ماشین‌های سنکرون

۵-۱- مقدمه

بعد از موتور القایی پرکاربردترین ماشین در صنعت، ماشین سنکرون است. سنکرون بدین معنی است که با توجه به نوع استفاده از این ماشین (ژنراتوری یا موتوری) سرعت روتور و سرعت چرخش میدان استاتور همزمان (سنکرون) است. همان‌طور که از نام این ماشین مشخص است مهم‌ترین مزیت این ماشین ثابت بودن سرعت چرخش ماشین می‌باشد، به همین علت بیشتر به‌عنوان ژنراتور با سرعت ثابت در نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ازآنجاکه سرعت چرخش روتور باید مقدار ثابتی باشد از این ماشین معمولاً به‌عنوان موتور استفاده نمی‌شود چون موتور باید بتواند بار مکانیکی را در سرعت‌های مختلف بچرخاند. در هر حالت سرعت چرخش روتور ثابت و برابر با سرعت میدان روتور و استاتور است و با رابطه زیر بیان می‌شود که P تعداد قطب‌ها و f فرکانس ولتاژ استاتور است.

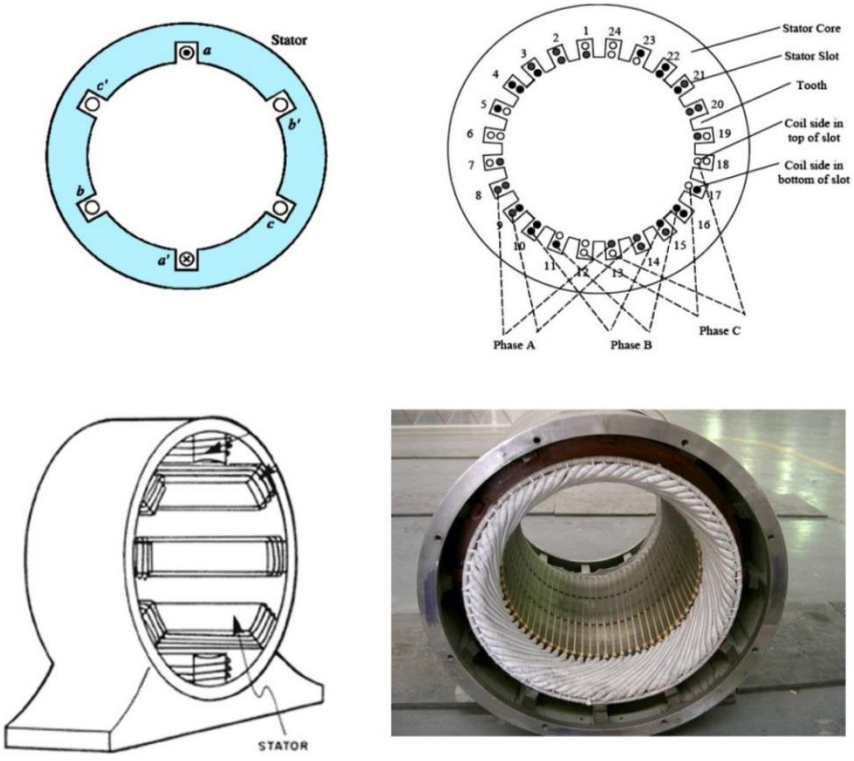
$$N_s = N_r = N_m = \frac{120 \times f}{p}$$

۵-۲- اجزا ماشین سنکرون

الف) استاتور

استاتور در واقع قسمت ثابت ماشین است که در حالت موتوری به سیم‌پیچ‌های آن تغذیه سه فاز داده می‌شود و در حالت ژنراتوری از آن‌ها تغذیه سه فاز گرفته می‌شود، به همین علت به آن آرمیچر گفته می‌شود (برعکس ماشین DC که به روتور آن تغذیه داده یا گرفته می‌شد و روتور آرمیچر بود).

استاتور ماشین سنکرون شبیه به استاتور ماشین القایی می‌باشد یعنی یک استوانه توخالی با شیارهایی در طول استوانه برای تعبیه سیم‌پیچ‌ها، که به‌صورت سه فاز است. یعنی برای هر فاز حداقل دو شیار یکی برای مسیر رفت و دیگری برای مسیر برگشت وجود دارد. اما تعداد شیارها بیش از این است، زیرا که برای ایجاد یک میدان سینوسی در فضای داخل استاتور سیم‌پیچ‌ها باید به‌صورت توزیع شده باشند و با تعداد مشخص که در فصل یک توضیح داده شد در شیارها قرار می‌گیرند. شکل زیر به ترتیب از چپ به راست نمونه ساده استاتور، نمونه کامل‌تر با تعداد شیارهای بیشتر، شکل سه‌بعدی استاتور و شکل واقعی آن را نشان می‌دهد.



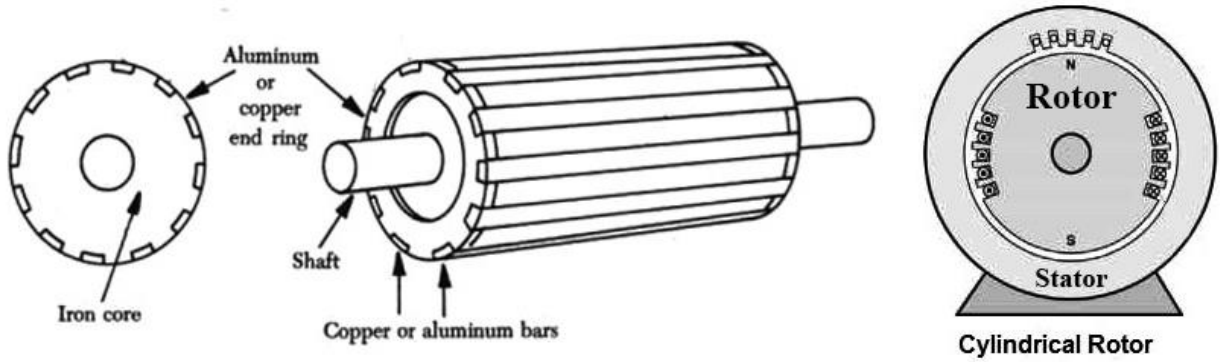
شکل (۶-۱): استاتور ماشین سنکرون

الف) روتور

روتور ماشین سنکرون درون استاتور قرار می‌گیرد و یک تغذیه DC برای تحریک آن و ایجاد میدان مغناطیسی به سیم‌پیچ‌های آن وصل می‌شود. روتور در حالت ژنراتوری باید با سرعت سنکرون چرخانده شود و در حالت موتوری با سرعت سنکرون می‌چرخد. روتور به دو صورت استوانه‌ای و قطب برجسته ساخته می‌شود.

الف-۱) روتور استوانه‌ای

روتور استوانه‌ای یک استوانه از جنس مواد فرومغناطیس است که در طول آن شبیه به استاتور شیارهایی برای تعبیه سیم‌پیچ‌های آن ایجاد شده است. در شکل زیر به ترتیب از چپ به راست سطح مقطع روتور استوانه‌ای، شکل سه‌بعدی روتور استوانه‌ای و قرارگیری روتور در استاتور نشان داده شده است.



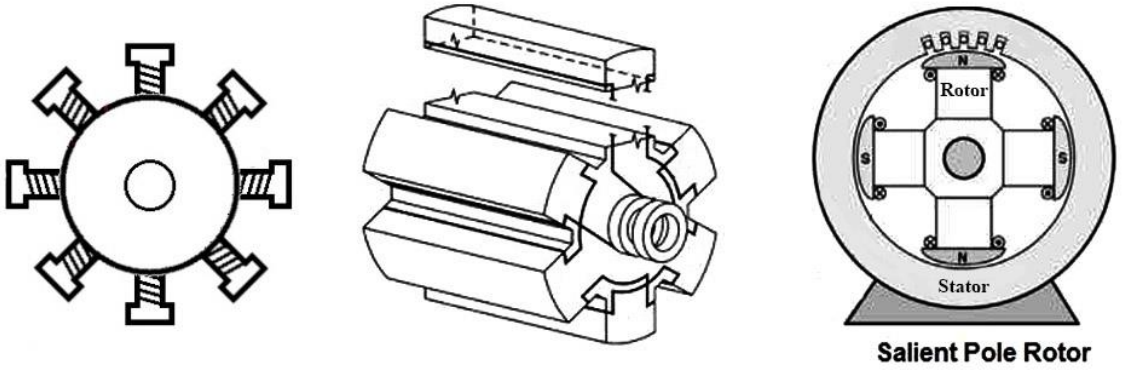
شکل (۶-۲): روتور استوانه‌ای

ویژگی‌های روتور استوانه‌ای:

۱- تعداد قطب آن کمتر از ۴تا است.
۲- ازآنجاکه سرعت سنکرون با تعداد قطب رابطه عکس دارد به‌واسطه تعداد قطب کم برای حالتی این روتور استفاده می‌شود که سرعت چرخش آن در نیروگاه بالا است. مانند نیروگاه بخار.
۳- طول آن‌ها بیشتر از قطرشان است تا در چرخش با سرعت بالا مشکل بالانس نداشته باشند.

الف-۱) روتور قطب برجسته

این روتور دارای سطح مقطع دایره نیست و قطب‌های آن نسبت به سطح روتور پیش‌آمدگی دارند که به آن‌ها کفشک گفته می‌شود و سیم‌پیچ‌ها به دور آن‌ها پیچیده شده است. در شکل زیر به ترتیب از چپ به راست سطح مقطع روتور قطب برجسته، شکل سه‌بعدی آن و قرارگیری روتور در استاتور نشان داده شده است.



شکل (۶-۳): روتور قطب برجسته

ویژگی‌های روتور قطب برجسته:

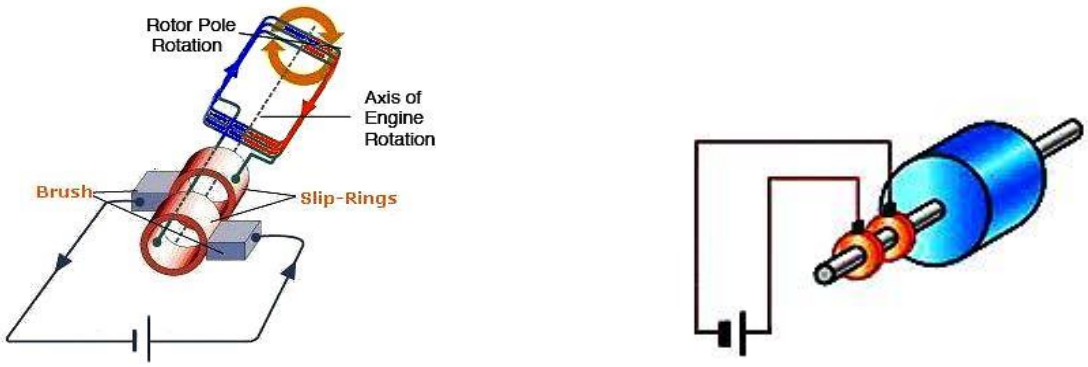
۱- تعداد قطب زیاد ۲۴، ۳۶، ۴۸ و ...
۲- تعداد قطب بالا سرعت کم را نتیجه می‌دهد بنابراین در نیروگاه‌هایی که سرعت توربین کم است استفاده می‌شود، مانند نیروگاه آبی.

۵-۳- روش‌های تغذیه روتور

روتور در حال چرخش است و از طرفی باید به یک منبع DC متصل باشد. بنابراین برای انتقال جریان به روتور در حال حرکت باید تمهیداتی انجام شود که در ادامه بررسی خواهند شد.

۵-۳-۱- استفاده از حلقه‌های لغزان

ساده‌ترین و قدیمی‌ترین روش استفاده از حلقه‌های لغزان شبیه آنچه که در ماشین DC وجود داشت، است. اما این روش به علت وجود جاروبک نیاز به تعمیر و نگهداری دارد و از طرفی مقداری توان در جاروبک‌ها که به روتور در حال چرخش چسبیده‌اند تلف می‌شود. در شکل زیر نمونه ساده این طرح نشان داده شده است.

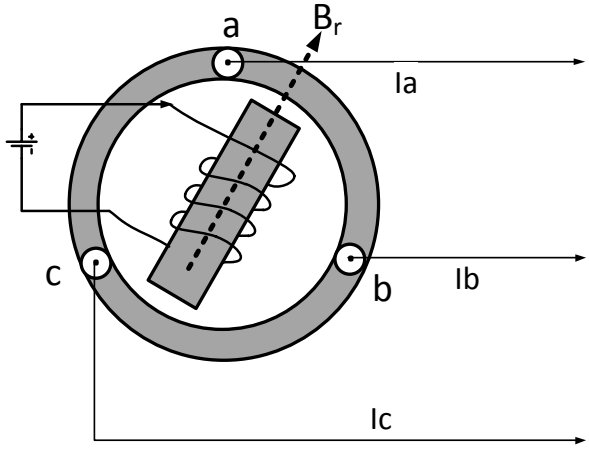


شکل (۶-۴): تحریک با استفاده از حلقه‌های لغزان

تمرین: دو روش دیگر تغذیه روتور را توضیح دهید.

۵-۵- تولید ولتاژ در ماشین سنکرون (عملکرد ژنراتوری)

در حالت ژنراتوری سیم‌پیچ‌های استاتور در مقابل میدان روتور قرار می‌گیرند. این میدان دارای اندازه ثابت است اما به علت اینکه گردان است طبق قانون فارادی در سیم‌پیچ‌ها ولتاژی القا می‌شود که با مشتق شار روتور و تعداد دور سیم‌پیچ استاتور رابطه مستقیم دارد. با چرخش روتور به ترتیب میدان آن از سیم‌پیچ‌های هر فاز عبور کرده و با توجه به اینکه با فاصله مکانی ۱۲۰ درجه در استاتور واقع شده‌اند ولتاژهای سه فازی با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه در آن‌ها القا می‌شود. البته لازم به ذکر است که سیم‌پیچ هر فاز به‌صورت توزیع شده سینوسی شبیه آنچه که در فصل اول گفته شد انجام شده است تا ولتاژ القایی سینوسی باشد. اگر ژنراتور به بار متصل باشد جریان‌های سه فاز در آن جاری می‌شود.



شکل (۶-۱۰): پایانه‌های استاتور و روتور

بنابراین ولتاژهای القایی در هر فاز و سایر روابط به‌صورت زیر خواهد بود.

با توجه به اینکه سیم‌پیچ‌ها به‌صورت سینوسی توزیع شده هستند، شار دربرگیرنده هر کدام نیز به‌صورت سینوسی خواهد بود.

$$\varphi_r = \varphi_m \cos \omega t$$

$$E_a = -N \frac{d\varphi_r}{dt} = N\varphi_m \omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

بنابراین ولتاژهای سه فاز که با هم ۱۲۰ درجه اختلاف فاز مکانی دارند به‌صورت زیر خواهد بود

$$E_a = E_m \sin \omega t$$
$$E_b = E_m \sin(\omega t - 120)$$
$$E_c = E_m \sin(\omega t - 240)$$

$$E_m = N\varphi_m \omega \Rightarrow E_{rms} = \frac{N\varphi_m \omega}{\sqrt{2}} = \frac{N\varphi_m 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4.44 N\varphi_m f$$

مشاهده می‌شود دامنه ولتاژ القایی هر سیم‌پیچ به سه پارامتر تعداد دور سیم‌پیچ استاتور، شار ایجاد شده توسط روتور و فرکانس وابسته است. در ماشین سنکرون باید سرعت ثابت باشد بنابراین فرکانس هم طبق رابطه اول فصل ثابت است. تعداد دور سیم‌پیچ‌ها نیز یک بار انجام شده و قابل تغییر نیست. اما با تغییر شار روتور که با تغییر جریان روتور انجام می‌شود می‌توان ولتاژ القایی خروجی را تنظیم کرد.

