

جزوه شماره ۲ (ویرایش دوم: اسفند ۹۸)

فصل ۶ (ماشینهای سنکرون سه فاز) تألیف دکتر P.C.Sen ترجمه دکتر مهرداد عابدی از صفحه ۳۲۷ تا ۳۳۷ و ۳۵۶ تا ۳۶۱ کپی شود)

فصل ۵ (ماشینهای آسنکرون سه فاز) تألیف دکتر P.C.Sen ترجمه دکتر مهرداد عابدی از صفحه ۲۳۳ تا ۲۳۶ و ۲۴۳ تا ۲۷۲ کپی شود.)

مقدمه‌ای بر

ماشین‌های سنکرون سه‌فاز

3Phase Synchronous Machines

قابل استفاده برای دانشجویان

کاردانی و کارشناسی مهندسی برق و سایر علاقه‌مندان

تهیه و تنظیم: مهندس پیام رحیمی

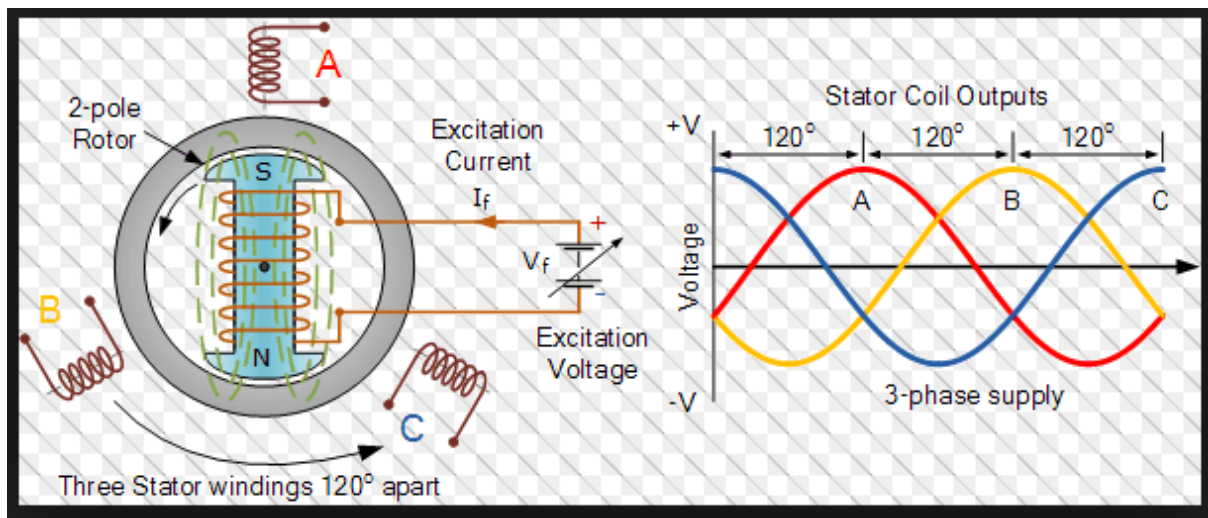
منابع:

(۱) ماشین‌های الکتریکی تألیف دکتر P.C.Sen ترجمه دکتر مهرداد عابدی

(۲) ماشین‌های الکتریکی تألیف استفن . ج . چاپمن

(۳) جزوه دکتر واحدی...دانشگاه علم و صنعت تهران

(۴) ماشینهای الکتریکی مدرسان شریف تألیف مهندس رضا پژمان‌فر



ماشین‌های سنکرون تحت سرعت ثابتی به نام سرعت سنکرون می‌چرخند و لغزش در آنها صفر است و جزو ماشین‌های جریان متناوب محسوب می‌شوند.

ماشین‌های سنکرون عمدتاً در حالت ژنراتوری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند و شبکه بی‌نهایت یا بار محلی را تغذیه می‌نمایند.

تفاوت ماشین‌های سنکرون و آسنکرون: ماشین‌های سنکرون اعم از ژنراتور و موتور جزو ماشین‌های دو تحرّیک محسوب می‌شوند. در حالی که در ماشین‌های القایی یا آسنکرون تنها عامل تحرّیک، جریان استاتور می‌باشد، زیرا جریان رتور بر اثر القا پدید می‌آید. لذا ماشین‌های آسنکرون همواره در حالت پس‌فاز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

امروزه ژنراتورهای سنکرون سه‌فاز (آلترناتورها) ستون فقرات شبکه‌های برق در جهان را تشکیل می‌دهند و در نیروگاه‌ها وظیفه‌ی تولید انرژی الکتریکی را به دوش می‌کشند.

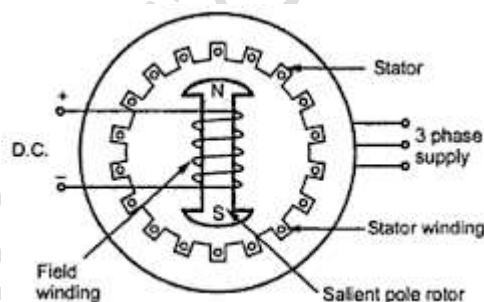
موتورهای سنکرون سه‌فاز در مواقعی به کار می‌روند که به سرعت ثابت نیاز داشته باشیم و یکی از مزایای عمده موتورهای سنکرون این است که می‌تواند از شبکه توان راکتیو دریافت و یا به شبکه توان راکتیو تزریق کند.

ساختمان ماشین‌های سنکرون سه‌فاز قدرت بالا (بزرگ)

استاتور (شامل هسته‌ی مغناطیسی (فولاد مغناطیسی) و سیم‌پیچی سه‌فاز): استاتور ماشین‌های سنکرون سه‌فاز، اعم از ژنراتور و موتور حاوی سیم‌پیچی سه‌فاز متقارن است که درون شیارهای استاتور جاسازی شده و در طول محیط آن پخش و توزیع گردیده‌اند. استاتور در ژنراتور بار را تغذیه می‌کند و در موتور به شبکه وصل می‌شود و از شبکه جریان دریافت می‌کند. به سیم‌پیچی استاتور، سیم‌پیچی آرمیچر نیز گفته می‌شود و سیم‌پیچی آرمیچر به طوری طراحی می‌شود که جریان و ولتاژ زیادی را تحمل نماید.

رتور (شامل هسته و سیم‌پیچی تغذیه شونده توسط جریان DC): رتور ماشین سنکرون حاوی سیم‌پیچی تحریک یا میدان است و این سیم‌پیچی توسط جریان DC تحریک می‌گردد و بر دو نوع است:

۱) رتور قطب برجسته: این رتورها عمدتاً در ماشین‌هایی به کار می‌رود که سرعت سنکرون آنها کم است و فاصله‌ی هوایی بین استاتور و رتور غیریکنواخت است، بطوریکه در زیر مرکز قطب‌ها فاصله‌ی هوایی و رلوکتانس کم و در طرفین قطب‌ها فاصله‌ی هوایی زیاد می‌باشد.



۲) رتور قطب صاف یا استوانه‌ای: این رتورها عمدتاً در ماشین‌هایی به کار می‌رود که سرعت سنکرون آنها زیاد است و فاصله‌ی هوایی بین استاتور و رتور یکنواخت است، استاتور و رتور به صورت استوانه کامل ساخته می‌شوند.

نتیجه اینکه : ماشین‌های سنکرون بزرگ، از نوع قطب داخلی بوده و سیم‌پیچ تحریک قطب‌ها روی رتور قرار دارد و سیم‌پیچی سه‌فاز آرمیچر روی استاتور نصب می‌شود.

**** ژنراتورهای سنکرون کوچک از نوع قطب خارجی بوده و سیم‌پیچ تحریک قطب‌ها روی استاتور قرار دارد و سیم‌پیچی سه‌فاز آرمیچر روی رتور نصب می‌شود. در این نوع ژنراتور روی رتور سه حلقه‌ی لغزان جهت اخذ توان خروجی سه‌فاز قرار دارد.**

دسته‌بندی ژنراتورهای سنکرون از نظر محرک (گرداننده اولیه):

توربو ژنراتورها: در این ژنراتورها، رتور توسط یک توربین بخاری یا گازی با سرعت چرخش نسبتاً بالا گردانده می‌شود لذا تعداد قطب‌های این نوع ژنراتورها کم (۲ یا ۴) می‌باشد و رتور از نوع قطب صاف داخلی است.

هیدرو ژنراتورها: در این ژنراتورها، رتور توسط یک توربین آبی با سرعت چرخش نسبتاً کم گردانده می‌شود لذا تعداد قطب‌های این نوع ژنراتورها زیاد (۱۲ به بالا) می‌باشد و رتور از نوع قطب برجسته داخلی است.

دیزل ژنراتورها: در این مولدها رتور توسط یک موتور دیزلی با سرعت چرخش متوسط (بین توربو و هیدرو) گردانده می‌شود. لذا تعداد قطب معمولاً بیشتر از ۴ است.

- توربو ژنراتورها نسبت به هیدروژنراتورها به علت سرعت بالا دارای طول زیاد و قطر کم می‌باشند.
- عمدتاً ژنراتورهای سنکرون سه‌فاز بزرگ (قدرت بالا) از نوع قطب داخلی بوده، به عبارت دیگر سیم‌پیچ رتور توسط منبع DC تغذیه و تحریک می‌شود و از سیم‌پیچ‌های استاتور جریان AC می‌گذرد و مولدهای سنکرون کوچک از نوع قطب خارجی هستند و از سیم‌پیچ‌های رتور جریان AC می‌گذرد.
- مولد های دارای قطب داخلی بوده و برق از اخذ می‌شود. (قدرت بالا- استاتور).
- در نیروگاه چون سرعت و قدرت بالاست ، باید قطب و قطب داخلی باشد. (بخاری – صاف).
- برای خنک سازی توربو ژنراتورها معمولاً از هیدروژن مایع و هوای سرد استفاده می‌شود و برای خنک‌سازی دیزل ژنراتورها معمولاً از روغن یا آب سرد یا هوای سرد استفاده می‌شود.

اساس کار ژنراتورهای سنکرون (قدرت بالا):

در یک ژنراتور سنکرون قدرت بالا که در نیروگاه‌ها وظیفه‌ی تولید برق را بر عهده دارد، مدار تحریک بر روی رتور قرار دارد، لذا یک جریان dc به سیم پیچ رتور اعمال می‌گردد تا یک میدان مغناطیسی رتور تولید شود. سپس رتور مربوط به ژنراتور به وسیله یک محرک اصلی (انواع توربین‌ها) چرخانده می‌شود، تا یک میدان مغناطیسی دوار در ماشین به وجود آید. این میدان مغناطیسی یک ولتاژ سه فاز را در سیم پیچ‌های استاتور ژنراتور القاء می‌نماید.

