ماشین های الکتریکی III

عبدالخالق حمیدی

مراجع

۱- جزوه درسی

۲- کتاب های:

ترجمه: دکتر عابدی و مهندس نبوی P.C. Sen

ترجمه: دکتر فیض S.J. Chapman

ترجمه: دکتر لساني G.R. Slemon

ترجمه: دکتر سلطاني و دکتر لساني P.S. Bimbhra

سر فصل مطالب

۱- ماشین سنکرون شامل: مقدمه، ساختمان ماشین، ژنراتور سنکرون روتـور استوانه ای، مدار معادل ماشین سنکرون، دیاگرام (نمودار) فازوری ماشین سنکرون، مکان هندسی توان مختلط، کنتـرل ضـریب تـوان، ژنراتورهـای سنکرون مـستقل، ماشـین هـای سـنکرون قطـب برجـسته، کـار مـوازی ژنراتورهای AC

۲- ترانسفورماتور سه فاز شامل: مقدمه، انواع ترانسفورماتورهای سـه فـاز از نظر ساختمان، سیرتکاملی‌ترانسفورماتورهای‌سـه‌فـاز هـسته ای، انـواع اتصالات در ترانسفورماتورهای سه فاز، گروه برداری، تأثیر جهت پلاریته و توالی فاز، موازی کردن ترانسفورماتورهای سه فاز، پدیـده تحریـک در ترانسفورماتور، هارمونیک ها و اثر آنها در تراسفورماتور سه فاز

فصل اول: ماشین های سنکرون

مقدمه:

ماشین های سنکرون تحت سرعت ثابتی به نام چرخند و جزء سرعت سنکرون می ماشین های جریان متناوب (AC) محسوب می شوند. در این ماشین ها بر خلاف ماشین های القایی (آسنکرون)، میدان گردان فاصله هوایی و روتور با یک سرعت که همان سرعت سنکرون است می چرخند. ماشین های سنکرون سه فاز بر دو نوع هستند:

۱- ژنراتورهای سنکرون سه فاز یا آلترناتورها

۲- موتورهای سنکرون سه فاز

امروزه ژنراتورهای سنکرون سه فاز ستون فقرات شبکه های برق را در جهان تشکیل می دهند و ژنراتورهای عظیم در نیروگاه ها وظیفه تولید انرژی الکتریکی را به دوش می کشند و بزرگترین ماشین های الکتریکی محسوب می شوند. بزرگ‌ترین‌قدرت نامی آلترناتورهای سه فاز تاکنون 1700 MW است.

فصل اول: ماشین های سنکرون

ساختمان ماشین:

ماشین های سنکرون سه فـاز اعـم از ژنراتـور و موتـور جـزء ماشـین هـای دو تحریکـه (Doubly Excited) محسوب می شوند، زیرا سیم پیچ روتور آنها توسـط منبـع DC تغذیه گشته و از استاتور آنها جریان AC می گذرد. به سـیم پـیچ روتـور، سـیم پـیچ میدان و به سیم پیچ استاتور، سیم پیچ آرمیچر گفته می شود. (بر خلاف ماشـین هـای DC)

ساختمان ژنراتور سنکرون و موتور سنکرون سه فاز شـبیه یکـدیگر اسـت. شـار شـکاف هوایی در این ماشین ها منتجه (برآیند) شارهای حاصـله از جریـان روتـور و جریـان استاتور می باشد. در ماشین های القایی تنها عامـل تحریـک کننـده، جریـان اسـتاتور محسوب می شد، زیرا جریان روتور بر اثر عمل القاء پدید مـی آمـد. لـذا موتورهـای القایی همواره در حالت پس فاز مورد بهره برداری قرار می گیرند، زیرا به جریان پس فاز راکتیوی نیاز داریم تا شار در ماشین حاصل شـود. امـا در ماشـین هـای سـنکرون (موتور) اگر مدار تحریک روتور، تحریک لازم را فراهم سازد، استاتور جریان راکتیـو نخواهد کشید و ماشین در حالت ضریب توان واحد کار خواهد کرد.

اگر جریان تحریک روتور کاهش یابد، جریان راکتیو از شبکه به ماشین جاری می شود تا به روتور جهت مغناطیس کنندگی ماشین کمک کند. در این صورت ماشین سنکرون (موتور) در حالت پس فاز کار خواهد کرد. اگر جریان تحریک روتور زیاد شود، جریان راکتیو پیش فاز از شبکه کشیده می شود تا با میدان روتور به مخالفت برخیزد. در این صورت ماشین درحالت کار پیش فازی خواهد بود و توان راکتیو به شبکه تحویل می دهد. بنابراین می توان با تنظیم جریان تحریک (مدار روتور) که جریان DC است، ضریب توان ماشین سنکرون سه فاز را کنترل نمود. بنابراین یکی از مزایای عمده ماشین های سنکرون این است که می توانند از شبکه توان راکتیو دریافت و یا به شبکه توان راکتیو تزریق کنند.

استاتور

ساختار استاتور در ماشین های سنکرون مانند استاتور در ماشین های القایی است؛ یعنی سیم پیچی گسترده (توزیع شده) سه فاز با گام کوتاه

فصل اول: ماشین های سنکرون

روتور

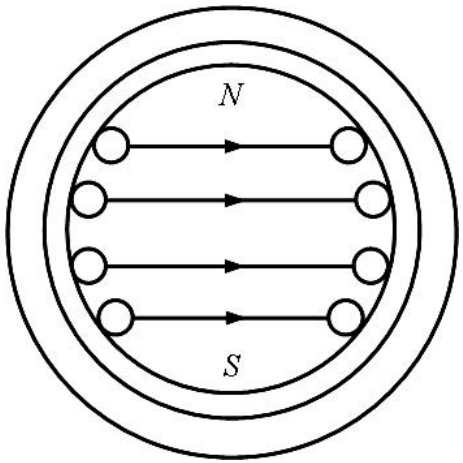
تحریک روتور (از طریق حلقه های لغزان) DC است و در نتیجه میدان متناظر با روتور نسبت به روتور ساکن است.

انواع روتور

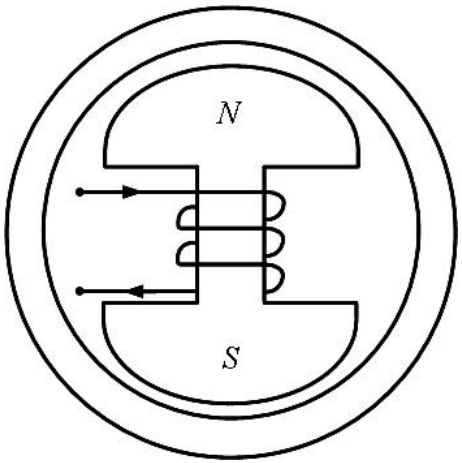
قطب صاف یا استوانه ای: Cylindrical or non salient rotor: فاصله هوایی یکنواخت، معمولاً قطر کم و طول زیاد، معمولاً در کاربردهای با سرعت بالا (نیروگاه های بخاری)

قطب برجسته: Salient pole rotor: فاصله هوایی غیر یکنواخت، معمولاً قطر زیاد و طول کم، معمولاً در کاربردهای با سرعت پایین (نیروگاه های آبی)

روتور قطب صاف



روتور قطب برجسته



n_s : سرعت سنکرون (rps) یا سرعت روتور در حالت پایدار و دائمی $n_S = \frac{2}{P} f_S$

P : تعداد کل قطب ها

f_s : فرکانس تغذیه استاتور

بالعکس و $n_S \rightarrow P \uparrow \rightarrow n_S$ در فرکانس ثابت : $f_S = \frac{P}{2}$

