

سر فصل مطالب

۱- ماشین سنکرون شامل: مقدمه، ساختمان ماشین، ژنراتور سنکرون روتور استوانه ای، مدار معادل ماشین سنکرون، دیاگرام (نمودار) فازوری ماشین سنکرون، مکان هندسی توان مختلط، کنترل ضریب توان، ژنراتورهای سنکرون مستقل، ماشین های سنکرون قطب برجسته، کار موازی ژنراتورهای AC

۲- ترانسفورماتور سه فاز شامل: مقدمه، انواع ترانسفورماتورهای سه فاز از نظر ساختمان، سیر تکاملی ترانسفورماتورهای سه فاز هسته ای، انواع اتصالات در ترانسفورماتورهای سه فاز، گروه برداری، تأثیر جهت پلاریته و توالی فاز، موازی کردن ترانسفورماتورهای سه فاز، پدیده تحریک در ترانسفورماتور، هارمونیک ها و اثر آنها در ترانسفورماتور سه فاز

فصل اول: ماشین های سنکرون

مقدمه:

ماشین های سنکرون تحت سرعت ثابتی به نام سرعت سنکرون می چرخند و جزء 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. بزرگ ترین قدرت نامی آلترناتورهای سه فاز تاکنون 1700 MW است.

فصل اول: ماشین های سنکرون

ساختمان ماشین:

ماشین های سنکرون سه فاز اعم از ژنراتور و موتور جزء ماشین های دو تحریکه (Doubly Excited) محسوب می شوند، زیرا سیم پیچ روتور آنها توسط منبع DC تغذیه گشته و از استاتور آنها جریان AC می گذرد. به سیم پیچ روتور، سیم پیچ میدان و به سیم پیچ استاتور، سیم پیچ آرمیچر گفته می شود. (بر خلاف ماشین های DC)

ساختمان ژنراتور سنکرون و موتور سنکرون سه فاز شبیه یکدیگر است. شار شکاف هوایی در این ماشین ها منتهجه (برآیند) شارهای حاصله از جریان روتور و جریان استاتور می باشد. در ماشین های القایی تنها عامل تحریک کننده، جریان استاتور محسوب می شد، زیرا جریان روتور بر اثر عمل القاء پدید می آمد. لذا موتورهای 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 شود. اما در ماشین های سنکرون (موتور) اگر مدار تحریک روتور، تحریک لازم را فراهم سازد، استاتور جریان راکتیو نخواهد کشید و ماشین در حالت ضریب توان واحد کار خواهد کرد.

فصل اول: ماشین های سنکرون

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 در حالت 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

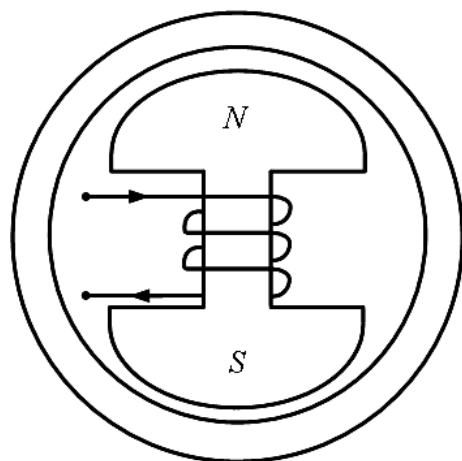
روتور

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

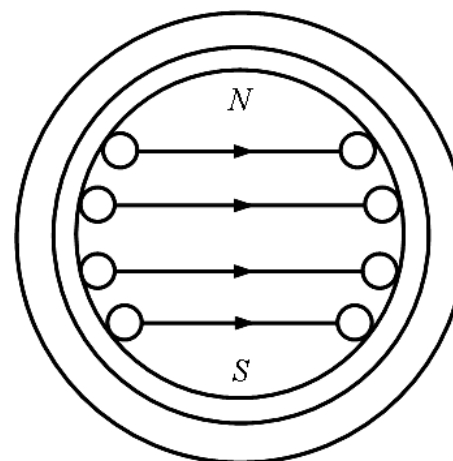
انواع روتور

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 برجسته



روتور قطب صاف

فصل اول: ماشین های سنکرون

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 $n_s \downarrow \Rightarrow P \uparrow \Rightarrow f_s = \frac{P}{2} n_s$: در فرکانس ثابت

