جزوه شماره ۲ (ویرایش سوم: فروردین ۹۹)

ماشین‌های سنکرون سه‌فاز

3Phase Synchronous Machines

قابل استفاده برای دانشجویان

کاردانی و کارشناسی مهندسی برق و سایر علاقه‌مندان

تهیه و تنظیم : مهندس پیام رحیمی

Payam.rahimi2558@yahoo.com

Telegram: @payam.Rahimi

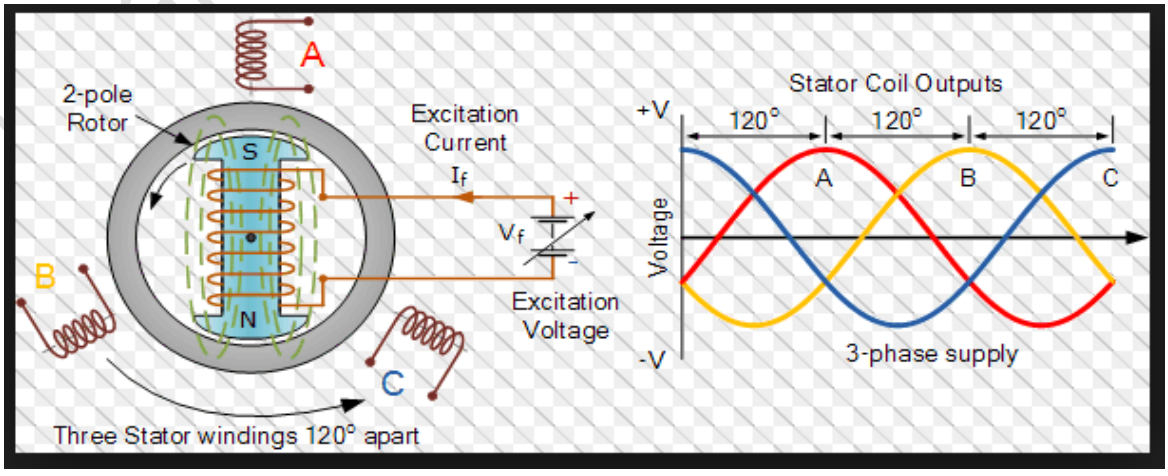
منابع:

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

۲) ماشین‌های الکتریکی تالیف استفن . ج . چاپمن

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

٤) ماشینهای الکتریکی مدرسان شریف تالیف مهندس رضا پژمان‌فر



payam.rahimi2558@yahoo.com

انواع ماشینهای الکتریکی متداول

- **ترانسفورماتور: تکفاز و سه فاز**
  - ✓ غالب ترانسفورماتورها: سه فاز می باشند
- **موتورهای سه فاز: آسنکرون (القایی) و سنکرون**
  - ✓ غالب موتورهای سه فاز آسنکرون می باشند
- **ژنراتورها ی سه فاز: سنکرون و آسنکرون (القایی)**
  - ✓ غالب ژنراتورهای سه فاز سنکرون می باشند.
- ❑ **تمام ماشینها بر اساس قوانین الکترومغناطیسی فارادی کار می کنند.**

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 عمدتا 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 تحریکه** محسوب می‌شوند. در حالی که در ماشین‌های القایی یا آسنکرون تنها عامل تحریک، 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.

payam.rahimi2558@yahoo.com

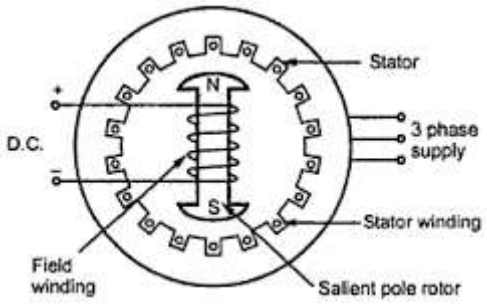
موتورهای سنکرون سه‌فاز در مواقعی به کار می‌روند که به سرعت ثابت نیاز داشته باشیم و یکی از مزایای عمده موتورهای سنکرون این است که می‌تواند از شبکه توان راکتیو دریافت و یا به شبکه توان راکتیو تزریق کند.

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، سیم پیچی آرمیچر نیز گفته می‌شود** و سیم‌پیچی آرمیچر به طوری طراحی می شود 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 عمدتا 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.



payam.rahimi258@yahoo.com

۲) **رتور قطب صاف یا استوانه‌ای: این رتورها عمدتا 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.

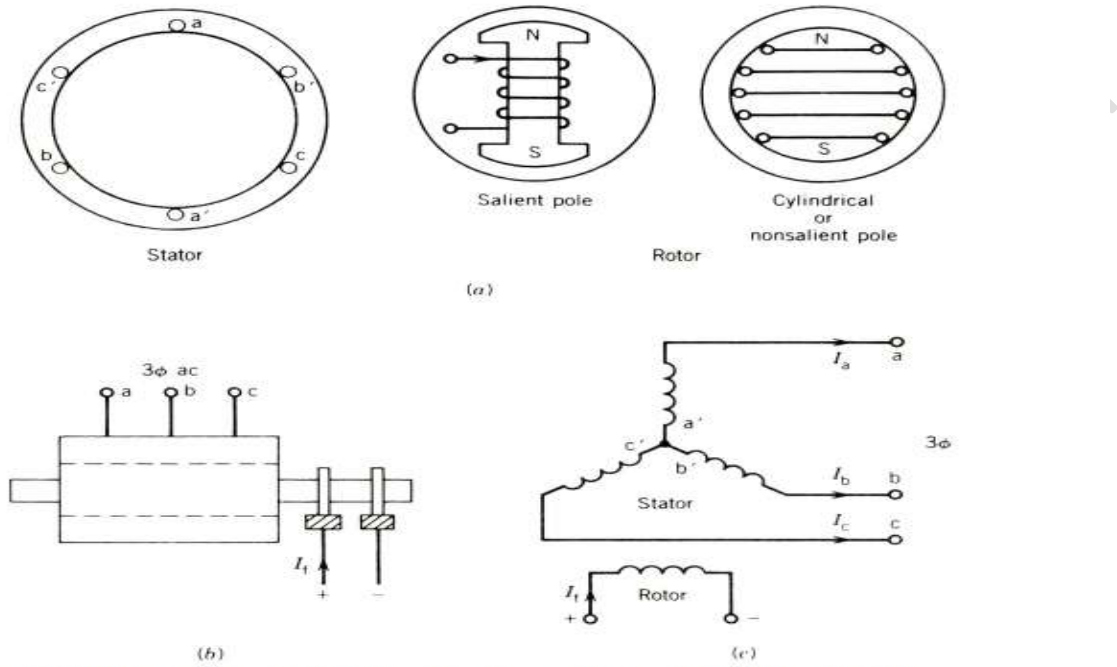


FIGURE 6.1 Basic structure of the three-phase synchronous machine.

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 نسبتا 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 نسبتا 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 معمولا بیشتر از ۴ است.

- توربو ژنراتورها نسبت به هیدروژنراتورها به علت سرعت بالا دارای طول زیاد و قطر کم می‌باشند.
- عمدتا 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 معمولا از هیدروژن مایع و هوای سرد استفاده می‌شود و برای خنک‌سازی دیزل ژنراتورها معمولا 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 می گردد 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.

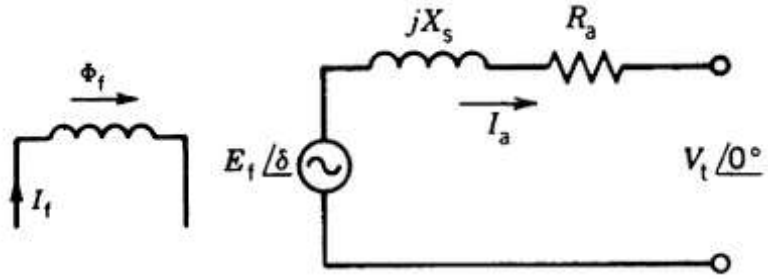
روش های اعمال تحریک به ماشین سنکرون:

۱) توسط حلقه های لعزان و جارو بک
۲) سیستم بدون جاروبک (brush less) یا دیودهای چرخان

payamrahimi2558@yahoo.com

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.



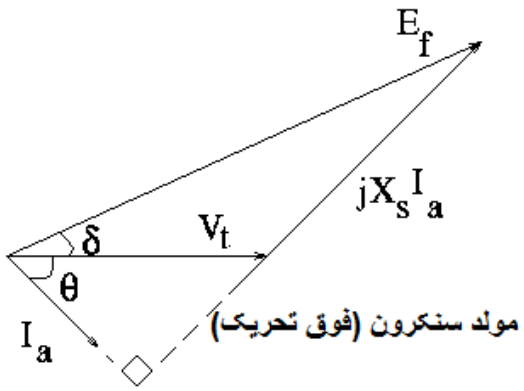
- در ژنراتور سنکرون همواره E_f از ولتاژ ترمینال(V_t) جلوتر است و زاویه‌ی δ مثبت است. $(\delta > 0)$
- در موتور سنکرون همواره E_f از ولتاژ ترمینال(V_t) عقب تر است و زاویه‌ی δ منفی است. $(\delta < 0)$
- زاویه توان یا زاویه گشتاور(δ) نقش مهمی در انتقال توان از ماشین به شبکه و بالعکس ایفا می‌کند و نقش آن در پایداری ماشین انکار ناپذیر است و $\delta = 90°$ حد پایداری استاتیکی ماشین سنکرون می‌باشد و چنانچه $\delta > 90°$ 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. $(P < 0)$

payam.rahimi258@yahoo.com

- **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.