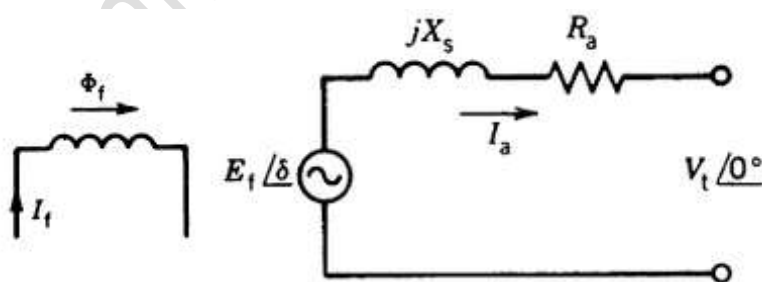
در ژنراتور سنکرون سیم پیچی استاتور به دلیل اینکه ولتاژ اصلی ماشین را تولید می‌کند به سیم پیچی آرمیچر، و سیم پیچی رتور به دلیل اینکه میدان اصلی مغناطیسی ماشین را تولید می‌کند به سیم پیچی میدان معروف است.

روش‌های اعمال تحریک به ماشین سنکرون:

- (۱) توسط حلقه‌های لغزان و جاروبک
- (۲) سیستم بدون جاروبک (brush less) یا دیودهای چرخان

مدل یکفاز ژنراتور سنکرون:

ولتاژ تحریک (E_f) که همان ولتاژ تولید شده می‌باشد با شار تحریک و سرعت متناسب است. واضح است که شار تحریک نیز با جریان تحریک متناسب است.

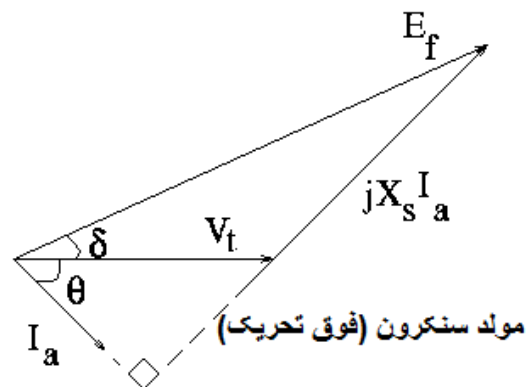


- در ژنراتور سنکرون همواره E_f از ولتاژ ترمینال (V_t) جلوتر است و زاویه‌ی δ مثبت است. ($\delta > 0$)
- در موتور سنکرون همواره E_f از ولتاژ ترمینال (V_t) عقب‌تر است و زاویه‌ی δ منفی است. ($\delta < 0$)

- زاویه توان یا زاویه گشتاور (δ) نقش مهمی در انتقال توان از ماشین به شبکه و بالعکس ایفا می‌کند و نقش آن در پایداری ماشین انکار ناپذیر است و $\delta = 90^\circ$ حد پایداری استاتیکی ماشین سنکرون می‌باشد و چنانچه $\delta > 90^\circ$ شود، سنکرونیزم از دست می‌رود، و ماشین ناپایدار می‌شود.
- در ماشین‌های واقعی در $0 < \delta < 25$ کار می‌کنند.
- در ماشین سنکرون قطب صاف مقدار توان اکتیو از رابطه‌ی $P = \frac{3V_t E_f}{X_s} \sin \delta$ بدست می‌آید.
- ژنراتور سنکرون به دلیل ($\delta > 0$) با توجه به رابطه‌ی $P = \frac{3V_t E_f}{X_s} \sin \delta$ هموار توان اکتیو تولید می‌کند. ($P > 0$)
- موتور سنکرون به دلیل ($\delta < 0$) با توجه به رابطه‌ی $P = \frac{3V_t E_f}{X_s} \sin \delta$ هموار توان اکتیو مصرف می‌کند. ($P < 0$)
- در حالت فوق تحریک ماشین سنکرون (ژنراتور و موتور) $E_f \cos \delta > V_t$ است و با توجه به رابطه‌ی $Q = \frac{3V_t}{X_s} (E_f \cos \delta - V_t)$ ماشین تولید کننده توان راکتیو است. ($Q > 0$)
- در حالت زیر تحریک ماشین سنکرون (ژنراتور و موتور) $E_f \cos \delta < V_t$ است و با توجه به رابطه‌ی $Q = \frac{3V_t}{X_s} (E_f \cos \delta - V_t)$ ماشین مصرف کننده توان راکتیو است. ($Q < 0$)
- در حالت تحریک نرمال ماشین سنکرون $E_f \cos \delta = V_t$ است و ($Q = 0$) می‌باشد.

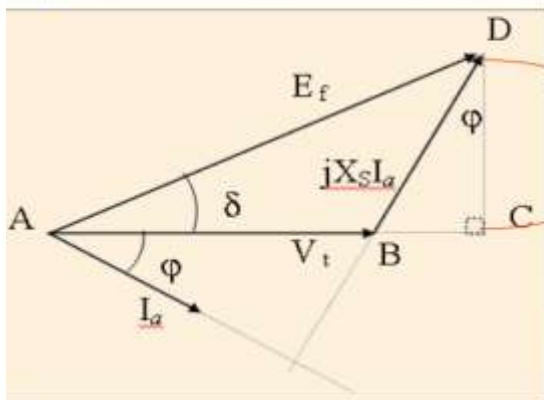
دیاگرام فازوری ژنراتور سنکرون قطب صاف در حالت فوق تحریک:

در حالت فوق تحریک ژنراتور سنکرون ($E_f \cos \delta > V_t$) دیاگرام فازوری مطابق شکل زیر است و مولد مانند خازن عمل می‌کند و توان راکتیو تحویل شبکه می‌دهد و I_a پس‌فاز است.



توان در ژنراتور سنکرون

فرض کنیم $R_a = 0$



توان اکتیو متناسب با این طول است

$$P = 3 V_{ph} I_{ph} \cos \varphi$$

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

$$\left\{ \sin \delta = \frac{DC}{E_f} \Rightarrow DC = E_f \cdot \sin \delta \right.$$

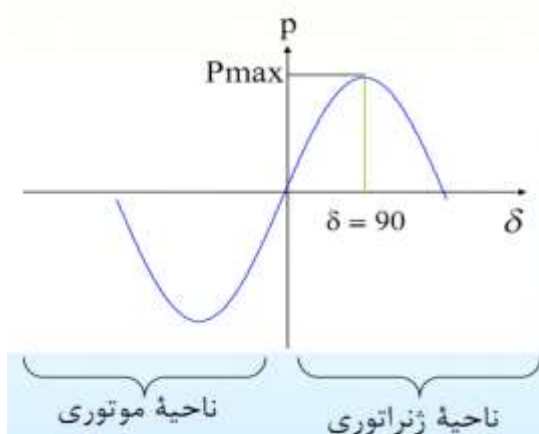
$$\left\{ \cos \varphi = \frac{DC}{X_s I_a} \Rightarrow DC = X_s \cdot I_a \cdot \cos \varphi \right.$$

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

$$P = 3 V_t I_a \cos \varphi = 3 V_t \frac{E \sin \delta}{X_s} \Rightarrow P = \frac{3 V_t E}{X_s} \sin \delta$$

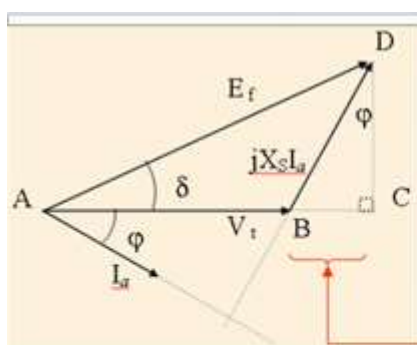
$$\sin \delta = 1 \Rightarrow P_{\max} = \frac{3 V_t E}{X_s}$$

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



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

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



فرض کنیم $R_a = 0$

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

$$\left\{ \begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{BC}{X_s I_a} \Rightarrow BC = X_s I_a \sin \varphi \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \cos \delta &= \frac{V_t + BC}{E_f} \Rightarrow BC = E_f \cos \delta - V_t \end{aligned} \right.$$

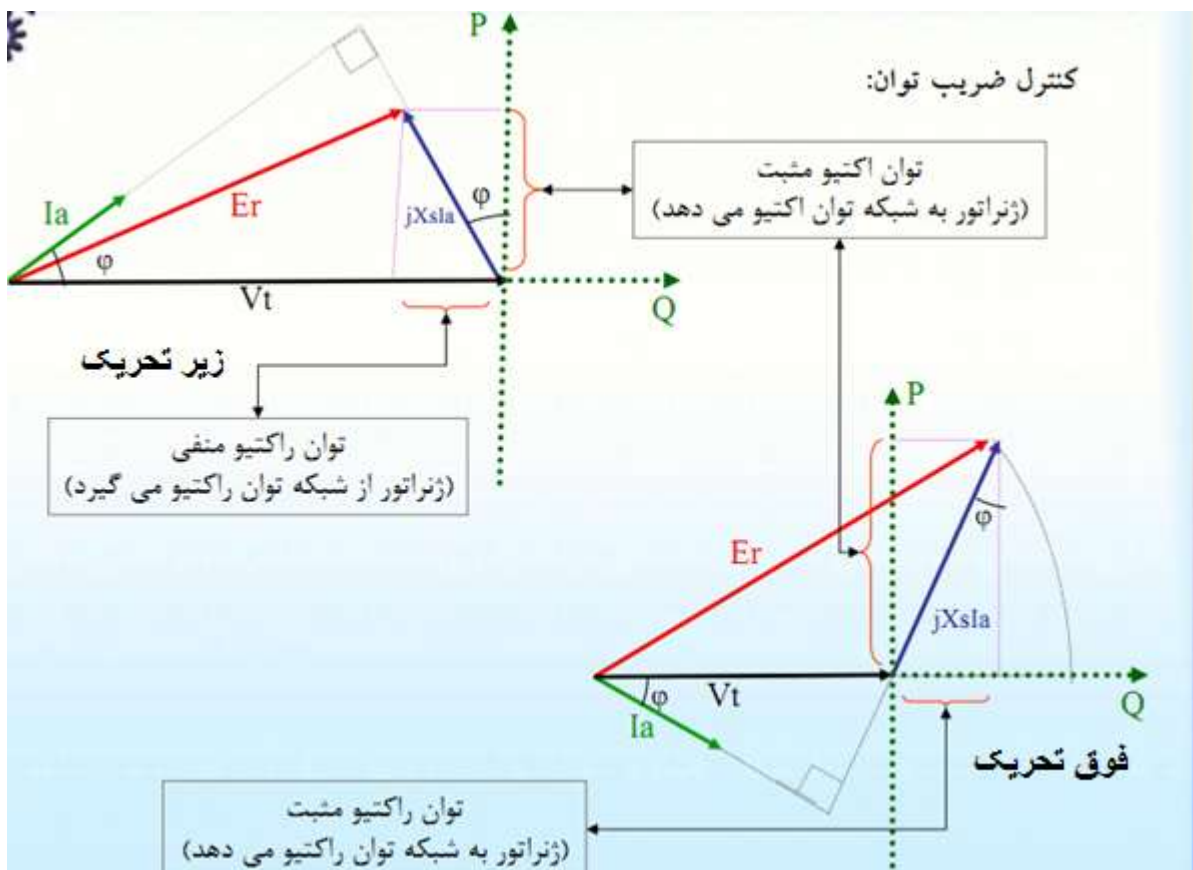
توان راکتیو متناسب با این طول است

$$Q = 3V_{ph} I_{ph} \sin \varphi$$

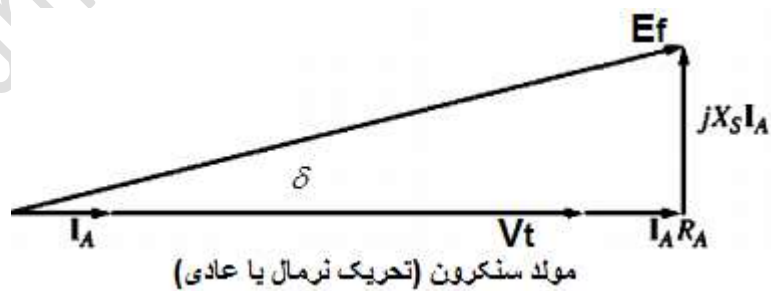
$$\Delta ADC, \Delta BDC \Rightarrow X_s I_a \sin \varphi = E \cos \delta - V_t \Rightarrow I_a \sin \varphi = \frac{E \cos \delta - V_t}{X_s}$$