۵-۵-۱- فرکانس در ماشین سنکرون

در ماشین ۲ قطب به ازای هر دور چرخش روتور یک سیکل کامل ولتاژ القا می‌شود. حال اگر تعداد قطب ۴ باشد به ازای هر نیم دور چرخش یک سیکل ولتاژ القا می‌شود، بنابراین در این حالت فرکانس ولتاژ القایی ۲ برابر فرکانس چرخش موتور است.

به‌طورکلی در یک ماشین P قطبی روابط زیر بین فرکانس، سرعت زاویه‌ای و زاویه مکانیکی یا روتور و کمیت-های الکتریکی مانند ولتاژ برقرار است:

$$f_e = \frac{P}{2} f_m$$
$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m$$

$$\theta_e = \frac{P}{2}\theta_m$$

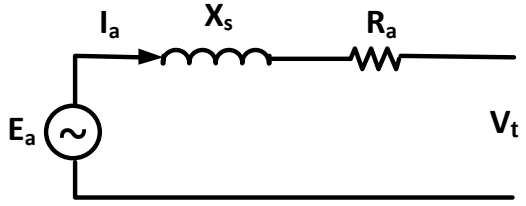
۵-۶- مدار معادل ماشین سنکرون

برای بدست آوردن مدار معادل ماشین سنکرون ابتدا باید عکس‌العمل آرمیچر بررسی و مدل شود. در ماشین سنکرون چون جریان به استاتور داده می‌شود و یا از آن گرفته می‌شود (برخلاف ماشین DC که به روتور آن جریان داده یا گرفته می‌شود)، استاتور ماشین سنکرون آرمیچر نام دارد (برخلاف ماشین DC که روتور آن آرمیچر است). بنابراین اگر باری به ژنراتور سنکرون متصل باشد جریان از سیم‌پیچ‌های استاتور عبور می‌کند. این جریان‌ها که از سیم‌پیچ‌های سه فاز عبور می‌کنند میدانی به وجود می‌آوردندکه میدان اصلی یعنی میدان روتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. درنتیجه ولتاژ القایی هر فاز نیز تغییر می‌کند. این اثر عکس‌العمل آرمیچر نام دارد یعنی جریان آرمیچر بر میدان به وجود آورنده آن تأثیر می‌گذارد.

با تعریف راکتانس سنکرون به‌صورت $X_s=X_{ar}+X_a$ داریم:

$$V_t = E_a - jX_s I_a - R_a I_a$$

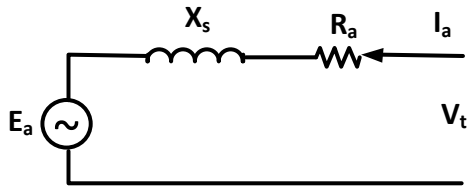
این رابطه یک KVL را نشان می‌دهد که شکل مداری آن به‌صورت زیر خواهد بود که مدل ژنراتور سنکرون است.



شکل (۶-۱۲): مدار معادل ژنراتور سنکرون

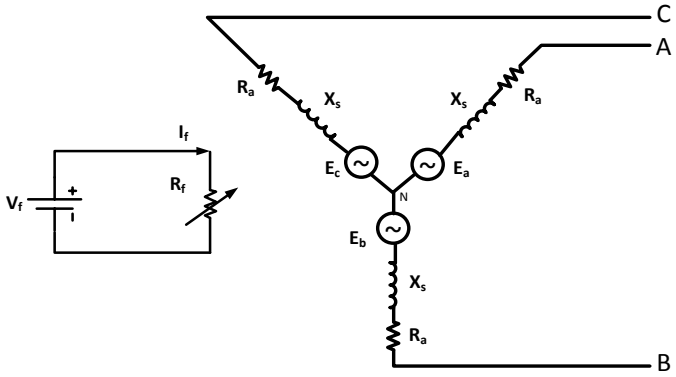
در حالت موتوری جهت جریان عکس می‌شود و از منبع خارجی وارد موتور می‌شود:

$$V_t = E_a + jX_s I_a + R_a I_a$$

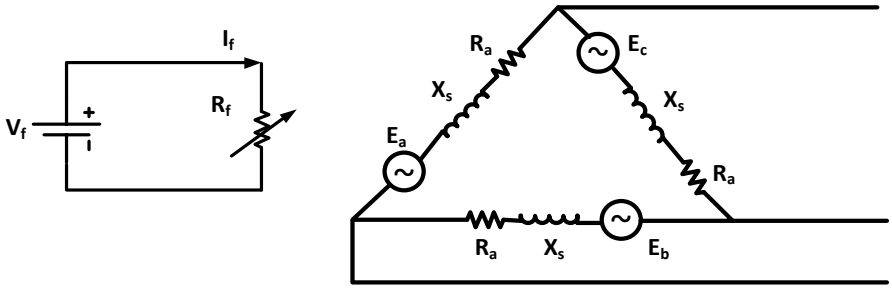


شکل (۶-۱۳): مدار معادل موتور سنکرون

این مدل برای یک فاز ماشین سنکرون است. برای سایر فازها هم به همین شکل تنها با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه خواهد بود. سیم‌پیچی استاتور ماشین سنکرون هم به‌صورت ستاره بسته می‌شود و هم مثلث، که در اتصال ستاره ولتاژ خط رادیکال ۳ برابر ولتاژ فاز است و در اتصال مثلث جریان خط رادیکال ۳ برابر جریان فاز می‌باشد. لازم به ذکر است که مدار تحریک هیچ اتصال الکتریکی با مدار استاتور ندارد و تنها رابطه بین جریان تحریک و ولتاژ القایی مشخصه مغناطیس‌شوندگی E_a-I_f شبیه ماشین DC است.



شکل (۶-۱۴): اتصال ستاره برای استاتور و مدار تحریک



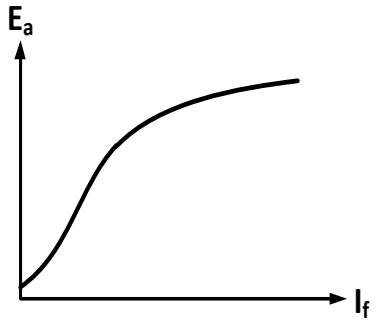
شکل (۶-۱۵): اتصال مثلث ستاره برای استاتور و مدار تحریک

۶-۵- اندازه‌گیری پارامترهای ماشین سنکرون توسط آزمایش

همان‌طور که مشاهده شد مدار معادل ماشین سنکرون دارای دو پارامتر راکتانس سنکرون و مقاومت آرمیچر (سیم‌پیچ استاتور) است. علاوه بر این دو کمیت منحنی مغناطیس شوندگی که رابطه بین جریان تحریک و ولتاژ القایی را نشان می‌دهد باید مشخص باشد. این موارد توسط ۳ آزمایش زیر بدست می‌آیند.

۵-۶-۱- آزمایش مدار باز برای تعیین مشخصه مغناطیس شوندگی

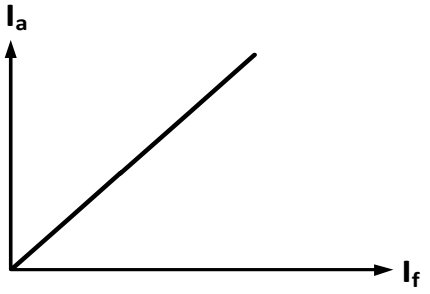
در این آزمایش ترمینال‌های ژنراتور باز و اصطلاحاً بی‌بار است و در سرعت نامی چرخانده می‌شود. جریان میدان در ابتدا صفر بوده و به‌تدریج افزایش می‌یابد. با هر مرحله افزایش I_f ولتاژ ترمینال V_t ثبت می‌شود و ازآنجاکه ژنراتور بی‌بار است و جریان آرمیچر صفر است $V_t=E_a$ می‌باشد. مقادیر ثبت شده برای I_f و $V_t=E_a$ را می‌توان روی یک منحنی رسم کرد که مشخصه بی‌باری خواهد بود. این مشخصه در ابتدا خطی است و با افزایش جریان تحریک به اشباع رفته و غیرخطی می‌شود.



شکل (۶-۱۶): مشخصه مغناطیس شوندگی ماشین سنکرون

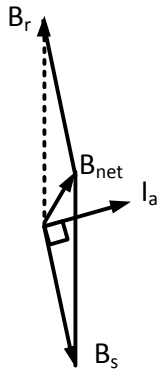
۵-۶-۲- آزمایش اتصال کوتاه برای تعیین راکتانس سنکرون

در این آزمایش ژنراتور در سرعت نامی چرخانده می‌شود. پایانه‌های ژنراتور اتصال کوتاه شده و یک آمپرمتر در مسیر آن قرار می‌گیرد. جریان میدان I_f در ابتدا صفر بوده و به‌تدریج افزایش می‌یابد و در هر مرحله افزایش جریان آرمیچر I_a اندازه‌گیری می‌شود. اگر مقادیر ثبت شده برای جریان میدان و جریان آرمیچر روی یک منحنی رسم شوند منحنی اتصال کوتاه بدست می‌آید که در واقع یک خط راست طبق شکل زیر است.



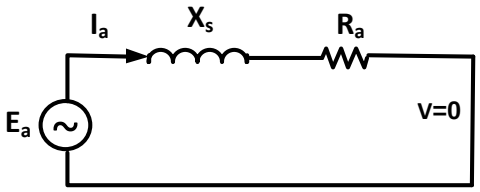
شکل (۶-۱۷): مشخصه اتصال کوتاه ماشین سنکرون

علت خطی بودن این مشخصه‌این است که در حالت اتصال کوتاه هیچ باری به ژنراتور متصل نیست، بنابراین فقط راکتانس سنکرون و مقاومت سیم‌پیچ‌ها در مدار است و چون $X_s >> R_a$ زاویه جریان I_a تقریباً اختلاف ۹۰ درجه با ولتاژ داخلی E_a و درنتیجه به علت هم‌راستا بودن این ولتاژ با میدان روتور، جریان I_a زاویه ۹۰ درجه با B_r دارد. از طرفی میدان استاتور یا همان عکس‌العمل آرمیچر ۹۰ درجه عقب‌تر از جریان است بنابراین اختلاف میدان استاتور B_s و B_r حدود ۱۸۰ درجه است که برآیند آن‌ها B_{net} یک میدان کوچک می‌شود و ماشین به اشباع نمی‌رود و مشخصه خطی است.



شکل (۶-۱۸): میدان روتور و استاتور و برآیند آن‌ها

با استفاده از مدل مداری زیر راکتانس سنکرون محاسبه می‌شود.



$$E_a = jX_s I_a + R_a I_a$$

$$X_s >> R_a \Rightarrow |X_s| = \frac{|E_a|}{|I_a|}$$

بنابراین برای بدست آوردن راکتانس سنکرون مراحل زیر را داریم:

۱- ولتاژ داخلی Ea را به ازای یک جریان میدان If معین از مشخصه بی‌باری بدست می‌آید.

۲- جریان اتصال کوتاه Ia به ازای همان جریان میدان از مشخصه اتصال کوتاه بدست می‌آید.

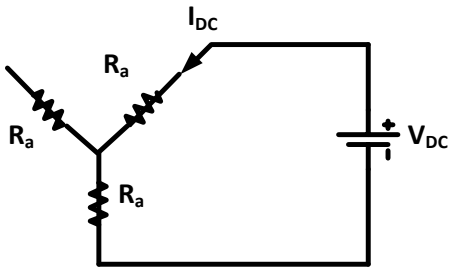
۳- با استفاده از رابطه بالا مقدار راکتانس سنکرون از تقسیم ولتاژ داخلی بر جریان اتصال کوتاه محاسبه می‌شود.

نکته: مقدار X_s تا زمانی به‌صورت ثابت بدست می‌آید که ماشین اشباع نشده باشد. چون در حالت اشباع E_a که به ازای I_f بدست می‌آید همان E_a متناظر در شرایط اتصال کوتاه نیست و نسبت E_a/I_f برابر با X_s نمی‌شود بلکه چون E_a اشباع شده و از مقدار خطی کمتر است X_s کوچک‌تری در این حالت بدست می‌آید.

۵-۶-۲- آزمایش DC برای تعیین مقاومت آرمیچر

در هنگام سکون با اعمال یک ولتاژ DC به سیم‌پیچ استاتور و اندازه‌گیری جریان، مقدار مقاومت آرمیچر بسته به اتصال ستاره یا مثلث از رابطه زیر بدست می‌آید. اما این مقدار به علت اثر پوستی و واقعی‌تر شدن در حالت ac در یک عدد بین ۱/۱ تا ۱/۳ ضرب می‌شود. نکته اینکه چون در حالت DC راکتانس سنکرون صفر است برای جلوگیری از آسیب دیدن سیم‌پیچ‌ها مقدار ولتاژ DC از مقدار ولتاژ حالت نامی باید کمتر باشد.

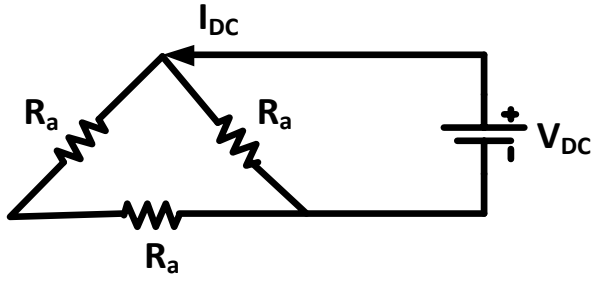
اتصال ستاره:



$$2R_{a-DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \Rightarrow R_{a-DC} = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}}$$

$$R_{a-ac} = [1.1-1.3] \times R_{a-DC}$$

اتصال مثلث:



$$2R_{a-DC} \| R_{a-DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \Rightarrow R_{a-DC} = \frac{3}{2}\frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

$$R_{a-ac} = [1.1-1.3] \times R_{a-DC}$$

مثال ۱: بر روی یک ژنراتور سنکرون ۲۰۰ کیلوولت آمپر، ۴۸۰ ولت و ۵۰ هرتز با اتصال ستاره با جریان میدان ۵ آمپر آزمایش‌های زیر انجام شده است:

۱- ولتاژ ترمینال مدار باز در جریان میدان نامی ۵۴۰ ولت اندازه‌گیری شده است.

۲- جریان خط اتصال کوتاه در جریان نامی ۳۰۰ آمپر به دست آمده است.

۳- با اعمال ولتاژ DC برابر با ۱۰ ولت جریان ۲۵ آمپر اندازه‌گیری شده است.

مقاومت آرمیچر و راکتانس سنکرون را در شرایط نامی بدست آورید. اگر در محاسبات راکتانس سنکرون از R_a صرف‌نظر نکنیم مقدار دقیق راکتانس سنکرون چقدر تغییر خواهد داشت.