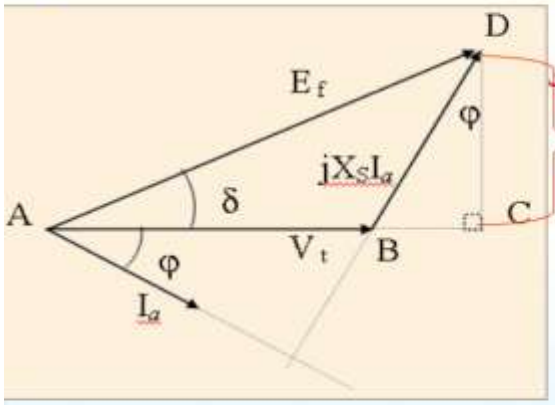


payam.ra...yahoo.com

توان در ژنراتور سنکرون

فرض کنیم $Ra = 0$

توان اکتیو متناسب با این طول است



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

$$\overline{E} = \overline{V}_t + \overline{I}_a (R_s + jX_s)$$ ($R_s \to 0$)

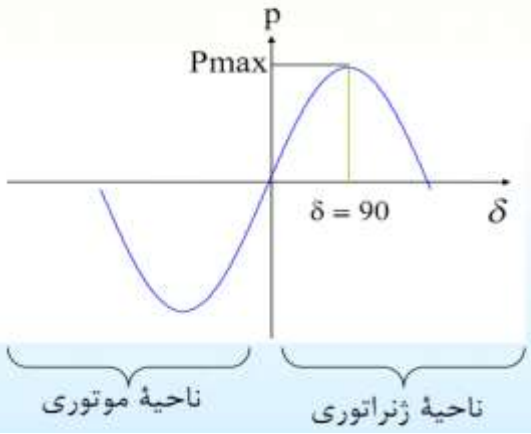
$$\begin{cases} Sin\delta = \dfrac{DC}{E_f} \Rightarrow DC = E_f .Sin\delta \end{cases} \qquad \begin{cases} Cos\varphi = \dfrac{DC}{X_s . I_a} \Rightarrow DC = X_s .I_a .Coc\varphi \end{cases}$$

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

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

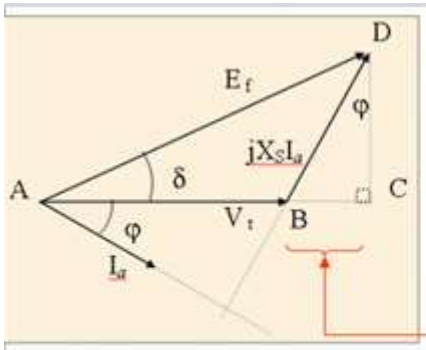
$$\sin\delta = 1 \Rightarrow P_{max} = \frac{3V_t E}{X_s}$$

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 $Ra = 0$

$$\overline{E} = \overline{V}_t + \overline{I}_a\left(\cancel{R_s}^{0} + jX_s\right)$$

$$\begin{cases} Sin\varphi = \dfrac{BC}{X_s I_a} \Rightarrow BC = X_s I_a Sin\varphi \\ Cos\delta = \dfrac{V_t + BC}{E_f} \Rightarrow BC = E_f Cos\delta - V_t \end{cases}$$

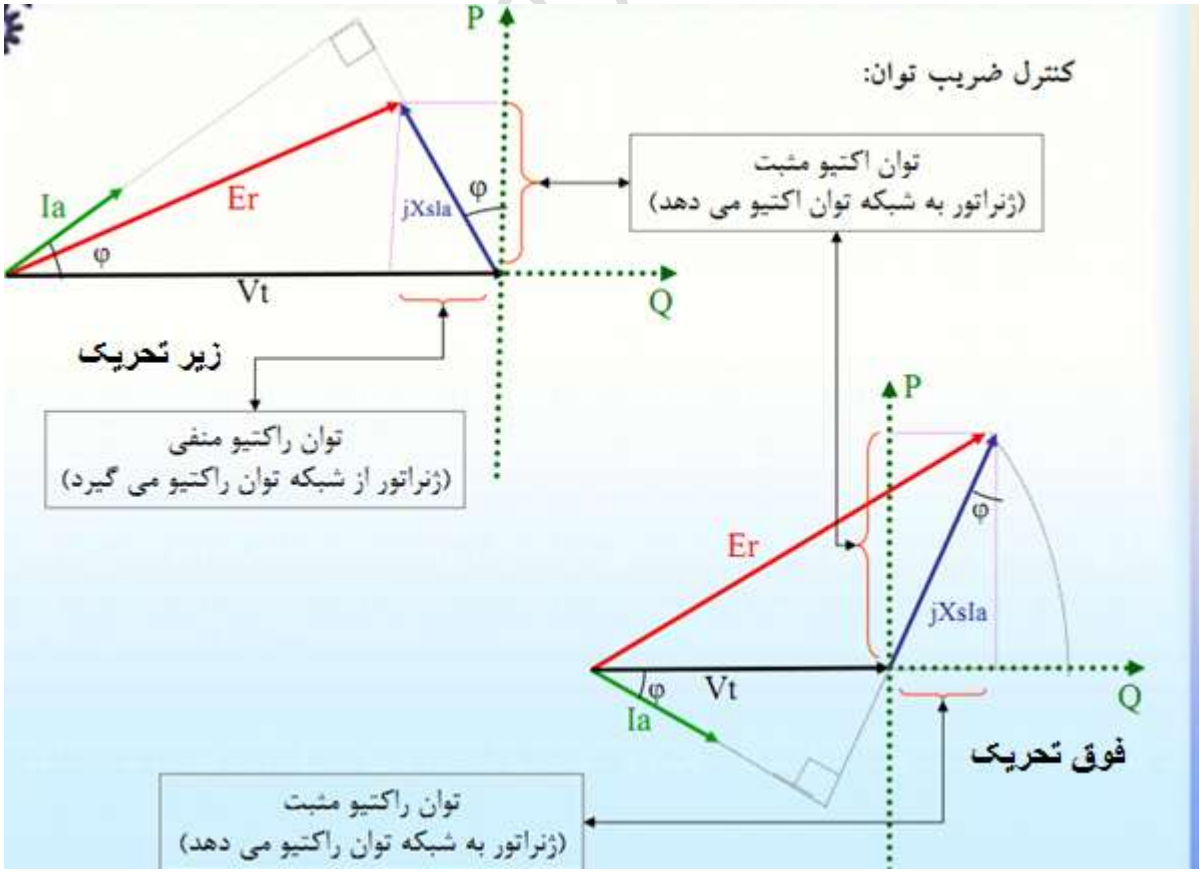
توان راکتیو متناسب با این طول است

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

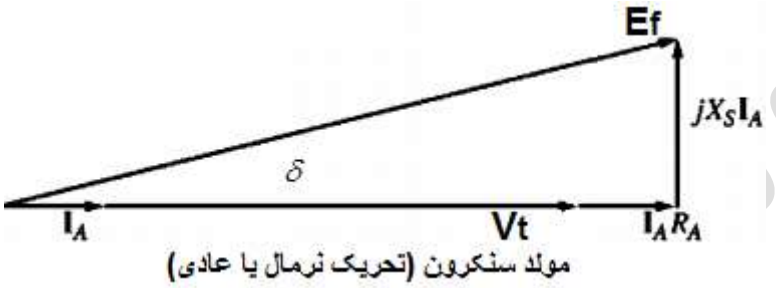
$$\Delta\ ADC, \Delta\ BDC \Rightarrow X_s I_a \sin\varphi = E\cos\delta - V_t \Rightarrow I_a \sin\varphi = \frac{E\cos\delta - V_t}{X_s}$$

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

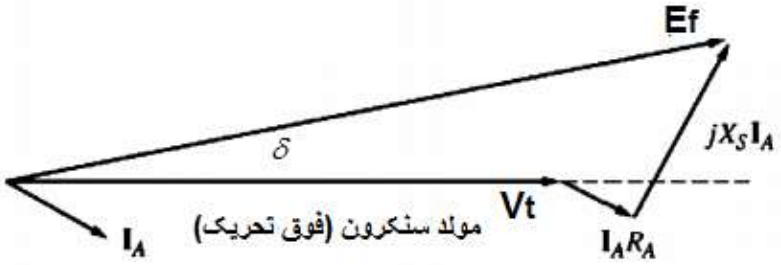
مقایسه دیاگرام فازوری ژنراتور سنکرون قطب صاف در حالات فوق تحریک و زیر تحریک :



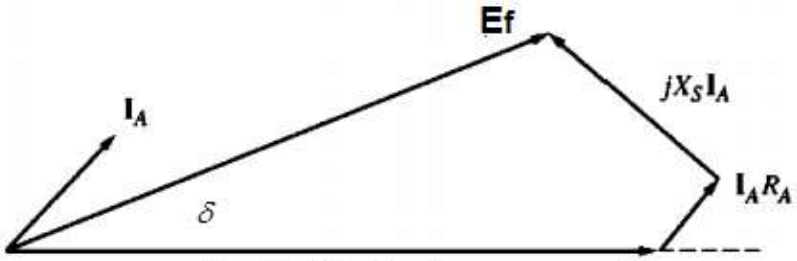
در اغلب مولدهای سنکرون بزرگ نیروگاهی از افت اهمی صرفنظر می‌شود چون در این ماشین‌ها به جای سیم مسی از تسمه‌های مسی استفاده می‌شود که مقاومت اهمی خیلی پایین تری نسبت به سیم دارند، دیاگرام‌های فازوری زیر با لحاظ افت اهمی ترسیم شده‌اند.



مولد سنکرون (تحریک نرمال یا عادی)



مولد سنکرون (فوق تحریک)



مولد سنکرون(زیر تحریک)

مثال۱: یک آلترناتور سه فاز ۶/۶KV- ۱۵۰۰ KVA با سیم پیچ اتصال ستاره درهر فاز دارای مقاومت ۰/۴ اهم و راکتانس۶ اهم است. این ماشین بار کامل را در ولتاژ نامی و ضریب توان ۰/۸پس فاز می‌دهد. ضمن ترسیم دیاگرام فازوری زاویه توان را بیابید.

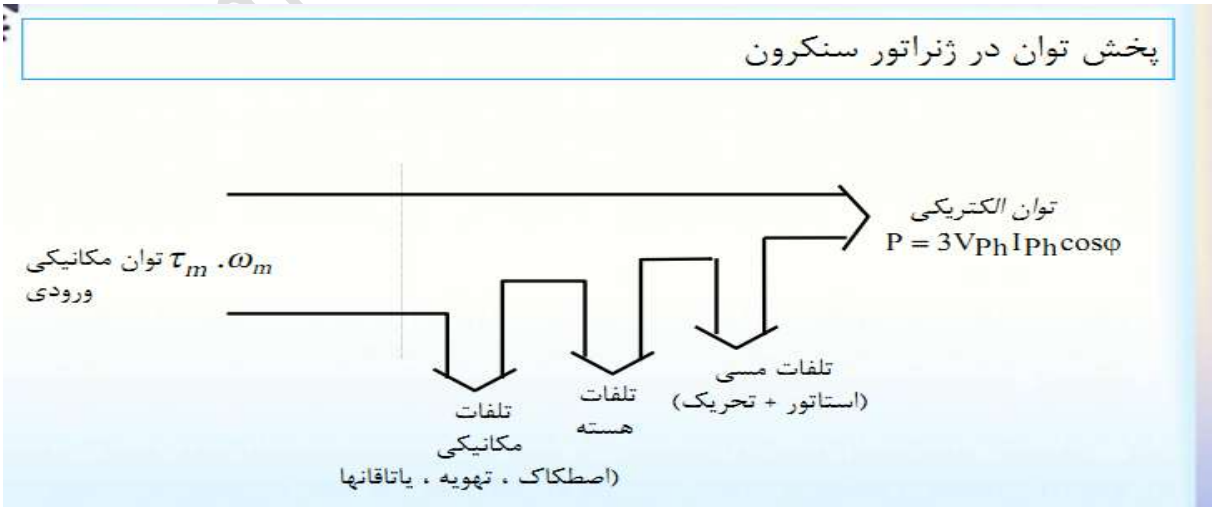
حل:

مثال۲: ولتاژ ترمینال یک مولد سنکرون با اتصال ستاره در بار $\mathbf{200A}$ و ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز $\mathbf{200\sqrt{3}}$ ولت می باشد . اگر از $\boldsymbol{R_s}$صرف نظر و $Xs = 0.5\Omega$ باشد : الف) ولتاژ القایی هر فاز($\mathbf{E_{ph}}$ یا $\mathbf{E_f}$) ب) زاویه بار یا زاویه توان (δ) ج) مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی

payam.rahimi258@yahoo.com

مثال۳) 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

m.rahimi2558@yahoo.com



کار موازی ژنراتورهای سنکرون :

امروزه به ندرت می توان 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 بـه عنـوان ژنراتورهـای اضطراری می‌توان یافت. در کاربردهای معمولی همیشه تعدادی ژنراتور به طور موازی توان مـورد 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 می کنند؟ 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 خرابـی یکـی از آن هـا 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 سـرویس و نگهـداری 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.

rahim2558@yahoo.com

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 ببینید 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 می شود. 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.

