



بنام خدا

ماشینهای الکتریکی III



فهرست مطالب :

سرفصلها :

مقدمه

بیان ویژگیها - دلیل استفاده - قسمت‌های تشکیل دهنده - انواع روتور - رنج قدرت - جنس هسته - روشهای خنک سازی و

اصول کار ژنراتور سنکرون

چگونگی القای ولتاژ در یک هادی - سیم پیچ با گام کسری - سیم پیچهای گسترده - سیم پیچهای دو طبقه
تاثیر نوع سیم پیچی بر هارمونیکهای مزاحم

مدار معادل ماشین سنکرون

منحنی های بی باری و اتصال کوتاه - چگونگی محاسبه پارامترهای مدل ماشین سنکرون - دیاگرام برداری
ماشین سنکرون در شرایط مختلف کاری

انواع سیستمهای تحریک

سیستمهای دینامیک - سیستمهای استاتیک - سیستمهای اتو پیلوت



ادامهٔ سرفصل:

بررسی عکس العمل آرمیچر

تحت بار پسفاز - تحت بار پیشفاز

رگولاسیون ولتاژ

روش امپدانس سنکرون - روش آمپر دور - روش پوتیه

پخش توان در ژنراتور سنکرون

انواع تلفات - راندمان

موازی کردن ژنراتورهای سنکرون

شرایط موازی کردن - ژنراتور موازی با شبکه - تقسیم بار بین دو ژنراتور موازی

برخی مشخصه های ژنراتور سنکرون

نسبت اتصال کوتاه - منحنی قابلیت ژنراتور



ادامه سرفصل :

موتور سنکرون

مقدمه : ساختمان - موارد کاربرد - مزایا و معایب

نحوه کارکرد موتور سنکرون

بررسی مکنانیزم کارکرد موتور سنکرون - روشهای راه اندازی

مدل موتور سنکرون

دیاگرام برداری موتور تحت شرایط مختلف بار و تحریکهای متفاوت - منحنی های وی

پخش توان در یک موتور سنکرون

تلفات و راندمان

کندانسور سنکرون



ادامه فهرست :

ماشینهای قطب برجسته
خصوصیات - کاربرد

مدار معادل ماشینهای قطب برجسته

تئوری دو محوری بلندل

توان انتقالی در ماشین قطب برجسته

روابط توان - منحنی توان

تحلیل شرایط کاری ماشین قطب برجسته

روش ترسیمی - روش محاسباتی

نیروی محرکه و شار ناشی از عکس العمل آرمیچر در ماشینهای قطب برجسته



ادامه فهرست :

تعیین مقادیر پارامترهای ماشین سنکرون قطب برجسته

روش آزمایشهای مدار باز و اتصال کوتاه - روش لغزش - روش موتور رلوکتانسی - روش ماکزیموم جریان پسفاز

حالتهای گذرا در ماشین سنکرون

اتصال کوتاه سه فاز و تکفاز - مدل‌های مداری گذرا و تند گذر

بررسی پایداری موتور سنکرون

پایداری استاتیک و دینامیک - معیار سطوح برابر - معادله تاب)

تبدیل پارک

معادلات ماتریسی ماشین سنکرون معادلات پارک



ادامه فهرست :

ترانسفورماتور سه فاز

مقدمه

بررسی اتصالات و آرایشهای ترانسفورماتور سه فاز

آرایشهای خاص

آرایش اسکات - آرایش زیگزاگ و

مرور گروه بندی ترانسفورماتور سه فاز

مباحث ویژه

هارمونیکها در ترانسفورماتور سه فاز - آزمایش سامپنر و



- 1- Electric Machinery
Fitzgerald, A.E. Mc Graw Hill Book Company
- 2-Electric Machinery Fundamentals
Chapman, Stephan Mc Graw Hill Book Company
- 3-Principles of Electric Machines and Power Electronics
Sen P.C. John Whily & Sons Inc.
- 4-Electric Machinery
Bimbhara P.S. Khana Publishe Delhi
- 5- Electric Machines
Nagrath I. J. , Tata Mc Graw Hill Book Company
- 6- Basic Electric Machines
Del Toro V. Prentice Hall International Editor



ارزشیابی

ارزشیابی

پایان ترم ۳۵٪

میان ترم ۳۰٪

پروژه ۲۰٪

حل تمرین ۱۵٪



بنام خدا

مبحث اول

ماشینهای الکتریکی III

کلیات ماشین سنکرون

معرفی ژنراتور و موتور سنکرون

بیان ویژگیها

دلیل استفاده

رنج قدرت $\left\{ \begin{array}{l} \text{حداکثر قدرت در ایران } 1 \text{ Mwatt} - 400 \text{ Mwatt} \\ \text{حداکثر قدرت در دنیا } 1200 \text{ Mwatt} \end{array} \right.$

جنس هسته $\left\{ \begin{array}{l} f = 50\text{HZ} \\ B = 1.0\text{T} \end{array} \right.$ (تلفات) $M_5 \rightarrow 1.2\text{W} / \text{Kg}$

روشهای خنک سازی



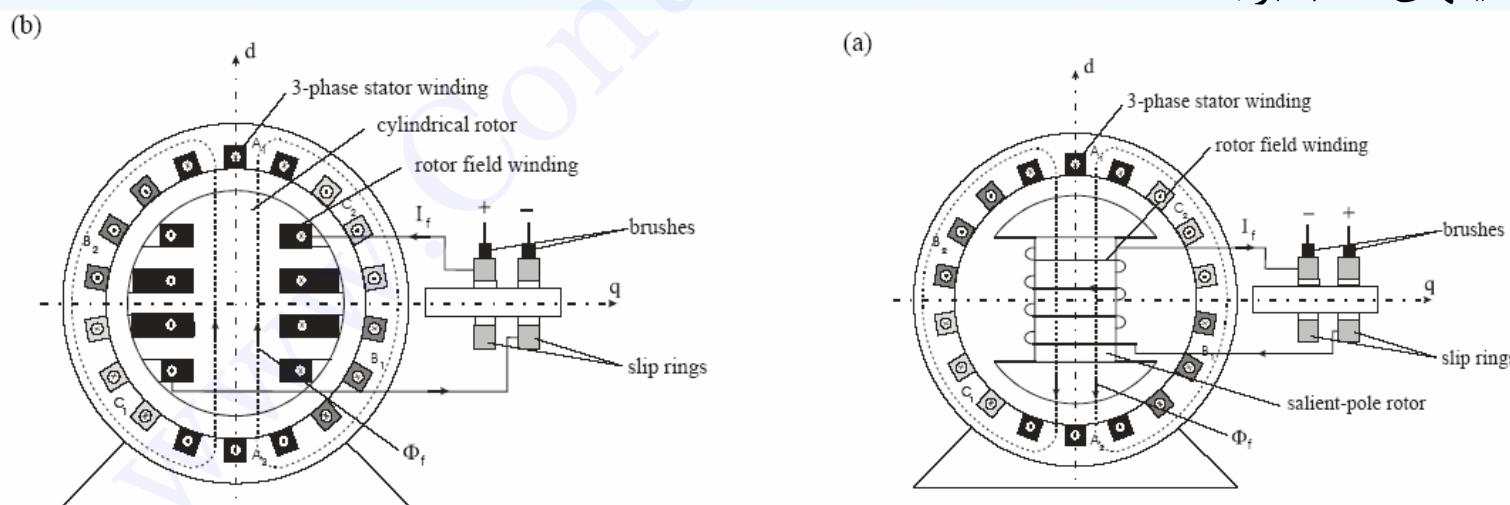


معرفی ژنراتور و موتور سنکرون

قسمتهای تشکیل دهنده



ماشینهای سنکرون با توجه به شکل روتورشان به دو گروه تقسیم می شوند ماشینهای قطب صاف و ماشینهای قطب برجسته





دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / ماشینهای الکتریکی / ۳ / دکتر واحدی / پاییز ۸۳

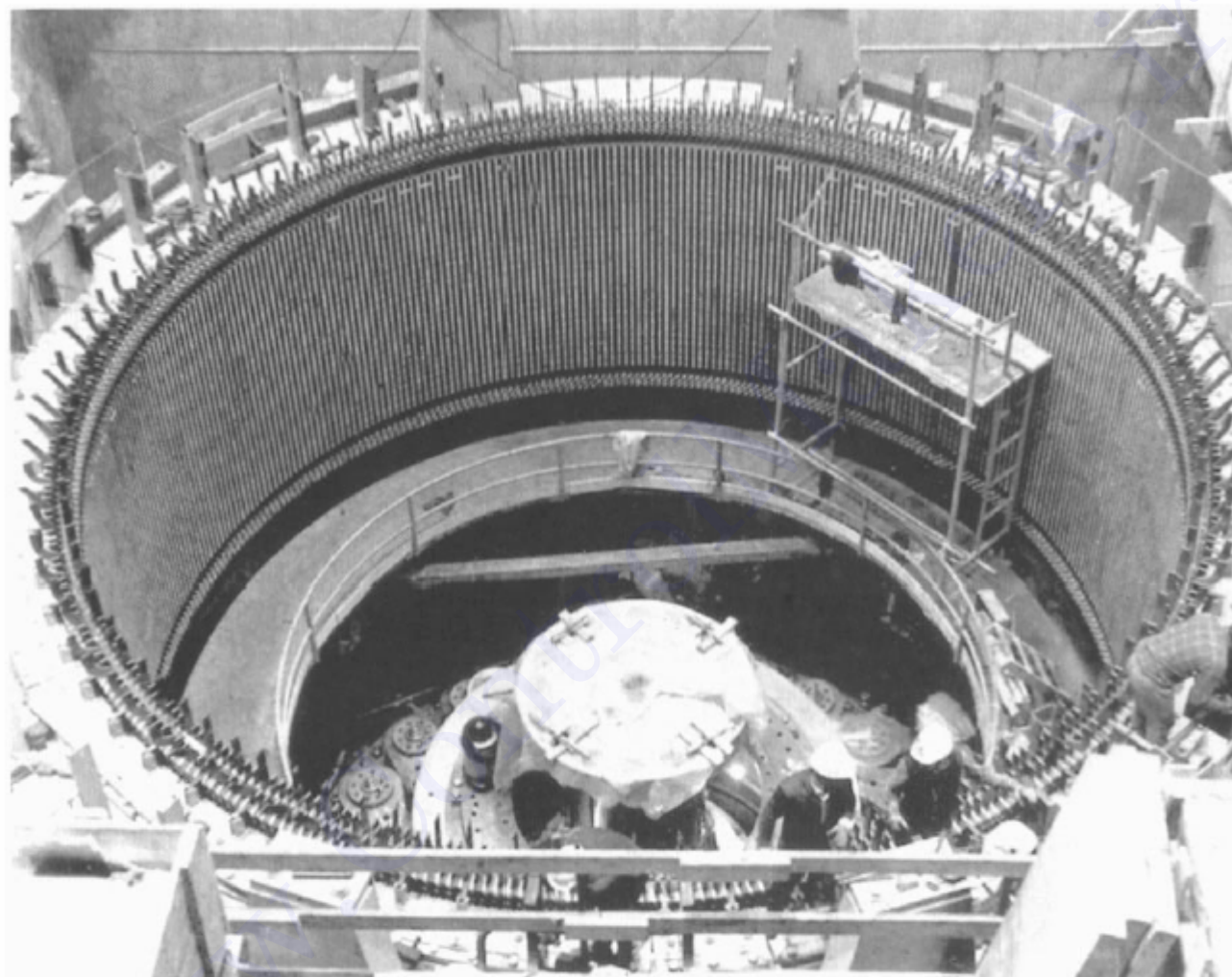


Figure 16.2a

Stator of a 3-phase, 500 MVA, 0.95 power factor, 15 kV, 60 Hz, 200 r/min generator. Internal diameter: 9250 mm; effective axial length of iron stacking: 2350 mm; 378 slots.

(Courtesy of Marine Industrie)



Synchronous Generator: Rotor

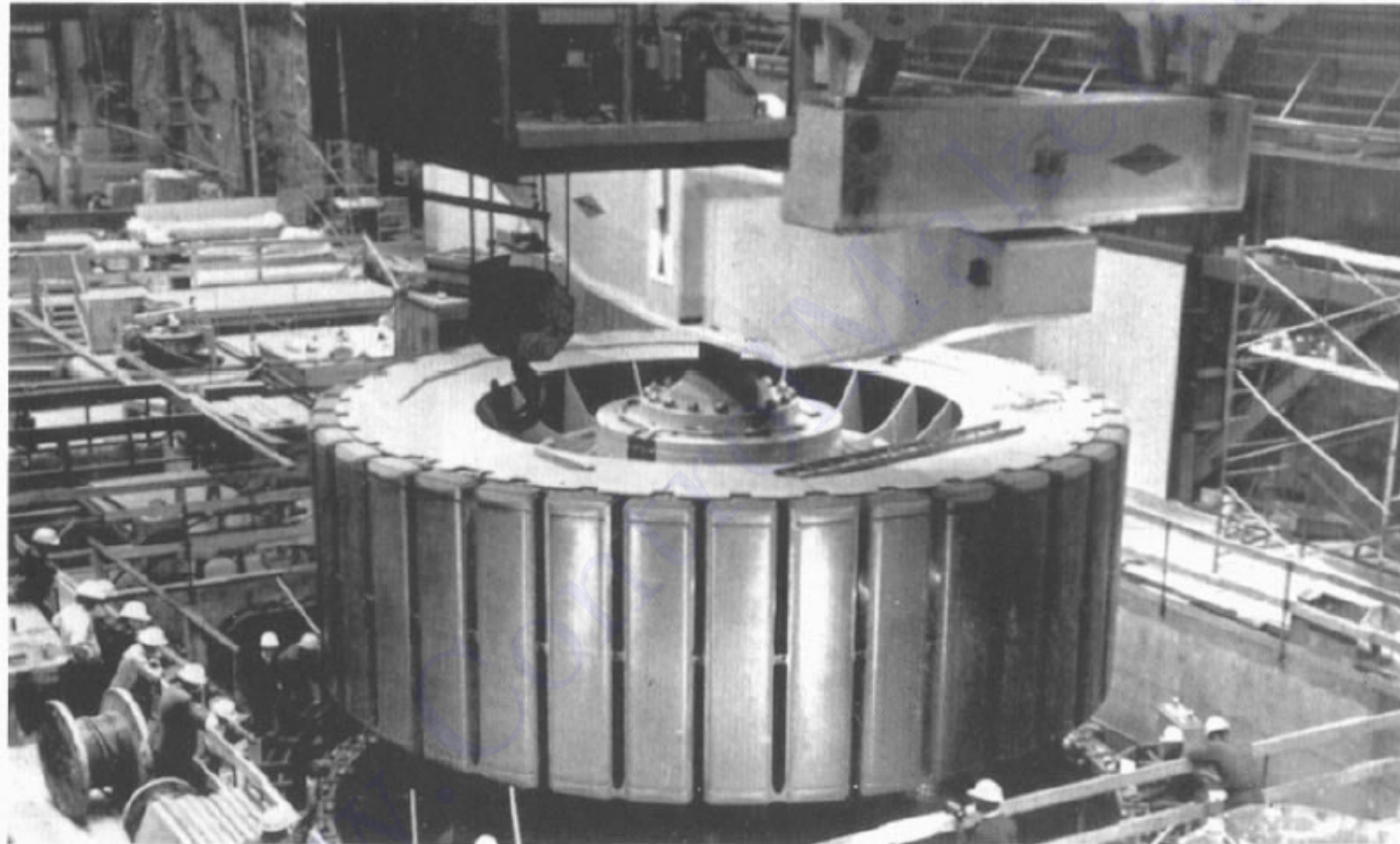


Figure 16.4

This 36-pole rotor is being lowered into the stator shown in Fig. 16.2. The 2400 A dc exciting current is supplied by a 330 V, electronic rectifier. Other details are: mass: 600 t; moment of inertia: $4140 \text{ t}\cdot\text{m}^2$; air gap: 33 mm.

(Courtesy of Marine Industrie)



Synchronous Generator: Rotor

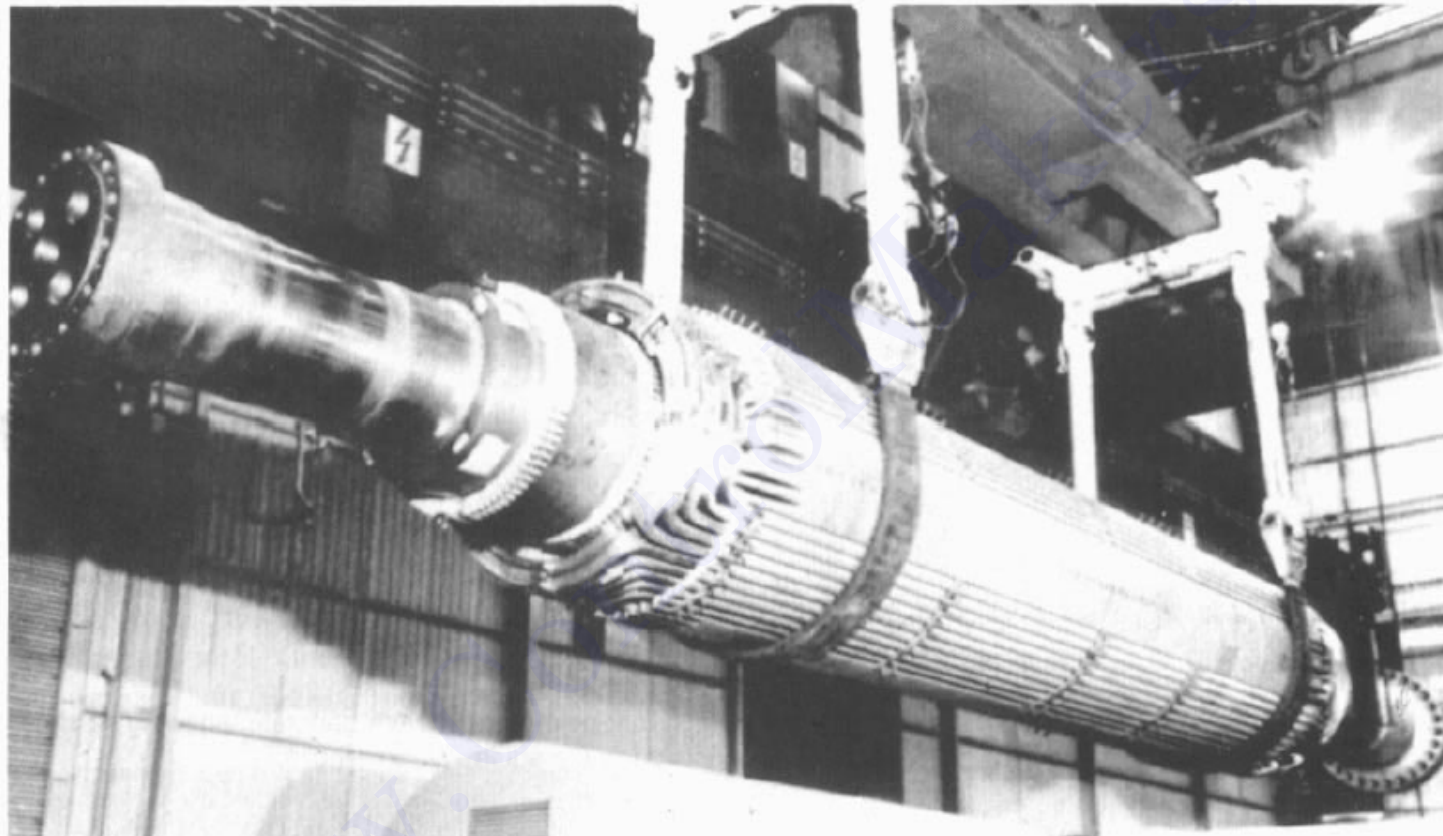


Figure 16.7b

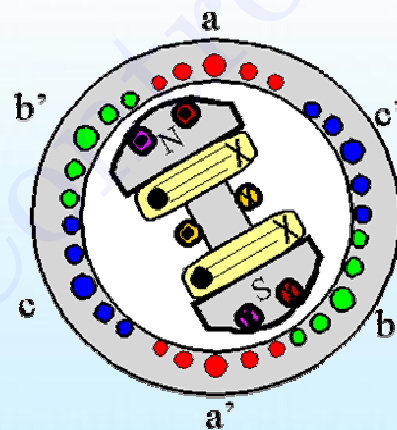
Rotor with its 4-pole dc winding. Total mass: 204 t; moment of inertia: $85 \text{ t}\cdot\text{m}^2$; air gap: 120 mm. The dc exciting current of 11.2 kA is supplied by a 600 V dc brushless exciter bolted to the end of the main shaft.

(Courtesy of Allis-Chalmers Power Systems Inc., West Allis, Wisconsin)



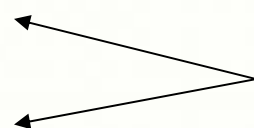
اصول کار ژنراتور و موتور سنکرون

اصول کار ژنراتور سنکرون





ژنراتور های سنکرون سه فاز
موتور های سنکرون سه فاز



ماشین های سنکرون سه فاز

امروزه ژنراتورهای سنکرون سه فاز به عنوان ستون فقرات شبکه های برق در جهان می باشند

ژنراتور های سنکرون :

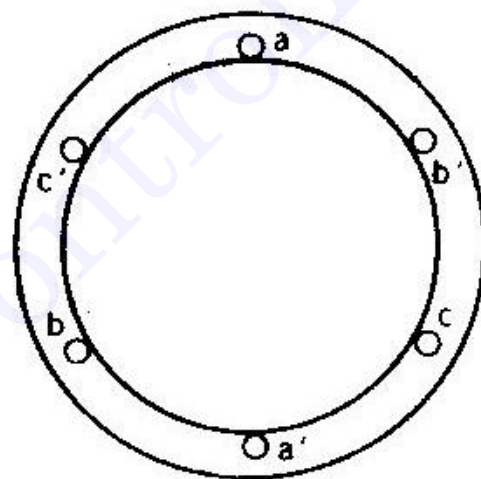
معمولا برای سرعت های ثابت (بااستفاده از کنترل دور برای سرعت های متفاوت)

موتور های سنکرون :



ساختمان این ماشینها متشکل از دو بخش است:

استاتور که شامل هسته و سیم بندی هاي سه فاز که درون شیارهاي استاتور جا سازي مي شود (همانند ماشین القايي)



استاتور
ماشینهای سنکرون سه فاز



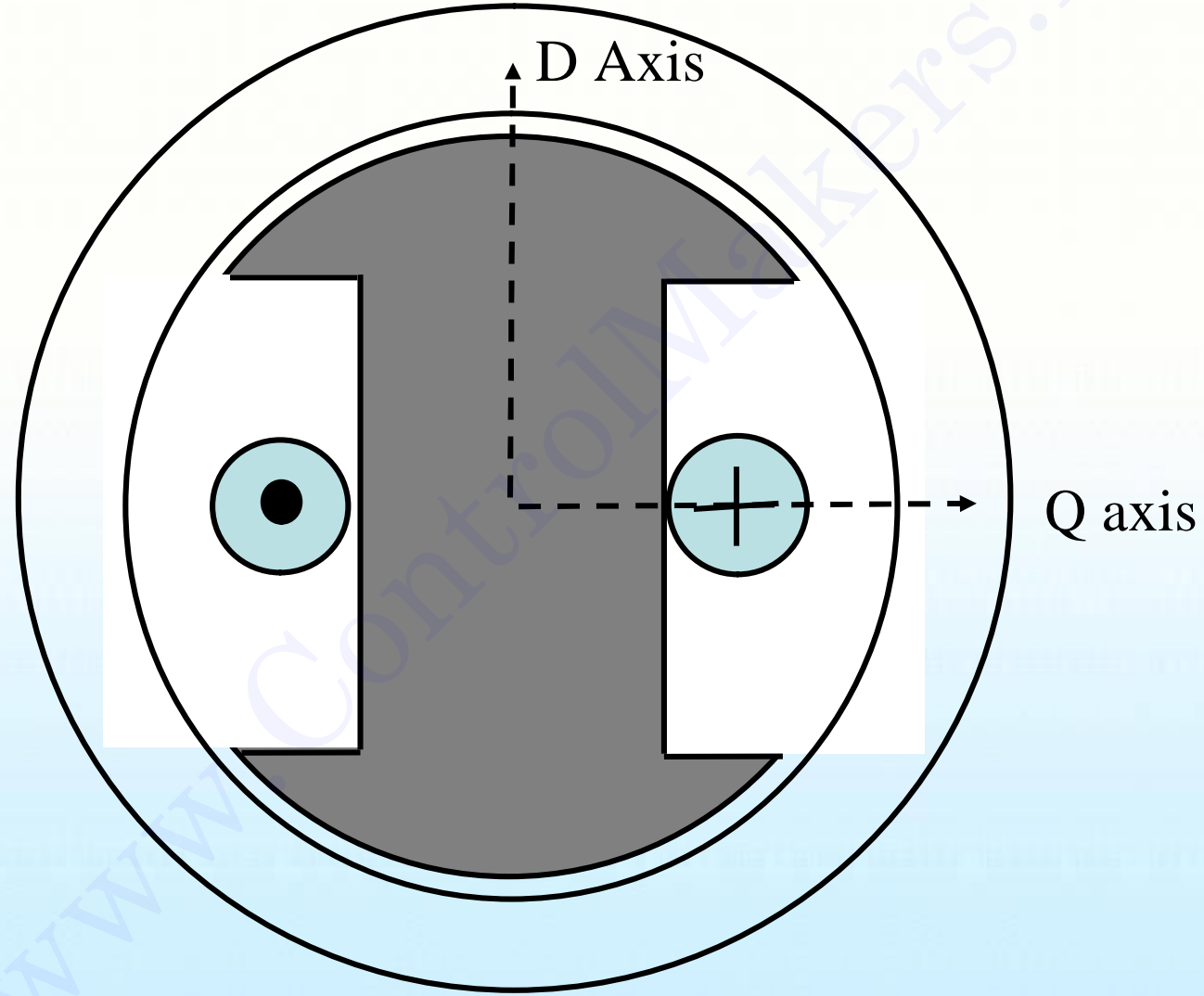
روتور که متشکل از هسته و سیم بندی است. این سیم پیچی از طریق حلقه های لغزان به یک منبع dc متصل است.

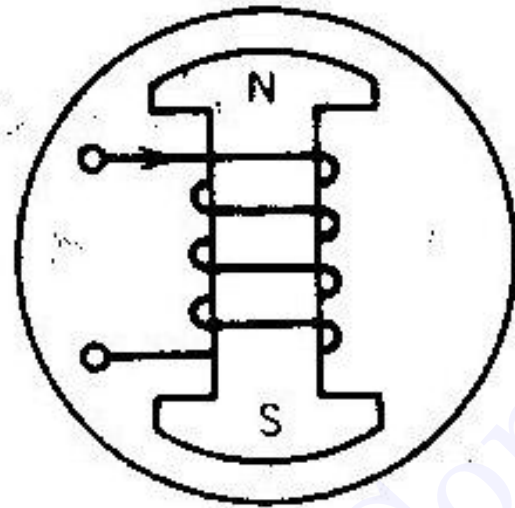
پس ماشین سنکرون برای کار کردن، همواره به یک منبع تغذیه dc نیاز دارد.

روتور ماشین سنکرون دو نوع است :

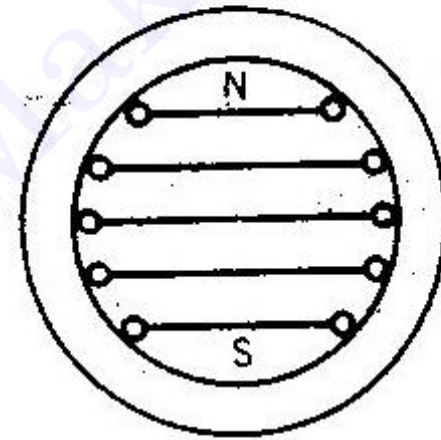
۱- سیلندری یا استوانه ای که روتور همانند استوانه ای است که سیم پیچی روی آن قران گرفته و فاصله هوایی یکنواخت دارد. معمولاً در کاربردهای سرعت بالا بکار میرود.

۲- قطب برجسته که فاصله هوایی غیر یکنواخت دارد و معمولاً در کاربردهای سرعت پایین بکار میرود.





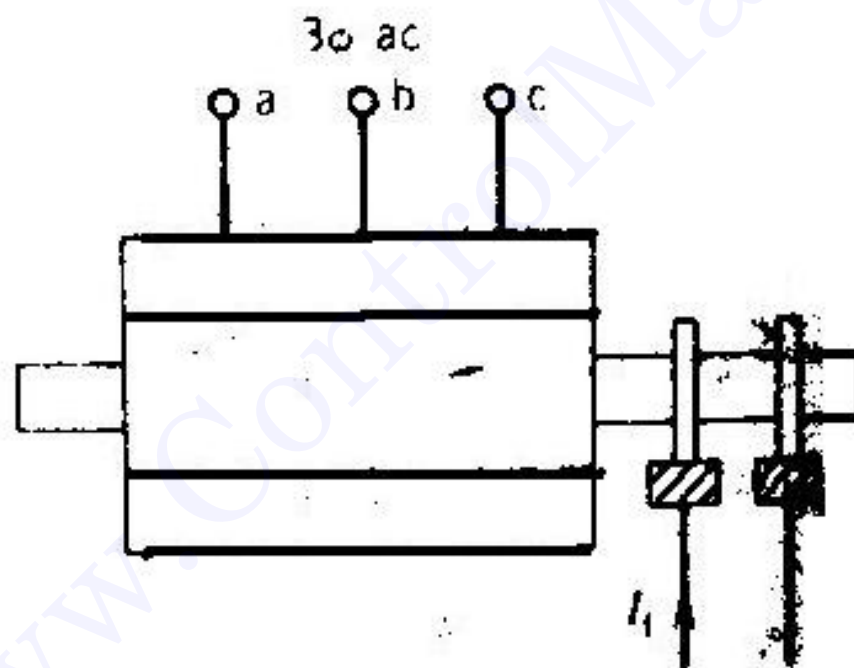
رتور قطب برجسته



رتور غیر برجسته
یا استوانه‌ای



از استاتور سه پایانه خارج می شود و تغذیه جریان DC از طریق حلقه های لغزان موجود بروی محور رتور ماشین انجام می گیرد





بنام خدا

مبحث دوم

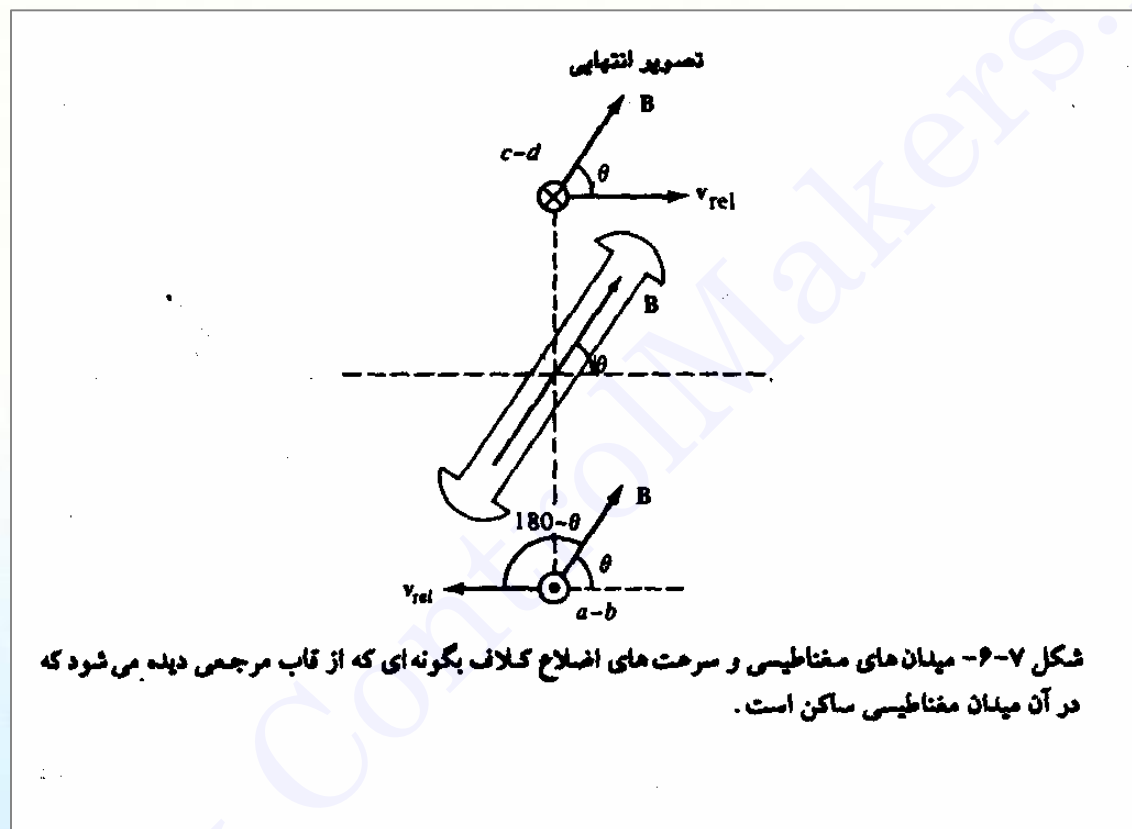
ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ



بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (تمام مباحث مربوط به ماشین قطب صاف است)



- فرض می کنیم
- ۱- توزیع میدان به شکل سینوسی
 - ۲- خطوط شار به صورت شعاعی از روتور به استاتور وارد می شود.

بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)



$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad \left\{ \begin{array}{l} e_{aa'} = vBl \sin \theta \\ e_{bb'} = vBl \sin(\pi - \theta) = vBl \sin \theta \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} e_{ind} = e_{aa'} + e_{bb'} = 2vBl \sin \theta \\ v = r\omega \\ \theta = \omega t \end{array} \right\} \Rightarrow e_{ind} = 2rwBl \sin q \xrightarrow[A \times B = \varphi]{2rl = A} e_{ind} = \varphi \omega \sin \omega t$$



بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)

در سیستم سه فازه و برای کلافهای N دوره خواهیم داشت

$$E_a = Nfw \sin q$$

$$E_b = Nfw \sin(q - 2\frac{p}{3})$$

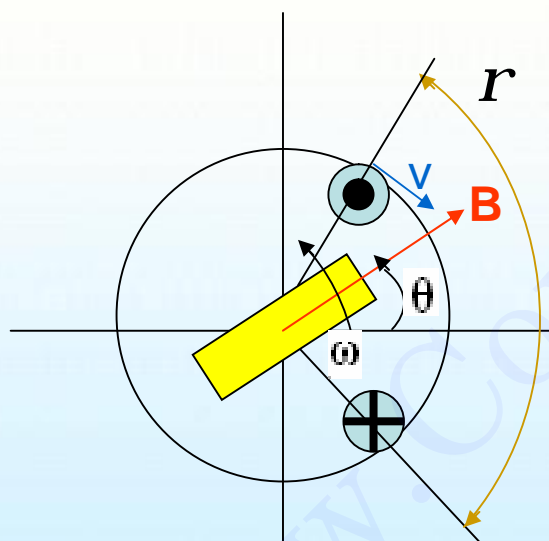
$$E_c = Nfw \sin(q + 2\frac{p}{3})$$

بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)

← هارمونیکهای مزاحم و راه های کاهش آنها

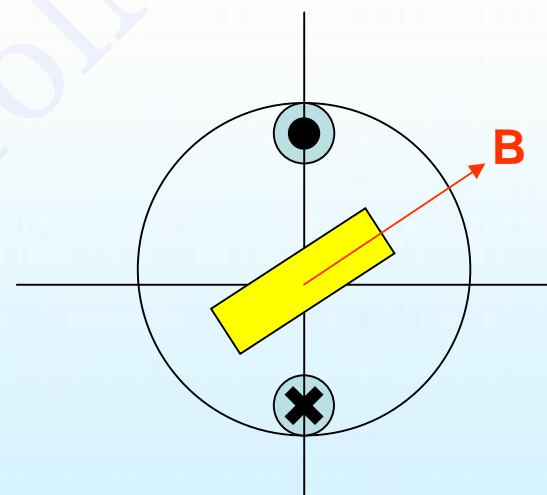
← سیم پیچ با گام کسری

گام کسری



$$e_{ind} = 2vBl \sin(\omega t) \times \sin(\rho/2)$$

گام کامل



$$e_{ind} = 2vBl \sin(\omega t)$$

بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / ماشینهای الکتریکی / ۳ دکتر واحدی / پاییز ۸۳

$$E_a = BVl \sin(\vec{B}, \vec{V}) \Rightarrow$$

$$\begin{cases} E_a = -BVl \sin\left(q - \frac{p}{2} + \frac{r}{2}\right) \\ E_{a'} = BVl \left(p - q - \frac{p}{2} + \frac{r}{2}\right) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} E_a = -BVl \left[\cos q \cos \frac{r}{2} - \sin q \sin \frac{r}{2} \right] \\ E_{a'} = BVl \left[\cos q \cos \frac{r}{2} + \sin q \sin \frac{r}{2} \right] \end{cases}$$



بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)

$$E_{rms} = K_P 4.44 N j f$$

$$K_P = \sin \frac{r}{2}$$

ضریب گام کوتاه

این ضریب برای مولفه اصلی است برای هارمونیهای

مراتب بالاتر مثلاً از مرتبه n :

$$K_P = \sin \frac{n r}{2}$$



بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)

مثال:

یک ژنراتور سنکرون دو قطب دارای استاتوری با نسبت گام سیم پیچی $\frac{5}{6}$ می باشد. ضریب گام برای هارمونیهای موجود در ماشین را بدست آورید.

$$\frac{5}{6} \Rightarrow r = \frac{5p}{6} = 150^\circ$$



بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)

ضریب گام را به ترتیب برای هارمونیهای ۱ و ۳ و ۵ و ۷ و ۹ بدست می آوریم .
توجه دارید که هارمونیهای مزاحم ماشین سنکرون هارمونیهای ۵ و ۷ هستند

$$K_{p1} = \sin \frac{150}{2} = 0.966$$

$$K_{p3} = \sin \frac{3 \times 150}{2} = -0.707$$

$$K_{p5} = \sin \frac{5 \times 150}{2} = 0.259$$

$$K_{p7} = \sin \frac{7 \times 150}{2} = -0.259$$

$$K_{p9} = \sin \frac{9 \times 150}{2} = -0.707$$



بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)

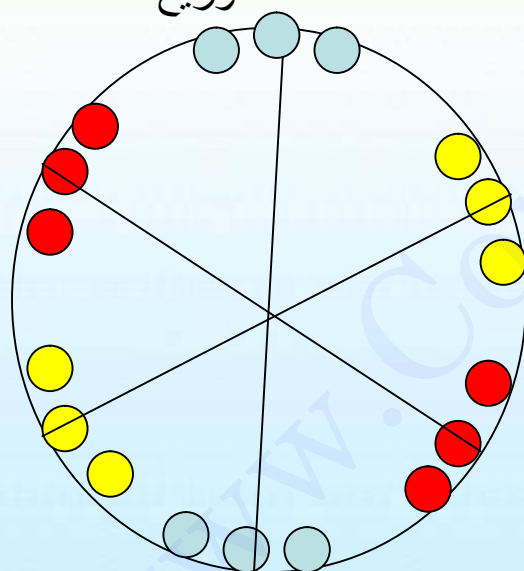
سیم پیچهای گسترده

یکی دیگر از روشهای متعادل کردن هارمونیکها استفاده از سیم پیچی گسترده است.