حل: چون اتصال ستاره است باید برای آزمایش DC از مدار مربوط به آن استفاده شود و همچنین در محاسبات باید مقدار ولتاژ خط بر رادیکال ۳ تقسیم شود تا ولتاژ فاز بدست آید ولی جریان خط با جریان فاز برابر است. صورت سؤال مقدار مقاومت در حالت ac را نخواسته که محاسبه نمی‌شود.

$$R_a = \frac{1}{2}\frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \frac{10}{2\times 25} = 0.2\ \Omega$$

در آزمایش مدار باز $E_a=V_t$

$$E_{a-ph} = \frac{V_t}{\sqrt{3}} = \frac{540}{\sqrt{3}} = 311.8\ V$$

$$I_a = I_L = 300\ A$$

$$X_s >> R_a \Rightarrow Ra \approx 0 \Rightarrow |X_s| = \frac{|E_a|}{|I_a|} = \frac{311.8}{300} = 1.04\ \Omega$$

$$Ra \neq 0 \Rightarrow \sqrt{X_s{}^2 + R_a{}^2} = \frac{|E_a|}{|I_a|} \Rightarrow \sqrt{X_s{}^2 + 0.2^2} = \frac{311.8}{300} \Rightarrow X_s = 1.02\ \Omega$$

۵-۶- تنظیم ولتاژ و دیاگرام فازوری ژنراتور سنکرون

با استفاده از مدار معادل بدست آمده می‌توان با در نظر گرفتن ولتاژ ترمینال ژنراتور، ولتاژ داخلی را بدست آورد. برای این کار باید با استفاده از معادله KVL حاکم بر مدار بردارهای مربوطه را با هم جمع برداری کرد. دیاگرام فازوری به‌صورت ترسیمی نشان می‌دهد که با تغییر بار و نوع بار از حالت اهمی، سلفی- اهمی و یا خازنی- اهمی ولتاژ داخلی چگونه تغییر می‌کند. در واقع نشان می‌دهد برای داشتن ولتاژ خروجی ثابت، ولتاژ داخلی چگونه باید تنظیم شود. اختلاف بین ولتاژ ترمینال و ولتاژ داخلی اگر به‌صورت درصد بیان شود تنظیم ولتاژ را نشان

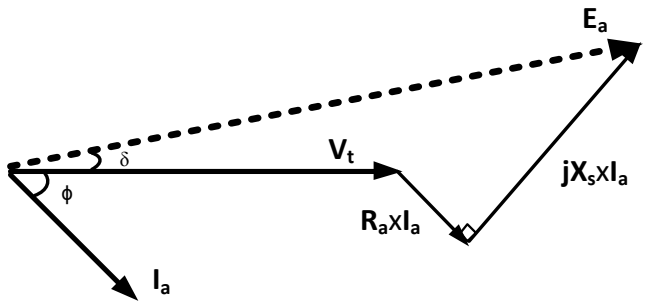
می‌دهد. تنظیم ولتاژ مثبت یعنی ولتاژ از منبع تا بار افت دارد و تنظیم ولتاژ منفی نشان‌دهنده این است که ولتاژ بار بیشتر از منبع است. لازم به ذکر است که تنظیم ولتاژ منفی تنها در بار خازنی- اهمی رخ می‌دهد.

تنظیم ولتاژ در ژنراتور سنکرون:

طبق تعریف که در فصل‌های قبل نیز بررسی شد تنظیم ولتاژ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

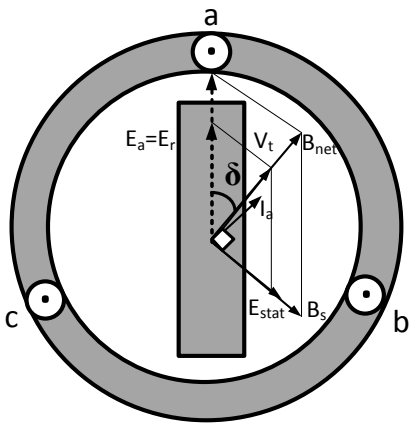
$$VR\% = \frac{E_a - V_t}{E_a} \times 100$$

دیاگرام فازوری برای بار سلفی- اهمی: در این حالت یک جریان پس‌فاز که نشان‌دهنده بار سلفی اهمی است فرض می‌شود. این جریان باید زاویه‌ای (ϕ) کمتر از ولتاژ ترمینال داشته باشد که این زاویه بین صفر تا منفی ۹۰ درجه خواهد بود. با توجه به رابطه KVL باید افت ولتاژ راکتانس سنکرون و افت ولتاژ مقاومت آرمیچر با ولتاژ ترمینال جمع شود تا ولتاژ داخلی بدست آید.لازم به ذکر است که بردار افت راکتانس سنکرون چون موهومی است و در j ضرب شده است باید اختلاف فاز ۹۰ درجه داشته باشد. بنابراین بردارهای متناظر طبق شکل زیر با هم جمع شده و E_a تشکیل می‌شود. ملاحظه می‌شود در این حالت E_a از V_t بزرگ‌تر شده است که به معنای تنظیم ولتاژ مثبت است. یعنی ولتاژ داخلی تا به ولتاژ ترمینال برسد کمتر خواهد شد.



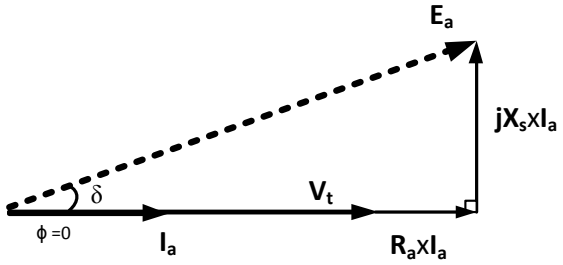
شکل (۶-۱۹): دیاگرام برداری ماشین سنکرون برای بار سلفی- اهمی

نکته مهم: زاویه بین E_a و V_t برابر با δ است که زاویه توان نیز نامیده می‌شود. این زاویه دقیقاً برابر با اختلاف زاویه بین میدان روتور و استاتور در رابطه گشتاور نیز هست. شکل زیر این زاویه را نشان می‌دهد.



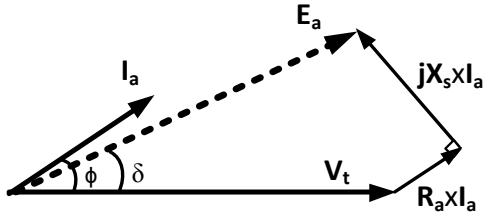
شکل (۶-۲۰): زاویه بین میدان روتور و استاتور

دیاگرام فازوری برای بار اهمی خالص: در بار اهمی خالص زاویه بین جریان و ولتاژ ترمینال صفر یعنی کسینوس فی برابر عدد ۱ است. در این حالت که دیاگرام فازوری آن طبق شکل زیر رسم شده است تنظیم ولتاژ مثبت است یعنی ولتاژ ترمینال از ولتاژ داخلی کوچک‌تر است.



شکل (۶-۲۱): دیاگرام برداری ماشین سنکرون برای بار اهمی

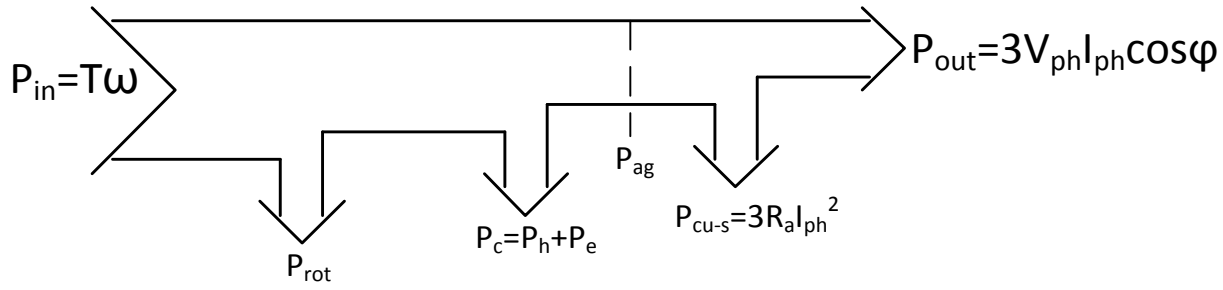
دیاگرام فازوری برای بار خازنی- اهمی: در بار خازنی اهمی جریان پیش‌فاز است یعنی دارای زاویه بیشتر از ولتاژ ترمینال است. در این حالت بسته به درجه پیش فازی ممکن است تنظیم ولتاژ صفر و یا حتی منفی باشد.



شکل (۶-۲۲): دیاگرام برداری ماشین سنکرون برای بار خازنی-اهمی

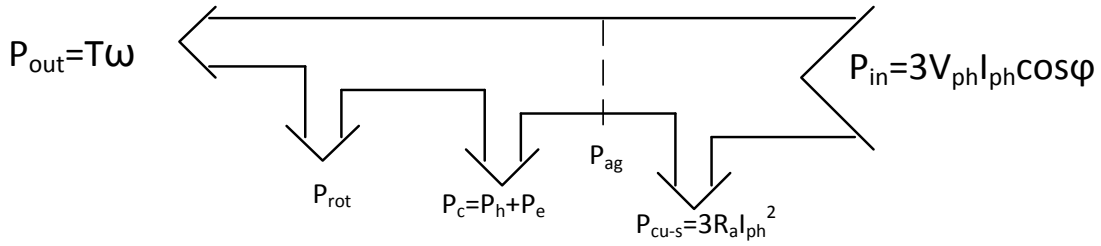
۵-۷- تلفات در ماشین سنکرون

در حالت ژنراتوری ماشین سنکرون توان ورودی مکانیکی توسط گرداننده به محور روتور وارد می‌شود. این توان بعد از مقداری کاهش به علت تلفات گردشی مانند تلفات مکانیکی و اصطکاک و پس از آن تلفات هسته شامل تلفات فوکو و هیسترزیس که در هسته استاتور وجود دارد و درنهایت تلفات مقاومتی (مسی) سیم‌پیچ‌های استاتور به توان خروجی یا همان توان الکتریکی تحویلی که از رابطه $P_{out}=3V_{ph}I_{ph}\cos\phi$ بدست می‌آید تبدیل می‌شود. در شکل زیر روند عبور توان و تلفات نشان داده شده است.



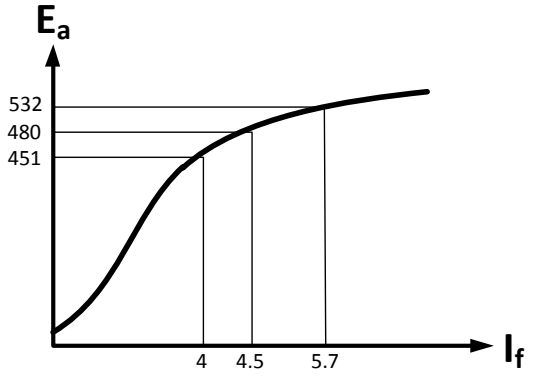
شکل (۶-۲۳): توان ماشین سنکرون در حالت موتوری

در حالت موتوری جهت تبدیل توان عکس حالت ژنراتوری است و توان ورودی $P_{in} = 3V_{ph}I_{ph}\cos\phi$ می‌باشد.



شکل (۶-۲۴): توان ماشین سنکرون در حالت ژنراتوری

مثال۲: مشخصه مدار باز یک ژنراتور سنکرون ۴۸۰ ولت، ۶۰ هرتز و ۴ قطب با اتصال مثلث در شکل زیر نشان داده شده است. راکتانس سنکرون ۰.۱ اهم و مقاومت آرمیچر ۰.۰۱۵ اهم است. در بار کامل جریان خروجی ۱۲۰۰ آمپر و ضریب توان ۰.۸ پس فاز و همچنین تلفات اصطکاک و هسته به ترتیب ۴۰ و ۳۰ کیلو وات است.



الف) سرعت چرخش ژنراتور چقدر است.

ب) مقدار جریان میدان برای ایجاد ولتاژ پایانه ۴۸۰ ولت در حالت بار کامل

ج) مقدار جریان میدان برای ایجاد ولتاژ پایانه ۴۸۰ ولت در حالت بی‌باری

د) توان ورودی، خروجی و بازده

ه) اگر بار ژنراتور به‌صورت ناگهانی قطع شود ولتاژ ترمینال چقدر خواهد شد.

و) مقدار جریان میدان برای ایجاد ولتاژ پایانه ۴۸۰ ولت در بار ۱۲۰۰ آمپر و ۰.۸ پیش فاز.

حل:

الف)

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

ب) در حالت بی‌باری $E_a=V_t$

$$V_t = E_a = 480 \ V$$

با استفاده از نمودار $I_f=4.5$

ج)

$$I_{LL} = 1200\angle -\cos 0.8 \qquad Delta \quad Connection \qquad I_{ph} = \frac{1200}{\sqrt{3}}\angle -\cos 0.8$$

$$E_a = V_t + (R_a + jX_s)I_a = 480 + (0.015 + j0.1) \times (\frac{1200}{\sqrt{3}}\angle -36.8) = 532\angle 5.3 \ V$$

با استفاده از نمودار $I_f=5.7$

د)

$$P_{out} = 3V_{t-ph}I_{ph}\cos\varphi = 3\times 480\times\frac{1200}{\sqrt{3}}\times 0.8 = 789000\ W$$

$$P_{cu-s} = 3R_a{I_{ph}}^2 = 3\times 0.015\times(\frac{1200}{\sqrt{3}})^2 = 21600\ W$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{cu-s} + P_c + P_{rot} = 789000 + 21600 + 40000 + 30000 = 889600\ W$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}\times 100 = 89.7\%$$

ه) اگر جریان بار به‌صورت ناگهانی قطع شود $E_a=V_t$ می‌شود و چون در حالت بار کامل $E_a=532$

$$V_t = E_a = 532\ V$$

و)

$$I_{LL} = 1200\angle + \cos 0.8 \qquad Delta \quad Connection \qquad I_{ph} = \frac{1200}{\sqrt{3}}\angle - \cos 0.8$$

$$E_a = V_t + (R_a + jX_s)I_a = 480 + (0.015 + j0.1)\times(\frac{1200}{\sqrt{3}}\angle + 36.8) = 451\angle 7.8\ V$$

با استفاده از نمودار $I_f=4$

۵-۸- توان الکتریکی تحویلی توسط ژنراتور سنکرون (حد پایداری استاتیکی)

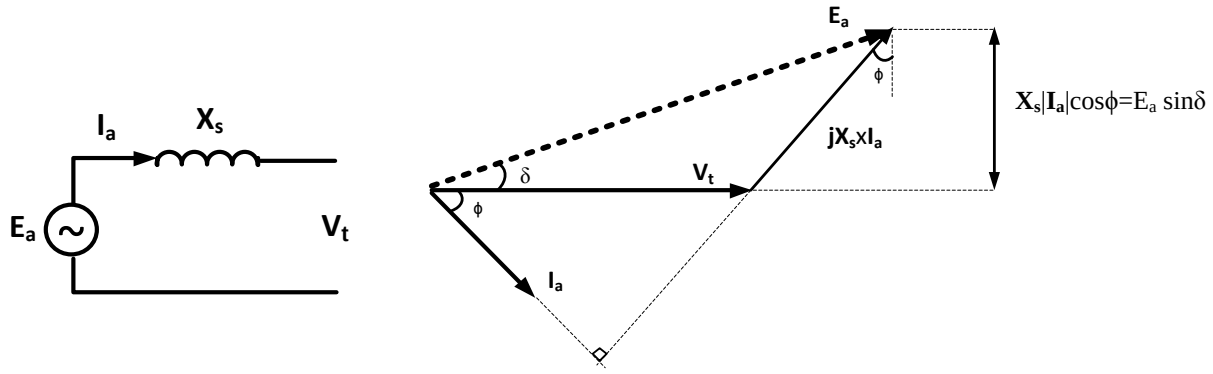
توان الکتریکی تحویل داده شده توسط ژنراتور سنکرون در قسمت قبل بیان شد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر مقدار این توان برحسب زاویه بین ولتاژ داخلی و ولتاژ پایانه یعنی δ که همان زاویه بین میدان روتور و استاتور است بیان می‌شود. یکی از اهداف این کار این است که وقتی توان ژنراتور افزایش می‌یابد مقدار توان ورودی توسط توربین نیز باید افزایش یابد که باعث تغییر در زاویه بین میدان روتور و استاتور می‌شود. بنابراین بهتر است که توان خروجی الکتریکی نیز برحسب این زاویه بیان شود. مقدار این توان به حد پایداری استاتیکی معروف است چون‌که درخواست توان بیش از این مقدار از ژنراتور باعث ناپایدار شدن آن می‌شود.

- **رابطه توان اکتیو تحویلی توسط ژنراتور سنکرون**

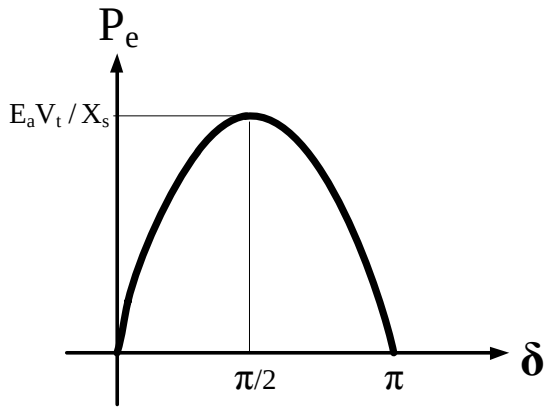
برای بدست آوردن رابطه توان از مقاومت آرمیچر صرف‌نظر می‌شود.

$$X_s I_a\cos\varphi = E_a\sin\delta \Rightarrow I_a\cos\varphi = \frac{E_a\sin\delta}{X_s}$$

$$P_e = 3V_t I_a\cos\varphi \Rightarrow P_e = 3\frac{E_a V_t}{X_s}\sin\delta$$



شکل زیر نمودار این رابطه را نشان می‌شد که یک منحنی سینوسی است و همه تحلیل‌های گفته شده درباره پایداری ژنراتور سنکرون که بر روی منحنی گشتاور آن گفته شد را می‌توان با این منحنی نیز بررسی کرد.