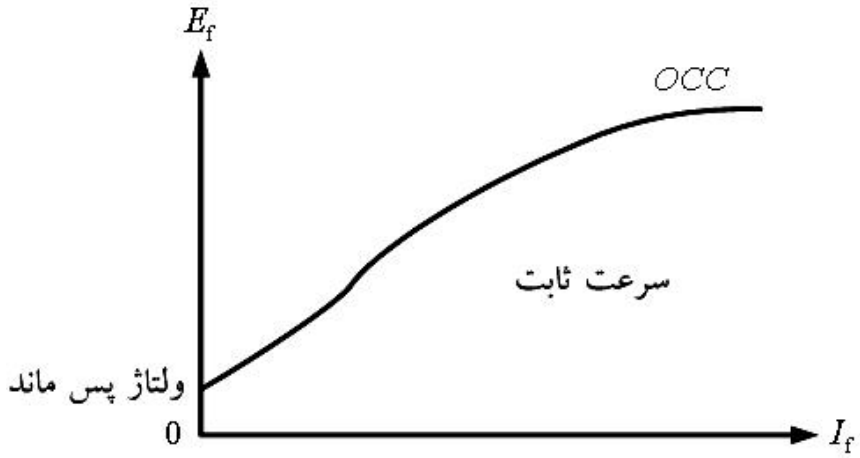
ژنراتور سنکرون روتور استوانه ای

فرض می کنیم که با عبور جریان DC (I_f) از سیم پیچی تحریک (روتور) شاری با توزیع سینوسی در شکاف (فاصله) هوایی ایجاد شود. حال اگر روتور توسط محرک اولیه مثل موتور دیزل یا توربین یا موتور DC چرخانده شود، یک میدان گردان در فاصله هوایی حاصل می شود (میدان تحریک). این میدان در سیم پیچی های سه فاز آرمیچر ولتاژ القاء می کند. این ولتاژها از نظر دامنه یکسان، اما با هم 120 الکتریکی اختلاف فاز دارند. با علامت E_f مشخص می شوند و به نام های ولتاژ القاء شده، ولتاژ تولید شده، ولتاژ داخلی و ولتاژ تحریک معروفند. همان طور که می دانیم رابطه emf ایجاد شده به صورت زیر است:

$$E_f = 4.44 f_s N_s K_{W_s} \varphi_f \ , \ N_{se} = N_s K_{W_s} \ , \ f_s = \frac{P}{2} n_s \Rightarrow E_f \alpha \ n_s \varphi_f \ , \ \varphi_f \alpha \ I_f \Rightarrow E_f \alpha \ n_s I_f$$

شار تحریک

بنابراین می توان منحنی مغناطیس شوندگی ژنراتور سنکرون را در حالت مدار باز و در سرعت ثابت محرک اولیه و با تغییر I_f از مقدار صفر تا مقدار نامی به دست آورد. این منحنی به مشخصه مدار باز یا OCC (Open Circuit Characteristic) معروف است:

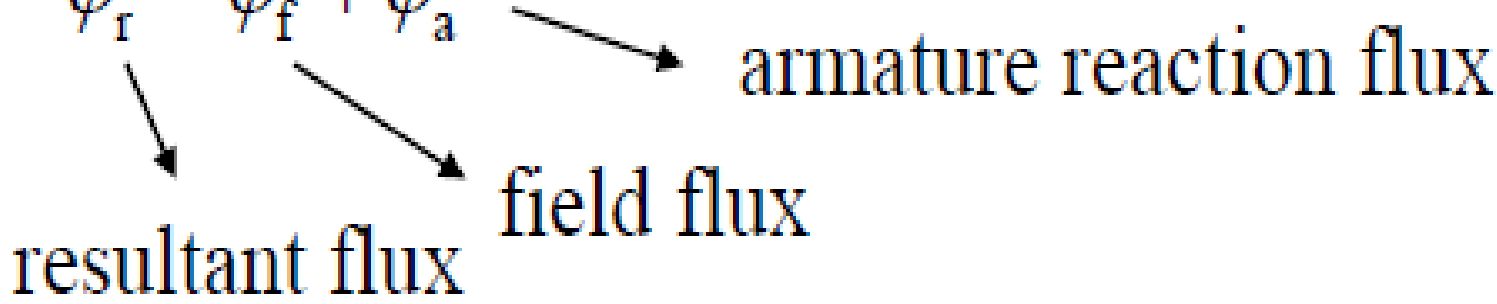


در ابتدا تغییرات E_f بر حسب I_f خطی است، اما با زیاد شدن I_f ، $_f$ دیگر با I_f رابطه خطی ندارد. (مسأله اشباع)

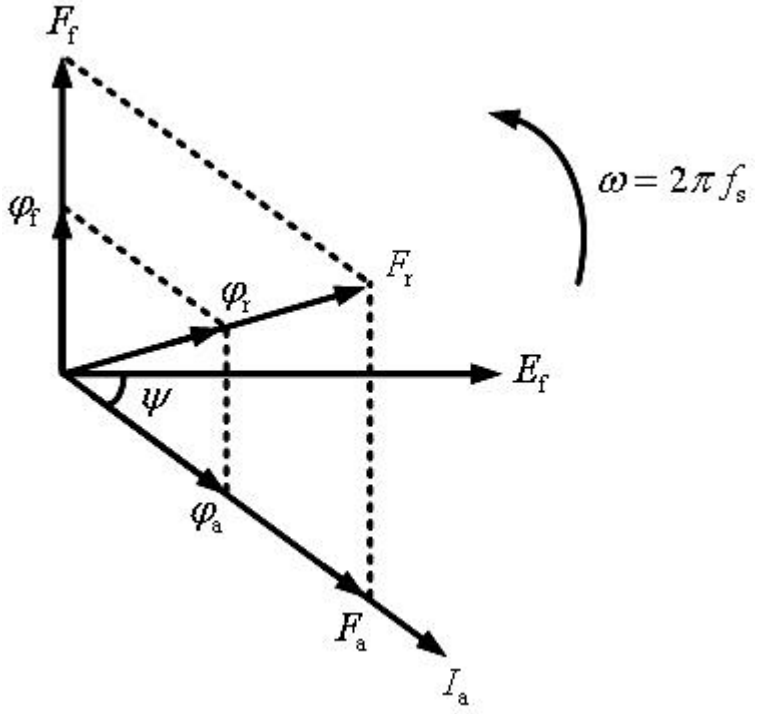
بنابراین در حالت بی باری یعنی در حالتی که بار به پایانه های استاتور وصل نباشد، می توان E_f را که معادل ولتاژ پایانه ژنراتور است با ولتمتر اندازه گیری کرده و OCC را به دست آورد.

حال اگر پایانه های استاتور ژنراتور سنکرون به بار سه فاز متصل شود، جریان های I_a ، I_b و I_c برقرار می گردد. فرکانس این جریان ها با E_f یکسان است. این سه جریان نیز یک میدان گردان (چرخشی) در شکاف هوایی پدید می آورند. لذا منتجه شار در شکاف هوایی از مجموع دو شار گردان روتور و استاتور حاصل می گردد. سرعت چرخش این دو شار یکسان بوده و همان سرعت سنکرون است. شار حاصله توسط جریان تحریک (I_f) را با $_f$ و شار حاصله توسط جریان استاتور را که به شار عکس العمل آرمیچر معروف است با a نمایش می دهیم:

$$\overline{\varphi}_r = \overline{\varphi}_f + \overline{\varphi}_a$$



فصل اول: ماشین های سنکرون



نمودار فازوری فضایی:

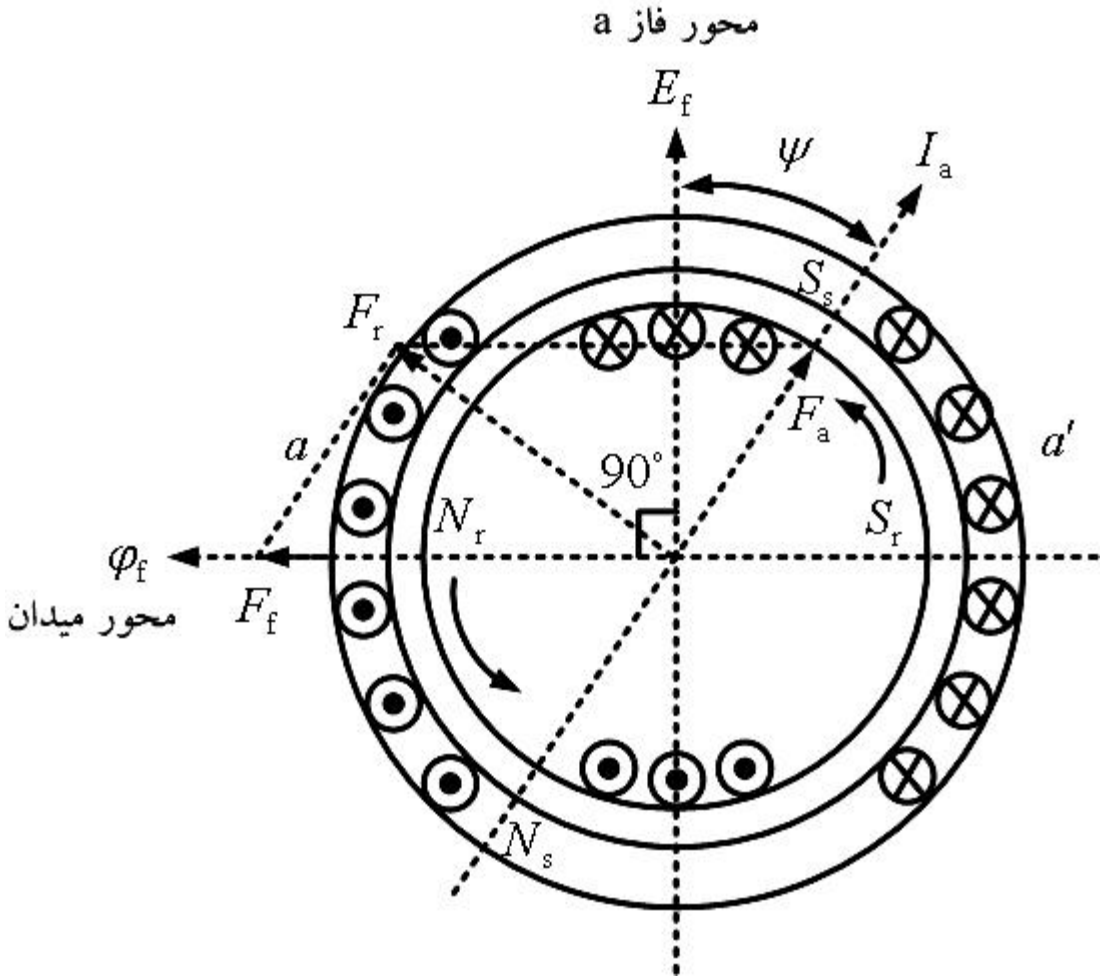
E_f به خاطرقانون فارادی

به اندازه ۹۰ درجه از Q_f

–

عقب تر است

فصل اول: ماشین های سنکرون



مدار معادل ماشین سنکرون (ژنراتور)

شار φ_a از دو بخش تشکیل شده است:

۱- شار φ_{al} یا شار نشتی که فقط سیم پیچی استاتور را دور می زند و در بر می گیرد. در واقع سیم پیچ تحریک روتور را در بر نمی گیرد.

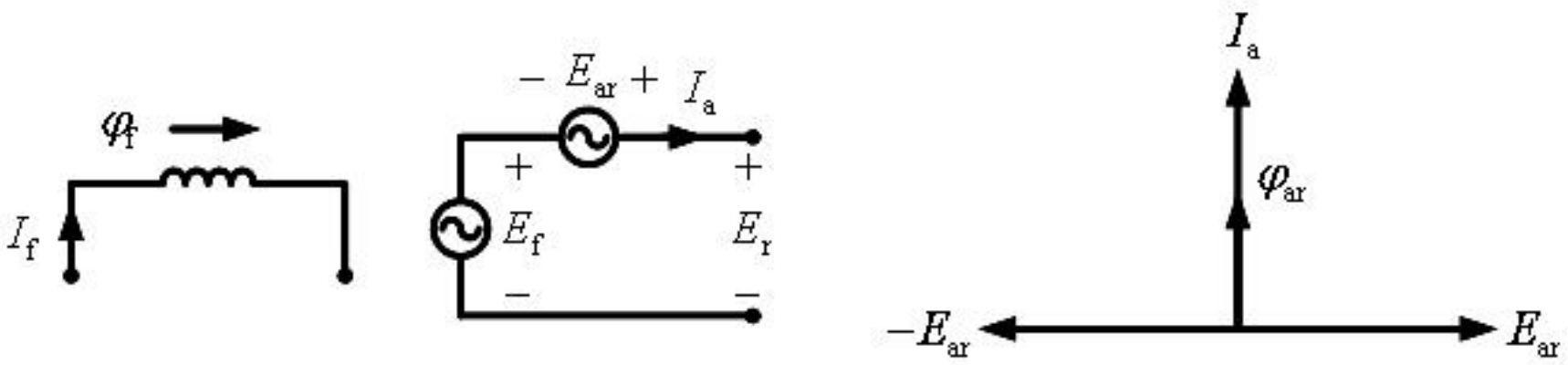
۲- شار φ_{ar} که به شار عکس العمل آرمیچر موسوم بوده و در شکاف هوایی شکل می گیرد و سیم پیچ تحریک روتور را نیز در بر می گیرد.

شار φ_{ar} بخش اعظم شار φ_a و φ_{al} بخش کوچکی از شار φ_a را تشکیل می دهد. لذا شار منتجه در شکاف هوایی (φ_r) از دو مؤلفه تشکیل شده است:

۱- شار φ_f به خاطر میدان روتور

۲- شار φ_{ar} به خاطر عکس العمل آرمیچر

شار φ_f در استاتور ولتاژ E_f را القاء می کند و φ_{ar} نیز در استاتور ولتاژی به نام E_{ar} القاء می کند. منتجه دو ولتاژ القایی E_f و E_{ar} به نام ولتاژ منتجه معروف است که با E_r نمایش داده می شود. به عبارت دیگر E_r توسط شار منتجه φ_r حاصل شده است. به E_r علاوه بر لفظ ولتاژ منتجه، ولتاژ شکاف یا فاصله هوایی نیز گفته می شود.



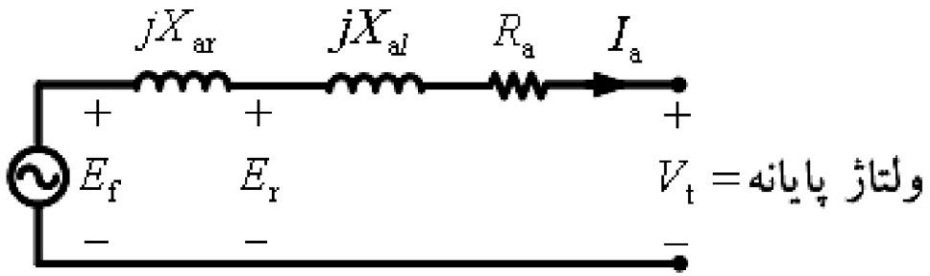
$$E_r = E_f + E_{ar} \rightarrow E_f = E_r + (-E_{ar})$$

ولتاژ E_{ar} از شار $_{ar}$ یا I_a به میزان 90 عقب تر است و یا I_a به میزان 90 از E_{ar}–عقب تـر است. لذا در رابطه فوق ولتاژ E_{ar}– را می توان با افت ولتاژ دو سر یک راکتانس به نام X_{ar}به ازاء عبور جریان I_a مدل نمود:

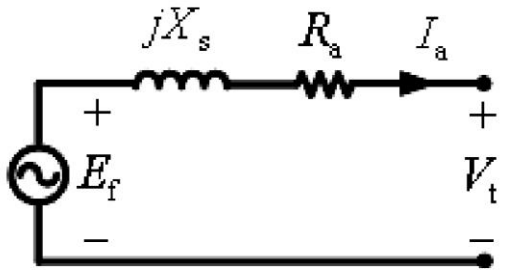
$$-E_{ar} = jX_{ar} I_a \rightarrow E_f = E_r + jX_{ar} I_a$$

راکتانس X_{ar} به راکتانس عکس العمل آرمیچر یا راکتانس مغناطیس کنندگی معروف است.