ژنراتور سنکرون روتور استوانه ای

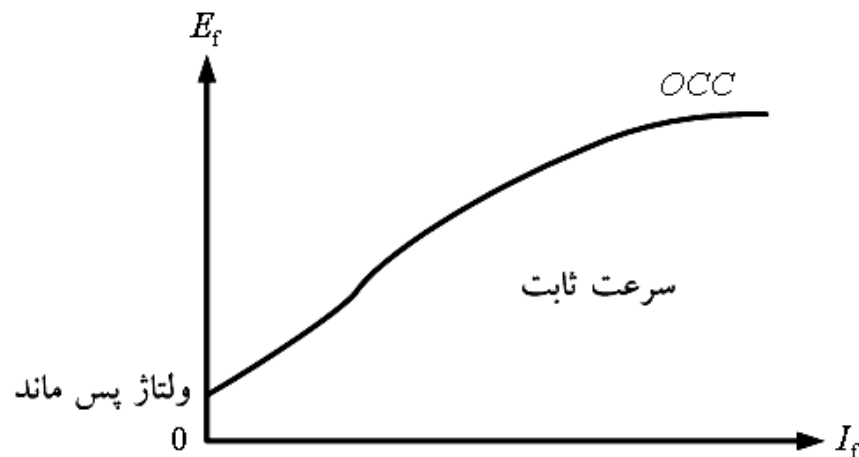
فرض می کنیم که با عبور جریان DC (I_f) از سیم پیچی تحریک (روتور) شاری با توزیع سینوسی در شکاف (فاصله) هوایی ایجاد شود. حال اگر روتور توسط محرک اولیه مثل موتور دیزل یا توربین یا موتور DC چرخانده شود، یک میدان گردان در فاصله هوایی حاصل می شود (میدان تحریک). این میدان در سیم پیچی های سه فاز آرمیچر ولتاژ 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:

فصل اول: ماشین های سنکرون

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

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 ، φ_f دیگر با I_f رابطه خطی ندارد. (مسأله اشباع)

فصل اول: ماشین های سنکرون

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 ولت متر 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 نتیجه 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 ϕ_f و شار حاصله توسط جریان استاتور را که به شار عکس العمل آرمیچر معروف است با ϕ_a نمایش می دهیم:

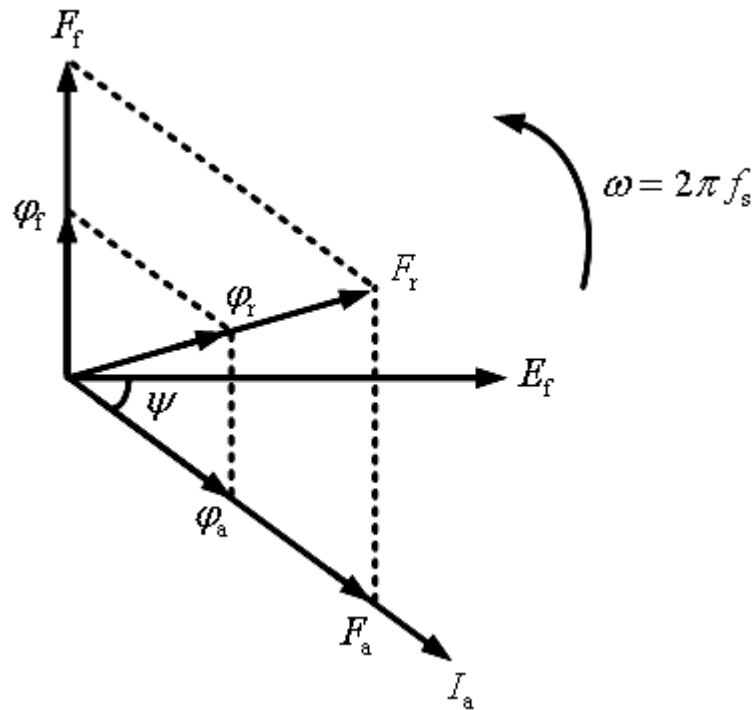
$$\bar{\phi}_r = \bar{\phi}_f + \bar{\phi}_a$$