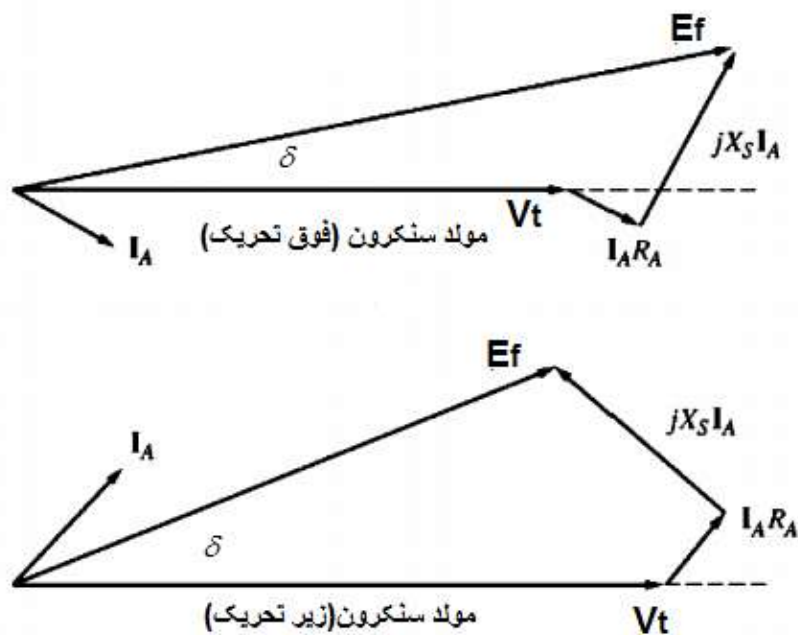
$$Q = 3V_t I_a \sin \varphi = 3V_t \frac{E \cos \delta - V_t}{X_s} \Rightarrow Q = 3 \left[\frac{V_t E \cos \delta - V_t^2}{X_s} \right]$$

مقایسه دیاگرام فازوری ژنراتور سنکرون قطب صاف در حالات فوق تحریک و زیر تحریک:



در اغلب مولدهای سنکرون بزرگ نیروگاهی از افت اهمی صرفنظر می‌شود چون در این ماشین‌ها به جای سیم مسی از تسمه‌های مسی استفاده می‌شود که مقاومت اهمی خیلی پایین تری نسبت به سیم دارند، دیاگرام‌های فازوری زیر با لحاظ افت اهمی ترسیم شده‌اند.



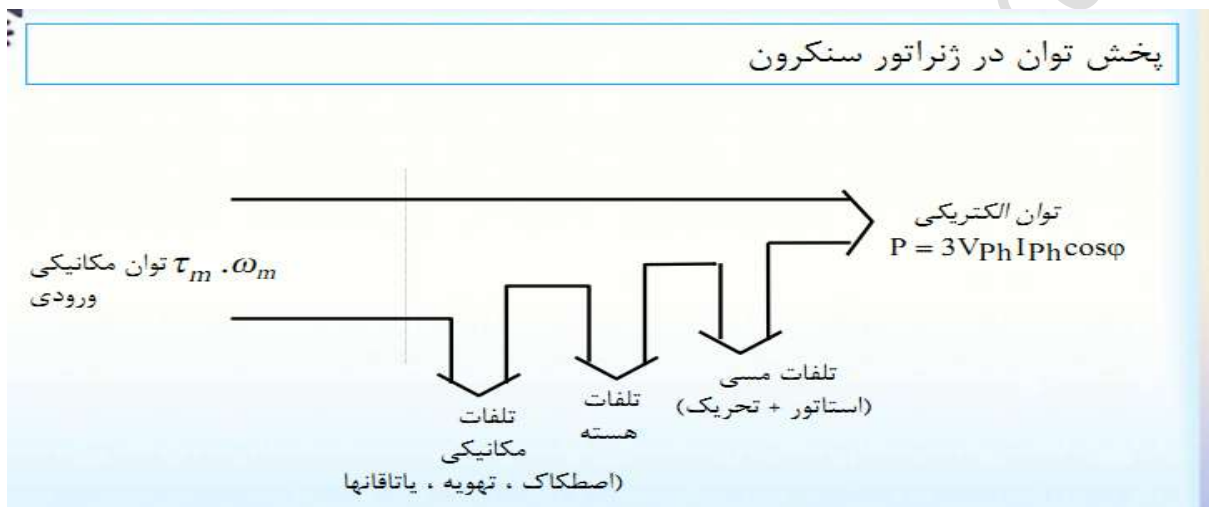


مثال ۱: یک آلترناتور سه فاز ۶/۶KV - ۱۵۰۰ KVA با سیم پیچ اتصال ستاره در هر فاز دارای مقاومت ۰/۴ اهم و راکتانس ۶ اهم است. این ماشین بار کامل را در ولتاژ نامی و ضریب توان ۰/۸ پس فاز می‌دهد. ضمن ترسیم دیاگرام فازوری زاویه توان را بیابید.

حل:

مثال ۲: ولتاژ ترمینال یک مولد سنکرون با اتصال ستاره در بار 200A و ضریب قدرت 0.8 پس فاز $200\sqrt{3}$ ولت می‌باشد. اگر از R_s صرف نظر و $X_s = 0.5\Omega$ باشد: الف) ولتاژ القایی هر فاز (E_{ph} یا E_f) ب) زاویه بار یا زاویه توان (δ) ج) مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی

مثال ۳: یک ژنراتور سنکرون سه فاز قطب صاف با قدرت 2 مگا ولت آمپر و ولتاژ خط 6 کیلوولت دارای اتصال ستاره تحت ضریب قدرت 0.8 پس فاز مفروض است، اگر از R_s صرف نظر شود و راکتانس سنکرون هر فاز $X_s = j5$ اهم باشد مطلوب است: الف) ولتاژ القایی هر فاز (E_{ph} یا E_f) ب) زاویه بار یا زاویه توان (δ) ج) مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی



کار موازی ژنراتورهای سنکرون :

امروزه به ندرت می‌توان ژنراتور سنکرونی یافت که مستقل از دیگر ژنراتورها کار کند و به تنهایی بار خودش را تغذیه کند. چنین حالتی را تنها در کاربردهای اندکی، مثلاً به عنوان ژنراتورهای اضطراری می‌توان یافت. در کاربردهای معمولی همیشه تعدادی ژنراتور به طور موازی توان مورد نیاز بارها را تأمین می‌کنند. پس در شبکه‌ی قدرت عظیم، شاید هزاران ژنراتور بار سیستم را بین خود تقسیم می‌کنند.

چرا ژنراتورهای سنکرون به طور موازی کار می‌کنند؟ این کار چندین فایده مهم دارد :

- ۱- باری که چند ژنراتور می‌توانند تأمین کنند بیشتر از باری است که یک ماشین به تنهایی تأمین می‌کند.
- ۲- داشتن ژنراتورهای زیاد، قابلیت اطمینان سیستم قدرت را افزایش می‌دهد، چون خرابی یکی از آن‌ها موجب نمی‌شود که تمام توان تأمین شده برای بار قطع شود.

۳- اگر تعداد ژنراتورها زیاد باشد امکان خارج کردن یک یا چند ژنراتور از مدار برای سرویس و نگهداری وجود دارد.

۴- اگر تنها یک ژنراتور به کار رفته باشد و بار آن بسیار کمتر از بار کامل باشد، بازده چندان خوبی ندارد. اما اگر به جای آن از تعدادی ماشین کوچک تر استفاده شود می توان تنها کسری از آنها را وارد مدار کرد. ژنراتورهایی که در مدار قرار می‌گیرند نزدیک بار کامل کار کرده، بازده بیشتری خواهند داشت.

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 ژنراتورهای سنکرون:

اگر در یک لحظه دلخواه دو ژنراتور را با هم موازی کنیم، احتمال آن است که ژنراتورها به طور جدی صدمه ببینند و توان مورد نیاز بار از دست برود. اگر ولتاژ دو هادی که با بسته شدن کلید به هم متصل می‌شوند، دقیقاً یکسان نباشد، هنگام بستن کلید **جریان بسیار بزرگی** ایجاد می‌شود. برای اجتناب از این مسأله، ولتاژ هر یک از سه فاز باید دقیقاً همان دامنه و فاز را داشته باشد که هادی متناظر آن داراست. فرکانس ژنراتور جدید (ژنراتوی که وارد مدار می‌شود) باید اندکی بیشتر از فرکانس سیستم در حال کار باشد.