شکل (۶-۲۵): نمودار توان ماشین سنکرون در حالت ژنراتوری

نکته: در حالت کار موتوری ازآنجاکه علامت δ متفاوت از حالت ژنراتوری است این منحنی از منفی ۱۸۰ تا صفر درجه و در پایین محور افقی خواهد بود.

- **رابطه توان راکتیو تحویلی توسط ژنراتور سنکرون**

مجدداً توسط دیاگرام فازوری گفته شده که از مقاومت آرمیچر نیز صرف‌نظر شده بود با استفاده از روابط هندسی برای بدست آوردن رابطه توان راکتیو داریم:

$$X_s I_a \sin\varphi = E_a \cos\delta - V_t \Rightarrow I_a \cos\varphi = \frac{E_a \cos\delta - V_t}{X_s}$$

$$Q_e = 3V_t I_a \cos\varphi \Rightarrow Q_e = 3V_t \frac{E_a \cos\delta - V_t}{X_s}$$

- **تنظیم توان اکتیو و راکتیو**

به‌منظور تنظیم توان اکتیو خروجی در ژنراتور سنکرون طبق رابطه بدست آمده برای توان اکتیو می‌توان با تغییر δ و یا ولتاژ داخلی E_a این کار را انجام داد. برای افزایش توان خروجی ژنراتور باید توان مکانیکی ورودی افزایش یابد که این کار با استفاده از تنظیم دریچه ورودی بخار، گاز و یا آب انجام می‌شود. افزایش توان ورودی به محور ژنراتور باعث می‌شود که روتور نسبت به ژنراتور زاویه بیشتری پیدا کند که طبق رابطه، توان اکتیو خروجی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین به‌طورکلی تغییر در توان اکتیو ژنراتور با استفاده از تنظیم δ انجام می‌شود.

اما به‌منظور تنظیم توان راکتیو مشاهده می‌شود که توان راکتیو تزریقی ژنراتور به علامت جمله $E_a\cos\delta - V_t$ وابسته است. یعنی اگر مثبت باشد تولید توان راکتیو خواهیم داشت. بنابراین برای تنظیم توان راکتیو مقدار ولتاژ داخلی باید تغییر کند که این کار توسط تنظیم جریان تحریک قابل انجام است. به این صورت که با افزایش جریان تحریک مقدار میدان تولدی روتور افزایش می‌یابد و با استفاده از مشخصه مغناطیس شوندگی مقدار ولتاژ داخلی نیز افزایش می‌یابد که تولید توان راکتیو را نتیجه می‌دهد. این روند را به‌صورت زیر نیز می‌توان بیان کرد:

$$I_a \uparrow \Rightarrow \varphi \uparrow \Rightarrow (E_a = 4.44Nf\varphi) \Rightarrow E_a \uparrow \Rightarrow Q \uparrow$$

مدهای کاری ژنراتور به‌منظور تولید توان راکتیو به‌صورت زیر تعریف می‌شوند. لازم به ذکر است که به علت اینکه جریان از ژنراتور خارج می‌شود و به بار وارد می‌شود، تعریف جهت جریان برای این دو متفاوت است بنابراین تعاریف پس فاز و پیش فاز نیز برای بار و ژنراتور متفاوت خواهد بود. بنابراین ژنراتور پس فاز یعنی تولید توان راکتیوی و پیش فاز یعنی مصرف توان راکتیو.

جدول (۶-۱): حالت‌های مختلف تحریک

پس فاز	تولید Q	$E_a\cos\delta > V_t$	فوق تحریک	$I_f > I_{f\text{-}n}$
PF=1	$Q = 0$	$E_a\cos\delta = V_t$	تحریک نرمال	$I_f = I_{f\text{-}n}$
پیش فاز	مصرف Q	$E_a\cos\delta < V_t$	زیر تحریک	$I_f < I_{f\text{-}n}$

مثال ۳: یک ژنراتور سنکرون ۴۸۰ ولت، ۶۰ هرتز و ۶ قطب با اتصال ستاره دارای راکتانس سنکرون ۱ اهم است. جریان آرمیچر در بار کامل ۶۰ آمپر با ضریب توان ۰/۸ پس فاز است. اگر تلفات اصطکاک ۱۵۰۰ وات و تلفات هسته ۱۰۰۰ وات باشد موارد زیر را بدست آورید.

الف) سرعت چرخش ژنراتور

ب) ولتاژ پایانه را در سه حالت جریان نامی با ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز، ضریب قدرت ۱ و ضریب قدرت ۰/۸ پیش فاز بدست آورید.

ج) تنظیم ولتاژ در سه حالت فوق چقدر است.

د) بازده ژنراتور در بار کامل و ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز.

ه) در بار کامل گشتاور توربین و گشتاور القایی مخالف چقدر است.

حل:

الف)

$$N_s = N_m = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \ rpm$$

ب)

$$E_{a-ph} = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277 \ V$$

$$I_{ph} = 60\angle -\cos 0.8$$

$$V_t = E_a - jX_s I_a = 277 - j1 \times (60\angle -36.8) = 236.9 \ V$$

$$I_{ph} = 60\angle 0$$

$$V_t = E_a - jX_s I_a = 277 - j1 \times (60) = 270.4 \ V$$

$$I_{ph} = 60\angle -\cos 0.8$$

$$V_t = E_a - jX_s I_a = 277 - j1 \times (60\angle +36.8) = 308.8 \ V$$

ج)

$$VR\% = \frac{E_a - V_t}{E_a} \times 100 = \frac{277 - 236.9}{277} \times 100 = 17\%$$

$$VR\% = \frac{E_a - V_t}{E_a} \times 100 = \frac{277 - 270.4}{277} \times 100 = 2.4\%$$

$$VR\% = \frac{E_a - V_t}{E_a} \times 100 = \frac{277 - 308.8}{277} \times 100 = -10.3\%$$

د) دقت شود مقاومت آرمیچر داده نشده بنابراین تلفات مسی استاتور صفر است.

$$P_{out} = 3V_{t-ph}I_{ph}\cos\varphi = 3\times 236.9\times 60\times 0.8 = 34100\ W$$
$$P_{in} = 34100 + 1500 + 1000 = 36600\ W$$
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}\times 100 = 93.2\%$$

ه)

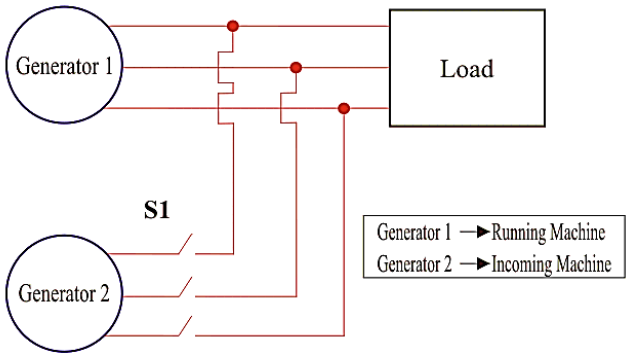
$$T_{turbine} = \frac{P_{in}}{\omega} \qquad \omega = \frac{2\pi\times 1200}{60} = 125.7\ rad/s \quad \Rightarrow \quad T_{turbine} = \frac{36600}{125.7} = 291.2\ N.m$$

بعد از اینکه تلفات گردشی و هسته از توان ورودی کم می‌شود توان فاصله هوایی بدست می‌آید که اگر بر سرعت تقسیم شود برابر با گشتاور الکترومغناطیسی یا القایی تولیدی ژنراتور خواهد شد.

$$P_{ag} = P_{in} - P_{rot} - P_c = 36600 - 1500 - 1000 = 34100\ W$$

$$T_{turbine} = \frac{34100}{125.7} = 271.3\ N.m$$

۵-۸- کارکرد موازی ژنراتورها



شکل (۶-۲۷): کارکرد موازی ژنراتورها

استفاده از مولدهای برق به‌صورت موازی به دلیل مزایای آن همواره موردتوجه بوده است که به‌صورت خلاصه این مزایا عبارت‌اند از:

۱- افزایش قابلیت اطمینان چون خرابی یکی از ژنراتورها باعث قطع تمام توان تولیدی نمی‌شود.
۲- تعمیر و نگهداری بدون خاموشی

۳- توسعه سیستم به دلیل رشد بار

۴- افزایش راندمان به علت بهره‌برداری در بار نامی و خاموش کردن واحدهای بی‌بار

۵- نیاز به واحدهای کوچک‌تر برای رزرو

اما برای موازی کردن ۲ ژنراتور باید شرایط زیر وجود داشته باشد.

۱- دامنه ولتاژ برابر

۲- فاز ولتاژ برابر

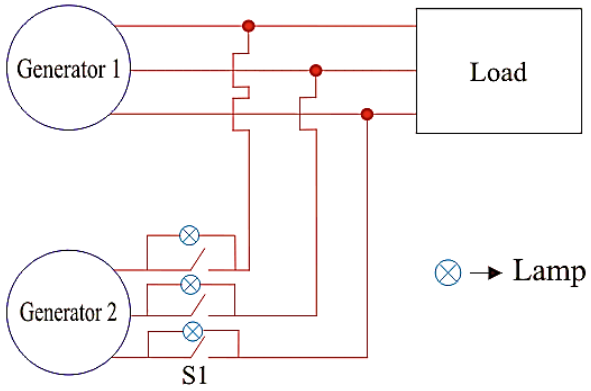
۳- برابر بودن توالی فازها

۴- برابر بودن فرکانس ژنراتورها

۵- برابری امپدانس معادل (این شرط ضروری نیست)

به‌منظور بررسی این شرایط برای کارکرد موازی دو ژنراتور وسایل اندازه‌گیری مختلف وجود دارد و اما یک روش قدیمی استفاده از روش سه لامپی و روش دیگر استفاده از سنکروسکوپ است.

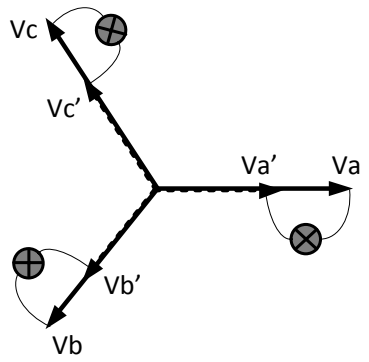
روش سه لامپی: در این روش لامپ‌ها بین فازهای هم نام دو مولد قرار می‌گیرند. زمانی که هر سه لامپ خاموش باشند ۴ شرط اول از شرایط بالا برقرار است. نکته اینکه در این روش لامپ‌ها باید توانایی تحمل ولتاژی به اندازه ۲ برابر ولتاژ مولدها را داشته باشند. در ادامه ۴ حالت مختلف که در هرکدام تنها یک شرط برقرار نیست بررسی خواهد شد و نشان داده خواهد شد که لامپ‌ها روشن و یا خاموش هستند. برای این منظور دو دسته فازور سه فاز رسم شده و جایی که اختلاف ولتاژ بین دو ولتاژ هم فاز وجود داشته باشد لامپ بین آن‌ها روشن خواهد شد.



شکل (۶-۲۸): روش سه لامپی

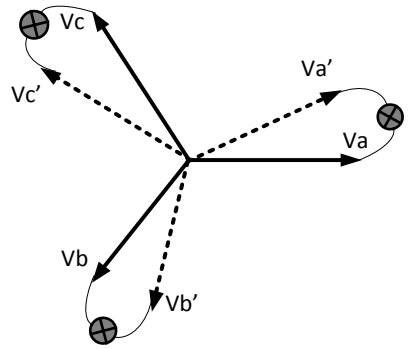
حالت ۱) فقط دامنه ولتاژها برابر نباشد.

طبق شکل مشاهده می‌شود اگر دامنه ولتاژها برابر نباشد بین دو سر همه لامپ‌ها اختلاف ولتاژ وجود دارد و همه روشن خواهند شد.



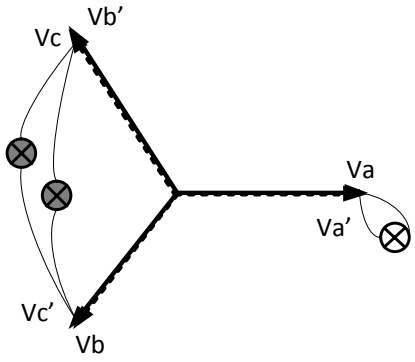
حالت ۲) فقط فاز ولتاژها برابر نباشد.

طبق شکل مشاهده می‌شود اگر فاز ولتاژها برابر نباشد بین دو سر همه لامپ‌ها اختلاف ولتاژ وجود دارد و همه روشن خواهند شد.



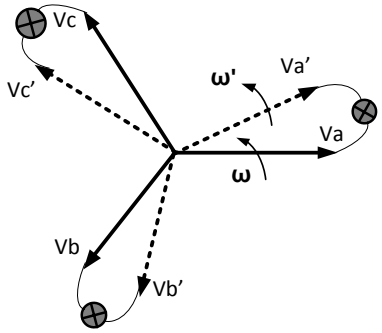
حالت ۳) فقط توالی فازها برابر نباشد.

طبق شکل مشاهده می‌شود اگر جای دو فاز در ۲ مولد یکسان نباشد (توالی منفی) بین دو لامپ اختلاف ولتاژی برابر با ولتاژ خط یعنی رادیکال سه برابر ولتاژ فاز وجود دارد و دو لامپ روشن خواهند شد.



حالت ۴) فقط فرکانس‌ها برابر نباشد.

طبق آنچه که در درس مدار الکتریکی ۱ گفته شد یک موج سینوسی را می‌توان با دامنه و فاز آن نشان داد که این دامنه و فاز یک بردار در صفحه مختلط می‌باشد که با سرعت ω در حال چرخش است. بنابراین دو موج سینوسی با فرکانس متفاوت دو بردار هستند که با سرعت‌های متفاوت در حال چرخش هستند. با این مقدمه در روش سه لامپی دو دسته بردار سه فاز وجود دارد که با سرعت مختلف در حال چرخش هستند و مدام فاز بین آن‌ها در حال تغییر است و فقط برای یک لحظه اندک که از روی هم می‌گذرند فاز بین آن‌ها صفر شده و لامپ‌ها خاموش می‌شوند وگرنه در سایر لحظات لامپ‌ها روشن هستند.



استفاده از سنکروسکوپ: سنکروسکوپ ساختمانی شبیه به یک موتور تکفاز دارد به‌طوری‌که استاتور آن به یک فاز شبکه و روتور آن به یک فاز مولد وصل می‌شود. هر وقت دو مولد هم فاز باشند میدان دوار تولیدی در سنکروسکوپ صفر است و سنکروسکوپ می‌ایستد چنانچه مولد شماره ۱ تندتر از مولد شماره ۲ در حال کار باشد زاویه فاز آن جلو می‌رود و عقربه در جهت ساعت‌گرد می‌چرخد و اگر کندتر باشد در جهت پادساعت‌گرد می‌چرخد.

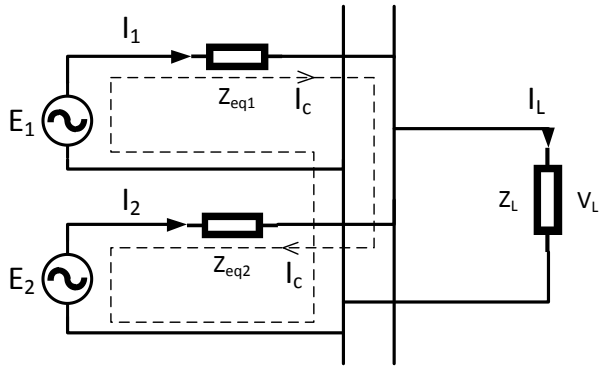
شکل (۶-۲۹): سنکروسکوپ

نکته: سنکروسکوپ نمی‌تواند توالی فاز را چک کند زیرا فقط به یک فاز وصل است.