اگر مقاومت استاتور و راکتانس نشتی X_{al} برای مدل سازی شار نشتی به مدار معادل اضافه شود، خواهیم داشت:



مدار معادل فاز a ژنراتور سنکرون سه فاز



مدار معادل فاز a ژنراتور سنکرون سه فاز

$Z_s = R_a + jX_s$: امپدانس سنکرون ، $X_s = X_{ar} + X_{al}$: راکتانس سنکرون

$$\bar{E}_f = \bar{V}_t + \bar{Z}_s \bar{I}_a = \bar{V}_t + R_a \bar{I}_a + jX_s \bar{I}_a$$

و یا:

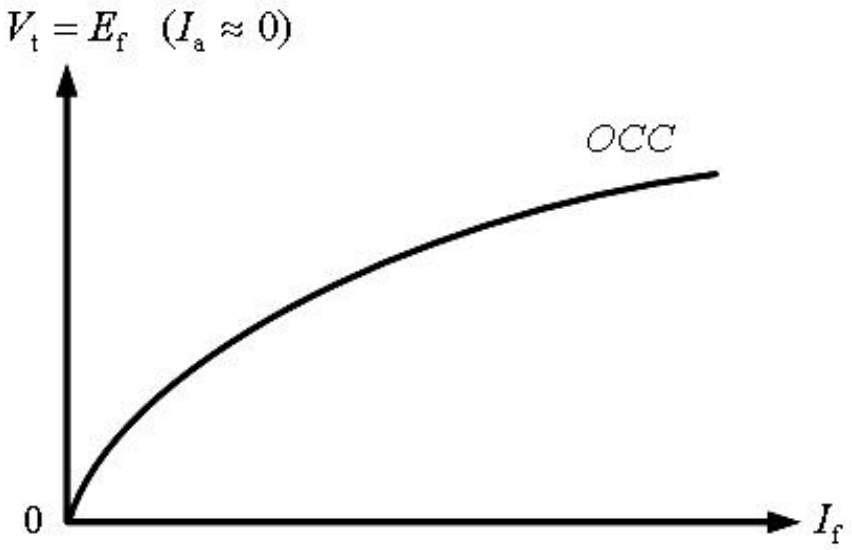
$$\bar{V}_t = \bar{E}_f - \bar{Z}_a \bar{I}_a = \bar{E}_f - R_a \bar{I}_a - jX_s \bar{I}_a$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

آزمایش مدار باز ژنراتور سنکرون

شرایط آزمایش: ترمینال های ماشین باز و سرعت محـرک اولیـه (prime mover) برابـر سرعت سنکرون

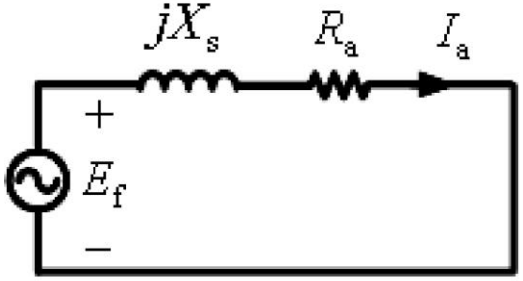
در این آزمایش با زیاد کردن I_f وارد ناحیه اشباع می شویم. تلفات ورودی شامل تلفـات مکانیکی (که ثابت است) و تلفات هسته (که وابسته به ولتاژ است) می باشد.

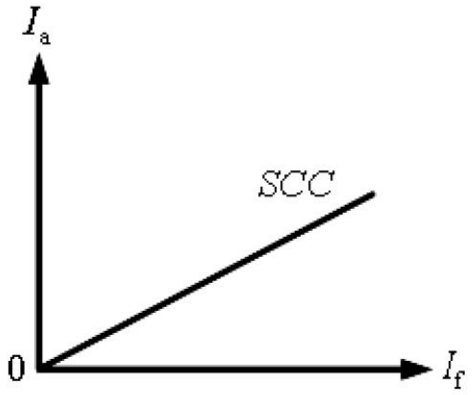


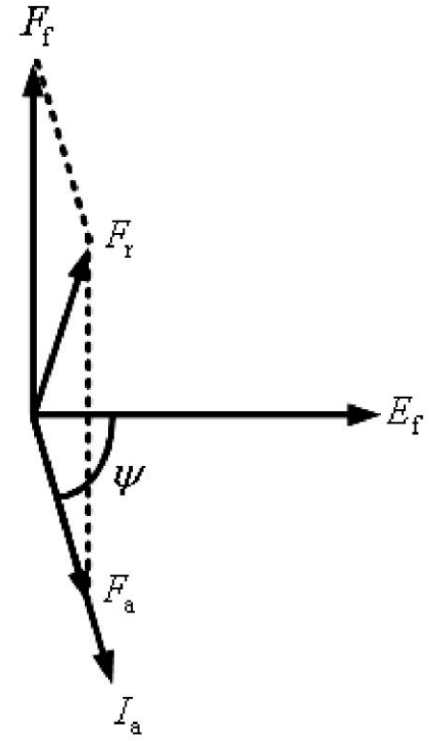
فصل اول: ماشین های سنکرون

آزمایش اتصال کوتاه: (Short Circuit Characteristic) SCC

شرایط آزمایش: محرک اولیه برابر سرعت سنکرون، پایانه های ماشین اتصال کوتاه،
مطالعه تغییرات I_a بر حسب I_f



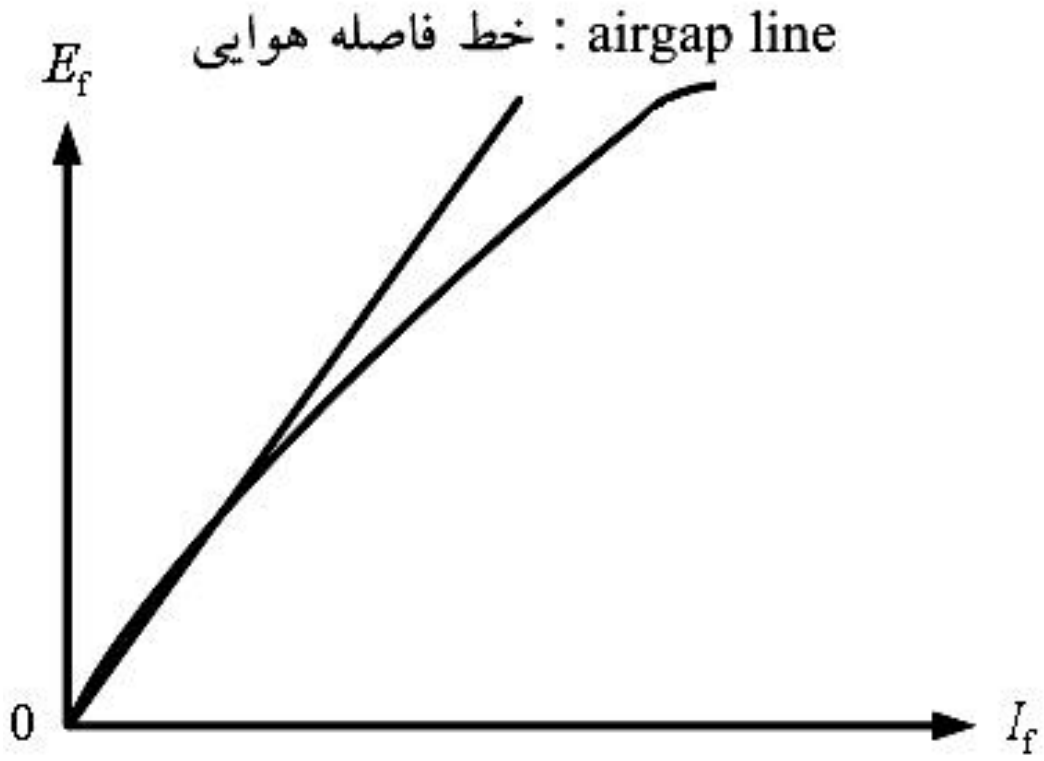


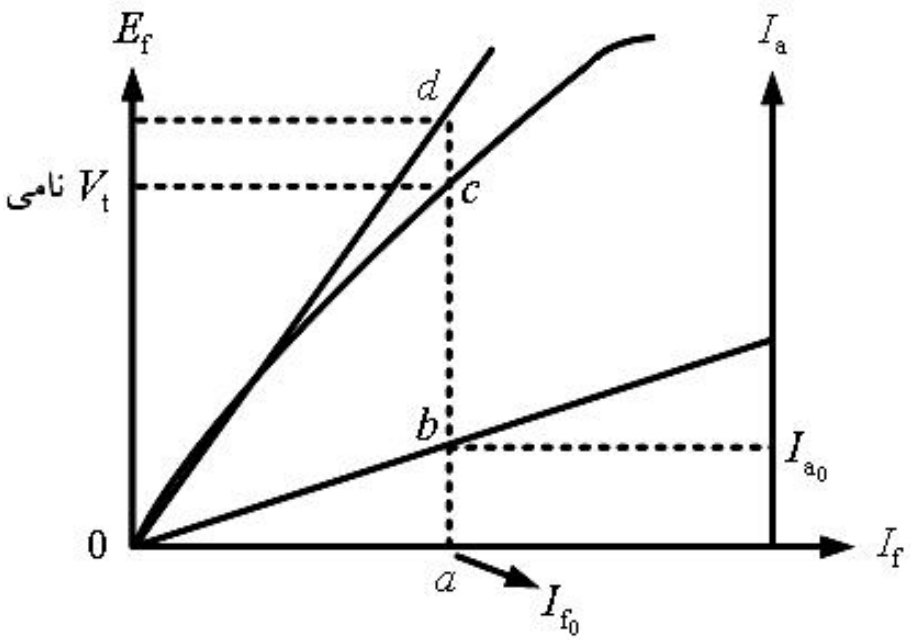


در شرایط اتصال کوتاه شار شکاف هوایی کم است. در نتیجه با اشباع روبرو نمی شویم و مشخصه اتصال کوتاه خطی خواهد بود.