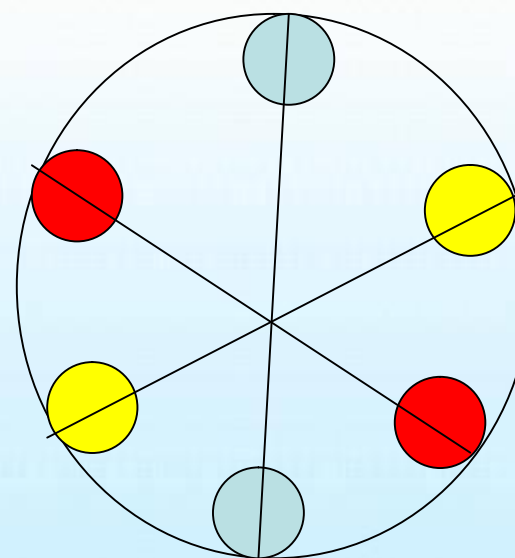
n تعداد شیار مربوط به هر فاز در هر قطب

γ گام شیار (در شکل زیر ۲۰ درجه)

توزیع شده

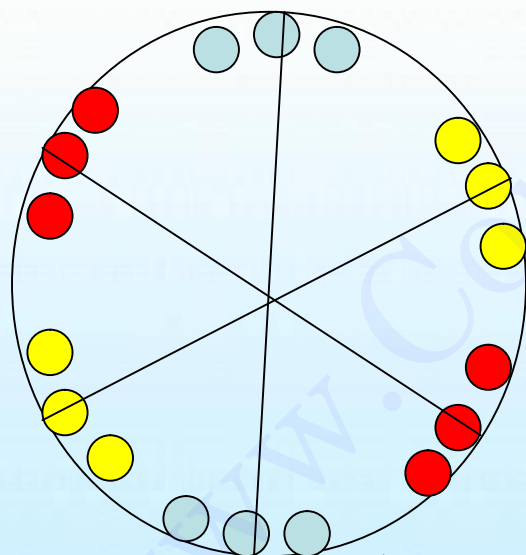
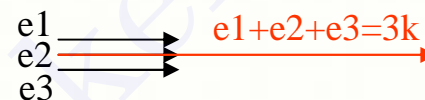
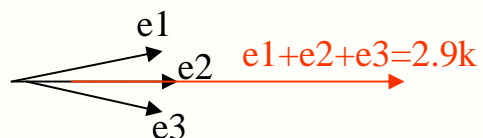


متمرکز

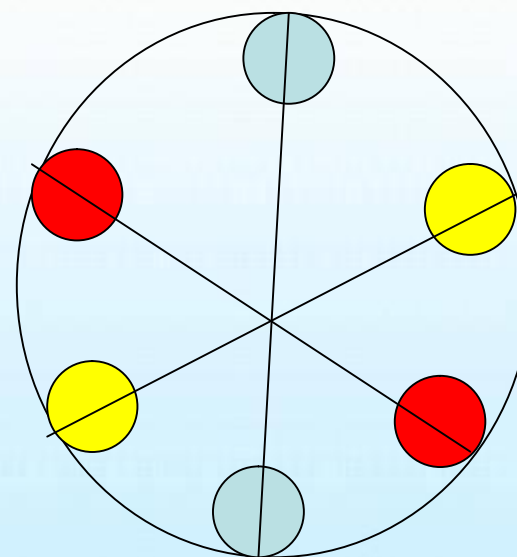




بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)



$$e_{ind} = 2vBl \sin(\omega t) \times \left(\frac{\sin(n\gamma/2)}{n \sin(\gamma/2)} \right)$$



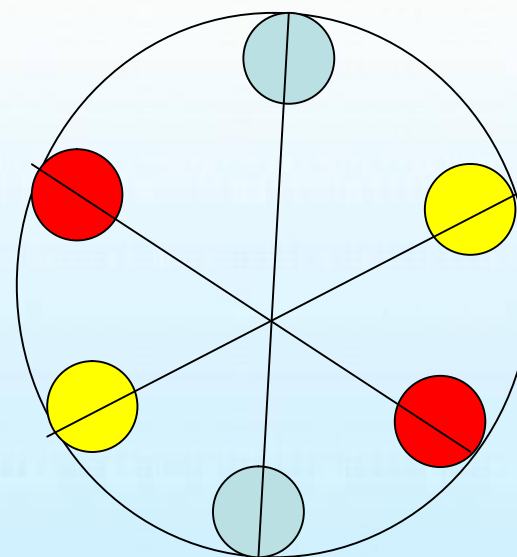
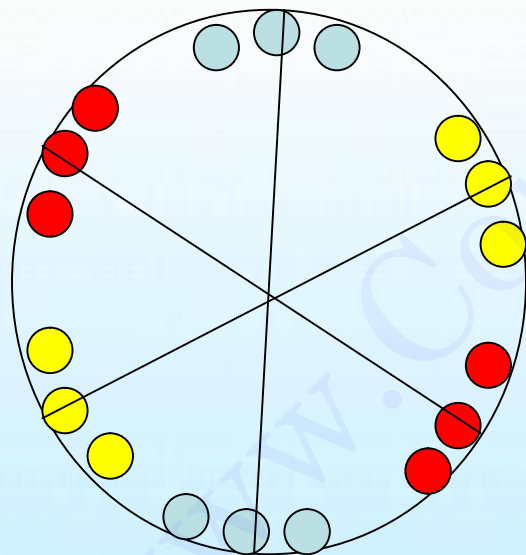
$$e_{ind} = 2vBl \sin(\omega t)$$



بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)

$$e_{\text{ind}} = 2vBl \sin(\omega t) \times K_d$$

$$K_d = \left(\frac{\sin(n\gamma/2)}{n \sin(\gamma/2)} \right) \Rightarrow K_d = \left(\frac{\sin(n\gamma n/2)}{n \sin(\gamma n/2)} \right)$$

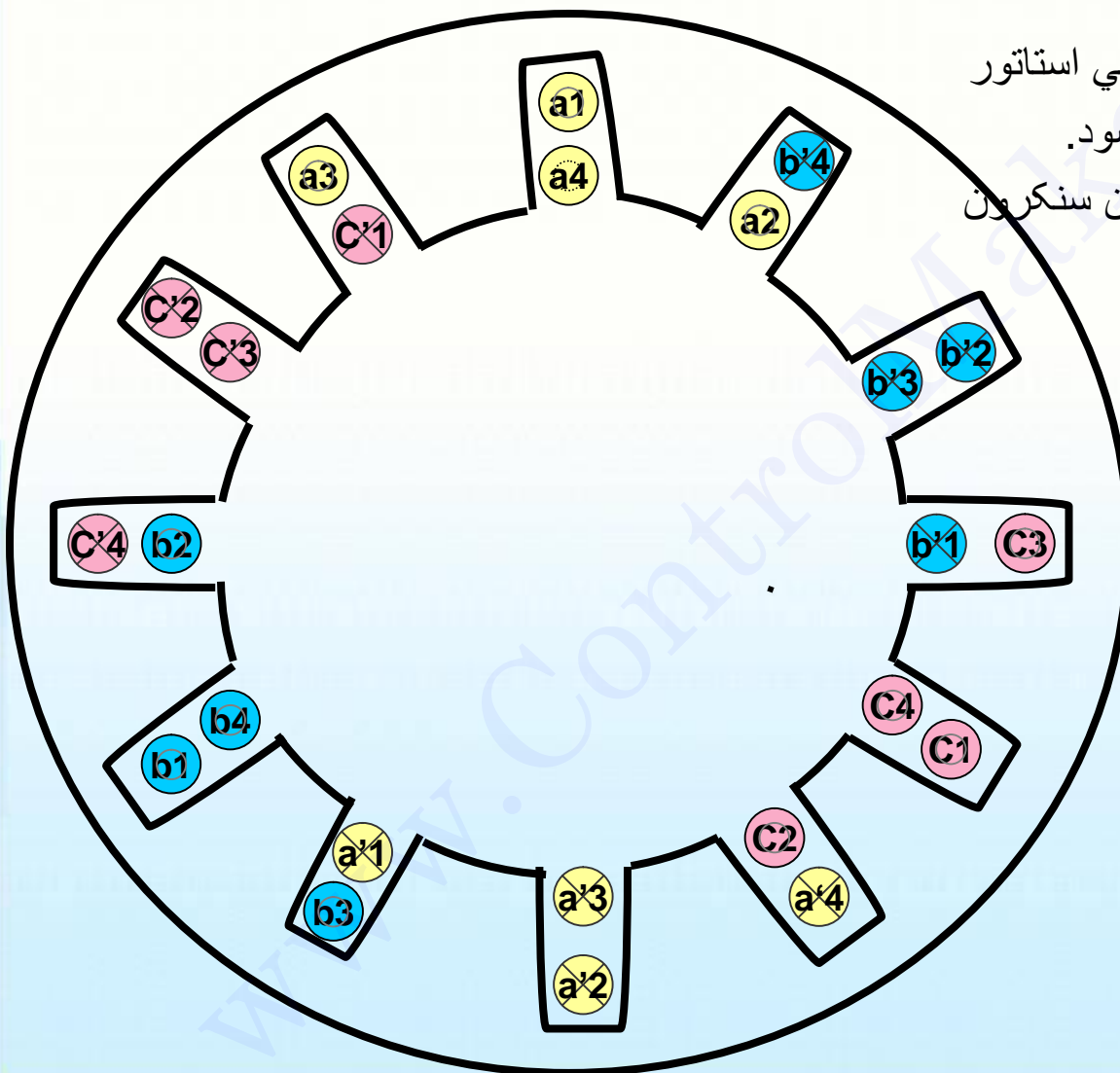




بررسی تئوریک پدیده القای ولتاژ در یک هادی (ادامه)

سیم پیچهای دو طبقه

برای استفاده بهینه از فضای داخلی استاتور
از شیارهای دو طبقه استفاده میشود.
در شکل مقابل استاتور یک ماشین سنکرون
با شیار دو طبقه دیده میشود





بنام خدا

مبحث سوم

ماشینهای الکتریکی III

مدار معادل ماشین سنکرون



مدار معادل ماشین سنکرون

برای پیش بینی رفتار ماشین سنکرون مدار به معادل آن نیاز داریم.
اثراتی که در مدار معادل باید در نظر گرفته شود، عبارتند از ::

۱- ولتاژ القایی بی باری

۲- اثر عکس العمل آرمیچر

۳- مقاومت آرمیچر

۴- اثر شارهای پراکنده

$$\left. \begin{aligned} E_{rms} &= K_W 4.44 N f j \\ K_W &= K_P K_d \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_{rms} = K j w$$



مدار معادل ماشین سنکرون

۱- ولتاژ القائی بی باری

ولتاژ اقای در استاتور را با یک منبع ولتاژ مدل میکنند.

۲- اثر عکس العمل آرمیچر

وقتی که روتور ژنراتور سنکرون می‌چرخد در سیم پیچهای استاتور آن ولتاژ EA القاء می‌شود. اگر باری به پایانه‌های ژنراتور متصل باشد، جریانی از آن می‌گذرد. اما این جریانهایی سه فاز در ماشین میدان مغناطیسی خودشان را تولید می‌کنند. این میدان مغناطیسی استاتور شکل میدان مغناطیسی اصلی روتور را تغییر داده و در نتیجه ولتاژ فاز را نیز تغییر می‌دهد. این اثر را عکس‌العمل آرمیچر می‌نامند و آنرا با یک المان سلفی مدل میکنند..



مدار معادل ماشین سنکرون

۳- مقاومت آرمیچر

مقاومت آرمیچر (افت اهمی حاصل از مقاومت سیم پیچی استاتور) سیم پیچهای استاتور دارای مقاومت اهمی هستند که باعث افت ولتاژ و افزایش تلفات میگردد که این اثر با المان اهمی در مدار در نظر گرفته میشود.

۴- اثر شارهای پراکنده

شار پراکندگی شاری است که فقط یکی از سیم پیچها را در بر میگیرد. مثلاً شار پراکندگی استاتور شاری است که فقط استاتور را حلقه می‌کند و روتور را در بر نمی‌گیرد. «عمولاً آنرا یا یک سلف که مبین افت ولتاژ است مدل میکنند.



مدار معادل ماشین سنکرون

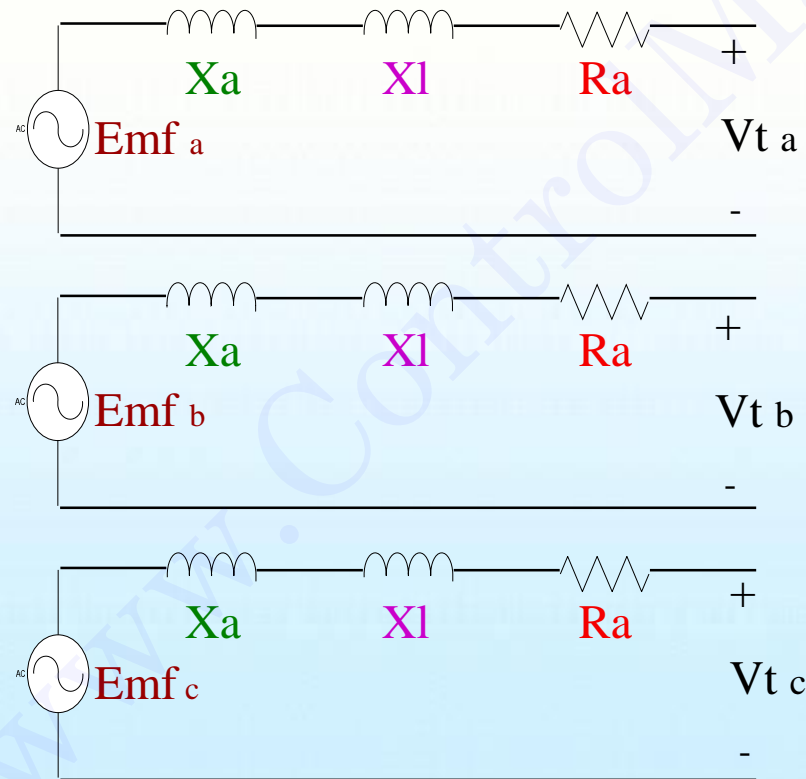
عواملی که در تعیین مدار معادل در نظر می گیریم :

۱- ولتاژ القائی بی باری

۲- اثر عکس العمل آرمیچر

۳- مقاومت آرمیچر

۴- اثر شارهای پراکنده





چگونگی محاسبه پارامترهای مدل ماشین سنکرون (آزمایشهای ماشین سنکرون)

این پارامترها عبارتند از :

۱- R_a مقاومت اهمی استاتور

۲- X_s راکتانس سنکرون (شامل راکتانس پراکندگی و راکتانس ناشی از عکس العمل آرمیچر)

← مقاومت اهمی استاتور با استفاده از یک اهم متر و با در نظر گرفتن اثر پوستی و حرارت

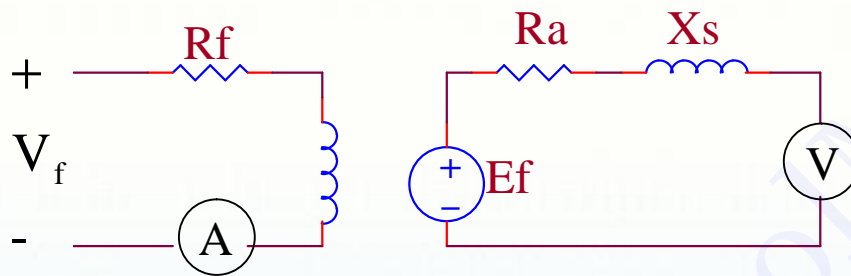
بدست می آید . (برای در نظر گرفتن اثر پوستی $R_{ac} = K R_{dc}$)

← راکتانس سنکرون با استفاده از آزمایشهای مدار باز و اتصال کوتاه محاسبه می شود .



چگونگی محاسبه پارامترهای مدل ماشین سنکرون (آزمایشهای ماشین سنکرون)

آزمایش مدار باز

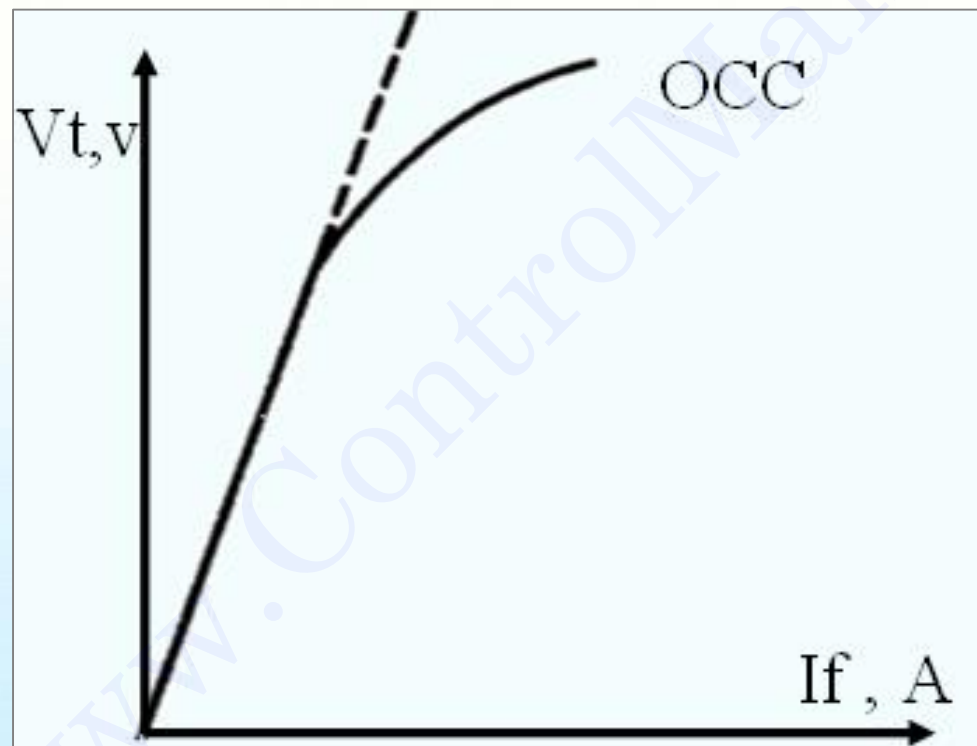


- رتور در سرعت نامی می گردد
- جریان تحریک ابتدای از صفر افزایش میابد.
- ولتاژ ترمینالها که باز هستند، اندازه گیری و ثبت میشوند.



چگونگی محاسبه پارامترهای مدل ماشین سنکرون (آزمایشهای ماشین سنکرون)

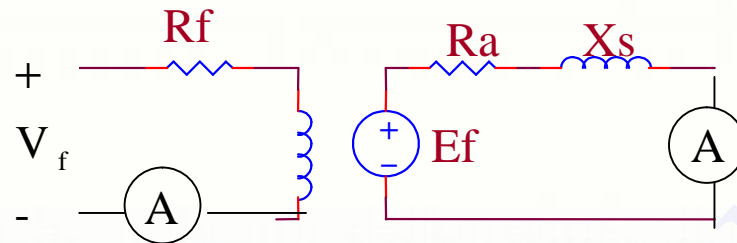
مشخصه مدار باز





چگونگی محاسبه پارامترهای مدل ماشین سنکرون (آزمایشهای ماشین سنکرون)

آزمایش اتصال کوتاه

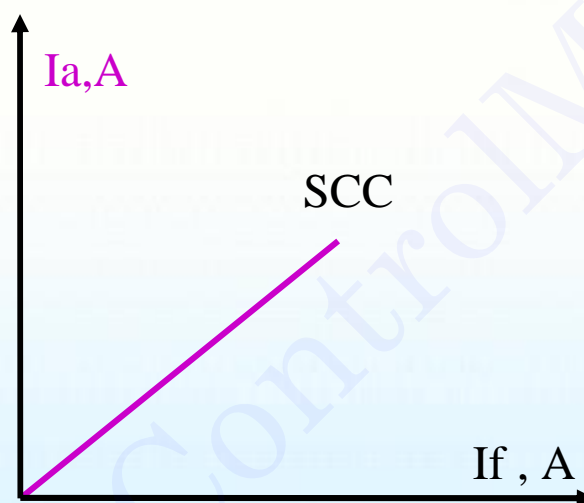


- رتور در سرعت نامی می گردد
- جریان تحریک ابتدای از صفر افزایش میابد.
- جریان ترمینال که اتصال کوتاه شده است، اندازه گیری و ثبت میشوند.



چگونگی محاسبه پارامترهای مدل ماشین سنکرون (آزمایشهای ماشین سنکرون)

مشخصه اتصال کوتاه



$$Z_s = V / I \quad \text{و} \quad Z_s = R_a + j (X_a + X_l)$$



بنام خدا

مبحث چهارم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

دیاگرام برداری ماشین سنکرون



دیاگرام برداری ماشین سنکرون (و بررسی اثر بارگذاری ماشین در کیفیت این بردارها)

میدانهای موجود در فضای داخلی ماشین :

۱) میدان ناشی از شار روتور

۲) میدان ناشی از شار استاتور (عکس العمل آرمیچر)

میدان استاتور خود به دو فاکتور وابسته است :

۱) دامنه جریان استاتور (آرمیچر)

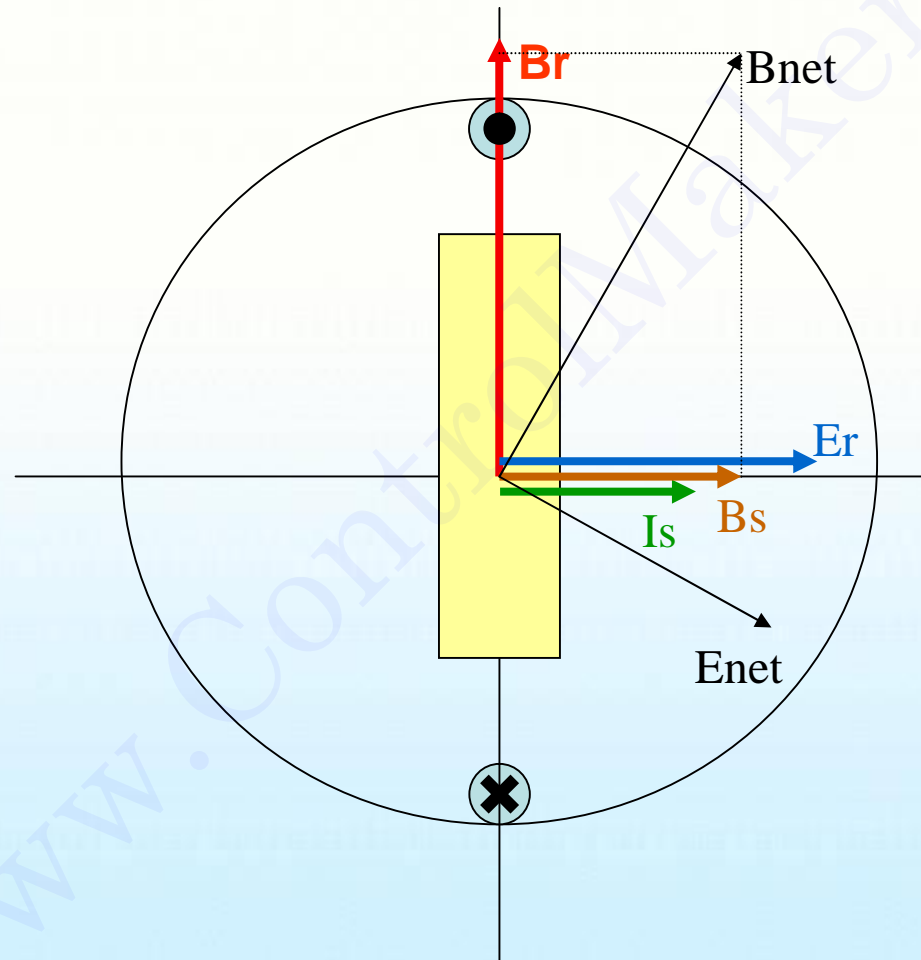
۲) زاویه بار ($\cos f$)

در شکلهای صفحات بعد این موضوع برای حالتیهای مختلف نشان داده شده است



دیاگرام برداری ماشین سنکرون (و بررسی اثر بارگذاری ماشین در کیفیت این بردارها)

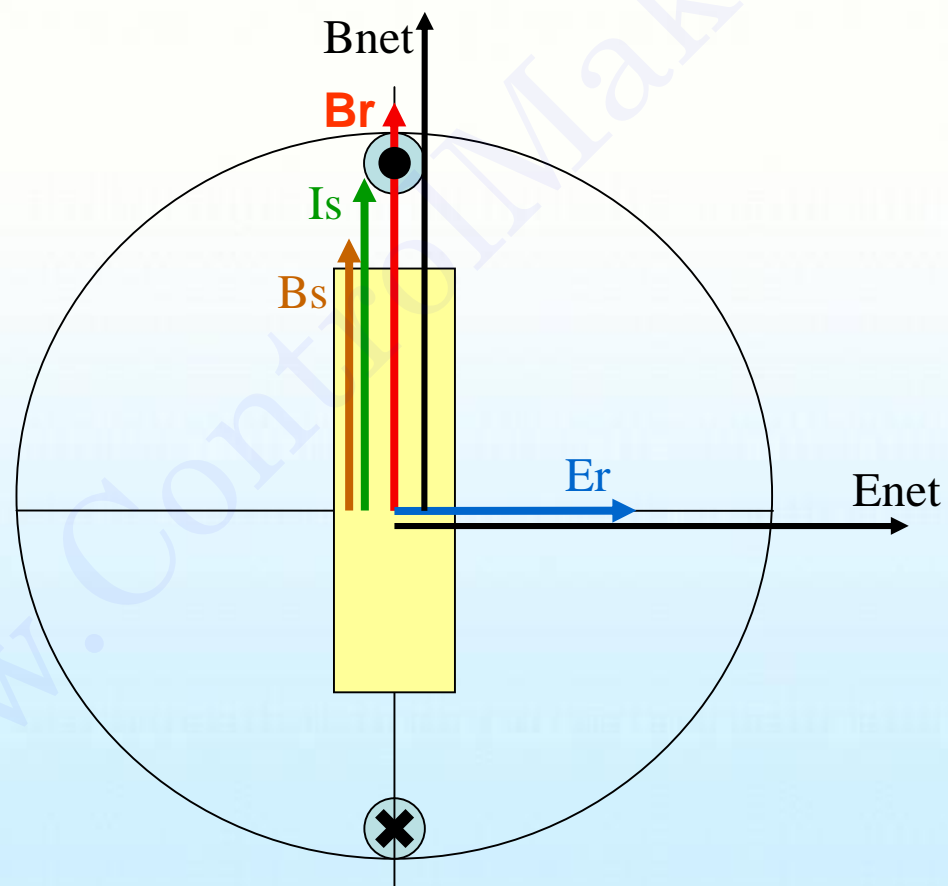
اثر دگرگون کنندگی عکس العمل آرمیچر در حالتی که ضریب قدرت بار یک است





دیاگرام برداری ماشین سنکرون (و بررسی اثر بارگذاری ماشین در کیفیت این بردارها)

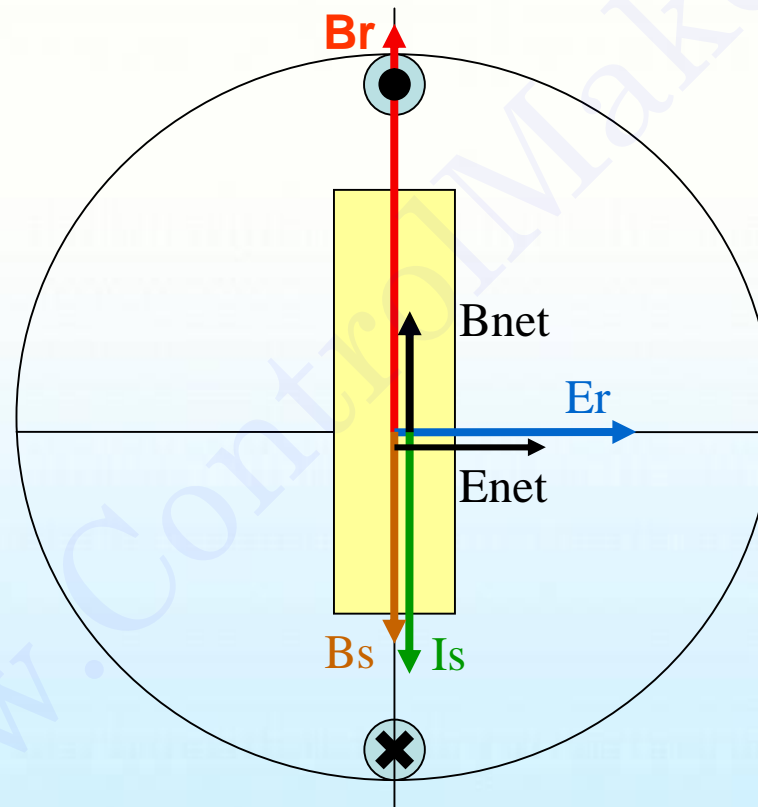
اثر تقویت کنندگی عکس العمل آرمیچر در حالتی که ضریب قدرت بار **صفر پیش فاز** است





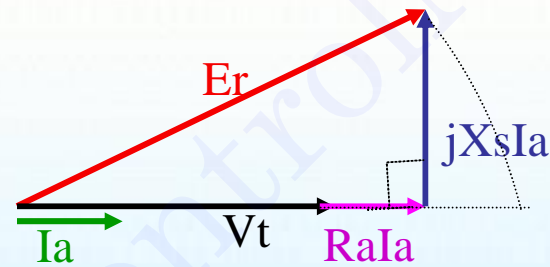
دیاگرام برداری ماشین سنکرون (و بررسی اثر بارگذاری ماشین در کیفیت این بردارها)

اثر تضعیف کنندگی عکس العمل آرمیچر در حالتی که ضریب قدرت بار **صفر پس فاز** است





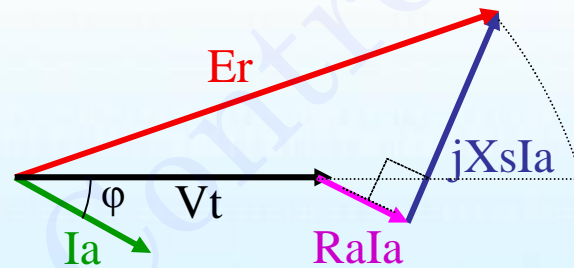
نمودار برداری ولتاژ و جریان (برای ژنراتور قطب صاف و تحت بار همافاز)



$$\cos(\varphi) = 1$$

نمودار برداری ولتاژ و جریان (برای ژنراتور قطب صاف و تحت بار پسفاز)

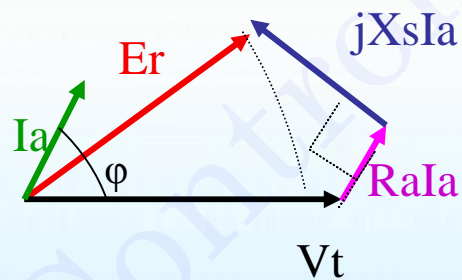
$$\cos(\varphi) = 0 \quad \text{lag}$$





نمودار برداری ولتاژ و جریان (برای ژنراتور قطب صاف و تحت بار پیشفاز)

$$\cos(\varphi) = 0 \quad \text{lead}$$





بنام خدا

مبحث پنجم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

رگولاسیون ولتاژ

رگولاسیون ولتاژ

در قسمت قبل دیدیم که بسته به اینکه جریان بار پیشفاز یا پسفاز باشد ولتاژ ترمینال ژنراتور می تواند کوچکتر ، مساوی یا بزرگتر از ولتاژ القائی باشد . رگولاسیون یا تنظیم ولتاژ، شاخصی برای سنجش تغییرات ولتاژ ترمینال از بی باری تا بار کامل میباشد که رابطه آن به شکل زیر است :

$$R\% = \frac{E_0 - V_{FL}}{V_{FL}}$$

توجه شود که در رابطه فوق اندازه ولتاژ در نظر گرفته میشود.

رگولاسیون ولتاژ



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / ماشینهای الکتریکی / ۳ / دکتر واحدی / پاییز ۸۳

روش مستقیم (برای ماشینهای کوچک)

روش امپدانس سنکرون

روش آمپر دور

روش پوتیه



روشهای غیر مستقیم

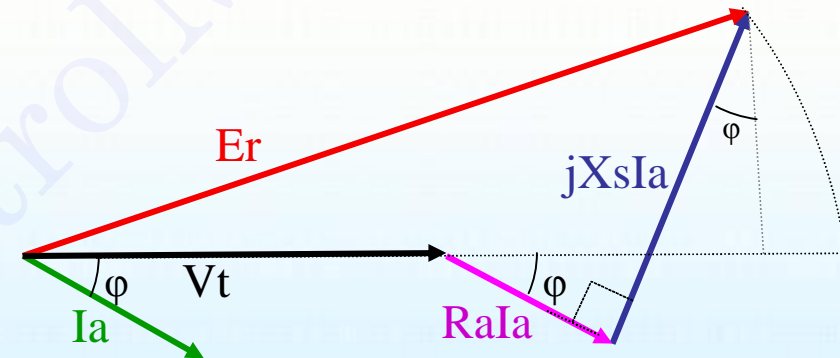
روشهای محاسبه

رگولاسیون ولتاژ

روش امپدانس سنکرون

با داشتن مقادیر راکتانس سنکرون و مقاومت اهمی میتوان مقدار رگولاسیون را برای بارهای مختلف محاسبه کرد بعنوان مثال برای یک بار پس فاز ::

$$R\% = \frac{E_0 - V_{FL}}{V_{FL}}$$

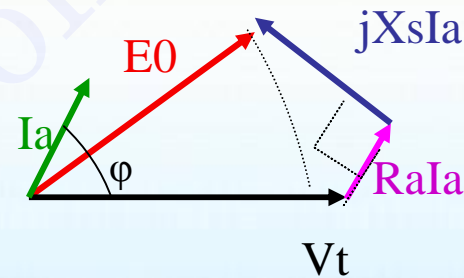


$$E_0 = \sqrt{(V + RI_a \cos \phi + X_s I_a \sin \phi)^2 + (-RI_a \sin \phi + X_s I_a \cos \phi)^2}$$

روش امپدانس سنکرون

برای یک بار پیشفاز داریم :

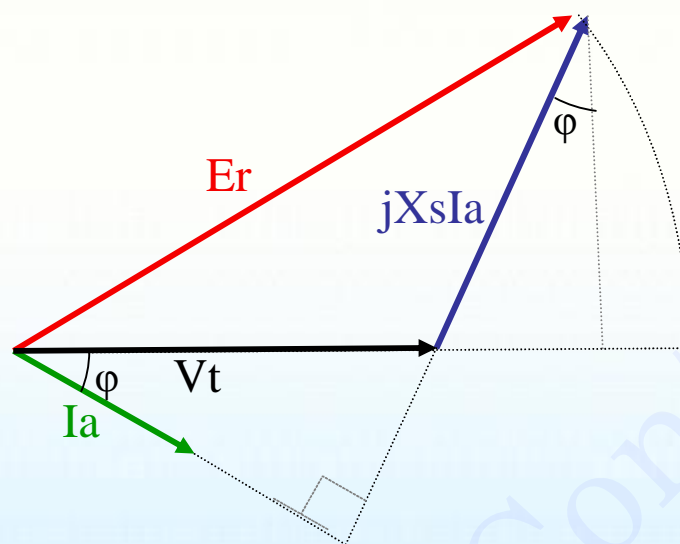
$$R\% = \frac{E_0 - V_{FL}}{V_{FL}}$$



$$E_o = \sqrt{(V + R I_a \cos \phi - X_s I_a \sin \phi)^2 + (R I_a \sin \phi + X_s I_a \cos \phi)^2}$$

روش امیدانس سنکرون

معمولا در محاسبه رگولاسیون ، از مقاومت اهمی بدلیل کوچکی آن ، صرفنظر می شود



$$E_o = \sqrt{(V + X_s I_a \sin \phi)^2 + (X_s I_a \cos \phi)^2}$$



روش آمپر دور

در روش امپدانس سنکرون ماهیت عکس العمل آرمیچر و شار پراکندگی بصورت افت ولتاژ در نظر گرفته میشود.

در روش آمپر دور ماهیت عکس العمل آرمیچر و شار پراکندگی بصورت میدانی در نظر گرفته میشود.

فرض کنیم ماشین در بار کامل بوده و ولتاژ نامی را به ما می دهد . جریان تحریک در این حالت I_f شامل مولفه های زیر است . (مولفه ای که I_{fE} را تولید می کند و مولفه ای که اثر عکس العمل آرمیچر را خنثی می کند یا I_{fXs})



روش آمپر دور

روش بدست آوردن هر یک از این مولفه ها بصورت زیر است:

← از منحنی مدار باز جریان تحریکی را بدست می آوریم که ولتاژ بی باری ناشی از آن با ولتاژ نامی برابر باشد. این جریان همان I_{fE} است.

← از منحنی اتصال کوتاه جریان تحریکی را بدست می آوریم که جریان اتصال کوتاه ناشی از آن برابر جریان نامی باشد. این جریان همان I_{fXs} است.

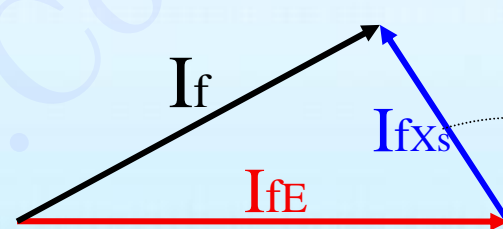
این دو جریان را با توجه به نوع بارت ترکیب کرده ، I_f و با استفاده از منحنی بی باری، E_o را بدست می آوریم .



روش آمپردور

در نهایت با استفاده از این رابطه رگولاسیون محاسبه می شود .

$$R\% = \frac{E_0 - V_{FL}}{V_{FL}}$$





تمرین

نتایج زیر از آزمایش بر روی یک ژنراتور ۶۶۰۰ ولت بدست آمده است .

If(A): 16 25 37.5 50 70

E(V): 3100 4900 6600 7500 8300

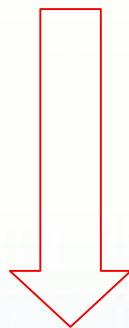
یک جریان تحریک ۲۰ آمپری جهت به گردش در آوردن جریان بار کامل در اتصال کوتاه مورد نیاز می باشد . از طریق روش آمپر دور و روش امپدانس سنکرون رگولاسیون بار کامل را در ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز حساب کنید . از مقاومت سیم پیچی آرمیچر صرفنظر کنید .



تمرین

پاسخ :

روش آمپر دور



$$If = If1 + If2$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{تولید کننده ولتاژ} \\ \text{نامی در بار کامل} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{تولید کننده ولتاژ} \\ \text{نامی در بی باری} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{جریان غلبه کننده بر} \\ \text{عکس العمل آرمیچر} \end{array} \right)$$

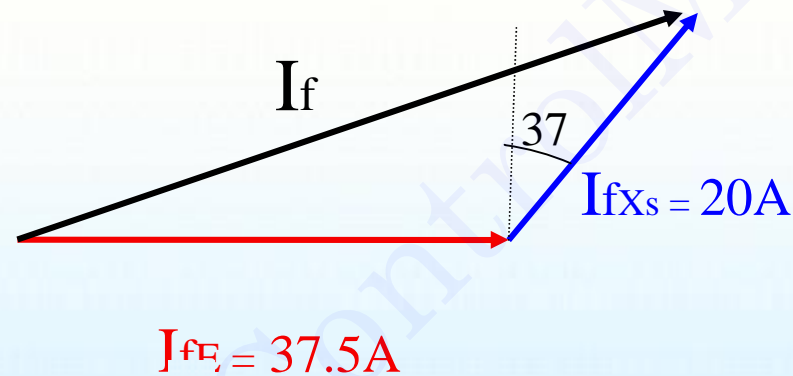
از جدول :

$$If1=37.5$$

$$If2=20$$

ادامه پاسخ تمرین

با ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز، زاویه قدرت -۳۷- می باشد در نتیجه :



$$I_{fT} = \sqrt{(37.5 + 20 \times 0.6)^2 + (20 + 0.8)^2} = 52$$

ادامه پاسخ تمرین

از روی منحنی بی باری برای $I_f = 56 \text{ A}$ ولتاژ بی باری برابر 7600 بدست می آید:

$$I_{fT} \xrightarrow{O.C.C} E$$

$$52 \xrightarrow{O.C.C} 7600$$

$$R\% = \frac{7600 - 6600}{6600} \times 100 = 15\%$$

پاسخ تمرین بروش امیدانس سنکرون :



$$x_s = \left. \frac{E_{oc}}{I_{sc}} \right|_{I_f = cte}$$

. مقدار جریان اتصال کوتاه بازای جریان تحریک بی باری را حساب میکنیم:

$$I_f \rightarrow I_{sc}$$

$$20 \rightarrow 1$$

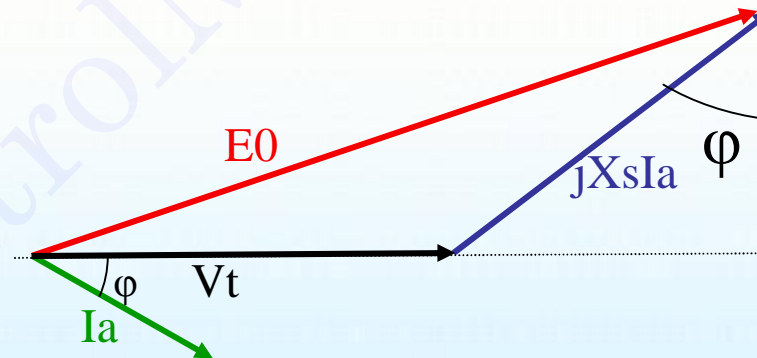
$$37.5 \rightarrow ? \Rightarrow 1.88$$



پاسخ تمرین بروش امپدانس سنکرون :

. مقدار امپدانس سنکرون را حساب میکنیم:

$$x_s = \frac{E_{oc}}{I_{sc}} \bigg|_{I_f=37.5} = \frac{1}{1.88} = 0.53$$



$$E_o = \sqrt{(V + X_s I_a \sin j)^2 + (X_s I_a \cos j)^2} = 1.387$$



پاسخ تمرین بروش امپدانس سنکرون :

. مقدار تنظیم ولتاژ را حساب میکنیم:

$$R\% = \frac{E_0 - V_{FL}}{V_{FL}} = \frac{1.387 - 1}{1} = 38.7\%$$



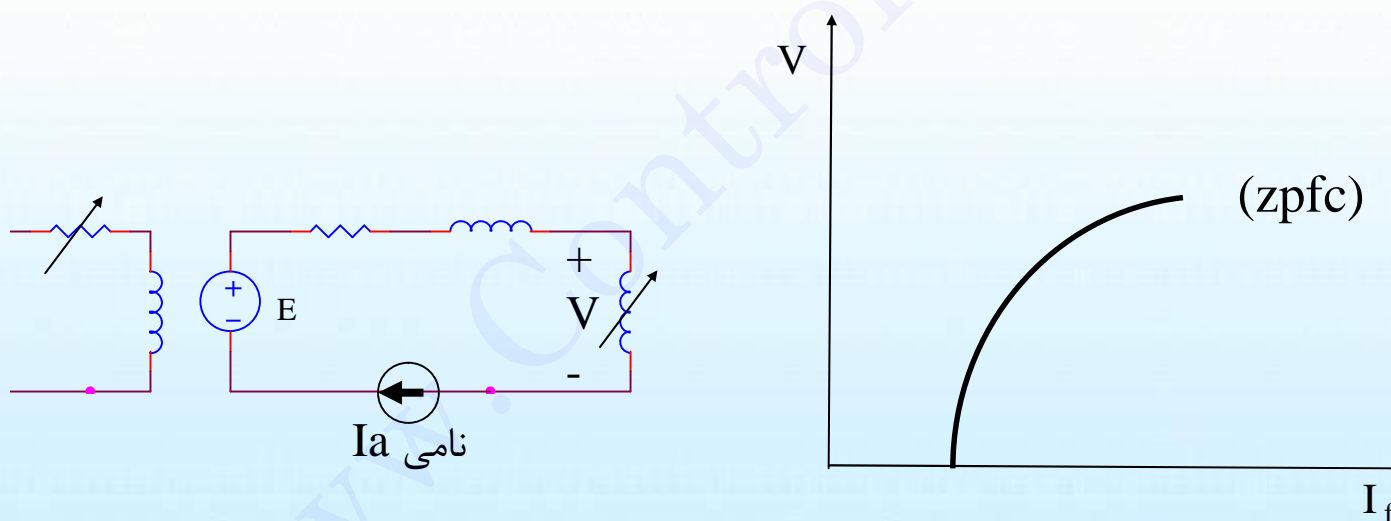
روش پوتیه

ملزومات این روش

← منحنی مشخصه بی باری (occ)

← منحنی مشخصه ضریب قدرت صفر (zpfc)

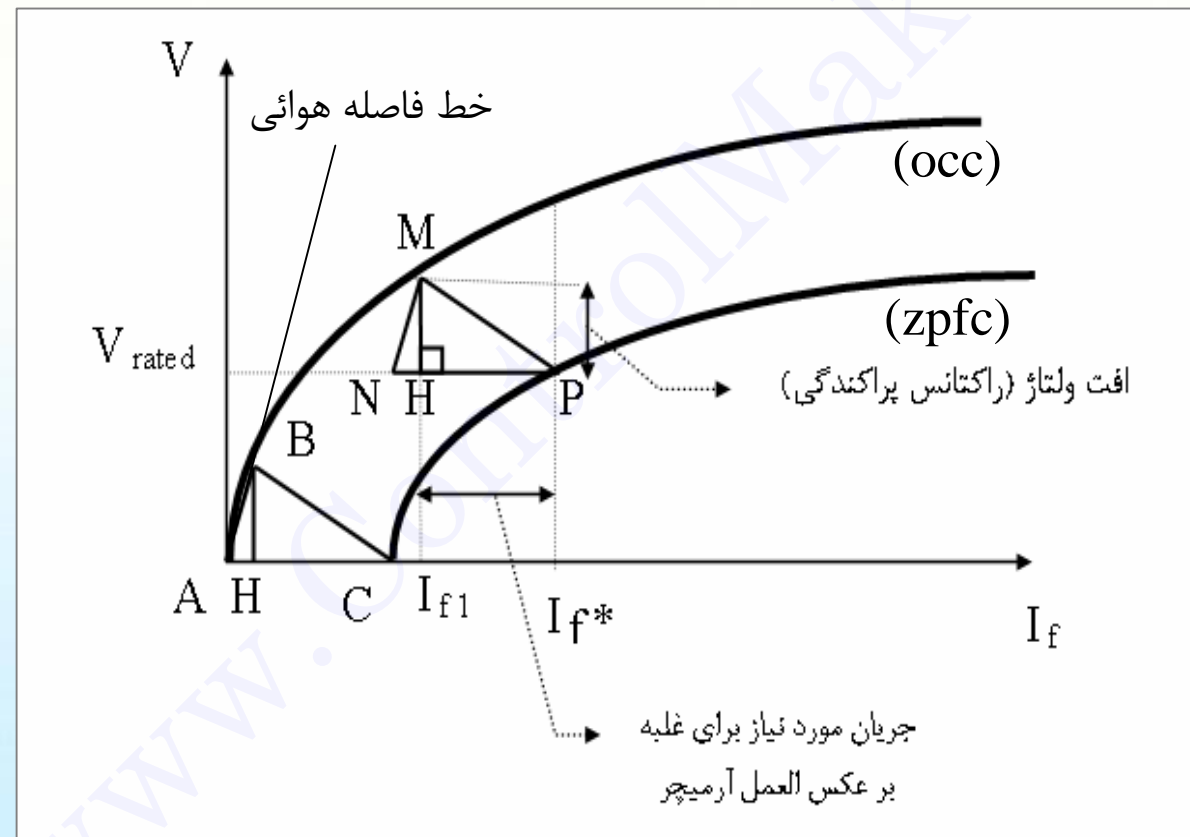
روش بدست آوردن منحنی مشخصه ضریب قدرت صفر



در مقادیر مختلف راکتانس بار ، جریان تحریک را آنگونه تنظیم می کنیم که جریان نامی از آرمیچر اخذ شود .