نکته: حالت مطلوب در موازی کردن قرار گرفتن عقربه سنکروسکوپ نزدیک صفر و در سمت تند است چون مولدی که می‌خواهد به شبکه وصل شود باید در ابتدا به مقدار بسیار اندک فرکانس بیشتری داشته باشد تا به‌صورت بار (موتور) به شبکه متصل نشود.
پس از بررسی و تنظیم شرایط بالا می‌توانیم کلید را وصل کنیم تا ژنراتور با شبکه موازی شود و توان کمکی را به شبکه تزریق کند.

۵-۹- اتصال موازی دو ژنراتور سنکرون در صورت برابر نبودن شرایط ۵ گانه

اگر دو ژنراتور سنکرون با یکدیگر موازی شوند و طبق شکل زیر به بار متصل شده باشند، با استفاده از روابط KVL سهم جریان هر کدام محاسبه می‌شود. مشاهده می‌شود که هر کدام یک سهم به نسبت عکس امپدانس معادل خود از جریان بار را خواهند داشت. اما یک جریان گردشی به نام I_c به جریان یکی اضافه شده و از جریان دیگری کم می‌شود. این جریان با اختلاف ولتاژ دو ژنراتور رابطه مستقیم دارد. ژنراتوری که جریان گردشی به جریان آن اضافه می‌شود اگر در جریان نامی کار کرده باشد دچار اضافه جریان می‌شود و به ناچار باید ظرفیت خود را کم کند. که این کار باعث می‌شود نتوان از کل ظرفیت نصب شده استفاده کرد.



$$E_1 - Z_{eq1} * I_1 = V_L = E_2 - Z_{eq2} * I_2$$

$$E_1 - E_2 + Z_{eq2} * I_2 = Z_{eq1} * I_1 \Rightarrow \quad (+Z_{eq2} * I_1)$$

$$E_1 - E_2 + Z_{eq2}(I_2 + I_1) = I_1(Z_{eq1} + Z_{eq2}) \quad , \quad I_1 + I_2 = I_L$$

$$I_1 = \frac{Z_{eq2}}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} * I_L + \frac{E_1 - E_2}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} \qquad I_2 = \frac{Z_{eq1}}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} * I_L - \frac{E_1 - E_2}{Z_{eq1} + Z_{eq2}}$$

I_C جریان گردشی

ازآنجا که جریان گردشی با اختلاف ولتاژ دو ژنراتور رابطه مستقیم دارد هر کدام از ۴ حالت زیر باعث ایجاد این جریان گردشی می‌شوند. و شرط پنجم نیز باعث می‌شود توان به‌صورت مساوی بین ژنراتورها تقسیم نشود.

۱- **دامنه ولتاژ نابرابر**--- باعث ایجاد جریان گردشی می‌شود.

۲- **فاز ولتاژ نابرابر**--- اختلاف دو ولتاژ با فاز نابرابر صفر نیست بنابراین این حالت هم باعث ایجاد جریان گردشی می‌شود.

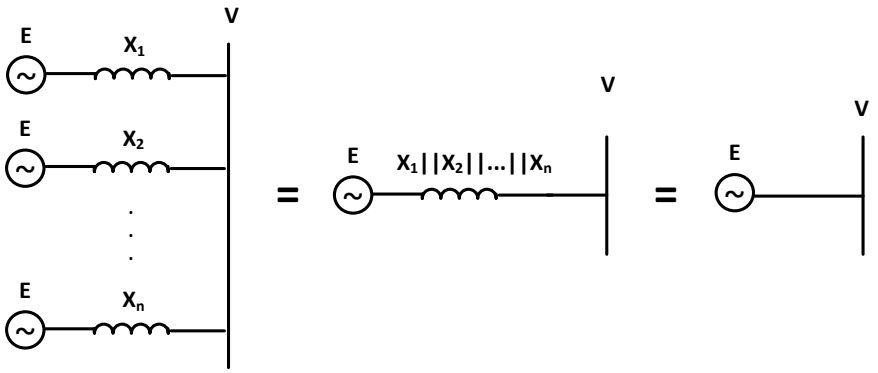
۳- **برابر نبودن توالی فازها**--- بین دو فاز به علت وجود اختلاف ولتاژ جریان گردشی بزرگی ایجاد می‌شود.

۴- **برابر نبودن فرکانس ژنراتورها**--- فاز بین ولتاژ دو ژنراتور مدام در حال تغییر است بنابراین جریان گردشی متغیری به وجود خواهد آمد.

۵- **برابر نبودن امپدانس معادل**--- جمله اول جریان هر ژنراتور به امپدانس‌ها وابسته است. اگر امپدانس‌ها با هم برابر نباشند جریان به نسبت عکس آن‌ها بین دو ژنراتور تقسیم می‌شود و ممکن است یکی دچار اضافه جریان شود.

- **کارکرد موازی n ژنراتور سنکرون و مفهوم باس بینهایت**

اگر n ژنراتور به یکدیگر متصل شوند و یک شبکه قدرت را برای تأمین بار تشکیل دهند، مدار معادل کل آن‌ها در صورت برابر بودن ولتاژ خروجی به‌صورت زیر خواهد شد. در این مدار معادل همه امپدانس‌ها با یکدیگر موازی شده و مقدار معادل آن‌ها به سمت صفر میل می‌کند. این مفهوم شبکه بینهایت را نشان می‌دهد. در شبکه بینهایت مقدار امپدانس تونن صفر بوده و تغییر جریان یا بار بر روی ولتاژ شبکه تأثیری نخواهد داشت چون افت ولتاژ به‌واسطه امپدانس صفر وجود ندارد.



شکل (۶-۳۰): شبکه بینهایت

از طرفی در کارکرد n ژنراتور در یک شبکه مقدار ممان اینرسی معادل کل به سمت بینهایت میل می‌کند. این بدان معنی است اگر یک ژنراتور دیگر به شبکه اضافه شود نمی‌تواند سرعت (فرکانس) شبکه را تغییر دهد، بلکه سرعت آن ژنراتور با شبکه سنکرون خواهد شد.

$$J_1\omega_1 + J_2\omega_2 + ...J_n\omega_n = (J_1 + J_2 + ... + J_n)\omega \Rightarrow \omega = \frac{J_1\omega_1 + J_2\omega_2 + ...J_n\omega_n}{J_1 + J_2 + ... + J_n}$$

$$J_{eq} = J_1 + J_2 + ... + J_n \to \infty$$

ژنراتوری که با سرعت ω' و J' به شبکه بینهایت اضافه می‌شود، فرکانس آن برابر با فرکانس شبکه خواهد شد:

$$J'\omega' + J_\infty\omega_\infty = (J' + J_\infty)\omega \Rightarrow \omega = \frac{J'\omega' + J_\infty\omega_\infty}{J' + J_\infty} \quad J_\infty \to \infty \quad \Rightarrow \omega = \omega_\infty$$

۵-۸- کارکرد موازی ژنراتورها تحت بار

اگر تمام شرایط پنج‌گانه گفته شده فراهم باشد و دو ژنراتور به یکدیگر متصل شوند بار بین آن‌ها تقسیم می‌شود. اما اگر بار افزایش یابد می‌توان سهم هرکدام از ژنراتورها را برای تأمین بار تغییر داد. این کار به مشخصه گاورنر (Governor) و در واقع سرعت عملکرد آن بستگی دارد.

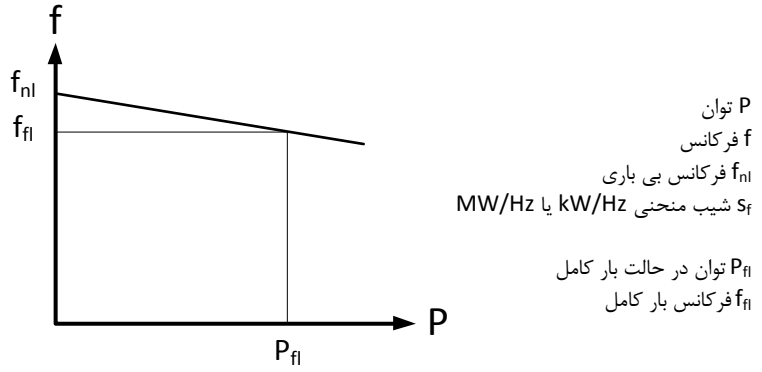
گاورنر: هر واحد نیروگاهی برای کنترل سرعت و قدرت خروجی به گاورنر برای تنظیم بخار، گاز و یا جریان آب ورودی به توربین، مجهز شده است. گاورنرها به ۳ دسته: مکانیکی، الکترومکانیکی و الکترونیکی تقسیم می‌شوند که در حال حاضر فقط از گاورنر الکترونیکی در نیروگاه‌های جدید استفاده می‌شود. گاورنرهای جدید دارای دو قسمت الکترونیکی و هیدرولیکی می‌باشند.

قسمت الکترونیکی گاورنر یک کنترل‌کننده الکترونیکی (معمولاً PID) حلقه بسته است که سیگنال‌های ورودی این کنترل‌کننده توان خروجی ژنراتور و موقعیت گیت‌های توربین است.

بر اساس سیگنال‌های ورودی فوق و پردازش آن‌ها در کنترل‌کننده PLC، سیگنال خروجی گاورنر الکترونیکی به شیر راهنما (Pilot valve) اعمال شده و با عملکرد این شیر، فشار و دبی لازم روغن برای حرکت سروو موتور و دریچه‌های توربین از طریق شیر کنترل اصلی گاورنر فراهم می‌گردد. در صورت بروز اشکال در گاورنر اصلی، کنترل سیستم به‌صورت خودکار، به گاورنر پشتیبان منتقل می‌شود.

ازآنجاکه با افزایش بار ژنراتور سرعت و به تبع آن فرکانس کاهش می‌یابد، مکانیزم گاورنر هر چه که باشد به‌صورتی عمل می‌کند که افت سرعت در اثر افزایش بار کم باشد که این کار را با تنظیم دریچه ورودی توربین انجام می‌دهد. بنابراین گاورنر دارای مشخصه‌ای به‌صورت زیر است:

$$P = s_f (f_{nl} - f)$$

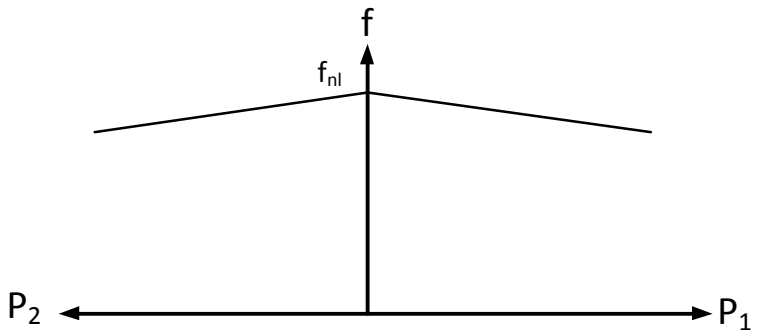


شکل (۶-۳۱): مشخصه گاورنر

نقطه تنظیم یا set point: نقطه تنظیم در واقع فرکانس بی‌باری یا f_{nl} است که توسط گاورنر تنظیم می‌شود و در حالت عملکرد ژنراتور به‌تنهایی فرکانس کاری را مشخص می‌کند. در حالت کارکرد موازی یک ژنراتور با ژنراتور دیگر یا شبکه با تغییر آن توان خروجی ژنراتور تغییر خواهد داشت.

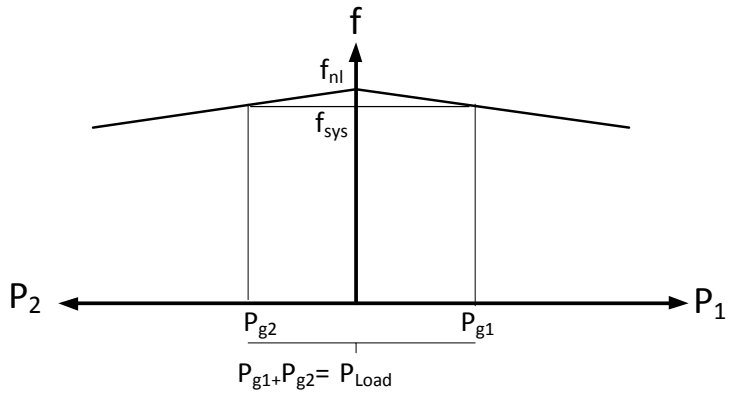
در کارکرد موازی دو ژنراتور مشخصه آن‌ها بر روی یک نمودار رسم شده و فرکانس کاری و توان هرکدام مشخص خواهد شد. در ادامه چند حالت مختلف کارکرد موازی دو ژنراتور با استفاده از مشخصه گاورنر آن‌ها بررسی خواهد شد.

حالت ۱) دو ژنراتور بدون بار و شرایط یکسان به یکدیگر متصل شده‌اند و نقطه تنظیم آن‌ها شبیه یکدیگر است.



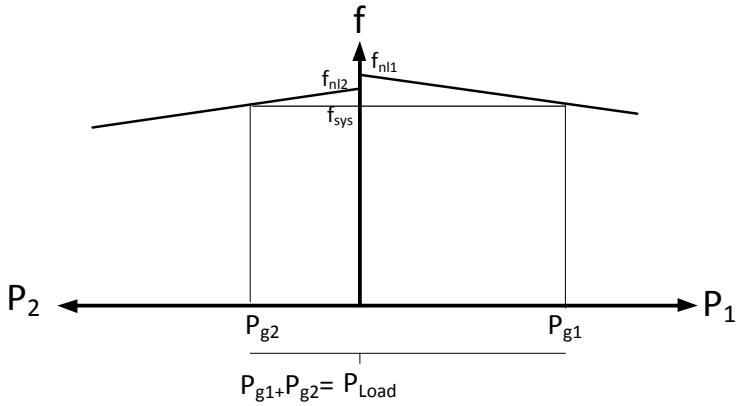
شکل (۶-۳۲): اتصال دو ژنراتور بی‌بار با مشخصه گاورنر یکسان

حالت ۲) دو ژنراتور مشابه به یک بار متصل شده‌اند، فرکانس کاری به f_{sys} کاهش می‌یابد. در این حالت جمع توان تولیدی دو ژنراتور برابر با توان بار است.