محاسبه راکتانس سنکرون X_s

خط فاصله هوایی خطی است که ولتاژ E_f در این خط حرکت می کرد، اگـر اشـباعی در ماشین اتفاق نمی افتاد.





$$Z_s = R_a + jX_s \quad , \quad X_s \qquad R_a$$

$$|Z_s| = \sqrt{R_a^2 + X_s^2} = \left|\frac{\bar{E}_f}{(\bar{I}_a)_{SCC}}\right| = \frac{ad}{ab}$$

R_a : از آزمایش ولت – آمپر و X_s از رابطه فوق به دست می آید.

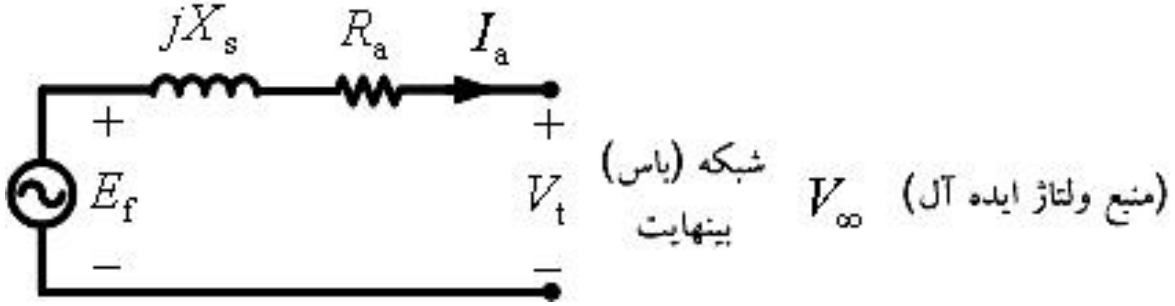
$Z_{s,us}$ *or* $X_{s,us}$: امپدانس یا راکتانس سنکرون اشباع نشده (روش تقریبی)

us: unsaturated

فصل اول: ماشین های سنکرون

امپدانس سنکرون اشباع شده (saturated)

ژنراتورهای سنکرون سه فاز عمدتاً به سیستم قدرت متصل انـد و بـه نـدرت بـه تنهـایی بارهای خاص و محلی را تأمین می کنند. در صورتی که ژنراتورهای سنکرون سه فاز به شبکه قدرت متصل اند و مشترکاً بار مشترکین را تأمین می کنند، گفته می شود کـه ژنراتورها به باس یا شین بینهایت وصل اند. از آنجایی که تعداد ژنراتورهای متصل به شبکه زیاد بوده و اندازه این ژنراتورها نسبتاً بزرگ و حجیم است، لذا ولتاژ و فرکانس شین بینهایت به سختی قابل تغییر است و ثابت می باشد.



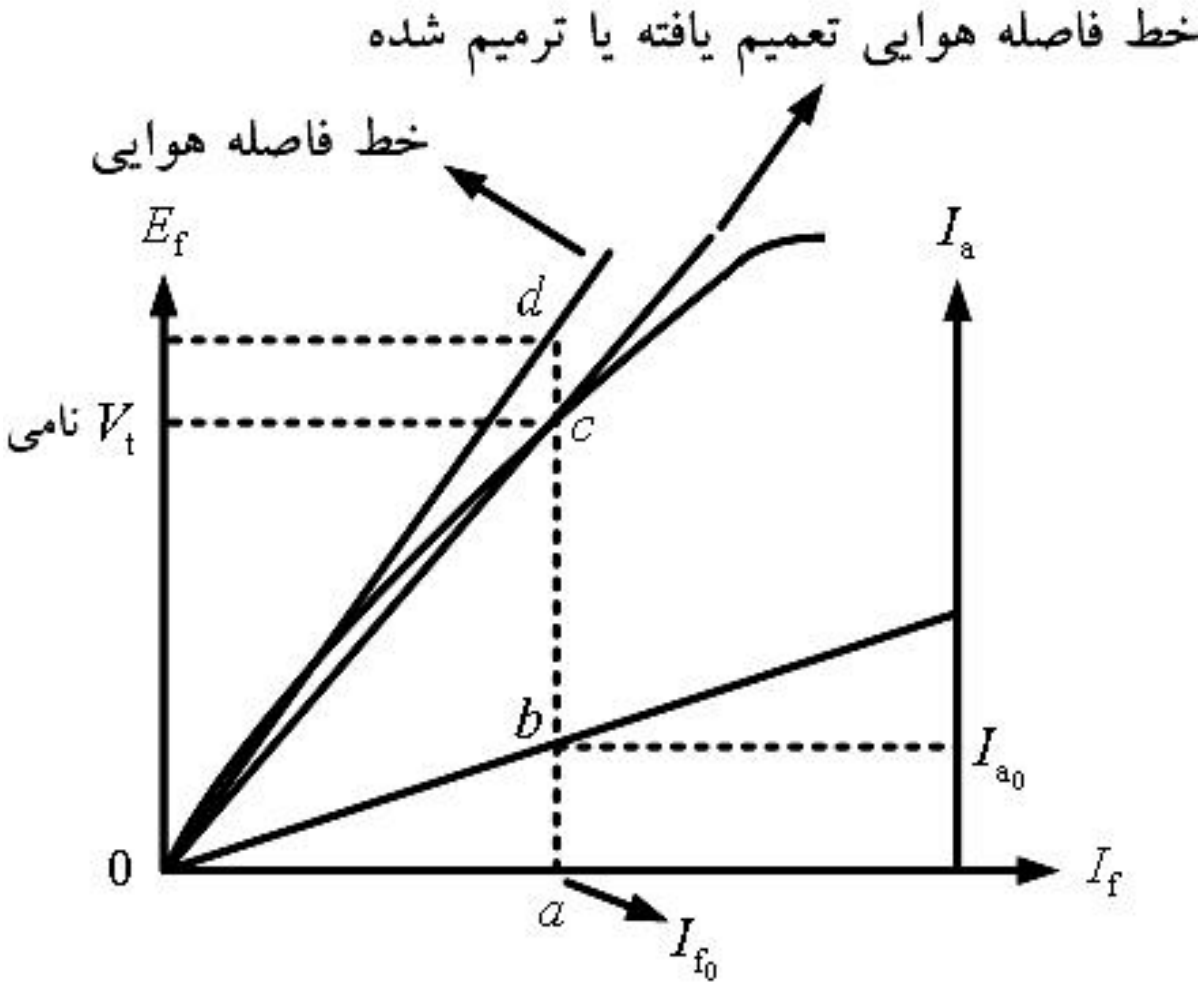
با توجه به افت ولتاژ کم روی امپدانس مقاومتی و نـشتی ماشـین (R_a+jX_{al}) مـی تـوان گفت که: $V_t E_r$ در حالت متصل شدن ماشـین بـه بـاس بینهایـت، شـار فاصـله هوایی تقریباً ثابت است.

فصل اول: ماشین های سنکرون

قبل از اتصال ژنراتور به باس بینهایت، E_f را در حد ولتاژ اسمی (نامی) ماشین تنظیم می کنیم. (ولتاژ نامی $E_{ac} = (V_t)$ در شکل اسلاید بعدی) حال اگر ژنراتور به شبکه بینهایت متصل شود، ولتاژ پایانه V_t معادل ولتاژ باس بینهایت خواهد بود. اگر جریان تحریک (I_f) تغییر کند، E_f نیز تغییر می کند. اما دیگر این تغییرات در راستای خط فاصله هوایی نخواهد بود، بلکه تغییرات E_f در راستای خط OC صورت می گیرد.