روش پوتیه

روش رسم مثلث پوتیه





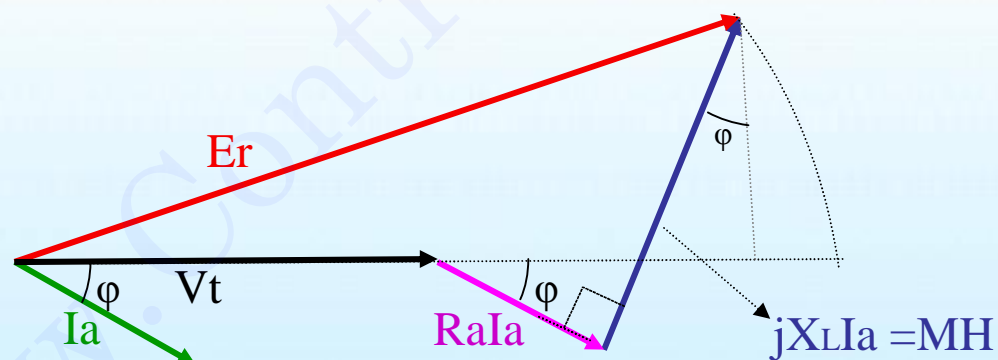
مراحل بدست آوردن رگولاسیون ولتاژ با استفاده از روش پوتیه

۱- رسم و بدست آوردن مثلث پوتیه

۲- تعیین میزان افت ولتاژ ناشی از راکتانس پراکندگی (MH)

۳- تعیین میزان جریان عکس العمل آرمیچر با استفاده از مثلث پوتیه

۴- محاسبه نیرو محرکه بیرونی (جمع برداری نیرو محرکه القایی و افت ولتاژ عکس العمل آرمیچر)



$$|E| = \sqrt{(V + R_a I_a \cos \phi + X_L I_a \sin \phi)^2 + (X_s I_a \cos \phi - R_a I_a \sin \phi)^2}$$

نیرو محرکه بیرونی



مراحل بدست آوردن رگولاسیون ولتاژ با استفاده از روش پوتیه (ادامه)

۵- تعیین جریان تحریک لازم برای ایجاد نیرو محرکه بیرونی ($I_f E$) با استفاده از (occ)

۶- جمع برداری جریان تحریک بدست آمده در ۵ با جریان تحریک بدست آمده در ۳

(این کار به همان صورتی که در روش آمپر دور انجام شد صورت می گیرد)

۷- تعیین نیرو محرکه داخلی از روی منحنی بی باری با استفاده از جریان تحریک بدست آمده در

۶

۸- محاسبه رگولاسیون با استفاده از رابطه زیر

$$R\% = \frac{|E| - |V_t|}{|V_t|} \cdot 100$$

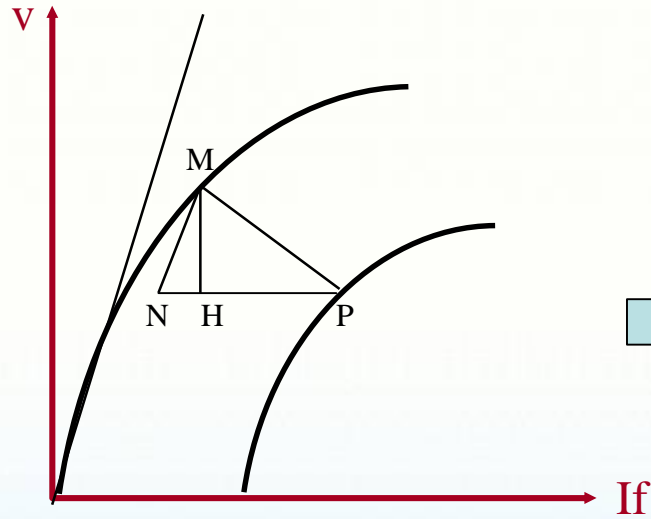
مثال

یک ژنراتور سنکرون سه فاز 11KV ، 1000KVA متصل شده به صورت ستاره دارای مقاومت 2^{Ω} در فاز می باشد مشخصه های بی باری و ضریب قدرت صفر این ژنراتور به شرح زیر است.

If(A) :	40	50	110	140	180
E(V):	5800	7000	12500	13750	15000
VZPFC(V):	0	1500	8500	10500	12500

تنظیم ولتاژ در جریان بار کامل تحت ضریب قدرت ۰.۸ پس فاز را از روش پوتیه بدست آورید .

پاسخ



$$NP = 40A$$

$$MH = X_1 I_a = 1000V$$

$$HP = 30A$$

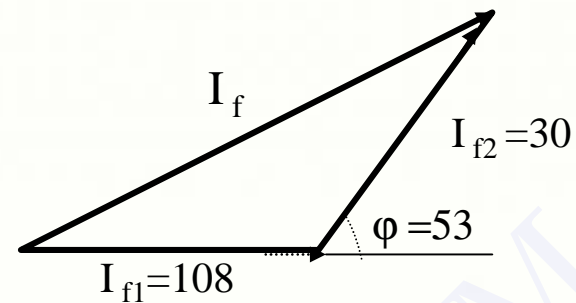
$$E = \sqrt{(V_t \cos \phi + R_s I_a)^2 + (V_t \sin \phi + X_1 I_a)^2}$$

$$= \sqrt{(6850 \cdot 0.8 + 2 \cdot 52.5)^2 + (6850 \cdot 0.6 + 1000)^2} = 7080$$

$$E = 7080$$

$$I_{f1} = 108 A$$

پاسخ



$$I_f = 128.3A \quad E = 7700V$$

$$\text{Reg}\% = \frac{7700 - 6350}{6350} \cdot 100 = 21\%$$



بنام خدا

مبحث ششم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

سیستمهای تحریک



انواع سیستمهای تحریک

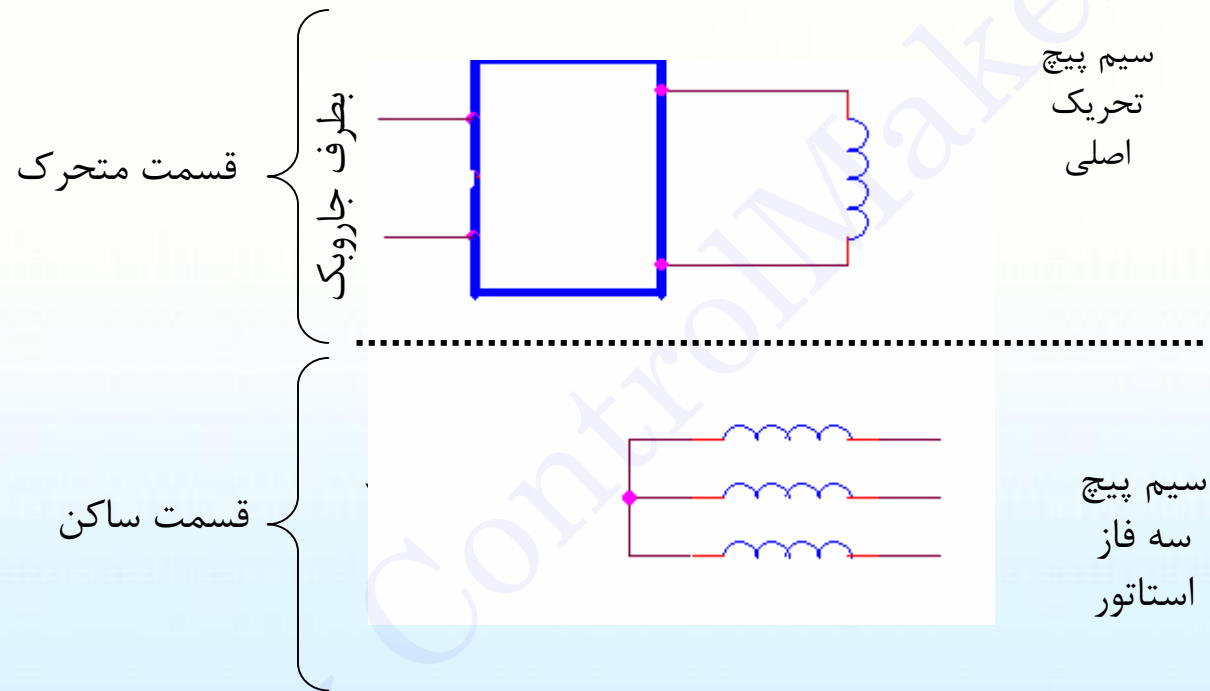
✱ سیستمهای دینامیک

✱ سیستمهای استاتیک

✱ سیستمهای پابلوت اکسایتر

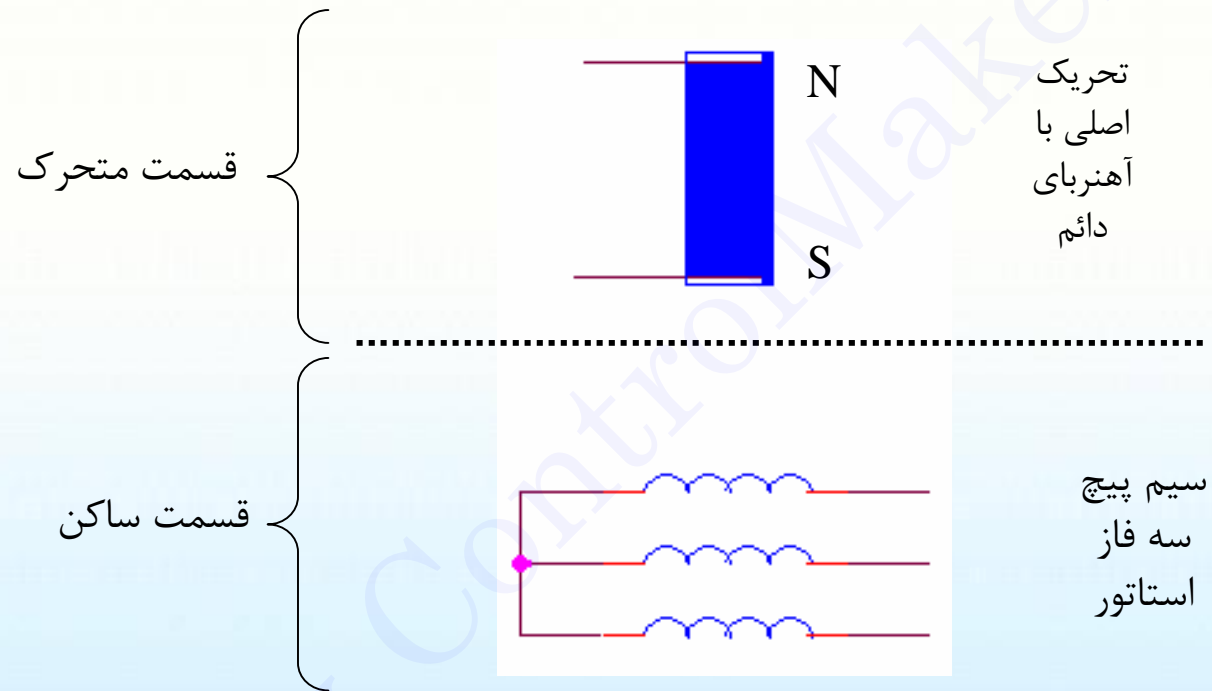


Dynamic EXC



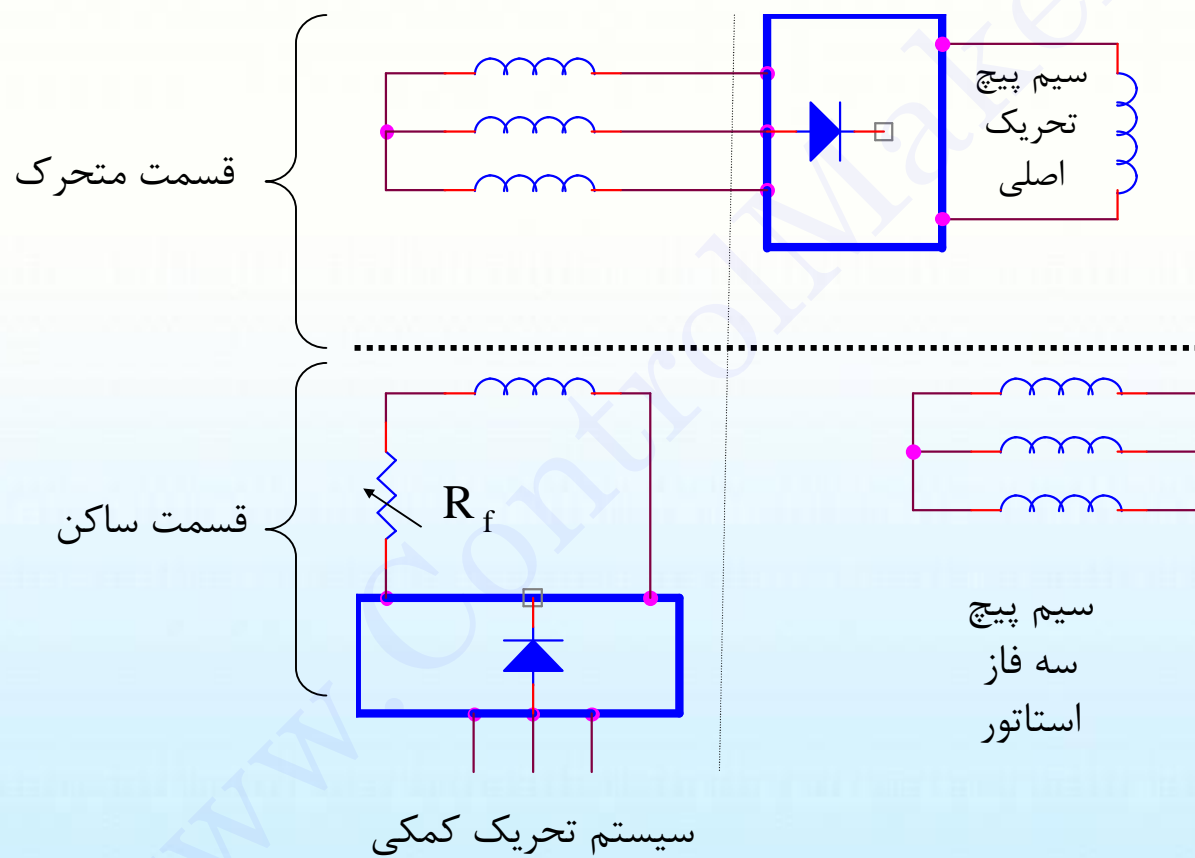


تحریک با آهنربای دائم



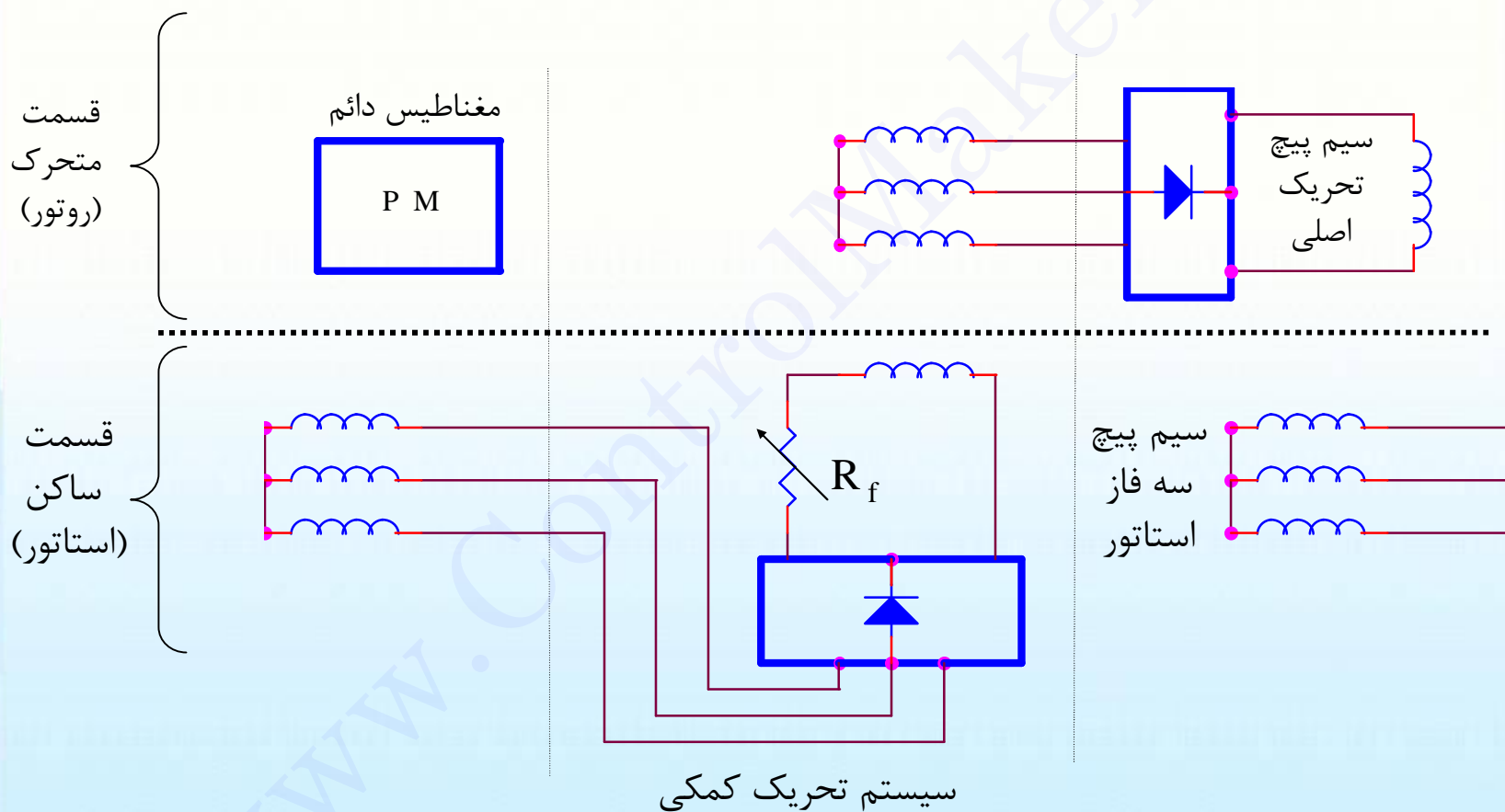


Brushless EXC





Pilot EXCITER





بنام خدا

مبحث هفتم

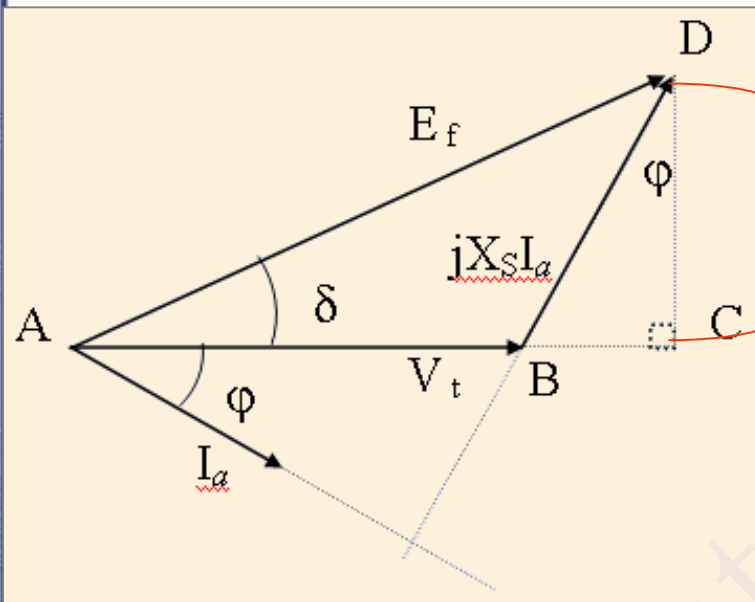
ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

توان در ژنراتور سنکرون

توان در ژنراتور سنکرون

فرض کنیم $R_a = 0$



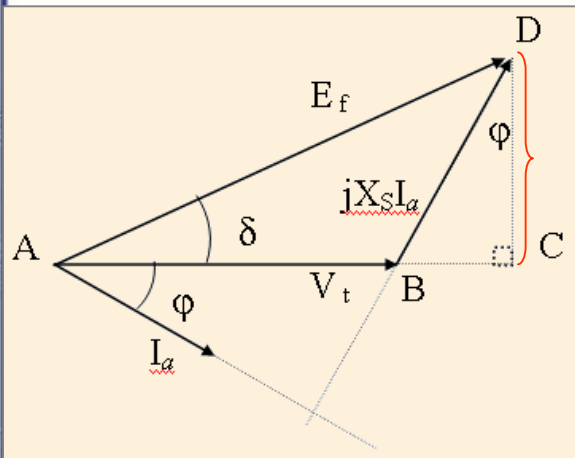
توان اکتیو متناسب با این طول است

$$P = 3V_{Ph} I_{Ph} \cos j$$

$$\bar{E} = \bar{V}_t + \bar{I}_a (R_s + jX_s)$$

$$\Delta ADC, \Delta BDC \Rightarrow X_s I_a \cos j = E \sin d \Rightarrow I_a \cos j = \frac{E \sin d}{X_s}$$

توان در ژنراتور سنکرون

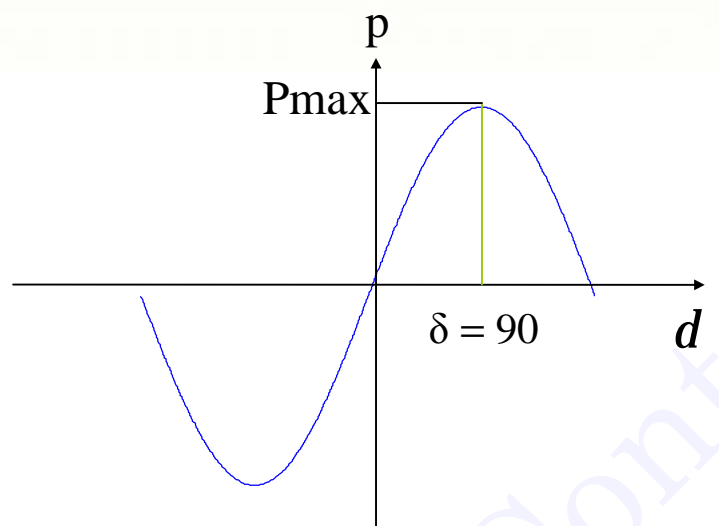


$$P = 3V_t I_a \cos \theta = 3V_t \frac{E \sin d}{X_s} \Rightarrow P = \frac{3V_t E}{X_s} \sin d$$

$$\sin d = 1 \Rightarrow P_{\max} = \frac{3V_t E}{X_s}$$

توان در ژنراتور سنکرون

نقطه $\delta = \pi/2$ حد پایداری استاتیکی ماشین سنکرون می باشد



ناحیه موتوری

ناحیه ژنراتوری

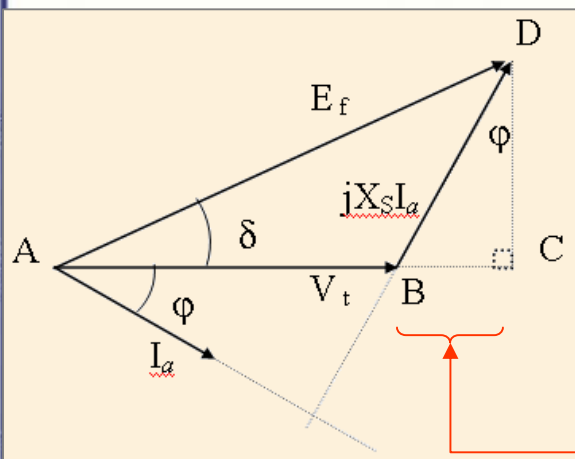
$$P = \frac{3V_t E}{X_s} \sin \delta$$

$$P_{\max} = \frac{3V_t E}{X_s}$$

توان در ژنراتور سنکرون

فرض کنیم $R_a = 0$

$$\bar{E} = \bar{V}_t + \bar{I}_a (R_s + jX_s)$$



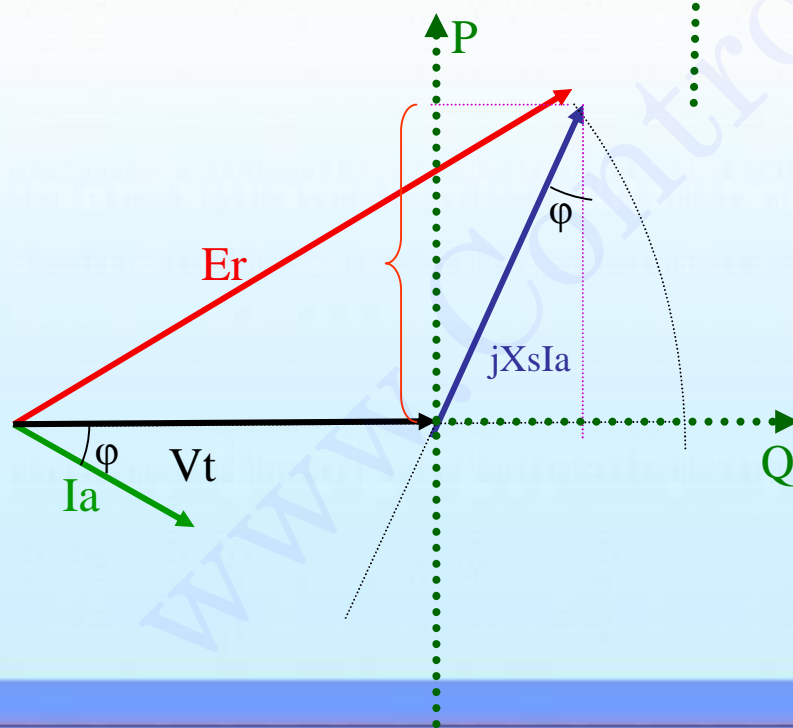
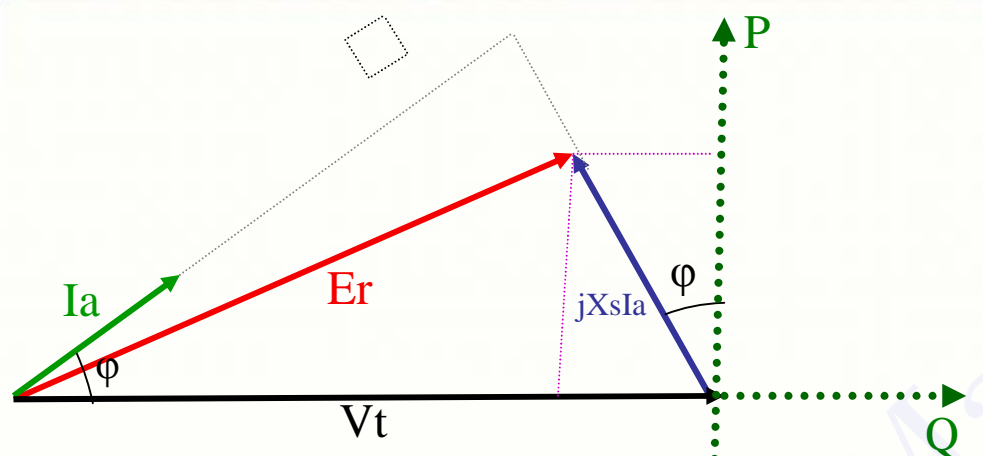
توان راکتیو متناسب با این طول است

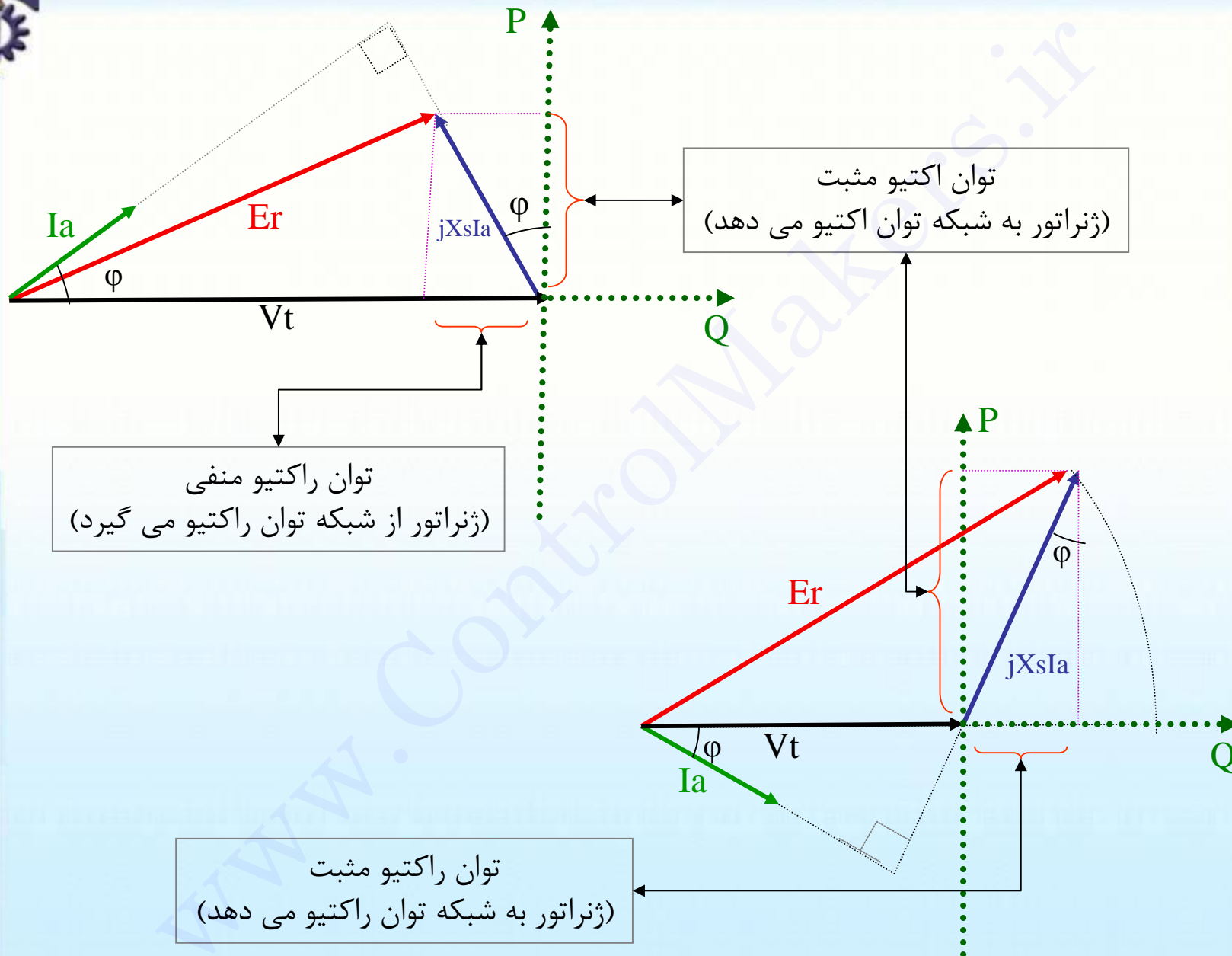
$$Q = 3V_{Ph} I_{Ph} \sin j$$

$$\Delta ADC, \Delta BDC \Rightarrow X_s I_a \sin j = E \cos d - V_t \Rightarrow I_a \sin j = \frac{E \cos d - V_t}{X_s}$$

$$Q = 3V_t I_a \sin j = 3V_t \frac{E \cos d - V_t}{X_s} \Rightarrow Q = 3 \left[\frac{V_t E \cos d - V_t^2}{X_s} \right]$$

کنترل ضریب قدرت





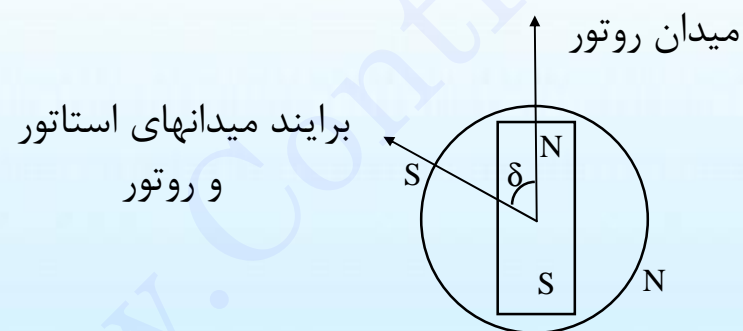


زاویه بار (d)

$$F = K \cos(q - wt)$$

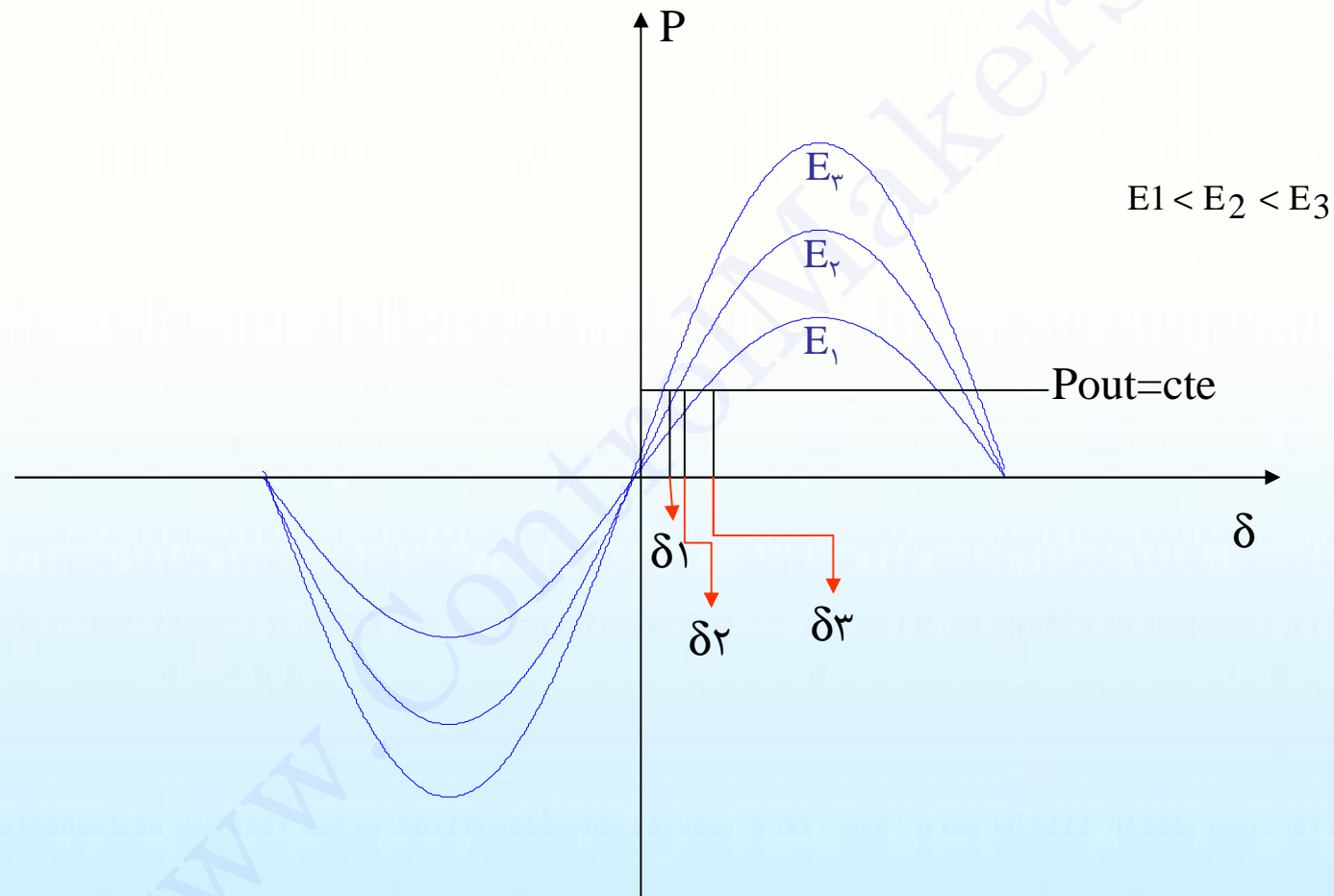
میدان دوار برآیند استاتور

روتور با یک سرعت ω در حال چرخش است. قطبهای N و S (میدان) روی استاتور نیز با همان سرعت می چرخند. زاویه بین این دو میدان را d گویند (زاویه بین میدان روتور و میدان استاتور $d =$)



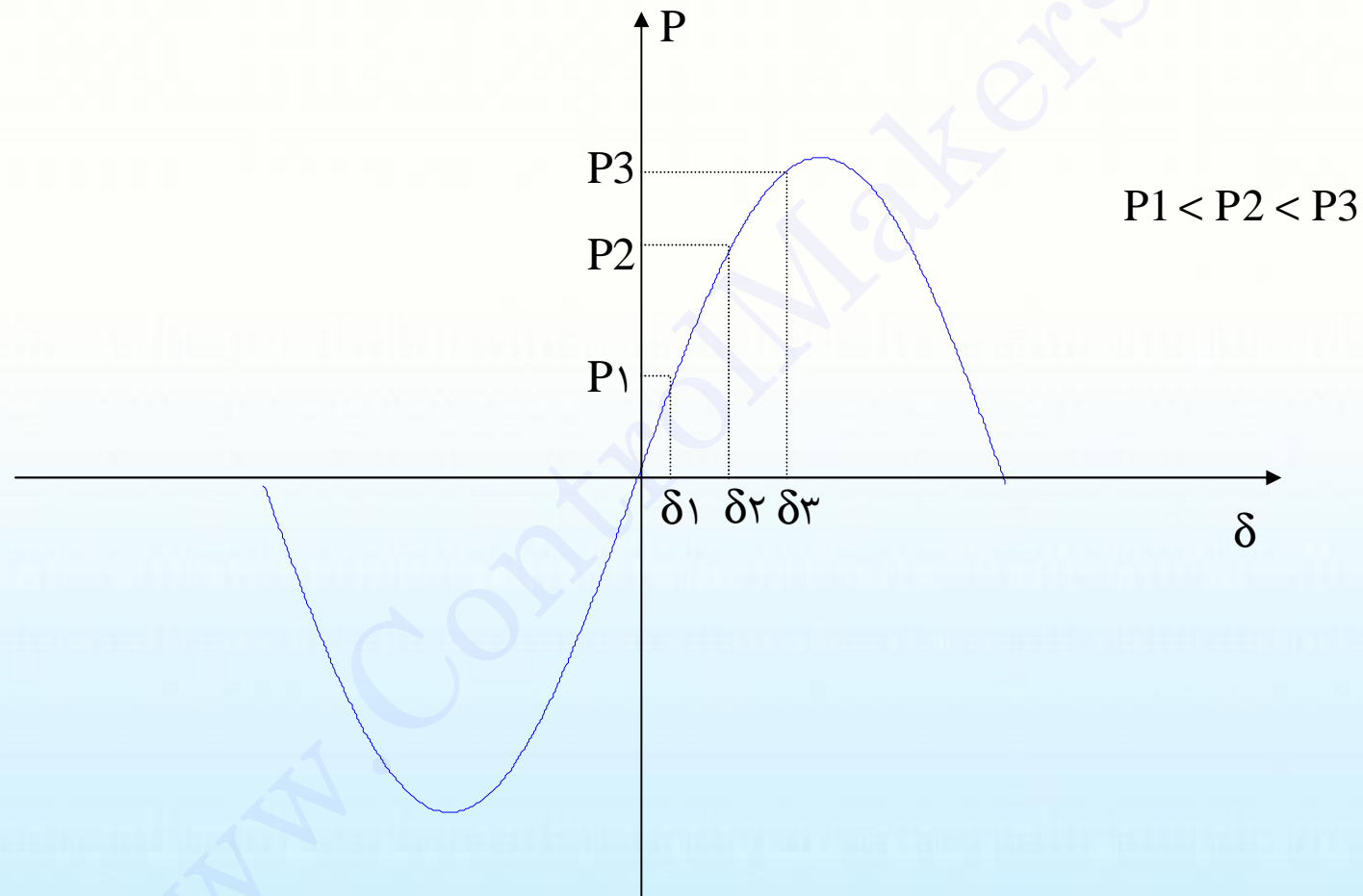


بررسی منحنی توان زاویه قدرت





بررسی منحنی توان زاویه قدرت





مکان هندسی توان مختلط و منحنی های قابلیت

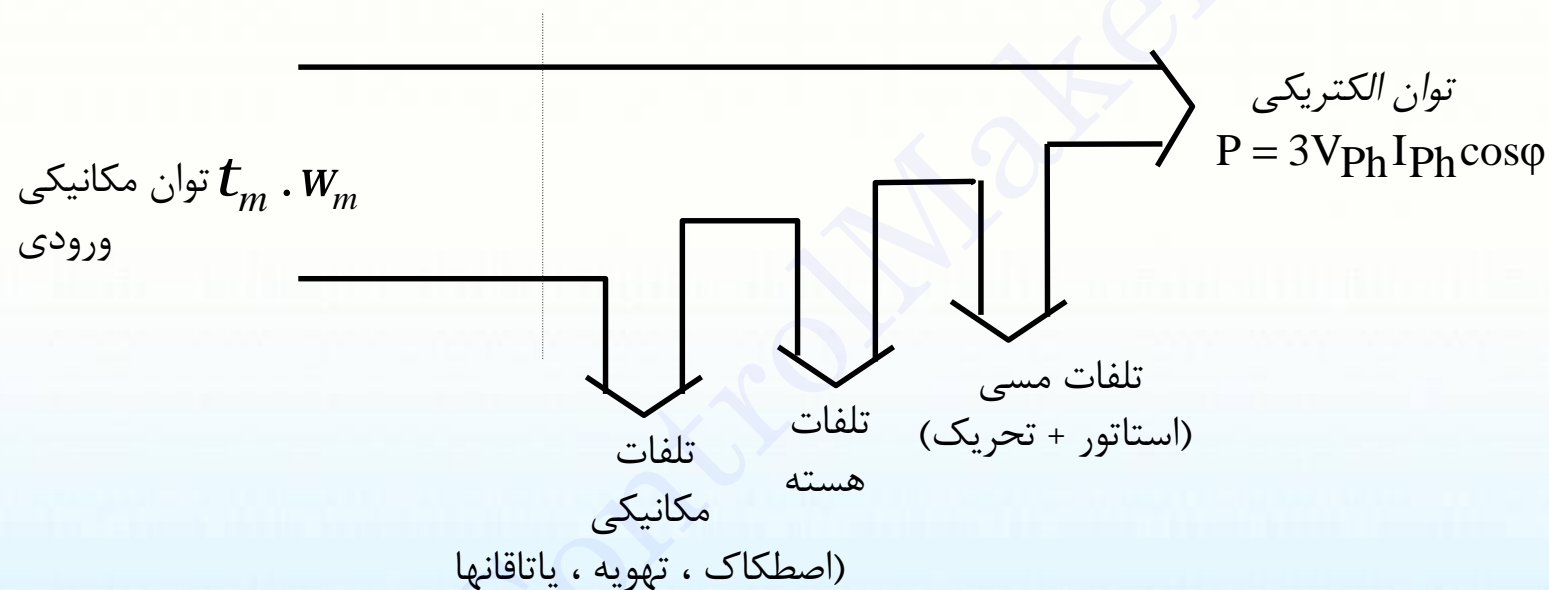
• مکان هندسی توان مختلط در صفحه S دایره ای است به شعاع $\frac{|V||E_f|}{X_s}$ و مرکز $\left(0, \frac{-|V|^2}{X_s}\right)$

• بهره برداری از ماشین سنکرون با محدودیتهای زیر روبرو است :

۱. جریان آرمیچر
۲. جریان تحریک
۳. حد پایداری استاتیکی



پخش توان در ژنراتور سنکرون





بنام خدا

مبحث هشتم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

موازی کردن ژنراتورهای سنکرون



موازی کردن ژنراتورهای سنکرون

هدف از موازی کردن ژنراتورها چیست ؟

← بالا بردن قابلیت اطمینان سیستم

← امکان برنامه ریزی برای تعمیرات دوره ای

← افزایش راندمان

← نیاز به واحدهای رزرو کوچکتر



شرایط لازم برای موازی کردن ژنراتورها

ردیف	شرط	ابزار تست برقراری شرط	راه حل در صورت برقرار نبودن شرط
۱	دامنه ولتاژ فازها یکی باشد	استفاده از ولت متر	تنظیم تحریک
۲	توالی فازها یکی باشد	استفاده از یک موتور القائی	جابجائی دو فاز
۳	ولتاژها هم فاز باشند	روش سه لامپ	تغییر فرکانس تا هم فاز شدن بعد تنظیم فرکانس
۴	برابری فرکانس ژنراتورها	فرکانس متر	تنظیم ست پوینت محرک اولیه



شرایط لازم برای موازی کردن ژنراتورها (ادامه)

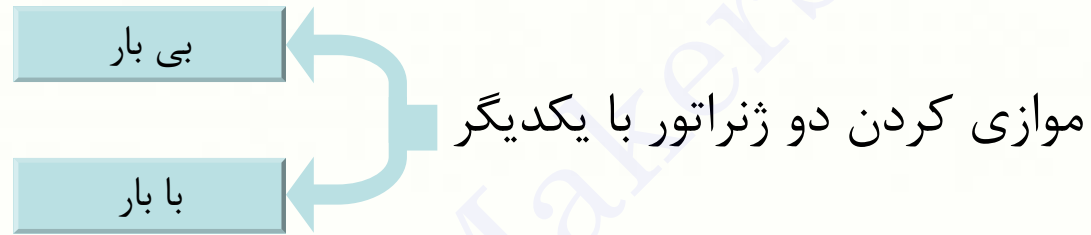
نکته: اگر تمام شرایط لازم برای موازی کردن برقرار باشند و روش سه لامپ را پیاده سازی کنیم ، همه لامپها خاموش خواهند بود .

