید مجهز به کنترلی باشد که وقتی بار الکتریکی افزایش می یابد بتواند سرعت را افزایش دهد . خط انتقال علاوه بر رساندن آن بخشی از توان بار که مولد آن را فراهم نمی کند فرکانس را ثابت نگاه میدارد و جریان مغناطیسی مولد القایی را فراهم می آورد اگر مولد بیش از آنچه بار بدان نیاز دارد توان تولید کند مازاد آن به خط تزریق میشود باید بین دارنده مولد و سازمان نیرو توافقی از این بابت وجود داشته باشد که چه کسی بهای توان اضافی را خواهد پرداخت و نیز باید دقت کرد که وقتی کارکنان بر روی خط کار می کنند از مولد محلی تغذیه نشود . هنگامیکه فرکانس و ولتاژ ثابت لازم نیست مولد آسنکرون میتواند بدون اتصال به خط قدرت کار کند (برای مثال اگر بخواهیم توان تولید شده را برای تلمبه زدن آب یا فراهم آوردن گرما بکار گیریم ولتاژ و فرکانس ثابت لازم نیست) این را بهره برداری جداگانه مینامند مطابق شکل (۱۰۳) توان حقیقی تحویلی مستقیما با لغزش (بالاتر از سرعت سنکرون)متناسب است و معمولا توان خروجی نامی را میتوان با لغزشهای کمتر از ۳٪ بدست آورد .

بهره برداري از مولد القايي بصورت جداگانه

بررسی مولد القایی جداگانه پیچیده تر از هنگامی است که مولد به شبکه متصل میشود زیرا فرکانس ثابت نیست و تحریک را خازنهای متصل به پایانه ها باید فراهم آورند فرکانیس هم به سرعت پیشرانه مکانیکی بستگی دارد و هم به لغزش که خود تابع مقدار توانی است که بار الکتریکی به آن نیاز دارد چنین مولد القایی جداگانه ای در شکل (۱۰۶) به نمایش درآمده است .

هنگامیکه مولد آسنکرون بسرعت بالاتر از سنکرون رسانده میشود تولید ولتاژ پایانه به دو شرط نیاز خواهد داشت . هسته روتور باید پسماند مغناطیسی داشته باشد و خازن تحریک کافی باید به پایانه ها متصل گردد جریان مغناطیس کنندگی I_Φ برای یک ماشین القایی بصورت تابعی از ولتاژ پایانه توسط گرداندن ماشین بصورت موتوری در فرکانس نامی در بی باری و اندازه گیری ولتاژ پایانه اعمالی متغیر و جریان خط بدست می آید . بمنظور آنکه ولتاژ در یک مولد القایی به یک اندازه معین برسد خازنهای خارجی متصل شده به پایانه های مولد می بایست جریان مغناطیس کنندگی متناظر با آن سطح ولتاژ را به مولد تغذیه نمایند . جریان واکنشی حاصل از یک خازن مستقیما با ولتاژ اعمالی به آن متناسب است درنتیجه مکان هندسی تمام نقاط ممکن برای ولتاژ و جریان ورودی به یک خازن یک خط راست است اگر یک گروه سه فاز از خازنها به پایانه های یک مولد القایی متصل شوند ولتاژ بی باری مولد از تقاطع منحنی مغناطیس شوندگی مولد با خط بار خازن بدست می آید ولتاژ پایانه بی باری یک مولد القایی برای سه مقدار متفاوت از ظرفیت خازنی در شکل (ج-۱۰۶)ملاحظه می گردد .

شکل (ج-۱۰۶) بسیار شبیه منحنی مغناطیس شوندگی یک مولد DC است که در حقیقت خازنهای اضافی مولد القایی جایگزین مقاومت میدان در مولد DC شده اند این تشابه در موارد دیگری هم به چشم میخورد بعنوان مثال زمانیکه یک مولد شنت DC گردانده میشود پسماند مغناطیسی موجود در میدان ولتاژ پسماندی تولید مینماید این ولتاژ جریان تحریک را حاصل میسازد که سبب ولتاژ بیشتر و درنتیجه جریان تحریک بیشتر میگردد تا اینکه ولتاژسازی بطور کامل انجام پذیرد



شکل (۱۰۶) مولد القایی منفرد (ب) مدار معدل یکفاز در فرکانس نامی (ج) تعیین ولتاژ بی باری با استفاده از منحنی مغناطیس شوندگی و مشخصه ولتاژ- جریان یک بانک خازنی

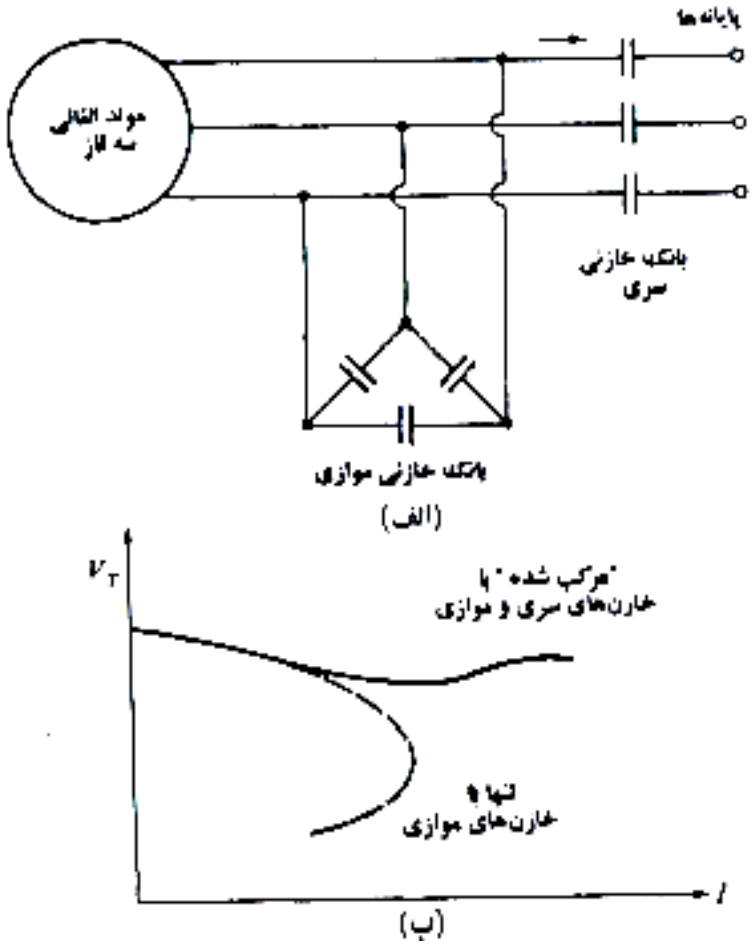
میدان ولتاژ کوچکی تولید میکند این ولتاژ کوچک جریان خازنی تولید میکند که ولتاژ را افزایش میدهد و درنتیجه خازنی افزایش می یابد تا اینکه ولتاژسازی کامل شود اگر فوران پسماند در ماشین DC موجود نباشد ولتاژسازی نیز انجام نمی گیرد. بهمین ترتیب اگر فوران پسماند در روتور مولد القایی موجود نباشد ولتاژسازی انجام نمی شود جهت رفع این مشکل می بایست ماشین را برای لحظه ای بصورت موتوری راه اندازی نمود تا مقداری فوران پسماندی در هسته روتور ایجاد شود .

جدی ترین مشکل یک مولد القایی آنست که ولتاژ مولد با تغییر در بار بویژه در بارهای القایی به مقدار زیادی تغییر میکند مشخصه های نوعی پایانه یک مولد القایی درحال کار مجزا با خازنهای موازی ثابت در شکل (۱۰۷) به نمایش درآمده است . از این شکل به روشنی دیده میشود که در بارهای القایی ولتاژ مولد بسیار افت میکند این به آن علت است که تمام توان واکنشی لازم برای بار و مولد می بایست توسط ظرفیت خازنی ثابت تغذیه شود بنابراین با انحراف هر مقدار توان واکنشی به طرف بار نقطه کار مقابل در امتداد منحنی مغناطیس شوندگی آن به عقب برگردانده میشود که دراینصورت افت ولتاژ شدید در ولتاژ مولد ایجاد می گردد به این سبب راه اندازی یک موتور القایی توسط شبکه تغذیه شده بایک مولد القایی بسیار مشکل است بنابراین باید روشهای ویژه ای برای افزایش ظرفیت مؤثر خازن در هنگام راه اندازی و سپس کاهش ظرفیت در زمان بهره برداری عادی بکار گرفت .

شباهت مولد القایی با مولد DC حتی تاحد مولد DC مرکب افزاینده نیز دنبال می گردد با قرار دادن یک گروه خازنهای سری علاوه بر خازنهای موازی در شبکه توان واکنشی خازنی با زیاد شدن بار افزایش می یابد و این عمل توان واکنشی مورد نیاز بار را تا حدی جبران مینماید . مشخصه پایانه یک مولد القایی همراه با خازنهای سری لازم نیز در شکل (۱۰۷) به نمایش درآمده است .

فرکانس مولد القایی به علت ماهیت مشخصه گشتاور- سرعت یک ماشین القایی با تغییر بار تغییر میکند اما خوشبختانه این تغییرات فرکانس بدلیل شیب تند مشخصه در پهنه کار عادی به کمتر از ۵۰٪ محدود میشود این مقدار تغییرات فرکانس در بسیاری از کاربردهای مولد اضطراری یا مجزا (تلمبه زدن آب یا فراهم آوردن گرما) قابل قبول است مسئله اصلی در کارکرد مولد القایی یافتن ولتاژ و فرکانسی است که برای بار الکتریکی مفروضی فراهم میشود هنگامیکه واکنشهای خازنی تحریک و سرعت معلومند فرض میشود که مقاومت های ظاهری مدار معادل R_1, R_2', X_1, X_B' در فرکانس نامی تعیین شده اند و منحنی مغناطیسی نیز در فرکانس نامی رسم شده است .

بار الکتریکی باید برحسب مقاومت R اهم در فاز (اتصال ستاره) بیان شود نه فلان قدر وات . زیرا ولتاژ در ابتدا نامعلوم است مقاومت کور هر فاز خازنهای تحریک باید آنقدر کوچک باشد که ساخت و نگاه داشت ولتاژ را در پهنه مورد نظر بار و سرعت اجازه دهد . مقدار درست مقاومت کور تنها میتواند از راه تجربه یا چندین بار کار بر روی مسئله برای رسیدن به نتیجه مناسب بدست آید .



شکل(۱۰۷) الف) مولد القایی مرکب با استفاده از خازن های سری و موازی (ب) مشخصه ولتاژ-جریان این مولد تحت بار با ضریب توان پس فاز ثابت

برای حل مسئله روابط بقای توان و بقای بارها برحسب مقاومت ظاهری مدار نسبت فرکانس a و نسبت b نوشته میشود بامعلوم بودن سرعت مقدار b بدست می آید . معادله بقای توان یک چند جمله ای درجه پنجم برحسب a را بدست میدهد که تنها یک ریشه حقیقی دارد این ریشه حقیقی a فرکانس را معین میکند از حل معادله بارها مقدار X_m را میتوان در فرکانس نامی تعیین نمود . با رسم این مقدار بر روی منحنی مغناطیسی ولتاژ تولید شده E پیدا میشود سپس از حل مدار معادل میتوان ولتاژ پایانه ، لغزش ، توان خروجی یا دیگر مجهولها را بدست آورد مانند حالت موتوری لغزش مولد در بار کامل بسیار کوچک و حدود ۰/۰۳ می باشد یعنی X'_B براستی درمقابل $\frac{R'_2}{S}$ قابل چشم پوشی است از رابطه زیر a بدست می آید :

$$S = \frac{a\omega_B - b\omega_B}{a\omega_B} = \frac{a-b}{a} \Rightarrow a = \frac{b}{1-S} \qquad (۲۲۹)$$

با لغزش کوچک نتیجه میشود که a تقریبا برابر b است این روش تقریبی یافتن a موجه است و بسیار آسانتر از یافتن یک چند جمله ای درجه پنجم است اگر X_1 نیز نادیده گرفته شود مقاومت ظاهری مدار استاتور شکل (۱۰۸) عبارتست از :

$$Z_1 = R_1 + \frac{-jR\left(X_c/a\right)}{R - j\left(X_c/a\right)}$$

$$\Rightarrow g_1 = \mathrm{Re}\left[\frac{1}{Z_1}\right] = \frac{R^2 R_1 + \left(X_c^{\,2}/a^2\right)(R_1 + R)}{R_1^{\,2} R^2 + \left(X_c^{\,2}/a^2\right)(R_1 + R)^2} \qquad (۲۳۰)$$

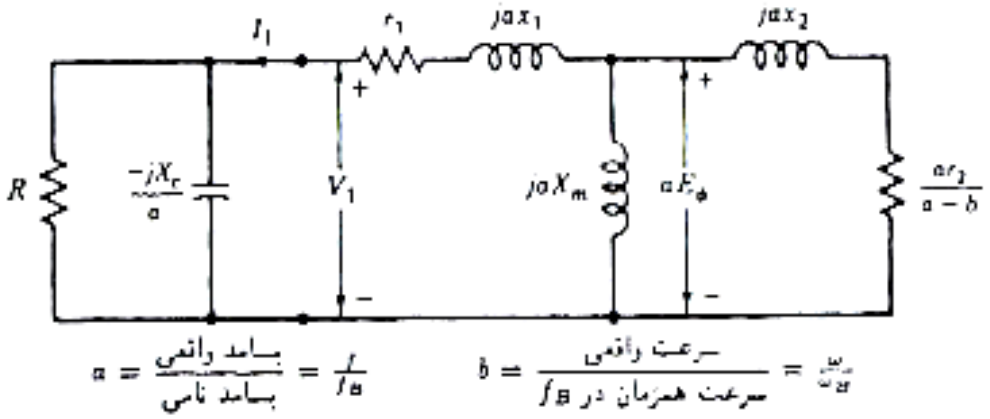
با چشم پوشی از X'_B هدایت ظاهری مدار روتور عبارت از $g_2 = \frac{s}{R'_2}$ خواهد بود . از حل معادله بقای توان $|E|^2 g_1 + |E|^2 g_2$ و نشاندن b بجای a (که تقریبا با هم برابرند) در عبارت g_1 مقدار تقریبی لغزش چنین بدست می آید :

$$S \approx -R'_2\left[\frac{R^2 R_1 + \left(X_c^{\,2}/b^2\right)(R + R_1)}{R^2 R_1^{\,2} + \left(X_c^{\,2}/b^2\right)(R + R_1)^2}\right] \qquad (۲۳۱)$$

این لغزش را اینک میتوان در رابطه ( ) گذاشت و a را یافت و آنرا در رابطه زیر نشاند تا $\mathbf{X_m}$ بدست آید .

$$X_m = \frac{\left[R_L + \left(R_1/a\right)\right]\left\{X'^{\,2}_2 + \left[R'_2/(a-b)\right]^2\right\}}{\left[R'_2/(a-b)\right](X_1 - X_L) - \left[R_L + \left(R_1/a\right)\right]X'_B} \qquad (۲۳۲)$$

که در آن $X_L = \frac{R^2 X_c}{a^2 R^2 + X_c^{\,2}}$ **و** $R_L = \frac{X_c^{\,2} R}{a\left(a^2 R^2 + X_c^{\,2}\right)}$ **است .**



شکل (۱۰۸) مدار معادل تک فاز مولد القایی –باز و خازنهای تحریک با اثر تغییرات سرعت و فرکانس

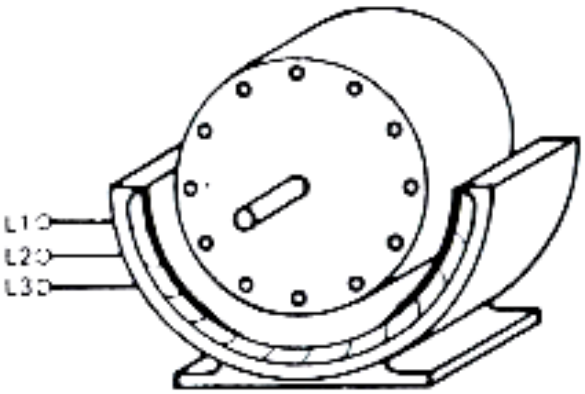
اکنون اگر خطی به شیب $\mathbf{X_m}$ رسم شود محل برخوردش با منحنی مغناطیسی در مقدار ولتاژ درونی ($E_0 = \frac{E}{a}$) ولتاژ تولید شده در فرکانس نامی را بدست میدهد پس از یافتن فرکانس و E حل مدار معادل شکل (۱۰۸) آسان خواهد بود با اینحال بمنظور برنامه نویسی رابطه ای تقریبی برای ولتاژ پایانه مولد بدست آورده

اند که عبارتست از :

$$V_1 = \frac{aE_0}{\left\{\left[1-a^2\left(X_1/X_c\right)\right]^2 + a^2\left[\left(X_1/R\right)^2 + \left(R_1/X_c\right)^2\right] + \left[1+\left(R_1/R\right)\right]^2 - 1\right\}^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{aE_0}{1-a^2\left(X_1/X_c\right)} \qquad (۲۳۳)$$

موتور القايي نيم تكه

يک موتور القايی استاندارد سه فازه چهار قطبی را که دارای سرعت سنکرون ۱۵۰۰ دور در دقیقه است درنظر بگیرید اگر هسته و سیم پیچی استاتور نصف شود تنها دو قطب N و S باقی میماند اکنون بدون آنکه تغییری در اتصالهای کلافهای موجود داده شود سه فاز را بصورت ستاره متصل کنید درپایان روتور اصلی را بر روی این قسمت از استاتور مطابق شکل (۱۰۹) سوار نمایید . درصورتیکه پایانه های استاتور به یک منبع سه فاز ۵۰ هرتز متصل شوند روتور دوباره تحت سرعت نزدیک به ۱۵۰۰ دور در دقیقه خواهد چرخید البته جهت جلوگیری از اشباع اندازه ولتاژ می بایست به نصف مقدار نامیش کاهش داده شود (زیراکه تعداد دور سیم پیچی نصف شده است) .



شکل(۱۰۹) موتور القایی دو قطبی نیم تکه

هارمونيكهاي زماني و مكاني (فضايي) در موتورهاي القايي سه فاز

در سر راه اغلب موتورها جهت کنترل سرعت اینورترهای جریان ولتاژ وجود دارد لذا جریان استاتور ماشین غیرسینوسی است این موجهای غیرسینوسی حاوی هارمونیک اصلی و سایر هارمونیکها خواهند بود سایر هارمونیها غیر از هارمونیک اصلی نیز میدان گردان در شکاف هوایی پدید می آورند و سرعت چرخش آنها بیشتر از سرعت میدان گردان حاصله از هارمونیک اصلی است به این هارمونیکها لفظ هارمونیکهای زمانی اطلاق می گردد و به علت ایجاد میدان گردان گشتاورهای پارازیت ایجاد می کنند . همچنین سیم پیچهای استاتور در طول محیط درون شیارها گسترده و توزیع شده اند درنتیجه هرگاه جریان از سیم پیچی های استاتور بگذرد mmf حاصله در شکاف هوایی توزیع غیرسینوسی خواهد داشت لذا شار شکاف هوایی حاوی هارمونیک اصلی و سایر هارمونیکهای دیگر خواهد بود . به این هارمونیکها لفظ هارمونیکهای مکانی (فضایی) اطلاق می گردد این هارمونیکها نیز گشتاورهای پارازیت پدید می آورند .

هارمونيكهاي زماني

هرگاه بخواهيم اثر هارمونيكهاي زماني را بررسي كنيم فرض مينماييم كه توزيع **mmf** در شكاف هوايي سينوسي است بعبارت ديگر از هارمونيك مكاني صرفنظر ميكنيم گيريم جريان فازهاي استاتور بقرار زير باشد

$$i_a = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\max)} Cos(h\omega t) \qquad (۲۳۴)$$

$$i_b = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\max)} \cosh(\omega t - 120) \qquad (۲۳۵)$$

$$i_c = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\max)} \cosh(\omega t + 120) \qquad (۲۳۶)$$

h مرتبه هارمونيک را نشان ميدهد و $\mathbf{I_{h(max)}}$ دامنه هارمونيک **h**ام جريان را نشان ميدهد . مقدار **mmf** در امتداد زاويه **θ** در اثر مشاركت جريان فاز **a** بقرار زير است :

$$F_a = Ni_a Cos(\theta) \qquad (۲۳۷)$$

N تعداد دور يا حلقه های هر فاز ميباشد از معادلات (۲۳۴) و (۲۳۷) داريم :

$$F_a(\theta,t) = \sum_{h=1}^{\infty} NI_{h(\max)} \cos(h\omega t)\cos(\theta) \qquad (۲۳۸)$$

$$= \sum_{h=1}^{\infty} F_{h(\max)} \cos(h\omega t)\cos(\theta) \qquad (۲۳۶)$$

$$F_{h(\max)} = NI_{h(\max)} \qquad (۲۴۰)$$

بطريقی مشابه مشاركت فازهای **b,c** بقرار زير است :

$$F_b(\theta,t) = \sum_{h=1}^{\infty} F_{h(\max)} \cosh(\omega t - 120)\cos(\theta - 120) \qquad (۲۴۱)$$

$$F_c(\theta,t) = \sum_{h=1}^{\infty} F_{h(\max)} \cosh(\omega t + 120)\cos(\theta + 120) \qquad (۲۴۲)$$

mmf منتجه در امتداد زاويه **θ** بقرار زير است :

$$F(\theta,t) = F_a(\theta,t) + F_b(\theta,t) + F_c(\theta,t) \qquad (۲۴۳)$$

$$= \sum F_{h(\max)} [\cos(h\omega t)\cos\theta + \cosh(\omega t - 120)\cos(\theta - 120) + \cosh(\omega t + 120)\cos(\theta + 120)] \qquad (۲۴۴)$$

mmf حاصله از هارمونيك اصلي

از معادله (۲۴۴) داريم :

$$F_1(\theta,t) = F_{1(\max)} [\cos(\omega t)\cos(\theta) + \cos(\omega t - 102)\cos(\theta - 120) + \cos(\omega t + 120)\cos(\theta + 120)]$$

$$= \frac{3}{2} F_{1(\max)} \cos(\theta - \omega t) \qquad (۲۴۵)$$

لذا **mmf** حاصله از هارمونيک اصلی يک **mmf** گردان است كه با سرعت زاويه ای **ω** (راديان بر ثانيه) می چرخد و قبلا به اين فرمول رسيده بوديم .

mmf حاصله از هارمونيك سوم

از رابطه (۲۴۴) داریم :

$$F_3(\theta,t) = F_{3(\max)}\{\cos(3\omega t)[\cos(\theta)+\cos(\theta-120)+\cos(\theta+120)]\} = 0 \qquad (۲۴۶)$$

توجه کنید در سیستم سه فاز سه سیمه جریان هارمونیک سوم وجود ندارد و لذا $F_{3(max)}$ صفر است .

mmf حاصله از هارمونيك پنجم

از رابطه (۲۴۴) داریم :

$$F_5(\theta,t) = \frac{3}{2}F_{5(\max)}\cos(\theta+5\omega t) \qquad (۲۴۷)$$

مشاهده میشود :

الف: سرعت **mmf** گردان در این حالت ۵ برابر سرعت **mmf** گردان هارمونیک اصلی است .

ب : جهت چرخش **mmf** در اینحالت عکس جهت چرخش **mmf** گردان هارمونیک اصلی است .

mmf حاصله از هارمونيك هفتم

از رابطه (۲۴۴) داریم :

$$F_7(\theta,t) = \frac{3}{2}F_{7(\max)}\cos(\theta-7\omega t) \qquad (۲۴۸)$$

مشاهده میشود :

۱. سرعت **mmf** گردان در اینحالت ۷ برابر سرعت **mmf** گردان هارمونیک اصلی است .