خط OC را خط شکاف هوایی تعمیم یافته گویند. این خط در حقیقت اثر اشباع را مدل سازی می کند. این موضوع را می توان اینچنین نیز توجیه کرد که E_r تقریباً ثابت است و در ازای تغییرات I_f از خود واکنشی نشان نمی دهد. این امر نشان دهنده آن است که شار در شکاف هوایی و یا اشباع مغناطیسی در قبال تغییرات I_f تقریباً ثابت می ماند و در نتیجه بسیار منطقی است که فرض کنیم E_f در راستای خط OC تغییر می کند:

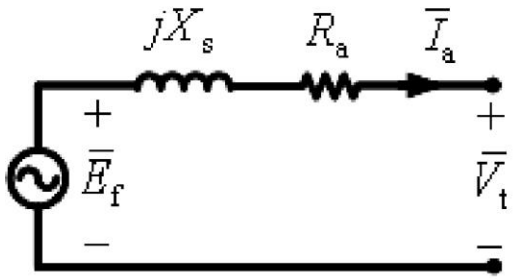
$$\left| Z_{s,sa} \right| = \frac{ac}{ab}$$


خط فاصله هوایی تعمیم یافته یا ترمیم شده
خط فاصله هوایی
E_f
I_a
d
V_t نامی
c
b
I_{a_0}
0
I_f
a
I_{f_0}

فصل اول: ماشین های سنکرون

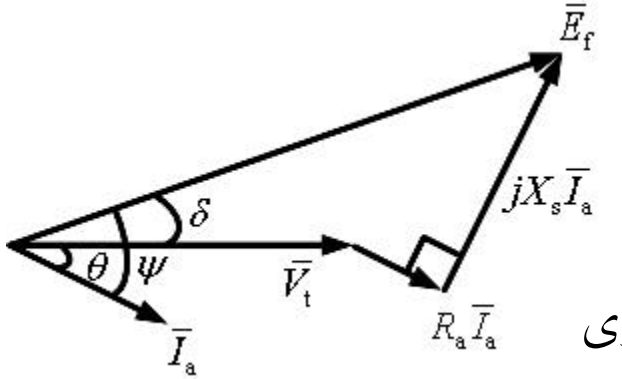
نمودار (دیاگرام) فازوری ماشین سنکرون

الف) ژنراتور سنکرون



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

δ: زاویه بار، زاویه توان، زاویه گشتاور

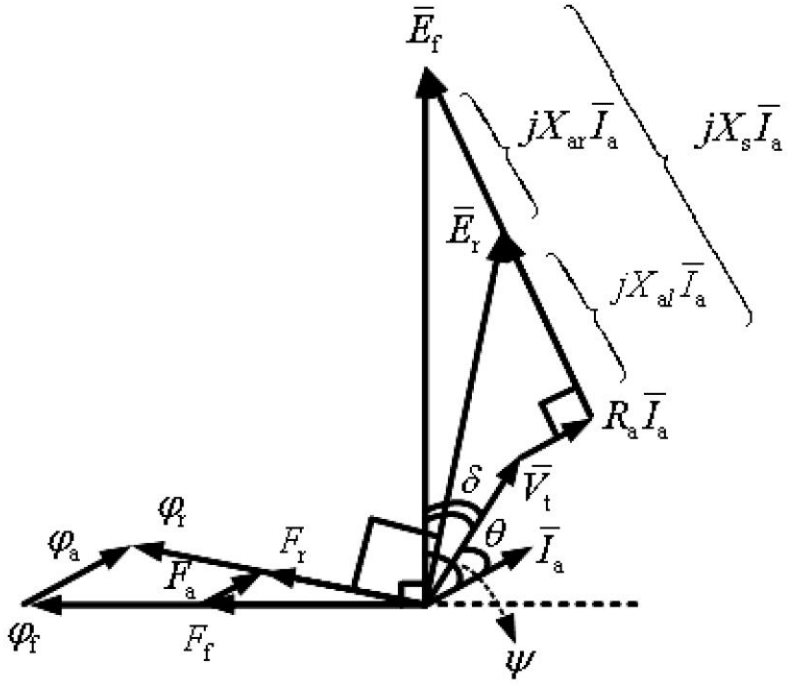


$$\bar{V}_t \neq |\bar{V}_t| \quad 0$$

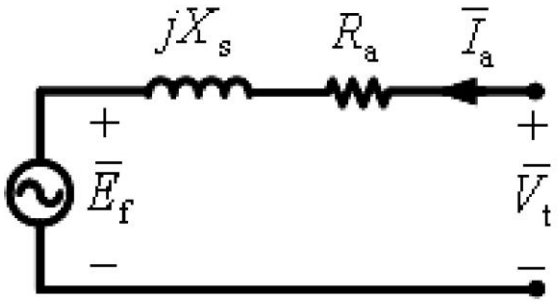
$$= \delta + \theta$$

$$\delta > 0$$

در حالت پس فازی



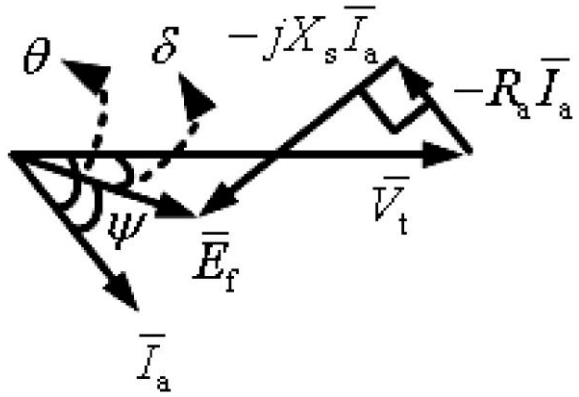
ب) موتور سنکرون



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

و یا:

$$\bar{E}_f = \bar{V}_t - R_a \bar{I}_a - jX_s \bar{I}_a$$



$$\bar{V}_t = |\bar{V}_t| \quad 0$$

$$= \theta - \delta$$

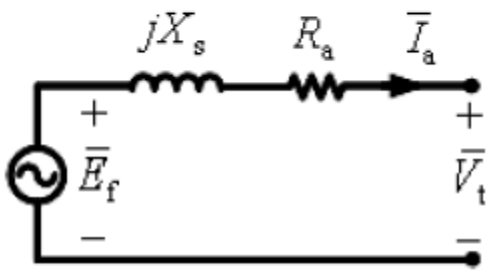
$$\delta \quad 0$$

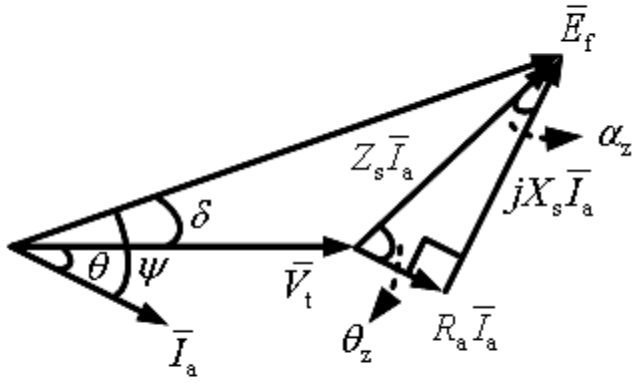
در حالت پس فازی

در واقع گشتاور در ماشین های سنکرون از تقابل بین دو میدان F_r و F_f به وجود می آید.

اگر $\delta = 0$ گشتاور نداریم.