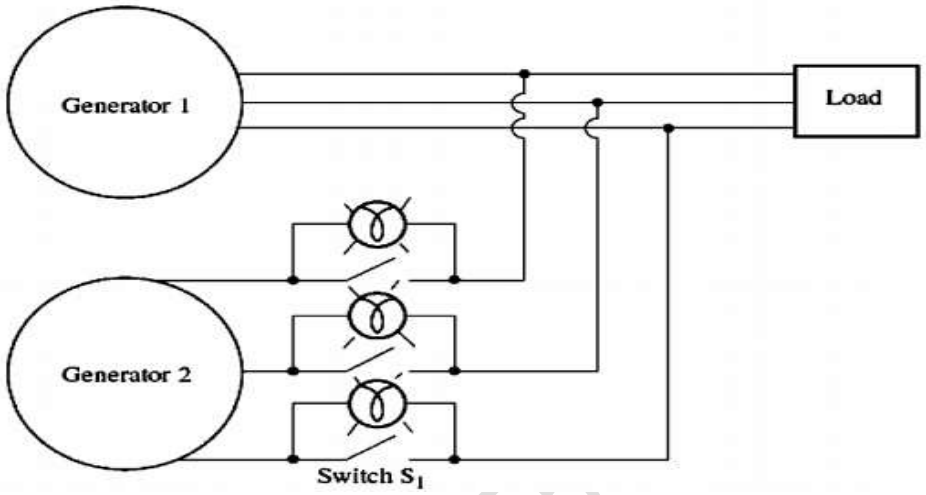
اگر فرکانس ژنراتورها هنگام اتصال، خیلی نزدیک هم نباشد، تا پایدار شدن ژنراتورها و رسیدن به یک فرکانس مشترک، جریان‌های حالت گذرای بزرگی به وجود می‌آید. **فرکانس دو ماشین باید به هم خیلی نزدیک باشند اما نمی توانند دقیقاً برابر باشند.**

شرایط لازم برای موازی کردن ژنراتورها

ردیف	شرط	ابزار تست برقراری شرط	راه حل در صورت بر قرار نبودن شرط
۱	دامنهٔ 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

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 آن ها 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 لامپ ها 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 آن ها صفر است و دو سیستم هم فازند و کلید را می‌بندیم.

توجه کنید که سنکروسکوپ تنها یک فاز را کنترل می کند، و در مورد توالی فازها یا ترتیب فازها اطلاعاتی نمی دهد. 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.

payamrahimi253

A synchroscope.

صفر (به معنی هم فاز بودن) در بالا و زاویه‌ی ۱۸۰ 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 سیستم ها کلید را بست.

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

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

هر ژنراتوری را یک گرداننده ی اولیه، که منبع توان مکانیکی ژنراتور است، می‌گرداند. متداول ترین نوع گرداننده اولیه توربین بخار است اما انواع دیگری از قبیل موتورهای دیزلی، توربین های گازی، توربین‌های آبی، . . . وجود دارند.

منبع اولیه توان هر چه که 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 می رود تا کاهش سرعت را با افزایش تقاضای توان خطی کند.

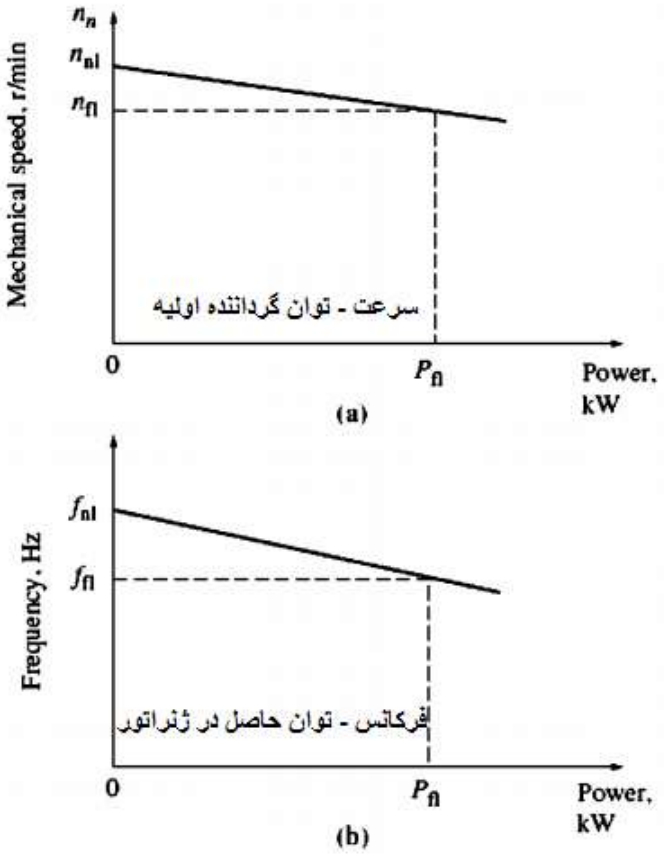
مکانیزم گاورنر هر چه باشد، همیشه طوری تنظیم می شود که افت سرعت در اثر افزایش بارکم باشد. **افت سرعت (SD) گرداننده‌ی اولیه با معادله زیر تعریف می‌شود** و افت سرعت بیشتر ژنراتورها ۲ تا ۴ درصد است.

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

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

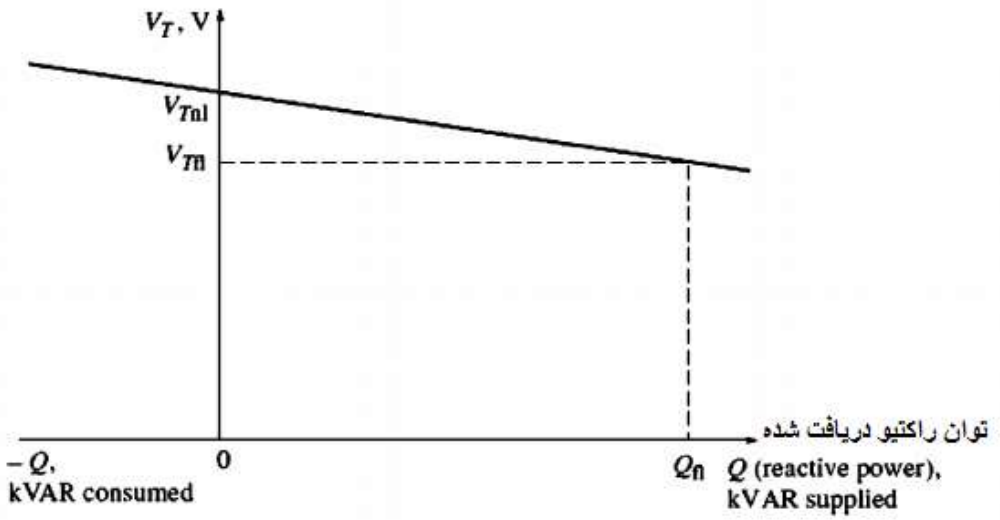
P = power output of the generator
f_{nl} = no-load frequency of the generator
f_{sys} = operating frequency of system
s_P = slope of curve, in kW/Hz or MW/Hz

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



(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 پایانه ای برحسب توان واکنشی را می توان به دست آورد.



کار ژنراتورهای موازی با سیستم های قدرت بزرگ:

ژنراتورهای سنکرون سه‌فاز عمدتا 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 مشترکا بار مشترکین را تامین می‌کنند، در این صورت اصطلاحا می‌گویند که ژنراتورها به شین بی‌نهایت وصل‌اند. از آنجایی که تعداد ژنراتورهای متصل به شبکه زیاد بوده و اندازه این ژنراتورها نسبتا 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 نخواد داشت. این مفهوم را در حالت ایده‌آل با شین بی نهایت نشان می‌دهند.

شین بی نهایت (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 نمی کند. مشخصه‌ی توان- فرکانس و مشخصه‌ی توان راکتیو - ولتاژ آن در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

payam.rahimi258@yahoo.com

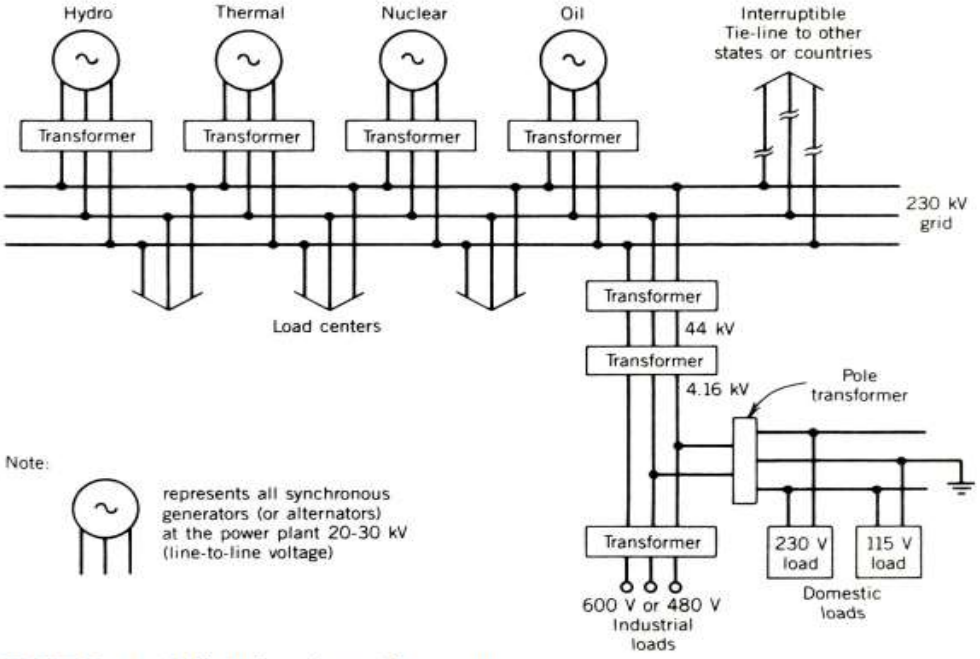


FIGURE 6.7 Infinite bus (or grid) system.