شکل (۶-۳۳): اتصال دو ژنراتور تحت بار با مشخصه گاورنر یکسان

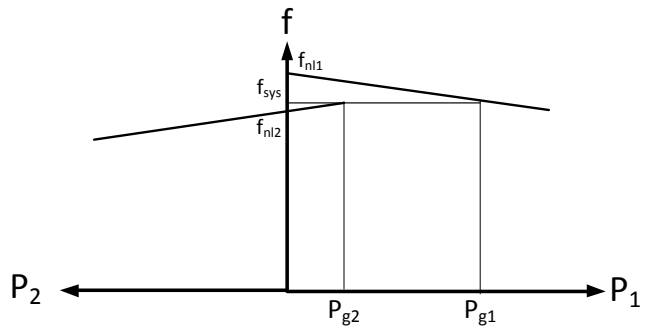
حالت ۳) میزان تولید هر ژنراتور با تغییر نقطه تنظیم (فرکانس بی‌باری) آن تغییر می‌کند. در این حالت فرکانس بی‌باری ژنراتور اول افزایش داده شده است و مشاهده می‌شود توان تولید آن نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۶-۳۴): اتصال دو ژنراتور تحت بار با ست پوینت غیر یکسان

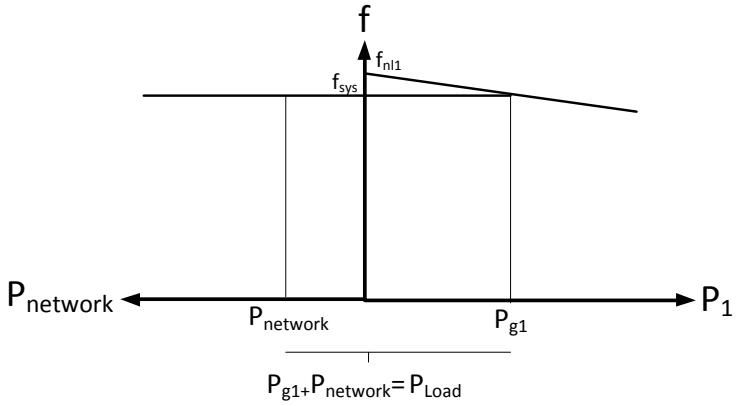
در شکل بالا با تغییر نقطه تنظیم ژنراتور اول تولید آن افزایش یافت و مجموع بار قابل تأمین نیز بیشتر شد. اما اگر بخواهیم در یک بار ثابت مقدار توان تولیدی یک ژنراتور را افزایش دهیم باید نقطه تنظیم آن را بیشتر کنیم و همزمان نقطه تنظیم دیگری را نیز کم کنیم که توان تولیدی آن کم شود. با این کار در یک بار ثابت تولید یک ژنراتور افزایش و تولید دیگری کاهش خواهد داشت و مجموع آن‌ها که بار است ثابت خواهد ماند. اگر نقاط تنظیم دو ژنراتور را همزمان افزایش دهیم سهم هر کدام ثابت و فرکانس سیستم افزایش می‌یابد. (شکل دو مورد اخیر به عهده خواننده)

حالت ۴) اگر نقطه تنظیم به‌درستی تعیین نشود ممکن است حالتی رخ دهد که یکی از ژنراتورها به شکل یک بار برای دیگر باشد. در این حالت مقدار توان تولیدی ژنراتور دوم به قسمت منفی خود رفته یعنی توان منفی دارد و مانند بار خواهد بود.



شکل (۶-۳۵): اتصال دو ژنراتور تحت بار با ست پوینت نامناسب برای یکی از آن‌ها

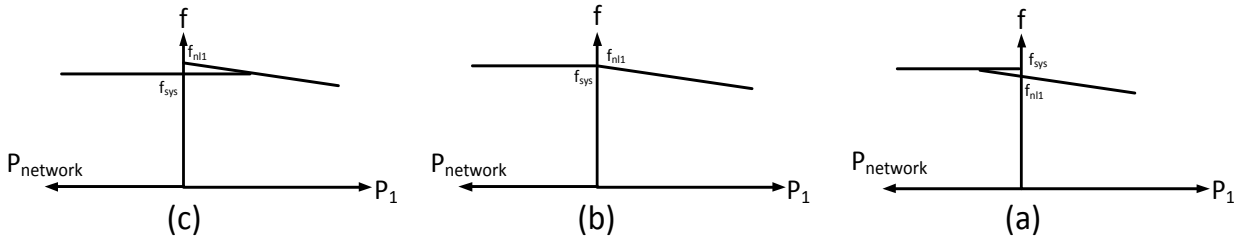
حالت ۵) ازآنجاکه یک شبکه دارای ممان اینرسی بینهایت است و فرکانس آن با تغییر بار تغییر نخواهد داشت، مشخصه آن به‌صورت خط افقی خواهد بود.



شکل (۶-۳۵): اتصال ژنراتور به شبکه بینهایت

- **اتصال یک ژنراتور به شبکه**

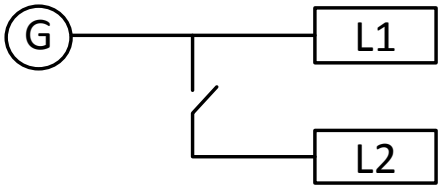
در لحظه اتصال یک ژنراتور به شبکه باید فرکانس آن اندکی بیشتر از فرکانس شبکه باشد. اگر فرکانس آن کمتر باشد مانند یک بار برای شبکه خواهد بود (شکل a). اگر فرکانس دقیقاً برابر باشد حالت کارکرد شناوری رخ خواهد داد(شکل b). اما اگر فرکانس به مقدار بسیار اندک بیشتر از شبکه باشد ژنراتور به‌عنوان مولد به شبکه اضافه می‌شود و در تولید نقش خواهد داشت و مقداری از بار مشترک را تأمین می‌کند(شکل c).



شکل (۶-۳۶): اتصال ژنراتور با ست پوینت متفاوت به شبکه بینهایت

نکته اینکه اگر فرکانس کمتر باشد رله‌های برگشت توان آن را از شبکه جدا می‌کنند و مانع عملکرد موتوری آن می‌شوند.

مثال ۴: یک ژنراتور در حال تغذیه باری با توان ۱۰۰۰ کیلو وات و ضریب توان ۰.۸ پس فاز است. فرکانس بی‌باری ژنراتور ۶۱ هرتز و شیب مشخصه گاورنر آن MW/Hz ۱ است. بار دومی توسط یک کلید با توات حقیقی ۸۰۰ کیلو وات و ضریب توان ۰.۷۰۷ پس فاز اضافه می‌شود.



۱- قبل از بستن کلید بار دوم فرکانس سیستم چقدر است؟

۲- بعد از بستن کلید بار دوم فرکانس سیستم چقدر است؟

۳- بعد از بستن کلید اپراتور چه کاری انجام دهد تا فرکانس ۶۰ هرتز شود؟

حل: نکته اینکه در فرمول گاورنر تنها توان اکتیو تأثیر دارد و ضریب توان مهم نیست.

۱- قبل از بستن کلید تنها بار ۱۰۰۰ کیلو وات یعنی ۱ مگا وات به ژنراتور وصل است

$$P = s_f(f_{nl} - f) \Rightarrow 1 = 1(61 - f) \Rightarrow f = 60 \ Hz$$

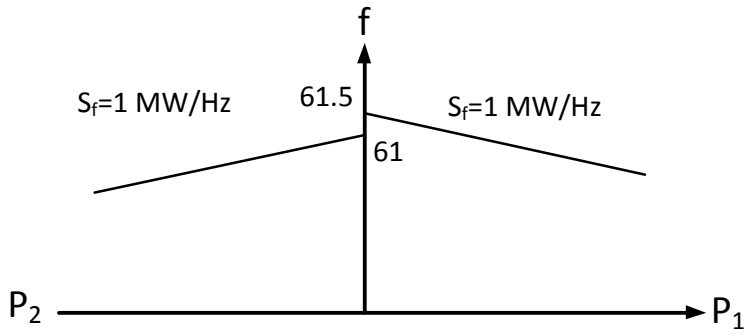
۲- بعد از بستن کلید بار ۸۰۰ کیلو وات یعنی ۰.۸ مگاوات به بار قبلی اضافه می‌شود.

$$P = s_f(f_{nl} - f) \Rightarrow 1 + 0.8 = 1(61 - f) \Rightarrow f = 59.2 \ Hz$$

۳- اپراتور می‌تواند نقطه تنظیم یا همان فرکانس بی‌باری را تغییر دهد. بنابراین

$$1.8 = 1(f_{nl} - 60) \Rightarrow f_{nl} = 61.8 \ Hz$$

مثال ۵: دو ژنراتور سنکرون به طور مشترک باری را تغذیه می‌کنند. این بار دارای توان ۲.۵ مگا وات با ضریب قدرت ۰.۸ پس فاز است. نمودار توان و فرکانس دو ژنراتور در شکل زیر نشان داده شده است.



۱- این سیستم در چه فرکانسی کار می‌کند؟

۲- فرض کنید یک بار ۱ مگاوات اضافه شود. فرکانس جدید چقدر می‌شود و ژنراتورها چه توانی تولید می‌کنند؟

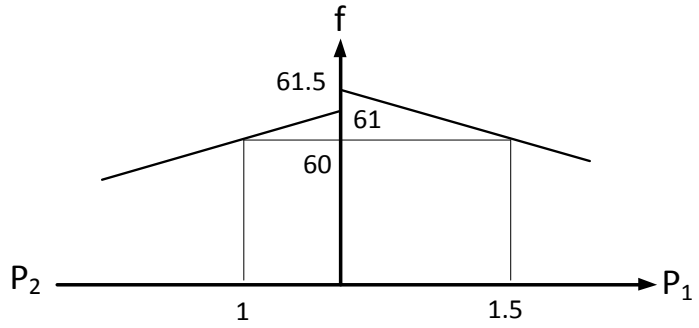
۳- با ترکیبی که در حالت ۲ بدست آمد اگر نقطه تنظیم ژنراتور دوم به میزان ۰.۵ هرتز زیاد شود فرکانس سیستم و توان ژنراتورها را بیابید.

حل:

۱-

$$P_1 = s_{f1}(f_{nl1} - f)$$
$$P_2 = s_{f2}(f_{nl2} - f)$$
$$P_1 + P_2 = P_{load} = 2.5 \Rightarrow 1(61.5 - f) + 1(61 - f) = 2500 \Rightarrow f = 60\ Hz$$

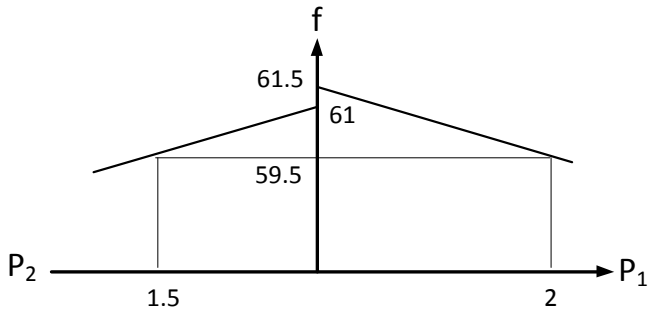
$$P_1 = s_{f1}(f_{nl1} - f) = 1(61.5 - 60) = 1.5\ MW$$
$$P_2 = s_{f2}(f_{nl2} - f) = 1(61 - 60) = 1\ MW$$



۲- بار به اندازه ۱ مگاوات افزایش یافته است

$$P_1 + P_2 = P_{load} = 2.5 + 1 = 3.5 \Rightarrow 1(61.5 - f) + 1(61 - f) = 3.5 \Rightarrow f = 59.5 \ Hz$$

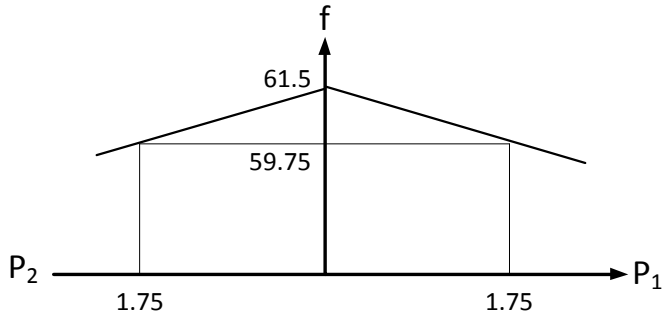
$$P_1 = s_{f1}(f_{nl1} - f) = 1(61.5 - 59.5) = 2 \ MW$$
$$P_2 = s_{f2}(f_{nl2} - f) = 1(61 - 59.5) = 1.5 \ MW$$



۳- $f_{nl2}=61.5$

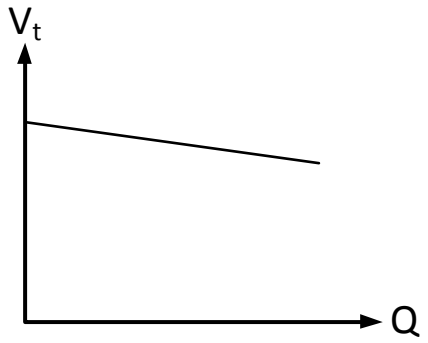
$$P_1 + P_2 = 3.5 \Rightarrow 1(61.5 - f) + 1(61.5 - f) = 3.5 \Rightarrow f = 59.75 \ Hz$$

$$P_1 = s_{f1}(f_{nl1} - f) = 1(61.5 - 59.75) = 1.75 \ MW$$
$$P_2 = s_{f2}(f_{nl2} - f) = 1(61.5 - 59.75) = 1.75 \ MW$$



- **مشخصه تنظیم‌کننده ولتاژ و توان راکتیو**

شبیه مشخصه گاورنر که بر روی فرکانس و توان اکتیو تأثیر دارد، مشخصه تنظیم‌کننده خودکار (AVR) نیز به‌صورت خطی مانند شکل زیر در نظر گرفته می‌شود که با افزایش توان راکتیو مصرفی ولتاژ افت می‌کند. AVR در واقع از اندازه ولتاژ نمونه گرفته و برای کنترل ولتاژ، مدار تحریک را تنظیم می‌کند.



شکل (۶-۳۷): مشخصه ولتاژ توان راکتیو مشابه مشخصه گاورنر

۵-۹- مشخصه‌های ماشین سنکرون

علاوه بر مشخصه‌های گفته شده مانند مشخصه بی‌باری، مشخصه گاورنر و AVR چند مشخصه مهم دیگر در مورد ماشین سنکرون وجود دارد که در این قسمت به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۵-۹-۲- منحنی قابلیت ماشین سنکرون Capability Curve

در شرایط کار ماندگار به طور معمول ولتاژ ترمینال، جریان تحریک، جریان استاتور (جریان بار)، ضریب توان، قدرت اکتیو و راکتیو، زاویه قدرت و گشتاور تولیدی از مهم‌ترین کمیت‌های ماشین هستند. بدیهی است که هر یک از کمیت‌ها دارای محدودیت‌هایی هستند. محدودیت‌های گفته شده در منحنی قابلیت ماشین سنکرون نشان داده می‌شوند.

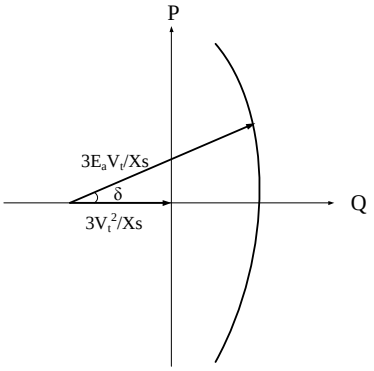
۱- **حد جریان تحریک:** برای افزایش ولتاژ القایی، جریان تحریک افزایش داده می‌شود. اما عبور جریان تحریک با محدودیت‌های حرارتی سیم‌پیچ روتور مواجه است. بنابراین برای جریان تحریک یک مقدار حداکثر وجود خواهد داشت. به ازای این جریان تحریک حداکثر، یک ولتاژ القایی حداکثر وجود خواهد داشت. بنابراین حد جریان روتور متناسب با $E_{a\text{-}max}$ است که یک دایره به مرکز حد پایداری توان در ماشین سنکرون و شعاعی متناسب با $E_{a\text{-}max}$ است.

$$P = 3\frac{E_a V_t}{X_s}\sin\delta \qquad \Rightarrow \sin\delta = \frac{P}{3E_a V_t / X_s}$$

$$Q = 3V_t\frac{E_a\cos\delta - V_t}{X_s} \qquad \Rightarrow \cos\delta = \frac{Q + V_t^2 / X_s}{3E_a V_t / X_s}$$

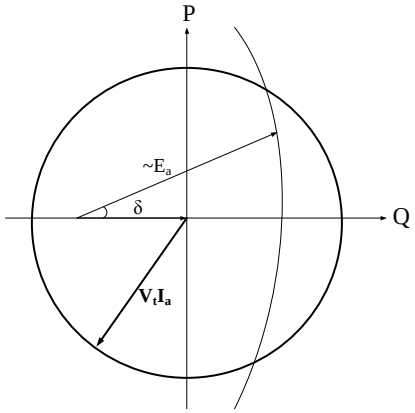
$$\sin^2\delta+\cos^2\delta=1\Rightarrow P^2+(Q+3\frac{V_t^2}{X_s})^2=(3\frac{E_aV_t}{X_s})^2$$

یعنی یک دایره به مرکز $(0\ ,\ 3V_t^2/X_s)$ و شعاع $3V_tE_a/X_s$ در صفحه توان اکتیو و راکتیو خواهیم داشت. با فرض ثابت بودن ولتاژ ترمینال اگر مقادیر را بر $3V_t/X_s$ که مقدار ثابتی است تقسیم کنیم به دیاگرام فازوری می‌رسیم و شعاع دایره متناسب با E_a یعنی در واقع جریان تحریک است.