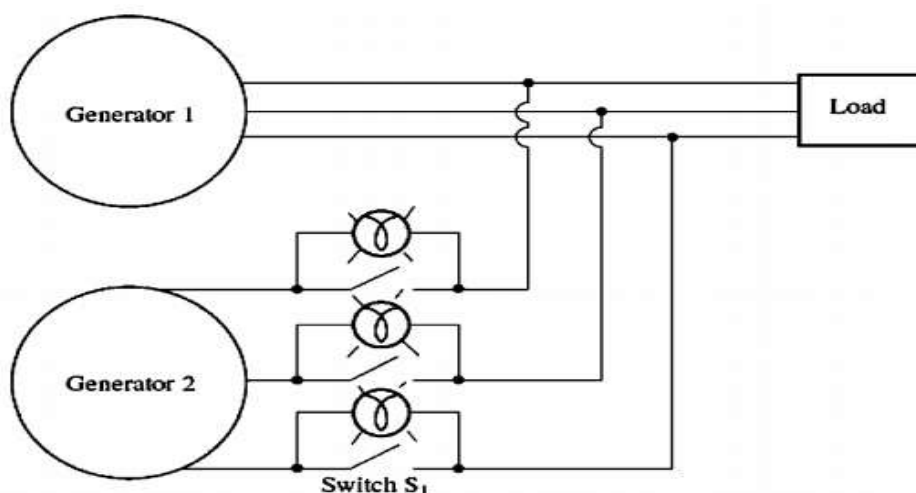
اگر فرکانس ژنراتورها هنگام اتصال، خیلی نزدیک هم نباشد، تا پایدار شدن ژنراتورها و رسیدن به یک فرکانس مشترک، جریان‌های حالت گذرای بزرگی به وجود می‌آید. فرکانس دو ماشین باید به هم خیلی نزدیک باشند اما نمی‌توانند دقیقاً برابر باشند.

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 القایی	جابجایی 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

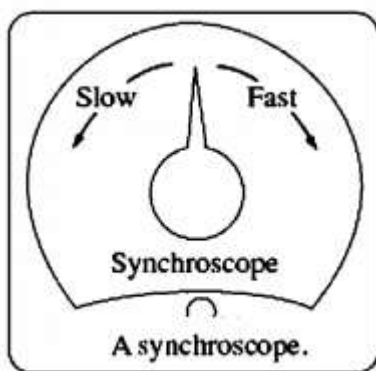
چه وقت می‌توان گفت دو سیستم هم فازند؟ یک راه ساده روش سه لامپی است:

هنگامی که هر سه لامپ خاموش اند، اختلاف ولتاژ دو سر آن‌ها صفر است و دو سیستم هم فازند. این روش ساده را می‌توان به کار برد ولی خیلی دقیق نیست. راه بهتر استفاده از سنکروسکوپ است.



اگر هر سه لامپ با هم پر نور و کم نور شوند، دو سیستم ترتیب فاز یکسانی دارند. اگر لامپ‌ها به نوبت پر نور و کم نور شوند، ترتیب فاز دو سیستم مخالف هم است و یکی از آن دو را باید عوض کرد. هنگامی که هر سه لامپ خاموش اند، اختلاف ولتاژ دو سر آن‌ها صفر است و دو سیستم هم فازند و کلید را می‌بندیم.

توجه کنید که سنکروسکوپ تنها یک فاز را کنترل می‌کند، و در مورد توالی فازها یا ترتیب فازها اطلاعاتی نمی‌دهد. در ژنراتورهای بزرگ که به سیستم قدرت متصل می‌شوند، تمام فرآیند موازی کردن یک ژنراتور جدید با سیستم به طور خودکار توسط کامپیوتر انجام می‌شود. اما ژنراتورهای کوچکتر به طور دستی و طی مراحل توصیح داده شده در بالا، به وسیله اپراتور به سیستم متصل می‌شوند.



صفر (به معنی هم فاز بودن) در بالا و زاویه‌ی 180° درجه در پایین قرار دارد. چون فرکانس دو سیستم اندکی تفاوت دارند، زاویه فازی که سنکروسکوپ نشان می‌دهد به کندی تغییر می‌کند. اگر ژنراتور یا سیستم جدید تندتر از سیستم در حال کار باشد (حالت مطلوب)، زاویه فاز آن جلو می‌رود و عقربه سنکروسکوپ در جهت

ساعتگرد می‌چرخد. اگر ماشین جدید کندتر باشد، عقربه در جهت پاد ساعتگرد می‌چرخد. وقتی که عقربه در وضعیت عمودی قرار دارد، ولتاژها هم فازند و می‌توان برای اتصال سیستم‌ها کلید را بست.

نکته: با استفاده از دستگاه سنکروسکوپ یا سنکروچک می‌توان شرایط موازی کردن ژنراتورها را بررسی کرد.

مشخصه‌ی (فرکانس-توان اکتیو) و (ولتاژ-توان راکتیو) ژنراتور سنکرون:

هر ژنراتوری را یک گرداننده‌ی اولیه، که منبع توان مکانیکی ژنراتور است، می‌گردانند. متداول‌ترین نوع گرداننده اولیه توربین بخار است اما انواع دیگری از قبیل موتورهای دیزلی، توربین‌های گازی، توربین‌های آبی، ... وجود دارند.

منبع اولیه توان هر چه باشد، تمام گرداننده‌های اولیه رفتار مشابهی دارند. هرچه توان بیشتری از آن‌ها کشیده شود، سرعت چرخش آن‌ها کمتر می‌شود. در حالت کلی این کاهش سرعت غیر خطی است، اما معمولاً مکانیزم‌هایی در گاورنر به کار می‌رود تا کاهش سرعت را با افزایش تقاضای توان خطی کند.

مکانیزم گاورنر هر چه باشد، همیشه طوری تنظیم می‌شود که افت سرعت در اثر افزایش بار کم باشد. افت سرعت (SD) گرداننده‌ی اولیه با معادله زیر تعریف می‌شود و افت سرعت بیشتر ژنراتورها ۲ تا ۴ درصد است.

$$SD = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\%$$

رابطه‌ی فرکانس و توان خروجی ژنراتور هم با معادله‌ی زیر تعریف می‌شود:

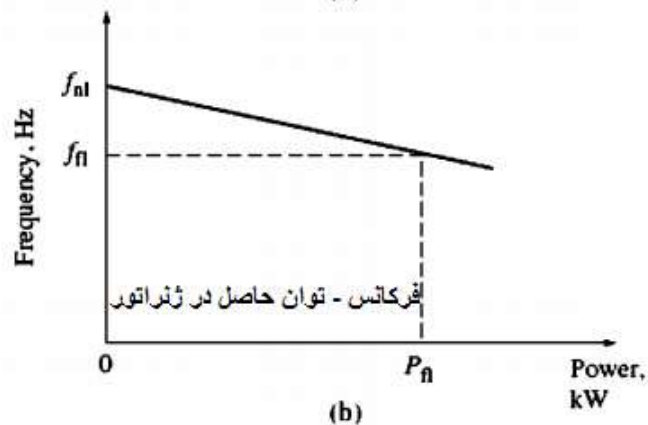
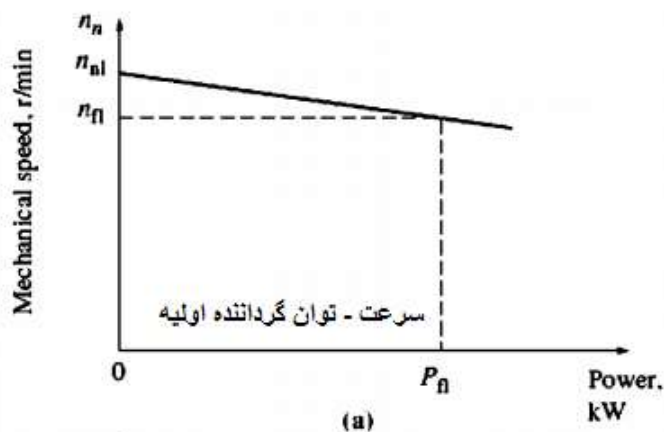
P = power output of the generator

f_{nl} = no-load frequency of the generator

f_{sys} = operating frequency of system

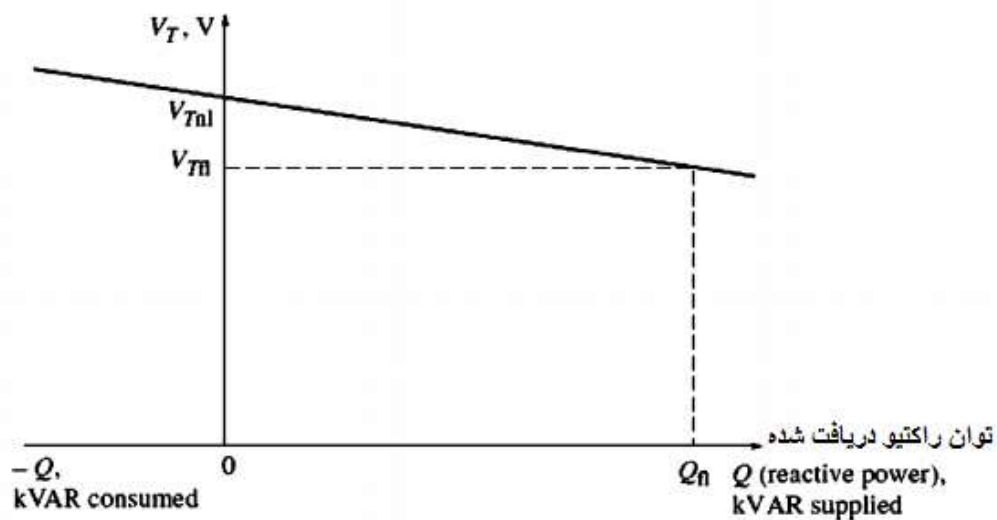
s_p = slope of curve, in kW/Hz or MW/Hz

$$P = s_p(f_{nl} - f_{sys})$$



(a) The speed-versus-power curve for a typical prime mover. (b) The resulting frequency-versus-power curve for the generator.

می‌توان بین توان راکتیو Q و ولتاژ پایانه‌ای V_T رابطه‌ی مشابهی به دست آورد. چنانکه قبلاً دیدم، اگر یک بار پس فاز به ژنراتور افزوده شود، ولتاژ پایانه‌ای آن افت می‌کند. به طور مشابه، اگر بار پیش فاز به ژنراتور افزوده شود، ولتاژ پایانه‌ای آن زیاد می‌شود. منحنی ولتاژ پایانه‌ای برحسب توان واکنشی را می‌توان به دست آورد.