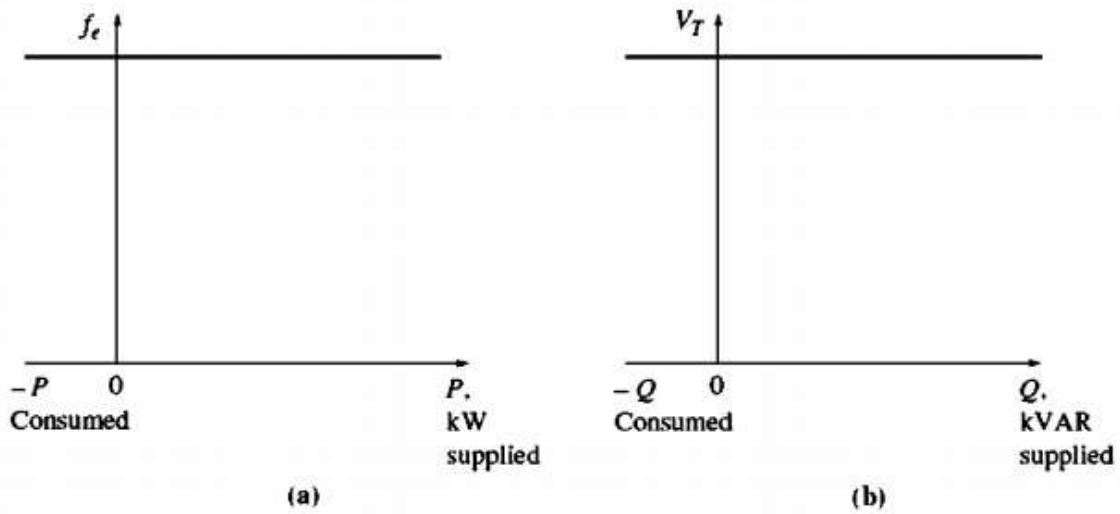
قبل موازی کردن ژنراتور سنکرون با شبکه، ژنراتور سنکرون باید مشخصات زیر را دارا باشد:

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.



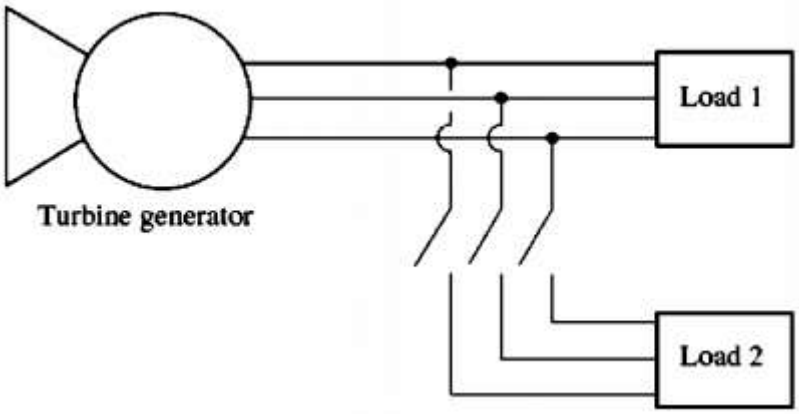
همانگونه که در قسمت قبل تشریح شد در نیروگاه‌ها چک کردن شرایط موازی کردن ژنراتور با شین بی‌نهایت توسط دستگاهی به نام سنکروسکوپ انجام می‌پذیرد، البته چک کردن توالی فازها توسط سنکروسکوپ امکان پذیر نیست و بل از موازی سازی باید حتما مورد تایید قرار گرفته باشد زیرا خطرات جبران ناپذیری را به دنبال خواهد داشت. هر گاه عقربه‌ی سنکروسکوپ به آرامی حرکت می‌نمود (به عبارت دیگر فرکانس تقریبا 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.

مثال۱): ژنراتوری مطابق شکل باری را تغذیه می‌کند. می‌خواهیم بار دومی را با بار اول موازی کنیم .فرکانس بی‌باری ژنراتور۶۱HZ و شیب sp آن 1MW/HZ است، بار ۱توان حقیقی ۱۰۰۰KW را با ضریب توان پس فاز ۰/۸ و بار ۲ توان حقیقی۸۰۰KW را با ضریب توان پس فاز ۰/۷۰۷مصرف 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

$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_P}$$

$$= 61\text{ Hz} - \frac{1000\text{ kW}}{1\text{ MW/Hz}} = 61\text{ Hz} - 1\text{ Hz} = 60\text{ Hz}$$

(b) After load 2 is connected,

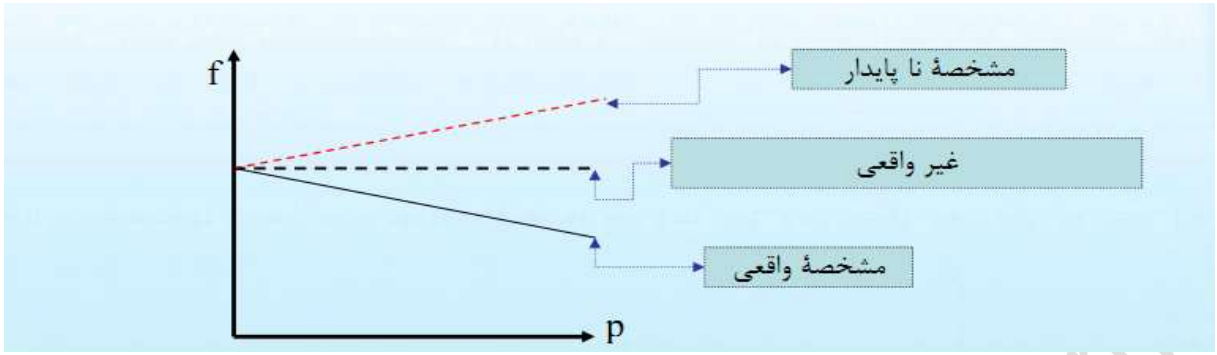
$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_P}$$

$$= 61\text{ Hz} - \frac{1800\text{ kW}}{1\text{ MW/Hz}} = 61\text{ Hz} - 1.8\text{ Hz} = 59.2\text{ Hz}$$

موازی کردن دو ژنراتور با یکدیگر(دیاگرامهای خانه ای)

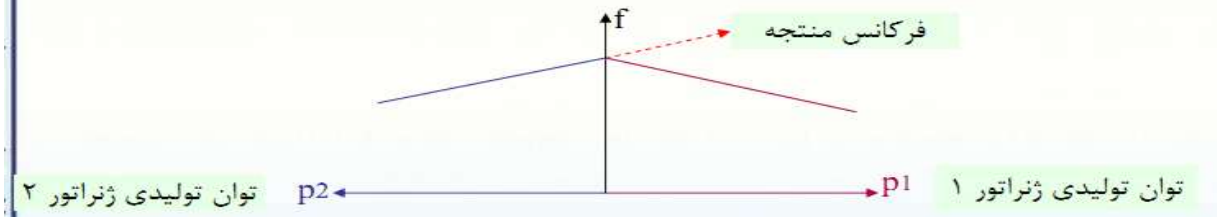
- دو ژنراتور که با هم موازی می شوند در صورتیکه تمام پارامترهای آنها (دامنه ولتاژها ،فرکانس و زاویهٔ آنها) مثل هم باشند هیچ توانی بین آنها رد و بدل نمی شود . حال اگر باری به ترمینال مشترک آنها وصل شود ، چگونه بین آن دو تقسیم می شود ؟
- این امر به مشخصهٔ گاورنر بستگی دارد . گاورنر وسیله ایست برای تنظیم توان تولیدی ژنراتور و دارای مشخصه ای بصورت زیر است : $P = Sp(fnl - f)$

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

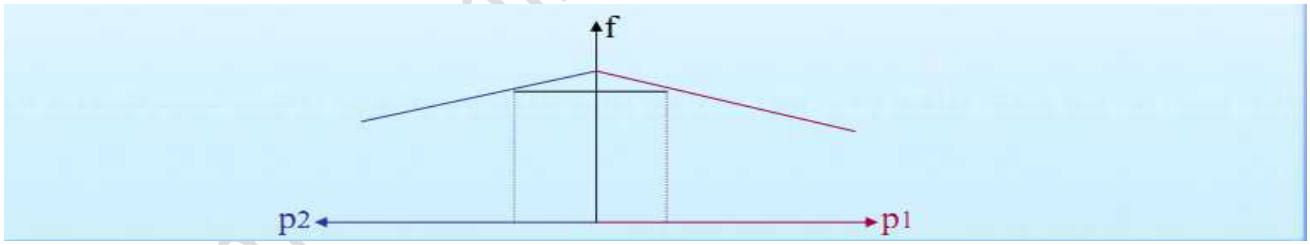


موازی کردن دو ژنراتور با یکدیگر (با بار)

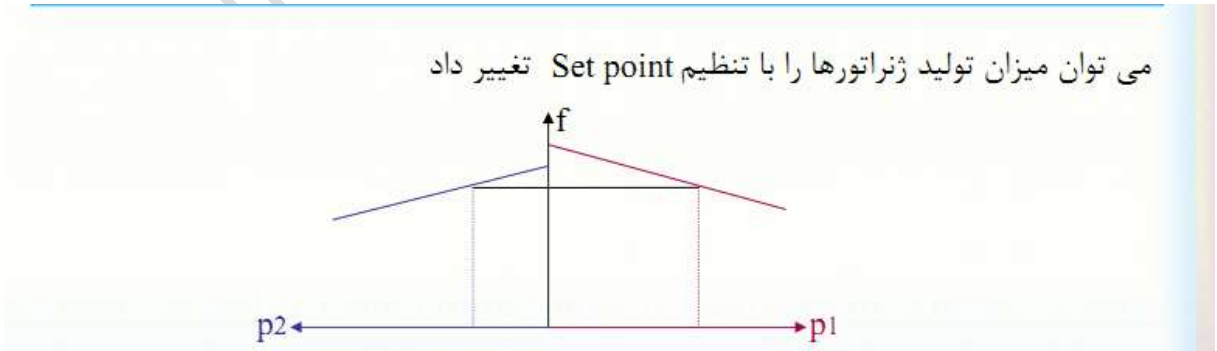
دو ژنراتور بدون بار و شرایط یکسان به هم وصل شده اند و Set point آنها مثل هم تنظیم شده



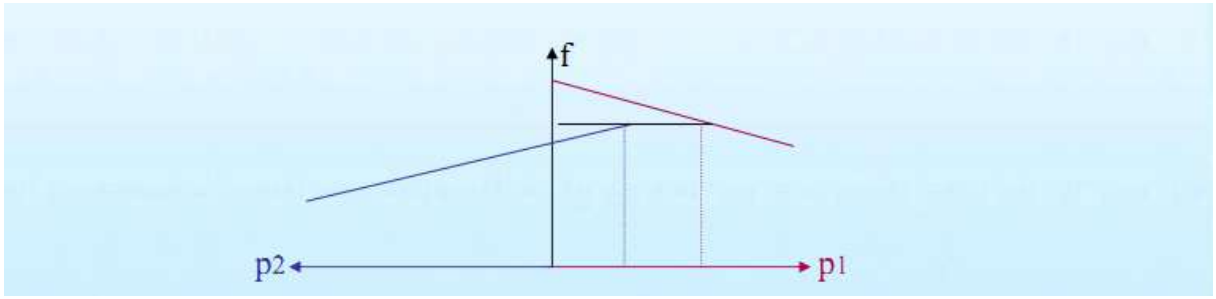
اگر در این حالت باری به این دو ژنراتور وصل شود ، همانگونه که از دیاگرام زیر پیداست فرکانس اندکی افت می کند و ژنراتورهای ۱ و۲ توانهائی را تولید می کنند که جمع آنها با توان مورد نیاز بار برابر است