سوال: در صورتیکه هر کدام از شرطهای فوق برقرار نباشد چگونگی تغییرات نور لامپها را پیش بینی کنید .

با استفاده از دستگاه سنکروسکوپ یا سنکروچک می توان شرایط موازی کردن ژنراتورها را بررسی کرد .



حالت‌های مختلف موازی کردن ژنراتورها

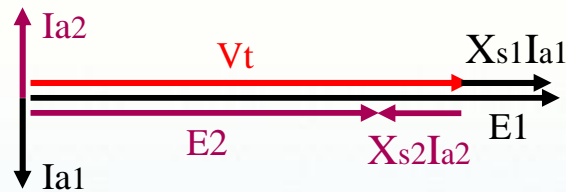


◀ موازی کردن یک ژنراتور با شبکه بی نهایت



موازی کردن دو ژنراتور با یکدیگر (بی بار)

← فرض کنیم ولتاژ داخلی دو ژنراتور هم فاز ولی از نظر اندازه تفاوت دارند . می دانیم در این حالت جریان گردشی تولید می شود . اثر این جریان گردشی بر روی ولتاژ ترمینال V_t و گشتاورهای اعمالی به ژنراتورها چنین است (با صرفنظر از مقاومت) :



$$V_{toc} = E_1 - jI_c X_{s1} = E_2 + jI_c X_{s2}$$

← ژنراتور ۲ ژنراتور ۱ را مثل بار خازنی می بیند لذا ولتاژ ترمینال آن بیشتر از ولتاژ داخلی آنست .

← ژنراتور ۱ ژنراتور ۲ را مثل بار سلفی می بیند لذا ولتاژ ترمینال آن کمتر از ولتاژ داخلی آنست .

← گشتاور ناشی از این جریانها صفر است . چرا؟

← عیب این جریان گردشی چیست ؟

← مباحث بالا را برای حالت توازی با دامنه ولتاژ برابر ولی زاویه های مختلف بررسی کنید .



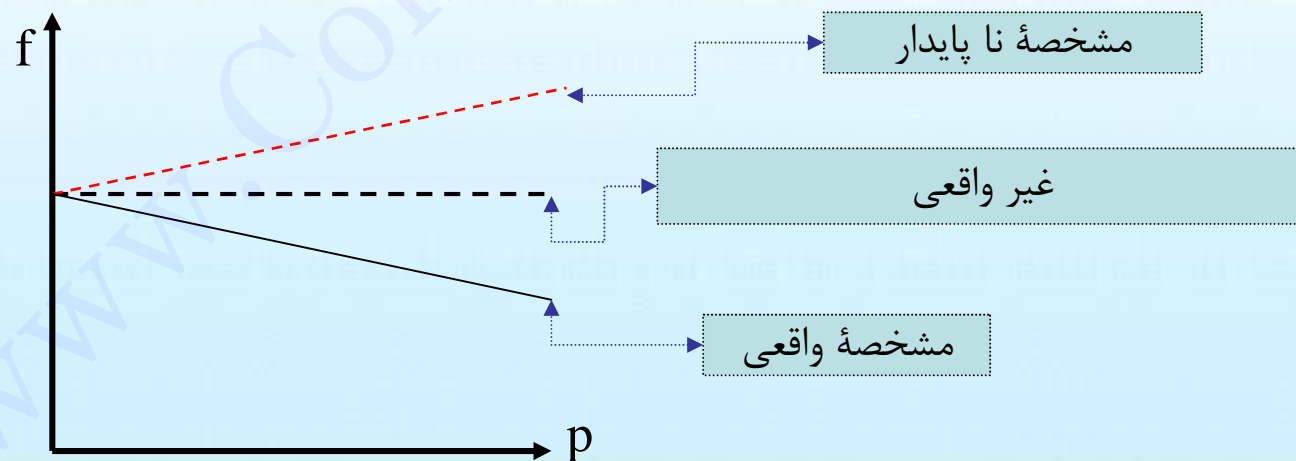
موازی کردن دو ژنراتور با یکدیگر (دیاگرامهای خانه ای)

← دو ژنراتور که با هم موازی می شوند در صورتیکه تمام پارامترهای آنها (دامنه ولتاژها، فرکانس و زاویه آنها) مثل هم باشند هیچ توانی بین آنها رد و بدل نمی شود . حال اگر باری به ترمینال مشترک آنها وصل شود ، چگونه بین آن دو تقسیم می شود ؟

← این امر به مشخصه گاورنر بستگی دارد . گاورنر وسیله ایست برای تنظیم توان تولیدی ژنراتور

و دارای مشخصه ای بصورت زیر است : $P = Sf (f_{n1} - f)$

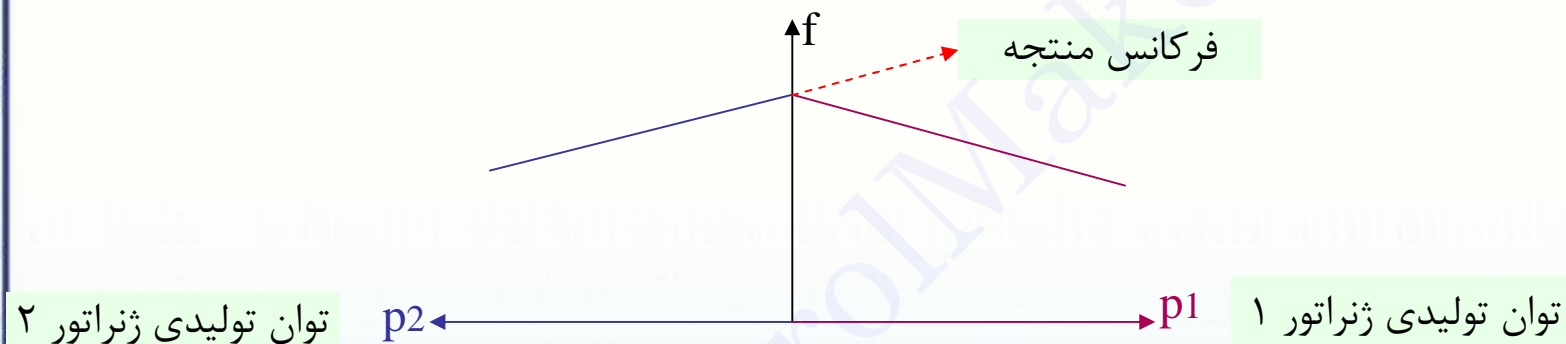
Sf شیب مشخصه بر حسب کیلو وات یا مگاوات بر هرتز می باشد .



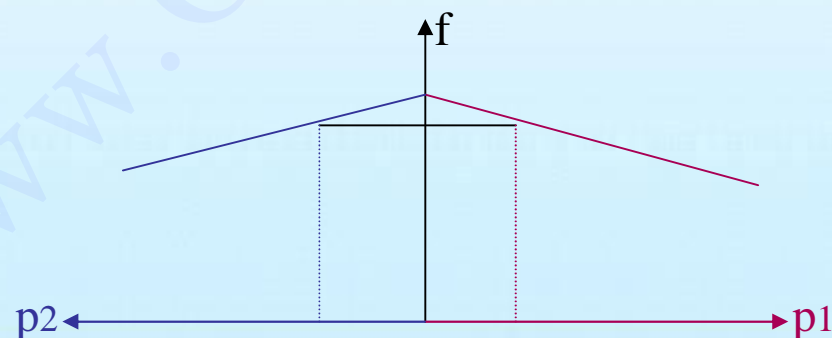


موازی کردن دو ژنراتور با یکدیگر (با بار)

دو ژنراتور بدون بار و شرایط یکسان به هم وصل شده اند و Set point آنها مثل هم تنظیم شده



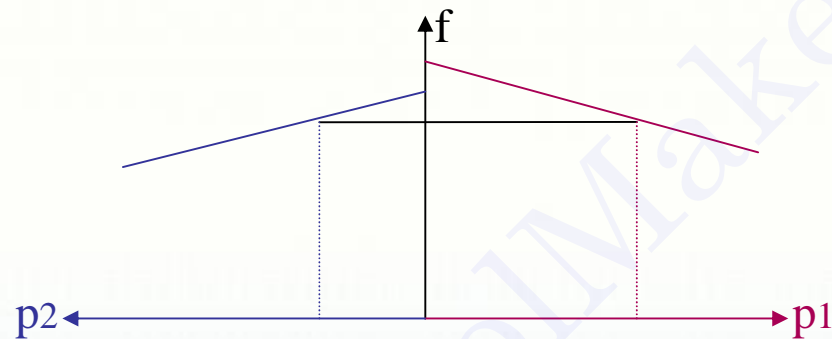
اگر در این حالت باری به این دو ژنراتور وصل شود ، همانگونه که از دیاگرام زیر پیداست فرکانس اندکی افت می کند و ژنراتورهای ۱ و ۲ توانهایی را تولید می کنند که جمع آنها با توان مورد نیاز بار برابر است



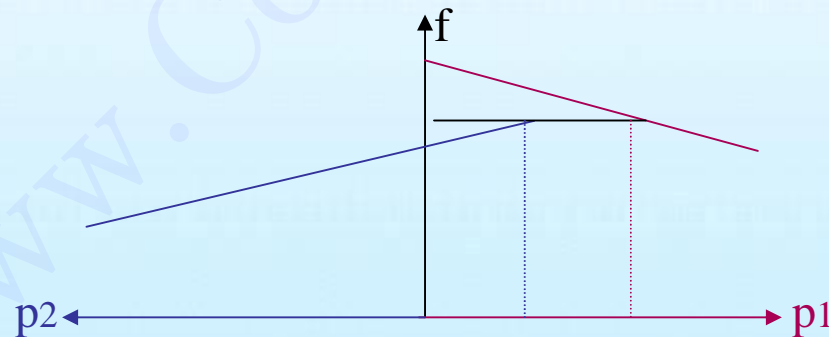


موازی کردن دو ژنراتور با یکدیگر (با بار)

می توان میزان تولید ژنراتورها را با تنظیم Set point تغییر داد

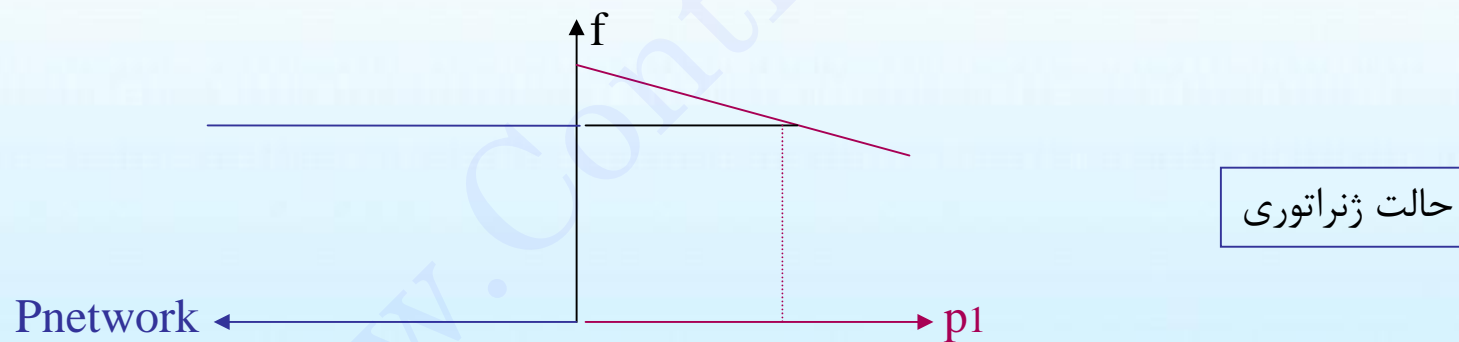
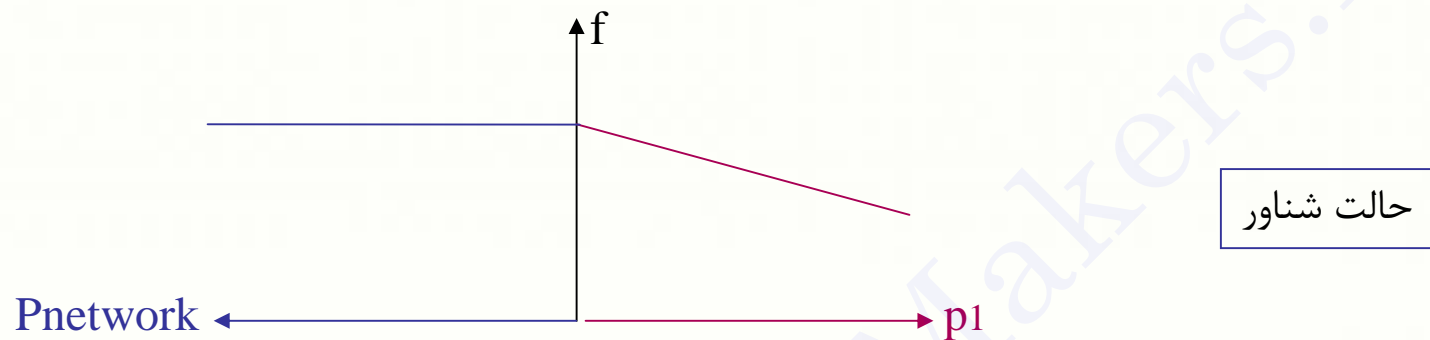


اگر Set point به طور مناسب تنظیم نشوند ممکن است حالتی رخ دهد که یکی از ژنراتورها به شکل یک بار برای دیگری عمل کند



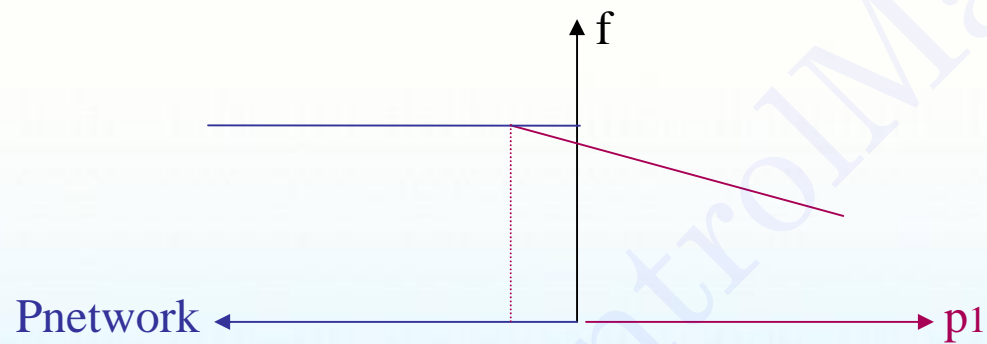


ژنراتور موازی با (یا متصل به) شبکه





ژنراتور موازی با (یا متصل به) شبکه



حالت موتوری



بنام خدا

مبحث نهم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

برخی مشخصه های ماشین سنکرون



برخی مشخصه های ماشین سنکرون

◀ نسبت اتصال کوتاه

◀ منحنی قابلیت ژنراتور



نسبت اتصال کوتاه

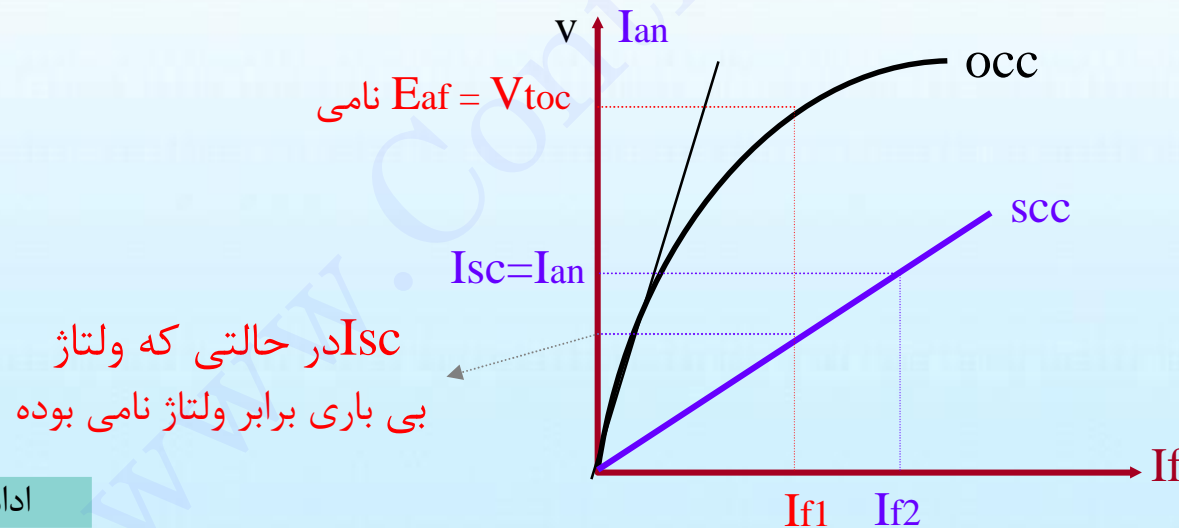
یادآوری: مقایسه نسبی کمیات ماشین سنکرون:

$$0.005 < R_a < 0.02$$

$$X_a = 1(\text{pu}) \text{ تقریباً}$$

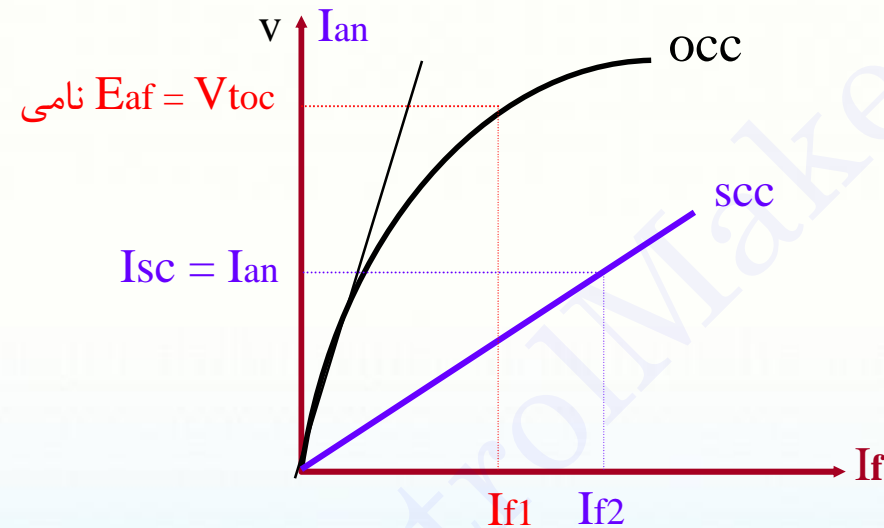
$$E_{afnl} = V_{toc} = 1(\text{pu})$$

نتیجه جالبی که از عبارت بالا حاصل می شود آنست که اگر یک ژنراتور که در حالت بی باری ولتاژ نامی تولید می کند، اتصال کوتاه شود، ممکنست جریان آن (در حالت دائمی) از جریان نامی بیشتر نگردد. مشخصه زیر را در نظر بگیرید، آیا راکتانس سنکرون آن بیشتر از یک پریونیت است یا کمتر؟



ادامه

نسبت اتصال کوتاه (ادامه)



$$\text{SCR(Short Circuit Ratio)} = \frac{|I_{f1}|}{|I_{f2}|} = \frac{I_a}{I_{an}}, \quad X_s = \frac{V_{toc}}{I_a}$$

$$X_s (\text{pu}) = \frac{X_s}{(V_n / I_n)} = \frac{V_{toc} / I_a}{V_n / I_n} = \frac{V_{toc} / V_n}{I_a / I_n} = \frac{1}{\text{SCR}}$$

منحنی قابلیت ژنراتور

$$P = \frac{VE}{X_s} \sin \delta, \quad Q = \frac{VE \cos \delta - V^2}{X_s}$$

$$\sin \delta = \frac{PX_s}{VE}, \quad \cos \delta = \frac{QX_s + V^2}{VE}$$

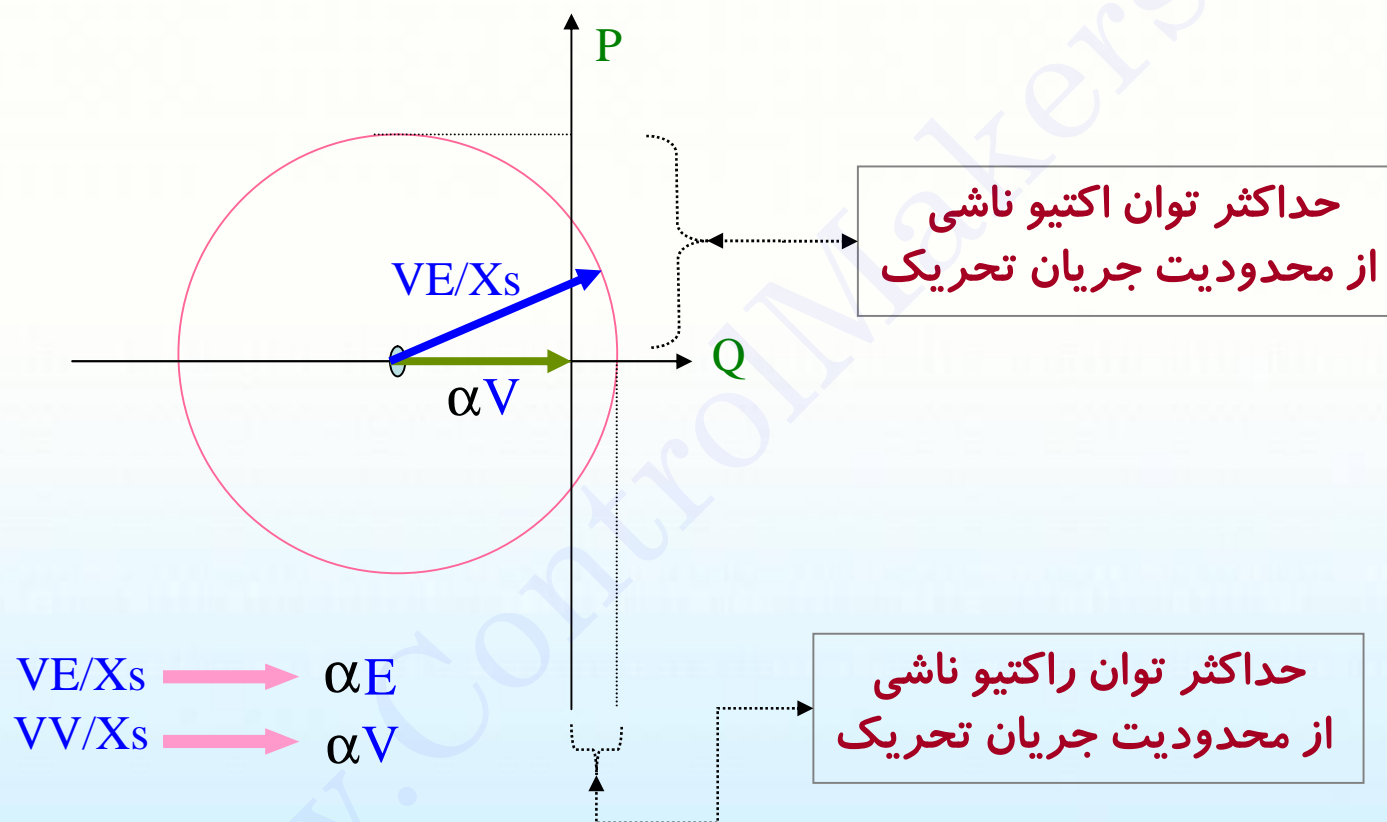
$$(\sin \delta)^2 + (\cos \delta)^2 = 1 \quad \frac{P^2 X_s^2}{V^2 E^2} + \frac{(QX_s + V^2)^2}{V^2 E^2} = 1$$

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X_s}\right)^2 = \frac{V^2 E^2}{X_s^2} = P_{\max}^2 \longrightarrow \text{معادلهٔ یک دایره}$$

ادامه



منحنی قابلیت ژنراتور (محدودیت جریان تحریک)



$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X_s}\right)^2 = \frac{V^2 E^2}{X_s^2} = P_{\max}^2$$



بنام خدا

مبحث دهم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

کلیات موتور سنکرون



موتور سنکرون

مقدمه

ساختمان

◀ موارد کاربرد

◀ مزایا معایب



موارد کاربرد موتور سنکرون

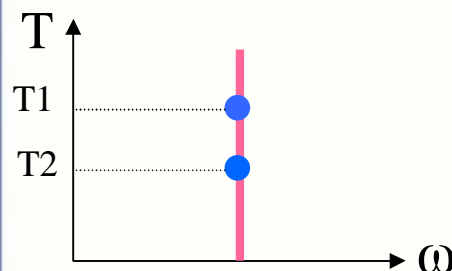
۱- در توانهای بالای یک مگاوات این موتورها از نظر قیمت و قابلیت بر موتورهای القائی ارجهیت داشته و بکار می روند .

۲- در کارخانه از این موتورها به دو دلیل استفاده می شود : یکی برای گرداندن بارهای مکانیکی که نیاز به به سرعت ثابت دارند و دیگر برای اصلاح ضریب توان .



مزایا و معایب موتورهای سنکرون

مزایا :



۱- یکی از مزایای موتور سنکرون آنست که همواره با یک سرعت ثابت کار می کند و در هر گشتاوری که بخواهیم یا به هیچ وجه کار نمی کند یا اینکه با یک سرعت ثابت کار می کند چنان خصوصیتی را می توان با مشخصه روبرو نشان داد :

۲- نسبت به موتورهای القائی بیشتر قابل کنترل می باشند .

۳- در ضریب توانهای مختلف می توانند کار کنند ، عبارت دیگر هم می توانند تولید کننده و هم مصرف کننده توان راکتیو باشند .

۴- راندمان بالائی دارند

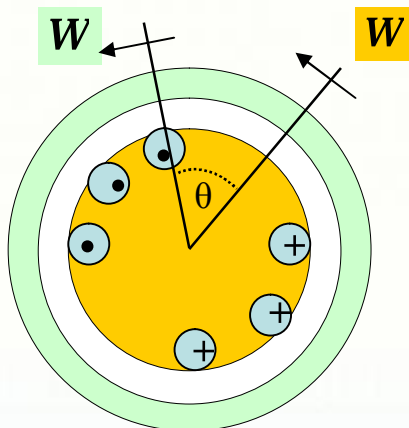
معایب :

۱- گشتاور راه اندازی ندارند

۲- پیچیدگی ساختمان ، قیمت بالا (در توانهای پائین) و نیاز به تعمیر و نگهداری از دیگر معایب آنند



مکانیزم عملکرد موتور سنکرون



$$i_a = I_m \sin(\omega t) \quad \Rightarrow \quad F_1 = K i_a \sin(\theta)$$

$$i_b = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad \Rightarrow \quad F_2 = K i_b \sin(\theta + 2\pi/3)$$

$$i_c = I_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \quad \Rightarrow \quad F_3 = K i_c \sin(\theta - 2\pi/3)$$

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad \Rightarrow \quad F = \frac{3KI_m}{2} \cos(\theta - \omega t)$$

← در اثر برقراری جریان الکتریکی در استاتور میدان دواری با دامنه ثابت در فضای موتور شکل می گیرد

← θ متغیری است که با زمان و متناسب با سرعت سنکرون تغییر می کند : $\theta = \omega t$

← با چرخش میدان مغناطیسی روی استاتور ، میدان روتور (درنتیجه خود روتور) به دنبال آن شروع به گردش می کنند .



مشکلات راه اندازی موتور سنکرون

موتور سنکرون گشتاور راه اندازی ندارد . چرا ؟

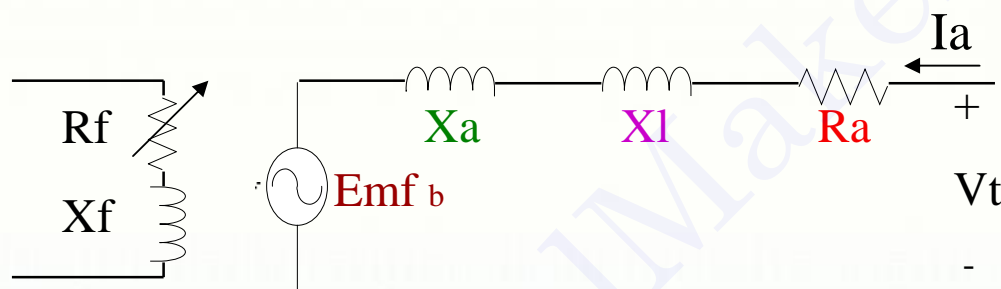
از آنجا که میدان مغناطیسی چرخان استاتور با سرعت بسیار زیادی می چرخد این سرعت زیاد مانع می شود که روتور بعلت وجود لختی ، بتواند به دنبال آن شروع به چرخش کند لذا موتور سنکرون راه اندازی نمی شود .

روشهای راه اندازی موتور سنکرون :

- ۱- کاهش فرکانس تغذیه استاتور
- ۲- روش استفاده از دمپر (راه اندازی به صورت موتور القائی)
- ۳- استفاده از محرک مکانیکی خارجی



مدار معادل یک فاز از موتور سنکرون



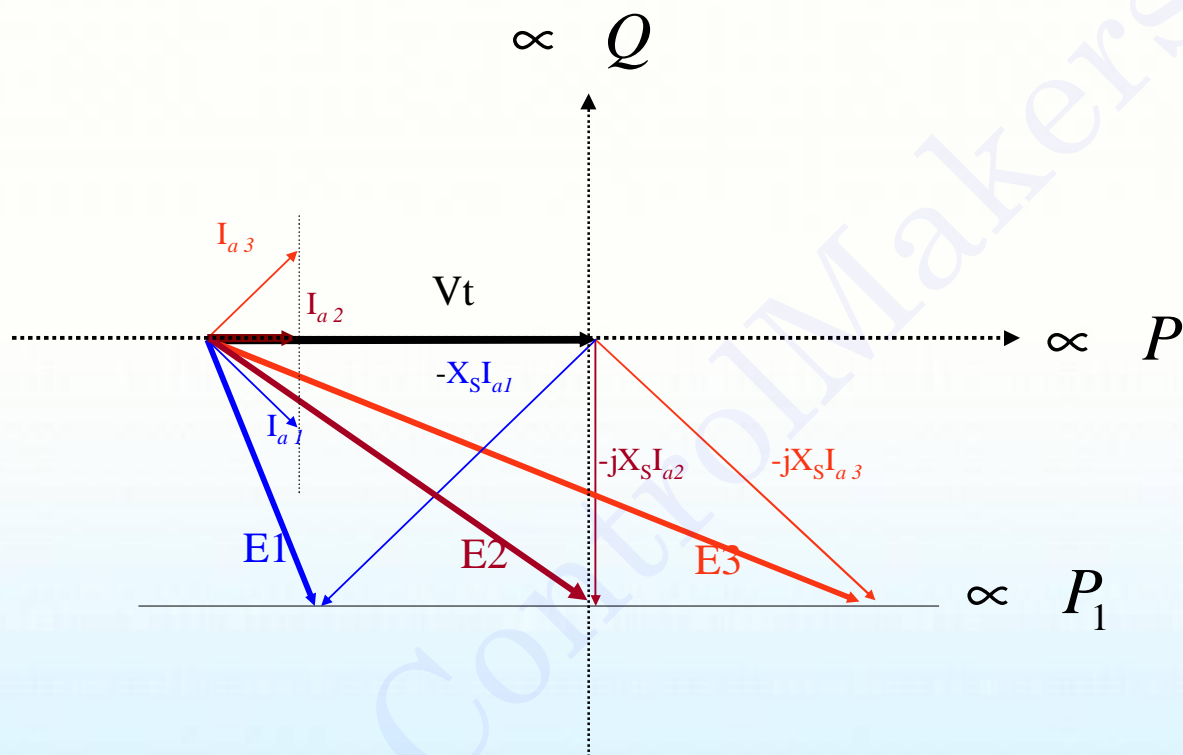
$$\bar{V}_t = E + \bar{I}_a (R_a + jX_s)$$

$$X_s = X_a + X_l$$

این مدار معادل همان مدار معادل ژنراتور سنکرون است با این تفاوت که در آن جهت جریان عکس شده است .



دیاگرام برداری موتور تحت شرایط بار ثابت و تحریکهای متفاوت

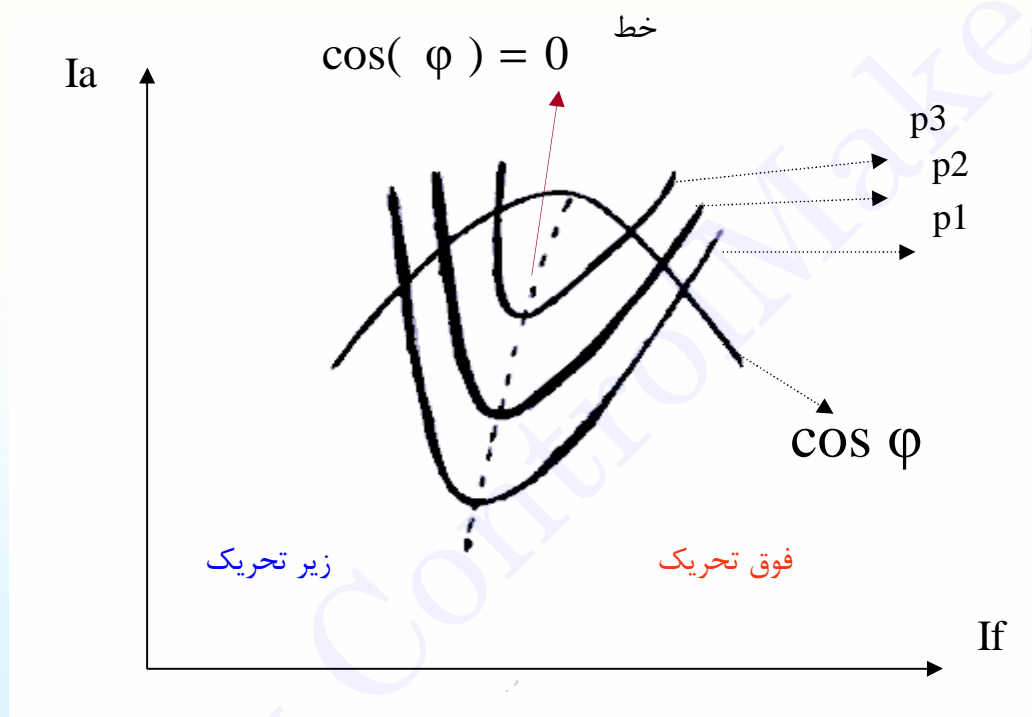


$$Q = 3 \left(\frac{V_t^2 - VE \cos \delta}{X_s} \right)$$

$$P = \frac{3V_t E}{X_s} \sin \delta$$



منحنیهای V

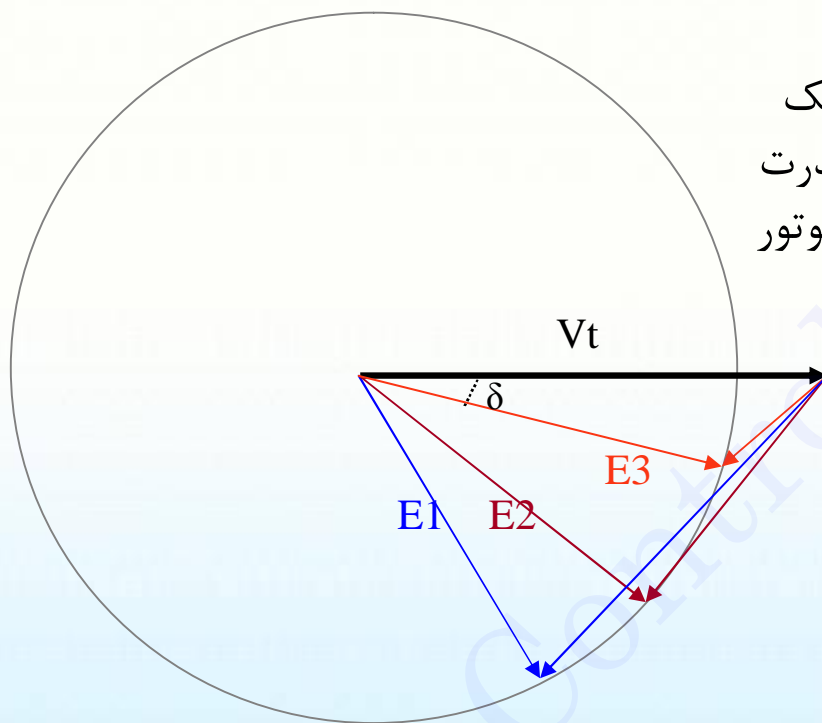


$$\begin{cases} E \cos \delta > V \Rightarrow \text{پیش فاز} \\ E \cos \delta = V \Rightarrow \text{مدار اکتیو} \\ E \cos \delta < V \Rightarrow \text{پس فاز} \end{cases}$$



کار موتور در تحریک ثابت و با بار متغیر

در این شکل ما بار یک موتور سنکرون را در تحریک ثابت زیاد کرده ایم. ملاحظه می شود که زاویه قدرت زیاد می شود اما توان راکتیو جذب شده توسط موتور نیز زیاد شده، چرا؟



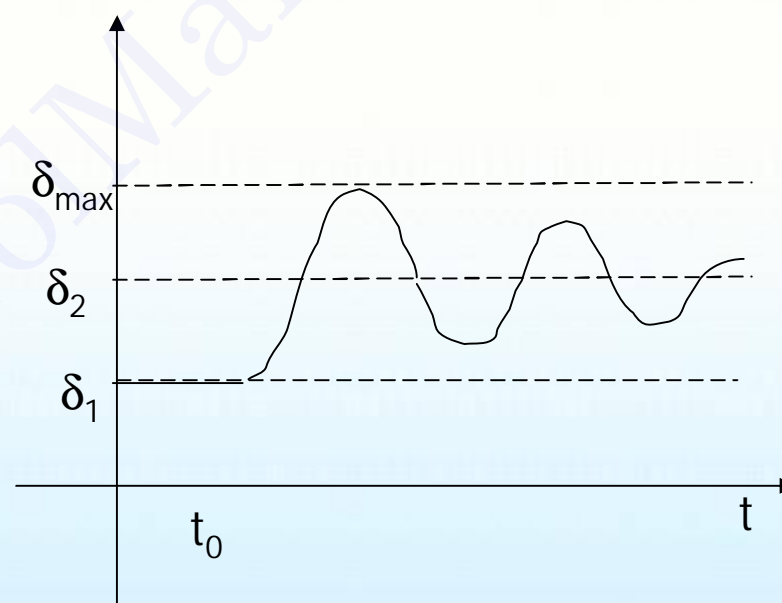
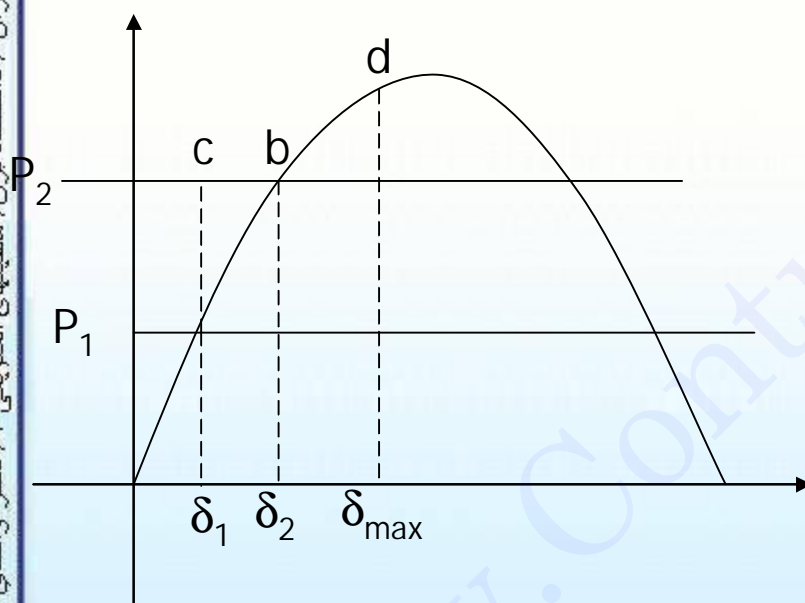
$$p_3 < p_2 < p_1$$

$$E_1 = E_2 = E_3$$

اگر بار بطور ناگهانی از P_1 به P_2 تغییر کند موتور ابتدا چند بار نوسان کرده سپس در δ_2 ساکن میشود، این موضوع در صفحه بعد نشان داده شده است.