۲- **حد جریان استاتور (توان ظاهری):** برای اندازه توان ظاهری ماشین (S) نیز مقدار ماکزیمم وجود دارد که توسط ولتاژ ترمینال و جریان خط طبق رابطه $S=VI^*$ مشخص می‌شود. ولتاژ ترمینال بر اساس قدرت عایقی سیم‌پیچ استاتور تعیین می‌شود و جریان خط نیز به مقطع سیم‌پیچ استاتور یعنی محدودیت حرارتی آن وابسته است. با توجه به رابطه زیر محدودیت توان ظاهری در صفحه توان اکتیو و راکتیو به‌صورت یک دایره خواهد که مرکز آن مبدأ و شعاع آن متناسب با VI است. اگر مقدار V ثابت فرض شود شعاع دایره دقیقاً متناسب با جریان خط یا همان جریان استاتور است.

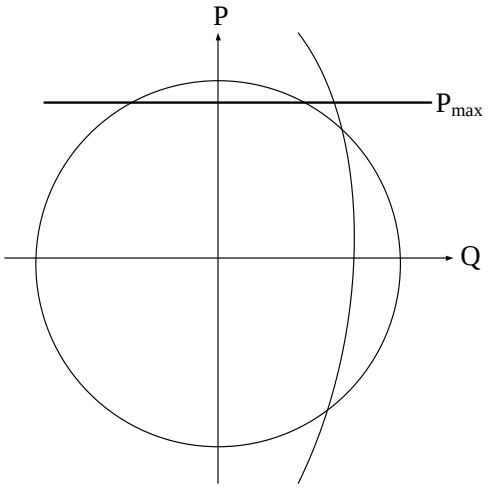
$$S=VI=P-jQ\Rightarrow|S|=|VI|=\sqrt{P^2+Q^2}$$



۳- **حد توان اکتیو**: از نظر تولید توان اکتیو نیز دو محدودیت وجود دارد. محدودیت اول ماکزیمم توان مکانیکی توسط توربین است. یعنی ماشین قادر به تولید توان اکتیو بیشتر از آنچه توربین به محور روتور وارد می‌کند نیست. محدودیت دوم حد پایداری استاتیکی ماشین است، یعنی اگر توربین بتواند بدون محدودیت توان به ماشین وارد کند از نظر پایداری طبق رابطه زیر ماشین نمی‌تواند از یک مقدار بیشتر انرژی الکتریکی تولید کند. محدودیت اول با یک خط افقی در شکل نشان داده شده است.

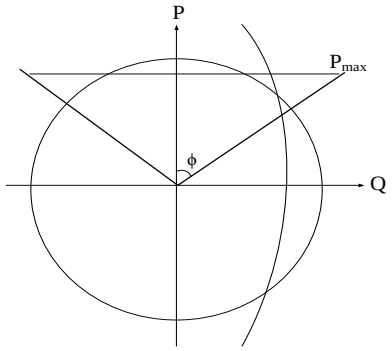
$$P = 3\frac{E_a V_t}{X_s}\sin\delta$$ حد پایداری استاتیکی

نکته: بهتر است ماشین در شرایط خود تحریک باشد که پایداری استاتیک افزایش یابد. یعنی ماشین می‌تواند برای تأمین توان اکتیو معین چون ولتاژ القایی بالاتر است زاویه گشتاور کوچک‌تر داشته باشد.

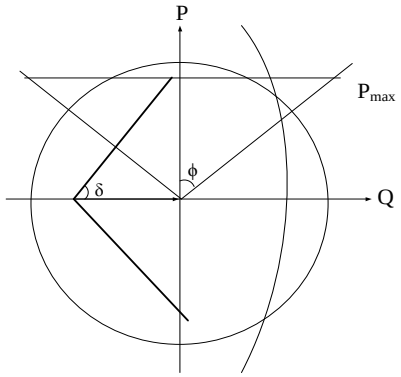


۴- **حد ضریب توان**: از نظر ضریب توان نیز محدودیت وجود دارد. زیرا برای تولید توان راکتیو که با افزایش ولتاژ انجام می‌شود. یعنی اگر ولتاژ در حداکثر خود باشد و جریان نامی نباشد در این شرایط نمی‌توان ضریب توان را کاهش داد (افزایش توان راکتیو با افزایش ولتاژ) زیرا محدودیت ولتاژ نقض می‌شود. با توجه به رابطه بین P و Q که به‌صورت زیر است، زاویه فاز ϕ که تانژانت آن نسبت توان راکتیو به اکتیو است (ضلع مقابل یعنی Q به ضلع مجاور یعنی P) به‌صورت زیر بر روی شکل مشخص می‌شود که یک محدودیت دیگر را نشان می‌دهد.

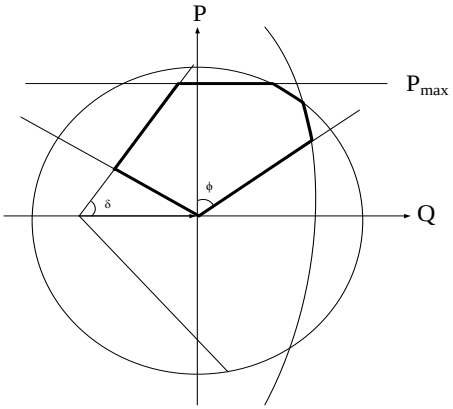
$$\tan\varphi = \frac{Q}{P}$$



۵- **حد زاویه گشتاور**: ماشین سنکرون نباید در زوایای بزرگ گشتاور کار کند زیرا به حد پایداری خود که ۹۰ درجه است نزدیک می‌شود. بنابراین نهایتاً زاویه ۶۰ درجه به‌عنوان ماکزیمم زاویه گشتاور در نظر گرفته می‌شود تا در صورت نوسان تا ۳۰ درجه ماشین پایدار بماند.



درنهایت منحنی قابلیت از اشتراک همه این محدودیت‌ها بدست می‌آید. چون همه آن‌ها باید توأمان برآورده شوند که به‌صورت زیر خواهد بود



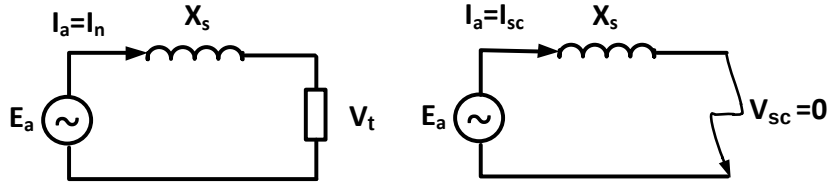
شکل (۶-۳۹): مشخصه قابلیت

نکته: چون ژنراتور نمی‌تواند توان اکتیو منفی داشته باشد معمولاً قسمت زیر نمودار هم جز منحنی قابلیت نیست.

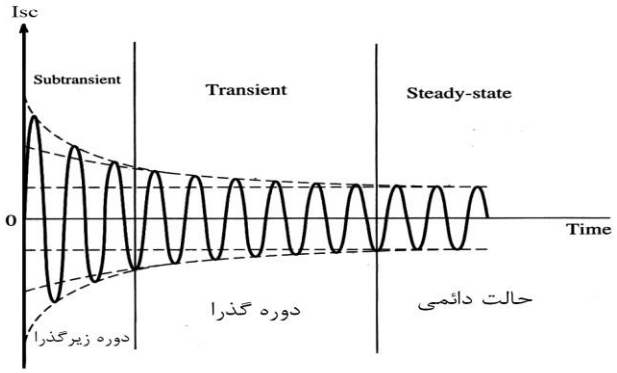
۵-۹- حالت گذرا در ماشین سنکرون

مواردی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفت در حالت کار دائمی ماشین سنکرون بوده که همه کمیت‌ها به مقدار ماندگار خود رسیده‌اند. اما در سیستم قدرت یک تغییر در ورودی توان در ماشین سنکرون و یا تغییرات دیگر مانند تغییر بار و خصوصاً اتصال کوتاه شرایط ماندگار را به هم زده و رفتار ماشین در لحظات اولیه این تغییرات متفاوت خواهد بود که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اگر از مقاومت مدار آرمیچر ماشین سنکرون صرف‌نظر شود و مدار معادل آن به‌صورت زیر تنها یک سلف داشته باشد، انتظار داریم در زمان اتصال کوتاه جریان اتصالی که به‌مراتب از جریان حالت کار دائمی ماشین بزرگ‌تر است از آن عبور کند. یعنی جریان اتصال کوتاه $\mathbf{I_{sc}}$ یک جریان سینوسی با دامنه‌ای بسیار بیشتر از جریان حالت دائمی $\mathbf{I_n}$ است.



اما در ماشین سنکرون مقدار جریان خطا در لحظات اولیه اتصالی حتی از جریان اتصال کوتاه $\mathbf{I_{sc}}$ نیز بزرگ‌تر است که علت آن رفتار سیم‌پیچ‌های این نوع ماشین است. شکل زیر جریان اتصال کوتاه را نشان می‌دهد که شامل سه دوره زیر گذرا، گذرا و حالت دائمی است که علت هر کدام در ادامه تشریح می‌شود.



شکل (۶-۴۵): شکل موج جریان آرمیچر در لحظه اتصال کوتاه تا رسیدن به جریان خطای حالت ماندگار

دوره زیر گذرا: در این دوره اتصال کوتاه باعث می‌شود سرعت روتور تغییر کرده و درنتیجه در سیم‌پیچ‌های دمپر (در قسمت بعدی توضیح داده خواهد شد) جریان القا شود که این جریان مانند تحریک عمل کرده و ولتاژ داخلی Ea را افزایش می‌دهد که نتیجه آن افزایش جریان اتصال کوتاه است. مدت زمان این دوره به ثابت زمانی مدار دمپر T'' وابسته است و معمولاً کوچک بوده و ۲-۳ سیکل طول می‌کشد. در دوره زیر گذار بیشترین جریان اتصال کوتاه را خواهیم داشت که حدود ۱۰ برابر جریان اتصال کوتاه حالت دائمی خواهد بود و با $I_{sc}^{''}$ نشان داده می‌شود.

دوره گذرا: در این دوره اتصال کوتاه باعث می‌شود در سیم‌پیچ‌های تحریک جریان القا شود که این جریان ولتاژ داخلی Ea را افزایش می‌دهد که نتیجه آن افزایش جریان اتصال کوتاه است. مدت زمان این دوره به ثابت زمانی مدار تحریک T' وابسته است و معمولاً ۱۰-۱۵ سیکل طول می‌کشد. در دوره گذار جریان اتصال کوتاه از حالت زیر گذرا کمتر است که حدود ۵ برابر جریان اتصال کوتاه حالت دائمی خواهد بود و با $I_{sc}^{'}$ نشان داده می‌شود.

حالت دائمی اتصال کوتاه: در این حالت افزایش جریان به‌واسطه افزایش تحریک در مدار دمپر و تحریک بر طرف شده و تنها جریان اتصال کوتاه حالت ماندگار تا زمان رفع خطا باقی می‌ماند و با I_{sc} نشان داده می‌شود.

همان‌طور که گفته شد علت افزایش ۲ مرحله‌ای جریان اتصال کوتاه تا قبل از رسیدن به مقدار ماندگار افزایش تحریک و ولتاژ القایی است. می‌توان این افزایش ولتاژ القایی را با کاهش راکتانس عکس‌العمل آرمیچر و یا راکتانس سنکرون مدل کرد. به‌عبارت‌دیگر ولتاژ القایی در هر دوره ثابت فرض می‌شود و در دوره زیر گذار راکتانس معادل آن یعنی $X_s^{''}$ کمترین مقدار را دارد. بعد از آن $X_s^{'}$ را خواهیم داشت که کمتر خواهد بود و درنهایت X_s که همان مقدار واقعی راکتانس سنکرون است.

$$X_s^{''} = \frac{E_a}{I_{sc}^{''}}$$

$$X_s^{'} = \frac{E_a}{I_{sc}^{'}} \qquad X_s^{''} < X_s^{'} < X_s \qquad I_{sc}^{''} > I_{sc}^{'} > I_{sc}$$

$$X_s = \frac{E_a}{I_{sc}}$$

بنابراین در هر دوره برای محاسبات از راکتانس معادل آن استفاده می‌شود. X_s'' راکتانس زیر گذرا، X_s' راکتانس گذرا و X_s راکتانس حالت دائمی است. مقدار جریان‌های زیر گذرا و گذرا برای تنظیم رله‌های حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

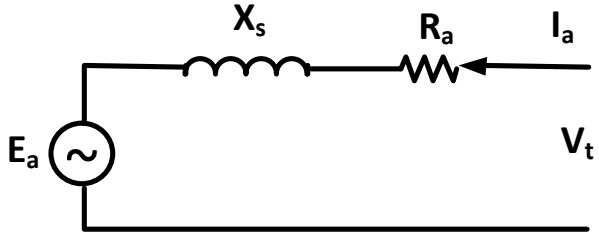
نکته: در ماشین قطب برجسته، همان‌طور که گفته شد در زمان اتصال کوتاه تنها راکتانس محور d را خواهیم داشت یعنی $X_s = X_d$ است. بنابراین در محاسبات از مقادیر راکتانس این محور در دوره‌های زیر گذرا، گذرا و حالت دائمی استفاده می‌کنیم.

$$X_d'' < X_d' < X_d$$

۵-۱۱- موتور سنکرون

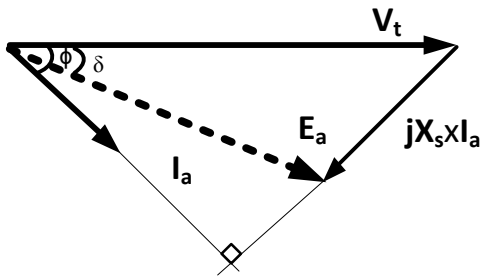
ساختمان موتور سنکرون مانند ژنراتور سنکرون است و تفاوت آن‌ها معکوس بودن جهت توان انتقالی بوده یعنی موتور سنکرون توان الکتریکی می‌گیرد و توان مکانیکی تحویل می‌دهد. بنابراین جهت جریان استاتور نیز عکس حالت ژنراتوری است. مدار معادل موتور سنکرون در شکل زیر نشان داده شده است.

$$V_t = E_a + jX_s I_a + R_a I_a$$



شکل (۶-۴۶): مدار معادل موتور سنکرون

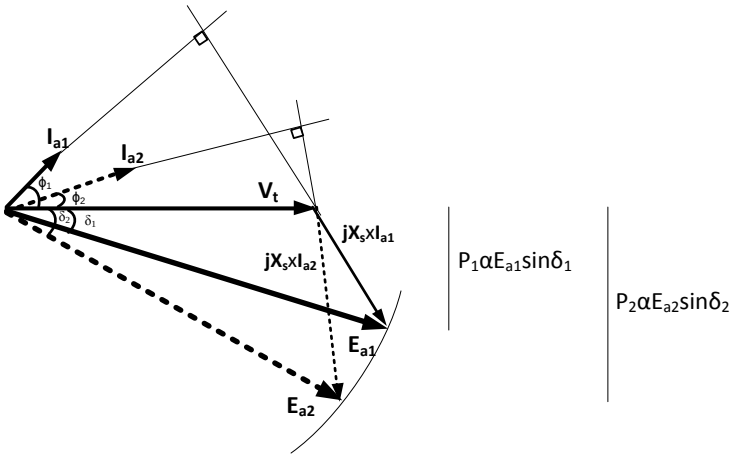
با استفاده از مدار معادل و KVL حاکم بر آن نمودار فازوری رسم شده است. مشاهده می‌شود که مقدار زاویه δ منفی شده یعنی ولتاژ القایی عقب‌تر از ولتاژ ترمینال است. به‌عبارت‌دیگر، میدان روتور عقب‌تر میدان استاتور است و توان اکتیو دارای علامتی مخالف حالت ژنراتوری می‌باشد، چون به جای تحویل توان، مصرف توان خواهیم داشت.