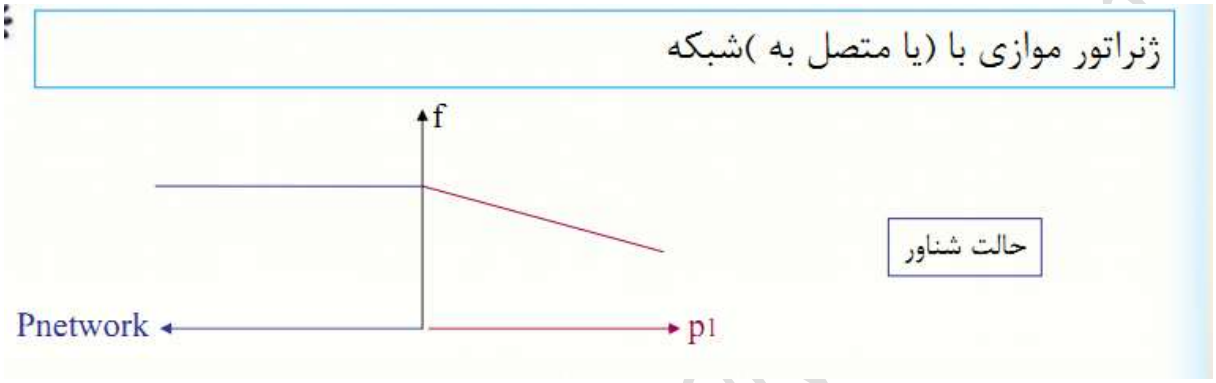


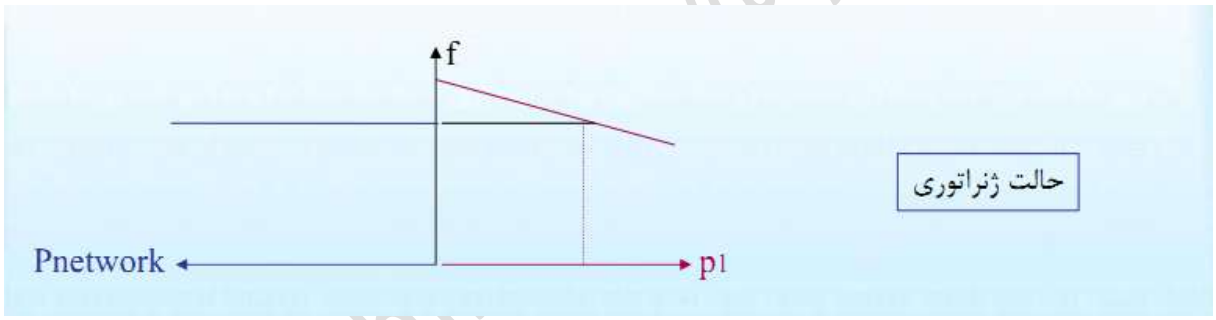
می توان میزان تولید ژنراتورها را با تنظیم Set point تغییر داد

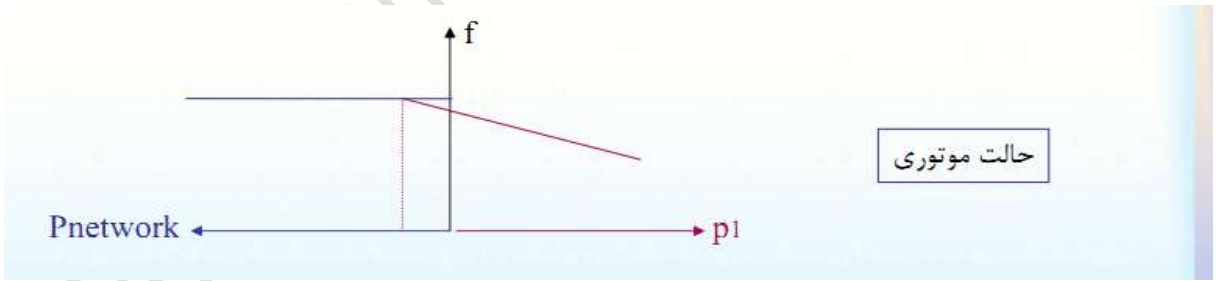


اگر Set point به طور مناسب تنظیم نشوند ممکن است حالتی رخ دهد که یکی از ژنراتورها به شکل یک بار برای دیگری عمل کند









مثال ۲) : دو ژنراتور سنکرون کوچک با توجه به مشخصات زیر با هم موازی شده‌اند و به باس بی‌نهایت اتصال دارند و مشترکا" 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.

$SP_1=1[\frac{MW}{HZ}]$	$F_{nl1}=61.5[HZ]$	G_1 ژنراتور اول
$SP_2=1[\frac{MW}{HZ}]$	$F_{nl2}=61[HZ]$	G_2 ژنراتور دوم

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:

$$\begin{aligned} P_{load} &= P_1 + P_2 \\ &= s_{P1}(f_{nl,1} - f_{sys}) + s_{P2}(f_{nl,2} - f_{sys}) \\ 2.5\text{ MW} &= (1\text{ MW/Hz})(61.5\text{ Hz} - f_{sys}) + (1\text{ MW/Hz})(61\text{ Hz} - f_{sys}) \\ &= 61.5\text{ MW} - (1\text{ MW/Hz})f_{sys} + 61\text{ MW} - (1\text{ MW/Hz})f_{sys} \\ &= 122.5\text{ MW} - (2\text{ MW/Hz})f_{sys} \end{aligned}$$

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

The resulting powers supplied by the two generators are

$$\begin{aligned} P_1 &= s_{P1}(f_{nl,1} - f_{sys}) \\ &= (1\text{ MW/Hz})(61.5\text{ Hz} - 60.0\text{ Hz}) = 1.5\text{ MW} \\ P_2 &= s_{P2}(f_{nl,2} - f_{sys}) \\ &= (1\text{ MW/Hz})(61.0\text{ Hz} - 60.0\text{ Hz}) = 1\text{ MW} \end{aligned}$$

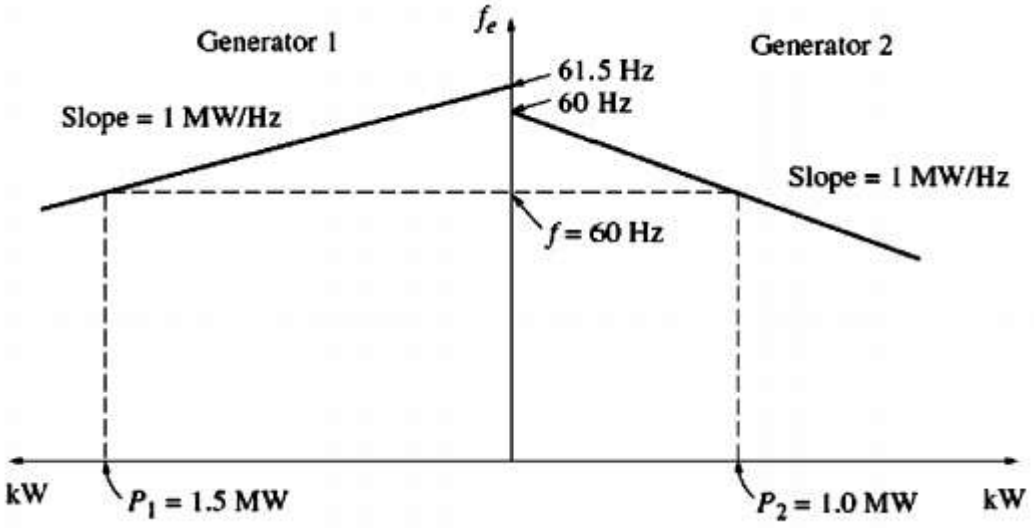
(*b*) When the load is increased by 1 MW, the total load becomes 3.5 MW. The new system frequency is now given by

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

$$\text{therefore} \qquad f_{\text{sys}} = \frac{122.5\text{ MW} - 3.5\text{ MW}}{(2\text{MW/Hz})} = 59.5\text{ Hz}$$

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 عمدتا 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.

مثال۳): 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؟

$SP_1=0.9[\frac{MW}{HZ}]$	$F_{nl1}=52[HZ]$	G_1 ژنراتور اول
$SP_2=1[\frac{MW}{HZ}]$	$F_{nl2}=51[HZ]$	G_2 ژنراتور دوم

مثال۴): سه ژنراتور کوچک با هم موازی شده و به باس بی نهایت با فرکانس 50HZ اتصال دارند و مشترکا" بار 4.4MW را تغذیه می‌کنند، فرکانس بی باری ژنراتور سوم را با توجه به معلومات زیر محاسبه کنید. و هر ژنراتور چه توانی را فراهم می‌سازد؟

$SP_1=0.9[\frac{MW}{HZ}]$	$F_{nl}=52[HZ]$	G_1
$SP_2=1[\frac{MW}{HZ}]$	$F_{nl}=51.5[HZ]$	G_2
$SP_3=1.1[\frac{MW}{HZ}]$	$F_{nl}=?[HZ]$	G_3

$$P1 = SP1(Fnl1 - Fsys) = 0.9 \times (52 - 50) = 1.8MW$$

$$P2 = SP2(Fnl2 - Fsys) = 1 \times (51.5 - 50) = 1.5MW$$

$$P3 = P - (P1 + P2) = 4.4 - (1.8 + 1.5) = 1.1MW$$

$$P3 = SP3(Fnl3 - Fsys) \Rightarrow 1.1 = 1.1 \times (Fnl3 - 50) \Rightarrow Fnl3 = 51HZ$$

payam.rahimi558@yahoo.com

موتورهای سنکرون سه‌فاز:

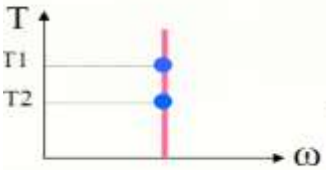
موتورهای آسنکرون خودراه انداز هستند اما موتورهای سنکرون خودراه‌انداز نیستند، گفتنی است که سرعت چرخش میدان گردان استاتور آنقدر سریع است که رتور به دلیل سنگینی و لختی نمی‌تواند خود را با آن هماهنگ سازد، در نتیجه ارتعاشی در مدار رتور پدید می‌آید.