کار ژنراتورهای موازی با سیستم‌های قدرت بزرگ:

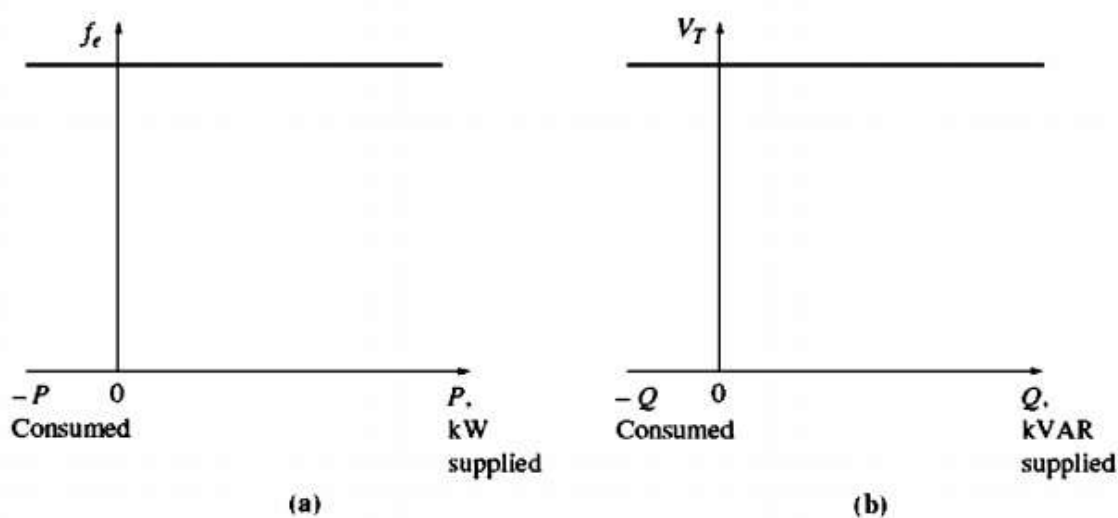
ژنراتورهای سنکرون سه‌فاز عمدتاً به سیستم قدرت متصل‌اند و بندرت به تنهایی بارهای خاص و محلی را تامین می‌کنند. در صورتی که ژنراتورهای سنکرون سه‌فاز به شبکه قدرت وصل‌اند و مشترکاً بار مشترکین را تامین می‌کنند، در این صورت اصطلاحاً می‌گویند که ژنراتورها به شین بی‌نهایت وصل‌اند. از آنجایی که تعداد ژنراتورهای متصل به شبکه زیاد بوده و اندازه این ژنراتورها نسبتاً حجیم و بزرگ است، لذا ولتاژ و فرکانس شین بی‌نهایت به سختی قابل تغییر است و ثابت می‌باشد.

هنگامی که ژنراتور سنکرون به یک سیستم قدرت وصل است، معمولاً سیستم قدرت آن چنان بزرگ است که اپراتور ژنراتور هر کار کند تأثیر چندانی بر سیستم قدرت نخواهد داشت. این مفهوم را در حالت ایده‌آل با شین بی‌نهایت نشان می‌دهند.

شین بی‌نهایت (Infinite Bus) سیستم قدرت بسیار بزرگی است که هر قدر توان اکتیو یا راکتیو به آن داده یا از آن گرفته شود ولتاژ و فرکانس آن تغییر نمی‌کند. مشخصه‌ی توان - فرکانس و مشخصه‌ی توان راکتیو - ولتاژ آن در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

قبل موازی کردن ژنراتور سنکرون با شبکه، ژنراتور سنکرون باید مشخصات زیر را دارا باشد:

- ۱) هم‌ولتاژ شبکه یا شین بی‌نهایت باشد.
- ۲) هم‌فرکانس شبکه یا شین بی‌نهایت باشد (البته فرکانس اندکی بیشتر از فرکانس شبکه باشد)
- ۳) توالی فاز ژنراتور با توالی فاز شبکه یکسان باشد.
- ۴) هم‌فاز شین بی‌نهایت یا شبکه باشد.



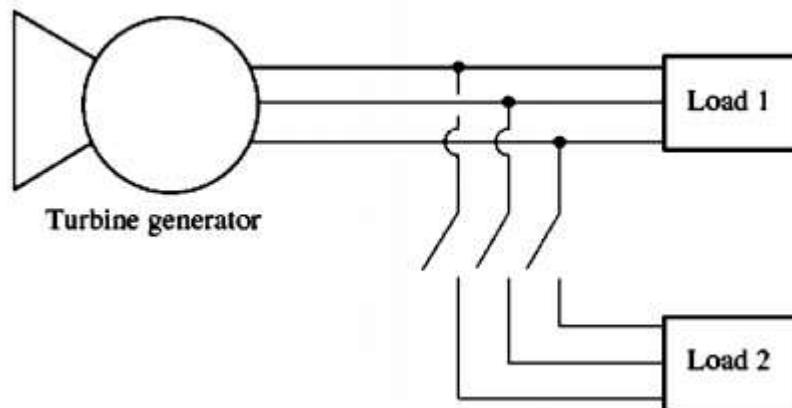
همانگونه که در قسمت قبل تشریح شد در نیروگاه‌ها چک کردن شرایط موازی کردن ژنراتور با شین بی‌نهایت توسط دستگاهی به نام سنکروسکوپ انجام می‌پذیرد، البته چک کردن توالی فازها توسط سنکروسکوپ امکان پذیر نیست و بل از موازی سازی باید حتما مورد تایید قرار گرفته باشد زیرا خطرات جبران ناپذیری را به دنبال خواهد داشت. هرگاه عقربه‌ی سنکروسکوپ به آرامی حرکت می‌نمود (به عبارت دیگر فرکانس تقریباً یکسان است) و به نقطه‌ی اختلاف فاز صفر رسید (وضعیت عمودی در بالا، انحراف کم به سمت سریع) دژنکتور را می‌بندیم و ژنراتور را به شین بی‌نهایت وصل می‌کنیم.

در آزمایشگاه‌ها بجای استفاده از سنکروسکوپ از سه لامپ استفاده می‌گردد و در آزمایشگاه محرک اولیه یک موتور DC یا موتور القایی است که نقش توربین نیروگاه را ایفا می‌کند. سرعت چرخش محور را می‌توان طوری تنظیم کرد که فرکانس ژنراتور سنکرون با شین بی‌نهایت مساوی گردد.

مثال ۱): ژنراتوری مطابق شکل باری را تغذیه می‌کند. می‌خواهیم بار دومی را با بار اول موازی کنیم. فرکانس بی‌باری ژنراتور ۶۱ HZ و شیب sp آن 1 MW/HZ است، بار ۱ توان حقیقی ۱۰۰۰ KW را با ضریب توان پس فاز ۰/۸ و بار ۲ توان حقیقی ۸۰۰ KW را با ضریب توان پس فاز ۰/۷۰۷ مصرف می‌کند.

الف) قبل از بستن کلید فرکانس سیستم چند است؟

ب) بعد از وصل بار ۲ فرکانس کار سیستم چقدر است؟



$$P = s_p(f_{nl} - f_{sys})$$

so
$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_p}$$

(a) The initial system frequency is given by

$$\begin{aligned} f_{sys} &= f_{nl} - \frac{P}{s_p} \\ &= 61 \text{ Hz} - \frac{1000 \text{ kW}}{1 \text{ MW/Hz}} = 61 \text{ Hz} - 1 \text{ Hz} = 60 \text{ Hz} \end{aligned}$$

(b) After load 2 is connected,

$$\begin{aligned} f_{sys} &= f_{nl} - \frac{P}{s_p} \\ &= 61 \text{ Hz} - \frac{1800 \text{ kW}}{1 \text{ MW/Hz}} = 61 \text{ Hz} - 1.8 \text{ Hz} = 59.2 \text{ Hz} \end{aligned}$$

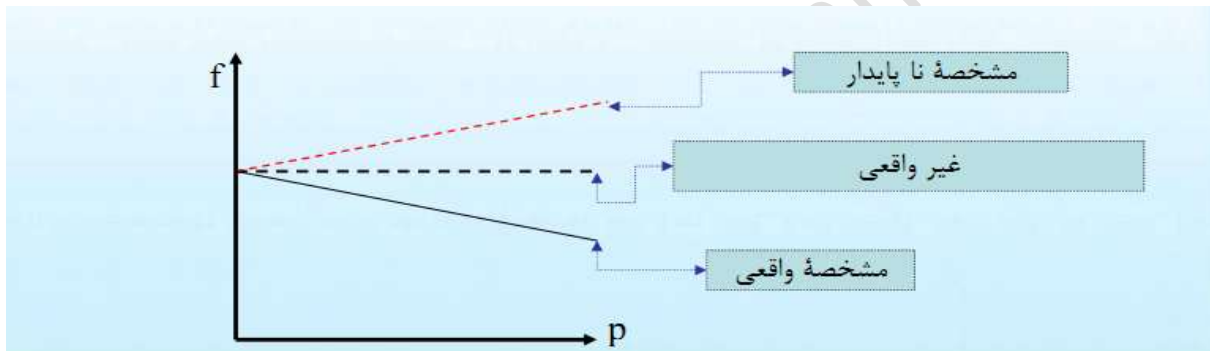
موازی کردن دو ژنراتور با یکدیگر (دیاگرام‌های خانه ای)

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

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

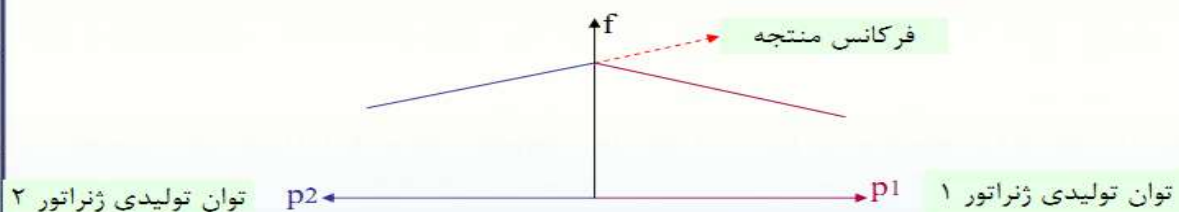
و دارای مشخصه ای بصورت زیر است: $P = S_p(f_{nl} - f)$

S_p شیب مشخصه بر حسب کیلو وات یا مگاوات بر هرتز می‌باشد.

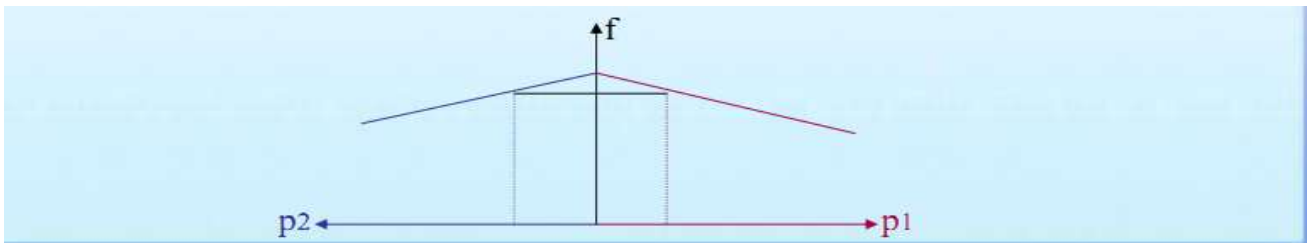


موازی کردن دو ژنراتور با یکدیگر (با بار)

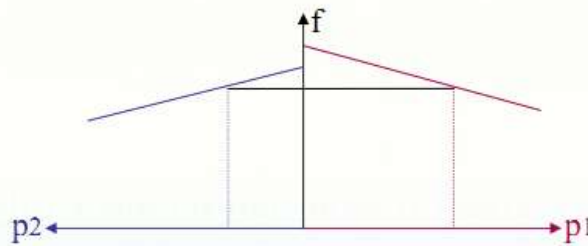
دو ژنراتور بدون بار و شرایط یکسان به هم وصل شده‌اند و Set point آنها مثل هم تنظیم شده



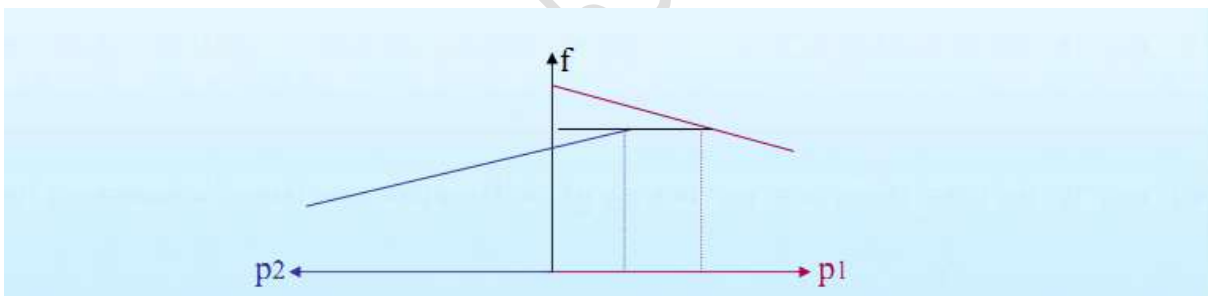
اگر در این حالت باری به این دو ژنراتور وصل شود، همانگونه که از دیاگرام زیر پیداست فرکانس اندکی افت می‌کند و ژنراتورهای ۱ و ۲ توانهایی را تولید می‌کنند که جمع آنها با توان مورد نیاز بار برابر است.