۲. جهت چرخش **mmf** گردان در اینحالت با جهت چرخش **mmf** گردان هارمونیک اصلی مشابه است .

mmf سایر هارمونیکهاي فرد

بطور کلی اگر مرتبه هارمونیک بقرار زیر باشد :

$h = 6m \pm 1$ (**m** عدد صحیح است)

دراینصورت **mmf** گردان وجود خواهد داشت و فرمول کلی آن بقرار زیر است :

$$F_h(\theta,t) = \frac{3}{2}F_{h(\max)}\cos(\theta \pm h\omega t) \qquad (۲۴۹)$$

mmf گردان مربوط به هارمونیک **h** ام با سرعت **hω** می چرخد (رادیان بر ثانیه) اگر :

$h = 6m+1$

در اینصورت جهت چرخش **mmf** گردان هارمونیک **h** ام با جهت دوران **mmf** هارمونیک اصلی مشابه است

اگر : $h = 6m-1$

دراینصورت جهت چرخش **mmf** گردان هارمونیک **h** ام مخالف جهت دوران **mmf** هارمونیک اصلی است .

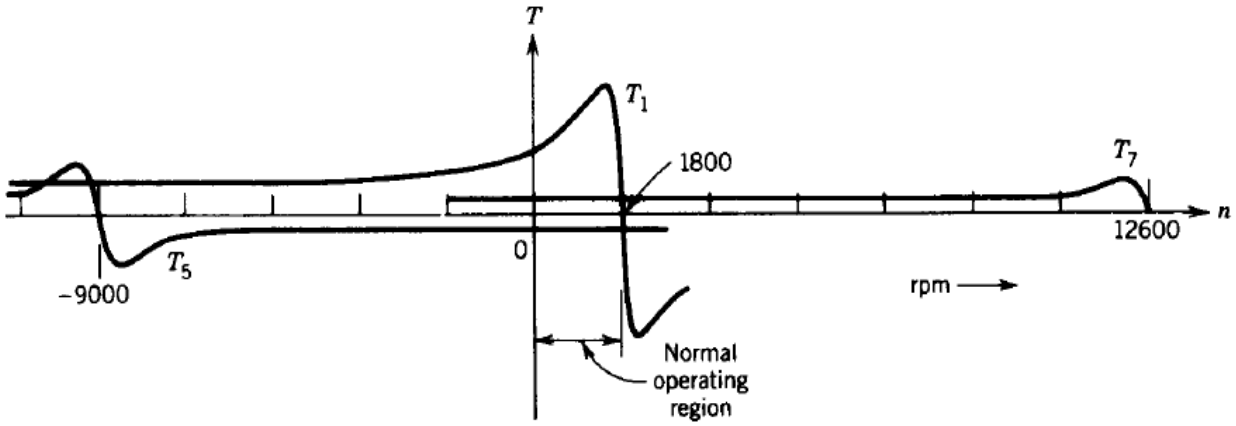
شکل (۱۱۰) مطالب فوق را برای یک موتور سه فاز چهارقطبی و ۶۰ هرتزی خلاصه میکند .

شکل (۱۱۰)

Current Harmonic	Synchronous Speed (rpm)
1	1800
3	0
5	$-5 \times 1800 = -9000$
7	$7 \times 1800 = 12{,}600$

اثر هارمونیکهاي زماني بر روي مشخصه هاي گشتاور – سرعت

همانطور که دیدیم شکل (۱۱۰) برای یک موتور سه فازه چهارقطبی و ۶۰ هرتزی تهیه شده است شکل (۱۱۱) مشخصه های گشتاور- سرعت را برای یک موتور و هارمونیکهای ۱و۵و۷ نشان میدهد . T_1 گشتاور هارمونیک اصلی است و T_7, T_5 گشتاورهای پارازیت نشأت گرفته از هارمونیکهای پنجم و هفتم است . باتوجه به شکل مشاهده میشود در ناحیه کار عادی ماشین گشتاورهای پارازیت ناچیز است .



شکل(۱۱۱) مشخصه گشتاور سرعت برای هارمونیک های زمانی گوناگون

هارمونیکهاي مکاني (فضايي)

توزیع ایده آل سینوسی **mmf** موقعی امکانپذیر است که ماشین دارای تعداد بیشماری شیار درطول محیط استاتور بوده و درضمن سیم پیچها بصورت توزیع سینوسی در شیارها گسترده شده باشد اما این امر ممکن نیست و در عمل سیم پیچها درون تعداد معینی شیار گسترده و پخش شده اند درنتیجه هرگاه از سیم پیچ استاتور جریان بگذرد توزیع مکانی یا فضایی **mmf** بصورت موج پله ای میباشد .

شکل (۱۱۲) توزیع مکانی **mmf** حاوی هارمونیک اصلی و سایر هارمونیکها از مرتبه **h** است و داریم :

($h = 6m \pm 1$ **m** عدد مثبت)

در شکل (۱۱۲) هارمونیک اصلی و هارمونیک پنجم نشان داده شده است باید دانست :

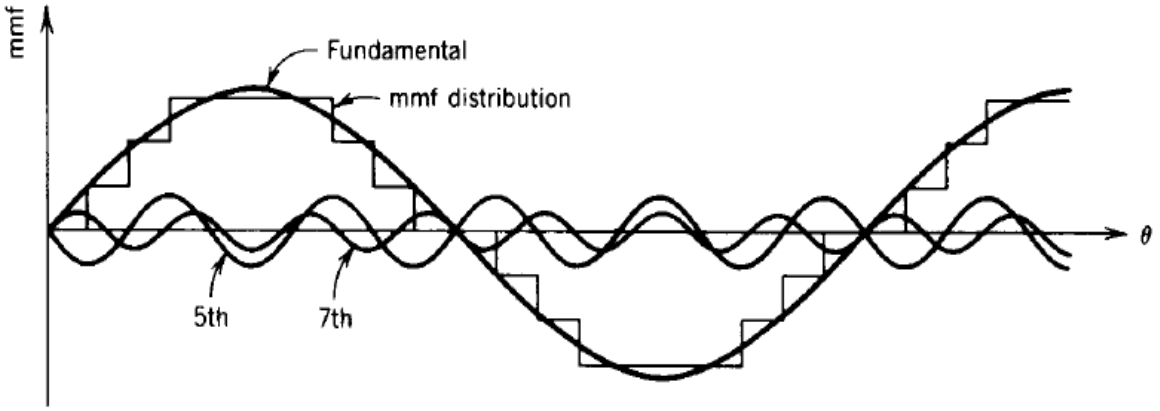
الف : در موتور سه فاز اگر جریان سینوسی از سیم پیچهای استاتور عبور کند mmf ناشی از هارمونیکهای مکانی یا فضایی با سرعتی معادل سرعت موج اصلی تقسیم بر h می چرخند که h مرتبه هارمونیک است .

ب : اگر $h=6m+1$ باشد موج هارمونیک مکانی در جهت موج اصلی می چرخد .

ج : اگر $h=6m-1$ باشد موج هارمونیک مکانی در خلاف جهت موج اصلی می چرخد .

د : رفتار ماشین P قطبی در مقابل هارمونیک h ام به مثابه یک ماشین hP قطبی بوده و لذا سرعت سنکرون موج هارمونیک مکانی h ام بقرار زیر است :

$$n_{s(h)}=\frac{n_s}{h}=\frac{120\,f}{hp} \qquad (۲۵۰)$$



شکل(۱۱۲) توزیع mmf در شکاف هوایی

اثر هارمونیکهاي مکاني (فضايي) بر مشخصه گشتاور– سرعت

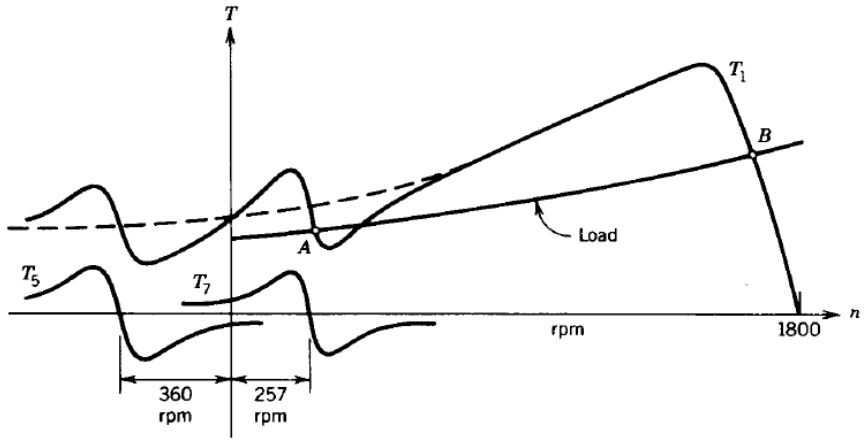
در اینجا یک موتور چهارقطبی سه فاز و ۶۰ هرتزی را درنظر میگیریم شکل (۱۱۳) سرعت سنکرون هارمونیکهای مکانی را برای این موتور نشان میدهد .

شکل (۱۱۳)

Space Harmonic	Synchronous Speed (rpm)
1	1800
5	$-\frac{1800}{5}=-360$
7	$\frac{1800}{7}=257.1$
11	$-\frac{1800}{11}=-163.6$
13	$\frac{1800}{13}=138.5$

شکل (۱۱۴) گشتاور حاصله توسط هارمونیک اصلی و هارمونیکهای پنجم و هفتم را نشان می دهد (هارمونیکهای فضایی یا مکانی) می بینیم اثر هارمونیکهای مکانی قابل ملاحظه است اگر اثر هارمونیک هفتم قابل ملاحظه باشد ممکن است موتور در سرعت کم مستقر شود بعبارت دیگر بجای اینکه نقطه کار مطلوب نقطه B باشد (شکل (۱۱۴)) نقطه A به مثابه نقطه کار عمل مینماید دراینصورت پدیده خزندگی در موتور رخ

میدهد برای کاهش این پدیده که درحقیقت همانا خوابیدن موتور در زیر بار است باید هارمونیکهای پنجم و هفتم کاهش یابند این امر توسط سیم بندی با گام کوتاه در استاتور میسر میشود .



شکل(۱۱۴) گشتاورهای پارازیت بعلت هارمونیک های مکانی یا فضایی. T1 مربوط به هارمونیک اصلی. T5 هارمونیک پنجم T7 مربوط به هارمونیک هفتم

ماشینهاي سنکرون سه فاز

ماشینهای سنکرون تحت سرعت ثابتی بنام سرعت سنکرون می چرخند و جزء ماشینهای جریان متناوب (AC) محسوب میشوند . در این ماشینها برخلاف ماشینهای القایی (آسنکرون) میدان گردان شکاف هوایی و روتور با یک سرعت که همان سرعت سنکرون است می چرخند ماشینهای سنکرون سه فاز بر دو نوعند :

۱ . ژنراتورهای سنکرون سه فاز یا آلترناتورها

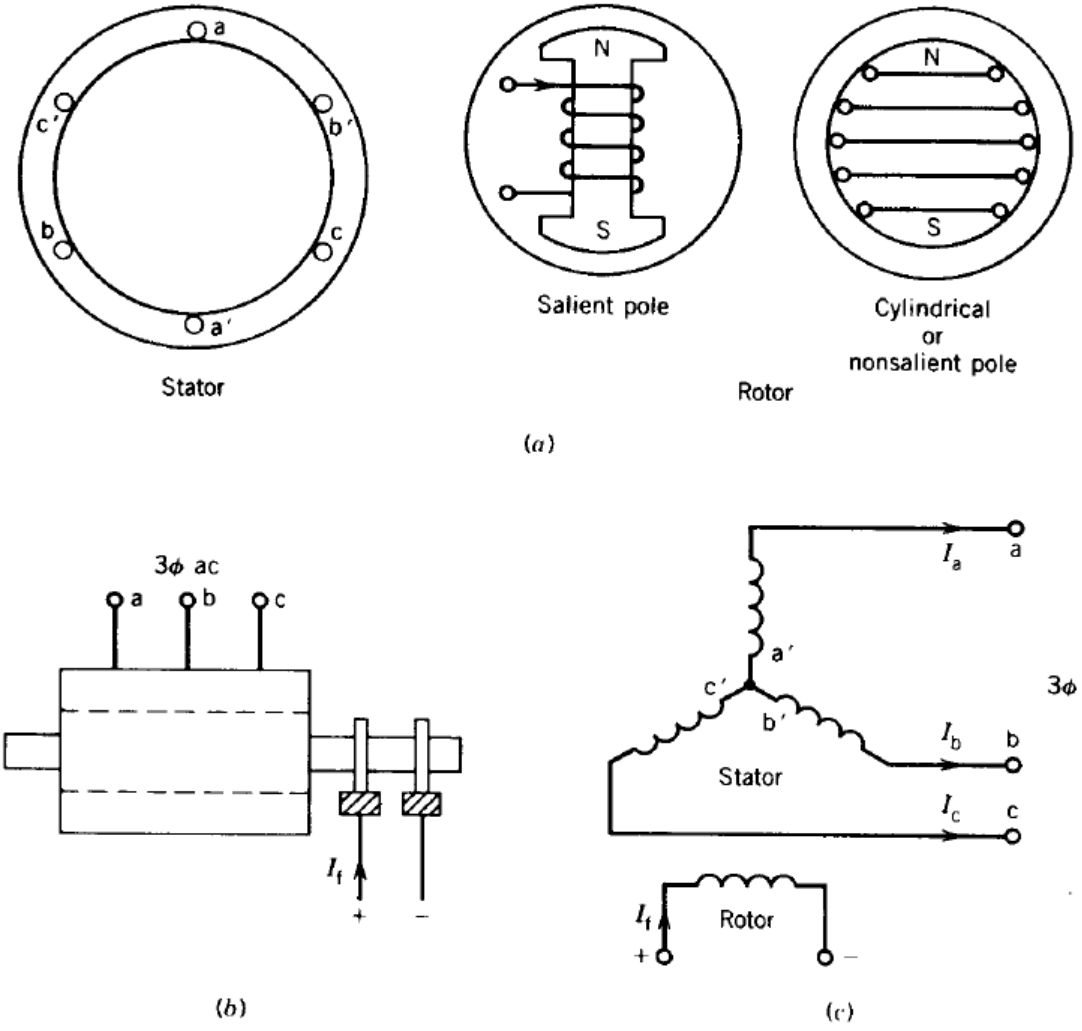
۲ . موتورهای سنکرون سه فاز

امروزه ژنراتورهای سنکرون سه فاز ستوان فقرات شبکه های برق را در جهان تشکیل می دهند و ژنراتورهای عظیم در نیروگاهها وظیفه تولید انرژی الکتریکی را به دوش می کشند موتورهای سنکرون در مواقعی بکار میروند که به سرعت ثابت نیاز داشته باشیم البته موتورهای سنکرون تکفاز کوچکی هم وجود دارند که در فصل بعد راجع به آن اشاره میکنیم . نوع خطی موتورهای سنکرون بنام موتورهای خطی یا LSM در سیستمهای حمل و نقل بکار میروند و در انتهای این فصل به اختصار راجع به آنها صحبت میکنیم یکی از مزایای عمده موتورهای سنکرون اینست که میتواند از شبکه توان راکتیو دریافت و یا به شبکه توان راکتیو تزریق کند ماشینهای سنکرون اعم از ژنراتور و موتور جزو ماشینهای دوتحریکه محسوب میشوند زیرا سیم پیچ روتور آنها توسط منبع DC تغذیه گشته و از استاتور آنها جریان AC می گذرد .

باید دانست ساختمان ژنراتور و موتور سنکرون سه فاز شبیه یکدیگر است شار شکاف هوایی در این ماشینها منتجه شارهای حاصله از جریان روتور و استاتور میباشد . در ماشینهای القایی تنها عامل تحریک کننده جریان استاتور محسوب میشد زیرا جریان روتور رب اثر عمل القاء پدید می آمد لذا موتورهای القایی همواره در حالت پسفاز مورد بهره برداری قرار میگیرند زیرا به جریان پسفاز راکتیوی نیاز داریم تا شار در ماشین حاصل شود اما در موتورهای سنکرون اگر مدار تحریک روتور تحریک لازم را فراهم سازد استاتور جریان راکتیو نخواهد کشید و موتور در حالت ضریب توان واحد کار خواهد کرد . اگر جریان تحریک روتور کاهش

یابد جریان راکتیو از شبکه به موتور سرازیر میشود تا به روتور جهت مغناطیس کنندگی ماشین کمک کند دراینصورت موتور سنکرون سه فاز در حالت پسفاز کار خواهد کرد اگر جریان تحریک روتور زیاد شود (میدان روتور افزایش می یابد) دراینصورت جریان راکتیو پیشفاز از شبکه کشیده میشود تا با میدان روتور به مخالفت برخیزد دراینصورت موتور در حالت پیشفاز کار میکند و توان راکتیو به شبکه می فرستد از گفتار فوق نتیجه میشود که با تغییر جریان تحریک (مدار روتور) که جریان DC است ضریب توان موتور سنکرون سه فاز را میتوان کنترل نمود باید دانست که در تمامی مراحل موتور از شبکه توان اکتیو (P) میکشد اما توان راکتیو موتور (Q) به نحوه تحریک بستگی دارد .

اگر موتور بی بار باشد تغییییر جریان تحریک باعث می گردد که موتور گاهی بصورت مقاومت ، گاهی بصورت سلف و گاهی بصورت خازن عمل نماید تا موتور سنکرون بی بار را کندانسور سنکرون مینامند و در سیستم های انتقال انرژی جهت تنظیم ولتاژ مورد استفاده قرار میگیرد در صنعت نیز گاهی برای بهبود ضریب توان بجای خازن از موتورهای سنکرون در حالت پیشفاز استفاده میشود در اینجا لازم است قدری درباره ساختمان ماشینهای سنکرون سه فاز اعم از موتور و ژنراتور بحث شود .



شکل(۱۱۵) ساختمان ماشین های سنکرون

شکل (a-۱۱۵) شمای استاتور این ماشینها را نشان میدهد . درون شیارهای استاتور سیم پیچی سه فاز استاتور جاسازی شده است و استاتور در این ماشینها شبیه استاتور ماشینهای القایی است . در شکل (a-۱۱۵) شمای دو نوع روتور برای ماشینهای سنکرون نشان داده شده است .

۱. روتور با قطبهای برجسته که در آن برجستگی قطبها مشهود است و قطبها توسط سیم پیچی تحریک یا سیم پیچی میدان تحریک میشوند واضح است که در این نوع ماشینها شکاف هوایی (فاصله بین روتور و استاتور) غیر یکنواخت است . در زیر قطبها شکاف هوایی کم و در میان قطبها شکاف هوایی زیادی حاصل میشود (شکل (a-۱۱۵))

۲. روتور استوانه ای یا روتور غیر برجسته : در این نوع ماشینها شکاف هوایی درون ماشین کاملا یکنواخت است و روتور بصورت یک استوانه نسبتا کامل ساخته میشود (شکل (a-۱۱۵))

شکل (b-۱۱۵) شمای بیرون ماشین سنکرون را نشان میدهد . می بینیم از استاتور سه پایانه خارج میشود که مربوط به سیستم سه فاز استاتور است تغذیه جریان DC تحریک مربوط به روتور (I_f) نیز از طریق حلقه های لغزان موجود بر روی محور ماشین انجام میشود . شکل (c-۱۱۵) وضعیت سیم پیچی های سه فاز استاتور و سیم پیچ تحریک را نشان میدهد .

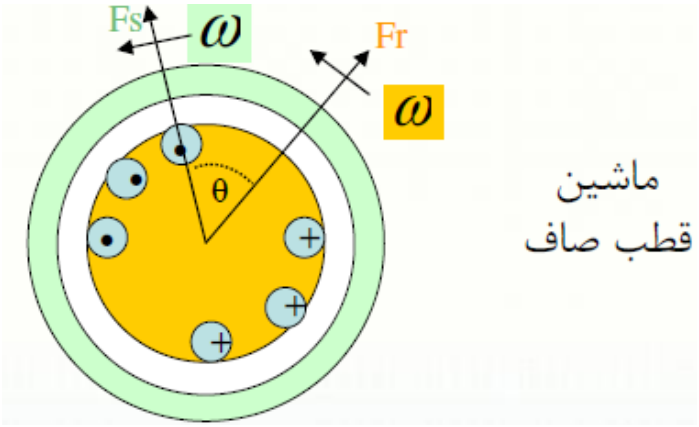
ساختمان ماشینهای سنکرون سه فاز

استاتور ماشینهای سنکرون سه فاز (اعم از ژنراتور و موتور) حاوی سیم پیچی سه فازی است که درون شیارهای استاتور جاسازی شده است و درطول محیط آن پخش و توزیع گردیده اند . 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 موتور سرازیر شود در هردو حال جریان استاتور یک جریان AC است به سیم پیچی استاتور سیم پیچی آرمیچر گفته میشود و این امر برخلاف ماشینهای DC است زیرا در ماشینهای DC سیم پیچی آرمیچر بر روی روتور قرار دارد . سیم پیچی روتور یا آرمیچر در ماشینهای سنکرون طوری طراحی میشوند که جریان و ولتاژ زیادی را تحمل نمایند . روتور ماشینهای سنکرون حاوی سیم پیچی تحریک یا سیم پیچی میدان است و این سیم پیچی توسط جریان DC تحریک میگردد . شکل (۱۱۵) شمای کلی ماشینهای سنکرون را نشان میدهد .

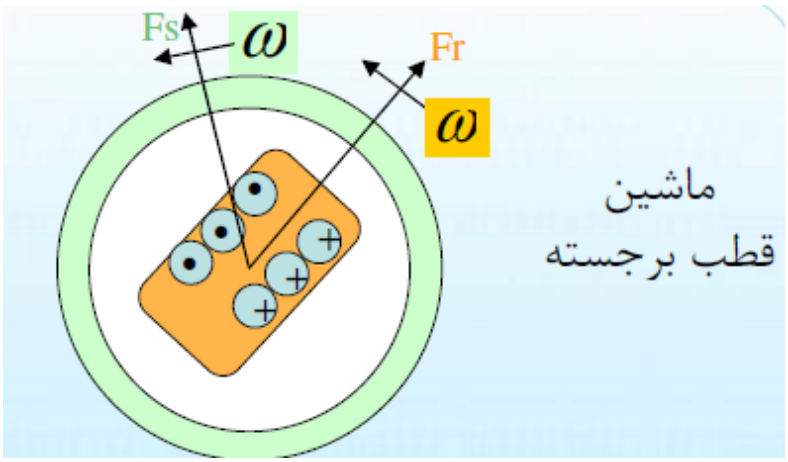
همانطور که در شکل (۱۱۶) دیدیم روتور این ماشینها بر دو نوع است :

۱ . روتور قطب برجسته : این روتورها عمدتا در ماشینهایی بکار میرود که سرعت سنکرون آنها کم است .

۲ . روتور استوانه ای یا غیربرجسته : این روتورها عمدتا در ماشینهایی بکار میرود که سرعت سنکرون آنها زیاد است . در اینجا بد نیست بدانید در نیروگاههای بخار از ژنراتورهای با روتور استوانه ای استفاده میشود . در نیروگاههای دیگر که سرعت چرخش توربین متصل به محور ژنراتور کم است از روتورهای قطب برجسته استفاده میشود . شکل (۱۱۶) تصویر یک ژنراتور با قطب استوانه ای عظیم الجثه را نشان میدهد و شکل (۱۱۷) تصویر یک ژنراتور قطب برجسته را به نمایش میگذارد . در این فصل ابتدا راجع به عملکرد ماشینهای سنکرون با روتور استوانه ای در حالت ماندگار (مانا) بحث میشود و سپس اثر برجستگی قطبها را مطرح میسازیم .



شکل(۱۱۶) تصویر یک ژنراتور سنکرون با قطب استوانه ای



شکل(۱۱۷) تصویر یک ژنراتور سنکرون با قطب برجسته

ژنراتور سنکرون

شکل (۱۱۸) را درنظر میگیریم و فرض میکنیم اگر جریان DC (I_f) از سیم پیچی تحریک (روتور) بگذرد شاری با توزیع سینوسی در شکاف هوایی ایجاد میشود .