نوسان میرای موتور حول یک حالت پایدار

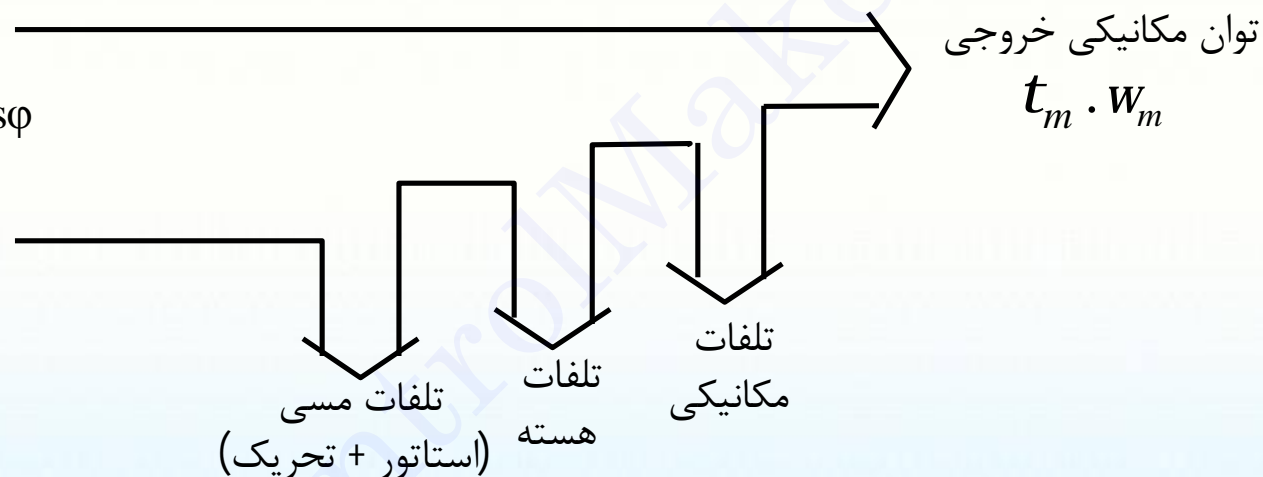




پخش توان در موتور سنکرون

$$P_{in} = 3V_{ph}I_{ph}\cos\phi$$

توان الکتریکی ورودی



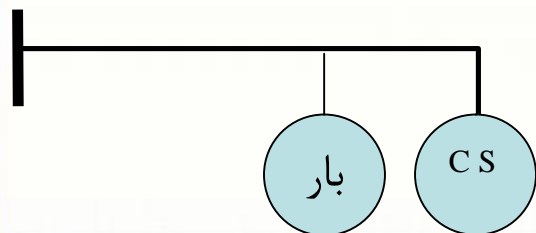
← تلفات دیگری هم وجود دارد که که جای خاصی برای آن در نمودار بالا نمی توان در نظر گرفت
این تلفات ، تلفات پراکنده نام دارد که مقدار آن را یک درصد توان ورودی در نظر می گیرند .
← در حالت ماندگار تلفات هسته روتور صفر است

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{P_{in} - P_{losses}}{P_{in}} \cdot 100$$



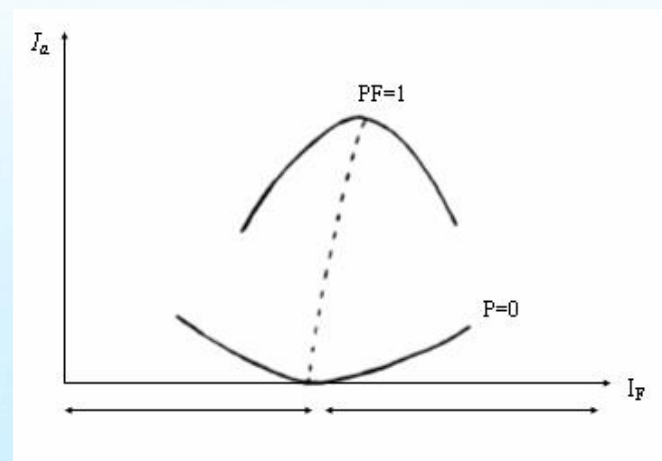
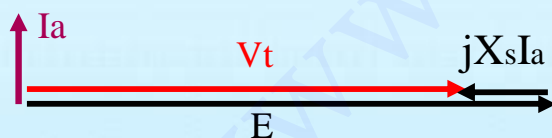
کندانسور سنکرون

کندانسور سنکرون ، ماشین سنکرونی است که محور خروجی ندارد ،
یعنی بدون بار کار می کند و با تنظیم تحریک می تواند بصورت مولد
یا مصرف کننده توان راکتیو عمل کند .



$$P = \frac{3V_t E}{X_s} \sin \delta$$

$$p = 0 \Rightarrow \delta = 0$$





بنام خدا

مبحث یازدهم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

کلیات ماشین قطب برجسته



ماشین قطب برجسته

استاتور ماشینهای قطب صاف و قطب برجسته مثل هم هستند و تفاوتی ندارند .

{ در این ماشینها روتور حالت و شکل سیلندری ندارد و اگر ناظری از جایگاه استاتور به روتور دواری نگاه کند ، در حالات مختلف رلوکتانسهای مختلفی را رویت می کند .

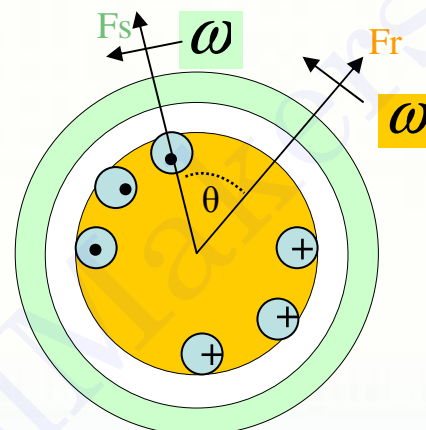
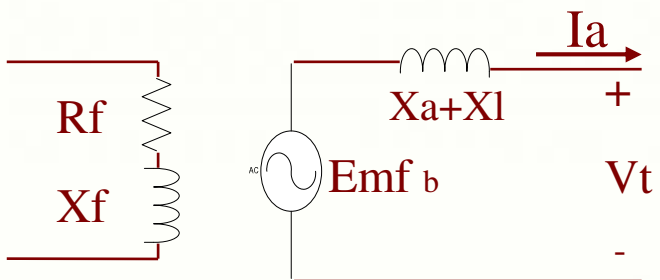
{ در این ماشینها توزیع شار روتور سینوسی است و این کار با تنظیم فاصله کفشک قطبها از استاتور ، صورت می گیرد (این کار در ماشینهای قطب صاف ، با توزیع سینوسی سیم پیچها میسر می شود)

خصوصیات

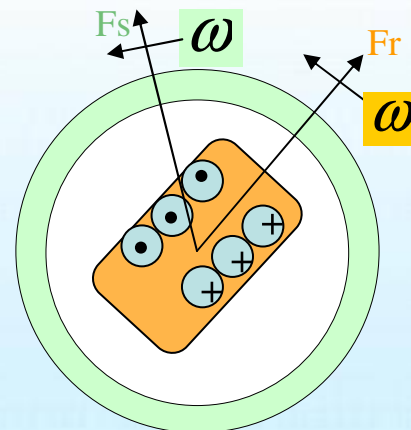
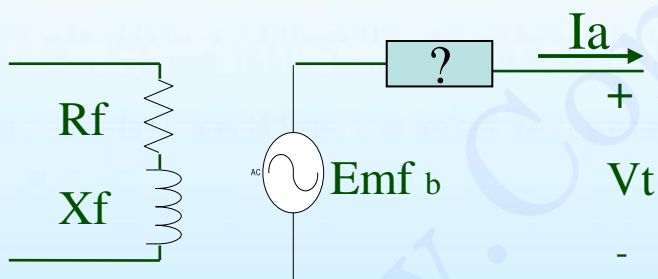
کاربردها: ماشینهای با روتور قطب برجسته در جاهائی استفاده می شوند که سرعت کم است لذا برای داشتن فرکانس الکتریکی خاص باید تعداد قطبها زیاد باشد(مثل ژنراتورهای موجود در نیروگاههای آبی) در سرعتهای بالا نیروهای گریز از مرکز قوی ، لزوم استفاده از ماشینهای قطب صاف را بیشتر ایجاب می کند .



مدار معادل ماشینهای قطب برجسته (تئوری دوماحوری بلوندل)



ماشین
قطب صاف



ماشین
قطب برجسته

میزان شار روتور و چگونگی توزیع آن در هر دو موتور قطب صاف و قطب برجسته یکسان است
لذا میزان E در هر دو حالت مشابه بوده و قسمت اول مدار معادل در هر دو حالت یکسان است.



مدار معادل ماشینهای قطب برجسته (تئوری دوماحوری بلوندل) (ادامه)

شار استاتور یا شار عکس العمل آرمیچر به دو عامل وابسته است
 جریان آرمیچر
 مقدار رلوکتانس مسیر شار

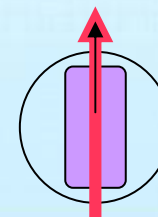
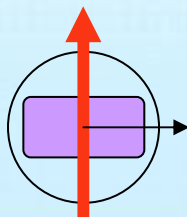
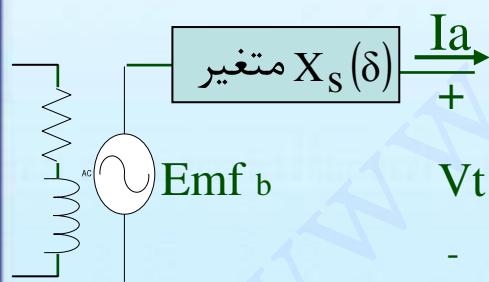
عکس رلوکتانس $\propto X_s \propto$ شار عکس العمل

در قطب صاف رلوکتانس در تمام حالات یکسان است $\leftarrow X_s$ ثابت است

حالت مینیموم > رلوکتانس > حالت ماکزیموم

اما در قطب
برجسته

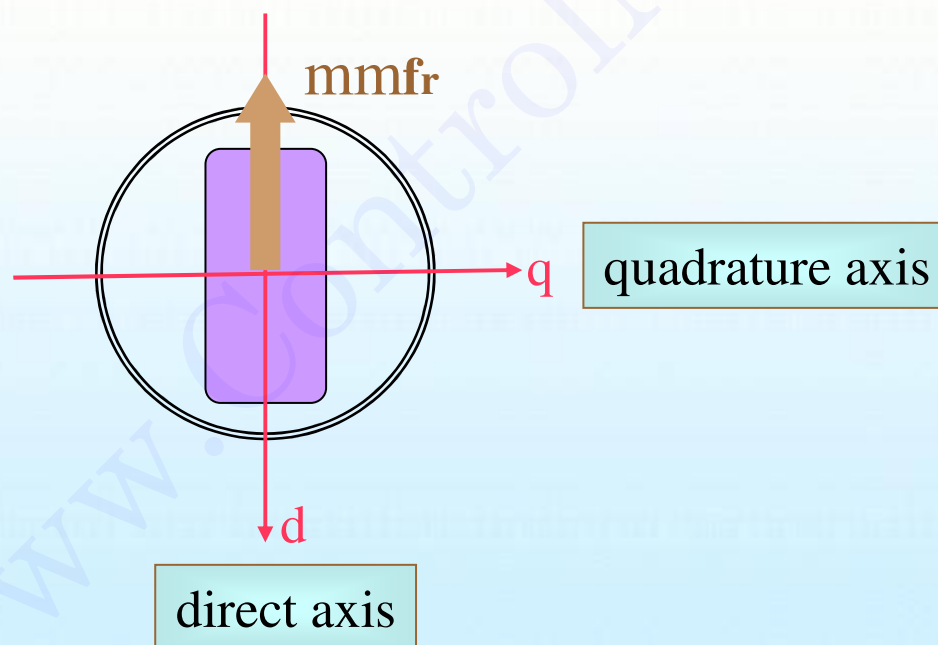
$$X_{min} < X < X_{max}$$





معرفی محورهای d و q و راکتانسهای X_d و X_q

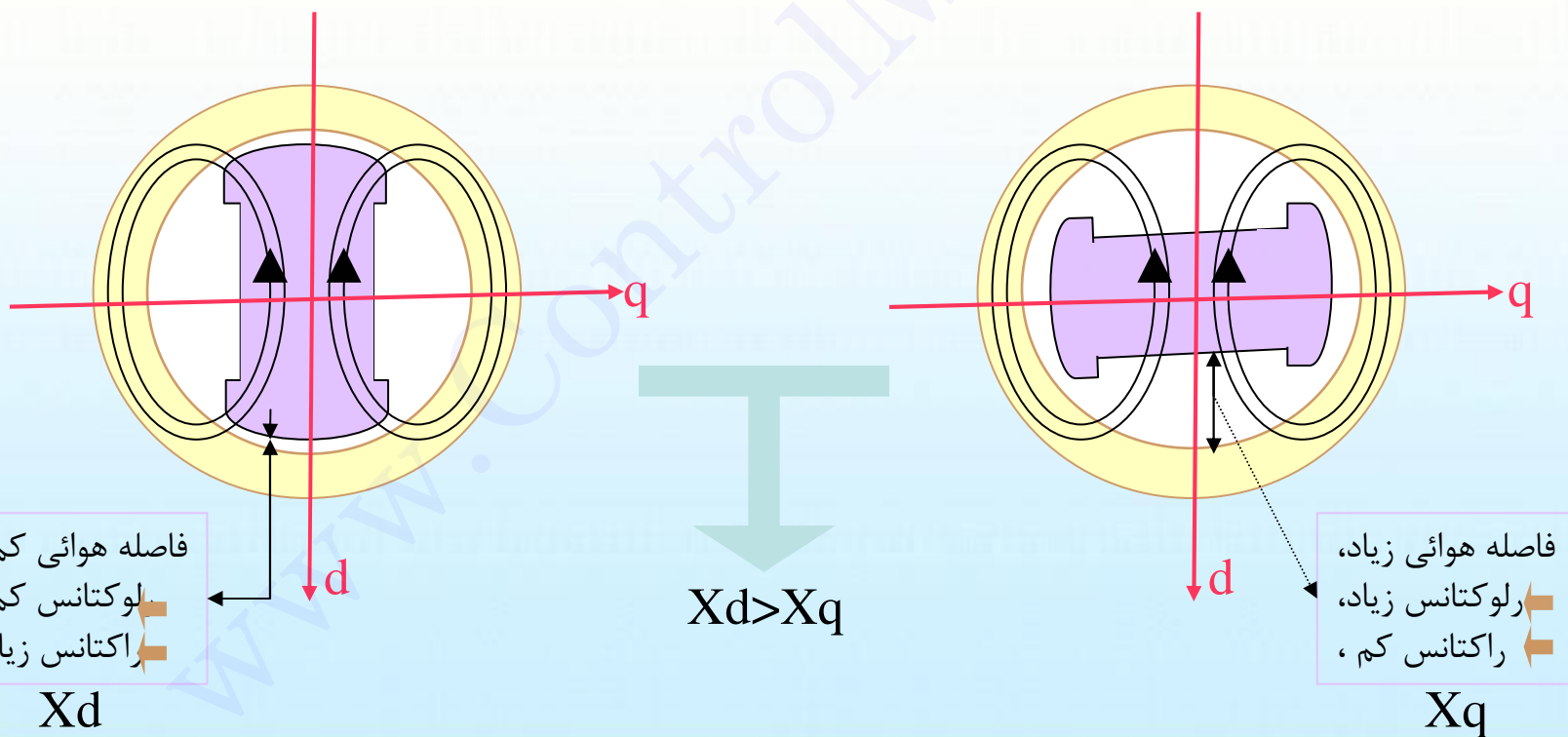
برای اینکه راکتانس متغیر در محاسبات و تحلیل ها وارد نشود از تئوری دو محوری بلوندل بهره گرفته می شود. برای این کار ما دو جهت یا محور مستقیم (d) و عرضی (q) را تعریف می کنیم
 محور d هم راستا با محور روتور است.
 محور q عمود بر محور روتور است.





راکتانسها در راستای محورهای عرضی و مستقیم .

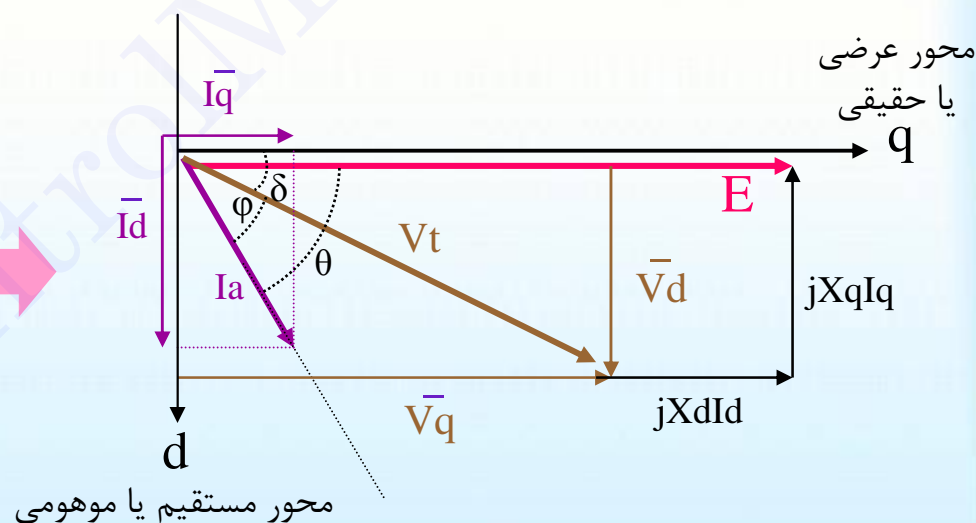
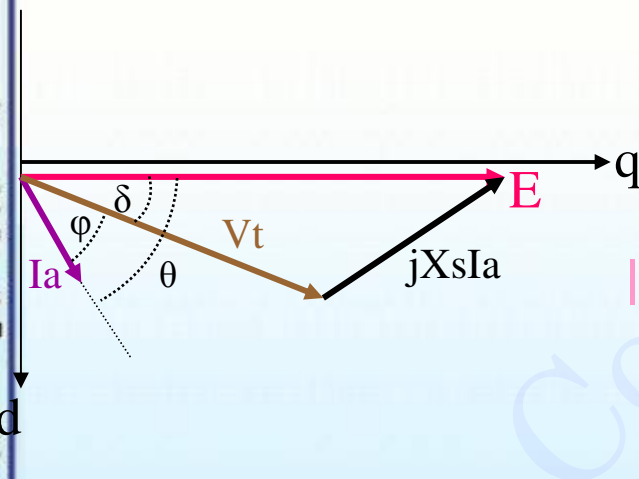
بسته به زاویه بین مسیر شارهای عبوری از روتور و محور روتور ، راکتانسهای متفاوتی را می توان در نظر گرفت . در اینجا کمترین و بیشترین مقدار راکتانس معرفی شده است سایر مقادیر بینابینی باروشی که در ادامه می آید با ترکیبی از این مقادیر (به نوعی) بدست می آید .





مدار معادل ماشینهای قطب برجسته (تئوری دوماحوری بلوندل) (ادامه)

با دو روش متفاوت می توان به استخراج روابط و مدار معادل پرداخت که هر کدام در جای خود تسهیلات ویژه ای دارند. در روش اول کمیات \bar{I}_d ، \bar{V}_d و \bar{I}_q ، \bar{V}_q ، را کمیاتی برداری در جهت محورهای d و q میدانیم پس روابط زیر را خواهیم داشت.

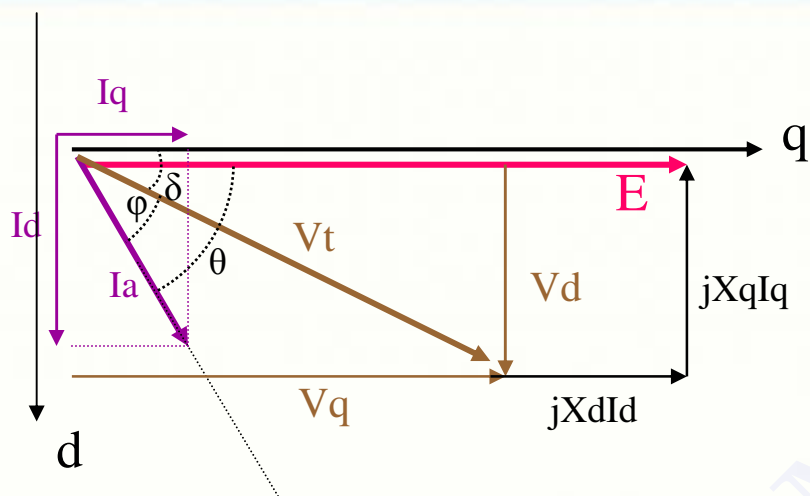


$$I_d = I_a \sin \theta$$

$$I_q = I_a \cos \theta$$

$$V_d = V_t \sin \delta$$

$$V_q = V_t \cos \delta$$



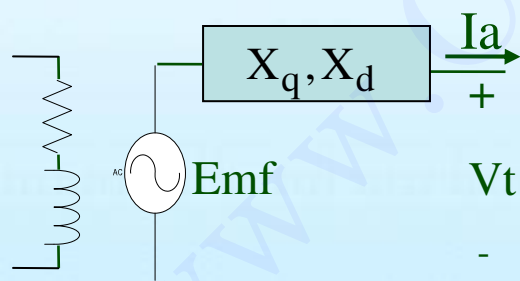
$$\bar{V}_t = \bar{V}_q + \bar{V}_d \quad (1)$$

$$\bar{I}_a = \bar{I}_q + \bar{I}_d$$

$$\begin{cases} \bar{V}_q = \bar{E} - jX_d \bar{I}_d & (2) \\ \bar{V}_d = -jX_q \bar{I}_q & (3) \end{cases} \xrightarrow{(1)} \bar{V}_t = (E - jX_d \bar{I}_d) + (-jX_q \bar{I}_q) = E - jX_q \bar{I}_q - jX_d \bar{I}_d$$

یا

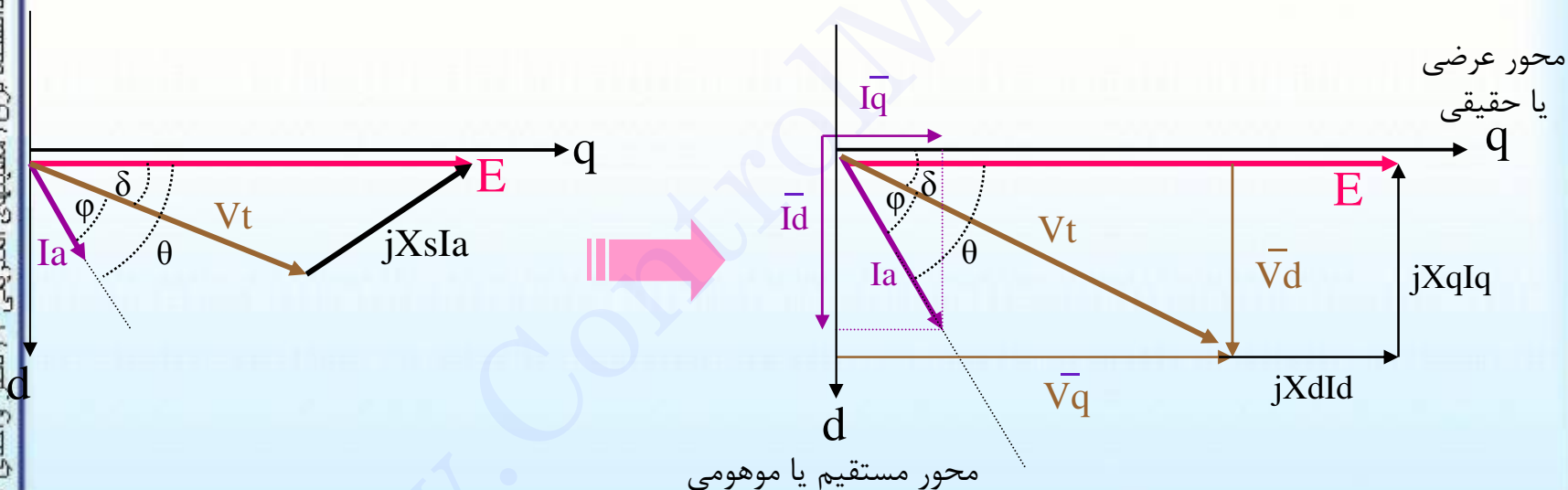
$$E = \bar{V}_t + jX_q \bar{I}_q + jX_d \bar{I}_d$$





مدار معادل ماشینهای قطب برجسته (تئوری دومحوری بلوندل) (ادامه)

در روش دوم کمیات I_d ، V_d و I_q ، V_q ، را کمیاتی اسکالر در راستای محوره‌های d و q میدانیم پس روابط زیر را خواهیم داشت.



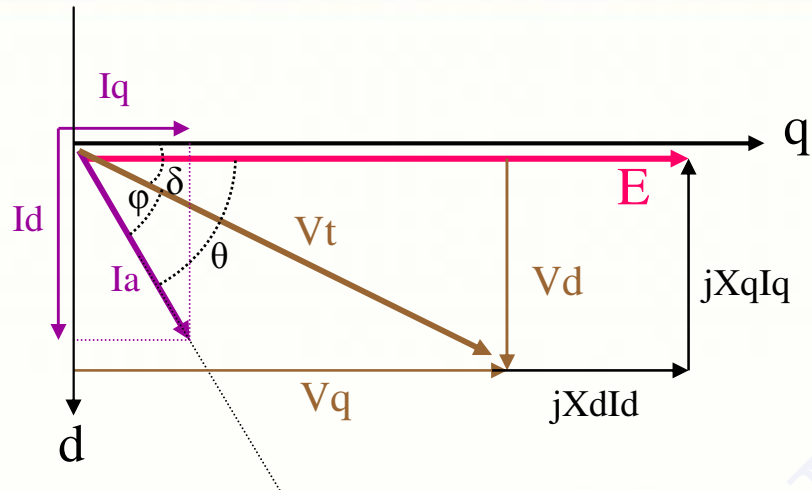
$$I_d = I_a \sin \theta$$

$$I_q = I_a \cos \theta$$

$$V_d = V_t \sin \theta$$

$$V_q = V_t \cos \theta$$

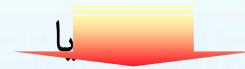
بزرگی بردارهای ولتاژ و جریان
(می توانند منفی هم باشند)



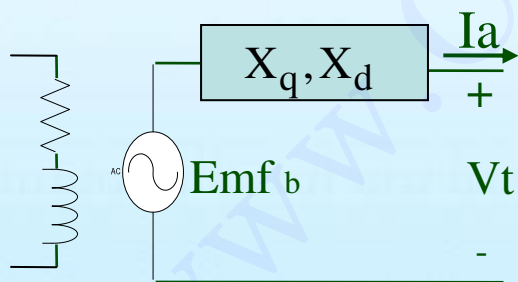
$$\bar{V}_t = V_q - jV_d \quad (1)$$

$$\bar{I}_a = I_q - jI_d$$

$$\begin{cases} V_q = E - X_d I_d & (2) \\ V_d = jX_q I_q & (3) \end{cases} \xrightarrow{(1)} \bar{V}_t = (E - X_d I_d) - (jX_q I_q) = E - X_d I_d - jX_q I_q$$



$$E = \bar{V}_t + X_d I_d + jX_q I_q$$

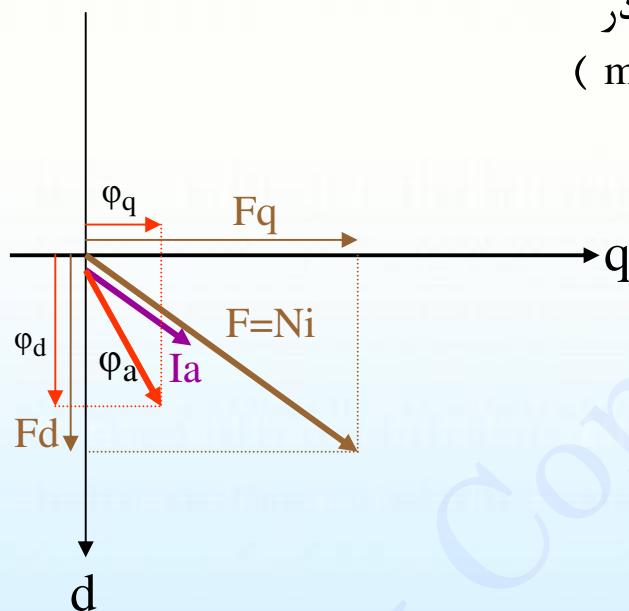




یکی از خصوصیات ماشینهای قطب برجسته

در این ماشینها نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) و شار مغناطیسی هم راستا نیستند.

نیروی محرکه مغناطیسی ناشی از جریان آرمیچر بوده و در دیاگرام برداری هم جهت با آن رسم می شود. ($\text{mmf} = Ni$)



$$\varphi_d = \frac{F_d}{R_d}$$

$$\varphi_q = \frac{F_q}{R_q}$$

$$R_d < R_q$$



بنام خدا

مبحث دوازدهم

ماشینهای الکتریکی III

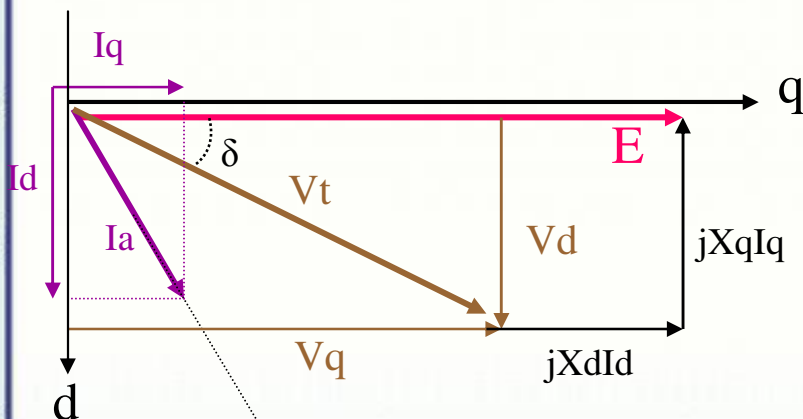
ماشینهای الکتریکی III

توان و گشتاور در ماشین
سنکرون قطب برجسته



توان در ماشین سنکرون قطب برجسته

روش اول :



$$\left. \begin{aligned} I_d &= \frac{E - V_t \cos \delta}{X_d} \\ I_q &= \frac{V_t \sin \delta}{X_q} \end{aligned} \right\} 1$$

$$P = P_d + P_q = 3V_t I_d \cos(90 - \delta) + 3V_t I_q \cos(\delta)$$

$$= 3V_t I_d \sin \delta + 3V_t I_q \cos \delta \quad \xrightarrow{1} \quad P = 3V_t \frac{E - V_t \cos \delta}{X_d} \sin \delta + 3V_t \frac{V_t \sin \delta}{X_q} \cos \delta$$

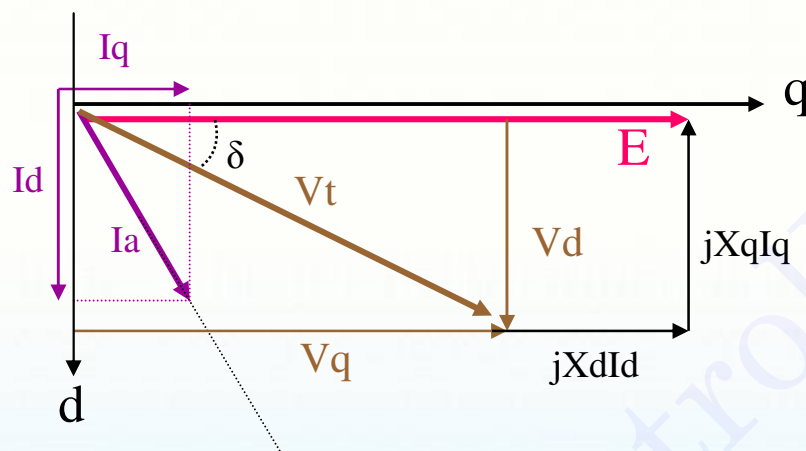
$$\xrightarrow{\quad} P = 3 \frac{EV_t}{X_d} \sin \delta + 3 \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

توان رلوکتانسی توان ناشی از تحریک



توان در ماشین سنکرون قطب برجسته (ادامه)

به همین ترتیب برای توان راکتیو هم داریم :



$$\left. \begin{aligned} I_d &= \frac{E - V_t \cos \delta}{X_d} \\ I_q &= \frac{V_t \sin \delta}{X_q} \end{aligned} \right\} \textcircled{1}$$

$$Q = Q_d + Q_q = 3V_t I_d \sin(90^\circ - \delta) + 3V_t I_q \sin(-\delta)$$

$$= 3V_t I_d \cos \delta - 3V_t I_q \sin \delta \quad \textcircled{1} \quad \rightarrow \quad Q = 3V_t \frac{E - V_t \cos \delta}{X_d} \cos \delta - 3V_t \frac{V_t \sin \delta}{X_q} \sin \delta$$

$$\rightarrow Q = 3 \frac{E V_t}{X_d} \cos \delta - 3 \frac{V_t^2 \cos^2 \delta}{X_d} - 3 \frac{V_t^2 \sin^2 \delta}{X_q}$$



توان در ماشین سنکرون قطب برجسته (ادامه)

روش دوم : در این روش فرض ما بر آنست که V_d, I_d, V_q, I_q کمیتی اسکالر می باشند

$$S = P + jQ = 3V_t I_a^*$$

$$= 3(V_q - jV_d)(I_q - jI_d)^* = 3(V_q - jV_d)(I_q + jI_d) \quad ۱$$

$$\text{اما داریم: } ۲ \left\{ \begin{array}{l} I_d = \frac{E - V_t \cos \delta}{X_d} \\ I_q = \frac{V_t \sin \delta}{X_q} \end{array} \right. \quad و \quad ۳ \left\{ \begin{array}{l} V_d = V_t \sin \delta \\ V_q = V_t \cos \delta \end{array} \right.$$

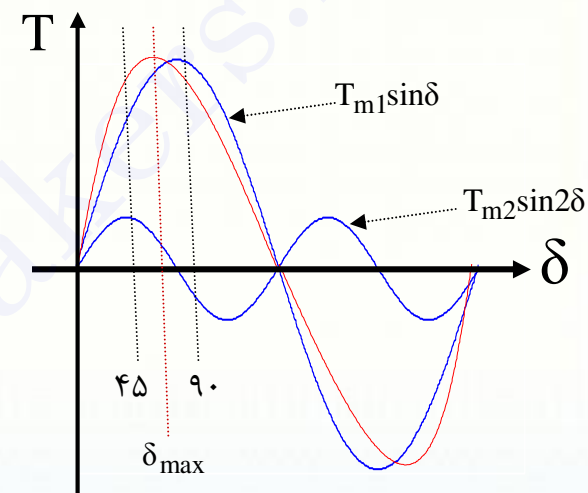
$$\begin{aligned} ۱ \quad ۲ \quad ۳ \rightarrow S &= 3(V_t \cos \delta - jV_t \sin \delta) \left(\frac{V_t \sin \delta}{X_q} + j \frac{E - V_t \cos \delta}{X_d} \right) \\ &= 3 \left(\frac{V_t^2 \sin 2\delta}{2X_q} + \frac{V_t E \sin \delta}{X_d} - \frac{V_t^2}{2X_d} \sin 2\delta \right) + j3 \left(\frac{EV_t}{X_d} \cos \delta - \frac{V_t^2 \cos^2 \delta}{X_d} - \frac{V_t^2 \sin^2 \delta}{X_q} \right) \\ &= 3 \left(\frac{EV_t}{X_d} \sin \delta + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right) + j3 \left(\frac{EV_t}{X_d} \cos \delta - \frac{V_t^2 \cos^2 \delta}{X_d} - \frac{V_t^2 \sin^2 \delta}{X_q} \right) \end{aligned}$$



گشتاور در ماشینهای قطب برجسته

$$P = T\omega$$

$$T = \frac{3}{\omega} \left(\underbrace{\frac{EV_t}{X_d} \sin \delta}_{\text{گشتاور ناشی از تحریک}} + \underbrace{\frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta}_{\text{گشتاور رلوکتانسی}} \right)$$



اگر فقط گشتاور رلوکتانسی باشد زاویه حد پایداری $\delta = 45$ است.

اگر فقط گشتاور ناشی از تحریک باشد زاویه حد پایداری $\delta = 90$ است.

در حالت کلی داریم: $45 < \delta_{\max} < 90$

هرچه دامنه E بزرگتر و اختلاف X_d و X_q کمتر باشد، δ به 90 درجه نزدیکتر می شود

و هرچه دامنه E کوچکتر و اختلاف X_d و X_q بیشتر باشد، δ به 45 درجه نزدیکتر می شود.



بنام خدا

مبحث سیزدهم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

طریقه رسم دیاگرام برداری



طریقه رسم دیاگرام برداری

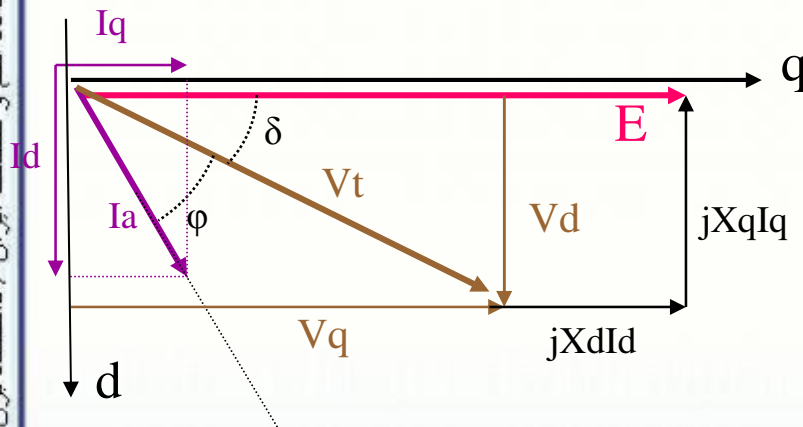
همانگونه که ملاحظه گردید ، برای رسم دیاگرامهای برداری و یا استفاده از روابط ماشینهای قطب برجسته لازم است زاویه δ و ولتاژ القائی E معلوم باشند . اما در عمل و از روی کمیات خارجی ماشین فقط می توانیم از مقادیر I_a ، V_t و φ اطلاع داشته باشیم لذا باید بتوانیم روشی را بیابیم که به کمک آن بتوانیم مقادیر δ و E را از روی کمیات قابل دسترسی ماشین تعیین کنیم . (البته با داشتن هر کدام از δ یا E می توانیم دیگری را هم محاسبه کنیم .)

روش محاسباتی

برای اینکار دو روش وجود دارد

روش ترسیمی

روش محاسباتی



$$I_d = I_a \sin(\delta + \varphi)$$

$$I_q = I_a \cos(\delta + \varphi) \quad (1)$$

$$V_t \sin \delta = X_q I_q \quad (2)$$



$$V_t \sin \delta = X_q I_a \cos(\delta + \varphi) \longrightarrow V_t \sin \delta = X_q I_a (\cos \delta \cos \varphi - \sin \delta \sin \varphi)$$

$$\sin \delta (V_t + X_q I_a \sin \varphi) = X_q I_a \cos \varphi \longrightarrow \operatorname{tg} \delta = \frac{X_q I_a \cos \varphi}{V_t + X_q I_a \sin \varphi}$$

توجه: X_q و X_d از پارامترهای ثابت ماشین هستند و روی پلاک ماشین داده شده اند.

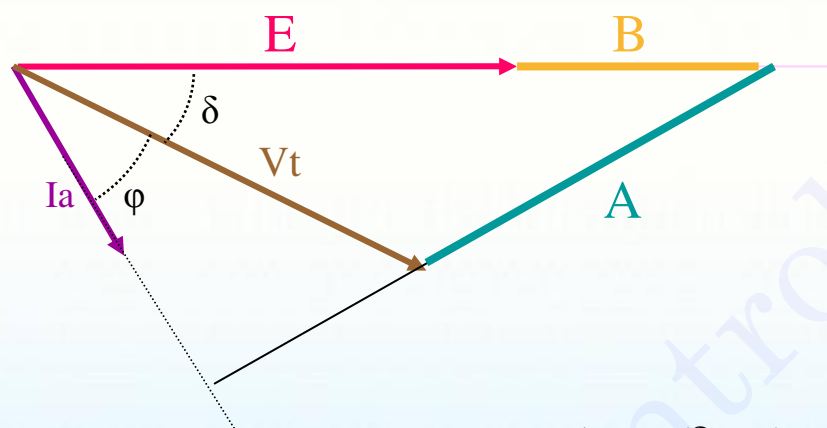
تمرین: روش محاسباتی فوق را برای حالت موتور دینال کنید.