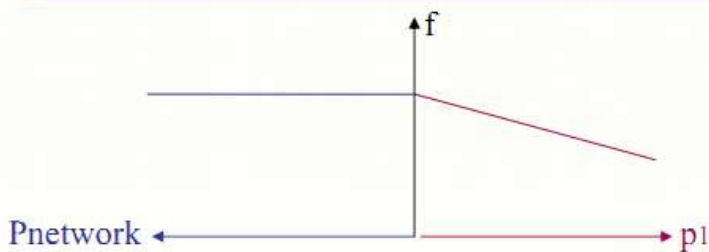
می‌توان میزان تولید ژنراتورها را با تنظیم Set point تغییر داد



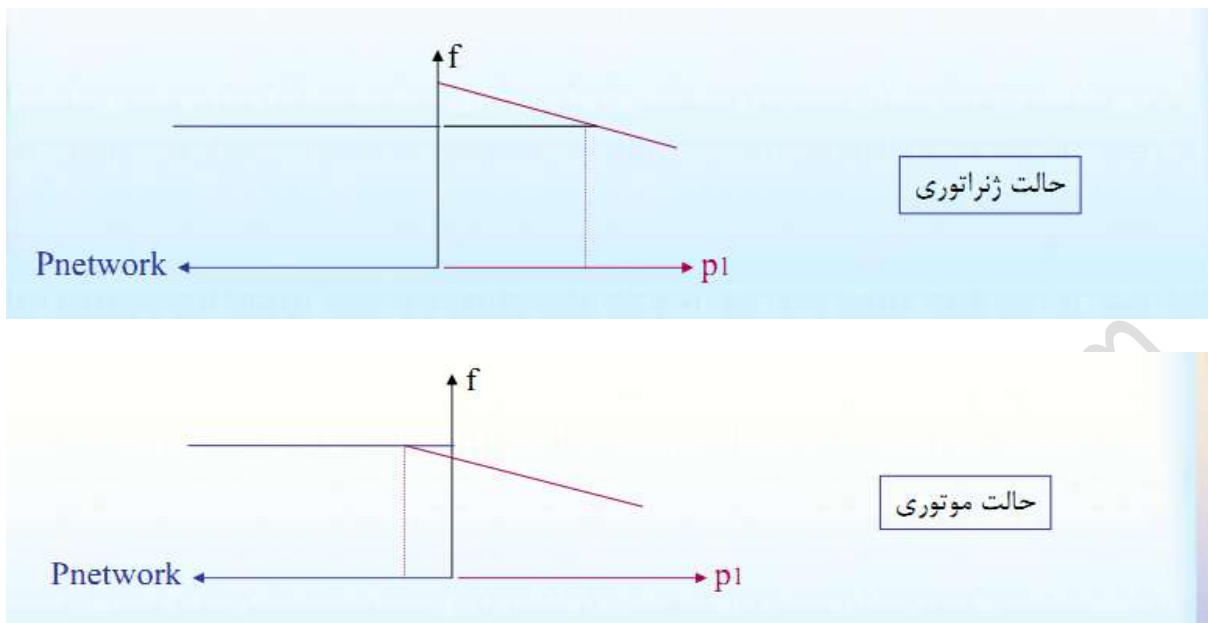
اگر Set point به‌طور مناسب تنظیم نشوند ممکن است حالتی رخ دهد که یکی از ژنراتورها به شکل یک بار برای دیگری عمل کند



ژنراتور موازی با (یا متصل به) شبکه



حالت شناور



مثال (۲): دو ژنراتور سنکرون کوچک با توجه به مشخصات زیر با هم موازی شده‌اند و به باس بی‌نهایت اتصال دارند و مشترکاً بار 2.5MW با ضریب توان 0.8 پس‌فاز را تغذیه می‌کنند:

الف) فرکانس سیستم چند هرتز است و هر ژنراتور چه توانی را فراهم می‌سازد؟

ب) فرض کنید یک بار 1MW به این سیستم قدرت اضافه شود، فرکانس جدید سیستم چقدر خواهد بود؟ و هر ژنراتور چه توانی را فراهم خواهد کرد؟

ج) نمودارهای توان – فرکانس یا نمودار خانه‌ای سیستم را ترسیم کنید.

ژنراتور اول G_1	$F_{n1}=61.5[\text{HZ}]$	$SP_1=1[\frac{\text{MW}}{\text{HZ}}]$
ژنراتور دوم G_2	$F_{n2}=61[\text{HZ}]$	$SP_2=1[\frac{\text{MW}}{\text{HZ}}]$

Solution

The power produced by a synchronous generator with a given slope and no-load frequency is given by Equation (5-28):

$$P_1 = s_{P1}(f_{nl,1} - f_{sys})$$

$$P_2 = s_{P2}(f_{nl,2} - f_{sys})$$

Since the total power supplied by the generators must equal the power consumed by the loads,

$$P_{load} = P_1 + P_2$$

These equations can be used to answer all the questions asked.

- (a) In the first case, both generators have a slope of 1 MW/Hz, and G_1 has a no-load frequency of 61.5 Hz, while G_2 has a no-load frequency of 61.0 Hz. The total load is 2.5 MW. Therefore, the system frequency can be found as follows:

$$P_{load} = P_1 + P_2$$

$$= s_{P1}(f_{nl,1} - f_{sys}) + s_{P2}(f_{nl,2} - f_{sys})$$

$$2.5 \text{ MW} = (1 \text{ MW/Hz})(61.5 \text{ Hz} - f_{sys}) + (1 \text{ MW/Hz})(61 \text{ Hz} - f_{sys})$$

$$= 61.5 \text{ MW} - (1 \text{ MW/Hz})f_{sys} + 61 \text{ MW} - (1 \text{ MW/Hz})f_{sys}$$

$$= 122.5 \text{ MW} - (2 \text{ MW/Hz})f_{sys}$$

$$\text{therefore } f_{sys} = \frac{122.5 \text{ MW} - 2.5 \text{ MW}}{(2 \text{ MW/Hz})} = 60.0 \text{ Hz}$$

The resulting powers supplied by the two generators are

$$P_1 = s_{P1}(f_{nl,1} - f_{sys})$$

$$= (1 \text{ MW/Hz})(61.5 \text{ Hz} - 60.0 \text{ Hz}) = 1.5 \text{ MW}$$

$$P_2 = s_{P2}(f_{nl,2} - f_{sys})$$

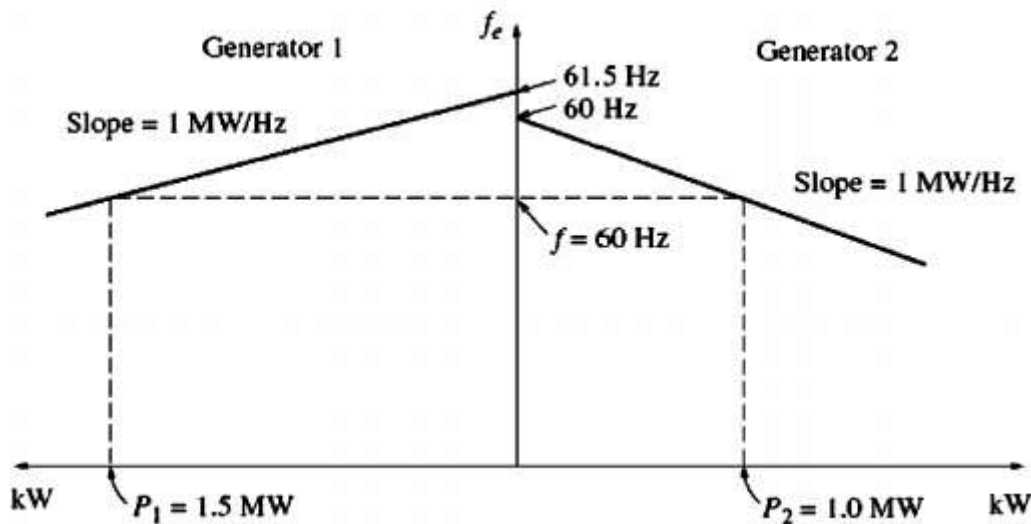
$$= (1 \text{ MW/Hz})(61.0 \text{ Hz} - 60.0 \text{ Hz}) = 1 \text{ MW}$$

(b) When the load is increased by 1 MW, the total load becomes 3.5 MW. The new system frequency is now given by

$$\begin{aligned}
 P_{\text{load}} &= s_{P1}(f_{\text{nl},1} - f_{\text{sys}}) + s_{P2}(f_{\text{nl},2} - f_{\text{sys}}) \\
 3.5 \text{ MW} &= (1 \text{ MW/Hz})(61.5 \text{ Hz} - f_{\text{sys}}) + (1 \text{ MW/Hz})(61 \text{ Hz} - f_{\text{sys}}) \\
 &= 61.5 \text{ MW} - (1 \text{ MW/Hz})f_{\text{sys}} + 61 \text{ MW} - (1 \text{ MW/Hz})f_{\text{sys}} \\
 &= 122.5 \text{ MW} - (2 \text{ MW/Hz})f_{\text{sys}} \\
 \text{therefore } f_{\text{sys}} &= \frac{122.5 \text{ MW} - 3.5 \text{ MW}}{(2 \text{ MW/Hz})} = 59.5 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

The resulting powers are

$$\begin{aligned}
 P_1 &= s_{P1}(f_{\text{nl},1} - f_{\text{sys}}) \\
 &= (1 \text{ MW/Hz})(61.5 \text{ Hz} - 59.5 \text{ Hz}) = 2.0 \text{ MW} \\
 P_2 &= s_{P2}(f_{\text{nl},2} - f_{\text{sys}}) \\
 &= (1 \text{ MW/Hz})(61.0 \text{ Hz} - 59.5 \text{ Hz}) = 1.5 \text{ MW}
 \end{aligned}$$



- ژنراتورهای سنکرون عمدتاً به شبکه‌ی بی نهایت وصلاند و شبکه‌ی به هم پیوسته را تغذیه می‌کنند اما ژنراتورهای کوچکی هم یافت می‌شوند که بار محلی و مستقل را تغذیه می‌کنند.
- در ژنراتورهای سنکرون مستقل که به صورت انفرادی کار می‌کنند با کنترل تحریک توسط AVR می‌توان کنترل ولتاژ نموده و با کنترل سرعت توسط گاورنر می‌توان کنترل فرکانس نمود.