مشخصه های توان و گشتاور در ماشین سنکرون (ژنراتور)





$$\theta_z + \alpha_z = 90^\circ$$

$$\bar{V}_t = |\bar{V}_t| \angle 0^\circ \ , \ \bar{E}_f = |\bar{E}_f| \angle \delta \ , \ \bar{I}_a = |\bar{I}_a| \angle \theta \ , \ \theta_z = \tan^{-1}\left(\frac{X_s}{R_a}\right) \ , \ Z_s = R_a + jX_s = |Z_s| \angle \theta_z$$

$$\bar{E}_f = \bar{V}_t + R_a\bar{I}_a + jX_s\bar{I}_a \Rightarrow \bar{I}_a = \frac{\bar{E}_f - \bar{V}_t}{R_a + jX_s} = \frac{|\bar{E}_f| \angle \delta - |\bar{V}_t| \angle 0^\circ}{|Z_s| \angle \theta_z}$$

توان مختلط در ترمینال ژنراتور : $\bar{S} = \bar{V}_t\bar{I}_a^* = (|\bar{V}_t| \angle 0^\circ)\left(\frac{|\bar{E}_f| \angle \delta - |\bar{V}_t| \angle 0^\circ}{|Z_s| \angle \theta_z}\right)^*$

$$\Rightarrow \ \bar{S} = (|\bar{V}_t| \angle 0^\circ)\left(\frac{|\bar{E}_f| \angle -\delta - |\bar{V}_t| \angle 0^\circ}{|Z_s| \angle -\theta_z} \right) = \frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{|Z_s|} \angle (\theta_z - \delta) - \frac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|} \angle \theta_z$$

$$\Rightarrow \ \bar{S} = \frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{|Z_s|} \cos(\theta_z - \delta) + j \frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{|Z_s|} \sin(\theta_z - \delta) - \left(\frac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|} \cos\theta_z + j \frac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|} \sin\theta_z \right)$$

$$\Rightarrow \ \bar{S} = \left(\frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{|Z_s|} \cos(\theta_z - \delta) - \frac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|} \cos\theta_z \right) + j \left(\frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{|Z_s|} \sin(\theta_z - \delta) - \frac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|} \sin\theta_z \right)$$

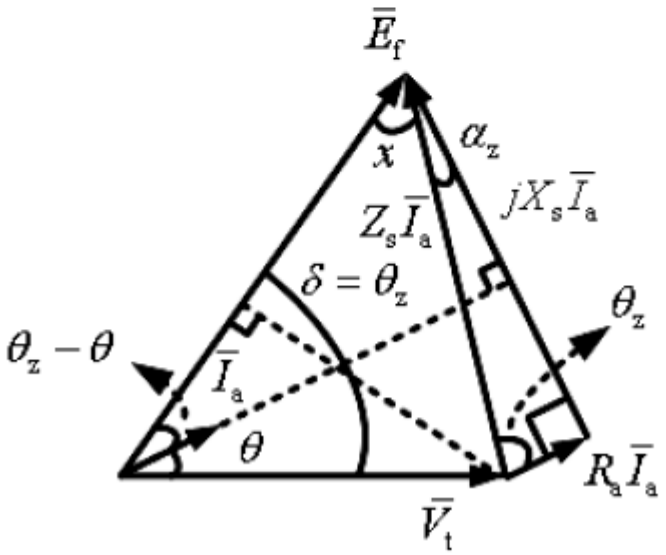
$$\bar{S} = P + jQ \ \Rightarrow \begin{cases} P = \dfrac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{|Z_s|} \cos(\theta_z - \delta) - \dfrac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|} \cos\theta_z \\ Q = \dfrac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{|Z_s|} \sin(\theta_z - \delta) - \dfrac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|} \sin\theta_z \end{cases}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

$$P_{max} = ? \rightarrow \frac{dP}{d\delta} = 0 \Rightarrow \frac{dP}{d\delta} = \frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{|Z_s|}\sin(\theta_z - \delta) = 0 \Rightarrow \delta = \theta_z$$

$$\Rightarrow P_{max} = \frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{|Z_s|} - \frac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|}\cos\theta_z \ , \ \cos\theta_z = \frac{R_a}{|Z_s|} \ , \ Q_{|P_{max}} = -\frac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|}\sin\theta_z$$

$Q < 0 \Leftarrow$ حالت کار ژنراتور پیش فازی است.



$$(x + \alpha_z) + (\theta_z - \theta) = 90^\circ \ , \ \alpha_z + \theta_z = 90^\circ \Rightarrow x = \theta$$

$$PF = \cos\theta = \frac{|\bar{E}_f| - |\bar{V}_t|\cos\delta}{|Z_s||\bar{I}_a|} \ , \ \delta = \theta_z = \cos^{-1}\left(\frac{R_a}{|Z_s|}\right)$$

$$|Z_s||\bar{I}_a| = \sqrt{|\bar{E}_f|^2 + |\bar{V}_t|^2 - 2|\bar{E}_f||\bar{V}_t|\cos\delta}$$

$\Leftarrow |\bar{I}_a|$ به دست می آید.

فصل اول: ماشین های سنکرون

حال اگر از R_a صرفه نظر کنیم، داریم:

$$Z_s \approx jX_s = X_s \angle 90^\circ \ , \ \theta_z = 90^\circ \Rightarrow P = \frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s}\sin\delta \ , \ Q = \frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s}\cos\delta - \frac{|\bar{V}_t|^2}{X_s}$$

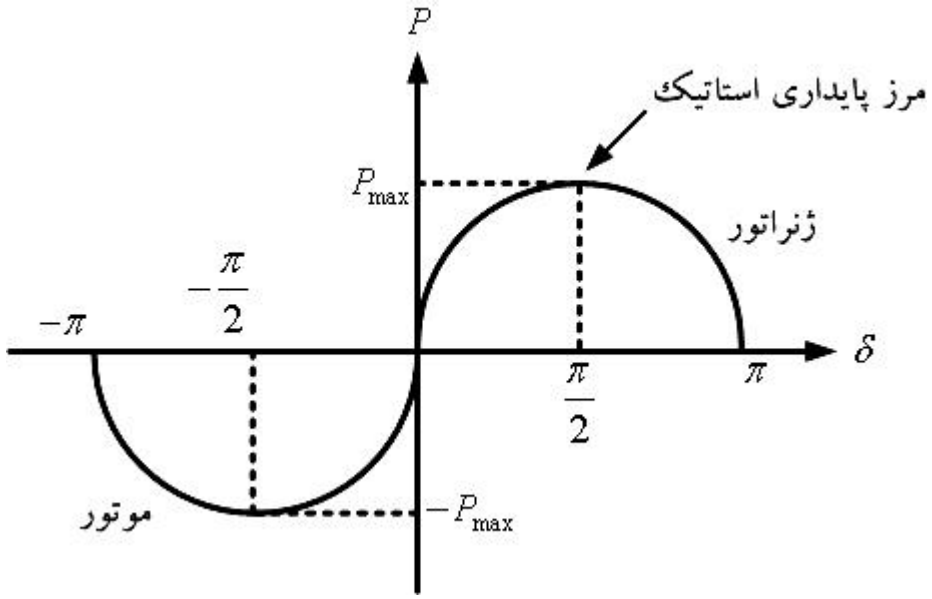
$$P_{\max|\delta=90^\circ} = \frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s} \ , \ Q_{|P_{\max}} = -\frac{|\bar{V}_t|^2}{X_s}$$

نکته: برای سه فاز، تمامی روابط P و Q در عدد 3 ضرب می شوند.

از آنجایی که از تلفات استاتور (آرمیچر) صرفه نظر شده است، لذا توان در پایانه ماشین همان توان شکاف هوایی خواهد بود و گشتاور حاصله توسط ژنراتور به صورت زیر است:

$$T = \frac{P_{3\varphi}}{\omega_{syn}} = \frac{3}{\omega_{syn}}\frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s}\sin\delta = T_{\max}\sin\delta \ , \ T_{\max} = \frac{3}{\omega_{syn}}\frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s} \ , \ \omega_{syn} = 2\pi n_s \ \ (rps)$$

فصل اول: ماشین های سنکرون



گشتاور به دست آمده همان گشتاور الکترومغناطیسی است و با گشتاور اعمال شده به محور از طریق توربین (محرک اولیه) برابر است، اما جهت این دو گشتاور خلاف یکدیگر است.
بار ژنراتور را می توان آرام آرام افزود تا آنکه به P_{max} برسیم. (T_{max} یا P_{max})

حد پایداری استاتیک (حالت ماندگار) ژنراتور سنکرون می باشد. اگر بار ژنراتور مجدداً افزوده شود، δ از 90 بیشتر شده و سیستم قابلیت تأمین بار را نداشته و ژنراتور سنکرونیزم خود را از دست می دهد و ناپایدار می شود. خروج از سنکرونیزم معادل هم سرعت نبودن میدان ها و عدم ایجاد گشتاور متوسط خواهد بود. (در ژنراتور گشتاور الکتریکی و در موتور گشتاور مکانیکی)

با توجه به اینکه گشتاور مکانیکی ورودی در ژنراتور کماکان وجود دارد (گشتاور توربین)، بروز این پدیده (وجود گشتاور مکانیکی ورودی و عدم وجود گشتاور الکتریکی خروجی) باعث ازدیاد سرعت ژنراتور می گردد که نهایتاً باید توسط سیستم های حفاظتی، ورودی مکانیکی قطع گردد. در عمل نقطه کار ماشین سنکرون در زاویه های کاملاً کوچکتر از 90 محدود می گردد تا امکان مانور ماشین در شرایط گذرا وجود داشته باشد.