تمرین: عملیات فوق را با در نظر گرفتن R_a مجدداً تکرار کنید.



روش ترسیمی

برای فهم این روش فرض می کنیم تمام کمیات منجمله δ و E را داریم و می توانیم دیاگرام را رسم کنیم . حالا با استفاده از این دیاگرام روشی را برای رسم آن می یابیم .



۱- I_a را امتداد می دهیم

۲- از انتهای بردار V_t بر I_a عمودی رسم می کنیم و از طرف دیگر آنرا چنان ادامه می دهیم تا راستای بردار E را قطع کند . طول پاره خط از V_t تا E را A نامیم .

۳- برای بدست آوردن طول پاره خط A چنین داریم .

$$A \cos(\delta + \varphi) = X_q I_q = X_q I_a \cos(\delta + \varphi) \quad \Rightarrow \quad A = X_q I_a$$

۴- برای پیدا کردن انتهای بردار E باید طول پاره خط B معلوم باشد که برای محاسبه آن چنین عمل می کنیم .

$$B = X_d I_d - A \sin(\delta + \varphi)$$

$$A \sin(\delta + \varphi) = X_q I_a \sin(\delta + \varphi) = X_q I_d$$

$$\Rightarrow B = X_d I_d - X_q I_d = I_d (X_d - X_q)$$



بنام خدا

مبحث چهاردهم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

تعیین پارامترهای X_d و X_q



تعیین پارامترهای X_d و X_q

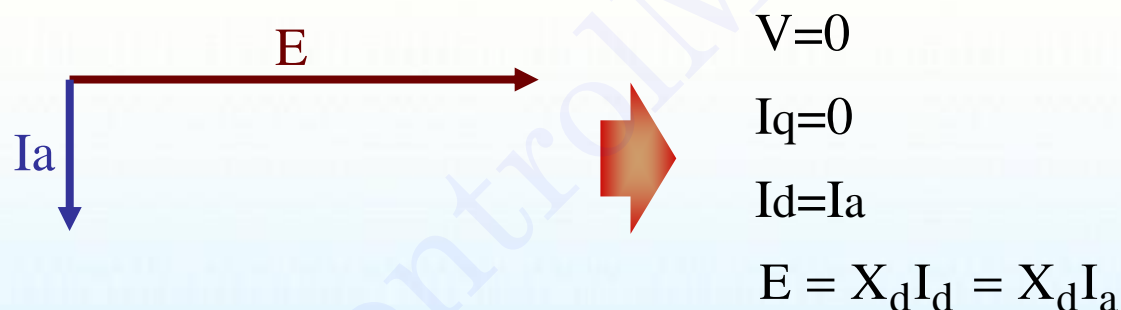




تعیین پارامتر X_d با استفاده از SCC و OCC

برای یک ماشین قطب برجسته می توان X_d را از دو آزمایش بی باری و آزمایش اتصال کوتاه بدست آورد.

در حالت اتصال کوتاه و با فرض $R_a=0$ دیاگرام برداری به صورت زیر است :



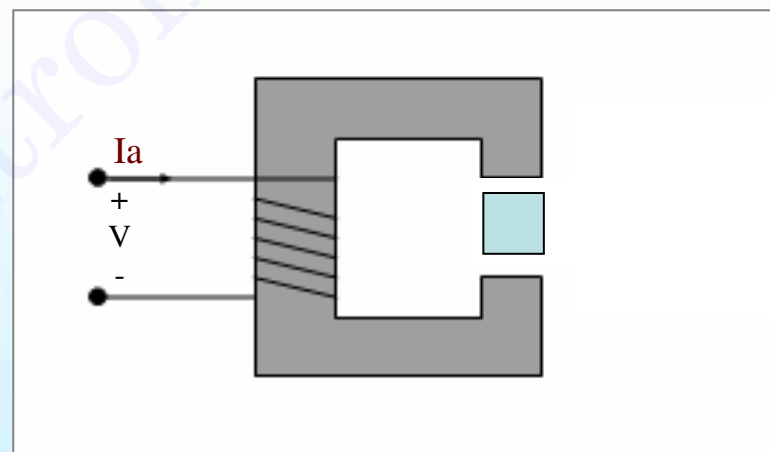
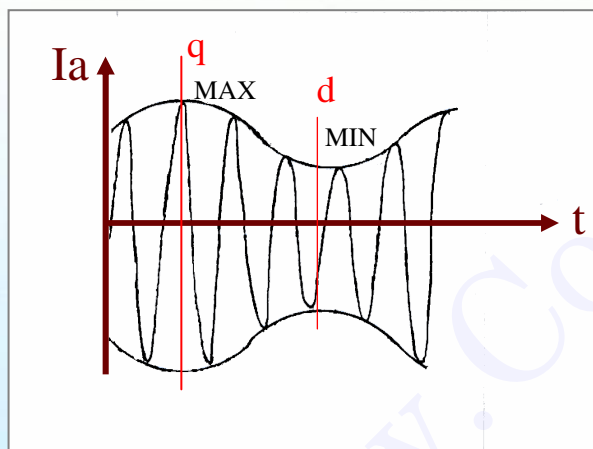
$$X_d = \left| \frac{E(\text{occ})}{I_a(\text{scc})} \right|_{I_f = \text{cte}}$$

بنابراین برای بدست آوردن X_d داریم :



تعیین پارامترهای X_d و X_q با استفاده از آزمایش لغزش

در این روش جریان تحریک صفر می باشد . ماشین سنکرون را به یک شبکه سه فاز وصل می کنیم و روتور آنرا به کمک یک محرک خارجی با سرعتی که اندکی از سرعت سنکرون کمتر است می چرخانیم . ولتاژ در این آزمایش باید حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد ولتاژ نامی باشد منحنی جریان یک فاز در این آزمایش بصورت زیر است :



$$X_d = \frac{V_t}{I_{a(\min)}} \quad \text{و} \quad X_q = \frac{V_t}{I_{a(\max)}}$$



تعیین پارامترهای X_d و X_q با استفاده از روش موتور رلوکتانسی

در این روش نسبت $K = \frac{X_q}{X_d}$ را بدست می آوریم. روش کار چنین است که موتور را به منبع سه فاز وصل کرده و جریان تحریک روتور را وصل می کنیم. وقتی که موتور به سرعت سنکرون رسید جریان تحریک را به تدریج کم می کنیم تا به صفر برسد. در این حالت موتور در اثر گشتاور رلوکتانسی به کار خود ادامه می دهد. بار مکانیکی را آنقدر زیاد می کنیم تا موتور به حد پایداری خود $\delta = 45^\circ$ برسد در این حالت مقادیر V_t ، I_a و P را اندازه گیری می کنیم. روابط بدینگونه اند:

$$P = \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta = \frac{V_t^2}{2X_q} \left(1 - \frac{X_q}{X_d} \right) \sin 2\delta \xrightarrow{\delta = 45^\circ} P_{\max} = \frac{V_t^2}{2X_q} (1 - K)$$

$$\left. \begin{array}{l} V_t \sin \delta = X_q I_q \\ V_t \cos \delta = X_d I_d \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} I_q = \frac{V_t \sin \delta}{X_q} \\ I_d = \frac{V_t \cos \delta}{X_d} \end{array} \right\} \Rightarrow |I_a| = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \xrightarrow{\delta = 45^\circ} \left. \begin{array}{l} P_{\max} \\ I_a \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{P_{\max}}{I_a} = \frac{V_t}{\sqrt{2}} \cdot \frac{(1 - K)}{\sqrt{1 + K^2}} \quad I_a = \frac{V_t}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{1}{X_q}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_d}\right)^2} = \frac{V_t}{\sqrt{2}X_q} \sqrt{1 + K^2}$$



بنام خدا

مبحث پانزدهم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

حالتهای گذرا در ماشین سنکرون



حالت‌های گذرا در ماشین سنکرون

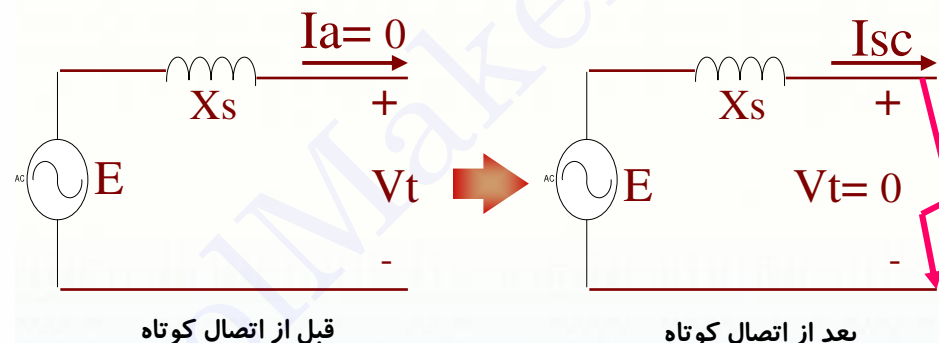
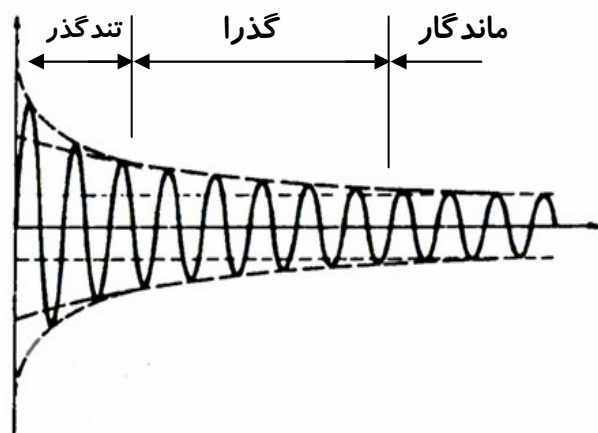
منظور اصلی از حالت گذرا در موتور و ژنراتور این موارد است .



۲- حالت موتوری : در حالت موتوری ، شرایط گذرا را می توان بعنوان تغییرات ناگهانی بار روی محور موتور تعبیر کرد .



بررسی اتصال کوتاه در ژنراتور

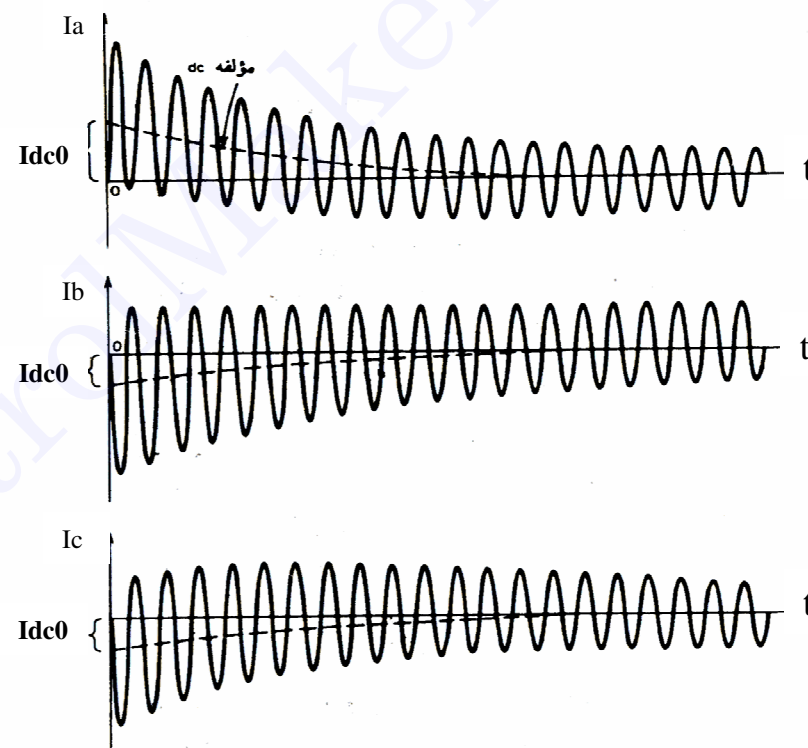
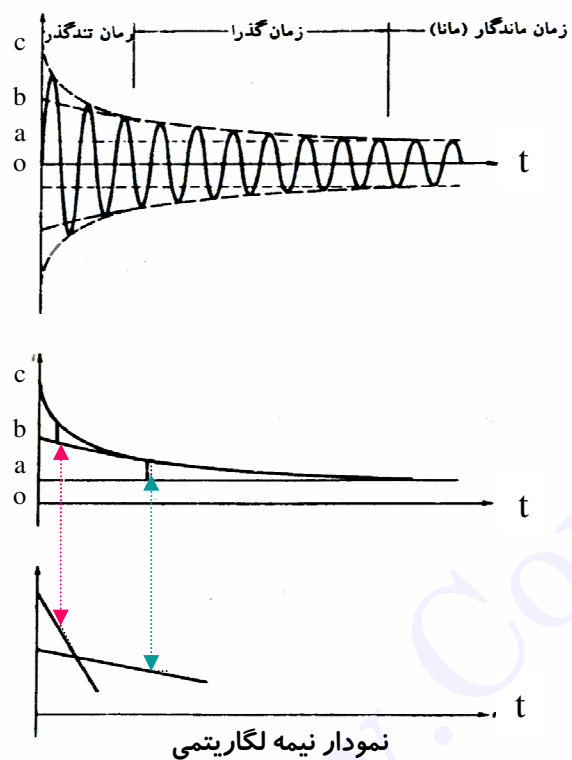


اگر ژنراتور را یک مدار سلفی معمولی می دانستیم انتظار داشتیم دامنه مولفه سینوسی ثابت بوده و فقط یک مولفه dc میرا در جریان ظاهر می شد ولی همانگونه که در نمودار جریان فوق (که با صرف نظر از مولفه dc رسم شده) دیده می شود، دامنه جریان سینوسی، تغییرات زیادی دارد. نکات مهمی که در این نمودار دارای اهمیت است به شرح زیرند:

- ۱- این نمودار را می توان به سه قسمت با زمانهای خاص خود تقسیم کرد.
- ۲- علت وقوع این تغییرات در هر کدام از بازه های زمانی.

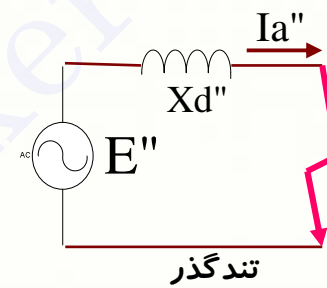
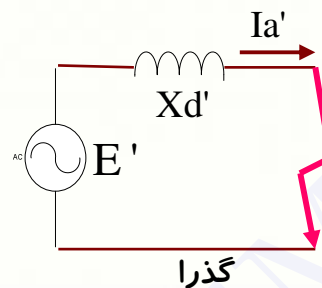
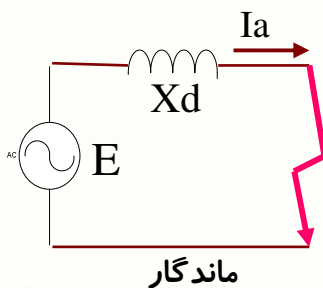


جریانهای اتصال کوتاه ژنراتور سه فاز در حالت بی باری





مدار معادل ژنراتور سنکرون در حالت‌های اتصال کوتاه بی بار و باردار



مدار معادل ژنراتور اتصال و تاه شده در حالت بی باری و بار داری به همین صورت است تنها تفاوت آنها در مقدار ولتاژ القائی آنها می باشد . در حالت بی بار ولتاژهای القائی در تمام حالات یکسان و برابر ولتاژ بی بار ژنراتور می باشند .

در حالت بار دار ولتاژهای القائی را بصورت زیر در نظر می گیرند :

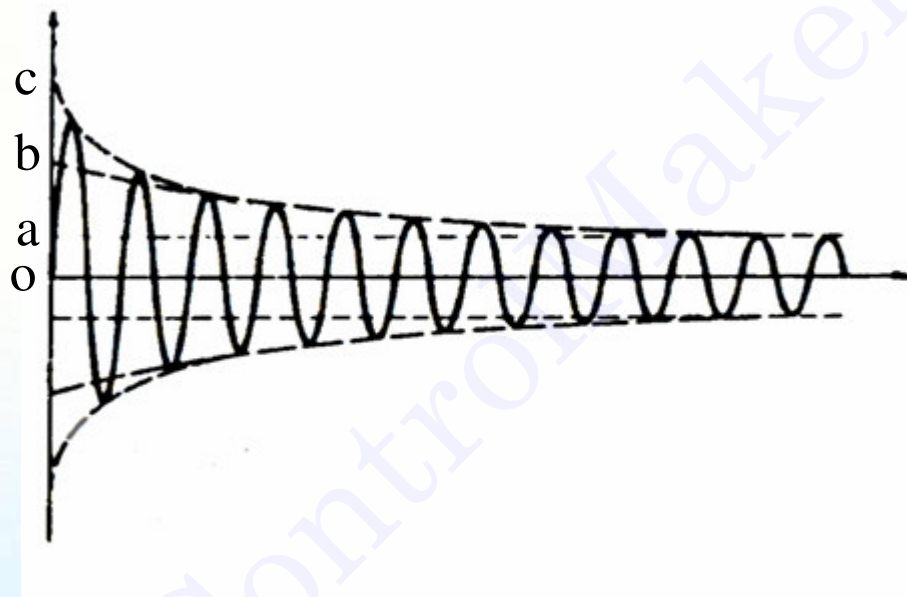
$$E = V_t + jX_d I_a$$

$$E' = V_t + jX_d' I_a$$

$$E'' = V_t + jX_d'' I_a$$



رابطه جریان اتصال کوتاه



$$i_{sc} = \sqrt{2} \left[\underbrace{\frac{E}{X_d}}_{oa} + \underbrace{\left(\frac{E}{X'_d} - \frac{E}{X_d} \right)}_{ab} e^{\frac{-t}{T_{d0}}} + \underbrace{\left(\frac{E}{X''_d} - \frac{E}{X'_d} \right)}_{bc} e^{\frac{-t}{T'_{d0}}} \right] \sin \omega t + I_{dco} e^{\frac{-t}{T_a}}$$



بنام خدا

مبحث شانزدهم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

بررسی پایداری ماشین سنکرون



بررسی پایداری ماشین سنکرون

منظور از پایداری حالتی است که ورودیها و خروجیهای ماشین متعادل بوده و ماشین بطور عادی در حال کار است. یعنی در حالت پایدار معادله زیر باید برقرار باشد :

$$P_m - P_l = 0$$

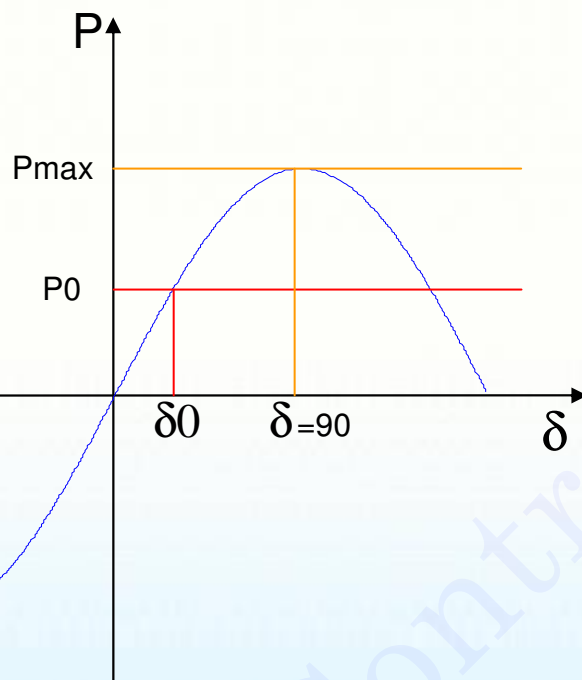
پایداری حالت دایم (استاتیک)

دو نوع پایداری برای ماشین سنکرون تعریف می شود

پایداری گذرا (دینامیک)



پایداری حالت دایم (استاتیک ، مانا)

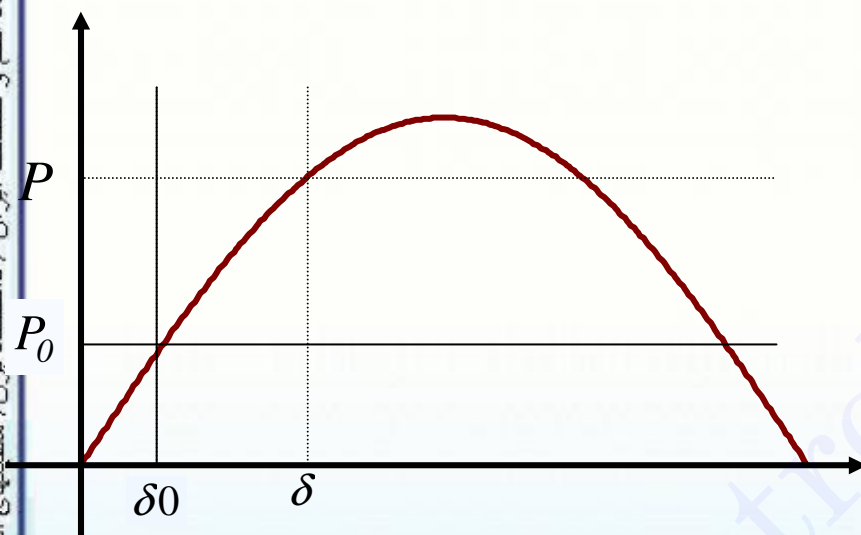


فرض کنیم ماشین با توان اولیه P_0 و زاویه δ_0 مشغول به کار است . اگر بار روی ماشین به آرامی افزایش پیدا کند ، δ زیاد می شود و توان مکانیکی مورد نیاز بار تامین می شود . اگر این فرایند ادامه یابد تا $\delta = 90^\circ$ ، از آن به بعد دیگر با تغییر δ ، توان مکانیکی خروجی موتور بیشتر نخواهد شد و در صورت افزایش بار موتور زیر بار خواهد ایستاد . بنا بر این $\delta = 90^\circ$ (در موتور قطب صاف) حد پایداری استاتیک می باشد .

نکته مهمی که در پایداری استاتیک مطرح است ، آنستکه در اینجا تغییرات بار آرام می باشد .



پایداری حالت دایم (استاتیک ، مانا)



در پایداری دینامیکی علاوه بر میزان تغییر بار ، سرعت تغییر بار نیز مطرح است. برای روشن شدن مطلب شکل روبرو را ملاحظه کنید :

اگر توان بار به آرامی از P_0 به P افزایش یابد ، زاویه ماشین از δ_0 به δ می رود . اما اگر تغییر توان ماشین از P_0 به P ناگهانی و بصورت پله ای باشد ، آیا باز هم ماشین پایدار خواهد ماند و قادر به تامین توان جدید خواهد بود ؟

ملاحظه شده که در تغییر پله ای بار ، حالت ماشین حول نقطه کار نهائی نوسان کرده تا در نهایت بوسیله عوامل میرا کننده در نقطه کار نهائی مقیم شود . در شرایط خاص این نوسانات ممکن است باعث ناپایداری ماشین شود که در بحث پایداری دینامیکی به این موضوع پرداخته می شود .



ادامه بحث پایداری دینامیکی

پیش از ارائه روابطی در این باره باید به دو نکته اشاره کرد :

اول در نظر گرفتن اثر میرائی های موجود در سیستم (اصطکاک و بادخوری) به چند روش ممکن است:

1) آنها را بطور دقیق در روابط وارد کنیم

2) از داخل کردن آنها در روابط پرهیز کرده ولی در تفسیر نتایج، اثر آنها را در نظر بگیریم

(در اینجا برای سادگی بیان مطلب از روش سوم بهره گرفته ایم .)

دوم در بررسی پایداری دینامیکی این مساله مهم است که میزان تغییر ایجاد شده کوچک است یا بزرگ . در مورد تغییرات کوچک می توانیم از روش خطی سازی و سیگنال کوچک به بررسی مساله پردازیم در حالی که در تغییرات بزرگ باید پاسخ معادلات حاکم را به روشی بطور دقیق بدست آوریم .

ابتدا روش سیگنال کوچک بیان شده آنگاه در باب روش دوم مطالبی ارائه می گردد .



بررسی پایداری سیستم با وجود تغییرات کوچک

$$\sum_j T_j = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

معادله مکانیکی حاکم بر ماشین چنین می باشد:

که در اینجا J ممان اینرسی و B ضریب اصطکاک می باشد

گفتیم که ما در اینجا اثر اصطکاک را در تفسیر نتایج استفاده می کنیم و در روابط از آن صرف نظر می کنیم در نتیجه معادله ۱ به شکل زیر در می آید:

$$T_i - T_m = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2)$$

محرك

مقاوم

$$\theta = \omega t + \delta \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \omega + \frac{d\delta}{dt} \Rightarrow \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (3)$$

در ضمن با فرض
ثابت بودن سرعت
داریم:

که در اینجا δ زاویه بار ماشین می باشد.



بررسی پایداری سیستم با وجود تغییرات کوچک

معادله نوسان (swing equation) :

$$\textcircled{2} \textcircled{3} \rightarrow T_i - T_m = J \frac{d^2 \delta}{dt^2} \xrightarrow{\text{ضرب طرفین در } \omega} P_i - P_m = \underbrace{J\omega}_{M} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \textcircled{4}$$

M ، مومنتوم

در مورد موتور سنکرون، با جایگذاری توان محرک و توان مقاوم داریم :

$$P_m = P_{\max} \sin \delta \xrightarrow{\text{جایگذاری}} P_i - P_{\max} \sin \delta = J\omega \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

همانطور که ملاحظه میشود این معادله غیر خطی است



حل سیگنال کوچک معادله نوسان

در حالت پایدار اولیه داریم: $P_i = P_{m0}$ و $P_{m0} = \frac{EV}{X} \sin \delta_0$

بعد از اعمال تغییر داریم: $P_m = P_{m0} + \Delta P_m$ و $\delta = \delta_0 + \Delta \delta$ (5)

$$(4) \quad P_i - P_m = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad \Rightarrow (5) \quad P_i - (P_{m0} + \Delta P_m) = M \frac{d^2 (\delta_0 + \Delta \delta)}{dt^2}$$

$$\Rightarrow \underbrace{P_i - P_{m0}}_0 - \Delta P_m = M \underbrace{\frac{d^2 \delta_0}{dt^2}}_0 + M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2}$$

$$\Rightarrow -\Delta P_m = M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2}$$

$$\Rightarrow M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \Delta P_m = 0 \quad (6)$$

در این مرحله ΔP_m را هم بر حسب $\Delta \delta$ می نویسیم

حل سیگنال کوچک معادله نوسان (ادامه)

$$P_m = \frac{EV}{X} \sin \delta$$

$$P_{m0} + \Delta P_m = \frac{EV}{X} \sin(\delta_0 + \Delta\delta) = \frac{EV}{X} \sin \delta_0 + \underbrace{\frac{EV}{X} \times \frac{d \sin \delta}{dt} \bigg|_{\delta_0}}_{P_{\max}} \Delta\delta$$

$$\Delta P_m = \frac{EV}{X} \cos \delta_0 \Delta\delta = P_{\max} \cos \delta_0 \Delta\delta \quad (7)$$

$$M \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + P_{\max} \cos \delta_0 \Delta\delta = 0$$

در حوزه لاپلاس $(MS^2 + P_{\max} \cos \delta_0) \Delta\delta = 0 \Rightarrow S = \pm \sqrt{\frac{-P_{\max} \cos \delta_0}{M}}$

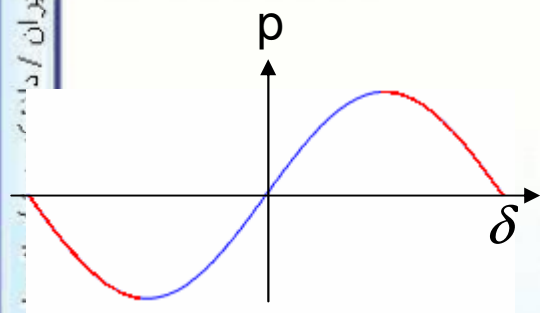




حل سیگنال کوچک معادله نوسان (ادامه)

$$S = \pm \sqrt{\frac{-P_{\max} \cos \delta_0}{M}}$$

تعبیر عبارت روبرو :



این رابطه می گوید اگر $P_{\max} \cos \delta_0$ منفی باشد مشخصه سیستم دارای دو ریشه حقیقی است ، یکی مثبت دیگری منفی ، که ریشه مثبت باعث ناپایداری ماشین می شود . این نواحی در شکل روبرو با رنگ قرمز نشان داده شده اند .

اگر $P_{\max} \cos \delta_0$ مثبت باشد مشخصه سیستم دارای دو ریشه موهومی است و در اثر بروز یک تغییر ماشین شروع به نوسان می کند که اگر اثر میرائی های موجود را در نظر بگیریم می توانیم بگوئیم که نوسانات بعد از مدتی میرا شده و سیستم به پایداری میرسد .



بررسی پایداری دینامیکی ماشین سنکرون در حضور تغییرات بزرگ (معیار سطوح برابر)

گفتیم که در این حالت باید معادله نوسان را بطور دقیق حل کنیم که این کار دارای پیچیدگی نسبتاً زیادی است. برای حل این مشکل روشی را ارائه می دهیم که با کمک آن بدون حل معادله نوسان بتوانیم یک برآورد کلی راجع به پایدار بودن یا نبودن سیستم تحت بررسی به عمل آوریم.

$$4 \Rightarrow P_i - P_m = M \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

ضرب طرفین در $2d\delta/dt$ و گرفتن انتگرال

$$\int \frac{2d\delta}{dt} (P_i - P_m) dt = \int \left(M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \right) \frac{2d\delta}{dt} dt$$

$$\Rightarrow \frac{2}{M} \int (P_i - P_m) d\delta = \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \quad 8$$



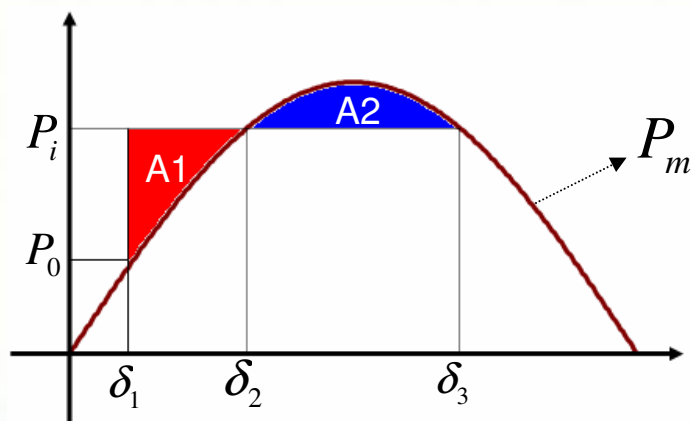
معیار سطوح برابر (ادامه)

ممکنست ماشین چند بار نوسان کند بنا براین $d\delta$ چند بار در بازه δ_1 و δ_2 رفت و برگشت خواهد داشت. اما می توان ثابت کرد که اگر برای اولین نوسان انتگرال فوق برقرار باشد برای نوسانات بعدی هم برقرار خواهد بود لذا ما فقط یک حرکت رفت (از تعداد حرکات رفت و برگشت ممکن) را بررسی می کنیم.

$$(8) \int_{\delta_1}^{\delta_3} (P_i - P_m) d\delta = 0$$



معیار سطوح برابر (ادامه)



اما مفهوم این رابطه چیست ؟

$$\int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_i - P_m) d\delta + \int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_i - P_m) d\delta = 0 \implies \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_i - P_m) d\delta = - \int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_i - P_m) d\delta$$

$$\implies \underbrace{\int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_i - P_m) d\delta}_{A1 \text{ area}} = \underbrace{\int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_m - P_i) d\delta}_{A2 \text{ area}}$$

$A1 = A2 \implies$ پایداری مرزی

$A1 < A2 \implies$ پایداری برقرار می ماند

$A1 > A2 \implies$ سنکرونیزم از دست می رود

مثال



یک موتور سنکرون سه فاز با مشخصات زیر مفروض است :

$$X_d = 0.8 \text{ PU} \quad \text{و} \quad X'_d = 0.3 \text{ PU}$$

جریان تحریک طوری تنظیم شده که $E_f = 1 \text{ PU}$ و سنکرونیزم بین موتور و شبکه بی نهایت برقرار شده است .

الف (حداکثر گشتاوری که می توان به آرامی به موتور اعمال نمود تا موتور از حالت سنکرونیزم خارج نشود چقدر است ؟

ب (حداکثر گشتاوری که می توان بطور ناگهانی به محور موتور اعمال نمود بدون اینکه موتور از حالت سنکرون خارج شود چقدر است ؟ آیا موتور می تواند تحت این بار بماند ؟

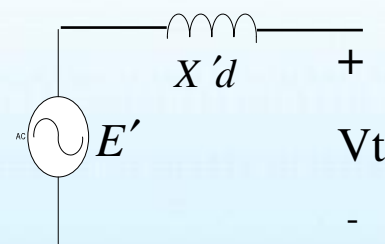
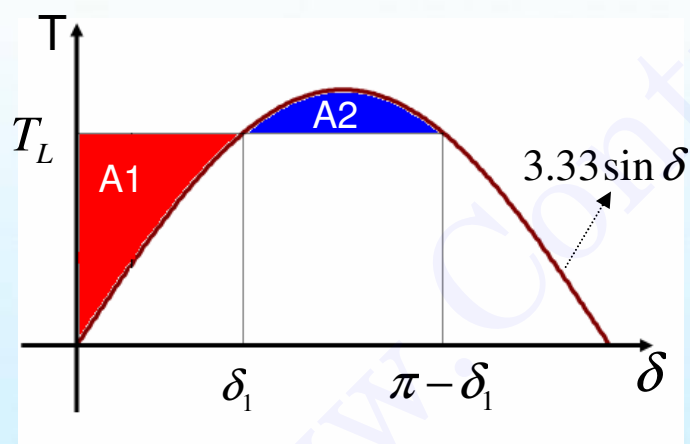
پاسخ



(الف)

$$\sin \delta = 1 \Rightarrow T = \frac{V_t E_f}{X_d} (PU) = \frac{1}{0.8} = 1.25$$

ب) حد اکثر بار قابل اعمال به موتور مربوط به زمانیست که سطح شتاب دهنده و سطح شتاب گیرنده مساوی باشند .



مدار معادل حالت گذرا



پاسخ (ادامه)

$$P = \frac{E'V}{X'd} \sin \delta \Rightarrow T = \frac{E'V}{\omega X'd} \sin \delta$$

$$E' = E - X'd I_a \xrightarrow{I_a=0} E' = E = 1 \text{ PU}$$

$$\Rightarrow T = \frac{1}{1 \times 0.3} \sin \delta = 3.33 \sin \delta$$

سطوح A1 و A2 را محاسبه کرده و با یکدیگر برابر قرار می دهیم تا δ_1 بدست آید

$$A1 = T_L \delta_1 - \int_0^{\delta_1} (3.33 \sin \delta) d\delta = (3.33 \sin \delta_1) \delta_1 + 3.33(\cos \delta_1 - 1)$$

$$A2 = \int_{\delta_1}^{\pi - \delta_1} (3.33 \sin \delta) d\delta - T_L (\pi - 2\delta_1) = (6.66 \cos \delta_1) - (3.33 \sin)(\pi - 2\delta_1)$$



پاسخ (ادامه)

$$A1=A2 \implies \delta_1 = 46.5 \implies T_L = 3.33 \sin \delta_1 = 2.42(pu)$$

موتور نمی تواند تحت این بار به کار خود ادامه دهد چرا که این بار فراتر از حد پایداری
استاتیکی ماشین می باشد



بنام خدا

مبحث شانزدهم

ماشینهای الکتریکی III

ماشینهای الکتریکی III

بررسی پایداری ماشین سنکرون



بررسی پایداری ماشین سنکرون

منظور از پایداری حالتی است که ورودیها و خروجیهای ماشین متعادل بوده و ماشین بطور عادی در حال کار است. یعنی در حالت پایدار معادله زیر باید برقرار باشد :

$$P_m - P_l = 0$$

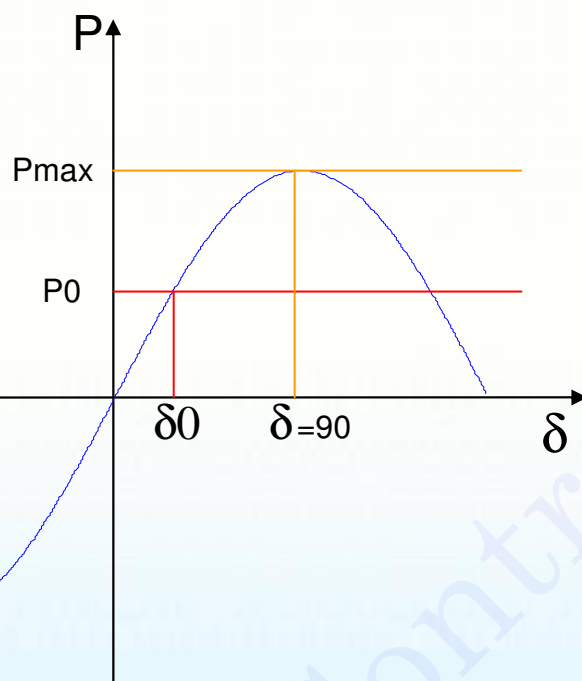
پایداری حالت دایم (استاتیک)

دو نوع پایداری برای ماشین
سنکرون تعریف می شود

پایداری گذرا (دینامیک)



پایداری حالت دایم (استاتیک ، مانا)

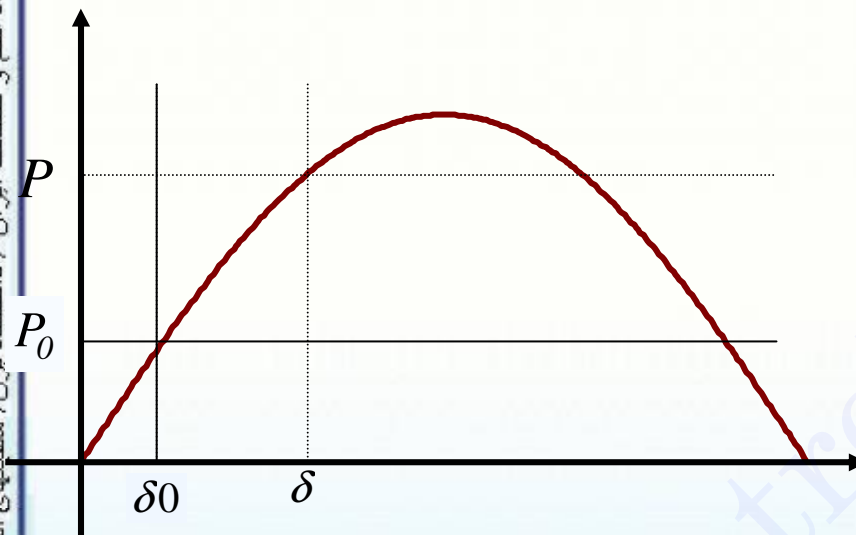


فرض کنیم ماشین با توان اولیه P_0 و زاویه δ_0 مشغول به کار است . اگر بار روی ماشین به آرامی افزایش پیدا کند ، δ زیاد می شود و توان مکانیکی مورد نیاز بار تامین می شود . اگر این فرایند ادامه یابد تا $\delta = 90^\circ$ ، از آن به بعد دیگر با تغییر δ ، توان مکانیکی خروجی موتور بیشتر نخواهد شد و در صورت افزایش بار موتور زیر بار خواهد ایستاد . بنا بر این $\delta = 90^\circ$ (در موتور قطب صاف) حد پایداری استاتیک می باشد .

نکته مهمی که در پایداری استاتیک مطرح است ، آنستکه در اینجا تغییرات بار آرام می باشد .



پایداری حالت دایم (استاتیک ، مانا)



در پایداری دینامیکی علاوه بر میزان تغییر بار ، سرعت تغییر بار نیز مطرح است. برای روشن شدن مطلب شکل روبرو را ملاحظه کنید :

اگر توان بار به آرامی از P_0 به P افزایش یابد ، زاویه ماشین از δ_0 به δ می رود . اما اگر تغییر توان ماشین از P_0 به P ناگهانی و بصورت پله ای باشد ، آیا باز هم ماشین پایدار خواهد ماند و قادر به تامین توان جدید خواهد بود ؟

ملاحظه شده که در تغییر پله ای بار ، حالت ماشین حول نقطه کار نهائی نوسان کرده تا در نهایت بوسیله عوامل میرا کننده در نقطه کار نهائی مقیم شود . در شرایط خاص این نوسانات ممکن است باعث ناپایداری ماشین شود که در بحث پایداری دینامیکی به این موضوع پرداخته می شود .



ادامه بحث پایداری دینامیکی

پیش از ارائه روابطی در این باره باید به دو نکته اشاره کرد :

اول در نظر گرفتن اثر میرائی های موجود در سیستم (اصطکاک و بادخوری) به چند روش ممکن است:

1 آنها را بطور دقیق در روابط وارد کنیم

2 از داخل کردن آنها در روابط پرهیز کرده ولی در تفسیر نتایج، اثر آنها را در نظر بگیریم

(در اینجا برای سادگی بیان مطلب از روش سوم بهره گرفته ایم .)

دوم در بررسی پایداری دینامیکی این مساله مهم است که میزان تغییر ایجاد شده کوچک است یا بزرگ . در مورد تغییرات کوچک می توانیم از روش خطی سازی و سیگنال کوچک به بررسی مساله پردازیم در حالی که در تغییرات بزرگ باید پاسخ معادلات حاکم را به روشی بطور دقیق بدست آوریم .

ابتدا روش سیگنال کوچک بیان شده آنگاه در باب روش دوم مطالبی ارائه می گردد .



بررسی پایداری سیستم با وجود تغییرات کوچک

$$\sum_j T_j = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

معادله مکانیکی حاکم بر ماشین چنین می باشد:

که در اینجا J ممان اینرسی و B ضریب اصطکاک می باشد

گفتیم که ما در اینجا اثر اصطکاک را در تفسیر نتایج استفاده می کنیم و در روابط از آن صرف نظر می کنیم در نتیجه معادله ۱ به شکل زیر در می آید:

$$T_i - T_m = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2)$$

محرك

مقاوم

$$\theta = \omega t + \delta \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \omega + \frac{d\delta}{dt} \Rightarrow \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (3)$$

در ضمن با فرض
ثابت بودن سرعت
داریم:

که در اینجا δ زاویه بار ماشین می باشد.