- یک مولد منفرد مجهز به AVR و GOV اگر مقدار جریان بار زیاد شود، هم ولتاژ و هم فرکانس مولد ثابت می‌ماند.

مثال (۳): دو ژنراتور سنکرون کوچک با توجه به مشخصات زیر با هم موازی شده‌اند و به باس بی‌نهایت اتصال دارند و مشترکا" بار 4MW را تغذیه می‌کنند: فرکانس سیستم چند هرتز است و هر ژنراتور چه توانی را فراهم می‌سازد؟

G_1 ژنراتور اول	$F_{n1}=52[Hz]$	$SP_1=0.9[\frac{MW}{Hz}]$
G_2 ژنراتور دوم	$F_{n2}=51[Hz]$	$SP_2=1[\frac{MW}{Hz}]$

مثال (۴): سه ژنراتور کوچک با هم موازی شده و به باس بی‌نهایت با فرکانس 50Hz اتصال دارند و مشترکا" بار 4.4MW را تغذیه می‌کنند، فرکانس بی‌باری ژنراتور سوم را با توجه به معلومات زیر محاسبه کنید. و هر ژنراتور چه توانی را فراهم می‌سازد؟

G_1	$F_{n1}=52[Hz]$	$SP_1=0.9[\frac{MW}{Hz}]$
G_2	$F_{n2}=51.5[Hz]$	$SP_2=1[\frac{MW}{Hz}]$
G_3	$F_{n3}=?[Hz]$	$SP_3=1.1[\frac{MW}{Hz}]$

موتورهای سنگرون سه‌فاز:

موتورهای آسنکرون خودراه انداز هستند اما موتورهای سنگرون خودراه‌انداز نیستند، گفتنی است که سرعت چرخش میدان گردان استاتور آنقدر سریع است که رتور به دلیل سنگینی و لختی نمی‌تواند خود را با آن هماهنگ سازد، در نتیجه ارتعاشی در مدار رتور پدید می‌آید.

موارد کاربرد موتور سنگرون

- ۱- در توانهای بالای یک مگاوات این موتورها از نظر قیمت و قابلیت بر موتورهای القایی ارجحیت داشته و بکار می‌روند.
- ۲- در کارخانه از این موتورها به دو دلیل استفاده می‌شود: یکی برای گرداندن بارهای مکانیکی که نیاز به سرعت ثابت دارند و دیگر برای اصلاح ضریب توان.

مزایا و معایب موتورهای سنگرون

مزایا:

- ۱- یکی از مزایای موتور سنگرون آنست که همواره با یک سرعت ثابت کار می‌کند و در هر گشتاوری که بخواهیم یا به هیچ وجه کار نمی‌کند یا اینکه با یک سرعت ثابت کار می‌کند چنان خصوصیتی را می‌توان با مشخصه روبرو نشان داد.
- ۲- نسبت به موتورهای القایی بیشتر قابل کنترل می‌باشند.
- ۳- در ضریب توانهای مختلف می‌توانند کار کنند، بعبارت دیگر هم می‌توانند تولید کننده و هم مصرف کننده توان راکتیو باشند.
- ۴- راندمان بالایی 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.

مشکلات راه اندازی موتور سنکرون

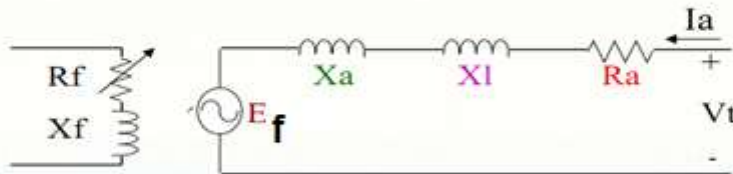
موتور سنکرون گشتاور راه اندازی ندارد . چرا ؟

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 القایی)
- ۳- استفاده از محرک مکانیکی خارجی

مدار معادل یک فاز از موتور سنکرون



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

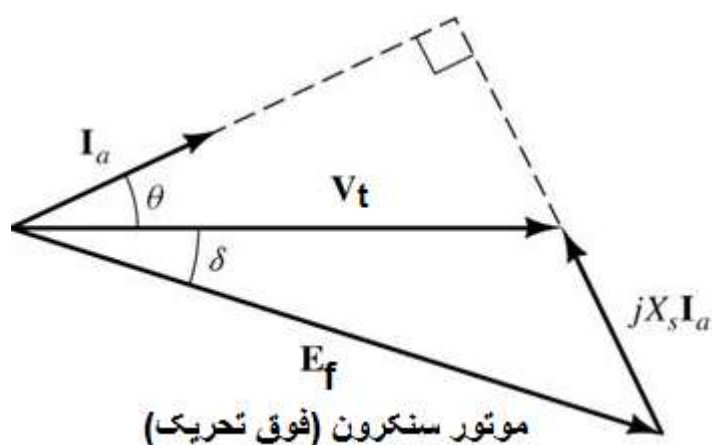
$$X_s = X_a + X_l$$

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

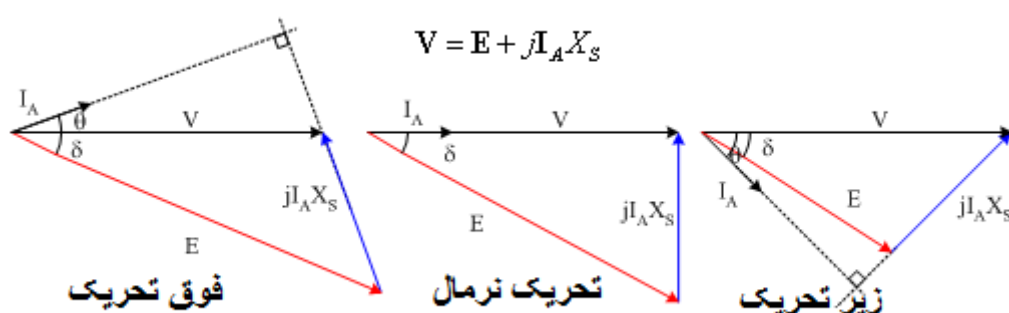
دیاگرام فازوری موتور سنکرون قطب صاف در حالت فوق تحریک :

در حالت فوق تحریک موتور سنکرون ($E_f \cos \delta > V_t$) دیاگرام فازوری مطابق شکل زیر است و مولد مانند خازن عمل می کند و توان راکتیو تحویل شبکه می دهد و I_a پیش فاز است.

یادآوری: I_a حالت فوق تحریک ژنراتور سنکرون پس فاز بود.



جمع‌بندی: دیاگرام فازوری حالات کاری موتور سنکرون



مثال ۴: یک ماشین سنکرون سه فاز چهار قطبی، 60 هرتزی 5 کیلو ولت آمپری 208 ولتی به صورت ژنراتوری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. اگر این ماشین با اتصال ستاره در حالت فوق تحریک، توان اسمی را تحت ضریب قدرت 0.8 پس فاز تحویل شبکه دهد و از R_s صرف نظر شود و راکتانس سنکرون هر فاز $X_s = 18 \Omega$ اهم باشد مطلوب است: (۱) ولتاژ القایی هر فاز (E_f) زاویه بار یا زاویه توان (δ) (۲) مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی (۴) حد پایداری استاتیک یا P_{max} (۵) ترسیم دیاگرام فازوری

پاسخ: $E_f = 206.9 \text{ V/Phase}$ و $\delta = 25.5^\circ$

*** اگر ماشین فوق به صورت موتور سنکرون سه فاز مورد بهره‌برداری قرار گیرد و آنرا به شبکه سه فاز با ولتاژ ترمینال 208 ولت با فرکانس 60 هرتز متصل سازیم و جریان تحریک را به گونه‌ای تنظیم کنیم تا

موتور 3 کیلو وات تحت ضریب توان واحد از شبکه بکشد. مقدار ولتاژ القایی هر فاز موتور (E_f) و زاویه

توان (δ) را در محاسبه کنید. پاسخ: $E_f = 137.35 \text{ V/Phase}$ و $\delta = -29^\circ$

*اگر جریان تحریک ثابت باشد و بار روی محور بتدریج افزایش یابد، گشتاور ماکزیمم (بیشینه) یا گشتاور

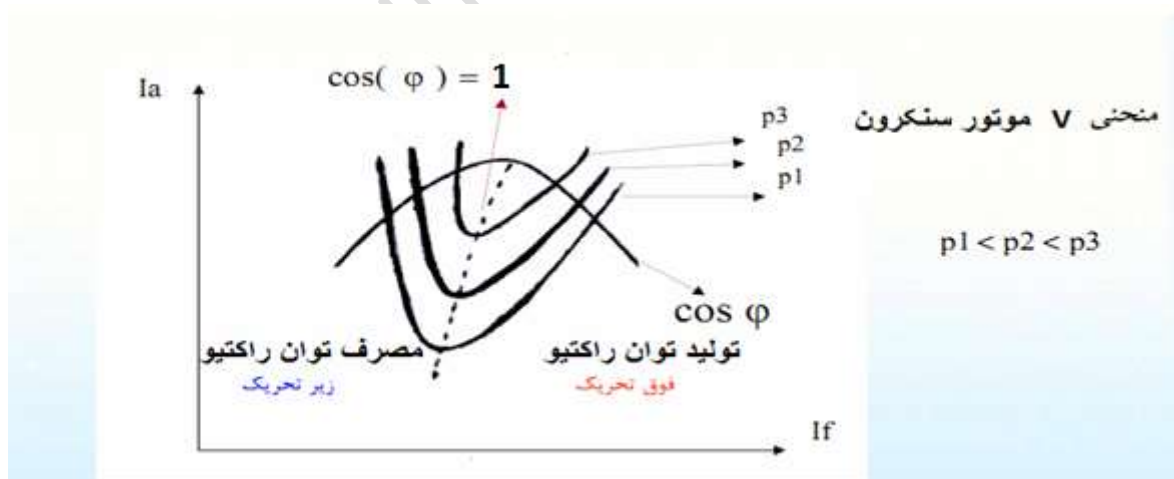
پرتگاهی را ($T_{\max}$) را حساب کنید. (گشتاور ماکزیمم در $\delta = 90^\circ$ رخ می‌دهد).