موارد کاربرد موتور سنکرون

۱- در توانهای بالای یک مگاوات این موتورها از نظر قیمت و قابلیت بر موتورهای القائی **ارجحیت** 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 کندچنین خصوصیتی را می توان با مشخصهٔ روبرو نشان داد

۲- نسبت به موتورهای القائی بیشتر قابل کنترل می باشند

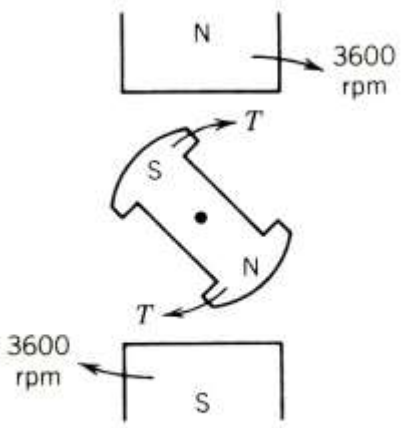
۳- در ضریب توانهای مختلف می توانند کار کنند ، بعبارت دیگر هم می توانند تولید کننده و هم مصرف کنندهٔ توان راکتیو باشند

۴- راندمان بالائی دارند

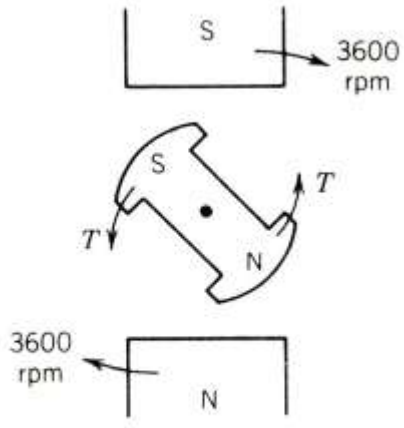
معایب :

۱- گشتاور راه اندازی ندارند

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



(a) $t = 0$



(b) $t = t_1$

مشکلات راه اندازی موتور سنکرون

موتور سنکرون گشتاور راه اندازی ندارد . چرا ؟

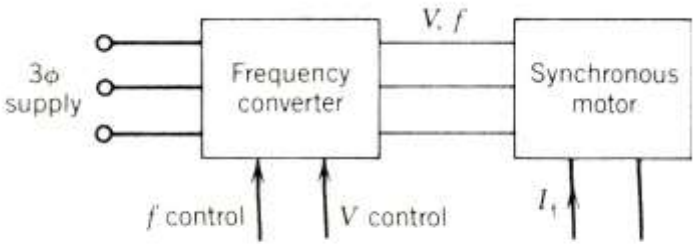
از آنجا که میدان مغناطیسی چرخان استاتور با سرعت بسیار زیادی می چرخد این سرعت زیاد مانع می شود که روتور بعلت وجود لختی ، بتواند به دنبال آن شروع به چرخش کند لذا موتور سنکرون راه اندازی نمی شود

روشهای راه اندازی موتور سنکرون :

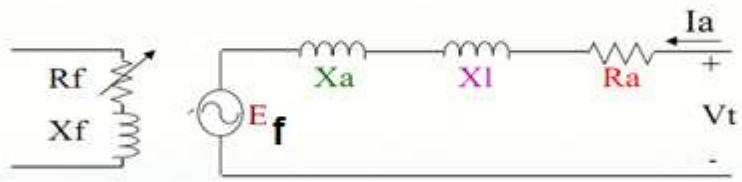
۱- کاهش فرکانس تغذیهٔ استاتور

۲- روش استفاده از دمپر (راه اندازی به صورت موتور القائی)

۳- استفاده از محرک مکانیکی خارجی



مدار معادل یک فاز از موتور سنکرون



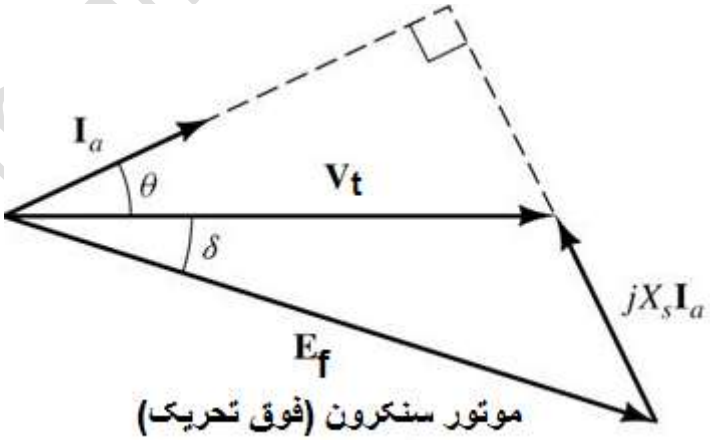
$$\overline{V}_t = E + \bar{I}_a (Ra + jX_s)$$
$$Xs = Xa + Xl$$

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 می‌کند و توان راکتیو تحویل شبکه می‌دهد و I_a پیش‌فاز است.

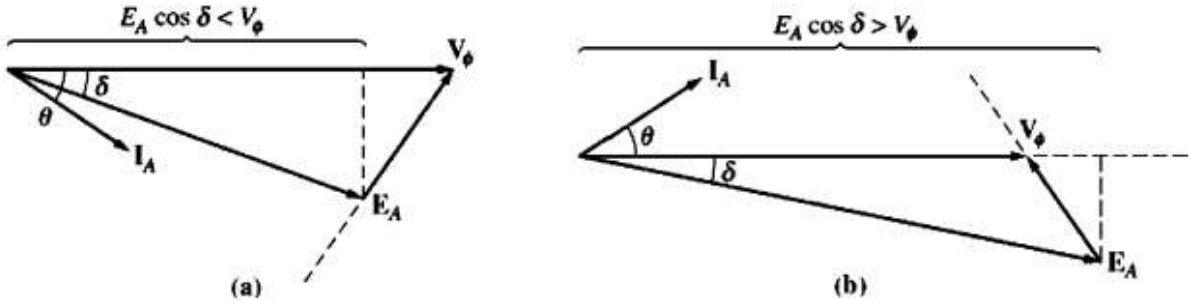
یادآوری: I_a حالت فوق تحریک ژنراتور سنکرون پس فاز بود.



موتور سنکرون (فوق تحریک)

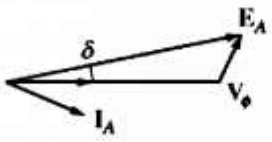
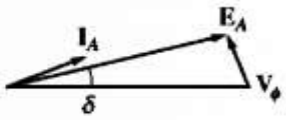
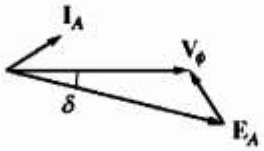
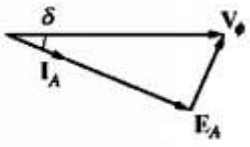
payam.rahimi1258@yahoo.com

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 $V\phi$ همان V_t است).



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.

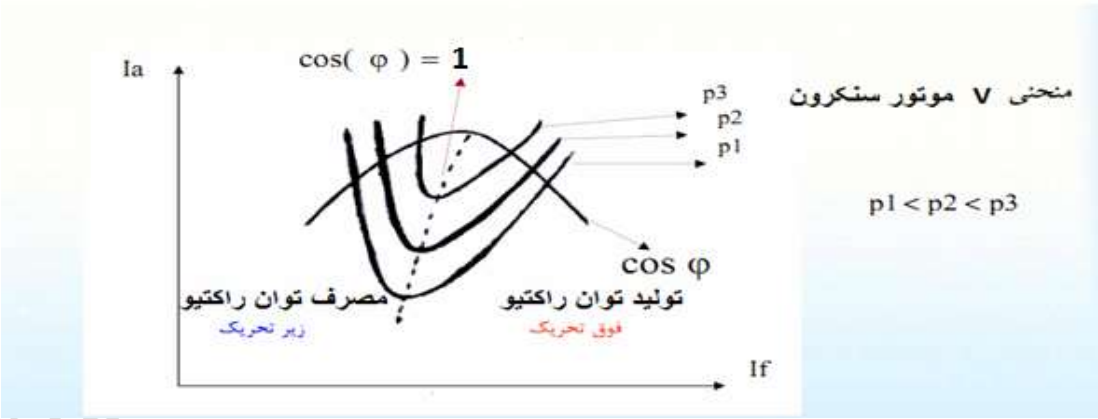
مقایسه ژنراتور و موتور سنکرون از نظر تولید و مصرف توان های اکتیو و راکتیو

	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		

حالات کاری موتورهای سنکرون و منحنی (V)

- اگر مدار تحریک رتور، تحریک لازم را فراهم سازد، استاتور جریان راکتیو نخواهد کشید و موتـور 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 مغناطیس کنندگی ماشین کمک کند. در این صورت موتور سنکرون سه‌فاز در حالت پـس‌فـاز کـار 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 پیش فاز از شبکه کشیده می‌شود تا با میدان رتور به مخالفت برخیزد، در این حالت موتور در حالت پیش فاز کار می کند 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 موتـور سـنکرون سـه‌فـاز را می‌توان کنترل کرد : در تمام حالات موتور، توان اکتیو(P) از شبکه اخذ می‌کند اما توان راکتیو(Q) به نحوه تحریک بستگی دارد.



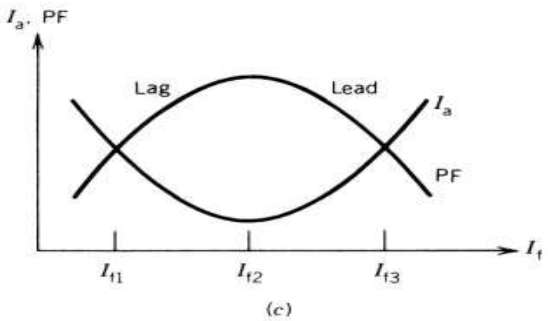
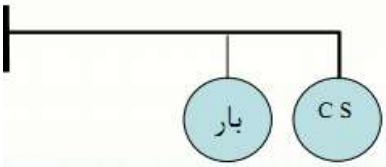


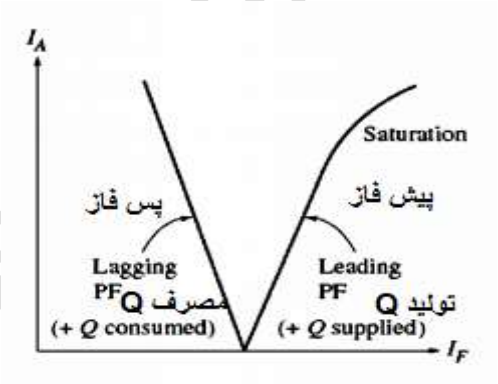
FIGURE 6.24 Power factor characteristics. (*a*) Equivalent circuit. (*b*) Phasor diagram. (*c*) Variation of I_a and PF with I_f.

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



- اگر موتور سنکرون بی بار 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: خازن سنکرون(کندانسورسنکرون) 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 معمولا برای این منظور از خازن‌های استاتیک و ادوات FACTS استفاده می‌گردد اما هنوز در کارخانجات قدیمی‌تر از خازن یا کندانسورهای سنکرون استفاده می‌گردد.

payam.rahimi58@yahoo.com

کاربردهای ماشین های سنکرون سه فاز

۱. ژنراتورهای سنکرون سه فاز در نیروگاه ها

There are many applications of synchronous machines. The primary use of the machine is as an ac generator or alternator. It provides more than 99 percent of the electrical energy used by people all over the world.

۲. موتورهای سنکرون در کارخانجاتی که به سرعت ثابت نیاز دارند.

۳. موتورهای سنکرون در حین اینکه کار مکانیکی انجام می دهد می تواند در حالت فوق تحریک توان به مثابه خازن راکتیو به شبکه تزریق کند و ضریب توان را بهبود بخشد.

۴. موتور سنکرون بی بار کندانسور سنکرون نام دارد که هم می تواند توان راکتیو از شبکه بگیرد و هم Q به شبکه تزریق کند برای تنظیم ولتاژ خطوط انتقال انرژی استفاده می شود.

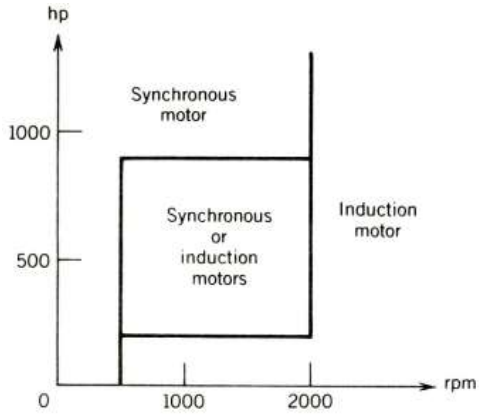


FIGURE 6.36 Application of synchronous and induction motors.