بررسی پایداری سیستم با وجود تغییرات کوچک

معادله نوسان (swing equation) :

$$\textcircled{2} \textcircled{3} \rightarrow T_i - T_m = J \frac{d^2 \delta}{dt^2} \xrightarrow{\text{ضرب طرفین در } \omega} P_i - P_m = \underbrace{J\omega}_{M} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \textcircled{4}$$

M ، مومنتوم

در مورد موتور سنکرون، با جایگذاری توان محرک و توان مقاوم داریم :

$$P_m = P_{\max} \sin \delta \xrightarrow{\text{جایگذاری}} P_i - P_{\max} \sin \delta = J\omega \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

همانطور که ملاحظه میشود این معادله غیر خطی است



حل سیگنال کوچک معادله نوسان

در حالت پایدار اولیه داریم: $P_i = P_{m0}$ و $P_{m0} = \frac{EV}{X} \sin \delta_0$

بعد از اعمال تغییر داریم: $P_m = P_{m0} + \Delta P_m$ و $\delta = \delta_0 + \Delta \delta$ (5)

$$(4) P_i - P_m = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad \Rightarrow (5) P_i - (P_{m0} + \Delta P_m) = M \frac{d^2 (\delta_0 + \Delta \delta)}{dt^2}$$

$$\Rightarrow \cancel{P_i - P_{m0}} - \Delta P_m = M \cancel{\frac{d^2 \delta_0}{dt^2}} + M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2}$$

0 0

$$\Rightarrow -\Delta P_m = M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2}$$

$$\Rightarrow M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \Delta P_m = 0 \quad (6)$$

در این مرحله ΔP_m را هم بر حسب $\Delta \delta$ می نویسیم

حل سیگنال کوچک معادله نوسان (ادامه)

$$P_m = \frac{EV}{X} \sin \delta$$

$$P_{m0} + \Delta P_m = \frac{EV}{X} \sin(\delta_0 + \Delta\delta) = \frac{EV}{X} \sin \delta_0 + \underbrace{\frac{EV}{X} \times \frac{d \sin \delta}{dt} \bigg|_{\delta_0}}_{P_{\max}} \Delta\delta$$

$$\Delta P_m = \frac{EV}{X} \cos \delta_0 \Delta\delta = P_{\max} \cos \delta_0 \Delta\delta \quad (7)$$

$$M \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + P_{\max} \cos \delta_0 \Delta\delta = 0$$

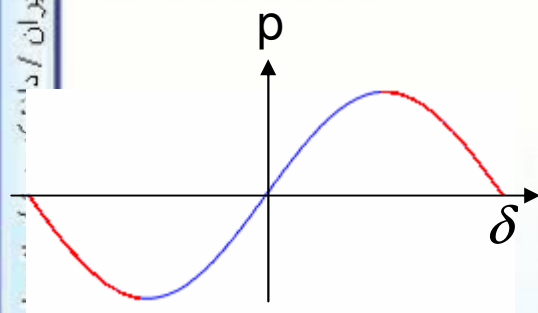
در حوزه لاپلاس $(MS^2 + P_{\max} \cos \delta_0) \Delta\delta = 0 \Rightarrow S = \pm \sqrt{\frac{-P_{\max} \cos \delta_0}{M}}$



حل سیگنال کوچک معادله نوسان (ادامه)

$$S = \pm \sqrt{\frac{-P_{\max} \cos \delta_0}{M}}$$

تعبیر عبارت روبرو :



این رابطه می گوید اگر $P_{\max} \cos \delta_0$ منفی باشد مشخصه سیستم دارای دو ریشه حقیقی است ، یکی مثبت دیگری منفی ، که ریشه مثبت باعث ناپایداری ماشین می شود . این نواحی در شکل روبرو با رنگ قرمز نشان داده شده اند .

اگر $P_{\max} \cos \delta_0$ مثبت باشد مشخصه سیستم دارای دو ریشه موهومی است و در اثر بروز یک تغییر ماشین شروع به نوسان می کند که اگر اثر میرائی های موجود را در نظر بگیریم می توانیم بگوئیم که نوسانات بعد از مدتی میرا شده و سیستم به پایداری میرسد .



بررسی پایداری دینامیکی ماشین سنکرون در حضور تغییرات بزرگ (معیار سطوح برابر)

گفتیم که در این حالت باید معادله نوسان را بطور دقیق حل کنیم که این کار دارای پیچیدگی نسبتاً زیادی است. برای حل این مشکل روشی را ارائه می دهیم که با کمک آن بدون حل معادله نوسان بتوانیم یک برآورد کلی راجع به پایدار بودن یا نبودن سیستم تحت بررسی به عمل آوریم.

$$4 \quad P_i - P_m = M \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

ضرب طرفین در $2d\delta/dt$ و گرفتن انتگرال

$$\int \frac{2d\delta}{dt} (P_i - P_m) dt = \int \left(M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \right) \frac{2d\delta}{dt} dt$$

$$\Rightarrow \frac{2}{M} \int (P_i - P_m) d\delta = \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \quad 8$$



معیار سطوح برابر (ادامه)

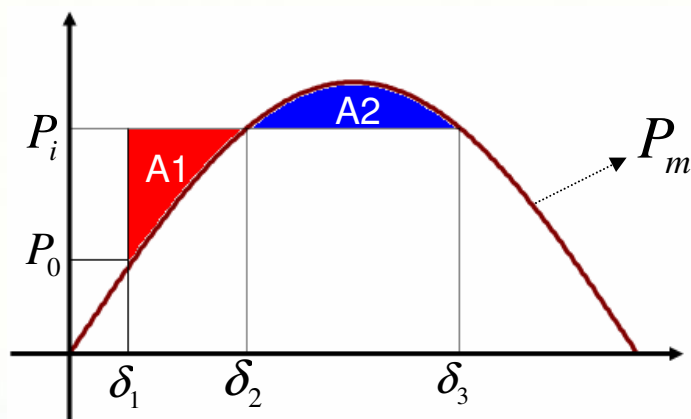
ممکنست ماشین چند بار نوسان کند بنا براین $d\delta$ چند بار در بازه δ_1 و δ_2 رفت و برگشت خواهد داشت. اما می توان ثابت کرد که اگر برای اولین نوسان انتگرال فوق برقرار باشد برای نوسانات بعدی هم برقرار خواهد بود لذا ما فقط یک حرکت رفت (از تعداد حرکات رفت و برگشت ممکن) را بررسی می کنیم .

$$(8) \int_{\delta_1}^{\delta_3} (P_i - P_m) d\delta = 0$$



معیار سطوح برابر (ادامه)

اما مفهوم این رابطه چیست ؟



$$\int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_i - P_m) d\delta + \int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_i - P_m) d\delta = 0 \implies \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_i - P_m) d\delta = - \int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_i - P_m) d\delta$$

$$\implies \underbrace{\int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_i - P_m) d\delta}_{A1 \text{ area}} = \underbrace{\int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_m - P_i) d\delta}_{A2 \text{ area}}$$

$A1 = A2 \implies$ پایداری مرزی

$A1 < A2 \implies$ پایداری برقرار می ماند

$A1 > A2 \implies$ سنکرونیزم از دست می رود

مثال



یک موتور سنکرون سه فاز با مشخصات زیر مفروض است :

$$X_d = 0.8 \text{ PU} \quad \text{و} \quad X'_d = 0.3 \text{ PU}$$

جریان تحریک طوری تنظیم شده که $E_f = 1 \text{ PU}$ و سنکرونیزم بین موتور و شبکه بی نهایت برقرار شده است .

الف (حداکثر گشتاوری که می توان به آرامی به موتور اعمال نمود تا موتور از حالت سنکرونیزم خارج نشود چقدر است ؟

ب (حداکثر گشتاوری که می توان بطور ناگهانی به محور موتور اعمال نمود بدون اینکه موتور از حالت سنکرون خارج شود چقدر است ؟ آیا موتور می تواند تحت این بار بماند ؟

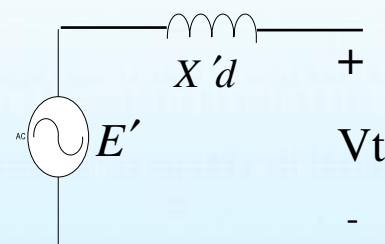
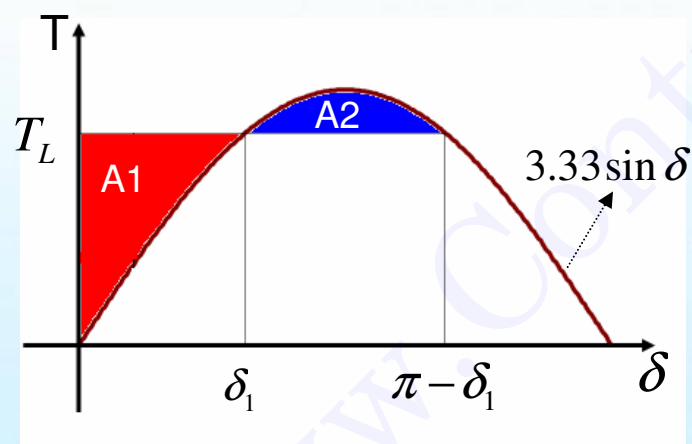
پاسخ



(الف)

$$\sin \delta = 1 \Rightarrow T = \frac{V_t E_f}{X_d} (PU) = \frac{1}{0.8} = 1.25$$

ب) حد اکثر بار قابل اعمال به موتور مربوط به زمانیست که سطح شتاب دهنده و سطح شتاب گیرنده مساوی باشند .



مدار معادل حالت گذرا



پاسخ (ادامه)

$$P = \frac{E'V}{X'd} \sin \delta \Rightarrow T = \frac{E'V}{\omega X'd} \sin \delta$$

$$E' = E - X'd I_a \quad \xrightarrow{I_a=0} \quad E' = E = 1 \text{ PU}$$

$$\Rightarrow T = \frac{1}{1 \times 0.3} \sin \delta = 3.33 \sin \delta$$

سطوح A1 و A2 را محاسبه کرده و با یکدیگر برابر قرار می دهیم تا δ_1 بدست آید

$$A1 = T_L \delta_1 - \int_0^{\delta_1} (3.33 \sin \delta) d\delta = (3.33 \sin \delta_1) \delta_1 + 3.33(\cos \delta_1 - 1)$$

$$A2 = \int_{\delta_1}^{\pi - \delta_1} (3.33 \sin \delta) d\delta - T_L (\pi - 2\delta_1) = (6.66 \cos \delta_1) - (3.33 \sin)(\pi - 2\delta_1)$$



پاسخ (ادامه)

$$A1=A2 \implies \delta_1 = 46.5 \implies T_L = 3.33 \sin \delta_1 = 2.42(pu)$$

موتور نمی تواند تحت این بار به کار خود ادامه دهد چرا که این بار فراتر از حد پایداری
استاتیکی ماشین می باشد



به نام خدا

مبحث هفدهم

ترانسفورماتور سه فاز

کلیات ترانسفورماتور سه فاز



فهرست :

ترانسفورماتور سه فاز

مقدمه

بررسی اتصالات و آرایشهای ترانسفورماتور سه فاز

آرایشهای خاص

آرایش زیگزاگ - آرایش اسکات - آرایش مثلث باز

مرور گروه بندی ترانسفورماتور سه فاز

مبحث ویژه

هارمونیکها در ترانسفورماتور سه فاز

مقدمه

دلیل استفاده از ترانسفورماتور در سیستم قدرت :

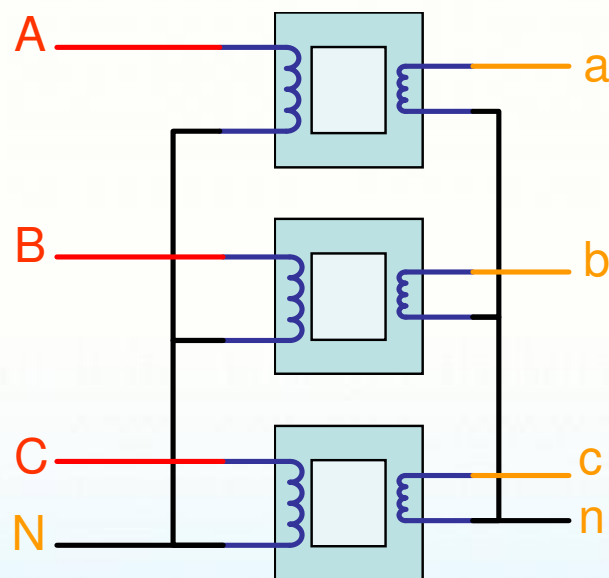
محدودیت ساخت ژنراتورها موجب شده که ولتاژ آنها از حدود بیست (و حداکثر سی) کیلو ولت تجاوز نکند که این ولتاژ برای انتقال قدرت مناسب نمی باشد و باعث بروز تلفات زیاد می گردد. لذا بحث استفاده از ترانسفورماتورهای سه فاز مطرح گردیده است .

دسته بندی ترانسهای سه فاز از نظر رنج ولتاژ :

ترانسهای با ولتاژ ۱۱ ، ۲۰ کیلو ولت	←	ترانس توزیع
ترانس با ولتاژ ۶۳ کیلو ولت	←	ترانس فوق توزیع
ترانسهای با ولتاژ ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلو ولت	←	ترانس انتقال



سیر تکاملی و انواع ترانسفورماتور سه فاز از نظر ساختمان



اتصال YNyn

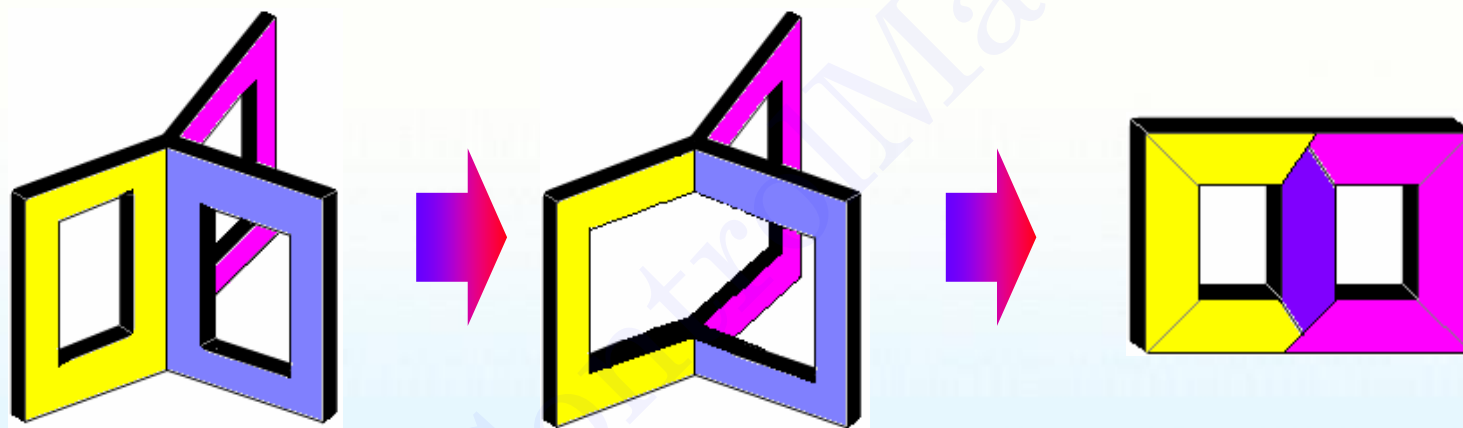
اولین آرایشی که بعنوان ترانس سه فاز مطرح شده و بکار رفته است ، شامل سه ترانس تکفاز است که در کنار هم بصورت یک مجموعه تحت عنوان گروه ترانس سه فاز یا بانک ترانس سه فاز مورد استفاده قرار گرفته است .

یکی از محاسن چنین آرایشی ، امکان تعویض هر کدام از فازها در صورت بروز نقص در آن فاز است و این یعنی نیاز به واحد یدکی کوچکتر و بعلاوه در صورت نبودن واحد یدکی امکان تامین قسمتی از بار توسط دو ترانس باقی مانده (اتصال مثلث باز) وجود دارد تا زمانیکه ترانس معیوب تعمیر شود .



سیر تکاملی و انواع ترانسفورماتور سه فاز از نظر ساختمان (ادامه)

عیب آرایش قبل (بانک ترانس سه فاز) وزن بالای هسته آن است. برای رفع این عیب طرح زیر پیشنهاد شده است:

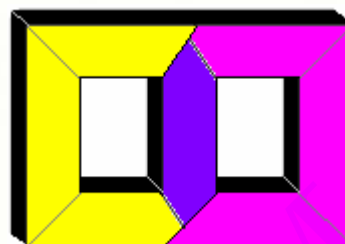


در کار متعادل شار عبوری از
ستون وسط صفر است پس
حذف آن بلا مانع می باشد.

ساخت چنین هسته ای
مشکل و حجم مورد نیاز
برای قرار دادن ترانس
(حجم مخزن) زیاد است.



سیر تکاملی و انواع ترانسفورماتور سه فاز از نظر ساختمان (ادامه)



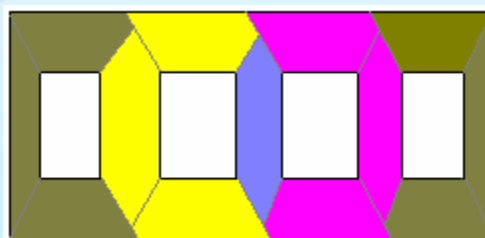
این هسته که آنرا هسته ستونی گویند دارای دو عیب است :

الف) یکسان نبودن مقاومت مغناطیسی مسیر شار فازهای مختلف

ب) در کار نا متعادل که جمع شارها صفر نیست شار منتهجه مسیر خود را از داخل دیواره

تانک می بندد که این باعث افزایش حرارت ترانس و کاهش راندمان می شود .

برای رفع عیب دوم گاهی از طرح زیر استفاده می شود :



هسته زرهی (پنج ستونه)



سیر تکاملی و انواع ترانسفورماتور سه فاز از نظر ساختمان (ادامه)



نکته: در ترانس روغنی ، روغن علاوه بر خنک کنندگی نقش عایقی نیز دارد

تقسیم بندی دیگری که در ترانسهای سه فاز انجام می شود بر حسب نوع اتصال و سربندیهای فازهای آن می باشد که در ادامه به آن پرداخته می شود .



روش بدست آوردن پارامترهای ترانس سه فاز

آزمایش اتصال کوتاه

از دو آزمایش برای این کار استفاده می شود

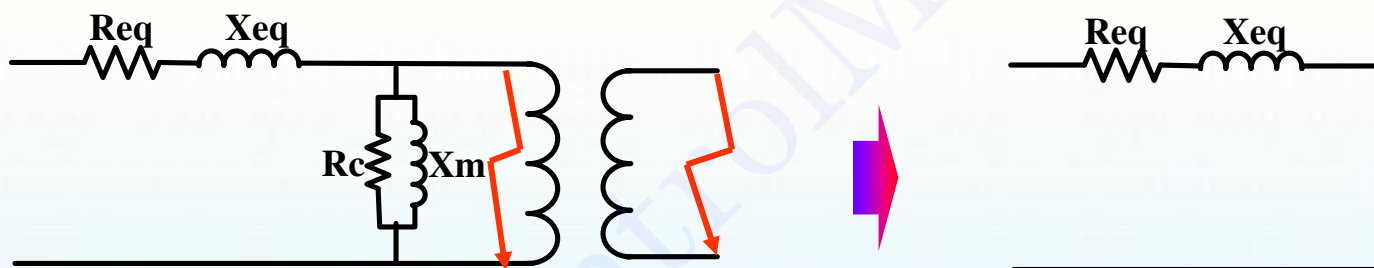
آزمایش مدار باز

در ترانس سه فاز نتایج آزمایشهای بالا ممکن است در حالت اتصال ستاره یا مثلث بدست آمده باشند . ما همیشه با توجه به نوع اتصال مقادیر مربوط به یک فاز را ، بدست می آوریم سپس مطابق روشی که در ترانس تکفاز دنبال می شد به محاسبه پارامترها می پردازیم .



روش بدست آوردن پارامترهای ترانس سه فاز (آزمایش اتصال کوتاه)

در این آزمایش که از طرف **فشار قوی** انجام می شود ، مدار معادل به شکل زیر در می آید که مقادیر المانهای آنرا می توان بصورت زیر حساب کرد .

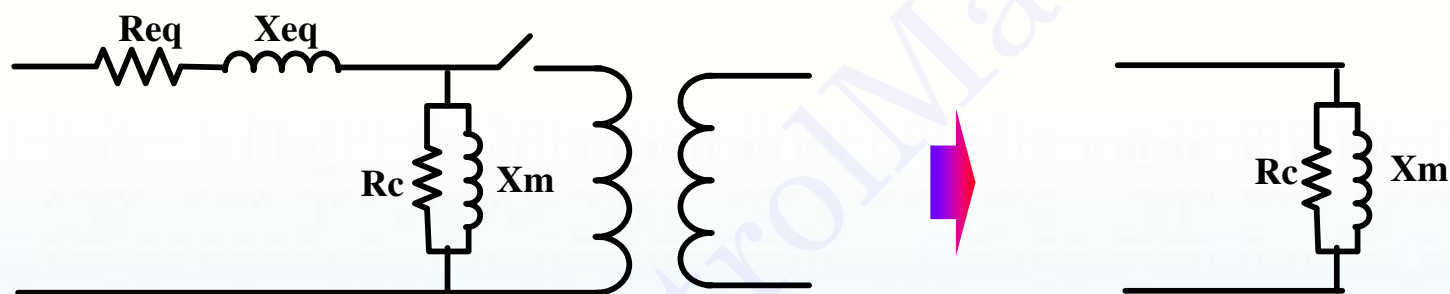


$$R_{eq} = \frac{P_{SC1ph}}{I_{1ph}^2} \quad \text{و} \quad Z_{eq} = \frac{V_{1ph}}{I_{1ph}} \quad \text{و} \quad X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

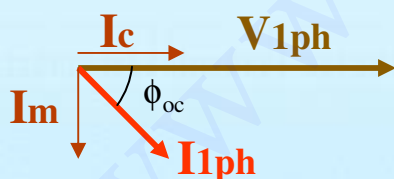


روش بدست آوردن پارامترهای ترانس سه فاز (آزمایش مدار باز)

این آزمایش از طرف **فشار ضعیف** انجام می شود . مدار معادل به شکل زیر در می آید که مقادیر المانهای آنرا می توان بصورت زیر حساب کرد .



در اینجا از X_{eq} و R_{eq} بخاطر کوچک بودن در برابر X_m و R_c صرف نظر شده است .



$$I_m = I_{1ph} \sin(\phi_{oc})$$

$$I_c = I_{1ph} \cos(\phi_{oc})$$

$$X_m = \frac{V_{1ph}}{I_m} \quad \text{و} \quad R_c = \frac{V_{1ph}}{I_c}$$



به نام خدا

مبحث هجدهم

ترانسفورماتور سه فاز

انواع اتصالات در ترانس سه فاز



انواع اتصالات در ترانس سه فاز

معرفی نمادها و وضع قراردادهای:

الف) از آنجا که اسامی اولیه و ثانویه بستگی به چگونگی قرارگیری ترانسفورماتور در مدار الکتریکی دارد و ماترانس را مستقل از شبکه بررسی می کنیم لذا ما از این عناوین استفاده نمی کنیم و به جای آنها از عبارات فشار قوی و فشار ضعیف برای نامیدن پیچکها استفاده می کنیم.

ب) حروف بکار رفته برای اسم گذاری کمیات سمت فشار قوی بصورت بزرگ و در طرف فشار ضعیف بصورت کوچک استفاده می شود. مثلا عبارت YNd معرف ترانسی است با اتصال ستاره دارای سر وسط در فشار قوی و اتصال مثلث در فشار ضعیف.

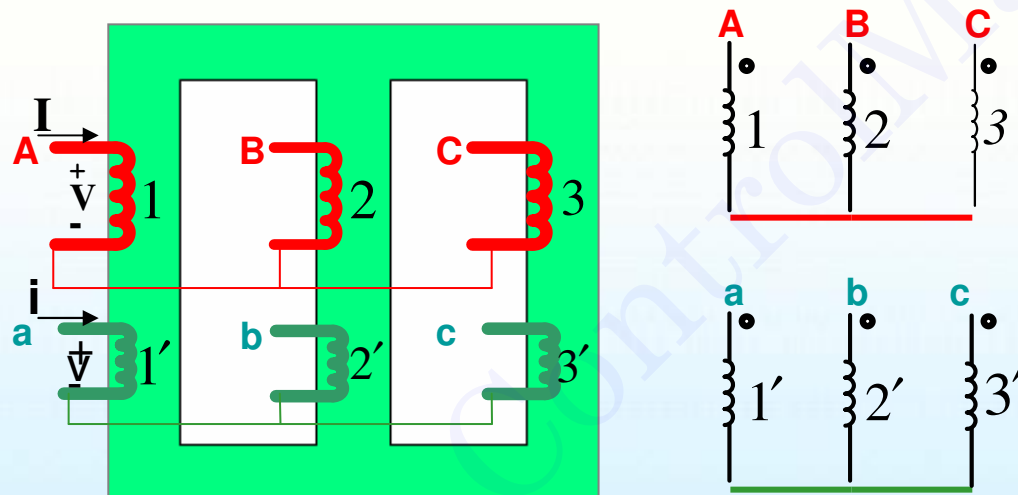
ج) نسبت تبدیل ترانس عبارتست از نسبت ولتاژ خط فشار قوی به ولتاژ خط فشار ضعیف مگر چیز دیگری غیر از آن تصریح شود.



انواع اتصالات در ترانس سه فاز (ادامه)

معرفی نمادها و وضع قراردادهای (ادامه) :

(د) با توجه به شکل قرار گیری پیچکها در یک ترانس واقعی ، بصورت نمادین آنها را به شکل زیر نشان می دهیم که در این شکل پیچکهای 1 و 1' روی یک هسته قرار دارند و ولتاژ القائی در آنها هم فاز می باشد



(ه) اسامی ABC و abc کاملاً دلخواه به پیچکها نسبت داده می شوند اما برای نشان دادن توالی ، ترتیب

آنها در توالی مثبت همیشه به یکی از سه صورت زیر است :
ABC ، CAB ، BCA



انواع اتصالات در ترانس سه فاز (ادامه)

معرفی نمادها و وضع قراردادهای (ادامه) :

ح) دامنه ولتاژ و جریان روی هر پیچک فشار قوی V و I و دامنه ولتاژ و جریان روی هر پیچک فشار ضعیف V و i می باشد.

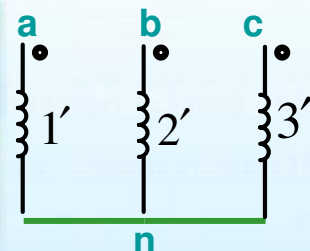
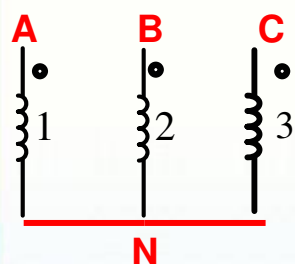
ط) K عبارتست از نسبت تبدیل فاز یا نسبت بین ولتاژ پیچکهای قرار گرفته روی یک ستون

$$\frac{V}{v} = \frac{N}{n} = K \quad \text{یا} \quad \frac{I}{i} = \frac{n}{N} = \frac{1}{K}$$



انواع اتصالات در ترانس سه فاز (ادامه)

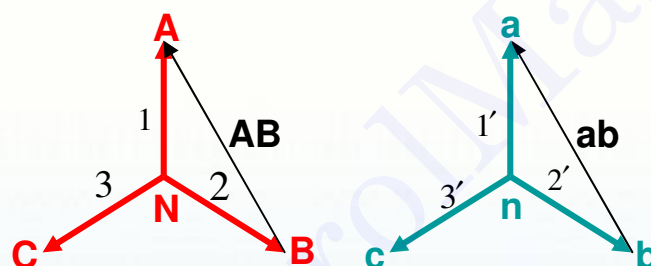
بسته به اینکه اولیه و ثانویه به چه شکلی سربندی شده باشند، اتصالات گوناگونی برای ترانس ایجاد می شود که در زیر با بیان این اتصالات ارتباط مقادیر خط و فاز و نسبت تبدیل هر یک از این اتصالات را بیان می کنیم.



YNyn

$$|V_{AN}| = V$$

$$|v_{an}| = v$$



(۱) اتصال ستاره ستاره

$$\left. \begin{aligned} |\bar{V}_{AB}| &= |\bar{V}_{AN} - \bar{V}_{BN}| = \sqrt{3}V \\ |\bar{V}_{ab}| &= |\bar{V}_{an} - \bar{V}_{bn}| = \sqrt{3}v \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{|\bar{V}_{AB}|}{|\bar{V}_{ab}|} = \frac{\sqrt{3}V}{\sqrt{3}v} = \frac{V}{v} = K$$

از این اتصال زمانی استفاده می شود که ولتاژ زیاد و جریان کم است

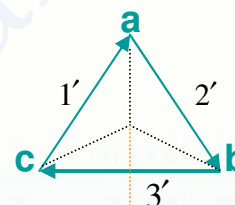
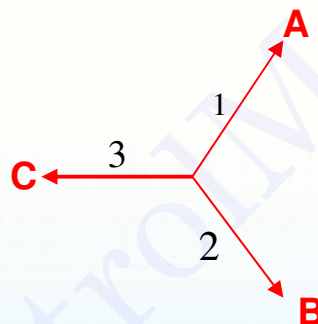
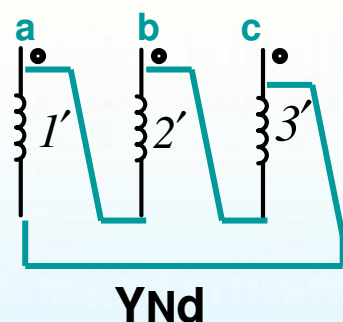
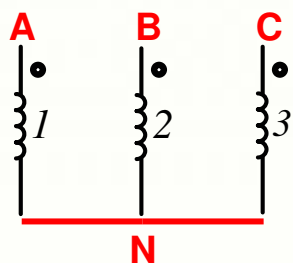
یا به سر وسط نیاز می باشد.



انواع اتصالات در ترانس سه فاز (ادامه)

۲) اتصال ستاره مثلث

از این اتصال جایی استفاده می شود که ولتاژ کم و جریان بالا باشد یا بخواهیم هارمونیکهای خاصی را حذف کنیم .



نقطه خنثی مجازی

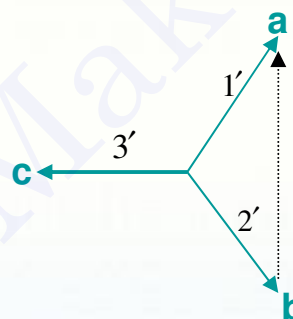
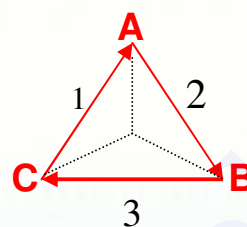
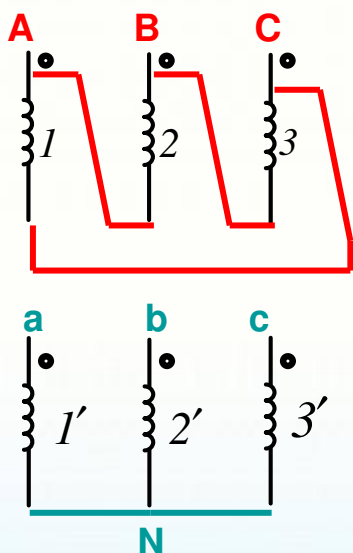
$$\left. \begin{aligned} |\bar{V}_{AB}| &= |\bar{V}_{AN} - \bar{V}_{BN}| = \sqrt{3}V \\ |\bar{V}_{ab}| &= v \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left| \frac{\bar{V}_{AB}}{\bar{V}_{ab}} \right| = \frac{\sqrt{3}V}{v} = \sqrt{3} \frac{V}{v} = \sqrt{3}K$$

تمرین : برای جریان نسبت تبدیل را بدست آورید .



انواع اتصالات در ترانس سه فاز (ادامه)

۳) اتصال مثلث ستاره

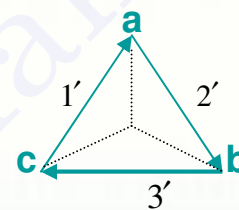
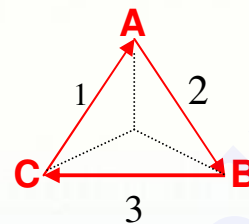
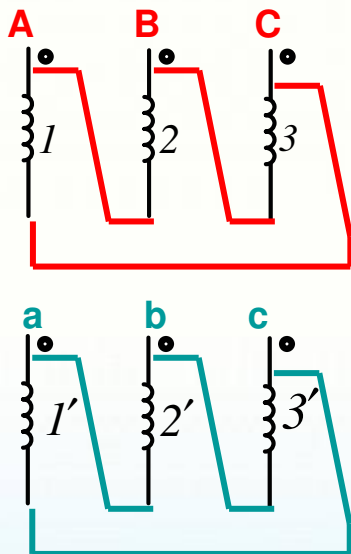


$$\left. \begin{aligned} |\bar{V}_{AB}| &= V \\ |\bar{v}_{ab}| &= |\bar{v}_{an} - \bar{v}_{bn}| = \sqrt{3}v \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{|\bar{V}_{AB}|}{|\bar{v}_{ab}|} = \frac{V}{\sqrt{3}v} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V}{v} = \frac{K}{\sqrt{3}}$$



انواع اتصالات در ترانس سه فاز (ادامه)

۳) اتصال مثلث مثلث

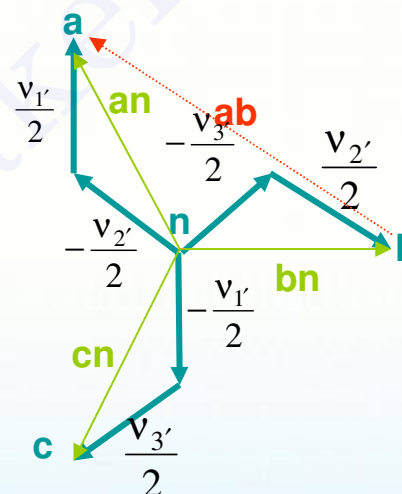
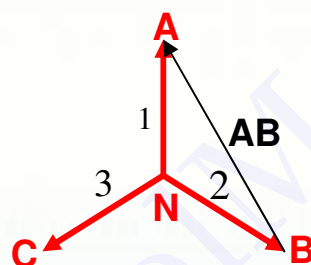
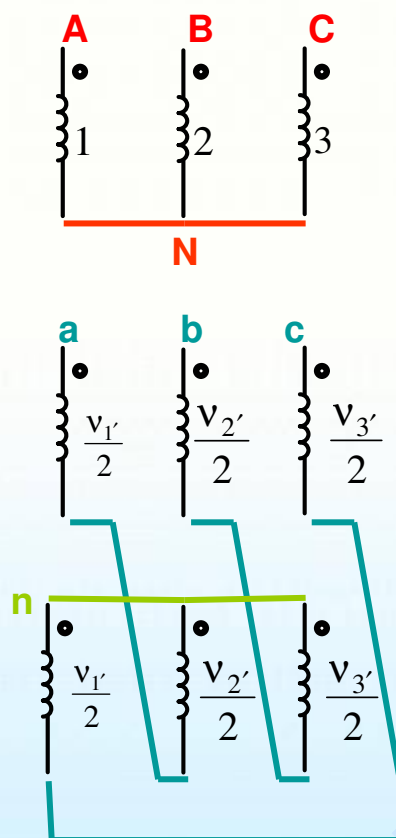


$$\left. \begin{aligned} |\bar{V}_{AB}| &= V \\ |\bar{V}_{ab}| &= V \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{|\bar{V}_{AB}|}{|\bar{V}_{ab}|} = \frac{V}{V} = K$$



انواع اتصالات در ترانس سه فاز (ادامه)

Inter connected star اتصال ستاره زیگزاگ



$$|v_{an}| = \left| \frac{\bar{v}_{1'}}{2} - \frac{\bar{v}_{2'}}{2} \right| = \sqrt{3} \frac{v}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} v$$

$$|v_{an}| = |v_{bn}| = |v_{cn}| = \frac{\sqrt{3}}{2} v$$

$$|v_{ab}| = |\bar{v}_{an} - \bar{v}_{bn}| = \sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} v \right)$$

$$|V_{AB}| = |\bar{V}_{AN} - \bar{V}_{BN}| = \sqrt{3} V$$



$$\frac{V_{AB}}{v_{ab}} = \frac{\sqrt{3}V}{3/2 \times v} = \frac{2}{\sqrt{3}} K$$



انواع اتصالات در ترانس سه فاز (ادامه)

حسن ترانس با اتصال زیگزاگ آنست که نا متعادلی را کم می کند . با توجه به شکل صفحه قبل اگر جریانی از یک فاز فشار قوی عبور کند بین دو فاز فشار ضعیف تقسیم می شود و به اینصورت نا متعادلی را کمتر می کند .

😊 بعنوان تمرین نشان دهید که :

$$\frac{i_a}{I_A} = \frac{2}{\sqrt{3}} K$$



به نام خدا

مبحث نوزدهم

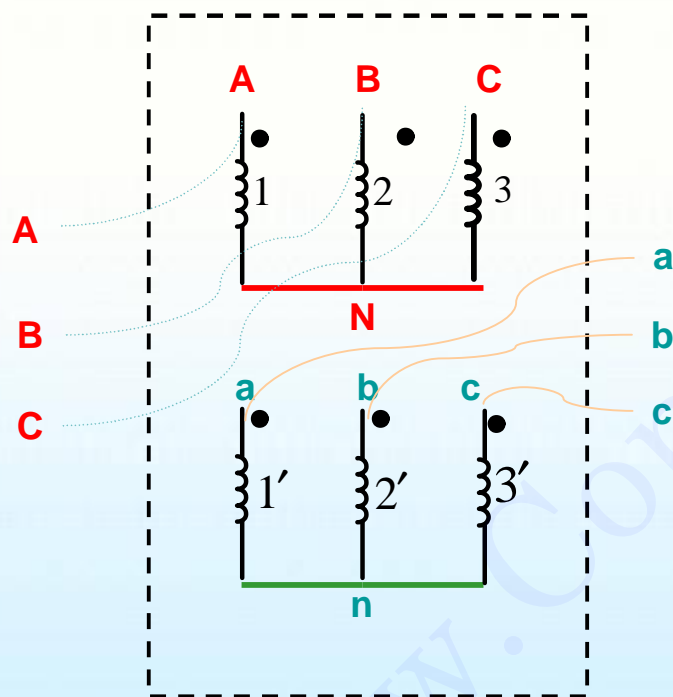
ترانسفورماتور سه فاز

گروه برداری

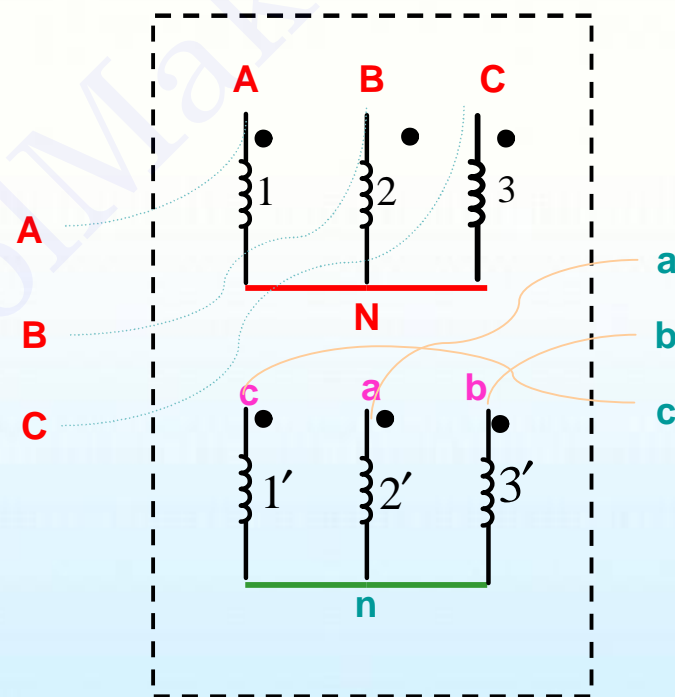


گروه برداری

به دو شکل شماتیک زیر نگاه کنید . همانگونه که گفتیم می توانیم ترمینالهای خروجی را به دلخواه اسم گذاری کنیم . آیا دو آرایش زیر، ترانسهای مختلفی را نتیجه می دهند ؟



الف



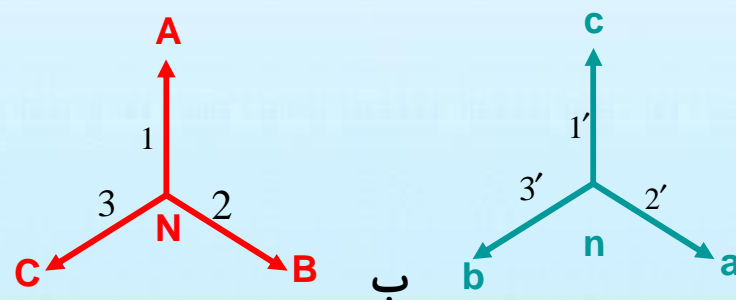
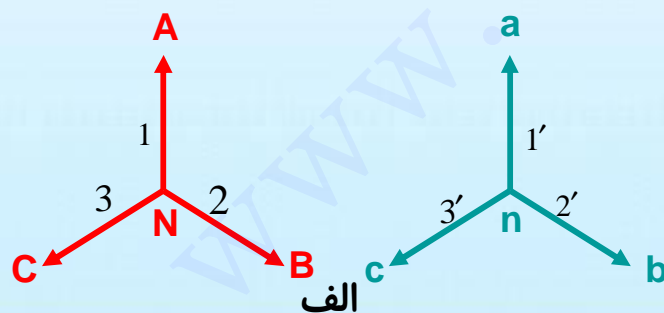
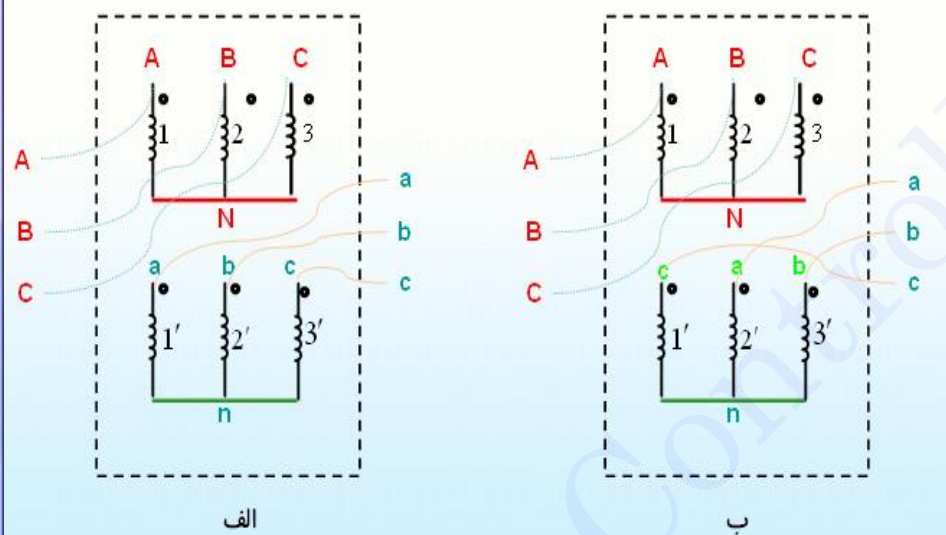
ب



گروه برداری (ادامه)

پاسخ مثبت است. با اینکه نسبت تبدیل ثابت می ماند ولی بین فاز های **هم نام** در هر کدام از ترانسها اختلاف فازهای مختلفی ایجاد می شود. در ترانس (الف) اختلاف فاز بین فاز **a** با **A** بدلیل اینکه روی

یک ستون بسته شده اند، برابر صفر درجه است
 حال آنکه در ترانس (ب) بخاطر آنکه فاز های **A** و **a** از سیم پیچهای بسته شده روی دو ستون مجاور هم گرفته شده اند، دارای اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه می باشند. شکل زیر گویای این مطلب است.