$$P_{\max} = \frac{3V_t E_f}{X_s} = \frac{3 \times 120 \times 137.35}{8} = 6180.75 \text{ W}$$

$$T_{\max} = \frac{P_{\max}}{\omega_s} = \frac{6180.75}{\omega_s} = 32.8 \text{ N.M}$$

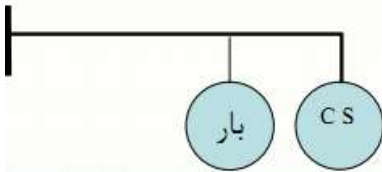
حالات کاری موتورهای سنکرون و منحنی (V)

- اگر مدار تحریک رتور، تحریک لازم را فراهم سازد، استاتور جریان راکتیو نخواهد کشید و موتور در حالت ضریب توان واحد کار خواهد کرد (تحریک نرمال یا عادی) $Q = 0$ (عملکرد اهمی).
 - اگر جریان تحریک رتور کاهش یابد، جریان راکتیو از شبکه به موتور سرازیر می‌شود تا به رتور جهت مغناطیس‌کنندگی ماشین کمک کند. در این صورت موتور سنکرون سه‌فاز در حالت پس‌فاز کار خواهد کرد و توان راکتیو از شبکه اخذ می‌کند. (زیر تحریک) $Q < 0$ (عملکرد سلفی).
 - اگر جریان تحریک رتور زیاد شود (میدان رتور افزایش می‌یابد) در این صورت جریان راکتیو پیش‌فاز از شبکه کشیده می‌شود تا با میدان رتور به مخالفت برخیزد، در این حالت موتور در حالت پیش‌فاز کار می‌کند و توان راکتیو به شبکه تزریق می‌کند. (فوق تحریک) $Q > 0$ (عملکرد خازنی).
- از گفتار فوق نتیجه می‌گیریم که با تغییر جریان تحریک رتور، ضریب توان موتور سنکرون سه‌فاز را می‌توان کنترل کرد :
- در تمام حالات موتور، توان اکتیو (P) از شبکه اخذ می‌کند اما توان راکتیو (Q) به نحوه تحریک بستگی دارد.

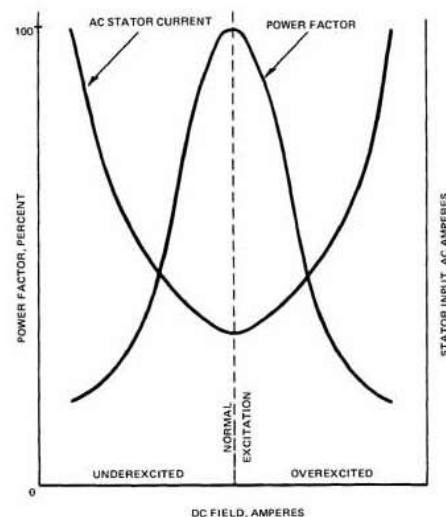
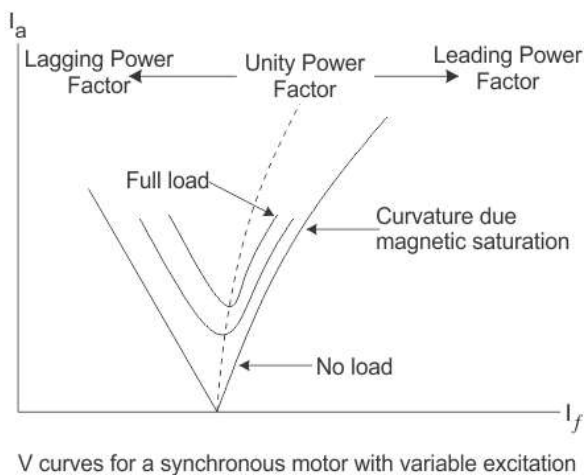


کندانسور سنکرون

کندانسور سنکرون، ماشین سنکرونی است که محور خروجی ندارد، یعنی بدون بار کار می‌کند و با تنظیم تحریک می‌تواند بصورت مولد یا مصرف‌کننده توان راکتیو عمل کند.



- اگر موتور سنکرون بی‌بار باشد تغییر جریان تحریک باعث می‌گردد که موتور گاهی به صورت مقاومت، گاهی به صورت سلف و گاهی به صورت خازن عمل نماید. موتور سنکرون بی‌بار را کندانسور سنکرون می‌نامند و در سیستم‌های انتقال انرژی جهت تنظیم ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صنعت نیز گاهی برای بهبود ضریب توان بجای خازن از موتورهای سنکرون در حالت فوق سنکرون (پیش‌فاز) استفاده می‌شود.



سوال: دیاگرام‌های فازوری ژنراتور و موتور سنکرون را در حالت فوق و زیر تحریک را ترسیم کنید و در مورد تولیدی یا مصرفی بودن توان‌ها بحث کنید.

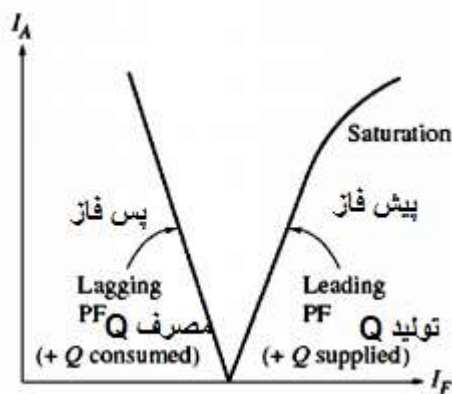
مقایسه ژنراتور و موتور سنکرون از نظر تولید و مصرف توان های اکتیو و راکتیو

	Supply reactive power Q $E_A \cos \delta > V_\phi$	Consume reactive power Q $E_A \cos \delta < V_\phi$
Supply power P تولید توان اکتیو Generator مولد E_A leads V_ϕ	توان راکتیو تولید می کند 	توان راکتیو مصرف می کند
Consume power P مصرف توان اکتیو Motor موتور E_A lags V_ϕ		

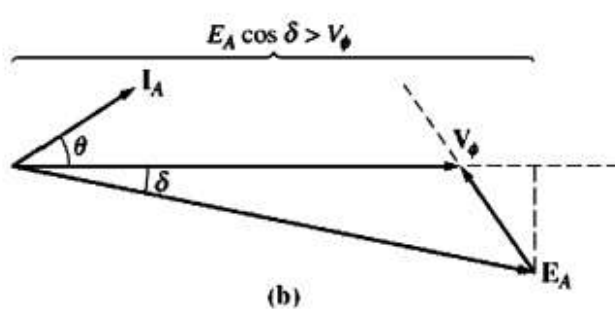
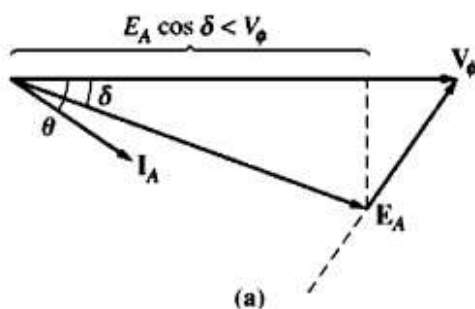
سوال: خازن سنکرون (کندانسور سنکرون) چیست؟ منحنی V خازن سنکرون را ترسیم کنید.

بعضی از موتورهای سنکرون فقط مخصوص اصلاح ضریب توان فروخته می‌شوند و محور این موتورها راهی به بیرون بدنه‌ی موتور ندارد. چون توان اکتیو تحویل داده شده به ماشین صفر است (مگر اندکی که صرف تلفات می‌شود)، جریان آرمیچر در ضریب توان واحد صفر است و در حالت فوق تحریک یا پیش‌فاز، موتور توان راکتیو تولید می‌کند و ضریب قدرت را اصلاح می‌کند.

امروزه معمولاً برای این منظور از خازن‌های استاتیک و ادوات FACTS استفاده می‌گردد اما هنوز در کارخانجات قدیمی‌تر از خازن یا کندانسورهای سنکرون استفاده می‌گردد.



سوال: دیاگرام فازوری موتور سنکرون سه‌فاز را در حالات فوق تحریک و زیر تحریک را ترسیم کنید و رابطه‌ی بین ولتاژ فازی ترمینال و ولتاژ تحریک را بنویسید. (a) زیر تحریک و (b) فوق تحریک است E_A همان E_f و V_ϕ همان V_t است).



مثال: یک موتور سنکرون ۲۰۸ ولتی، ۴۵ کیلو وات آمپری با ضریب توان ۰/۸ پیش‌فاز و اتصال مثلث، ۶۰ هرتزی دارای راکتانس ۲/۵ اهم و یک مقاومت آرمیچر کوچک است. تلفات اصطکاک و تهویه آن ۱/۵ کیلووات و تلفات هسته‌ای آن ۱ کیلو وات است و یک بار ۱۵ اسب بخاری به محور آن وصل است و ضریب توان موتور ۰/۸ پیش‌فاز است:

* نمودار فازوری موتور را رسم کرده و مقادیر جریان آرمیچر و جریان خط و ولتاژ القایی آرمیچر را بیابید.

(a) Initially, the motor's output power is 15 hp. This corresponds to an output of

$$P_{out} = (15 \text{ hp})(0.746 \text{ kW/hp}) = 11.19 \text{ kW}$$

Therefore, the electric power supplied to the machine is

$$\begin{aligned} P_{in} &= P_{out} + P_{\text{mech loss}} + P_{\text{core loss}} + P_{\text{elec loss}} \\ &= 11.19 \text{ kW} + 1.5 \text{ kW} + 1.0 \text{ kW} + 0 \text{ kW} = 13.69 \text{ kW} \end{aligned}$$

Since the motor's power factor is 0.80 leading, the resulting line current flow is

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{P_{in}}{\sqrt{3} V_T \cos \theta} \\ &= \frac{13.69 \text{ kW}}{\sqrt{3} (208 \text{ V})(0.80)} = 47.5 \text{ A} \end{aligned}$$

and the armature current is $I_L/\sqrt{3}$, with 0.8 leading power factor, which gives the result

$$I_A = 27.4 \angle 36.87^\circ \text{ A}$$

To find E_A , apply Kirchhoff's voltage law

$$\begin{aligned} E_A &= V_\phi - jX_S I_A \\ &= 208 \angle 0^\circ \text{ V} - (j2.5 \Omega)(27.4 \angle 36.87^\circ \text{ A}) \\ &= 208 \angle 0^\circ \text{ V} - 68.5 \angle 126.87^\circ \text{ V} \\ &= 249.1 - j54.8 \text{ V} = 255 \angle -12.4^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