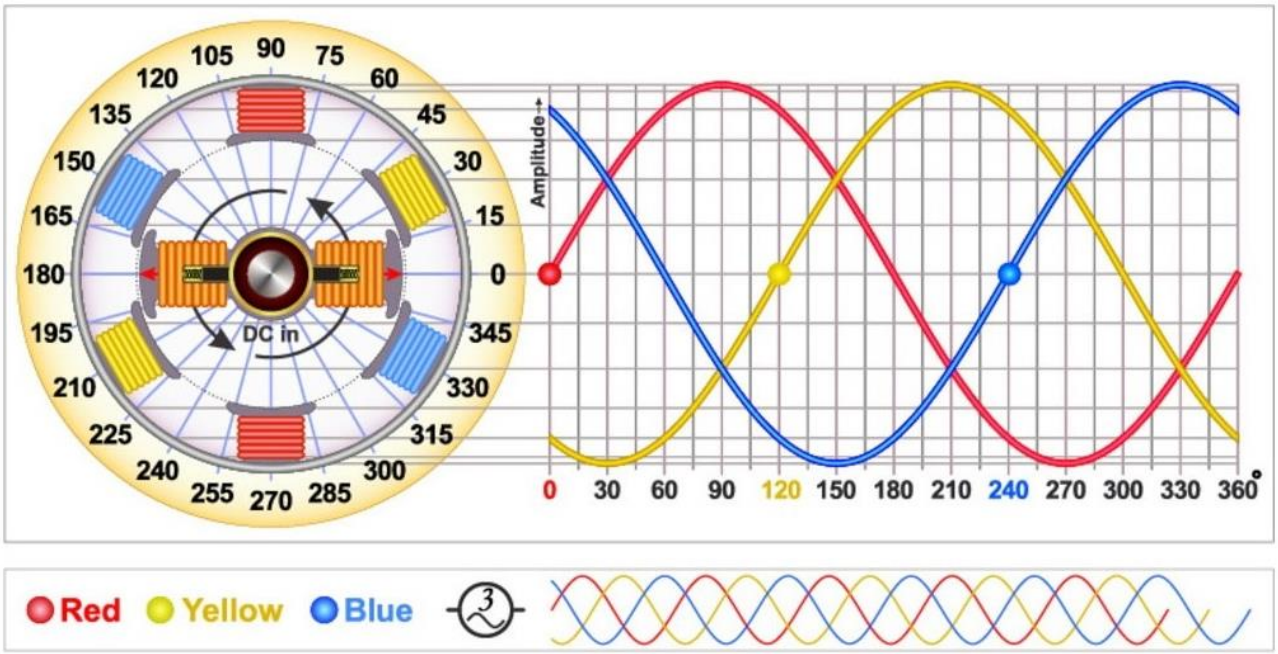
حال اگر روتور توسط محرک اولیه مثل موتور دیزل یا توربین یا موتور DC چرخانده شود یک میدان گردان در شکاف هوایی حاصل میشود به این میدان لفظ میدان تحریک نیز اطلاق میگردد . این میدان در سیم پیچهای سه فاز آرمیچر (aa',bb',cc') در شکل (۱۱۸) ولتاژ القاء میکنند و این سه ولتاژ القایی در شکل (۱۱۸) نشان داده شده است . این ولتاژها از نظر دامنه یکسان اما با هم ۱۲۰ درجه الکتریکی اختلاف فاز دارند به این ولتاژها نامهای زیر اطلاق میگردد و با علامت E_f مشخص میشوند :

۱ . ولتاژ القاء شده

۲ . ولتاژ تولید شده

۳ . ولتاژ داخلی

۴ . ولتاژ تحریک



شکل(۱۱۸) ولتاژ تحریک با ولتاژ القاشده در ژنراتور سنکرون سه فاز

گفتنی است که سرعت روتور (سرعت سنکرون) و فرکانس ولتاژههای القایی طبق رابطه زیر بهم مربوط میشوند :

$$n = 120\frac{f}{P} \qquad (۲۵۱)$$

یا :

$$f = \frac{n \times P}{120} \qquad (۲۵۲)$$

n سرعت روتور (سرعت سنکرون) برحسب دور بر دقیقه بوده و P تعداد قطبهای روتور است .

مقدار مؤثر ولتاژ تحریک (E_f) از رابطه زیر قابل استهصال است .

$$E_f = 4.44\, f \times \Phi_f N \times K_w \qquad (۲۵۳)$$

Φ_f شار هر قطب بخاطر جریان تحریک I_f تعبیر میشود . N تعداد حلقه ها یا دورها در هر فاز بوده و K_w ضریب سیم پیچ نام دارد . از روابط (۲۵۲) و (۲۵۳) داریم :

$$E_f \propto n\Phi_f \qquad (۲۵۴)$$

می بینیم ولتاژ تحریک E_f که همان ولتاژ القایی یا ولتاژ داخلی یا ولتاژ تولید شده میباشد با شار تحریک و سرعت متناسب است . واضح است که شار تحریک Φ_f نیز با جریان تحریک I_f تناسب دارد . تغییرات ولتاژ تحریک E_f بر حسب جریان تحریک I_f تحت سرعت ثابت در شکل (۱۱۹) نشان داده شده است . ولتاژ القایی مربوط به $I_f=0$ بخاطر پدیده پسماند میباشد در ابتدا تغییرات E_f برحسب I_f خطی است اما پس از عبور از مرحله تغییرات خطی اگر I_f زیاد شود Φ_f دیگر با I_f رلبطه خطی ندارد و لذا طبق منحنی شکل (۱۱۹) E_f نیز تقریبا ثابت میشود به منحنی شکل (۱۱۹) مشخصه مدار باز ژنراتور سنکرون سه فاز نیز اطلاق میشود باید دانست درحالت بی باری یعنی درحالتیکه بار به پایانه های استاتور وصل نباشد در اینصورت E_f معادل ولتاژ پایانه ژنراتور است که میتوان آنرا با ولت متر اندازه گیری نمود بهمین دلیل به مشخصه شکل (۱۱۹) مشخصه مدار باز یا OCC اطلاق میشود نام دیگر این منحنی مشخصه مغناطیس شوندگی است.

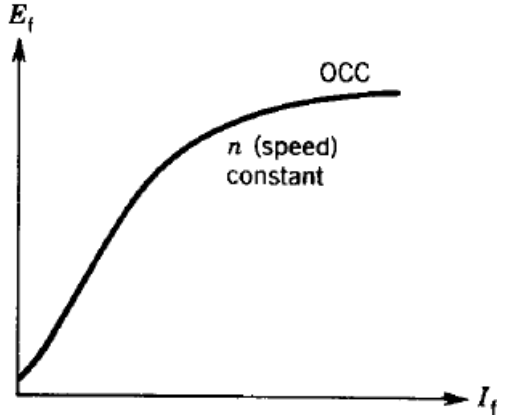
اگر در شکل (c-۱۱۵) پایانه های استاتور ژنراتور سنکرون به بار سه فاز متصل شود جریانهای I_c, I_b, I_a برقرار میگردد فرکانس این جریانها با E_f یکسان است این سه جریان نیز میدان گردان در شکاف هوایی پدید می آورند لذا منتجه شار در شکاف هوایی از مجموع دو شار گردان روتور و استاتور حاصل می گردد باید دانست سرعت چرخش این دو شار یکسان بوده و همان سرعت سنکرون است (رابطه (۲۵۱))

گیریم Φ_f شار حاصله توسط جریان تحریک و Φ_a بخاطر جریان استاتور حاصل شود به Φ_a شار عکس العمل آرمیچر نیز گفته میشود . پس :

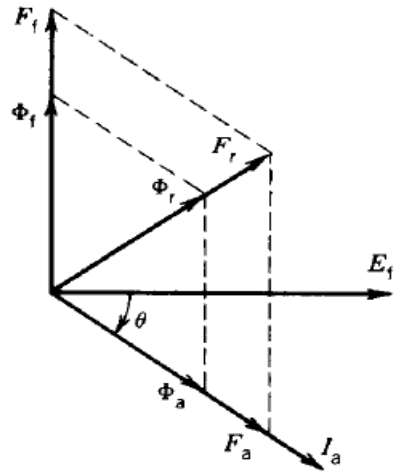
شار منتجه در شکاف هوایی (از اشباع صرفنظر شده است) $= \phi_r = \phi_f + \phi_a$

باید دانست سرعت دوران هر سه شار فوق الذکر در شکاف هوایی همان سرعت سنکرون است (رابطه (۲۵۱))

شکل (۱۲۰) نمودار فازوری فضایی این سه شار را نشان میدهد . mmf مربوط به روتور (F_f) که در اثر جریان تحریک حاصل میشود شار Φ_f را تولید میکند و همگی در یک امتداد نشان داده شده اند .



شکل(۱۱۹) منحنی مغناطیس شوندگی ژنراتور سنکرون یا مشخصه مشخصه باز(OCC)



شکل(۱۲۰) نمودار فازوری فضایی

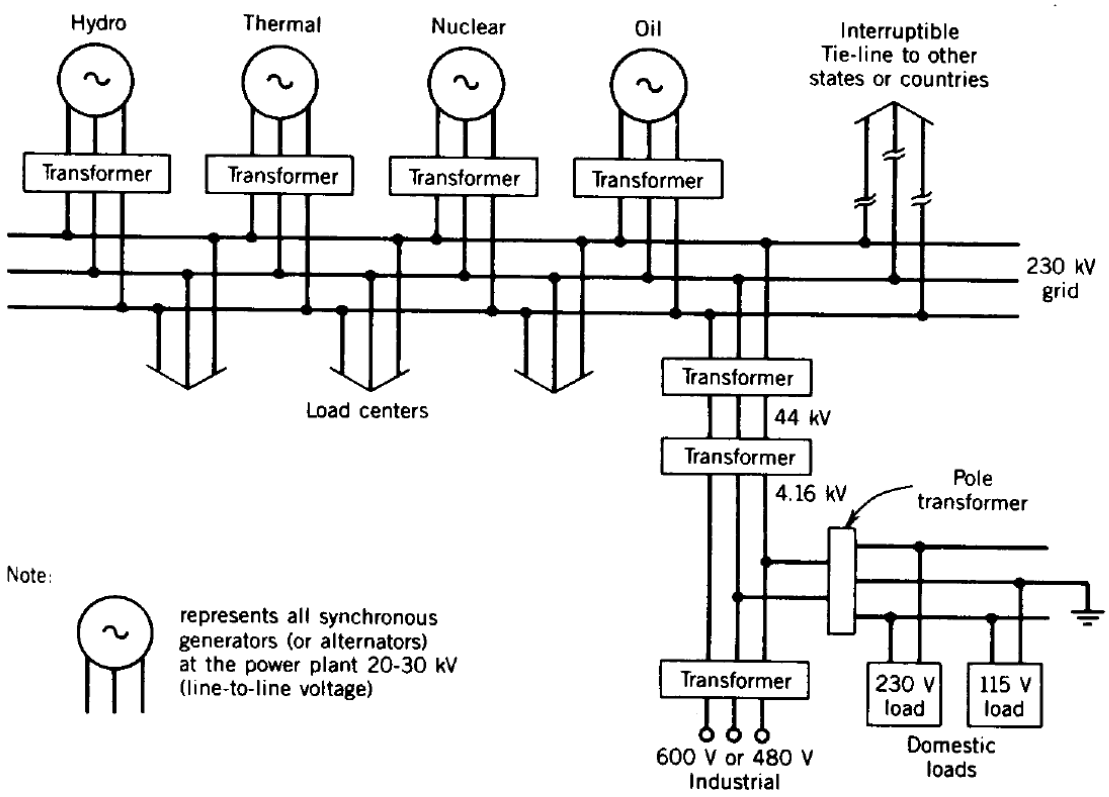
ولتاژ تحریک بخاطر اصل فاراده از Φ_f به میزان ۹۰ درجه عقب می افتد گیریم جریان استاتور از ولتاژ تحریک به میزان θ درجه عقب باشد mmf مربوط به I_a که با F_a نشان داده میشود شار Φ_a را تولید میکند و همگی در امتداد I_a در شکل (۱۲۰) نشان داده شده اند . mmf منتجه یا F_r بقرار زیر است :

$$F_r = F_f + F_a$$

اگر از اشباع صرفنظر شود دراینصورت Φ_r نیز منتجه Φ_a, Φ_f خواهد بود و باید دانست Φ_r را همان F_r تولید مینماید . در قسمتهای بعدی درباره رابطه **mmf** ها و شارها بیشتر صحبت میشود .

شین بینهایت

ژنراتورهای سنکرون سه فاز عمدتا به سیستم قدرت متصل اند و بندرت بتنهایی بارهای خاص و محلی را تأمین می کنند درصورتیکه ژنراتورهای سنکرون سه فاز به شبکه قدرت وصلند و مشترکند بار مشترکین را تأمین می کنند دراینصورت اصطلاحا می گویند که ژنراتورها به شین بینهایت وصلند . از آنجائیکه تعداد ژنراتورهای متصل به شبکه زیاد بوده و اندازه این ژنراتورها نسبتا بزرگ و حجیم است لذا ولتاژ و فرکانس شین بینهایت به سختی قابل تغییر است و ثابت میباشد . مصرف کننده ها از نقاط مختلف شین بینهایت توسط انشعابهایی تغذیه میشوند شکل (۱۲۱) یک شین بینهایت را که گاهی نیز به آن شبکه بهم پیوستخ نیز اطلاق میشود نشان میدهد .



شکل (۱۲۱) شین بی نهایت یا شبکه بهم پیوسته (**Grid**)

معمولا ولتاژ پایانه های ژنراتورهای مدرن امروزه حدود ۳۳ کیلو ولت است لذا برای وصل ژنراتورها به شین بینهایت یا شبکه بهم پیوسته از ترانسفورماتور استفاده میشود پس از افزایش ولتاژ ژنراتورها توسط ترانسفورماتورها این ژنراتورها توسط خطوط انتقال انرژی به شین بینهایت یا شبکه بهم پیوسته وصل میشوند علت آنکه ولتاژ خطوط انتقال انرژی بالاست آنست که بازده سیستم افزایش یابد و از تلفات کاسته گردد همانطور که از شکل (۱۲۱) پیداست خطوط انتقال انرژی فشار قوی از شین بینهایت یا شبکه منشعب شده تا مراکز بار تغذیه می نماید در مراکز بار از ترانسفورماتورهای کاهنده استفاده میشود تا بارهای خانگی و بارهای

صنعتی و بارهای تجاری تغذیه شوند در نیروگاه ژنراتورهای سنکرون بسته به شرایط خاص بهره برداری به شین بینهایت وصل ویا از آن جدا میشوند . وصل ژنراتور به شین بینهایت مقوله موازی کردن ژنراتور با شین بینهایت را مطرح می سازد قبل از موازی کردن ژنراتورهای سنکرون با شبکه ژنراتور سنکرون باید مشخصات زیر را دارا باشد :

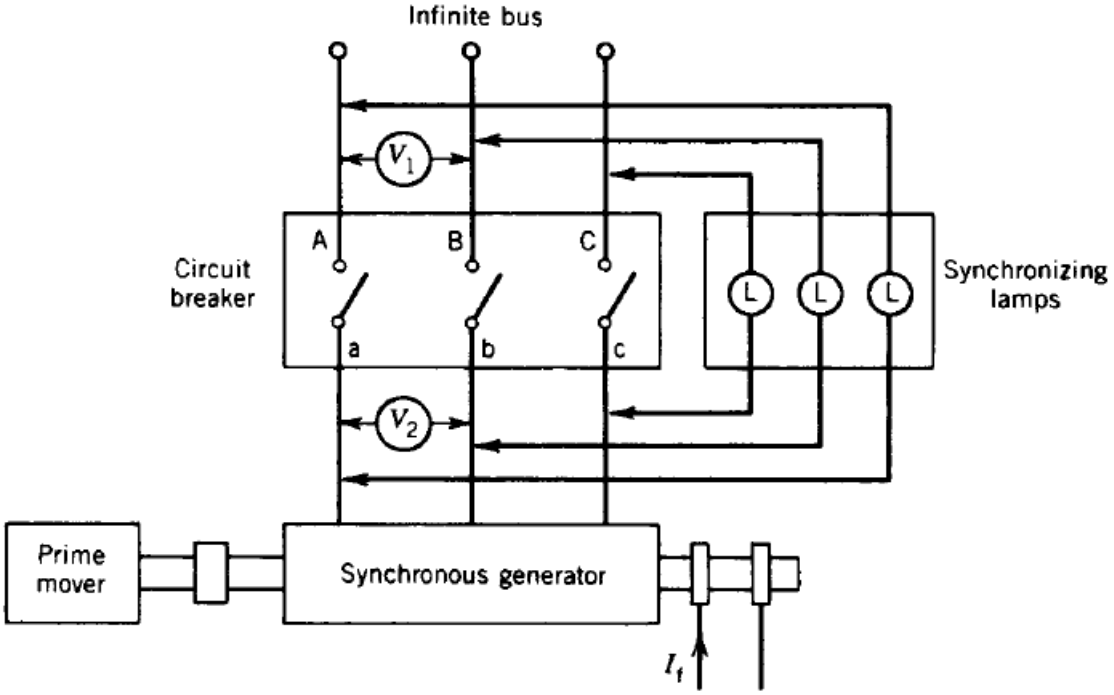
۱. هم ولتاژ شبکه یا شین بینهایت باشد .
۲. هم فرکانس شبکه یا شین بینهایت باشد .
۳. توالی فاز ژنراتور با توالی فاز شبکه یکسان باشد .
۴. همفاز شین بینهایت یا شبکه باشد .

در نیروگاهها چک کردن صحت شرایط فوق توسط دستگاهی بنام سنکروسکوپ انجام می پذیرد. (شکل (۱۲۲))وضعیت روشن شدن LED در این دستگاه اختلاف فاز ولتاژ ژنراتور و ولتاژ شبکه را نشان میدهد . جهت حرکت نشان می دهد که ژنراتور بسیار سریع و یا بسیار آرام می چرخد .

شکل(۱۲۲) سنکروسکوپ

بعبارت دیگر این امر مشخص میسازد که آیا فرکانس ژنراتور بیشتر یا کمتر از شبکه میباشد ؟ باید دانست مسئله چک کردن توالی فازها توسط این دستگاه امکانپذیر نیست و قبل از موازی سازی باید حتما این امر مورد تأیید قرار گرفته باشد زیرا خطرات جبران ناپذیری را بدنبال خواهد داشت . هرگاه عقربه خیلی آرام حرکت می نمود (بعبارت دیگر فرکانسها تقریبا یکسانند) و به نقطه اختلاف فاز صفر رسید (وضعیت عمودی در جهت بالا) مدارشکن (دژنگتور) را می بندیم و ژنراتور را به شبکه بینهایت وصل مینماییم در آزمایشگاه بجای استفاده از سنکروسکوپ میتوان از سه لامپ جهت موازی کردن ژنراتورها با شبکه استفاده نمود . شکل (۱۲۳) شمای مربوط به این آزمایش را نشان میدهد در اینجا محرک اولیه یک موتور DC یا یک موتور القایی است که نقش توربین نیروگاه را ایفا میکند . سرعت چرخش محور را میتوان طوری تنظیم کرد که فرکانس ژنراتور سنکرون با شین بینهایت مساوی گردد بعنوان مثال میتوان گفت اگر ژنراتور سنکرون سه فاز چهارقطبی باشد

باید آنرا با سرعت ۱۸۰۰ دور در دقیقه بچرخانیم تا فرکانس ۶۰ هرتز حاصل گردد . جریان تحریک را میتوان طوری تنظیم نمود که دو ولتمتر V_1 ,V_2 یک عدد را نشان دهند (شکل (۱۲۳).



شکل(۱۲۳) آزمایش لامپ برای موازی کردن ژنراتور سنکرون با شبکه

دراینحال اگر توالی فازها یکسان باشند دراینصورت لامپها درخشندگی یکسانی خواهند داشت زیرا هنوز از اختلاف فاز صفر ولتاژها مطمئن نیستیم اگر فرکانسها کاملا یکسان نباشند لامپها همگام با یکدیگر روشن و خاموش میشوند زیرا هنوز از اختلاف فاز صفر مطمئن نیستیم حال ببینیم اگر شرایط فوق برقرار نباشد چه اتفاقی رخ میدهد برای توجیه مطلب از نمودار فازوری استفاده می کنیم . گیریم :

فازورهای ولتاژهای شین بینهایت E_A ,E_B ,E_C

فازورهای ولتاژهای ژنراتور سنکرون E_a , E_b , E_c

فازورهای ولتاژهای دو سر لامپها . دامنه E_{Aa} , E_{Ab} , E_{cc}

این فازورها درخشندگی لامپها را مشخص می کنند .

الف : توالي فازها و فركانسها مشابهند اما ولتاژها يكسان نيستند

شکل (۱-۱۲۴) را درنظر می گیریم دراینصورت با دو مجموعه فازوری روبرو هستیم که این دو مجموعه با سرعت یکسان می چرخند :

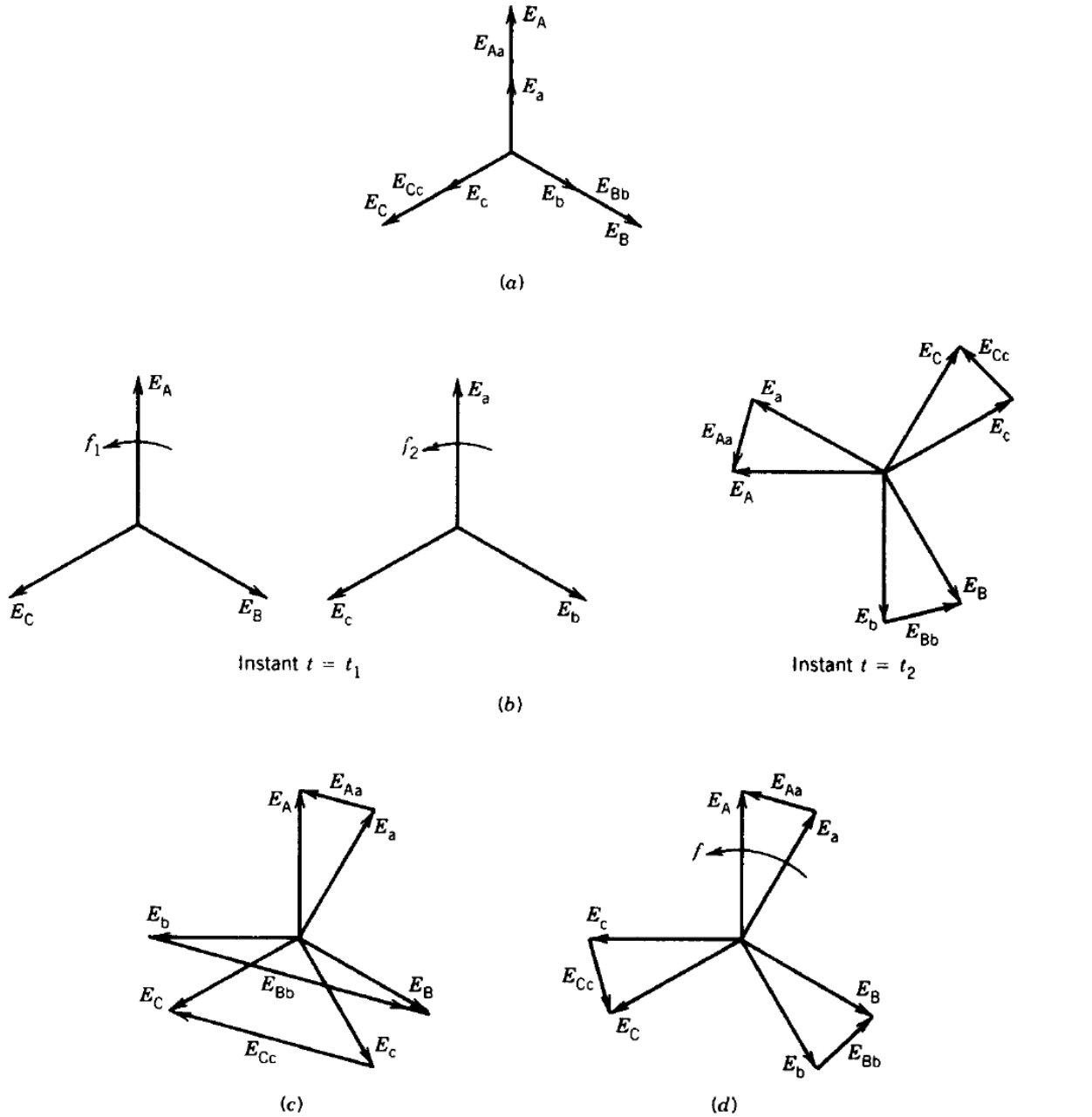
۱- E_A , E_B , E_C مربوط به شین بینهایت

۲- E_a , E_b , E_c مربوط به ماشین

ولتاژ دوسر لامپها یعنی E_{Cc} , E_{Bb} , E_{Aa} باهم مساویند و لذا در این شرایط هر سه لامپ روشن و درخشندگی یکسان دارند برای آنکه ولتاژها یکسان شود باید جریان تحریک ژنراتور افزایش یابد .