۵. هزینه ساخت موتورهای سنکرون بیشتر از موتورهای القایی (آسنکرون) است لذا در سرعت های بالا یا در سرعت های متوسط با توان کمتر از ۵۰ اسب بخار موتورهای سنکرون مناسب نمی باشند.

۶. توجه : در کاربردهایی که به سرعت کم و توان (اسب بخار) زیاد نیاز است موتورهای القایی ارزانتر از موتورهای سنکرون نخواهند بود زیرا به آهن بسیار زیاد جهت ایجاد چگالی شار

بالا در شکاف هوایی نیاز است (حدود یک تسلا) و باید متذکر شد کـه موتـور سـنکرون دارای خواص (سرعت ثابت، بازده بالا، قابلیت کنترل ضریب توان)است که گرانی آن را می‌پوشاند

مثال۴: یک ماشین سنکرون سه فاز چهار قطبی، 60 هرتزی 5 کیلو ولت آمپری 208 ولتـی بـه صـورت 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 شـود و راکتـانس سـنکرون هـر فـاز $X_s = J8$ اهم باشد مطلوب است: ۱) ولتاژ القایی هر فاز(E_f) ۲) زاویه بار یا زاویـه تـوان (δ) ۳) مقـادیر توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی ۴) حد پایداری استاتیک یا P_{max} ۵)ترسیم دیاگرام فازوری

پاسخ: $E_f = 206.9 V/_{Phase}$ و $\delta = 25.5°$

The per-phase equivalent circuit for the synchronous generator is shown in Fig. E6.3*a*.

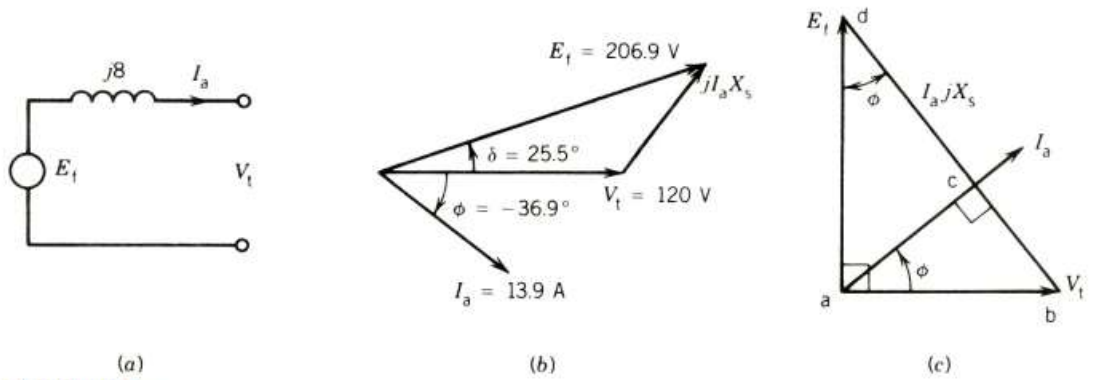
(a) $V_t = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120$ V/phase

Stator current at rated kVA;

$$I_a = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 208} = 13.9 \text{ A}$$

$\phi = -36.9°$ for lagging pf of 0.8

From Fig. E6.3*a*,



(*a*) (*b*) (*c*)

FIGURE E6.3

$$E_f = V_t \angle 0° + I_a jX_s$$
$$= 120\angle 0° + 13.9\angle -36.9° \cdot 8\angle 90°$$
$$= 206.9\angle 25.5°$$

Excitation voltage $E_f = 206.9$ V/phase

Power angle $\delta = +25.5°$

Note that because of generator action, the power angle is positive. The phasor diagram is shown in Fig. E6.3*b*.

$$Q = \frac{3Vt}{Xs}(Ef.Cos\delta - Vt) = \frac{3\times 120}{8}(206.9\times Cos25.5 - 120) = 3MVAR$$

$$P = \frac{3Vt.Ef}{Xs} Sin\delta = \frac{3\times 120\times 206.9}{8} \times Sin25.5 = 4MW$$

$$P_{max} = \frac{3Vt.Ef}{Xs} Sin\delta = \frac{3\times 120\times 206.9}{8} \times Sin90 = 9.31MW$$

*** قسمت ب مثال ۴ : اگر جریان تحریک ۲۰ درصد افزایش یابد ولی توان مکانیکی ورودی از طریق توربین ثابت بماند، جریان استاتور، ضریب توان و توان راکتیو ژنراتور را بدست آورید.

(b) The new excitation voltage $E'_f = 1.2 \times 206.9 = 248.28$ V. Because power transfer remains same, چون توان اکتیو دست نخورده باقی می ماند

$$\frac{V_t E_f}{X_s}\sin\delta = \frac{V_t E'_f}{X_s}\sin\delta'$$

or

$$E_f \sin\delta = E'_f \sin\delta'$$

or

$$\sin\delta' = \frac{E_f}{E'_f}\sin\delta = \frac{\sin 25.5°}{1.2}$$

$$\delta' = 21°$$

The stator current is

$$I_a = \frac{E_f - V_t}{jX_s}$$
$$= \frac{248.28\angle 21° - 120\angle 0°}{8\angle 90°}$$
$$= \frac{142.87\angle 38.52°}{8\angle 90°}$$
$$= 17.86\angle -51.5° \text{ A}$$
$$\text{Power factor} = \cos 51.5° = 0.62 \text{ lag}$$
$$\text{Reactive kVA} = 3|V_t|I_a| \sin 51.5°$$
$$= 3 \times 120 \times 17.86 \times 0.78 \times 10^{-3}$$
$$= 5.03$$

or, from Eq. 6.26,

$$Q = \frac{3Vt}{Xs}(Ef.Cos\delta - Vt) = \frac{3\times 120}{8}(248.28 \times Cos21 - 120) = 5.03MVAR$$

** **مثال ۵ :** اگر ماشین **مثال ۴** را به صورت موتور سنکرون سه فاز مورد بهره‌برداری قرار دهیم 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. الف) مقدار ولتاژ القایی هر فاز موتور (E_f) و زاویه توان(δ) را در محاسبه کنید. پاسخ: $E_f = 137.35^{V}/_{Phase}$ و $\delta = -29°$

Solution

The per-phase equivalent circuit for motoring operation is shown in Fig. E6.4*a*.

(a) $3V_tI_a\cos\phi = 3 \text{ kW} = 3V_tI_a$ for $\cos\phi = 1$.

$$I_a = \frac{3000}{3 \times 120} = 8.33 \text{ A}$$

$$E_f = V_t - I_a jX_s$$
$$= 120\angle 0° - 8.33\angle 0° \cdot 8\angle 90°$$
$$= 137.35\angle -29°$$

Excitation voltage $E_f = 137.35$ V/phase
Power angle $\delta = -29°$

Note that because of motor action, the power angle is negative.

The phasor diagram is shown in Fig. E6.4*b*. E_f and δ can also be calculated from the phasor diagram.

$$E_f = \sqrt{|V_t|^2 + |I_a X_s|^2} = \sqrt{120^2 + (8.33 \times 8)^2}$$

$$= 137.35 \text{ V/phase}$$

$$\tan \delta = \frac{|I_a X_s|}{|V_t|} = \frac{8.33 \times 8}{120} = 0.555$$

$$|\delta| = 29°$$

$$\delta = -29°$$

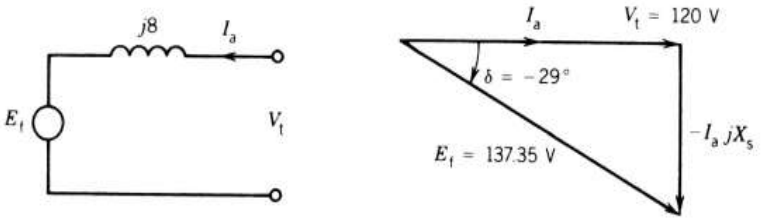


FIGURE E6.4

Activate Windows

*ب) 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 $\delta = 90°$ رخ می‌دهد .)

(b) Maximum torque will be developed at $\delta = 90°$. From Eq. 6.25a,

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

$$T_{max} = \frac{P_{max}}{\omega_{syn}} = \frac{6180.75}{(1800/60) \times 2\pi} = 32.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

OR

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

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

مثال ۶: یک موتور سنکرون ۲۰۸ ولتی ، ۴۵ کیلو ولت 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 هسته‌ی 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

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

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

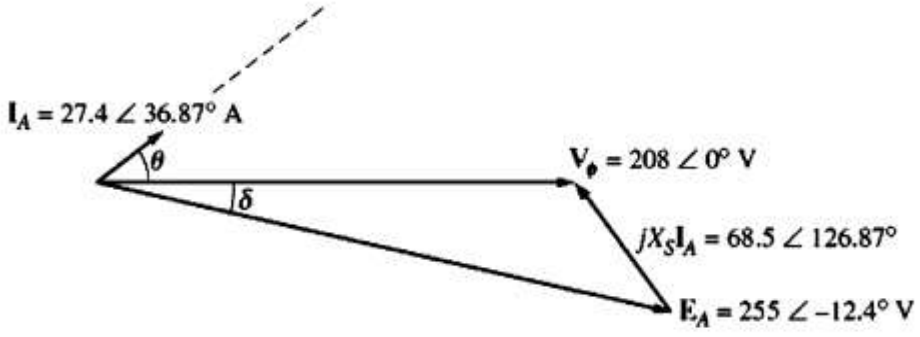
$$\begin{aligned} I_L &= \frac{P_{in}}{\sqrt{3}\, V_T \cos\theta} \\ &= \frac{13.69 \text{ kW}}{\sqrt{3}(208 \text{ V})(0.80)} = 47.5 \text{ A} \end{aligned}$$

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

$$\mathbf{I}_A = 27.4 \angle 36.87° \text{ A}$$

To find $\mathbf{E}_A$, apply Kirchhoff's voltage law

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_A &= \mathbf{V}_\phi - jX_S\mathbf{I}_A \\ &= 208 \angle 0° \text{ V} - (j2.5\ \Omega)(27.4 \angle 36.87° \text{ A}) \\ &= 208 \angle 0° \text{ V} - 68.5 \angle 126.87° \text{ V} \\ &= 249.1 - j54.8 \text{ V} = 255 \angle -12.4° \text{ V} \end{aligned}$$



مثال ۷: یک موتور سنکرون سه فاز ۵ مگا ولت آمپری، ۶۰ هرتزی و ۱۱ کیلو ولتی مفروض است، مقاومت استاتور ماچیز و راکتانس سنکرون ۱۰ اهم است، ماشین به شبکه ۱۱ کیلو ولتی ۶۰ هرتزی وصل است و در شرایط کندانسور سنکرون مورد بهره برداری قرار می گیرد. از تلفات چرخشی صرفنظر کنید :الف) در حالت تحریک نرمال جریان استاتور را بیابید و و نمودار فازوری را رسم کنید. ب) اگر جریان تحریک به میزان ۱۵۰ درصد نسبت به حالت تحریک نرمال افزایش یابد جریان استاتور و ضریب توان را بدست آورید و نمودار فازوری را ترسیم کنید.