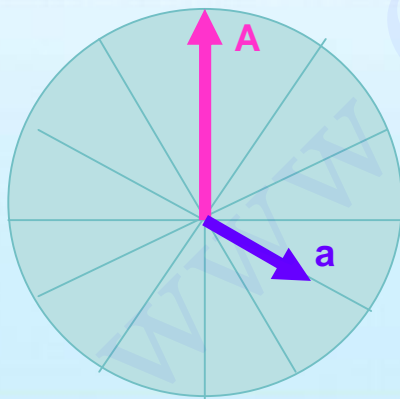


گروه برداری (ادامه)

برای نشان دادن این تمایز بین دو ترانس فوق از توصیف ویژه ای تحت عنوان گروه برداری یا ساعت ترانس استفاده می شود .

ترانس الف را با گروه برداری $Yy0$ یا ساعت صفر می نامیم . ترانس (ب) ترانسیست با گروه برداری $Yy4$ یا ساعت چهار .

برای یافتن ساعت ترانس یا گروه برداری آن از قاعده زیر استفاده می شود . بردار ولتاژ فشار قوی را عقربه دقیقه شمار فرض کرده و راستای آنرا در امتداد ساعت ۱۲ فرض می کنیم . بردار ولتاژ فشار ضعیف را عقربه ساعت شمار در نظر می گیریم .



هر ساعت معادل 30° اختلاف فاز بین فازهای هم نام است .

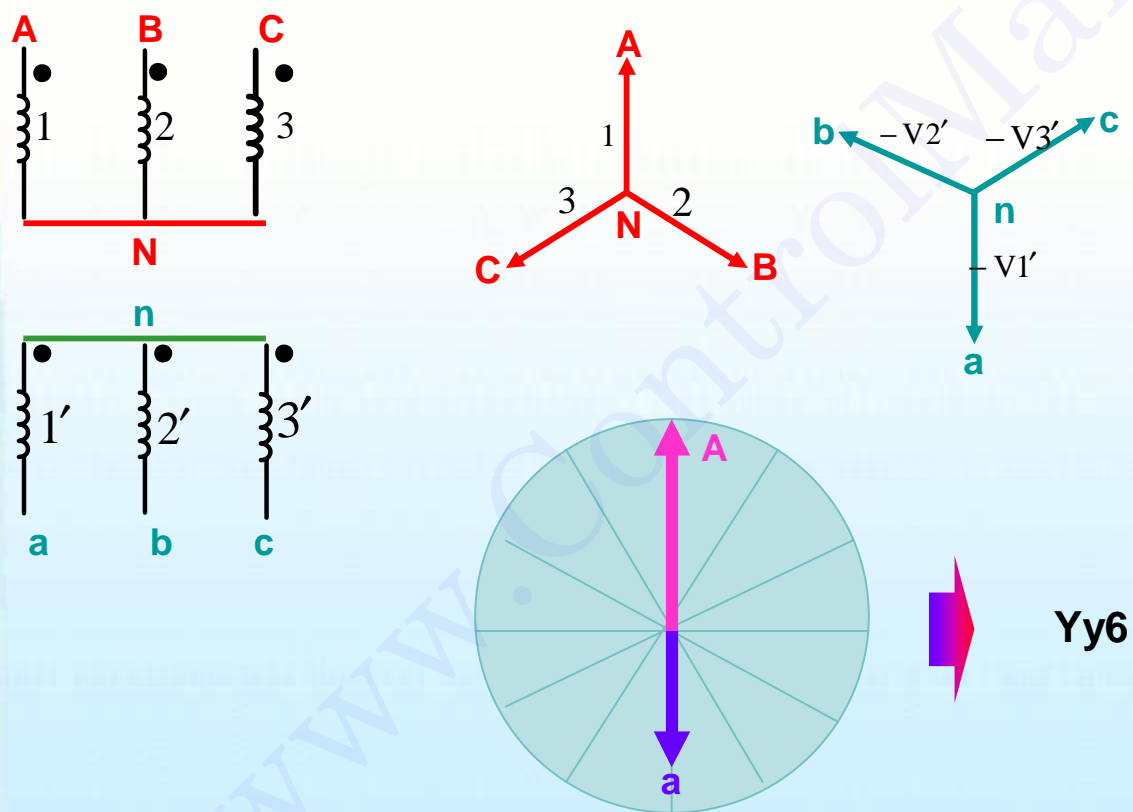


دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / ماسنهای الکتریکی / ۳ / دکتر واحدی / پاییز ۸۳

گروه برداری (ادامه)

علاوه بر تغییر اسم گذاریها ، تغییر پلارите پیچکها هم می تواند به گروههای برداری متفاوت بیانجامد .

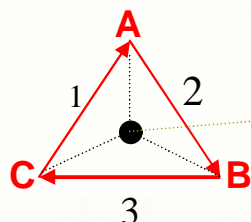
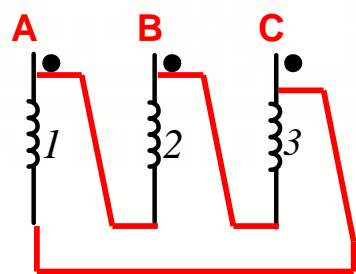
شکل زیر را ببینید :



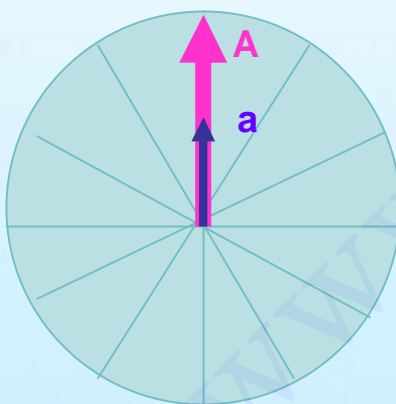
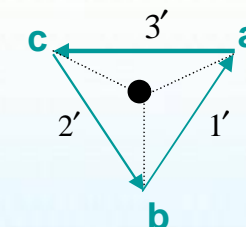
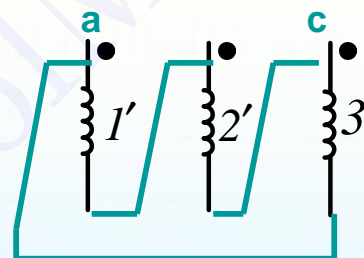
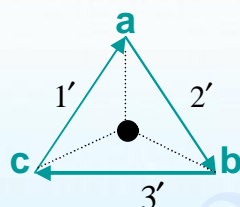
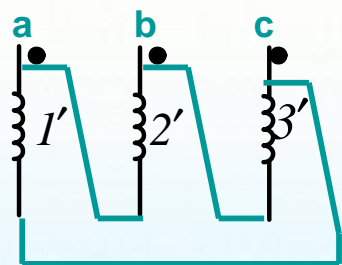
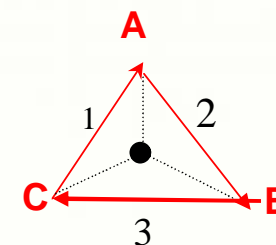
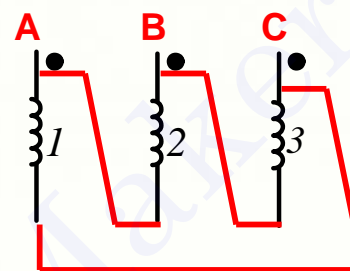
گروه برداری (ادامه)

در اتصال مثلث علاوه بر تغییر اسم گذاریها، تغییر سربندی پیچکها هم می تواند به گروههای برداری متفاوت بیانجامد

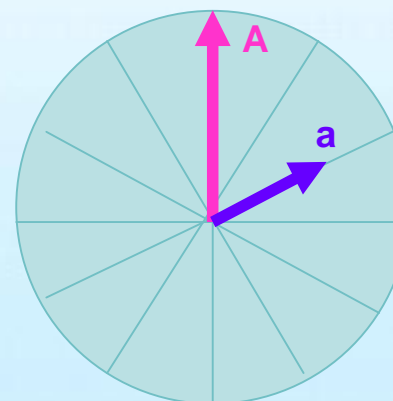
شکلهای زیر را ببینید:



نقطه
خشتی
مجازی



Dd0



Dd2



گروه برداری (ادامه)

نکاتی در مورد تعیین گروه برداری :

(۱) گروه برداری همیشه برای کمیات سه فاز متعادل بیان می شود

(۲) برای یافتن گروه برداری همیشه باید نقطه صفر (**حقیقی یا مجازی**) را بیابیم و اختلاف زاویه دو خط (یا فاز هم نام **a** و **A**) را در جهت **ساعت گرد** بیابیم . از آنجائیکه این اختلاف همیشه مضربی از ۳۰ درجه است لذا هر ۳۰ درجه معادل یک ساعت می باشد .

(۳) بردارهای $1'$ با 1 ، $2'$ با 2 و $3'$ با 3 همیشه بصورت موازی رسم می شوند . چگونگی اتصال سر به ته این بردارها را شکل شماتیک نشان می دهد .

****** گروه برداری اختلاف بین کمیات خطی هم نام با یکدیگر ، یا کمیات فازی هم نام با یکدیگر می باشد . یعنی برای یک ترانس با گروه برداری **Yy4** ولتاژ فاز V_{AN} فشار قوی ازولتاژ فاز V_{an} سمت فشار ضعیف و یا ولتاژ خط V_{AB} از ولتاژ خط V_{ab} ، $120^\circ = 30^\circ \times 4$ درجه جلوتر می باشد برای جریانه ها نیز به همین صورت است .



گروه برداری (ادامه)

اتصالات ترانس داده شده و هدف تعیین گروه برداری ترانس است . (همیشه یک جواب منحصر به فرد دارد)

گروه برداری داده شده و هدف تعیین اتصالات و سر-بندیهای ترانس است . (ممکن است بیش از یک جواب منحصر به فرد داشته باشد .)

در بحث گروه برداری معمولا با دو نوع مساله مواجه هستیم

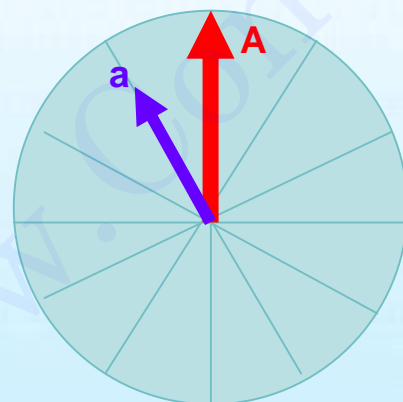
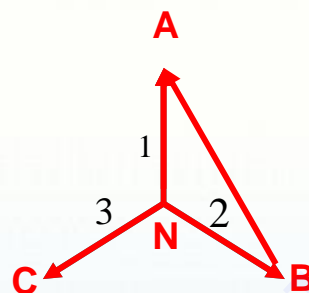
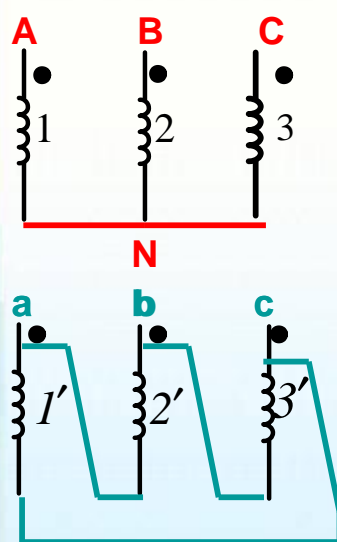




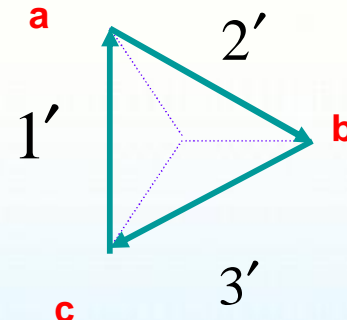
گروه برداری (ادامه)

مثال: 😊

گروه برداری ترانس دارای طرح شماتیک زیر را بیابید.



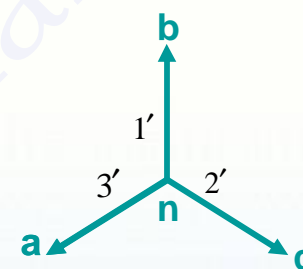
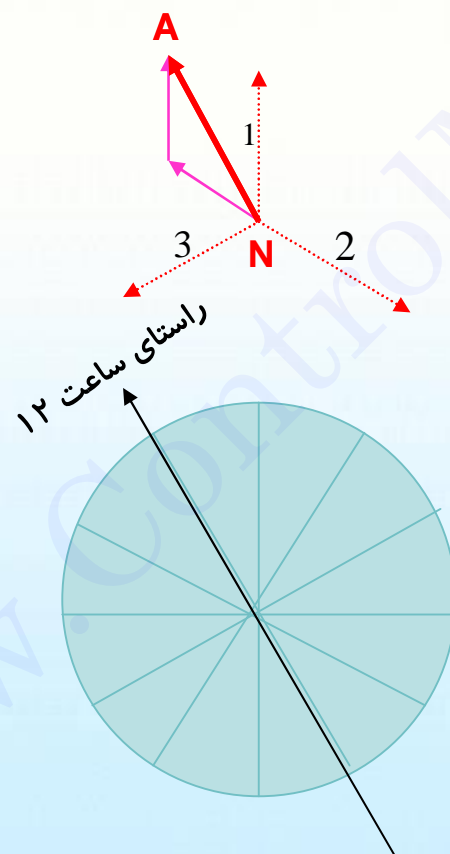
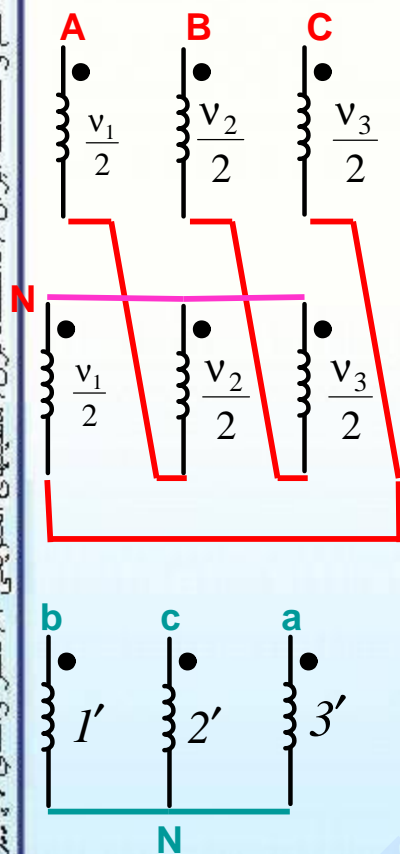
Yd11



گروه برداری (ادامه)

مثال: 😊

گروه برداری ترانس دارای طرح شماتیک زیر را بیابید.



Zy9



گروه برداری (ادامه)

😊 **تمرین:**

بعنوان تمرین چگونگی بدست آوردن اتصالات و سربندیهای ترانس را برای هر گروه برداری دلخواه، بررسی کنید.



به نام خدا

مبحث بیستم

ترانسفورماتور سه فاز

مباحث ویژه



موازی کردن ترانسفورماتورها

همانگونه که قبلا دیده ایم برای موازی کردن ترانسها شرایطی از جمله شرایط زیر باید برقرار باشند :

۱- برابری نسبت تبدیل

۲- اختلاف فاز برابر (وابسته به گروه برداریها)

۳- توالی فازهای یکسان

در این مبحث شرط دوم را مورد بررسی قرار می دهیم .



موازی کردن ترانسفورماتورها (ادامه)

در عمل ترانسهای با گروه برداریهای متناسب را می توان با هم موازی نمود و می توان ترانسهایی با گروه برداریهای ویژه پیدا کرد که موازی کردن آنها ممکن نباشد . این بخاطر اختلاف فازهایی است که ممکنست در اینگونه موارد ایجاد شود که ایجاد سیستم سه فاز متعادل را غیر ممکن کنند .

نکته مهمی که در بررسی این موضوع مبنای کار ما می باشد آنست که اگر بواسطه قرار گرفتن یک ترانس در یک مدار اختلاف فاز بین ولتاژ فازهای هم نام این مدار (مثلا R با r ، S با s یا T با t) مقدار ویژه ای شد ، چنان فازهایی از ترانس موازی شونده را باید به این فازهای هم نام وصل کنیم که همان اختلاف فاز را داشته باشند .

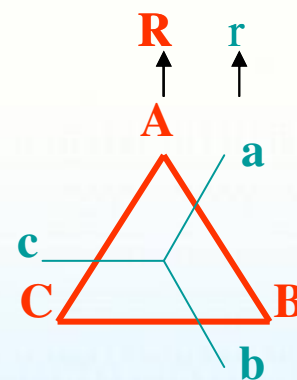
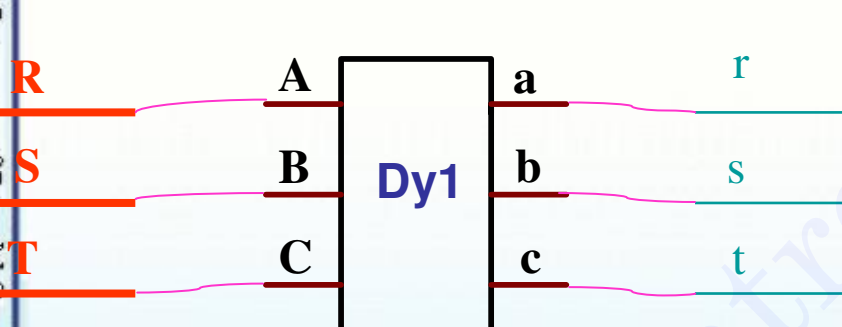


موازی کردن ترانسفورماتورها (ادامه)

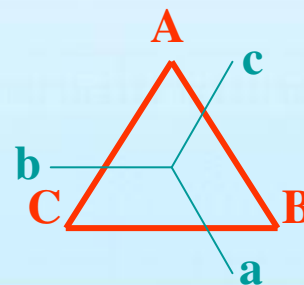
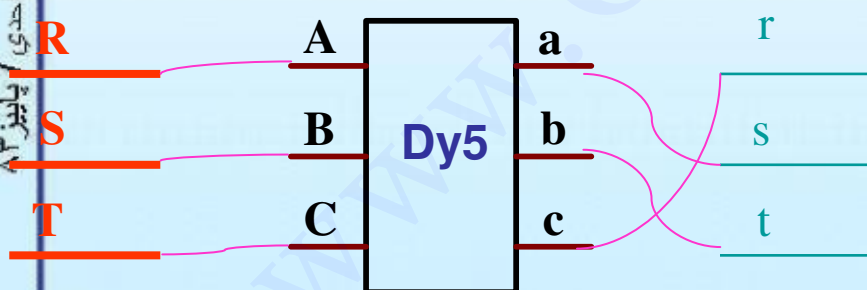
برای موازی کردن دو ترانس با گروه برداریهای $Dy1$ و $Dy5$ اینگونه عمل می شود :

اتصالات ترانس اول به دلخواه انجام می شود .

از روی دیاگرام برداری اختلاف فاز بین دو فاز هم نام بدست می آید .



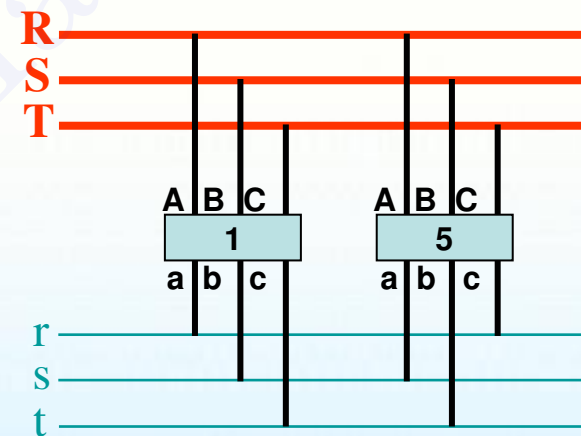
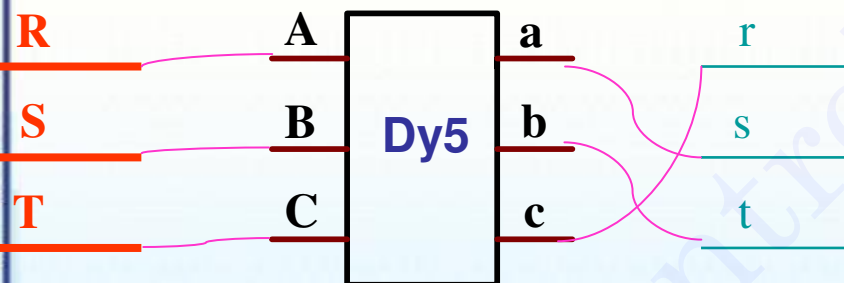
دیاگرام برداری ترانس دوم را کشیده و نوع سر بندی را تعیین می کنیم .





موازی کردن ترانسفورماتورها (ادامه)

این شکل را معمولا بصورت زیر نمایش می دهند :

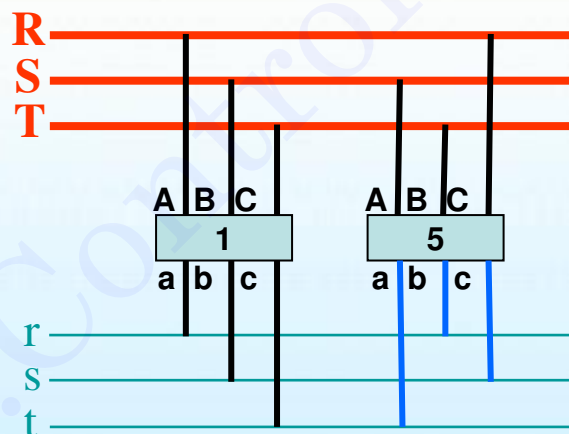




موازی کردن ترانسفورماتورها (ادامه)

😊 تمرین :

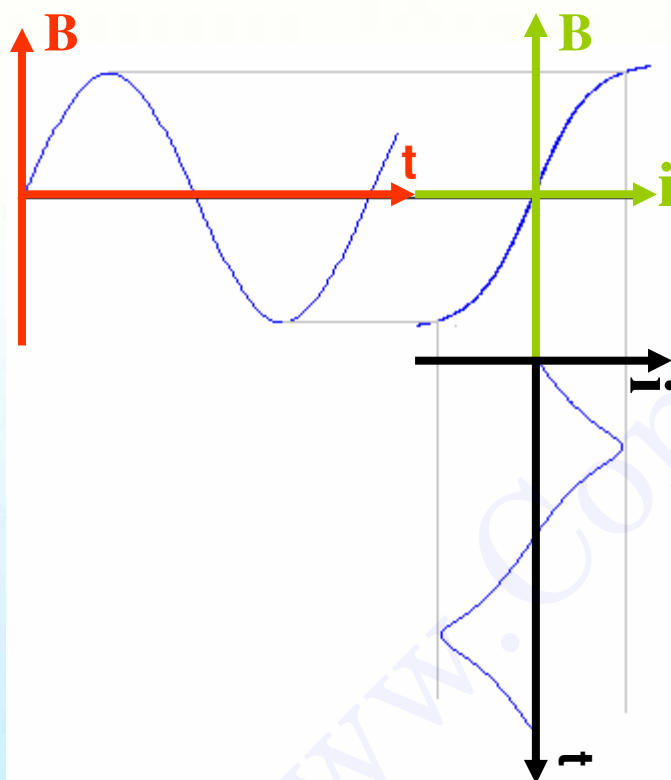
برای شکل زیر اتصالات ثانویه ترانس با گروه ۵ را بدست آورید :





هارمونیکها و اثر آنها در ترانس سه فاز

عامل ایجاد هارمونیکها در ترانسهاییکه با منبع سینوسی تغذیه می شوند ، مشخصه مغناطیسی غیر خطی هسته می باشد .

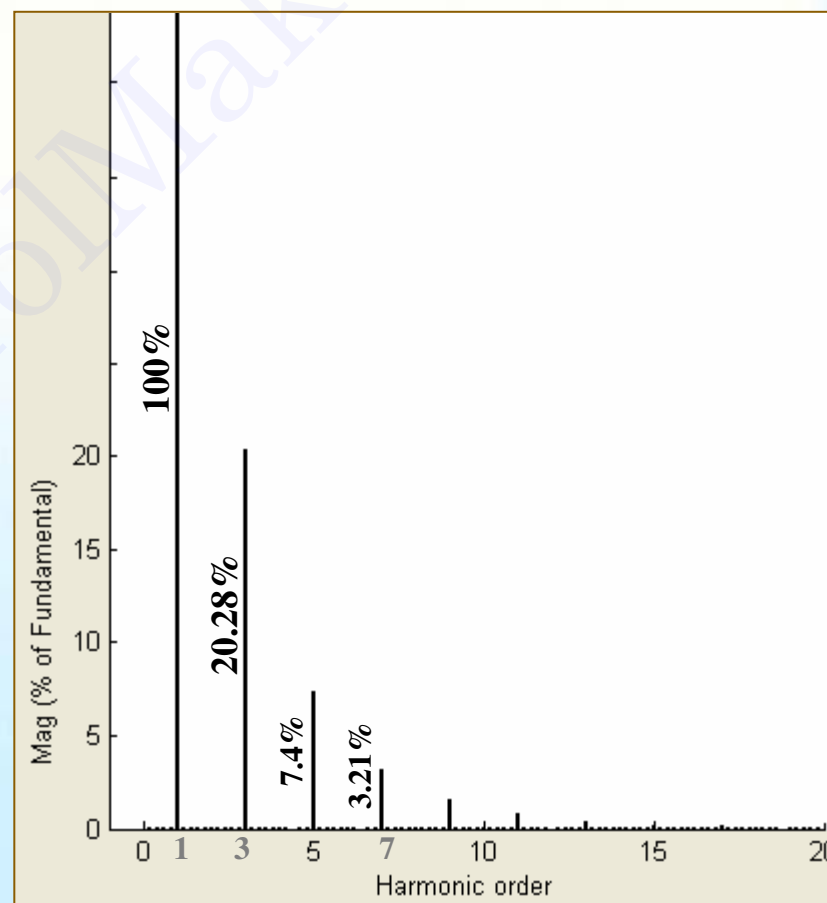
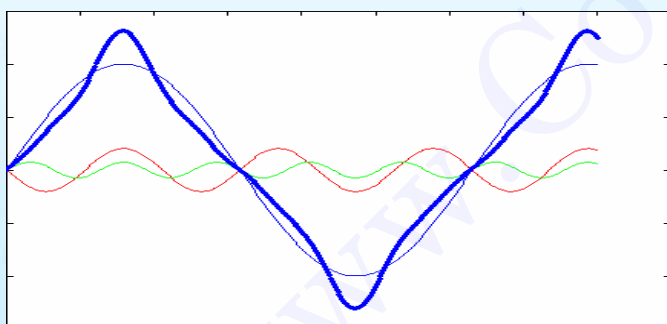
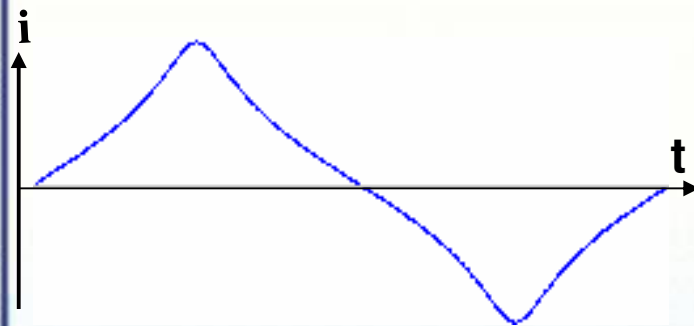


می دانیم که ولتاژ با مشتق شار متناسب است لذا اگر ولتاژ سینوسی به ترانسفورماتوری اعمال شود ، شار نیز باید سینوسی باشد . اما همان گونه که از شکل زیر پیداست برای داشتن شار سینوسی ، یک جریان غیر سینوسی لازم است که ترکیبی است از مولفه اصلی و مولفه های فرد دیگر.



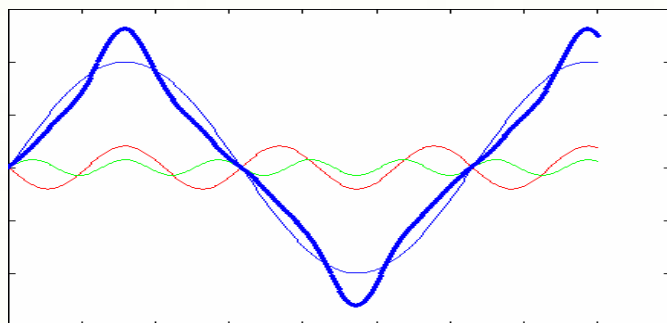
هارمونیکها و اثر آنها در ترانس سه فاز

این شکل موج شامل هارمونیکهای مرتبه اول ، سوم ، پنجم و سایر مولفه های فرد است که فقط هارمونیکهای اول و سوم از نظر دامنه قابل ملاحظه می باشند .





هارمونیکها و اثر آنها در ترانس سه فاز (ادامه)



همانطور که می بینید این شکل موج دارای مولفه های فرد می باشد. روابط مربوط به مولفه های اول تا پنجم در زیر آمده است.

$$I_{A1} = I_{m1} \sin(\omega t)$$

$$I_{B1} = I_{m1} \sin(\omega t - 120)$$

$$I_{C1} = I_{m1} \sin(\omega t + 120)$$

$$I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} = 0$$

مولفه اول
سه فاز متقارن، توالی مثبت

$$I_{A3} = I_{m3} \sin 3(\omega t)$$

$$I_{B3} = I_{m3} \sin 3(\omega t - 120) = I_{m3} \sin(3\omega t - 360) = I_{m3} \sin(3\omega t)$$

$$I_{C3} = I_{m3} \sin 3(\omega t + 120) = I_{m3} \sin(3\omega t + 360) = I_{m3} \sin(3\omega t)$$

$$I_{A3} + I_{B3} + I_{C3} = 3I_{m3} \sin(3\omega t)$$

مولفه سوم
سه موج هم فاز

$$I_{A5} = I_{m5} \sin(5\omega t)$$

$$I_{B5} = I_{m5} \sin 5(\omega t - 120) = I_{m5} \sin(5\omega t - 600) = I_{m5} \sin(5\omega t - 240)$$

$$I_{C5} = I_{m5} \sin 5(\omega t + 120) = I_{m5} \sin(5\omega t + 600) = I_{m5} \sin(5\omega t + 240)$$

$$I_{A5} + I_{B5} + I_{C5} = 0$$

مولفه پنجم
سه فاز متقارن، توالی منفی



هارمونیکها و اثر آنها در ترانس سه فاز (ادامه)

همانگونه که دیدیم برای تولید شار سینوسی نیاز به مولفه های غیر مولفه اصلی داریم.

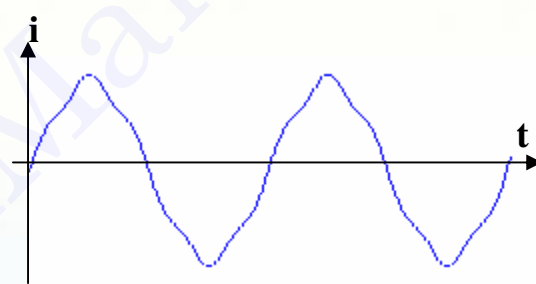
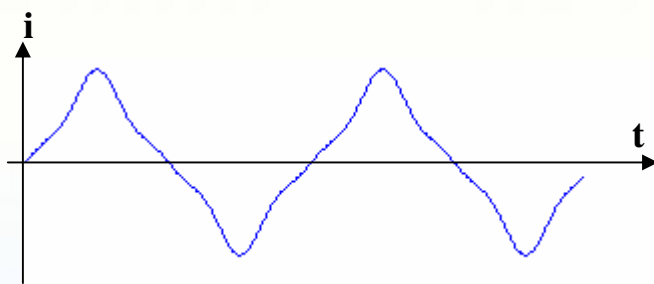
یکی از معایب چنین پدیده ای **تحمیل مولفه های فرکانس بالا به شبکه است** . (البته چون جریان تحریک عموماً کوچک است لذا این مشکل حادی نمی باشد) .

یکی دیگر از مسائلی که از هارمونیکها ناشی می شود مربوط به مولفه سوم می باشد ، همانگونه که قبلاً ملاحظه شد حاصلجمع امواج سه فاز ناشی از این مولفه صفر نمی باشد ، در حالی که حاصلجمع مولفه های دیگر صفر است . به همین خاطر در مدارات سه فاز باید برای مسیر برگشت این مولفه تمهیداتی (مثلاً اتصال سیم چهارم) اندیشیده شود در غیر اینصورت برقراری آن ممکن نبوده و همین امر می تواند باعث بروز مشکلاتی شود .

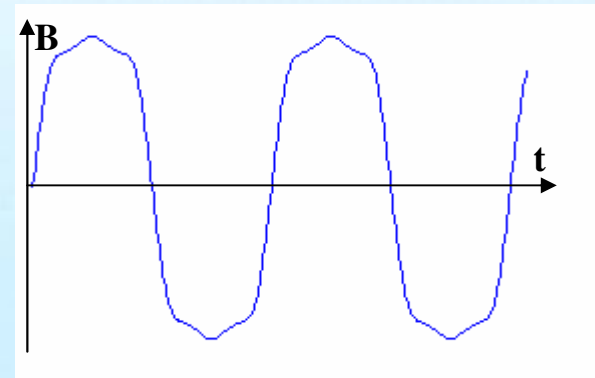
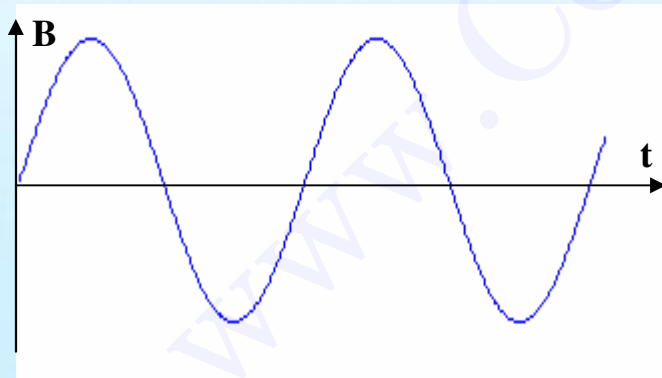


هارمونیکها و اثر آنها در ترانس سه فاز (ادامه)

فرض کنیم اتصال ترانس از نوع ستاره بدون سیم چهارم باشد. در این صورت مولفه سوم جریان صفر بوده و شکل موج جریان و شار ناشی از آن بصورت زیر تغییر می کند:

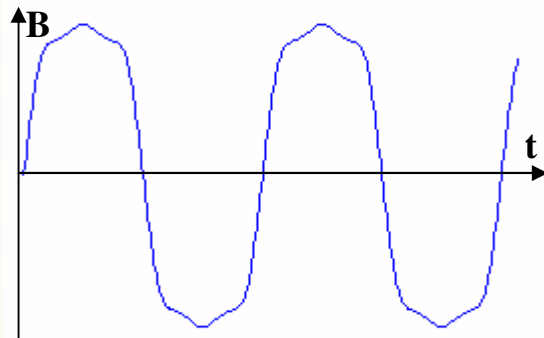


حذف
هارمونیک
سوم





هارمونیکها و اثر آنها در ترانس سه فاز (ادامه)



ملاحظه می شود که شکل موج شار غیر سینوسی شده و باعث تولید ولتاژ غیر سینوسی خواهد گردید . این شکل موج دارای یک مولفه سوم مزاحم است .

می توان بطور تقریبی نوشت :

$$\phi_1 = \phi_{m1} \sin(\omega t)$$

$$\phi_3 = \phi_{m3} \sin(3\omega t)$$



$$E_1 = n \frac{d\phi_1}{dt} = n\phi_{m1} \omega \cos(\omega t)$$

$$E_3 = n \frac{d\phi_3}{dt} = n\phi_{m3} \times 3\omega \cos(3\omega t)$$

حالت اخیر ممکنست اضافه ولتاژهای بزرگی

تولید کند که باعث آسیب ترانسفورماتور یا

مصرف کننده شود .

$$E_{rms} = \sqrt{E_1^2 + E_3^2}$$



هارمونیکها و اثر آنها در ترانس سه فاز (ادامه)

همانطور که قبلا اشاره شد ، یکی از راه حلهای موجود برای این مشکل اتصال سیم چهارم یا سیم زمین است . ولی این کار همیشه ممکن نیست یا معایبی چون هزینه بالا ، تاثیر نامطلوب روی خطوط مخابراتی یا غیره دارد .

از دیگر راه های رفع این مشکل در نظر گرفتن یک اتصال مثلث در ترانس می باشد .

فرض کنیم ترانس دارای اولیه ستاره بدون سیم چهارم و ثانویه مثلث باشد . فرایند زیر رخ می دهد :

ولتاژهای همفاز مولفه سوم

در ثانویه جریان چرخشی

تولید می کنند

شار و ولتاژ دارای

هارمونیک سوم می شوند

جهت جریان چرخشی به صورتی

است که عامل بوجود آورنده خود

(شار مزاحم مولفه سوم) را حذف کند

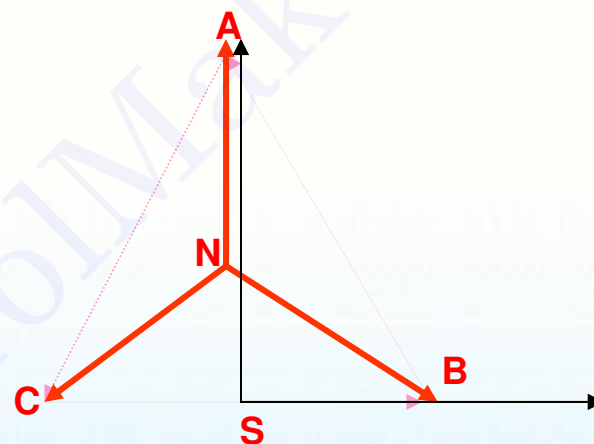
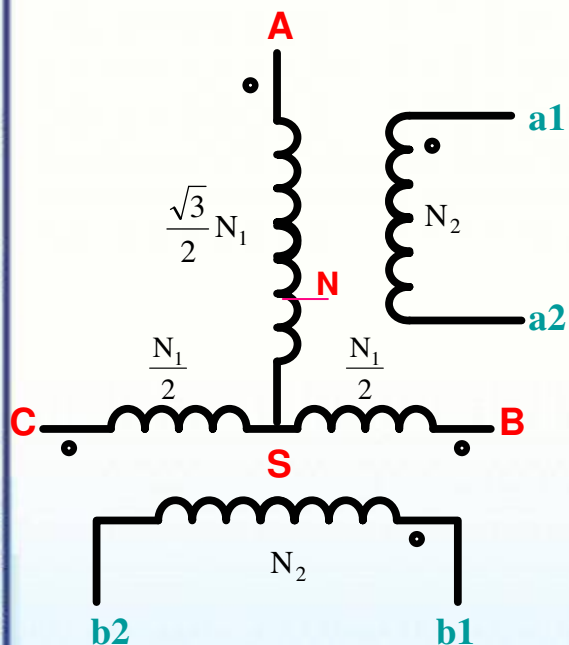
عیب این روش آنست که مولفه سوم بطور کامل حذف نمی شود و جریان گردشی نیز بطور

دایمی برقرار می باشد .



اتصالات خاص (اتصال اسکات)

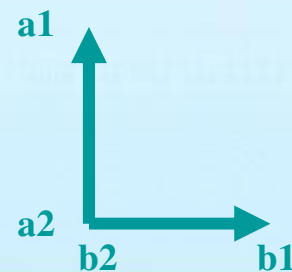
اتصال T یا اسکات برای تبدیل سه فاز به دو فاز و بالعکس



$$V_{AS} = V_{AB} \cos \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_L$$

$$V_{a1a2} = \frac{N_2}{\frac{\sqrt{3}}{2} N_1} V_{AS} = \frac{N_2}{N_1} \times \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{3}}{2} V_L = \frac{N_2}{N_1} V_L$$

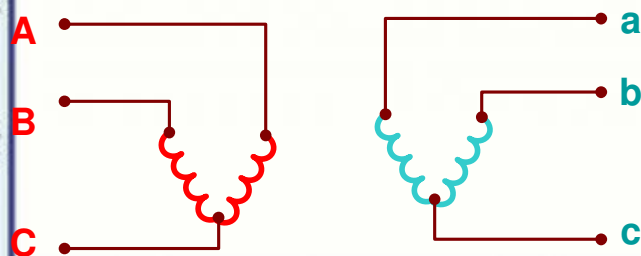
$$V_{b1b2} = \frac{N_2}{N_1} V_{BC} = \frac{N_2}{N_1} V_L$$





اتصالات خاص (اتصال مثلث باز یا VV)

بعضی مواقع در صورت بروز خطا در ترانسی که بصورت مثلث مثلث بسته شده، تعمیرات اضطراری و یا عدم نیاز به استفاده از سه ترانس تکفاز در قالب یک بانک ترانس سه فاز از اتصال مثلث باز استفاده می شود.



مقایسه با ترانس مثلث مثلث :

قدرت استفاده شده

$$\frac{\text{قدرت استفاده شده}}{\text{قدرت نصب شده}} = 1$$

$$3 \times V_{\phi} \times I_{\phi}$$

قدرت نصب شده در ترانس مثلث :

$$3 \times V_{\phi} \times I_{\phi}$$

قدرت استفاده شده در ترانس مثلث :

در DD

قدرت استفاده شده

$$\frac{\text{قدرت استفاده شده}}{\text{قدرت نصب شده}} = 0.866$$

$$2 \times V_{\phi} \times I_{\phi}$$

قدرت نصب شده در ترانس مثلث باز :

$$\sqrt{3} \times V_{\phi} \times I_{\phi}$$

قدرت استفاده شده در ترانس مثلث باز :

در VV