ب : ولتاژها و توالي فازها يكسانند اما فركانسها متفاوت ميباشند

دراينصورت با دو مجموعه فازوری مطابق شكل (۲-۱۲۴) روبرو هستيم و سرعت چرخش فازورها به فركانسها بستگی دارد گيريم در $t = t_1$ همچون شكل (۲-۱۲۴) ولتاژها همفاز باشند در اينحالت ولتاژ دو سر لامپها صفر است و همگی خاموشند اگر $f_1 > f_2$ باشد در لحظه ای بعد ($t = t_2$ در شكل (۲-۱۲۴)) با نمودار فازوری ديگری روبرو ميشويم كه در شكل (۲-۱۲۴) نشان داده شده است . دراينصورت E_{Cc} , E_{Bb} , E_{Aa} بر دو سر لامپها ظاهر شده و با درخشندگی يكسان روشن ميشوند لذا در صورتيكه $f_1 \neq f_2$ باشد لامپها همگام با يكديگر روشن و خاموش ميشوند .



شكل(۱۲۴) نمودار فازوری ژنراتور و شين بی نهايت در شرايط مختلف وصل ژنراتور به شبكه

در اين شرايط بايد سرعت چرخش ژنراتور را افزايش داد تا خاموش و روشن شدن لامپها به آرامی صورت گيرد .بايد دانست تغيير سرعت ژنراتور ولتاژهای ماشين را تغيير ميدهد لذا بايد I_f را تنظيم نمود تا ولتاژهای مشابه باقی بمانند .

ج : فرکانسها و لتاژها برابرند اما توالي فازها مشابه نیستند

دراینصورت با نمودار فازوری شکل (۳-۱۲۴) روبرو هستیم توالی فاز شین بینهایت E_C , E_B , E_A بوده و توالی فاز ژنراتور E_c , E_b , E_a است دراینصورت ولتاژ دو سر لامپها یکسان نبوده و درخشندگی آنها متفاوت است در اینحالت اگر فرکانسها باهم قدری متفاوت باشند دراینصورت خاموش و روشن شدن لامپها همگامی خود را از دست میدهد . برای تصحیح توالی فاز بعنوان مثال میتوان در شکل (۱۲۳) پایانه **a** را به پایانه **B** و پایانه **b** را به **A** متصل نمود .

د : ولتاژها و فرکانسها و توالي فازها یکسانند اما ولتاژها همفاز نیستند

دراینصورت با نمودار فازوری شکل (۴-۱۲۴) روبرو هستیم و لامپها با درخشندگی یکسان روشن می مانند برای اینکه اختلاف فاز بین ولتاژها را از بین ببریم باید فرکانس ژنراتور را به میزان ناچیزی تغییر دهیم در هنگامیکه اختلاف فاز بین ولتاژها صفر است تمامی لامپها خاموش میشوند اگر دراینحالت (لامپهای خاموش) مدارشکن را ببندیم ماشین به شبکه بینهایت وصل میشود هرگاه ژنراتور وصل شد فرکانس آن از فرکانس شبکه تبعیت می کند باید دانست انتقال توان اکتیو از ماشین به شبکه بینهایت توسط کنترل توان محرک اولیه (توربین) صورت می پذیرد همچنین کنترل راکتیو منتقله از ماشین به شبکه توسط تنظیم جریان تحریک صورت می پذیرد . در اینجا کتذکر می شویم برای موازی کردن ژنراتورها با شبکه همواره پس از یکسری عملیات خود را به بند ((د)) فوق الذکر می رسانیم سپس با همفاز کردن ولتاژها مرحله موازی سازی را کامل میکنیم .

موتور سنکرون سه فاز

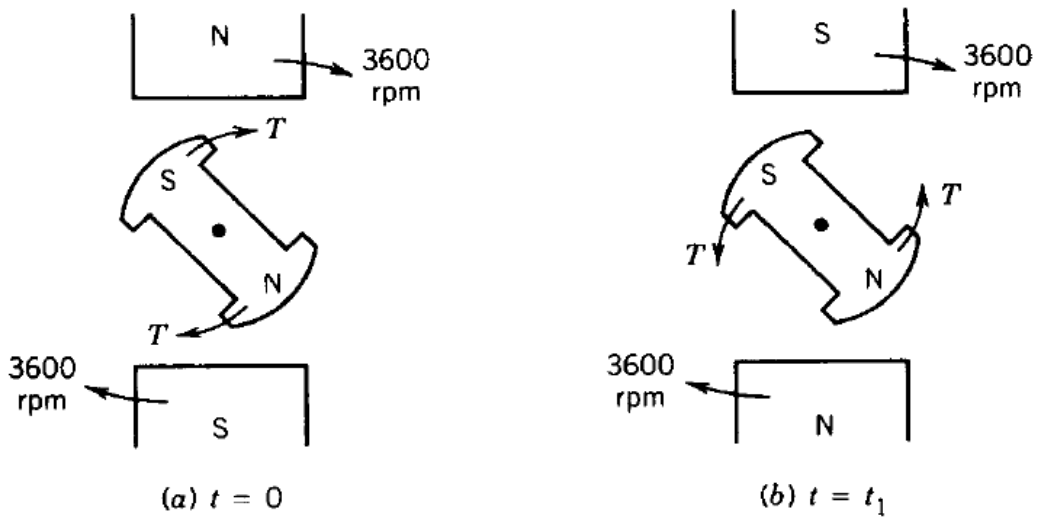
همانطور که در بحث موتورهای **DC** و موتورهای القایی دیدیم با وصل اینگونه موتورها به شبکه آنها چرخش خود را آغاز می کنند بعبارت دیگر این موتورها خود راه انداز هستند اما موتورهای سنکرون سه فاز خود راه انداز نیستند بعبارت دیگر اگر استاتور موتور که شبیه استاتور ژنراتور سنکرون میباشد به شبکه برق سه فاز **AC** وصل شود و جریان تحریک I_f نیز وارد مدار روتور گردد باز موتور راه اندازی نمی شود بلکه ارتعاش پیدا میکند این امر را میتوان چنین توجیه کرد گیریم استاتور یک موتور سنکرون سه فاز دوقطبی به شبکه سه فاز ۶۰ هرتزی وصل شود دراینصورت استاتور یک میدان گردان ایجاد میکند که با سرعت ۳۶۰۰ دور در دقیقه می چرخد میدان گردان استاتور را با یک آهن ربای دوقطبی چرخان مدلسازی می کنیم (شکل (۱۲۵))

گیریم در ابتدای امر (موقعیت راه اندازی یا $t = 0$) وضعیت روتور مطابق شکل (۱-۱۲۵) باشد دراینصورت به روتور گشتاور **T** اعمال شده و جهت این گشتاور همان جهت عقربه ساعت است این گشتاور بخاطر این امر پدید می آید که قطبهای غیرهمنام استاتور و روتور یکدیگر را جذب می نمایند لذا روتور در جهت میدان گردان به چرخش درمی آید حال شرایطی را در $t = t_1$ مورد بررسی قرار می دهیم (شکل (۲-۱۲۵)) دراینصورت میدان استاتور نیم دور چرخیده است در این شرایط میدان گشتاوری در جهت خلاف عقربه ساعت به روتور اعمال میشود (چرا؟)

این امر در شکل (۲-۱۲۵) نشان داده شده است باتوجه به نکات فوق گشتتاور خالص اعمال شده به روتور در طی یک دور کامل از چرخش میدان گردان استاتور صفر خواهد بود درنتیجه در موتورهای سنکرن گشتاور راه اندازی حاصل نخواهد شد گفتنی است که سرعت چرخش میدان گردان استاتور آنقدر سریع است که روتور نمیتواند خود را با آن هماهنگ سازد و درنتیجه ارتعاشاتی در مدار روتور پدید می آید . برای راه اندازی موتورهای سنکرون سه فاز از دو روش استفاده میشود :

۱ . استفاده از مبدل فرکانس یا منبع تغذیه با فرکانس متغیر

۲ . راه اندازی موتور سنکرون بصورت موتور القایی (آسنکرون)



(a) $t = 0$ (b) $t = t_1$

شکل(۱۲۵) گشتاور اعمال شده به روتور در زمان راه اندازی

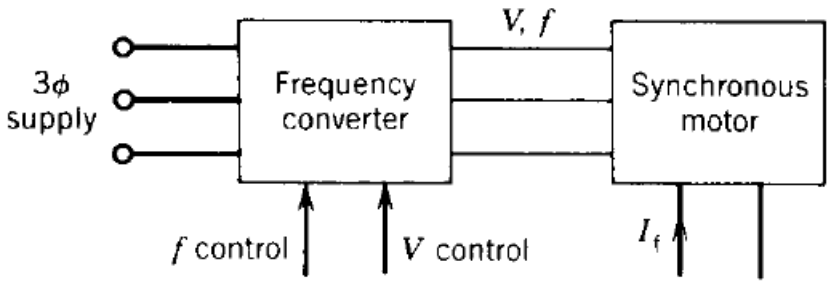
راه اندازي به كمك منبع تغذيه با فركانس متغير (مبدل فركانس)

مبدل فرکانس قادر است موتور سنکرون سه فاز را از حالت سکون به درآورده و به سرعت مطلوب برساند شکل (۱۲۶) نمودار جعبه ای چنین سیستمی را نشان می دهد که در سر راه موتور قرار دارد . در مرحله راه اندازی فرکانس منبع تغذیه کم است و لذا میدان گردان استاتور با سرعت کمی می چرخد درنتیجه قطبهای روتور قادر به تعقیب قطبهای استاتور است سپس با افزایش تدریجی فرکانس سرعت موتور به حد مطلوب رسانده میشود این سیستم گران است اما اگر بخواهیم سرعت موتور را کنترل کرده و بعبارت دیگر به سرعتهای سنکرون گوناگون دست یابیم استفاده از آن الزامی است .

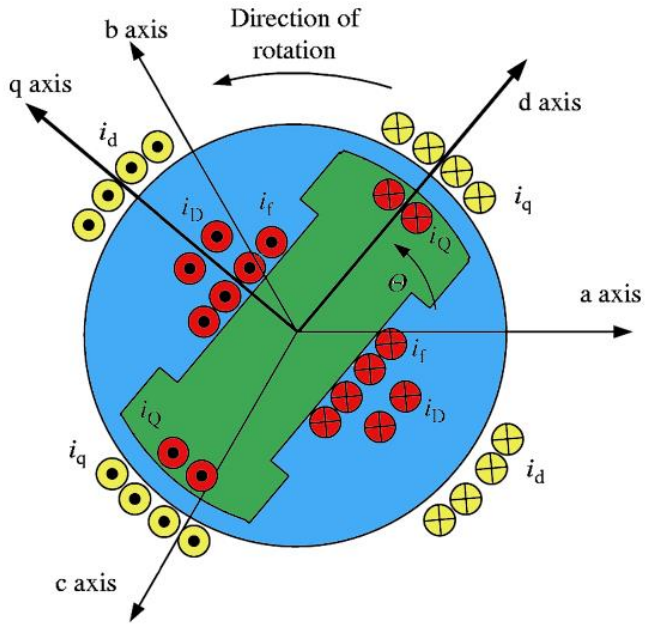
راه اندازي بصورت موتور القايي سه فاز

اگر مبدل فرکانس در دسترس نباشد یا نخواهیم به سرعتهای سنکرون گوناگون دست یابیم از روش ذکر شده در این قسمت استفاده می کنیم در این روش سیم پیچی اضافی شبیه قفس سنجابی موتور القایی بر روی روتور نصب میشود این سیم پیچها بنام سیم پیچهای میرا کننده معروفند این سیم پیچها در شکل (۱۲۷) نشان داده شده اند برای راه اندازی سیم پیچی تحریک روتور را با جریان I_f تحریک نمی کنیم حال سیم پیچی سه فاز استاتور را به برق AC سه فاز وصل می کنیم موتور بصورت موتور القایی راه اندازی میشود علت این امر آنست که سیم پیچهای میرا کننده به مثابه روتور قفس سنجابی عمل می کنند لذا باوجود سیم

پیچهای میرا کننده گشتاور راه انداز حاصل می گردد . پس از سرعت گیری موتور بالاخره به شرایطی می رسیم که سرعت روتور نزدیک سرعت سنکرون میدان گردان استاتور میشود و جهت چرخش هردو مشابه یکدیگر است حال اگر جریان DC مدار تحریک (I_f) برقرار شود دراینصورت قطبهای روتور و استاتور که یکدیگر را از نزدیک تعقیب می کنند به یکدیگر قفل شده و روتور نیز با سرعت سنکرون به دوران خود ادامه می دهد در این شرایط چون سرعت میدان گردان استاتور و سرعت دوران روتور یکی میشود (سرعت سنکرون)



شکل(۱۲۶) راه اندازی موتور سنکرون سه فاز به کمک مبدل فرکانس



شکل(۱۲۷) سیم پیچ های میرا کننده در روتور ماشین های سنکرون (شبیه قفس سنجابی)

لذا دیگر جریان القایی در سیم پیچ میراکننده وجود نخواهد داشت بنابراین این سیم پیچی فقط برای مرحله راه اندازی نقش خود را ایفا میکند گفتنی است که اگر بخاطر تغییرات ناگهانی بار بر روی محور موتور یا شرایط دیگر گذرا سرعت سنکرون روتور تغییر کند دراینصورت در سیم پیچی مستهلک کننده جریان القاء شده و این جریان گشتاوری حاصل میکند تتا سرعت سنکرون را مجددا برقرار نماید علت اینکه نام این سیم پیچ را میراکننده گذاشته اند نیز بهمین خاطر است که نوسانات و حالات گذرا را میرا مینماید باید دانست امروزه هم ژنراتورهای سنکرون سه فاز و هم موتورهای سنکرون سه فاز به این سیم پیچی که بر روی روتور استوار است مجهز می باشند تا نوسانات گذرا زودتر مستهلک و میرا شوند .

مدار معادل

در بخشهای قبلی ژنراتور و موتور سنکرون سه فاز را بصورت توصیفی مطرح نمودیم حال بهتر است مدار معادل آنها را مورد بررسی قرار دهیم تا تحلیل ریاضی آنها ساده تر گردد و مشخصه های آنها بهتر درک شود . ما در این بخش توجه خود را به ماشینهای سنکرون با روتور استوانه ای معطوف می داریم و درباره روتورهای قطب برجسته بعدا صحبت میکنیم . ابتدای امر نیز توجه خود را بیشتر به مدل ژنراتور معطوف میداریم و باز یادآور میشویم که این مدل مربوط به حالت ماندگار میباشد لذا میتوان از ثابت زمانی های سیم پیچی تحریک و سیم پیچی میراکننده صرفنظر کرد . گفتنی است از آنجائیکه ماشینهای سنکرون سه فاز عمدتا در حالت متعادل مورد بهره برداری قرار می گیرند لذا مدل ارائه شده بر مبنای یکفاز (معمولا فاز **a**) استوار است . جریان I_f در شکاف هوایی ماشین شار Φ_f را حاصل می سازد جریان I_a در استااتور شار Φ_a را پدید می آورد که از دو بخش تشکیل شده :

۱ . Φ_{al} یا شار نشتی که فقط یم پیچی استاتور را دور میزند و دربر میگیرد و سیم پیچی تحریک روتور را دربر نمی گیرد .

۲ . Φ_{ar} که به شار عکس العمل آرمیچر موسوم بوده و در شکاف هوایی شکل می گیرد و سیم پیچ تحریک روتور را نیز دربر میگیرد . بخش اعظم این شار Φ_a و Φ_{al} بخش کوچکی از Φ_a را تشکیل میدهد لذا شار منتجه در شکاف هوایی (Φ_r) از دو مؤلفه تشکیل شده است :

۱ . Φ_f بخاطر میدان روتور

۲ . Φ_{ar} بخاطر عکس العمل آرمیچر

گفتنی است :

الف : Φ_f در استاتور ولتاژ E_f را القاء میکند .

ب : Φ_{ar} نیز در استاتور ولتاژ القاء میکند .

منتجه دو ولتاژ القایی E_{ar} , E_f بنام ولتاژ منتجه معروف است (E_r) و پرواضح است که E_rتوسط شار منتجه Φ_r حاصل شده است همانطور که قبلا گفتیم E_f همان ولتاژ تحریک است و از آزمایش مدار باز (شکل (۱۱۹)) بدست می آید . E_{ar} ولتاژ عکس العمل آرمیچر است و به Φ_{ar} و درنتیجه به I_a بستگی دارد باید دانست به E_r علاوه بر لفظ ولتاژ منتجه ولتاژ شکاف هوایی نیز گفته میشود باتوجه به شکل (۱-۱۲۸) داریم :

$$E_r = E_{ar} + E_f \qquad (۲۵۵)$$

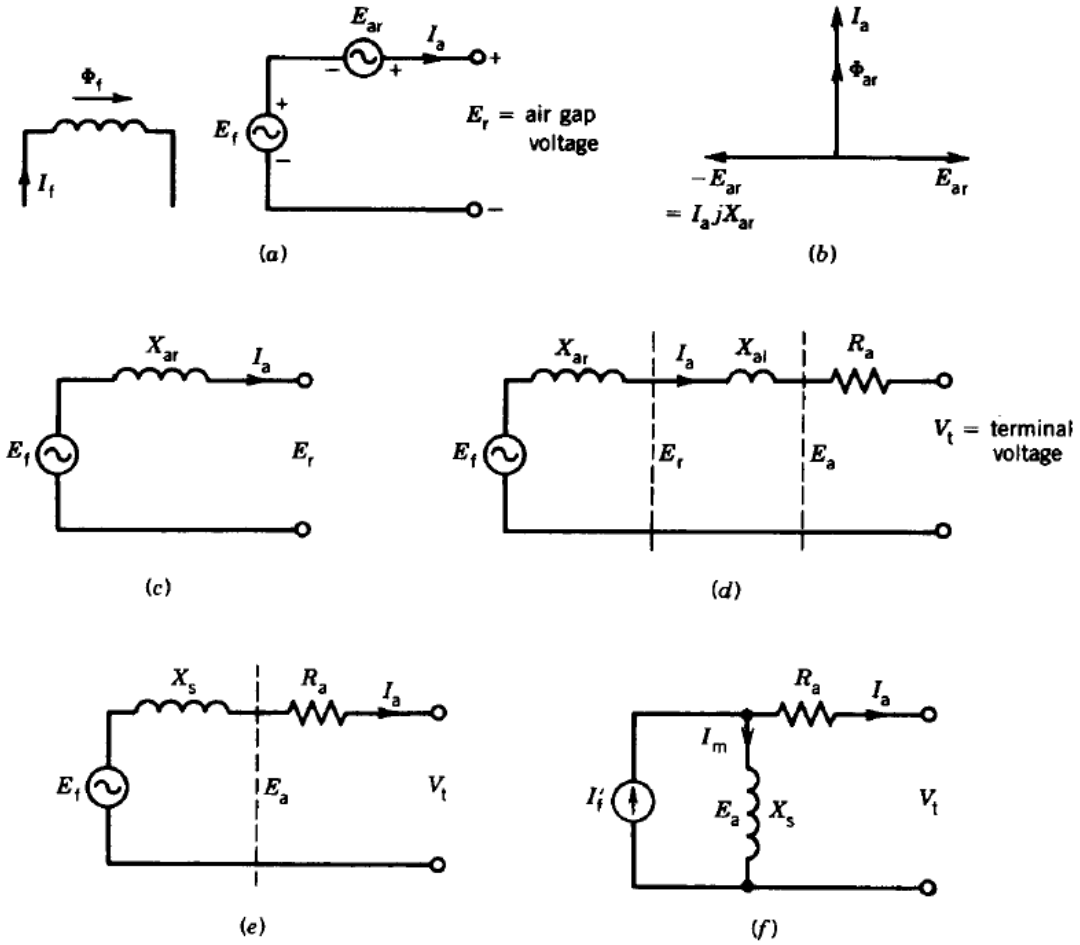
$$E_f = -E_{ar} + E_r \qquad (۲۵۶)$$

از نمودار فازوری شکل (۲-۱۲۸) داریم :

۱ . E_{ar} از Φ_{ar} یا I_a به میزان ۹۰ درجه عقب است

۲ . I_a بمیزان ۹۰ درجه از E_{ar}– عقب است .لذا در رابطه (۲۵۶) ولتاژ E_{ar}– را میتوان با افت ولتاژ دوسر X_{ar} بإزاء عبور جریان I_a مدل نمود . بنابراین رابطه (۲۵۶) بصورت زیر درمی آید :

$$E_f = I_a X_{ar} + E_r \qquad (۲۵۷)$$



شکل(۱۲۸) مدار معادل ژنراتور سنکرون سه فاز با روتور استوانه ای

شکل (۱۲۹) پارامترهای ماشین های سنکرون سه فاز (PU)

	Smaller Machines (tens of kVA)	Larger Machines (tens of MVA)
R_a	0.05–0.02	0.01–0.005
X_{al}	0.05–0.08	0.1–0.15
X_s	0.5–0.8	1.0–1.5

X_{ar} بنام راکتانس عکس العمل آرمیچر یا راکتانس مغناطیس کنندگی مفروض است و در شکل (c-۱۲۸) نشان داده شده است . اگر مقاومت استاتور و راکتانس نشتی X_{al} برای مدلسازی شار نشتی مدار معادل افزوده شود در اینصورت مدار معادل شکل (d-۱۲۸) حاصل میشود گفتنی است که این مدار معادل برای فاز a معتبر است برای فازهای c, b نیز به مدارهای مشابهی همچون شکل (d-۱۲۸) می رسیم اما کمیتهای ولتاژ و جریان نسبت به شکل (d-۱۲۸) بمیزان ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه اختلاف فاز دارند (سیستم سه فاز متعادل) باید دانست R_a در این مدل مقاومت مؤثر بوده و ۱/۶ برابر مقاومت DC سیم پیچ استاتور میباشد در مقاومت مؤثر اثر پوستی و درجه حرارت خود را نمایان می سازند و مجموع X_{al} , X_{ar} را با X_s نشان میدهیم که به نام راکتانس سنکرون ماشین معروف است لذا مدار معادل نهایی مطابق شکل (e-۱۲۸) خواهد بود . باید دانست :

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

(امپدانس سنکرون) $Z_s = R_a + jX_s$

شکل (۱۲۹)جدول پارامترهای ماشینهای سنکرون سه فاز را در سیستم یکایی نشان میدهد مقادیر مبنا همان مقادیر اسمی ماشین فرض شده اند مدار معادل شکل (۵-۱۲۸) بنام مدار معادل تونن ژنراتور سنکرون معروف است . شکل (۶-۱۲۸) مدار معادل نورتون ژنراتور سنکرون را نشان میدهد . در مدار نورتون داریم :

$$I'_f = \frac{E_f}{X_s}$$

اما :

$$\left|I'_f\right| = \frac{X_{ar}}{X_s} \times nI_f$$

بدانید :

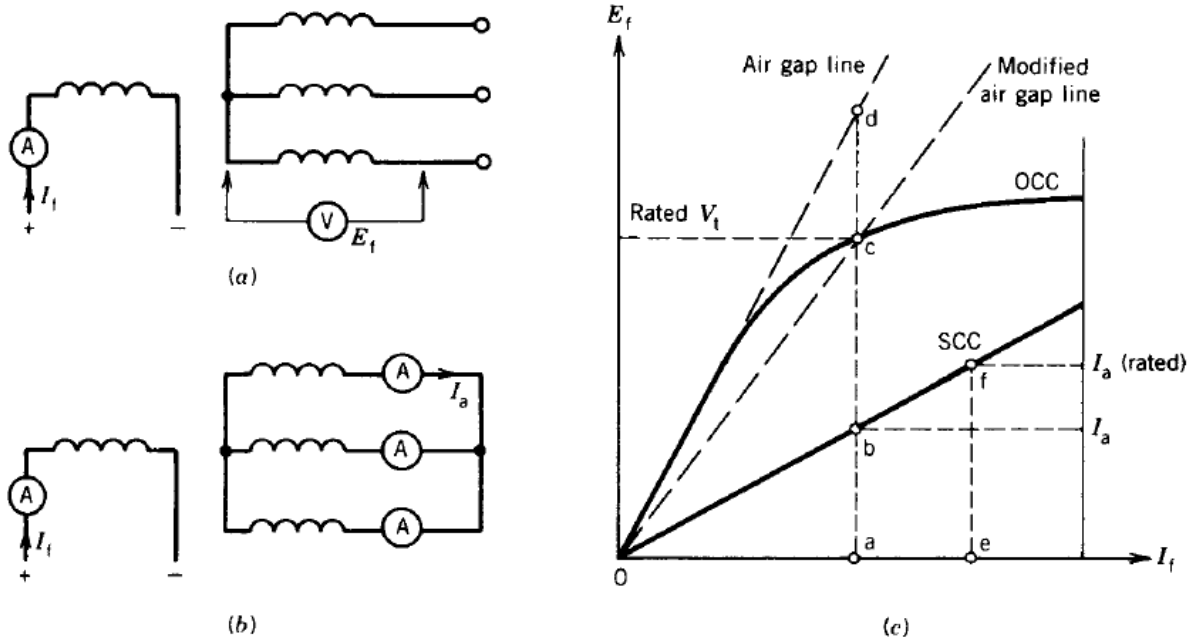
$$n = \frac{\sqrt{2}}{3} \times \frac{N_{re}}{N_{se}}$$

که N_{re} تعدا حلقه های مؤثر سیم پیچی تحریک و N_{se} تعداد حلقه های مؤثر سیم پیچی استاتور (فاز a) است باز متذکر میشویم که کلیه مدارهای معادل فوق مربوط به ژنراتور سنکرون سه فاز با روتور استوانه ای است .