موارد استفاده، مزیت‌ها و معایب: موتور سنکرون در توان‌های بالای ۱ مگاوات گزینه مناسب‌تری نسبت به موتورهای القایی است. این موتور همان‌طور که در ادامه گفته می‌شود می‌تواند حتی توان راکتیو تولید کند درصورتی‌که موتور القایی همیشه توان راکتیو مصرف می‌کند، بنابراین می‌تواند برای تصحیح ضریب توان به کار گرفته شود. نسبت به موتورهای القایی بیشتر قابل کنترل است. اما از معایب آن این است که تنها در یک سرعت که سرعت سنکرون باشد کار می‌کند (البته تغییر اندک مشکلی ندارد) و گشتاور راه‌اندازی ندارد.

۵-۱۱-۱- اثر تغییر بار مکانیکی بر موتور سنکرون

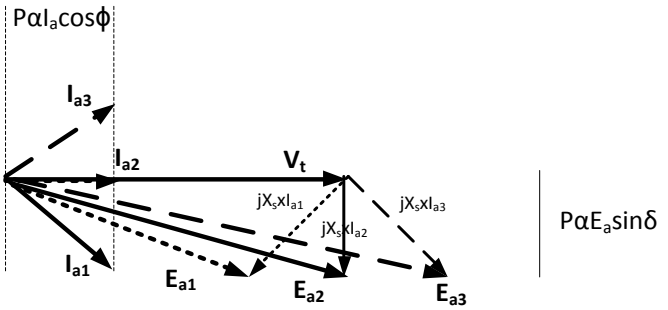
اگر بار مکانیکی روی محور موتور سنکرون افزایش یابد، روتور کند می‌شود و با کند شدن آن زاویه بین میدان روتور و استاتور یعنی δ افزایش می‌یابد. با افزایش این زاویه طبق رابطه $T=-KB_sB_r\sin\delta$ گشتاور القایی افزایش می‌یابد. افزایش گشتاور القایی جریان بیشتری از منبع گرفته و سرعت را افزایش می‌دهد و موتور باز هم به سرعت اولیه خود یعنی سرعت سنکرون می‌رسد اما این بار با زاویه δ بزرگ‌تر کار می‌کند. در شکل زیر نمودار فازوری تغییر بار در موتور سنکرون با صرف‌نظر از مقاومت آرمیچر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار E_a با افزایش بار ثابت می‌ماند چون تنها به جریان تحریک I_f وابسته است. با افزایش بار موتور توان اکتیو یا متناظر با آن $E_a\sin\delta$ زیاد می‌شود. اما چون V_t به منبع متصل است و ثابت است و X_s هم مقدار ثابتی دارد بنابراین برای برقراری KVL باید I_a افزایش یابد که به تبع آن jX_sI_a زیاد شود و بردار E_a را به V_t وصل کند. علاوه بر این مقدار زاویه ϕ نیز تغییر می‌کند. شکل زیر برای بار پیش فاز رسم شده است.



شکل (۶-۴۷): اثر تغییر بار مکانیکی بر موتور سنکرون

۵-۱۱-۲- اثر تغییر جریان تحریک I_f بر موتور سنکرون

افزایش جریان تحریک ولتاژ القایی را افزایش می‌دهد اما بر روی توان اکتیو تأثیری ندارد، زیرا که توان اکتیو تنها وقتی تغییر می‌کند که بار مکانیکی تغییر کرده باشد و به تبع آن جریان آرمیچر تغییر کند. بنابراین در دیاگرام فازوری فواصل متناسب با توان اکتیو یعنی $E_a \sin\delta$ و $I_a \cos\phi$ باید ثابت بماند. برای بررسی تغییر جریان تحریک فرض می‌شود موتور در حال کار به‌صورت پس فاز است. اگر جریان تحریک افزایش یابد E_a زیاد می‌شود و چون جمع آن با افت ولتاژ jX_sI_a برابر V_t است گه ثابت بوده، مقدری جریان کم می‌شود و از درجه پس فازی آن کم می‌شود تا جایی که زاویه صفر با ولتاژ پیدا کند(E_{a2} , I_{a2}). با افزایش بیشتر جریان تحریک E_a بزرگ‌تر شده و جریان نیز پیش فاز می‌شود(E_{a3} , I_{a3}). بنابراین با افزایش جریان تحریک مقدار توان اکتیو ثابت ماند اما حالا کار موتور از پس فاز به پیش فاز تغییر کرد. یعنی موتور سنکرون هم می‌تواند Q مصرف کند و هم تولید کند علی‌رغم اینکه همیشه P مصرف می‌کند. لازم به ذکر است که V_t با توجه به اینکه به منبع متصل است همیشه ثابت می‌ماند.

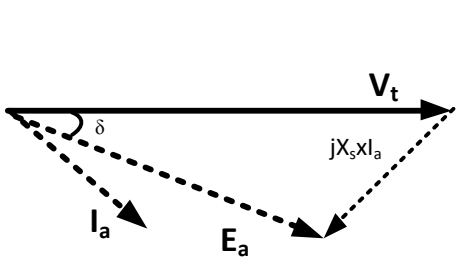


شکل (۶-۴۸): اثر تغییر جریان تحریک I_f بر موتور سنکرون

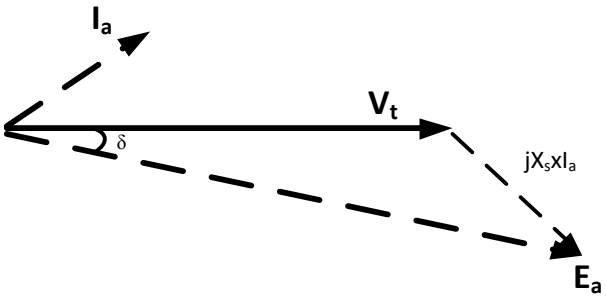
بنابراین:

۱- اگر $E_a\cos\delta > V_t$ جریان پیش فاز و موتور Q تولید می‌کند.

۲- اگر $E_a\cos\delta < V_t$ جریان پس فاز و موتور Q مصرف می‌کند.



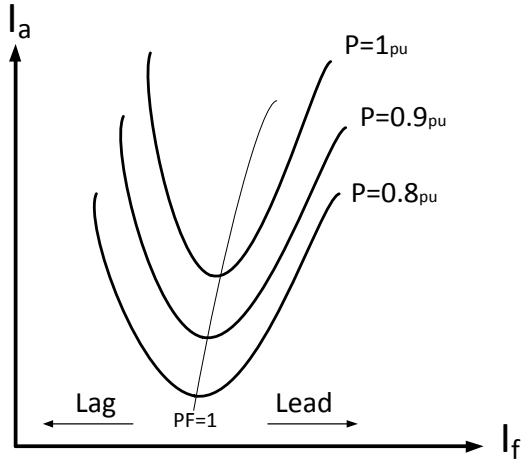
$V_t > E_a\cos\delta$



$V_t < E_a\cos\delta$

۵-۱۱-۳- منحنی‌های V شکل موتور سنکرون

اگر تغییرات جریان آرمیچر را برحسب جریان تحریک رسم کنیم منحنی حاصل می‌شود که به علت شباهت آن به حرف V منحنی V شکل نامیده می‌شود. این منحنی‌ها برای توان اکتیو مختلف مشابه هستند فقط کمی جابجا می‌شوند. مشاهده می‌شود حداقل جریان آرمیچر در ضریب توان ۱ رخ می‌دهد چون هیچ‌گونه توان راکتیوی رد و بدل نمی‌شود. این قضیه در دیاگرام فازوری تغییر جریان تحریک نیز دیده می‌شود.



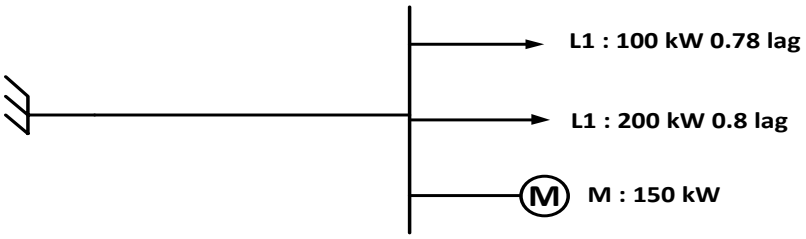
شکل (۶-۴۹): منحنی‌های V شکل موتور سنکرون

۵-۱۱-۴- کندانسور سنکرون

به موتور سنکرونی که در حالت بی‌بار استفاده می‌شود، کندانسور سنکرون گفته می‌شود. همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد، با تغییر جریان تحریک می‌توان حالت عملکرد موتور سنکرون را از پیش فاز به پس فاز و یا بالعکس تغییر داد. بنابراین برای کنترل توان راکتیو در یک منطقه از این موتور می‌توان استفاده کرد. به این صورت که در زمان کمبود Q با افزایش I_f موتور به حالت فوق تحریک رفته و توان راکتیو تولید می‌کند. توسط خازن نیز می‌توان توان راکتیو به‌صورت محلی تولید کرد اما کندانسور سنکرون به‌صورت پیوسته توان راکتیو را کنترل می‌کند بر عکس خازن که به‌صورت گسسته و پله‌ای این کار را انجام می‌دهد چون خازن‌های یک بانک خازنی به ترتیب وارد مدار می‌شوند. بنابراین کندانسور سنکرون اصلاح ضریب توان را انجام می‌دهد و تلفات خط نیز به‌واسطه تأمین محلی توان راکتیو در محل بار کاهش می‌یابد.

مثال: یک موتور سنکرون و ۲ بار مانند شکل زیر توس یک خط انتقال به باس بی‌نهایت ۴۸۰ ولت وصل شده‌اند.

۱- اگر موتور سنکرون دارای ضریب توان ۰.۸۵ پس فاز باشد جریان خط انتقال چقدر است؟
۲- اگر موتور سنکرون دارای ضریب توان ۰.۸۵ پیش فاز باشد جریان خط انتقال چقدر است؟
۳- اگر تلفات خط انتقال $P_{Loss}=3I_L^2R_L$ باشد، تلفات خط در دو حالت قبل را با هم مقایسه کنید.



حل:

۱-

$$Q_{L1} = P_1 \tan\varphi_1 = 100 \tan\cos^{-1} 0.87 = 80.2 \quad kVar$$

$$Q_{L1} = P_1 \tan\varphi_1 = 100 \tan\cos^{-1} 0.87 = 150 \quad kVar$$

$$Q_M = P_M \tan\varphi = 150 \tan\cos^{-1} 0.85 = 93 \quad kVar$$

$$P_{tot} = 100 + 200 + 150 = 450 \quad kW$$

$$Q_{tot} = 80.2 + 150 + 93 = 323.2 \quad kVar$$

$$PF = \cos\varphi = \cos\tan^{-1}\frac{Q}{P} = \cos\tan^{-1}\frac{323.2}{450} = 0.812$$

$$I = \frac{P_{tot}}{\sqrt{3}V_L\cos\varphi} = \frac{450}{\sqrt{3}(480)(0.812)} = 667 \quad A$$

۲- توان اکتیو و راکتیو بارها تغییر نکرده فقط توان راکتیو موتور در حالت دوم تغییر می‌کند:

$$Q_M = P_M\tan\varphi = 150\tan(-\cos^{-1}0.85) = -93 \quad kVar$$

$$P_{tot} = 100 + 200 + 150 = 450 \quad kW$$

$$Q_{tot} = 80.2 + 150 + -93 = 137.2 \quad kVar$$

$$PF = \cos\varphi = \cos\tan^{-1}\frac{Q}{P} = 0.957$$

$$I = \frac{P_{tot}}{\sqrt{3}V_L\cos\varphi} = \frac{450}{\sqrt{3}(480)(0.957)} = 566 \quad A$$

۳-

$$P_{Loss1} = 3I^2R_L = 3(667)^2 = 1344700R_L$$

$$P_{Loss2} = 3I^2R_L = 3(566)^2 = 961070R_L$$

توان حقیقی ثابت بوده اما جریان در حالت دوم به علت ضریب توان بهتر کمتر بوده که تلفات کمتر را نتیجه می‌دهد.

۵-۱۳- روش‌های راه‌اندازی موتور سنکرون

از سه روش زیر برای راه‌اندازی موتور سنکرون می‌توان استفاده نمود.

۱- کاهش سرعت میدان استاتور

فرکانس منبع را کاهش داده تا سرعت میدان استاتور کم شود. با این کار میدان استاتور کندتر شده و روتور فرصت کافی برای شتاب گرفتن و قفل شدن با میدان استاتور را خواهد داشت. کاهش فرکانس توسط ادوات الکترونیک قدرت انجام می‌شود. که از فرکانس کمتر از ۱ هرتز شروع شده و سپس افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با کاهش فرکانس طبق رابطه $E_a=k\phi\omega$ مقدار ω کم شده و درنهایت ولتاژ القایی نیز کم می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از افزایش جریان I_a طبق رابطه زیر باید ولتاژ منبع نیز با فرکانس تغییر کند یعنی نسبت آن‌ها ثابت باشد.

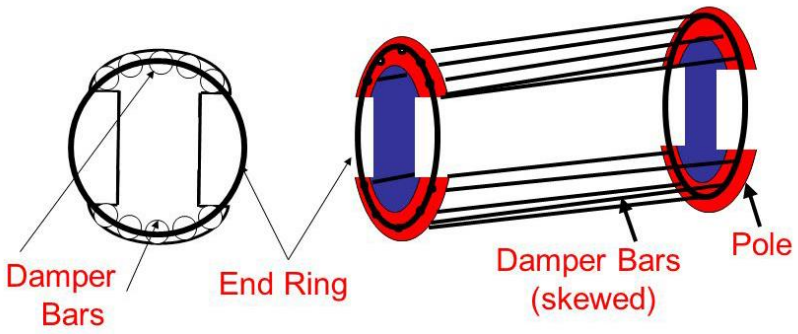
$$I_a = \frac{V_t - E_a}{jX_s} \qquad \frac{V_t}{f} = cte$$

۲- راه‌اندازی توسط گرداننده اولیه

در این روش موتور سنکرون به‌وسیله یک موتور دیگر چرخانده می‌شود. موتور راه‌انداز کافی است بر لختی روتور غلبه کند، بنابراین موتور کوچکی است. چون بیشتر موتورهای سنکرون سیستم تحریک بدون جاروبک دارند که روی محور آن‌ها سوار است، می‌توان از این ماشین‌های تحریک به‌عنوان موتور راه‌انداز استفاده کرد.

۳- راه‌اندازی با استفاده از سیم‌پیچ‌های میرایی

یکی از متداول‌ترین روش‌های راه‌اندازی موتور سنکرون است. این سیم‌پیچ‌ها در شیارهایی در رخ روتور طبق شکل زیر تعبیه شده‌اند و درنهایت اتصال کوتاه می‌شوند.



شکل (۶-۵۱): روتور ماشین سنکرون به همراه سیم‌پیچ دمپر

- **اثر سیم‌پیچ‌های میرایی بر پایداری ماشین سنکرون**

با افزودن سیم‌پیچ‌های میرایی در واقع یک تیر و دو نشان می‌زنیم. زیرا پایداری ماشین نیز بهبود می‌یابد. اگر روتور با سرعت سنکرون بچرخد در این سیم‌پیچ‌ها به علا اینکه میدان استاتور نیز با سرعت سنکرون می‌چرخد هیچ جریانی القا نمی‌شود. اما اگر سرعت روتور کم شود جریان القاشده که گشتاوری در جهت افزایش سرعت روتور ایجاد می‌کند. همچنین اگر سرعت روتور زیاد شود باز هم جریانی ایجاد می‌شود که این بار گشتاور مخالف ایجاد می‌کند که سرعت روتور را کاهش دهد. بنابراین تغییرات اندک را این سیم‌پیچ‌ها از بین می‌برند و پایداری را بهبود می‌دهند.