توجه: روابط فوق مربوط به ژنراتور سنکرون است. برای موتور سنکرون روابط در یک منفی ضرب شده و نیز δ تبدیل به $-\delta$ می شود.

مثال 1: اطلاعات زیر از یک ماشین سنکرون سه فاز، 10 مگا ولت-آمپر و 14 کیلو ولت با

اتصال ستاره به دست آمده است. مقاومت آرمیچر هر فاز استاتور معادل 0.07 اهم است.

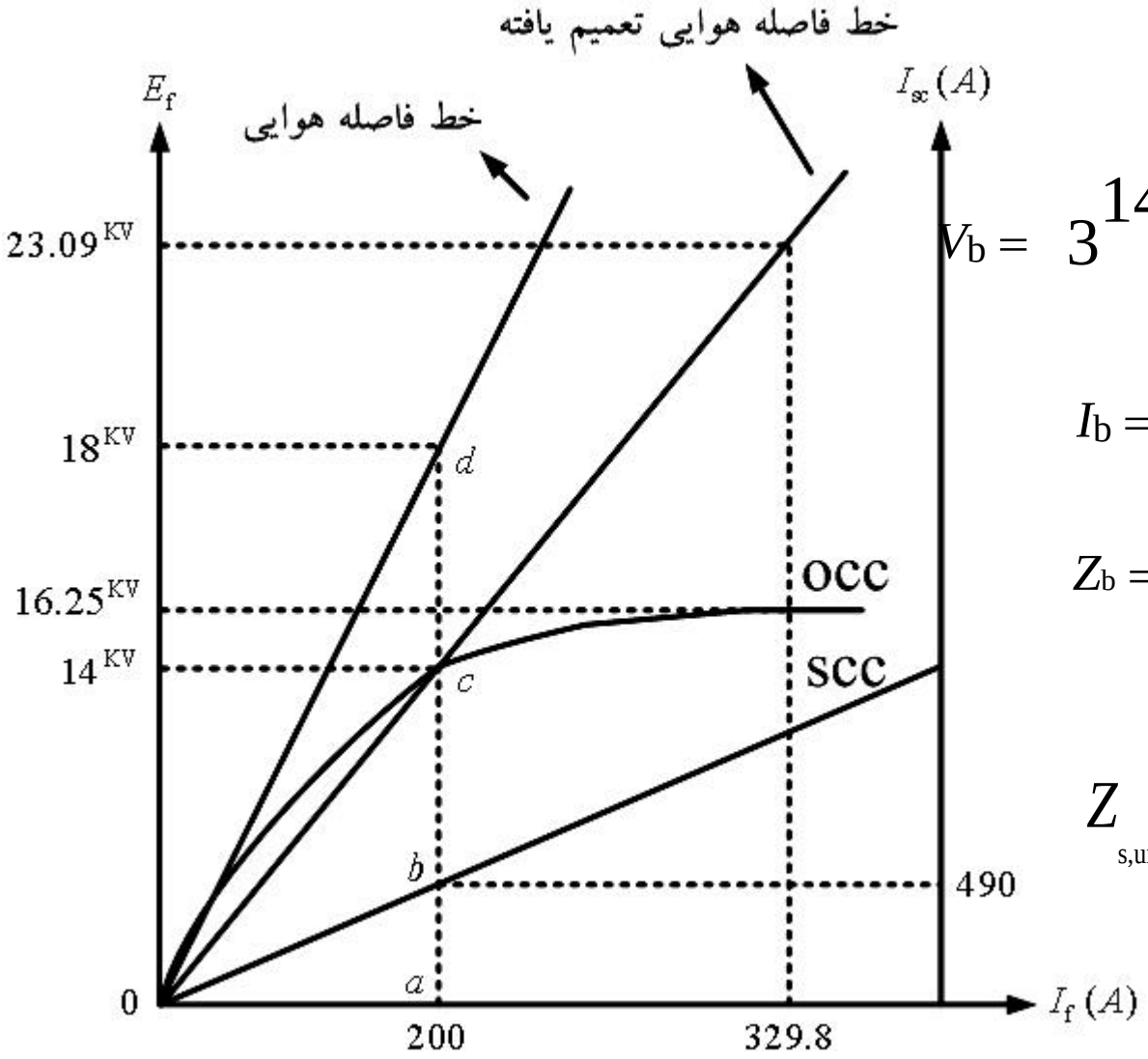
الف) مطلوب است محاسبه راکتانس سنکرون اشباع شده و نشده بر حسب اهم و پریونیت.

فصل اول: ماشین های سنکرون

ب) جریان میدان را در حالتی بیابید که ژنراتور به باس بینهایت متصل شده و قدرت نامی را در ضریب توان پس فاز 0.8 تحویل دهد.

ج) اگر ژنراتور قسمت ب) از باس بینهایت قطع گردد، مطلوب است محاسبه ولتاژ ترمینال در صورتی که جریان میدان تغییر نکرده باشد.

I_f (A)	ولتاژ پایانه در آزمایش مدار باز (L-L , KV)	ولتاژ خط فاصله هوایی (L-L , KV)	جریان اتصال کوتاه (A)
100	9		
150	12		
200	14	18	490
250	15.3		
300	15.9		
350	16.4		



حل: الف)

$$V_b = \frac{14000}{\sqrt{3}} = 8083 \; V_{phase}$$

$$I_b = \frac{10 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 14000} = 412.41 \; A$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{8083}{١٤,٢١٤} = 19.6$$

$$Z_{s,unsat} = \frac{18000/\sqrt{3}}{490} = 21.21$$

$$R_a = 0.07 \quad , \quad X_{s,unsat} = \sqrt{Z_{s,unsat}^2 - R_a^2} = 21.2 \quad , \quad X_{s,unsat}^{pu} = \frac{21.2}{19.6} = 1.08\ pu$$

$$Z_{s,sat} = \frac{\frac{14000}{\sqrt{3}}}{490} = 16.5 \quad , X_{s,sat} = \sqrt{Z_{s,sat}^2 - R_a^2}\ 16.5 \quad , X_{s,sat}^{pu} = \frac{16.5}{19.6} = 0.84 \quad pu$$

ب)

$$\overline{V}_t = 1^{\ pu}\ \ 0\ , pf = \cos\theta = 0.8 \quad lag \rightarrow \theta = 36.87\ , \ \overline{I}_a = 1^{\ pu}\ \ -36.87$$

$$Z_s = 0.84^{\ pu}\ \ \tan^{-1}\left(\frac{16.5}{0.07}\right) = 0.84^{\ pu}\ \ +89.8\ , \ \overline{E}_f = \overline{V}_t + Z_s \overline{I}_a$$

$$\overline{E}_f = \quad 1\ \ 0 + (0.84\ \ 89.8\ )(1\ \ -36.87\ ) = 1.649^{\ pu} 24 \quad or \quad 23.09^{\ kv}\ \ 24$$

$$\rightarrow \left|\overline{E}_f\right| = 23.09\ kv \ \rightarrow I_f = 329.8A \quad \text{از روی جدول و منحنی:}$$

ج)

$$\left|\overline{E}_f\right| = \left|\overline{V}_t\right| = 16.25\ kv \quad \text{از روی جدول و منحنی:}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

مثال 2: یک ماشین سنکرون سه فاز چهار قطبی، 60 هرتز، 208 ولت و 5 کیلو ولت – آمپر با راکتانس سنکرون 8 اهم در هر فاز و مقاومت آرمیچر ناچیز و با آرایش ستاره به شبکه ای با ولتاژ نامی متصل است. ماشین ابتدا به صورت ژنراتور کار می کند.

الف) مطلوب است ولتاژ تحریک و زاویه توان هنگامی که ماشین، بار نامی را در ضریب توان 0.8 پسفاز تحویل می دهد.

ب) اگر جریان تحریک 20 درصد افزایش یابد ولی توان ورودی ثابت بماند، مطلوب است محاسبه جریان استاتور، ضریب قدرت و توان راکتیو تحویلی.

ج) با جریان تحریک مشابه فرض الف) قدرت ورودی به تدریج افزایش می یابد. مطلوب است محاسبه مرز پایداری، جریان استاتور، ضریب قدرت و توان راکتیو در نقطه متناظر با مرز پایداری (حداکثر توان).