Solution

1. (a) Power = $3V_tI_a \cos\phi$. For normal excitation, power factor = $\cos\phi = 1$. Hence V_t, and I_a are in phase. Since power is zero, I_a is zero. From Eq. 6.24, for no power transfer, δ is zero. If I_a is zero, both V_t and E_f are also the same in magnitude.

$$E_f = V_t = \frac{11}{\sqrt{3}}\text{kV/phase} = 6.35\text{ kV/phase}$$

The phasor diagram is shown in Fig. E6.6*a*.

(b) Because power transfer is zero, δ is zero. Hence,

$$I_a = \frac{V_t\angle 0° - E_f\angle 0°}{jX_s} = \frac{6351 - 1.5\times 6351}{10\angle 90°}$$

$$= 317.55\angle 90°\text{ A}$$

$$\text{PF} = \cos 90° = 0 \quad \text{leading}$$

The phasor diagram is shown in Fig. E6.6*b*.

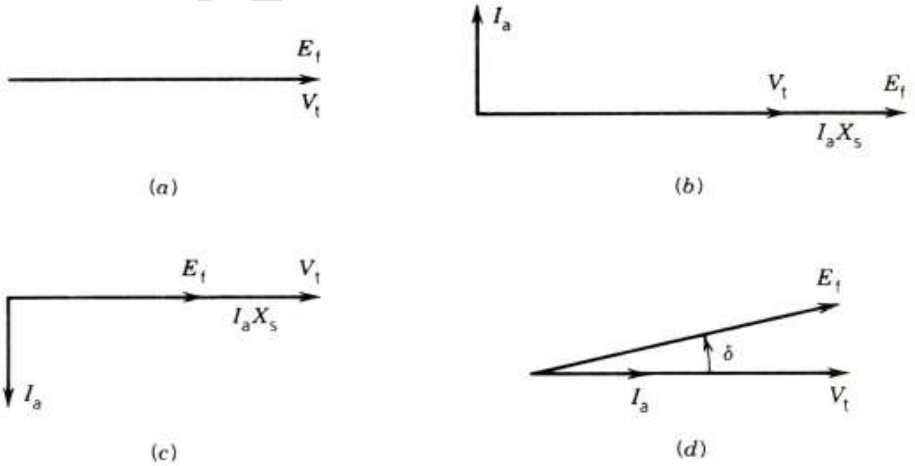


FIGURE E6.6

5-23. A three-phase Y-connected synchronous generator is rated 120 MVA, 13.2 kV, 0.8 PF lagging, and 60 Hz.

Its synchronous reactance is 0.9 Ω, and its resistance may be ignored.

(a) What is its voltage regulation?

(a) The rated armature current is

$$I_A = I_L = \frac{S}{\sqrt{3}\,V_T} = \frac{120\text{ MVA}}{\sqrt{3}(13.2\text{ kV})} = 5249\text{ A}$$

The power factor is 0.8 lagging, so $\mathbf{I}_A = 5249\angle -36.87°\text{ A}$.

The phase voltage is $13.2\text{ kV} / \sqrt{3} = 7621\text{ V}$.

Therefore, the internal generated voltage is

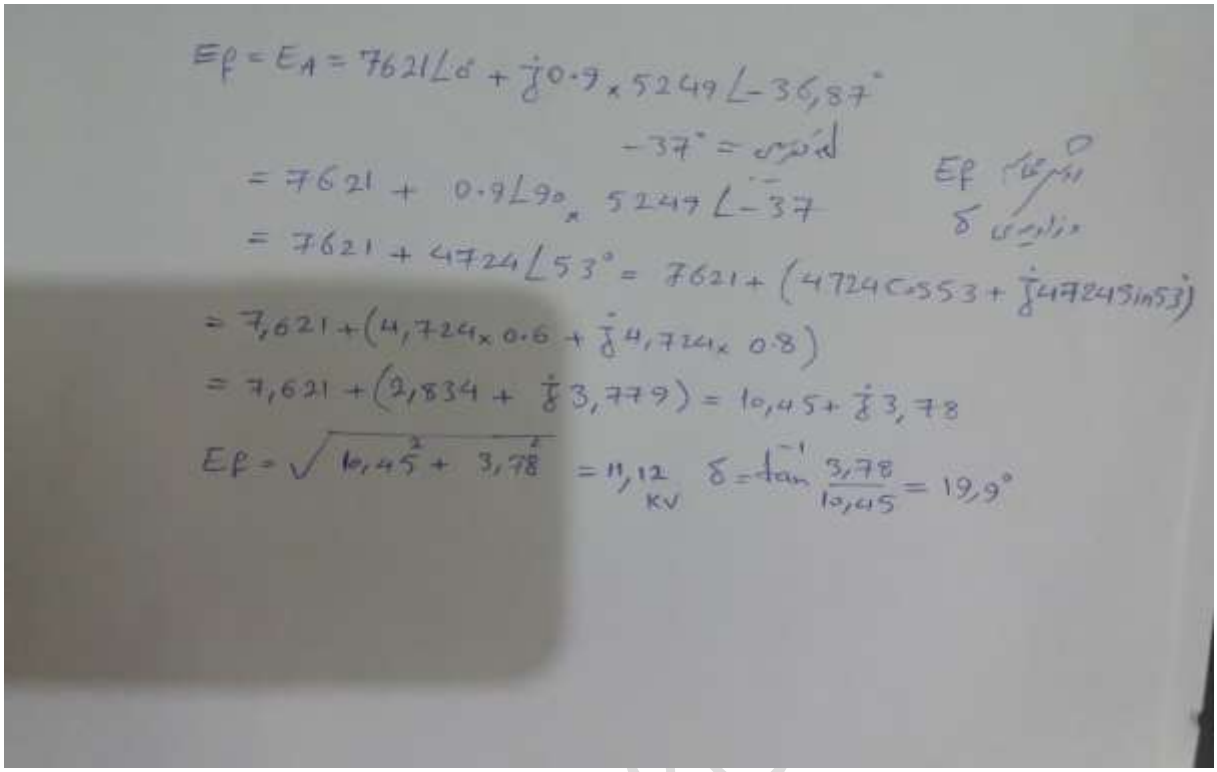
$$\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\phi + R_A\mathbf{I}_A + jX_S\mathbf{I}_A$$

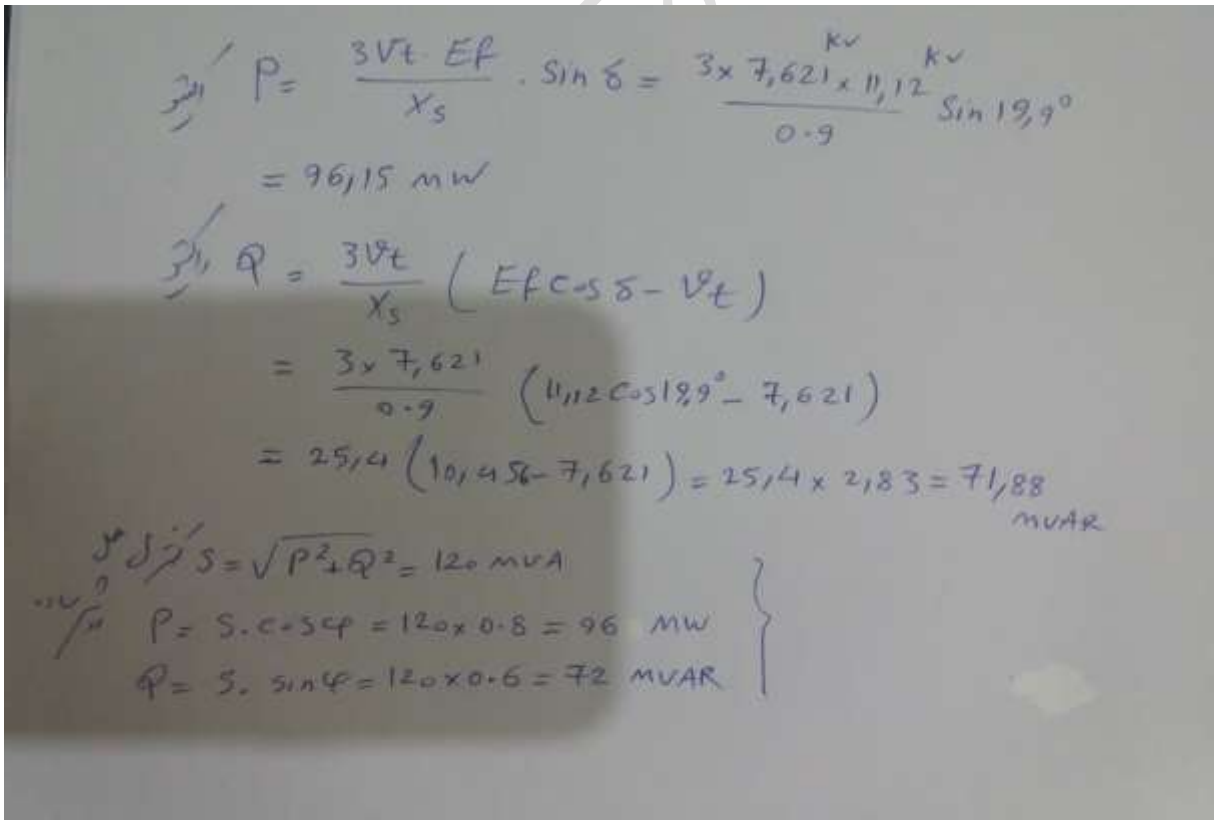
$$\mathbf{E}_A = 7621\angle 0° + j(0.9\ \Omega)(5249\angle -36.87°\text{ A})$$

$$\mathbf{E}_A = 11{,}120\angle 19.9°\text{ V}$$ resulting voltage regulation is

$$\text{VR} = \frac{11{,}120 - 7621}{7621} \times 100\% = 45.9\%$$

payam.ra


$E_f = E_A = 7621\angle\delta + j0.9 \times 5249\angle -36,87^\circ$
$= 7621 + 0.9\angle 90 \times 5247\angle -37$
$= 7621 + 4724\angle 53^\circ = 7621 + (4724\cos 53 + j4724\sin 53)$
$= 7,621 + (4,724 \times 0.6 + j4,724 \times 0.8)$
$= 7,621 + (2,834 + j3,779) = 10,45 + j3,78$
$E_f = \sqrt{10,45^2 + 3,78^2} = 11,12$ KV
$\delta = \tan^{-1}\frac{3,78}{10,45} = 19,9^\circ$


$P = \frac{3V_t E_f}{X_s} \cdot \sin\delta = \frac{3 \times 7,621\,\text{KV} \times 11,12\,\text{KV}}{0.9} \sin 19,9^\circ$
$= 96,15$ MW
$Q = \frac{3V_t}{X_s}(E_f\cos\delta - V_t)$
$= \frac{3 \times 7,621}{0.9}(11,12\cos 19,9^\circ - 7,621)$
$= 25,4(10,456 - 7,621) = 25,4 \times 2,83 = 71,88$ MVAR
$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 120$ MVA
$P = S.\cos\varphi = 120 \times 0.8 = 96$ MW
$Q = S.\sin\varphi = 120 \times 0.6 = 72$ MVAR