تعیین راکتانس سنکرون (X_s)

آزمایش مدار باز یا بي باري

گیریم ژنراتور سنکرون سه فاز در حالت مدار باز تحت سرعت سنکرون چرخانده شود (شکل (۱-۱۳۰)) حال با تغییر جریان تحریک میتوان ولتاژ پایانه (V) و در نتیجه E_f را اندازه گیری کرد زیرا در بی باری داریم : $V=E_f$ دراینصورت میتوان به مشخصه مدار باز یا OCC ژنراتور دست یافت (شکل (۳-۱۳۰)) این منحنی تغییرات E_f را برحسب I_f نشان می دهد اثر اشبا ع خود را در این منحنی مشخصه نمایان میسازد خطی که بر قسمت خطی این منحنی مماس میشود خط شکاف هوایی نام دارد گفتنی است اگر از اثر اشباع صرفنظر شود E_f برطبق این خط تغییر خواهد کرد .



شکل(۱۳۰) (a) آزمایش مدارباز یا بی باری (b) آزمایش اتصال کوتاه (c) مشخصه ها

آزمایش اتصال کوتاه

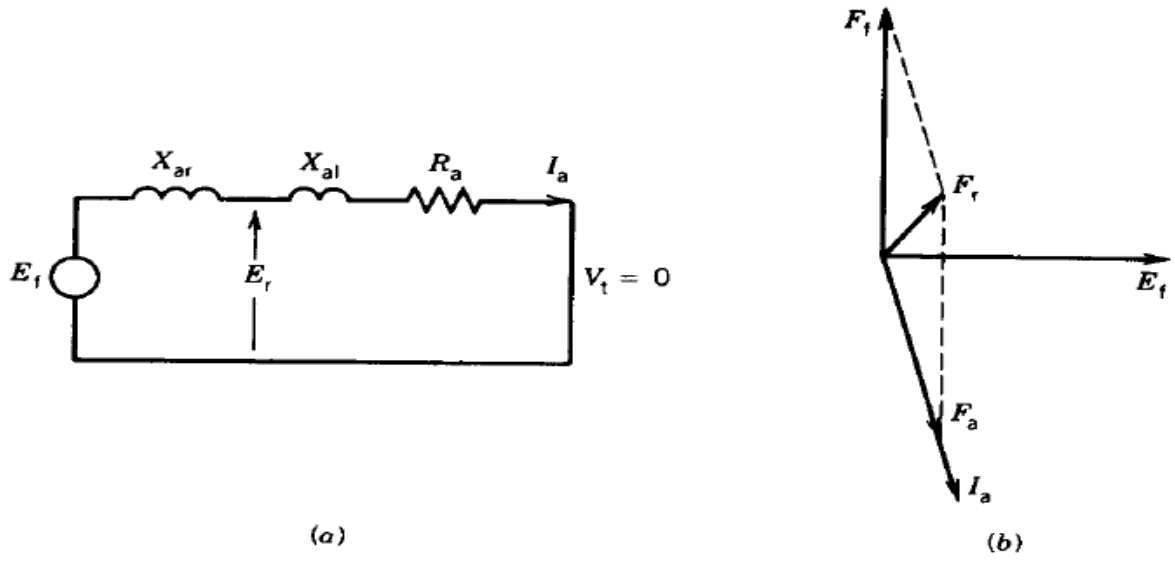
در این آزمایش با مدار شکل (b-۱۳۰) روبرو هستیم گیریم پایانه های ژنراتور سنکرون سه فاز اتصال کوتاه شده باشند و ماشین تحت سرعت سنکرون چرخانده شود حال جریان مدار تحریک را تغییر می دهیم و تغییرات I_a برحسب I_f را رسم می کنیم (شکل (c-۱۳۰)) . باید دانست :

$$I_a = \text{متوسط جریانها} = \frac{\text{مجموع اعداد سه آمپرمتر در شکل (۲-۱۳۰)}}{۳}$$

تغییرات I_a برحسب I_f بنام مشخصه اتصال کوتاه معروف است (SCC) این مشخصه تغییرات جریان آرمیچر را برحسب جریان تحریک در شرایط اتصال کوتاه نشان می دهد مشخصه SCC خطی است زیرا در شرایط اتصال کوتاه با اشباع روبرو نمی شویم علت این امر آنست که در شرایط اتصال کوتاه شار شکاف هوایی کم است این موضوع را میتوان چنین توجیه کرد مدار معادل ژنراتور در شرایط اتصال کوتاه مطابق شکل (a-۱۳۱) است

عمدتا داریم : $R_a << X_s$ (شکل (۱۲۹))

پس I_a بمیزان تقریبا ۹۰ درجه از E_f عقب است



شکل(۱۳۱) عملکرد ژنراتور سنکرون در شرایط اتصال کوتاه

لذا عکس العمل آرمیچر F_a تقریبا درجهت مخالف F_f قرار می گیرد و شار منتجه در شکاف هوایی F_r خیلی کم است (شکل (b-۱۳۱)) لذا اگر I_f, I_a زیاد باشند اشباع حاصل نمی شود .

راکتانس سنکرون اشباع نشده

این راکتانس از قسمت خطی منحنی OCC و مشخصه SCC قابل استحصال است از شکل (۳-۱۳۰) داریم :

$$Z_{s(unsat)} = \frac{E_{da}}{I_{ba}} = R_a + jX_{s(unsat)} \qquad (۲۵۸)$$

اگر از R_a چشم پوشی کنیم داریم :

$$X_{s(unsat)} = \frac{E_{da}}{I_{ba}} \qquad (۲۵۹)$$

راکتانس سنکرون اشباع شده

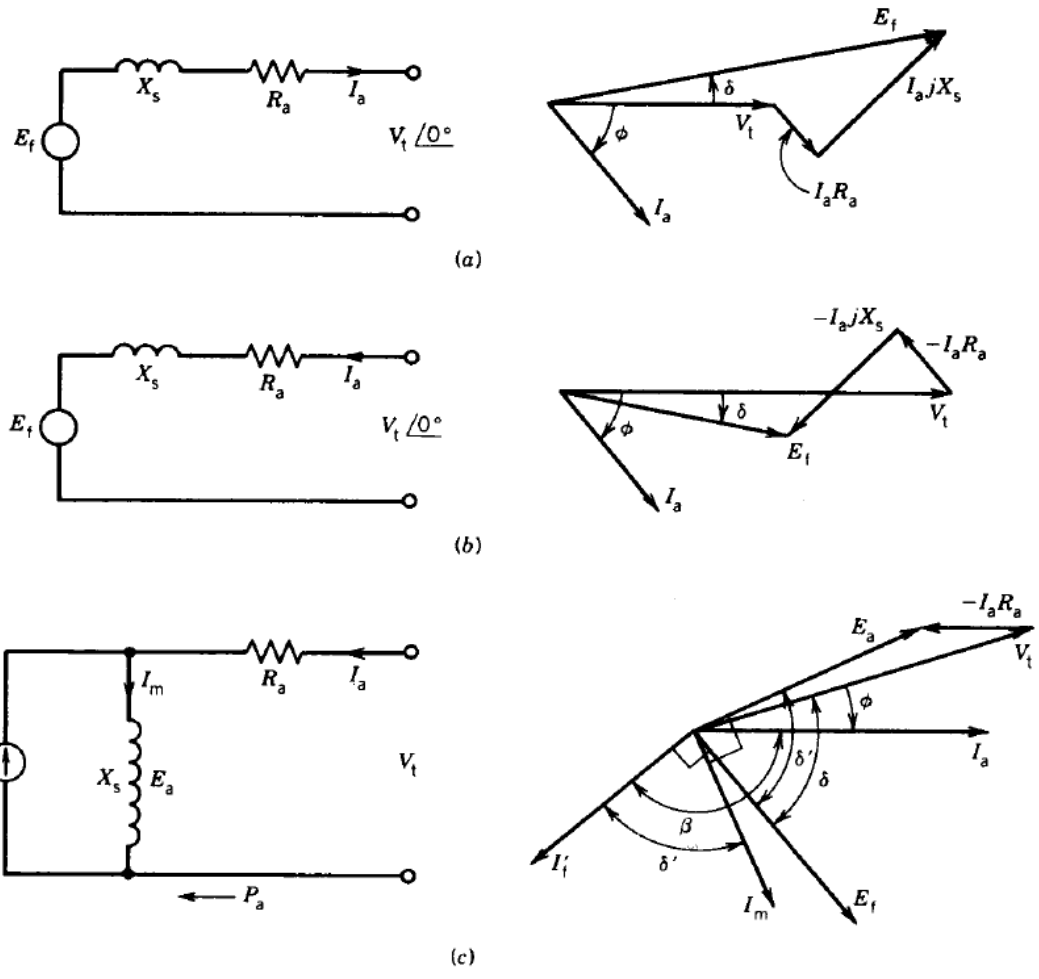
قبل از وصل ژنراتور سنکرون به شین بینهایت یا شبکه E_f را درحد ولتاژ اسمی ماشین تنظیم میکنیم از شکل (۱۳۰-c) این ولتاژ با E_{ca} نشان داده شده که معادل ولتاژ اسمی پایانه ماشین یا V_t است مشاهده میشود که در این شرایط مسئله اشباع خود را نمایان میسازد اگر ژنراتور به شبکه وصل شود ولتتاژ پایانه معادل ولتاژ شین بینهایت خواهد بود حال اگر جریان تحریک تغییر کند E_f نیز تغییر میکند اما دیگر این تغییرات در راستای خط OC صورت میگیرد (شکل (۱۳۰-c))

خط OC را خط شکاف هوایی تعمیم یافته مینامند این خط درحقیقت اثر اشباع را مدلسازی مینماید این موضوع را میتوان چنین توجیه کرد از مدار معادل شکل (۱۲۹-d) داریم :

$$E_r = V_t + I_a(R_a + jX_{al}) \qquad (۲۶۰)$$

اگر از افت ولتاژهای دوسر X_{al} , R_a صرفنظر کنیم داریم :

$$E_r \approx V_t$$



شکل(۱۳۲) (a)مدار معادل تکفاز ژنراتور سنکرون سه فاز با روتور استوانه ای و نمودار فازوری(b) مدار معادل تکفاز موتور سنکرون سه فاز با روتور استوانه ای و نمودار فازوری مربوطه(c) مدار معادل نورتن موتور سنکرون و نمودار فازوری مربوطه

از آنجائیکه V_t ثابت است ولتاژ شکاف هوایی نیز اساسا ثابت می ماند و درقبال تغییرات I_f از خود واکنشی نشان نمی دهد این امر نشان دهنده آنست که شار در شکاف هوایی یا درنتیجه اشباع مغناطیسی در قبال تغییرات جریان تحریک تقریبا ثابت می مانند و لذا بسیار منطقی است که فرض کنیم E_f در راستای خط OC

در شکل (۳-۱۳۰) تغییر میکند پس بطور خلاصه اثر اشباع را نیز با خط شکاف هوایی تعمیم یافته مدل مینماییم .

بسهولت از شکل (۳-۱۳۰) داریم :

$$Z_{s(sat)} = \frac{E_{ca}}{I_{ba}} = R_a + jX_{s(sat)} \qquad (۲۶۱)$$

اگر از R_a چشم پوشی شود داریم :

$$X_{s(sat)} \approx \frac{E_{ca}}{I_{ba}} \qquad (۲۶۲)$$

نمودار فازوري

شکلهای (۱-۱۳۲) و (۲-۱۳۲) مدار معادل ژنراتور سنکرون سه فاز و موتور سنکرون سه فاز را نشان میدهند در این شکلها نمودارهای فازوری مربوطه نیز نشان داده شده اند باید دانست :

۱ . این مدارهای معادل مربوط به ماشینهای با روتور استوانه ای هستند .

۲ . جهت جریان I_a در موتور از طرف شبکه به سمت ماشین و در ژنراتور از طرف ماشین به سمت شبکه است .

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

۴ . ولتاژ پایانه ماشینها V_t بعنوان فازور مرجع درنظر گرفته شده است .

۵ . این مدارهای معادل همان مدار معادل تونن ژنراتور و موتور است .

۶ . مدار معادل نورتون ژنراتور را قبلا دیده ایم . حال باتوجه به شکل (۳-۱۳۲) مدار معادل نورتون موتور سنکرون را معرفی میکنیم . در این شکل نمودار فازوری مدار نورتون نیز نشان داده شده است برای ژنراتور سنکرون باتوجه به مدار معادل شکل (۱-۱۳۲) داریم :

$$E_f = V_t + I_a R_a + I_a jX_s = |E_f| \angle \delta \qquad (۲۶۳)$$

باید دانست که V_t ولتاژ شبکه بوده و به بار متصل به ژنراتور اعمال میشود و بعنوان مرجع در نظر گرفته شده است . شکل (۱-۱۳۲) مربوط به حالتی است که بار ژنراتور پسفاز است یا بعبارت دیگرجریان I_a از V_t عقب افتاده است . برای موتور سنکرون باتوجه به مدار معادل شکل (۲-۱۳۲) داریم :

$$V_t = E_f + I_a R_a + I_a jX_s \qquad (۲۶۴)$$

$$E_f = V_t \angle 0 \circ - I_a R_a - I_a jX_s = |E_f| \angle -\delta \qquad (۲۶۵)$$

باید دانست که V_t ولتاژ شبکه بوده و به موتور اعمال میشود و بعنوان مرجع در نظر گرفته شده است .

شکل (۲-۱۳۲) مربوط به حالتی است که بار موتور پسفاز است یا بعبارت دیگرجریان I_a از V_t عقب افتاده است

در اینجا زاویه δ زاویه بین E_f, V_t است . باید گفت :

۱ . درحالت ژنراتوری زاویه δ مثبت است .

۲ . در حالت موتوری زاویه δ منفی است .

δ نقش مهمی در انتقال توان از ماشین به شبکه و بالعکس ایفا میکند و نقش آن در پایداری ماشین انکارناپذیر است .

مشخصه هاي توان و گشتاور

معمولا ژنراتورهای سنکرون به شبکه بینهایت با ولتاژ ثابتی متصل اند و تحت سرعت ثابت سنکرون چرخانده میشوند البته باید درنظر داشت همواره محدودیتی برای توان منتقله از ژنراتور به شبکه وجود دارد برای موتورهای سنکرون سه فاز هم وضع بهمین منوال است . یعنی موتورها به شبکه سه فاز و AC متصل میشوند و تحت سرعت ثابت سنکرون می چرخند اما درموتورها با محدودیت گشتاور بار روبرو هستیم زیرا ممکن است گشتاور بار آنقدر زیاد شود که دیگر موتور قادر به چرخش در سرعت سنکرون نباشد و اصطلاحا می گوییم سنکرونیزم خود را از دست داده است .در این بخش روابط تحلیلی برای ماشینهای سنکرون از نقطه نظر گشتاور را ارائه می دهیم و متذکر میشویم این روابط در حالت ماندگار صادقند . شکل (۱۳۳) را در نظر میگیریم که در آن مدار معادل یک ژنراتور سنکرون با روتور استوانه ای را نشان می دهد و همانطور که می دانیم این مدار معادل مربوط به هر فاز ژنراتور می گردد گیریم ولتاژ پایانه ماشین (شبکه بینهایت) فازور مرجع باشد پس :

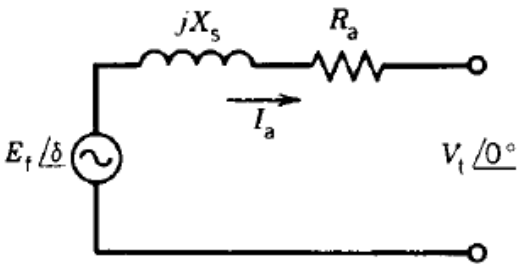
$$V_t = |V_t| \angle 0 \qquad (۲۶۶)$$

$$E_f = |E_f| \angle \delta \qquad (۲۶۷)$$

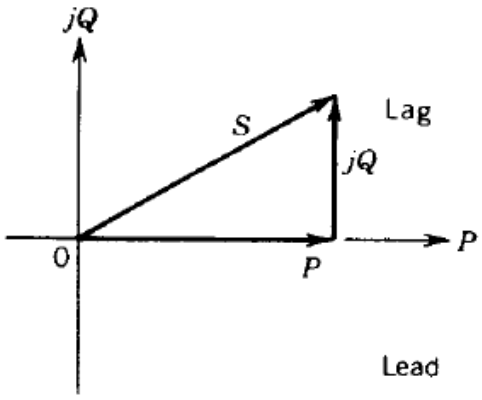
$$Z_s = R_a + jX_s = |Z_s| \angle \theta_s \qquad (۲۶۸)$$

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

$$S = V_t I_a^* \qquad (۲۶۹)$$



شکل(۱۳۳) مدار هر فاز ژنراتور سنکرون با روتور استوانه ای



شکل(۱۳۴) توان مختلط

در اینجا از مزدوج جریان استفاده شده است و باید دانست فرض برآنست که توان راکتیو پسفاز مثبت و توان راکتیو پیشفاز منفی اختیار میشود شکل (۱۳۴) مثلث توان را برای حالت پسفاز نشان میدهد در این مثلث P توان اکتیو ،Q توان راکتیو و S توان مختلط است قدرمطلق S را توان ظاهری گویند .

از شکل (۱۳۳) داریم :

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

$$= \frac{|E_f|\angle -\delta}{|Z_s|\angle -\theta_s} - \frac{|V_t|\angle 0}{|Z_s|\angle -\theta_s} \qquad (۲۷۰)$$

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

از معادلات (۲۶۹) و (۲۷۰) داریم :

$$S = \frac{|V_t||E_f|}{|Z_s|}\angle \theta_s - \delta - \frac{|V_t|^2}{|Z_s|}\angle \theta_s \qquad (۲۷۱)$$

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

$$P = \frac{|V_t||E_f|}{|Z_s|}Cos(\theta_S - \delta) - \frac{|V_t|^2}{|Z_s|}Cos(\theta_S) \qquad (۲۷۲)$$

$$Q = \frac{|V_t||E_f|}{|Z_s|}Sin(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{|Z_s|}Sin(\theta_s) \qquad (۲۷۳)$$

اگر از R_a صرفنظر شود دراینصورت : $Z_s = X_s \qquad \theta = 90\circ$

دراینصورت از روابط (۲۷۲) و (۲۷۳) برای ژنراتور سه فاز داریم :

$$P_{3\phi} = \frac{3|V_t||E_f|}{|X_s|}\sin\delta = P_{\max}\sin\delta \qquad (۲۷۴)$$

$$P_{\max} = \frac{3|V_t||E_f|}{|X_s|} \qquad (۲۷۵)$$

$$Q_{3\phi} = \frac{3|V_t||E_f|}{|X_s|}\cos\delta - \frac{3|V_t|^2}{|X_s|} \qquad (۲۷۶)$$

از آنجائیکه از تلفات استاتور صرفنظر شده است لذا توان در پایانه ماشین همفاز توان شکاف هوایی خواهد بود گشتاور حاصله توسط ژنراتور بقرار زیر است :

$$T = \frac{P_{3\phi}}{\omega_{syn}} \qquad (۲۷۷)$$

$$= \frac{3}{\omega_{syn}}\frac{|V_t||E_f|}{X_s}\sin\delta \qquad (۲۷۸)$$

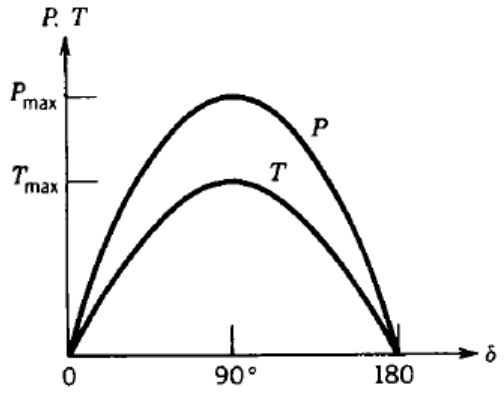
$$= T_{\max}\sin\delta N\cdot M \qquad (۲۷۹)$$

$$T_{\max} = \frac{3}{\omega_{syn}} \frac{|V_t||E_f|}{X_s} = \frac{P_{\max}}{\omega_{syn}} \qquad (۲۷۹-۱)$$

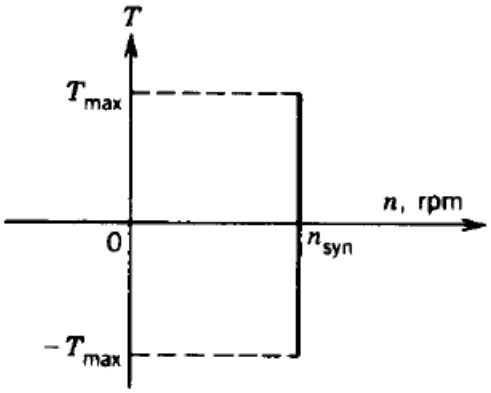
$$\omega_{syn} = \frac{n_{syn}}{60} 2\pi$$

n_{syn} = سرعت سنکرن بر حسب دور در دقیقه

مشاهده میشود که توان و گشتاور تابع سینوسی زاویه δ است (شکل (۱۳۵)) لذا به زاویه δ زاویه توان یا زاویه گشتاور اطلاق میشود باید دانست گشتتاور فوق در ژنراتور سنکرون همان گشتاور الکترومغناطیسی است و پرواضح است که با گشتاور اعمال شده به محور از طریق توبین برابر است اما جهت این دو گشتاور متضاد یکدیگر میباشد بار ژنراتور را میتوان آرام آرام افزود تا آنکه به T_{max} , P_{max} برسد این دو کمیت حد پایداری ایستا ژنراتور سنکرون میباشد اگر زاویه δ در ژنراتور بیش از ۹۰ درجه گردد ژنراتور سنکرونیزم خود را از دست میدهد و ناپایدار میشود توجه کنید که $\delta=90$ مربوط به شرایط P_{max} , T_{max} است که به آنها توان و گشتاور پرتگاهی نیز گفته میشود .



شکل(۱۳۵) تغییرات توان و گشتاور بر حسب زاویه بار



شکل(۱۳۶) مشخصه گشتاور- سرعت

باید دانست منحنی های شکل (۱۳۵) را میتوان برای موتورهای سنکرون درنظر گرفت و چون در حالت موتورها δ منفی است لذا این منحنی ها در ربع سوم مختصات مورد توجه قرار می گیرند در حالت موتوری نیز P_{max} و T_{max} و از دست رفتن سنکرونیزم موتور در δ= -90 مطرح است . در ماشینهای سنکرون اعم از موتور و ژنراتور از آنجائیکه در حالت پایدار در بارهای گوناگون سرعت همواره معادل سرعت سنکرون است لذا

مشخصه گشتاور- سرعت اینگونه ماشینها مطابق شکل (۱۳۶) است حال بیایید باتوجه به مدار معادل نورتون موتور سنکرون رابطه ای برای گشتاور بدست آوریم . شکل (۳-۱۳۲) را درنظر می گیریم توان مختلط در شکاف هوایی بقرار زیر است :

$$S_a = I_a E_a^* \qquad (۲۷۹-۲)$$

گیریم :

$$I_a = |I_a| \angle 0^\circ \qquad (۲۷۹-۳)$$

اکنون :

$$E_a = jX_s I_m = jX_s \left(I_a + I_{f'}\right) = |X_s||I_a| \angle 90 + |X_s||I'_f| \angle 90 + \beta \qquad (۲۷۹-۴)$$

$$E_a^* = |X_s||I_a| \angle -90 + |X_s||I'_f| \angle -90 - \beta \qquad (۲۷۹-۵)$$

از معادلات (۲-۲۷۹) و (۳-۲۷۹) و (۵-۲۷۹) داریم :

$$S_a = |X_s||I_a|^2 \angle -90 + |X_s||I_a||I'_f| \angle -90 - \beta \qquad (۲۷۹-۶)$$

از رابطه (۶-۲۷۹) توان اکتیو شکاف هوایی بدست می آید :

$$P_a = \mathrm{Re}[S_a] = X_s I_a^{\,2} \cos(-90) + |X_s||I_a||I'_f| \cos(-90 - \beta) = -\omega L_s I_a I'_f \sin\beta \qquad (۲۷۹-۷)$$

$$\omega = 2\pi f$$

گشتاور حاصله بقرار زیر است :

$$T = \frac{3P_a}{\omega_{syn}} \qquad (۲۷۹-۸)$$

اکنون :

$$\omega_{syn} = \frac{n_{syn} 2\pi}{60} = \frac{120 f}{P} \frac{2\pi}{60} = \frac{4\pi f}{P} = \frac{2}{P}\omega \qquad (۲۷۹-۹)$$

از روابط (۸-۲۷۹) و (۹-۲۷۹) داریم :

$$T = -\frac{3P}{2} L_s I_a I'_f \sin\beta \qquad (۲۷۹-۱۰)$$

گشتاور وتوان تابع سینوسی زاویه **β** هستند .

مکان هندسي توان مختلط

یک مختصات موهومی درنظر می گیریم محور حقیقی این مختصات توان اکتیو (**P**) و محور موهومی آن توان راکتیو (**jQ**) میباشد به این مختصات صفحه **S** (توان مختلط) نیز اطلاق می گردد باید دانست :

۱ . اگر **P** و **Q** بر روی دو محور مربوط به توانهای سه فاز باشد توان مختلط نیز بیانگر سیستم سه فاز خواهد بود .

۲ . اگر **P** و **Q** در روی دو محور مربوط به توانهای هرفاز باشد توان مختلط **S** نیز مربوط به هر فاز خواهد بود حال اگر **P** و **Q** حاصله از روابط (۲۷۴) و (۲۷۶) در مختصات موهومی یا صفحه **S** مربوط به هر فاز رسم شوند در اینصورت مکان هندسی توان مختلط دایره خواهد بود و داریم :

الف : شعاع این دایره $\frac{|V_t||E_f|}{|X_s|}$ است .

ب : مختصات مرکز این دایره $-\frac{|V_t|^2}{|X_s|}$ و صفر می باشد . این دایره در شکل (۱۳۷) رسم شده است برای نقطه عملیاتی **X** زاویه توان (**δ**) و زاویه ضریب توان (**Φ**) بر روی این شکل مشخص شده است . دایره های مختلف بر روی این شکل مربوط به مقادیر مختلف $\mathbf{E_f}$ میباشد مکان هندسی توان ماکزیمم که حد پایداری ایستا را مشخص میکند بر روی شکل (۱۳۷) با خط افقی خط چین نشان داده شده و پرواضح است که در این شرایط

$\delta=90$ است . به P_{max} حد پایداری ماندگار نیز اطلاق می گردد همانطور که پیداست شکل (۱۳۷) هم برای ژنراتور و هم برای موتور صادق است .

منحني هاي توانايي

ماشین سنکرون نمی تواند در تمامی نقاط داخل منطقه محصور شده توسط دایره شکل (۱۳۷) مورد بهره برداری قرار گیرد علت اینست که با محدودیتهایی در هنگام بهره برداری روبرو هستیم . این محدودیتها بقرار زیرند :

الف : کرم شدن آرمیچر (استاتور) بخاطر جریان آرمیچر

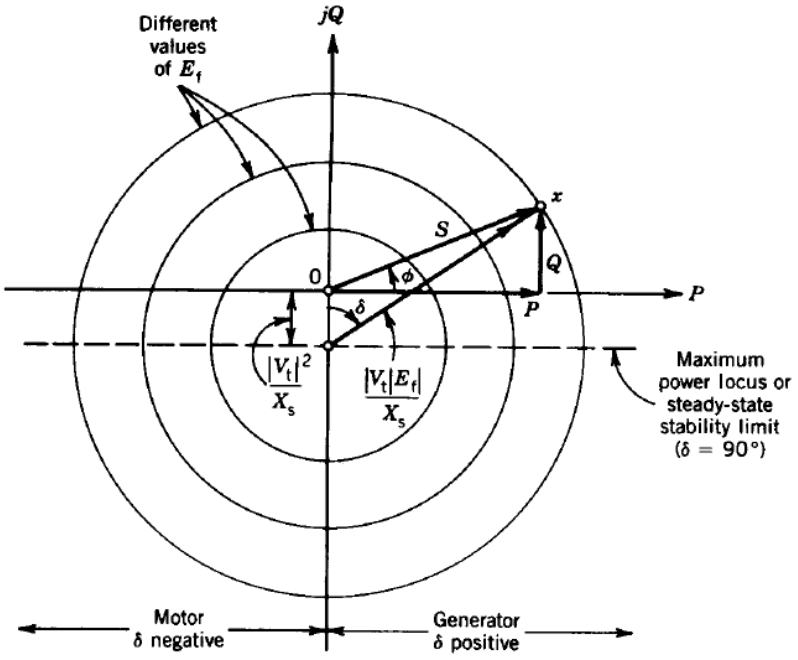
ب : گرم شدن مدار تحریک بخاطر جریان تحریک

ج : حد پایداری ماندگار یا P_{max} در $\delta=90$

حال میتوان این محدودیتها را اعمال نمود و ناحیه عملیاتی مطلوب را بدست آورد در شکل (۱۳۸) دایره ای بشعاع $S=V_tI_a$ رسم شده و مرکز این دایره مبدأ مختصات است (نقطه **O**) این دایره ناحیه ای را تعریف میکند که در آن گرم شدن آرمیچر از حد مجاز فراتر نمیرود. حال دایره ای به مرکز **Y** رسم میکنیم (شکل(۱۳۸)) مشخصات این دایره بقرار زیر است :

۱ . شعاع دایره $\frac{|V_t|\times|E_f|}{|X_s|}$ است .

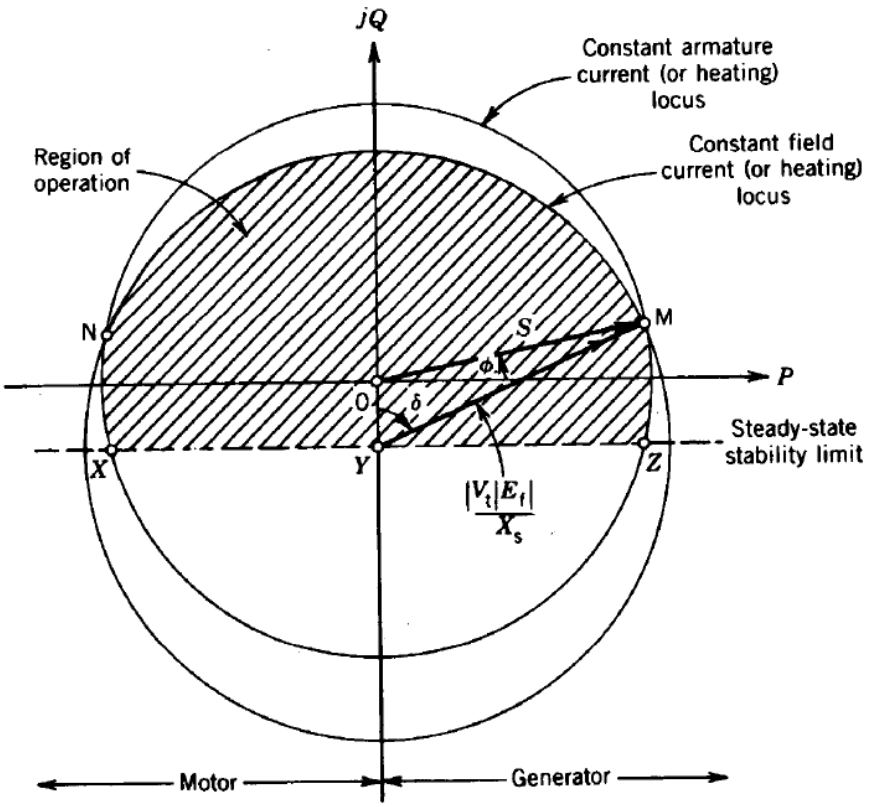
۲ . مختصات مرکز این دایره $-\frac{|V_t|^2}{|X_s|}$ و صفر است .



شکل(۱۳۷) مکان هندسی توان مختلط هر فاز

این دایره ناحیه ای را مشخص میکند که در آن گرم شدن مدار تحریک از حد مجازی فراتر نمی رود خط افقی **XYZ** حد پایداری ماندگار را مشخص میسازد . به این سه منحنی یعنی دایره به مرکز **O** و دایره به مرکز **Y** و

خط XYZ در شکل (۱۳۸) منحنی های توانایی ماشین سنکرون اطلاق می گردد . ناحیه هاشورزده که توسط این سه منحنی در شکل (۱۳۸) محصور است ناحیه عملیاتی ماشین سنکرون را مشخص میکند در شکل (۱۳۸) ناحیه عملیاتی موتور و ژنراتور مشخص شده است . نقطه تلاقی دو دایره در شکل (۱۳۸) نقطه بهره برداری بهینه را مشخص میکند باید دانست نقطه M مربوط به حالت ژنراتوری و نقطه N مربوط به حالت موتوری میباشد علت بهینه بودن این نقاط آنست که حداکثر بهره وری از مدار تحریک و استاتور در این نقاط حاصل میشود .



شکل(۱۳۸) منحنی توانایی ماشین سنکرون

کنترل ضریب توان

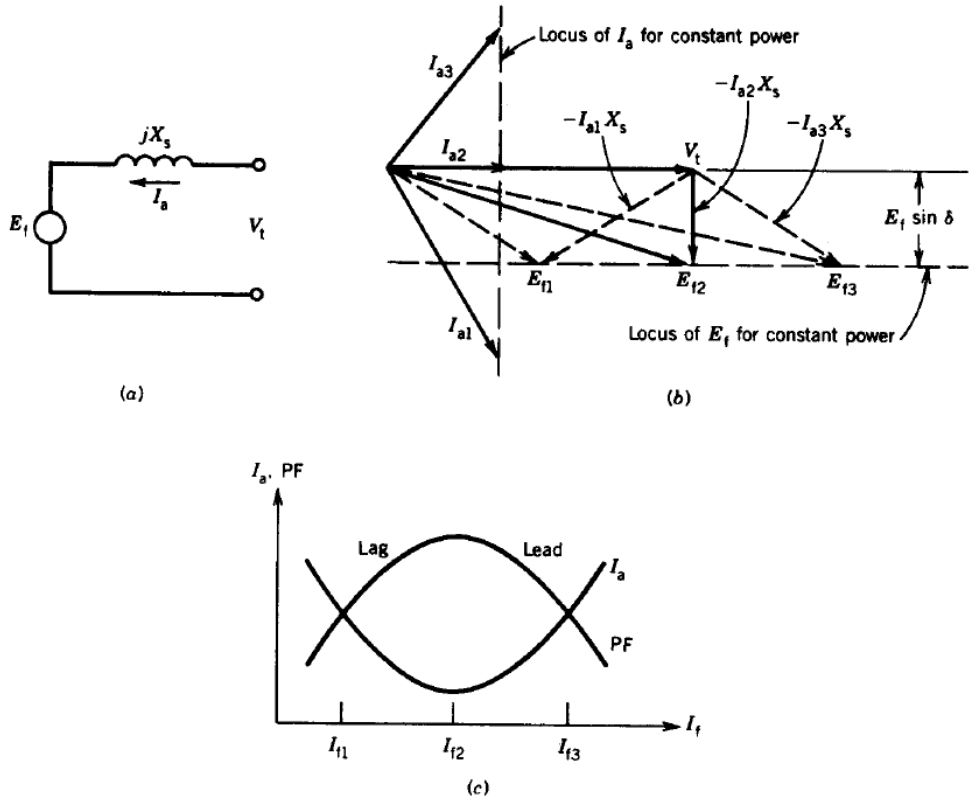
یکی از مزایای عمده موتورهای سنکرون سه فاز آنست که ضریب توان موتور را میتوان با تغییر جریان تحریک کنترل نمود بعبارت دیگر تغییر جریان تحریک باعث می گردد که جریان موتور از حالت پسفاز به حالت پیشفاز برود و بالعکس . این امر را میتوان توسط نمودار فازوری توجیه نمود گیریم موتور سنکرونی به شبکه بینهایت وصل باشد و توان اکتیو آن ثابت باشد (بار موتور ثابت است) شکل (a-۱۳۹) مدار معادل موتور را نشان میدهد و فرض برآنست که مقاومت استاتور ناچیز است در شکل (b-۱۳۹) نمودار فازوری موتور نصب شده است .

برای موتور سه فاز توان اکتیو بقرار زیر است :

$$P = 3V_t I_a \cos\phi \qquad (۲۸۰)$$

از آنجائیکه V_t ثابت است لذا برای آنکه موتور تحت شرایط توان اکتیو ثابت مورد بهره برداری قرار گیرد باید $I_a \cos\Phi$ عدد ثابتی باشد بعبارت دیگر مؤلفه ای 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 (۱۳۹-b)).

شکل (۱۳۹-b) برای سه جریان مختلف استاتور رسم شده است .



شکل(۱۳۹) مشخصه های ضریب توان موتور سنکرون **(a)** مدار معادل **(b)** نمودار فازوری **(c)** تغییرات **Ia** ضریب توان برحسب **If**

این سه جریان بقرار زیرند :

$I_a = I_{a1}$ پسفاز نسبت به V_1

$= I_{a2}$ همفاز V_1

$= I_{a3}$ پیشفاز نسبت به V_1

برای این سه جریان سه ولتاژ E_{f1} , E_{f2} , E_{f3} حاصل میشود این سه ولتاژ نیز متناظر با سه جریان تحریک I_{f1} , I_{f2} , I_{f3} است در شکل (۱۳۹-b) این سه ولتاژ نیز رسم شده است بطور کلی برای موتور سنکرون داریم :

$$E_f = V_t - jI_a X_s \qquad (۲۸۱)$$

توان اکتیو را میتوان چنین نیز نوشت :

$$P = \frac{3V_t E_f}{X_s}\sin\delta \qquad (۲۸۲)$$

اگر بخواهیم توان اکتیو ثابت بماند باید $E_f \sin\delta$ عددی ثابت باشد لذا مکان هندسی E_f و درنتیجه I_f نیز خطی است این خط مستقیم موازی V_t بوده و در شکل (۱۳۹-b) نشان داده شده است بطور خلاصه میتوان گفت اگر جریان تحریک I_f تغییر کند E_f تغییر میکند فازور E_f همواره بر روی خط افقی موازی V_t یا مکان

هندسی مربوطه قرار دارد با تغییر E_f طبق رابطه (۲۸۱) جریان I_a تغییر میکند اما همواره نوک فازور I_a بر روی خط عمودی یا مکان هندسی مربوطه قرار دارد (شکل (b-۱۳۹)).

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 بعنوان مثال میتوان گفت اگر جریان تحریک I_{f1} باشد در اینصورت ولتاژ درون ماشین E_{f1} بوده و جریان استاتور I_{a1} است (شکل (b-۱۳۹)) دراینصورت ماشین در شرایط پسفاز کار میکند زیرا I_{a1} از V_t عقب افتاده است این حالت را حالت زیر تحریک موتور سنکرون مینامند . اگر جریان تحریک I_{f2} طوری باشد که E_{f2} را در ماشین تولید کند دراینصورت جریان استاتور I_{a2} بوده و مشاهده میشود ضریب توان واحدی برای موتور حاصل میشود زیرا V_t با I_{a2} همفاز است . به این شرایط حالت تحریک عادی یا تحریک نرمال میگویند . اگر جریان تحریک I_{f3} طوری باشد که E_{f3} را در ماشین تولید کند دراینصورت جریان استاتور I_{a3} بوده و مشاهده میشود موتور در ضریب توان پیشفاز کار میکند زیرا I_{a3} از V_t جلو می افتد به این شرایط حالت فوق تحریک می گویند از گفتار بالا نتیجه میشود که 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 و 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 از شبکه P میکشد (ضریب توان واحد)

شکل (۳-۱۳۹) تغییرات جریان استاتور و ضریب توان موتور را برحسب جریان تحریک تحت توان اکتیو ثابت نشان میدهد باید گفت :

الف : منحنی تغییرات جریان استاتور (I_a) برحسب جریان تحریک (I_f) به منحنی V معروف است زیرا شبیه حرف V است .

ب : منحنی تغییرات ضریب توان (PF) برحسب 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) دراینصورت با جریان تحریک میتوان آنرا بصورت یک خازن و یا یک سلف مورد بهره برداری 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 می گیرد .

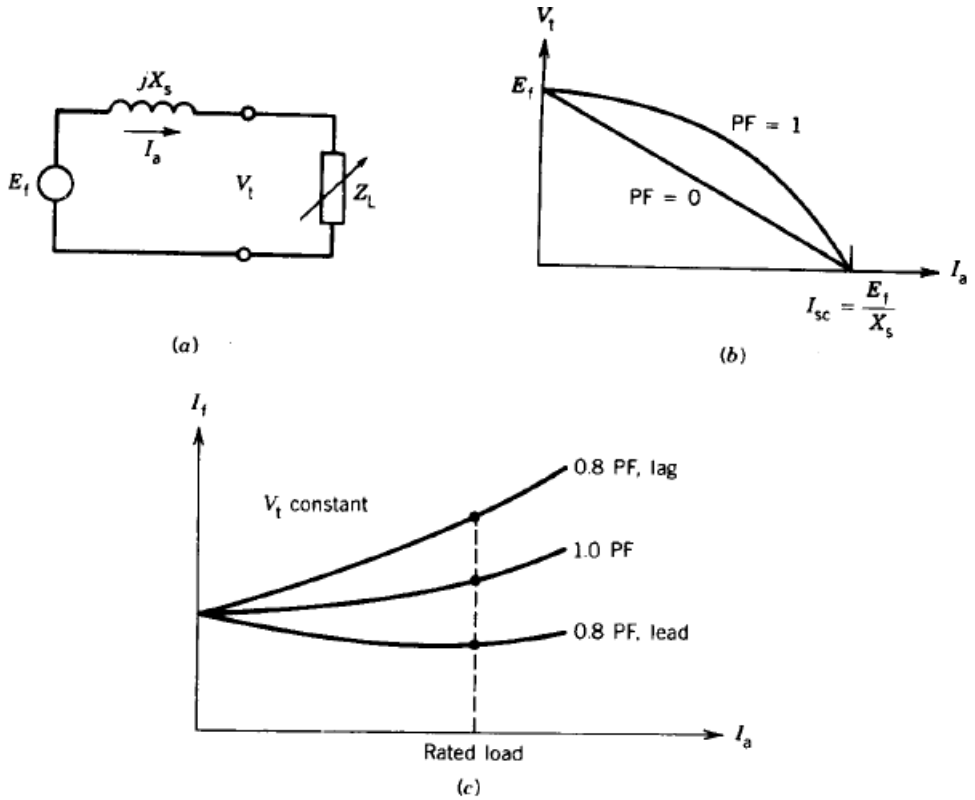
ژنراتورهاي سنکرون مستقل

همانطور که قبلا گفتیم ژنراتورهای سنکرون عمدتا به شبکه بینهایت وصلند و شبکه بهم پیوسته را تغذیه می کنند 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 اینگونه ژنراتور موتور دیزل اغلب جهت چرخاندن محور بکار میرود و محور را تحت سرعت ثابت سنکرون بچرخش درمی آورد با تغییر بار ژنراتور مستقل ولتاژ پایانه V_t آن تغییر میکند و از روی این ژنراتورها معمولا تنظیم کننده ولتاژ اتوماتیک

نصب میشود تا جریان تحریک را جهت حصول به $\mathbf{V_t}$ ثابت کنترل نماید . برای دستیابی به مشخصه پایانه ژنراتورهای مستقل (تغییرات $\mathbf{V_t}$ برحسب $\mathbf{I_a}$) مدار معادل شکل (a-۱۴۰) را درنظر می گیریم که در آن از مقاومت استاتور (آرمیچر) صرفنظر شده است . درحالت بی باری یا مدار باز داریم : $E_f = V_t, I_a = 0$

در حالت اتصال کوتاه داریم : $V_t = 0, I_{sc} = \frac{E_f}{X_s}$

اگر جریان بار بین صفر و $\frac{E_f}{X_s}$ تغییر کند دراینصورت ولتاژ پایانه بین $\mathbf{E_f}$ و صفر تغییر میکند لذا اگر جریان تحریک در إزاءتغییرات جریان بار ثابت بماند ولتاژ پایانه در محدوده بسته ای تغییر خواهد کرد و تنظیم ولتاژ جالبی حاصل نمی شود .



شکل(۱۴۰) مشخصه های ژنراتور سنکرون مستقل **(a)** مدار معادل**(b)** تغییرات **Vt** برحسب **Ia**در تحت **If**ثابت **(c)** تغییرات **If** برحسب **Ia** در تحت **Vt**ثابت

برای بار اندوکتیو یا سلفی داریم : $Z_L = X_L$

$$V_t = E_f - I_a X_s = I_{sc} X_s - I_a X_s = X_s (I_{SC} - I_a) \qquad (۲۸۳)$$

برای بار مقاومتی داریم :

$$I_a = \frac{E_f}{\sqrt{R_L{}^2 + X_s{}^2}} = \frac{X_s I_{sc}}{\sqrt{R_L{}^2 + X_s{}^2}} \qquad (۲۸۴)$$

$$V_t = I_a R_L \qquad (۲۸۵)$$

از روابط (۲۸۴) و (۲۸۵) داریم :

$$\frac{V_t{}^2}{(X_s I_{sc})^2} + \frac{I_a{}^2}{I_{sc}{}^2} = 1 \qquad (۲۸۶)$$

رابطه (۲۸۳) تغییرات خطی V_t برحسب I_a را نمایان میسازد و معادله (۲۸۶) یک ربع بیضی را نشان میدهد . این دو رابطه در شکل (b-۱۴۰) رسم شده اند این منحنیها نشان می دهد که در تحت ضریب توانهای کم اگر I_a زیاد شود ولتاژ پایانه بشدت سقوط میکند برای ثابت نگه داشتن V_t در بارهای مختلف جریان تحریک را تغییر می دهیم و درنتیجه E_f را کنترل می نمائیم . شکل (c-۱۴۰) تغییرات جریان تحریک مورد نیاز جهت ثابت نگه داشتن V_t در إزاء جریانهای مختلف استاتور رانشان میدهد .

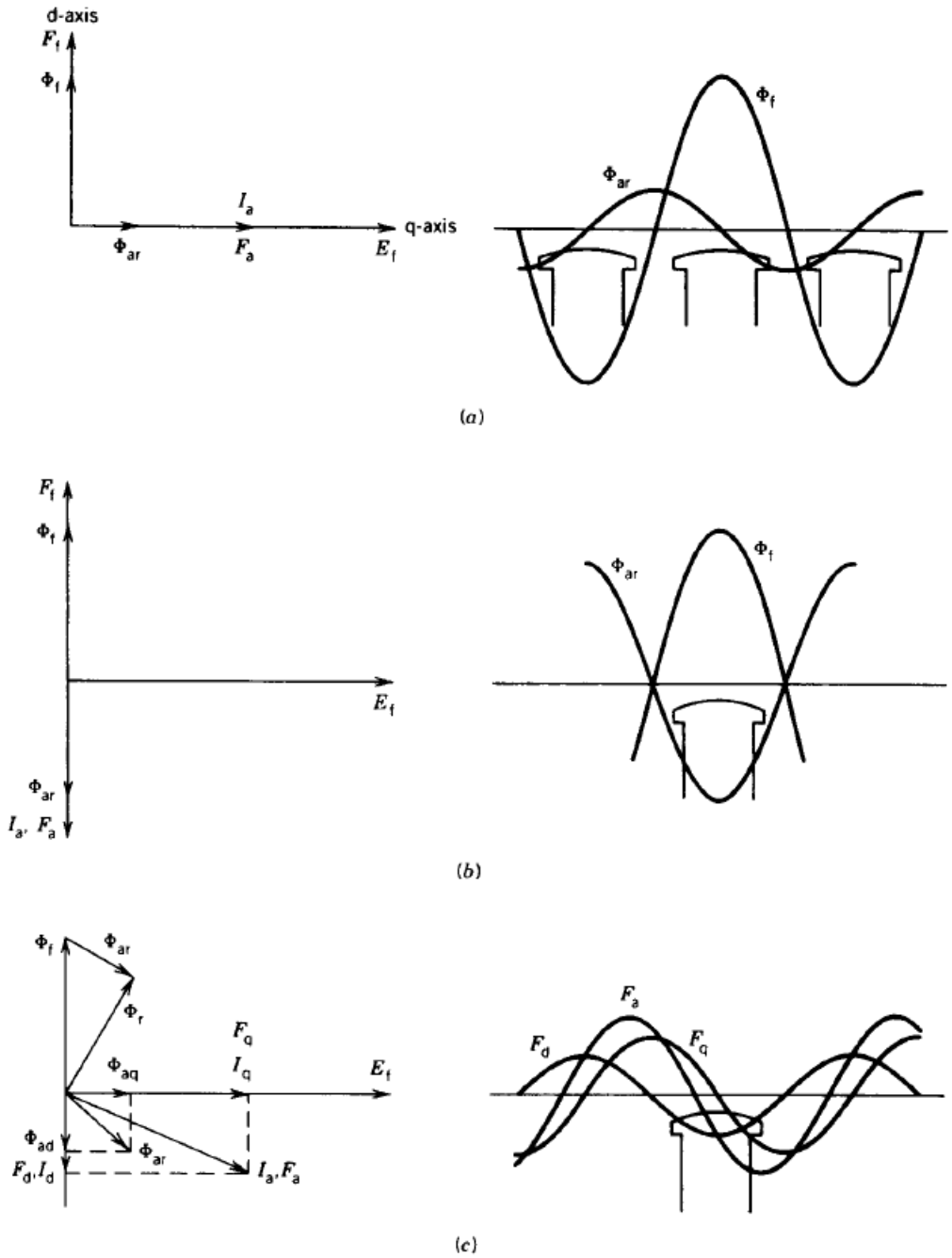
تنظیم کننده ولتاژ اتوماتیک ولتاژ پایانه ژنراتور را حس کرده و جریان تحریک I_f را طوری تغییر میدهد تا ولتاژ پایانه ماشین ثابت نگه داشته شود .

ماشینهاي 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 روبرو هستیم لذا عکس العمل آرمیچر یا mmf آرمیچر شار بیشتری در امتداد محور قطبها که به محور مستقیم یا محور d معروف است تولید می کنیم علت این امر آنست که طول شکاف هوایی در این امتداد بسیار کم است . پرواضح است که عکس العمل 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 نسبتا زیاد است . در ماشینهای با روتور استوانه ای که قبلا مورد بحث قرار گرفت شار در کلیه نقاط شکاف هوایی یکسان است زیرا در این ماشینها شکاف هوایی یکنواخت می باشد درنتیجه راکتانس X_{ar} که مدل عکس العمل آرمیچر در ماشینهای با روتور استوانه ای است دیگر جهت مدلسازی عکس العمل آرمیچر در ماشینهای قطب برجسته قابل قبول نخواهد بود . شکل (a-۱۴۱) را درنظر میگیریم که در آن جریان آرمیچر با E_f همفاز است mmf ناشی از میدان قطبها یا F_f و شار وابسته به آن یعنی Φ_f در امتداد محور d عمل خواهد نمود mmf آرمیچر یا F_a و شار وابسته به آن Φ_{ar} در امتداد محور q عمل مینمایند باید دانست طبق قانون فاراده اگر میدان روتور در جهت محور d باشد ولتاژ E_f در امتداد محور q خواهد بود . در شکل (b-۱۴۱) فرض برآنست که جریان آرمیچر بمیزان ۹۰ درجه از E_f عقب است دراین شرایط F_a , Φ_{ar} در امتداد محور d عمل میکنند اما جهت آنها مخالف F_f و Φ_f است گیریم F_a در هر دو شکل (a-۱۴۱) و (b-۱۴۱) یکسان باشد باید دانست در شکل (a-۱۴۱) چون F_a در امتداد محور q عمل میکند شار عکس العمل آرمیچر کمتر خواهد بود زیرا در امتداد محور q طول شکاف هوایی بیشتر است . در شکل (b-۱۴۱) چون F_a در امتداد محور d عمل میکند شار عکس العمل آرمیچر بیشتر خواهد بود زیرا در امتدا محور d طول شکاف هوایی کمتر است لذا راکتانسی که عکس العمل آرمیچر را مدل مینماید دیگر یک راکتانس واحد نخواهد بود .

جریانها و راکتانسهاي d , q :

mmf آرمیچر یعنی F_a و درنتیجه جریان I_a را میتوان به دو مؤلفه تجزیه کرد مؤلفه F_a بر روی محور d همان F_d است که در امتداد محور d عمل میکند مؤلفه دیگر F_a همان F_q است که در امتداد محور q عمل میکند .



شکل(۱۴۱) mmf و شارها در ماشین سنکرون قطب برجسته

F_q , F_d یا جریانهای I_q, I_d شارهای Φ_{aq} , Φ_{ad} را ایجاد میکند (شکل (c-۱۴۱)) در این شکل فرض بر اینست که I_a از E_f عقب است Φ_{ad} یا شار عکس العمل آرمیچر در امتداد محور d با راکتانس X_{ad} مدلسازی میشود Φ_{aq} یا شار عکس العمل آرمیچر در امتداد محور q با راکتانس X_{aq} مدلسازی میشود اگر X_{al} راکتانس نشتی استاتور فرض شود دراینصورت داریم :

$X_d = X_{ad} + X_{al}$ **راکتانس سنکرون محور d** **(۲۸۷)**

$X_q = X_{aq} + X_{al}$ **راکتانس سنکرون محور q** **(۲۸۸)**

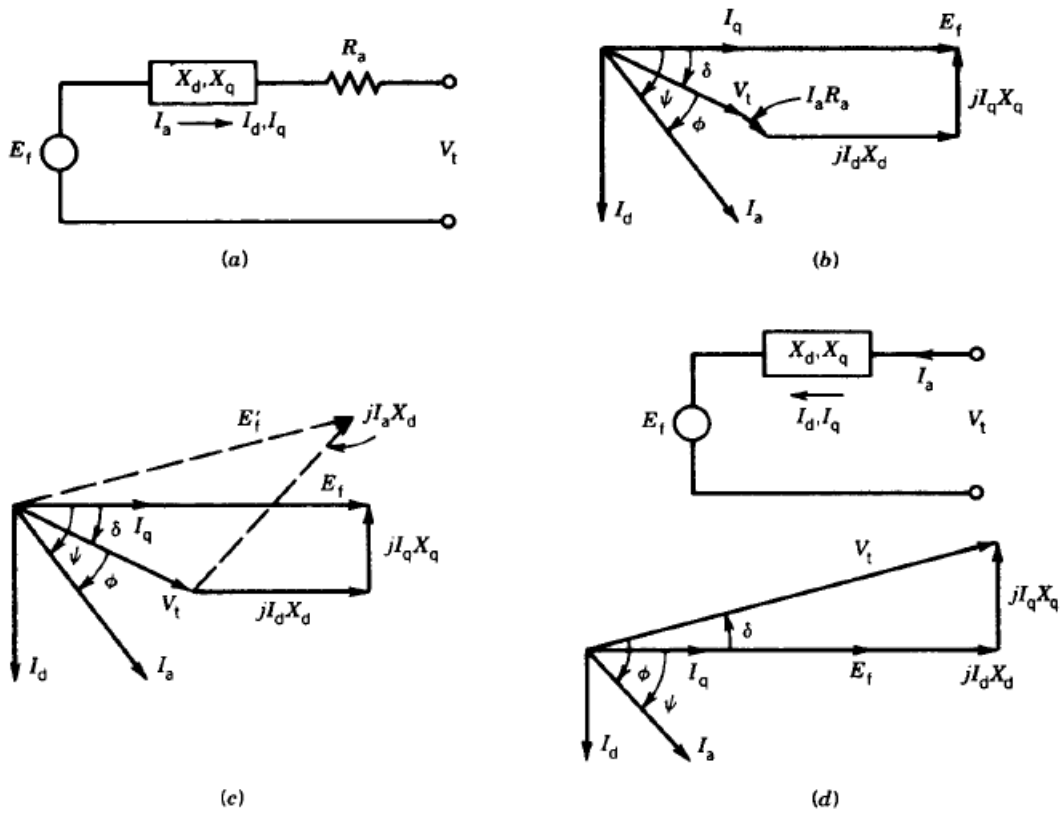
در اینجا فرض براینست که راکتانس نشتی (X_{al}) برای جریانهای I_q, I_d یکسان است باید دانست : $X_d > X_q$ زیرا رلوکتانس شکاف هوایی در امتداد محور q بیشتر از محور d است معمولا داریم :

$X_q = (0.5 - 0.8)X_d$

در مدار معادل ماشینهای سنکرون قطب برجسته X_d , X_q باید در مدل ظاهر شوند شکل (۱۴۲-a) مدار معادل ژنراتور سنکرون قطب برجسته را نشان داده و نمودار فازوری مربوطه در شکل (۱۴۲-b) نشان داده شده است واضح است که این مدار معادل مربوط به یک فاز ماشین میباشد زیرا در سیستمهای سه فاز متعادل تحلیل یک فاز کافی است . معادلات ژنراتور با قطب برجسته بقرار زیر است :

$$E_f = V_t + I_a R_a + I_d jX_d + I_q jX_q \qquad (۲۸۹)$$

$$I_a = I_d + I_q \qquad (۲۹۰)$$



شکل(۱۴۲) مدار معادل و نمودارهای فازوری ماشین سنکرون قطب برجسته **(a)** ژنراتور **(b)** ژنراتور **(c)** ژنراتور**(d)** موتور

شکل (۱۴۲-c) نمودار فازوری ژنراتور سنکرون قطب برجسته را نشان میدهد که در آن از مقاومت استاتور (آرمیچر) صرفنظر شده است . شکل (۱۴۲-d) مدار معادل و نمودار فازوری مربوط به موتور سنکرون قطب برجسته را نشان میدهد و فرض براینست که مقاومت آرمیچر ناچیز است . برای موتور سنکرون داریم ($R_a = 0$) :

$$V_t = E_f + I_d jX_d + I_q jX_q \qquad (۲۹۱)$$

از نمودار فازوری شکلهای (۱۴۲-c) و (۱۴۲-d) داریم :

$$\Psi = \phi \pm \delta \qquad (۲۹۲)$$

$$I_d = I_a \sin\Psi = I_a \sin(\phi \pm \delta) \qquad (۲۹۳)$$

$$I_q = I_a \cos\Psi = I_a \cos(\phi \pm \delta) \qquad (۲۹۴)$$

$$V_t \sin\delta = I_q X_q = I_a X_q \cos(\phi \pm \delta) \qquad (۲۹۵)$$

$$\tan\delta = \frac{I_a X_q \cos\phi}{V_t \pm I_a X_q \sin\phi} \qquad (۲۹۶)$$

$$E_f = V_t \cos\phi \pm I_d X_d \qquad (۲۹۷)$$

روابط اخیر برای موتور و ژنراتور سنکرون قطب برجسته در حالت پسفاز صادقند برای موتور دراینحالت داریم

$$\Psi = \phi - \delta$$

برای ژنراتور داریم :

$$\Psi = \phi + \delta$$

کلا در روابط فوق علامت (+) مربوط به حالت ژنراتوری و علامت (-) مربوط به حالت موتوری است .

روابط توان در ماشینهاي سنکرون قطب برجسته

برای سهولت در امر محاسبات مربوط به توان در ماشینهای سنکرون با قطب برجسته از مقاومت استاتور (R_a) صرفنظر می کنیم و همچنین تلفات هسته را ناچیز می شماریم با توجه به شکل (c-۱۴۲) برای ژنراتور سنکرون داریم :

$$S = V_t I_a^{\ *} = |V_t| \angle -\delta \left(|I_q| - j|I_d| \right)^* = |V_t| \angle -\delta \left(|I_q| + j|I_d| \right) \qquad (۲۹۸)$$

در این رابطه فرض براینست که E_f فازور مرجع بوده و محاسبات برای یک فاز (فاز a) انجام گرفته است . از شکل (c-۱۴۲) داریم :

$$|I_d| = \frac{|E_f| - |V_t| \cos\delta}{X_d} \qquad (۲۹۹)$$

$$|I_q| = \frac{|V_t| \sin\delta}{X_q} \qquad (۳۰۰)$$

با جایگزینی این مقادیر در رابطه (۲۹۸) داریم :

$$S = \frac{|V_t|^2}{X_q} \sin \angle -\delta + \frac{|V_t||E_f|}{X_d} \angle 90 - \delta - \frac{|V_t|^2}{X_d} \cos \angle 90 - \delta = P + jQ \qquad (۳۰۱)$$

بسهولت داریم :

$$P = \frac{|V_t||E_f|}{X_d} \sin\delta + \frac{|V_t|^2 \left(X_d - X_q \right)}{2 X_d X_q} \sin 2\delta = P_f + P_r \qquad (۳۰۲)$$

$$Q = \frac{|V_t||E_f|}{X_d} \cos\delta - |V_t|^2 \left| \frac{\sin^2\delta}{X_q} + \frac{\cos^2\delta}{X_d} \right| \qquad (۳۰۳)$$

اگر $X_d = X_q$ فرض شود داریم :

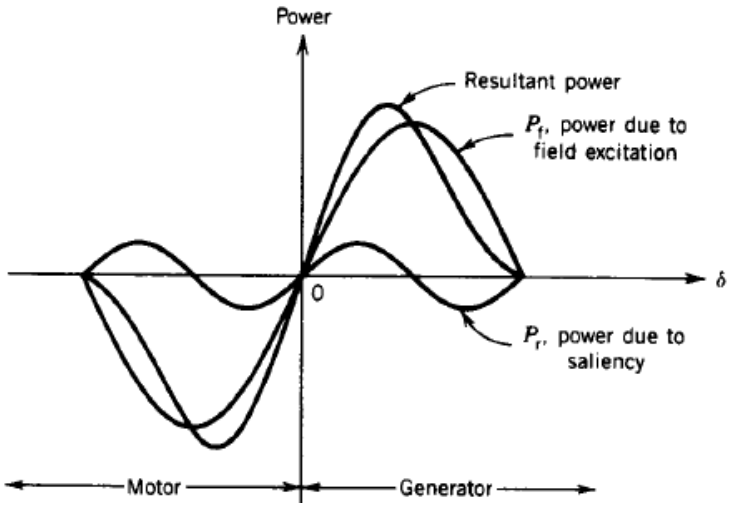
$$P = \frac{|V_t||E_f|}{X_d} \sin\delta \qquad (۳۰۴)$$

$$Q = \frac{|V_t||E_f|}{X_d} \cos\delta - \frac{|V_t|^2}{X_d} \qquad (۳۰۵)$$

این روابط مشابه روابط مربوط به ژنراتور سنکرون با روتور استوانه ای است و واضح است در روتور استوانه ای داریم : $X_d = X_q = X_s$

باتوجه به رابطه (۳۰۲) درمی یابیم در ژنراتور سنکرون قطب برجسته توان اکتیو تحویلی از طرف ماشین به طرف شبکه از دو مؤلفه تشکیل شده است :

۱ . P_f که در حقیقت توان اکتیوی است که E_f تأمین میکند و مشابه رابطه ژنراتور با قطب استوانه ای است .



شکل(۱۴۳) مشخصه زاویه توان ماشین سنکرون قطب برجسته

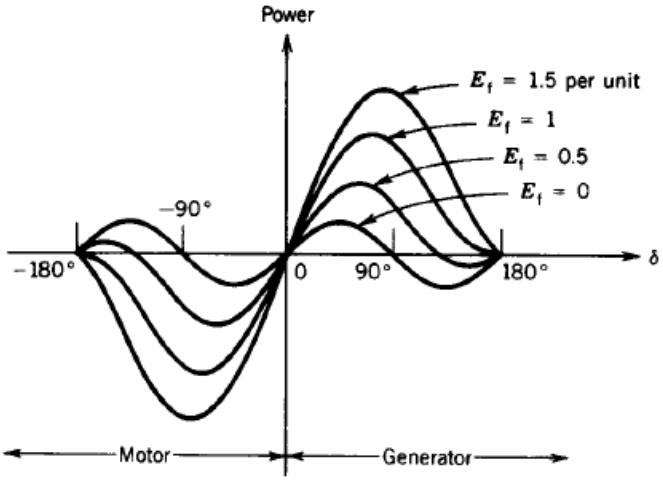
۲ . P_r توان رلوکتانسی نام دارد و بخاطر برجستگی قطبها حاصل میشود و به E_f بستگی ندارد باید دانست در روتور استوانه ای $X_d=X_q$ بوده و توان رلوکتانسی محو خواهد شد . شکل (۱۴۳) مشخصه زاویه توان ژنراتور سنکرون را در ربع اول مختصات نشان میدهد .برای موتورهای سنکرون نیز همچون مشخصه ای در ربع سوم مختصات قابل استحصال است در این شکل P_f و P_r و منتجه آنها یعنی P رسم شده است . در حالت ژنراتوری P از طریق ژنراتور به شبکه تحویل شده و در حالت موتوری P وارد ماشین میشود باید دانست P_{max} در ماشینهای قطب برجسته بیشتر از P_{max} در روتور استوانه ای است و در زاویه ای کمتر از ۹۰ رخ میدهد . شکل (۱۴۴) یکسری منحنی های مربوط به مشخصه زاویه- توان تحت V_t ثابت و E_f متغیر رسم شده است . باید دانست اگر جریان تحریک نیز صفر باشد ماشین بخاطر برجستگی قطبها توان رلوکتانسی (یا گشتاور رلوکتانسی) حاصل میسازد که خود از مزایای عمده ماشینهای با قطب برجسته بشمار میرود . یکی از موارد استعمال این حالت آنست که موتور سنکرون در انتهای خط انتقال انرژی بعنوان کندانسور سنکرون نصب شده باشد و بخواهیم Q از شبکه بکشد تا ولتاژ خط را بهبود بخشد .(در اواخر شب وقتی اثر خازن زیاد میشود) دراینصورت باید کندانسور سنکرون را در حالت زیر تحریک مورد بهره برداری قرار دهیم .

اگر کندانسور از نوع روتور استوانه ای باشد کاهش جریان تحریک برای بردن ماشین به حالت زیر تحریک ممکن است گشتاوری را حادث سازد که از گشتاور چرخشی مورد نیاز کمتر شود و لذا سنکرونیزم موتور از دست میرود . اما در موتور قطب برجسته میتوان جریان تحریک را به صفر رساند تا موتور جریان پسفاز بیشتری بکشد و گشتاور رلوکتانسی سنکرونیزم ماشین را حفظ خواهد کرد .

در ماشینهای قطب برجسته اگر جریان تحریک در طیف متعارف خود تغییر کند اثر برجستگی بر روی توان و گشتاور حاصله آنچنان مشهود نخواهد بود .فقط در تحریک کم است که برجستگی قطبها خود را بیشتر نمایان میسازند . در شکل (۱۴۲-c) اگر از برجستگی قطبها صرفنظر شود در اینصورت ولتاژ تحریک E'_f خواهد بود و باید دانست :

$$E'_f = V_t + jI_a X_d$$

گفتنی است که مقادیر E_f, E'_f تقریبا یکسانند و لذا بجز درموارد تحریک کم و یا در مواقعی که دقت زیاد مدنظر است تئوری ماشینهای با روتور استوانه ای را میتوان برای ماشینهای با قطب برجسته نیز بکار برد .



شکل(۱۴۴) مشخصه زاویه توان ماشین های سنکرون تحت جریان های تحریک گوناگون

تعیین X_d , X_q

همانطور که قبلا گفتیم X_d , X_q بترتیب بیشترین و کمترین راکتانسهای ناشی از عکس العمل آرمیچر در وضعیتهای مختلف روتور میباشند . X_d , X_q را توسط آزمایش لغزش میتوان بدست آورد . در این آزمایش مدار تحریک را باز نگه میداریم ($I_f = 0$)و روتور را تحت سرعتی که قدری کمتر از سرعت سنکرون است می چرخانیم . دراینحال استاتور را به برق سه فاز AC وصل مینمائیم باید توجه داشت که در این آزمایش جهت چرخاندن روتور باید همجهت چرخش میدان گردان استاتور باشد از آنجائیکه مدار روتور باز است ($I_f = 0$) لذا E_f یا ولتاژ القاء شده در استاتور صفر خواهد بود بنابراین در این آزمایش ولتاژ شبکه اعمال شده به استاتور (V_t) باید کاهش یابد تا به ماشین آسیب نرسد در غیراینصورت از استاتور جریان شدیدی خواهد گذشت نظریه برجستگی قطبها در این آزمایش اسیلوگرام جریان استاتور (جریانی که از شبکه کشیده میشود) مطابق شکل (۱۴۵) خواهد بود باتوجه به حداقل و حداکثر جریانها راکتانسهای X_d , X_q را اینچنین حساب میکنیم :

$$X_d = \frac{V_t}{I_{\min}/\sqrt{2}} \qquad (۳۰۶)$$

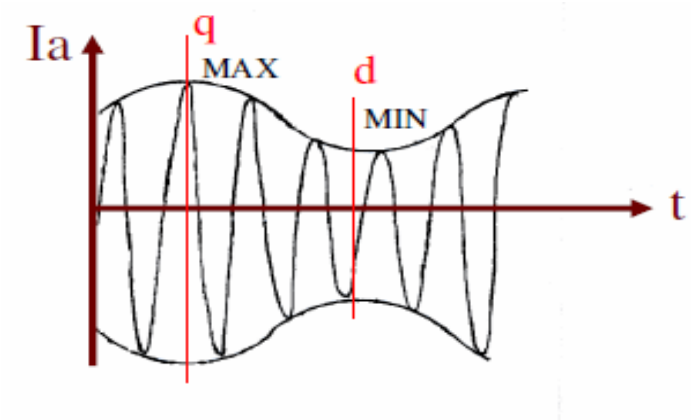
$$X_q = \frac{V_t}{I_{\max}/\sqrt{2}} \qquad (۳۰۷)$$

کنترل سرعت موتورهاي سنکرون

سرعت موتورهای سنکرون را میتوان با تغییر فرکانس منبع تغذیه منترل نمود و در تحت هر فرکانسی خاص به سرعت سنکرون جدیدی دست یافت باید دانست با این ترتیب میتوان حتی با تغییر بار سرعت چرخش را ثابت نگه داشت مگر آنکه با آنقدر شدید باشد تا موتور سنکرونیزم خود را از دست بدهد زیرا برخلاف موتورهای القایی تلفات توان بخاطر لغزش در آنها پدید نمی آید معمولا برای کنترل سرعت موتورهای سنکرون از دو دوش استفاده میشود :

۱ . روش اول استفاده از تغییر ولتاژ و فرکانس خروجی اینورتر یا سیکلوکنورتور میباشد

۲ . در روش دوم فرکانس بصورت اتوماتیک بوسیله سرعت موتور تنظیم میشود و در این روش موتور را خودکنترل گویند .



شکل(۱۴۵) جریان استاتور (آرمیچر) در آزمایش لغزش

کنترل فرکانس

شکل (۱۴۶) نمودار جعبه ای یک سیستم کنترل از نوع حلقه باز مربوط به کنترل سرعت موتور سنکرون سه فاز را نشان میدهد در این روش یا از اینورتور و یا از سیکلوکنورتور استفاده میشود تا ولتاژ و فرکانس ورودی موتور تنظیم گردد در سیستم اینورتوری طیف تغییرات فرکانس وسیع است (شکل **a**-۱۴۶) اما در سیستم سیکلوکنورتوری تغییرات فرکانس ورودی موتور در کمتر از ثلث فرکانس اسمی میسر خواهد گردید باید دانست برای حصول به گشتاوری مشابه در کل محدوده تغییرات سرعت و همچنین برای جلوگیری از اشباع در ماشین باید ولتاژ ورودی نیز همگام با فرکانس ورودی تغییر نماید از رابطه (۲۷۴) برای ماشین سنکرون سه فاز داریم :

$$P = T\omega_m = \frac{3V_t E_f}{X_s}\sin(\delta) \qquad (۳۰۸)$$

اکنون :

$$\omega_m = \frac{4\pi f}{P} \qquad (۳۰۹)$$

گیریم :

$$X_s = 2\pi f L_s \qquad (۳۱۰)$$

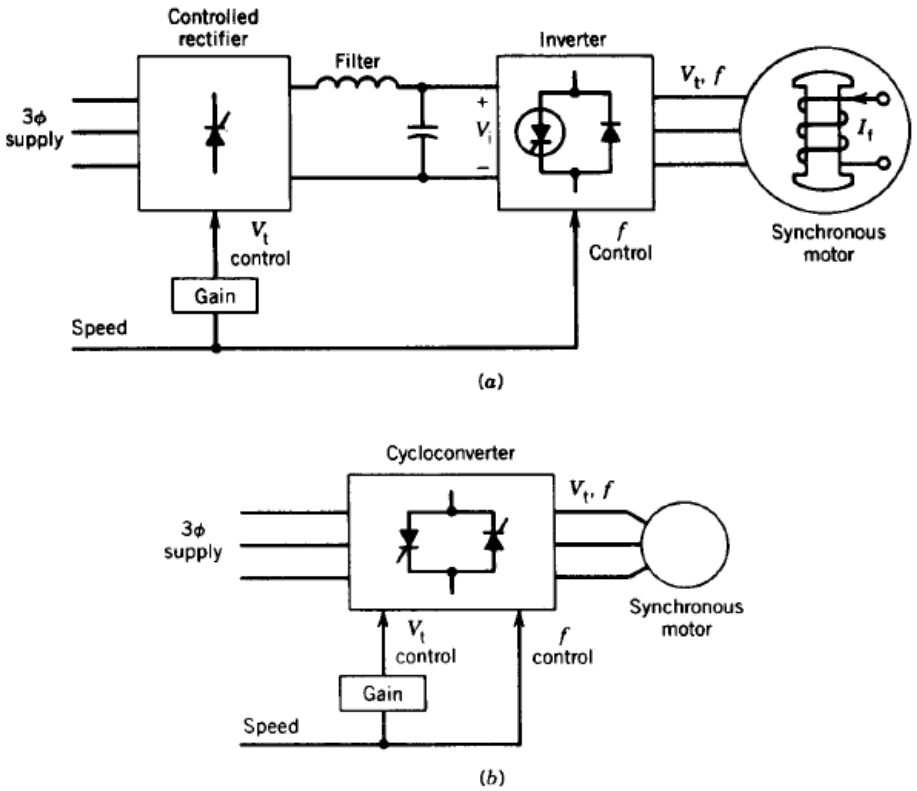
اگر جریان تحریک ($\mathbf{I_f}$) ثابت باشد دراینصورت $\mathbf{E_f}$ متناسب با سرعت است لذا :

$$E_f = K_1 f \qquad (۳۱۱)$$

$\mathbf{K_1}$ عددیست ثابت . از روابط (۳۰۸) تا (۳۱۱) داریم :

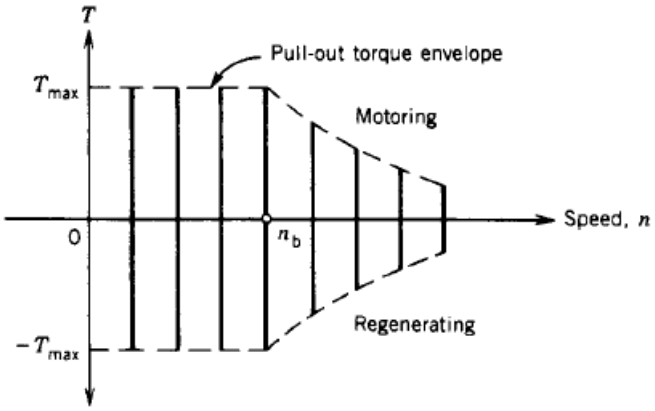
$$T = K\frac{V_t}{f}shi(\delta) \qquad (۳۱۲)$$

$\mathbf{K}$ عددی است ثابت . سرعت مبنا را میتوان برای شرایط $\mathbf{V_t}$ و $\mathbf{f}$ اسمی تعریف کرد اگر در سرعتهای کمتر از سرعت مبنا نسبت $\frac{V_t}{f}$ با تغییر فرکانس و سرعت ثابت نگه داشته شود لذا گشتاور ماکزیمم یا گشتاور پرتگاهی ($K\frac{V_t}{f}$) یکسانی در سرعتهای زیر سرعت مبناء حاصل میشود. مشخصه گشتاور- سرعت موتورهای سنکرون در فرکانس و ولتاژ متغیر در شکل (۱۴۷) رسم شده است در این شکل $\mathbf{n_b}$ سرعت مبنا و $\mathbf{T_{max}}$ گشتاور ماکزیمم است در حالت ترمز جهت توان فرق میکند و از موتور به سمت شبکه میرود.

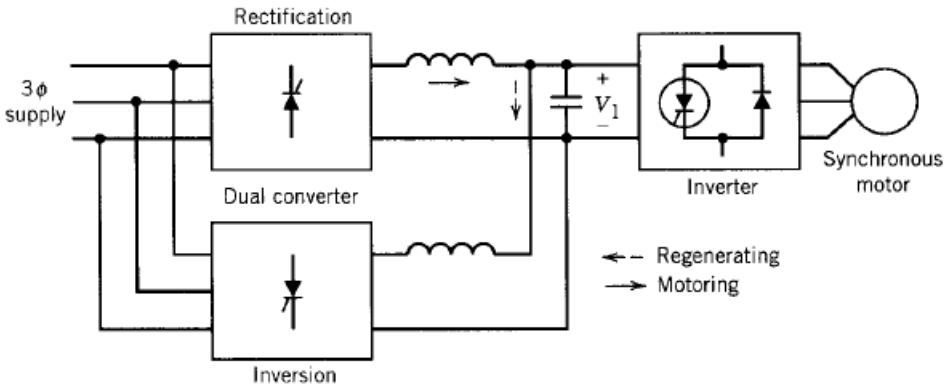


شکل (۱۴۶) سیستم کنترل فرکانس از نوع حلقه باز

در سیستم شکل (a-۱۴۶) بخاطر وجود دیودها امکان برگشت توان وجود ندارد و باید از مدل دوگانه جهت امکان برقراری جریان برگشتی استفاده کرد (شکل (۱۴۸))



شکل(۱۴۷) مشخصه گشتاور سرعت موتور سنکرون تحت فرکانس و ولتاژمتغیر



شکل(۱۴۸) کنترل سرعت با در نظر گرفتن امکان برقراری توان برگشتی

اما در سینکلوکنورتورها امکان برقراری جریان برگشتی وجود دارد باید دانست درحالت ترمز که توان از موتور به شبکه میرود موتور اساسا نقش ژنراتور را ایفا میکند و این وضعیت را ترمز- تولید نامیده اند اگر بخواهیم سرعت را بیشتر از سرعتهای مبنا کنیم فرکانس را افزایش داده اما ولتاژ را در حد ولتاژ اسمی نگه میداریم این عمل باعث میگردد که در سرعتهای زیاد گشتاور پرتگاهی کاهش یابد (شکل (۱۴۷)) در شکل (۱-۱۴۶) اگر یکسوساز کنترل شده با پل یکسوساز دیود جایگزین شود دراینصورت ورودی اینورتور (V_i) ثابت خواهد بود . دراین حال باید از اینورتور PWM یا اینورتور با مدولاسیون عرض پالس استفاده کرد تا فرکانس و ولتاژ خروجی توسط خود اینورتور تغییر یابد . باید توجه کرد که اگر فرکانس ناگهانی تغییر کند یا نرخ تغییرات آن شدید باشد دراینصورت روتور قادر به تعقیب میدان گردان استاتور نخواهد بود و موتور سنکرونیزم خود را از دست میدهد لذا نرخ تغیرات فرکانس باید محدود باشد همچنین اگر بار ناگهان به محور موتور اعمال شود این امکان وجود دارد که سنکرونیزم موتور از دست برود لذا سیستم کنترل حلقه باز برای حالاتی کا بار ناگهانی اعمال میشود مناسب نیست .

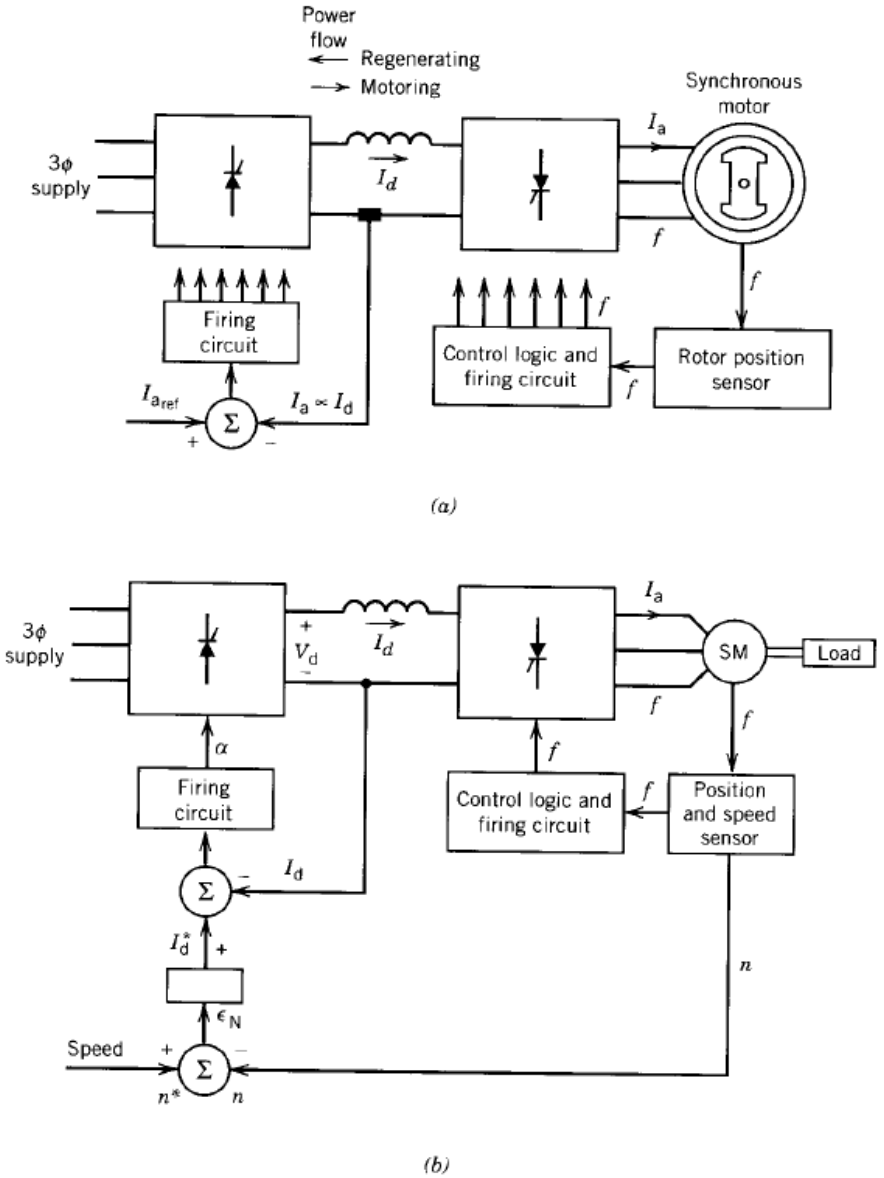
موتور سنکرون خودکنترل

در هنگام اعمال بارهای ناگهانی به موتور امکان از دست رفتن سنکرونیزم وجود دارد و موتور بحالت ناپایدار سوق داده میشود در سیستم کنترل حلقه باز اگر بار ناگهانی اعمال شود موقتا سرعت موتور کاهش می یابد و ممکن است δ از ۹۰ زیادتر شود و سنکرونیزم مختل گردد اما اگر وضعیت روتور در هنگام آهسته گردیدن حس گردد و از این اطلاعات جهت کاهش فرکانس استاتور استفاده شود سنکرونیزم حفظ می گردد (حالت پایدار) در این روش سرعت روتور فرکانس استاتور را تنظیم میکند لذا موتور را خودکنترل می گویند . شکل (۱-۱۴۹) شمای این سیستم کنترل را نشا ن میدهد در این سیستم از دو یکسوساز کنترل شده استفاده میشود یکی از آنها در قسمت منبع تغذیه و دیگری در سر راه موتور قرار دارد در حالت موتوری یکسوساز نزدیک منبع تغذیه همان نقش یکسوساز را ایفا میکند اما یکسوساز نزدیک موتور نقش اینورتور را ایفا میکند درحالت ترمز یا ترمز- تولید وظیفه این دو یکسوساز جابجا میشود در این سیستم یک حس کننده وضعیت روتور بر روی محور نصب شده و سیگنال در رابطه با وضعیت روتور حاصل میسازد این سیگنال به مدار کنترل دیجیتالی اعمال گشته از آن برای آتش تریستورهای اینورتور سر موتور استفاده میشود لذا هرگونه تغییری در سرعت موتور فرکانس آتش کردن تریستورها را تغییر میدهد و درنتیجه فرکانس استاتور تصحیح میشود و از ناپایدار شدن موتور یا از دست رفتن سنکرونیزم جلوگیری می گردد در این سیستم همچنین در قسمت یکسوساز متصل به منبع تغذیه یک حلقه کنترل جریان تعبیه شده است تا بتوان جریان ماشین را در حد مطلوب نگهداری کرد در این سیستم جریان ارتباط DC یا I_d که با جریان ماشین متناسب است با جریان مرجع مقایسه شده و سیگنال خطا زاویه آتش تریستورهای یکسوساز را بنحوی تنظیم میکنند که جریان آرمیچر درحد مطلوب جریان مرجع قرار گیرد از رابطه (۱۰-۲۷۹) در می یابیم که گشتاور به زاویه β بستگی دارد زاویه β در سیستم کنترل دیجیتالی موجود در سر ماشین قابل کنترل است علت این امر آنست که سیگنال مربوط به وضعیت روتور وضعیت محور میدان روتور را مشخص کرده و زمان آتش شدن تریستورها محور میدان آرمیچر را مشخص میکند اگر β در میزان معینی تنظیم شده باشد و جریان تحریک ثابت نگه

داشته شود لذا گشتاور و درنتیجه سرعت توسط جریان آرمیچر کنترل میشود . این جریان توسط حلقه کنترل جریان در یکسوساز منبع تغذیه کنترل می گردد هردو یکسوساز موجود در این سیستم ساده و ارزان هستند و به مدار کموتاسیون برای انجام فرآیند کموتاسیون اجباری نیاز ندارند .

سیستم کنترل با حلقه بسته

در سیستم شکل (a-۱۴۹) اگر بار تغییر کند سرغت نیز تعییر میکند اگر بخواهیم سرعت ثابت باقی بماند باید جریان DC (I_d) را طوری تنظیم کنیم که گشتاور بار را ارضاء کند برای انجام اینکار از یک حلقه کنترل دیگر مطابق شکل (b-۱۴۹) استفاده میکنیم . حس کننده وضعیت روتور اطلاعاتی درباره محور میدان روتور و سرعت روتور ارائه می دهد اگر در اثر افزایش بار سرعت کاهش یابد خطای سرعت (ε) زیاد شده و I_d^* زیاد میشود لذا زاویه آتش تریستورها طوری تغییر می یابد تا جریان I_d زیاد شود و گشتاور بیشتری در موتور حاصل گردد بنابراین سرعت نهایتا به مقدار اولیه خود باز می گردد .



شکل(۱۴۹) سیستم خود کنترل برای کنترل سرعت موتور سنکرون (a) سیستم حلقه باز (b) سیستم حلقه باز

کاربرد ماشینهاي سنکرون سه فاز

کاربردهای ماشین سنکرون سه فاز را می توان چنین برشمرد :

۱ . ژنراتورهای سنکرون سه فاز در نیروگاهها انرژی الکتریکی تولید می کنند .

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

۳ . ضریب توان موتورهای سنکرون با تغییر جریان تحریک قابل تغییر است لذا میتوان از آن در حالت فوق تحریک به مثابه خازن استفاده کرد و Q به شبکه تزریق نمود و بنابراین میتوان از این موتورها برای بهبود ضریب توان استفاده کرد . یکی از مشخصات بارز این موتورها آنست که در حین اینکه کار مکانیکی انجام میدهد میتواند Q به شبکه تزرییق کند و ضریب توان کل کارخانه را بهبود بخشد .

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

۵ . نکته منفی در رابطه با موتورهای سنکرووون آنست که برای تغذیه روتور به ممنبع DC نیاز داریم اما امروزه از سیستمهای تحریک بدون جاروبک استفاده کرده و مسئله منبع DC جداگانه را حل نموده اند در این سیستمها تحریک کننده مدار تحریک روترو یک ژنراتور کوچک AC است که بر روی محور روتور استوار است و همراه محور می چرخد خروجی این ژنراتور AC توسط یکسوسازهای الکترونیکی که آنهم بر روی محور موتور قرار دارد وبا موتور می چرخد یکسو میشود لذا به جاروبک و حلقه لغزان برای تغذیه روتور نیاز نداریم و خروجی یکسوساز مستقیما روتور را تغذیه مینماید . شکل (۱۵۰) شمای یک موتور سنکرون را که به سیستم تحریک بدون جاروبک مجهز است نشان میدهد . باید توجه داشت امروزه این نوع سیستم تحریک برای ژنراتورهای سنکرون نیز بکار میرود .

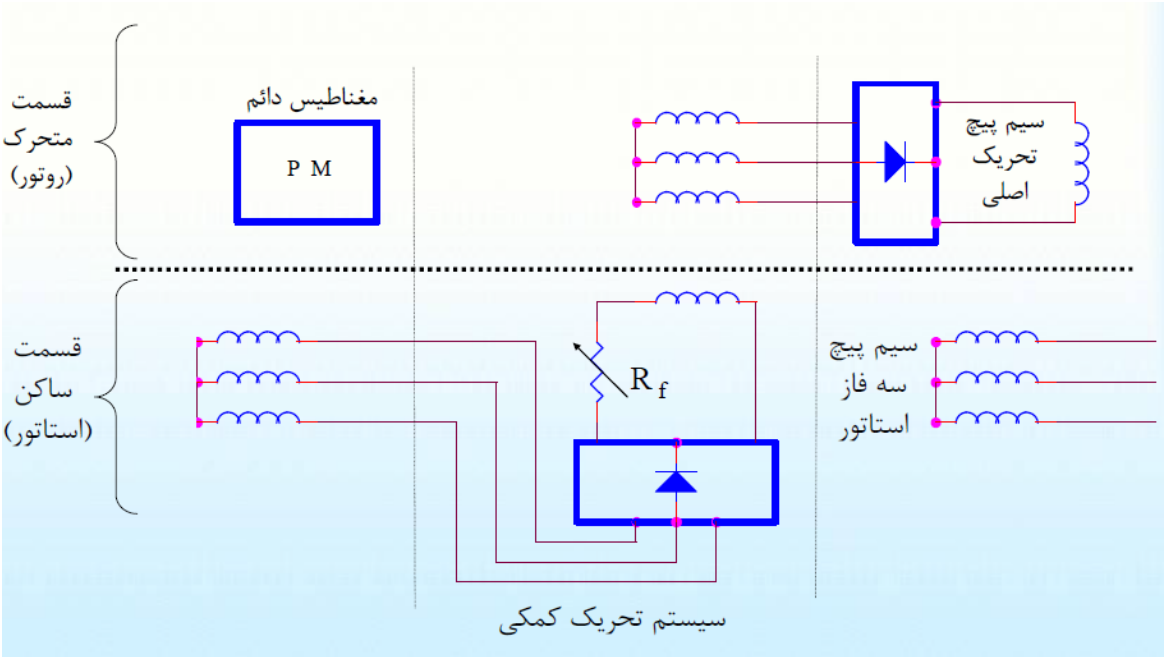
۶ . هزینه ساخت موتورهایسنکرون بیشتر از موتور القایی است لذا در سرعتهای بالا یا در سرعتهای متوسط با توان کمتر از ۵۰ اسب بخار موتورهای سنکرون مناسب نمی باشند در کاربردهایی که به سرعتهای کم و توان زیاد نیاز است موتور القایی ارزانتر از موتورهای سنکرون نخواهد بود زیرا به آهن بسیار زیاد جهت ایجاد چگالی شار بالا در شکاف هوایی نیاز است (حدود یک تسلا).

باید متذکر شد که موتور سنکرون دارای خواص زیر است که مسئله گرانی آنرا می پوشاند :

الف : سرعت بالا

ب : بازده زیاد

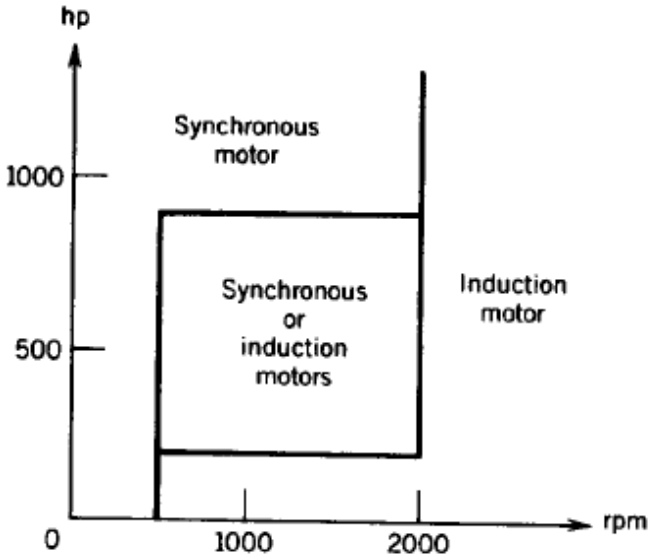
ج : قابلیت کنترل ضریب توان



شکل(۱۵۰) سیستم تحریک بدون جاروبک همراه با دیودهای گردان جهت تغذیه روتور ماشین سنکرون

شکل (۱۵۱) محدوده ای را که میتوان با توجه به آن موتور سنکرون یا آسنکرون را برای کاربردی خاص انتخاب نمود نشان میدهد

۷ . در سیستمهای کنترل سرعت امروزه موتورهای سنکرون که توسط سیستمهای الکترونیکی کنترل میشوند جدا مورد توجه قرار گرفته اند مبدلهای موجود در سیستم شکل (۱۴۹) که به سیستم خودکنترل معروف است بسیار ساده و ارزان هستند زیرا کموتاسیون تریستورها توسط خود ماشین انجام میگیرد . امروزه این سیستم به طرز چشمگیری جای خود را در صنعت باز میکند بخصوص تحقیقات وسیعی در جریان است که از این سیستم در ترنهای برقی استفاده شود تا بتوانند موتورهای سنکرون را بجای موتورهای DC و القایی وارد سیستم حمل و نقل نمایند .



شکل (۱۵۱) کاربرد موتورهای سنکرون و القایی (آسنکرون)

منابع این جزوه آموزشی برگرفته از کتابهابی مختلف از جمله پ-س-سن می باشد

پـــایـــــان

باآرزوی موفقیت برای همه شما عزیزان

دکتر حـــسن زارع