armature reaction flux

field flux

resultant flux

فصل اول: ماشین های سنکرون

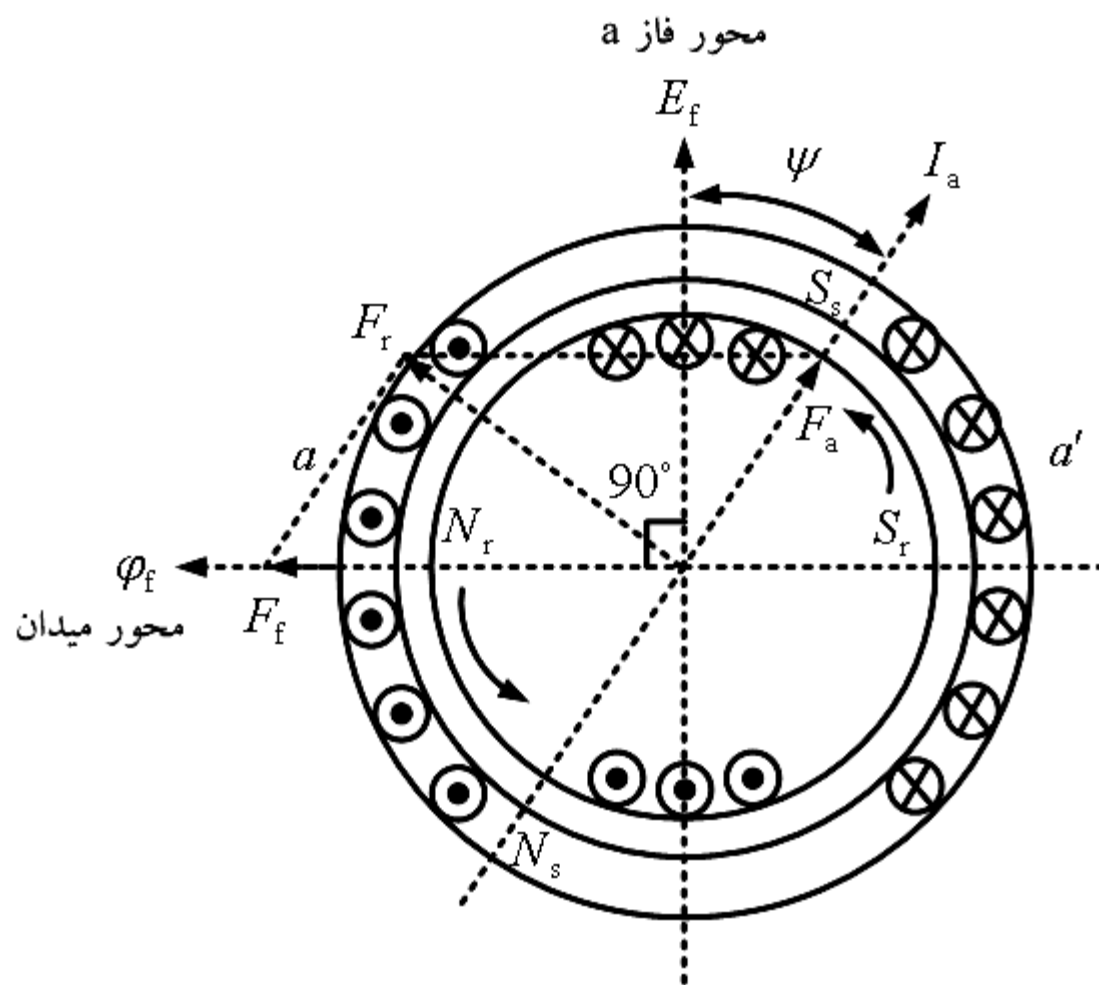


نمودار فازوری فضایی:

E_f به خاطر قانون فارادی ($e = -N \frac{d\phi}{dt}$) از 90° عقب تر است. در این نمودار فرض کرده ایم که جریان I_a به میزان ψ درجه از E_f عقب تر باشد. mmf مربوط به I_a که با F_a نشان داده شده، شار ϕ_a را تولید می کند که همگی با هم همفاز می باشند.

mmf متجه (F_r) برابر است با: $\bar{F}_r = \bar{F}_f + \bar{F}_a$

فصل اول: ماشین های سنکرون



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.

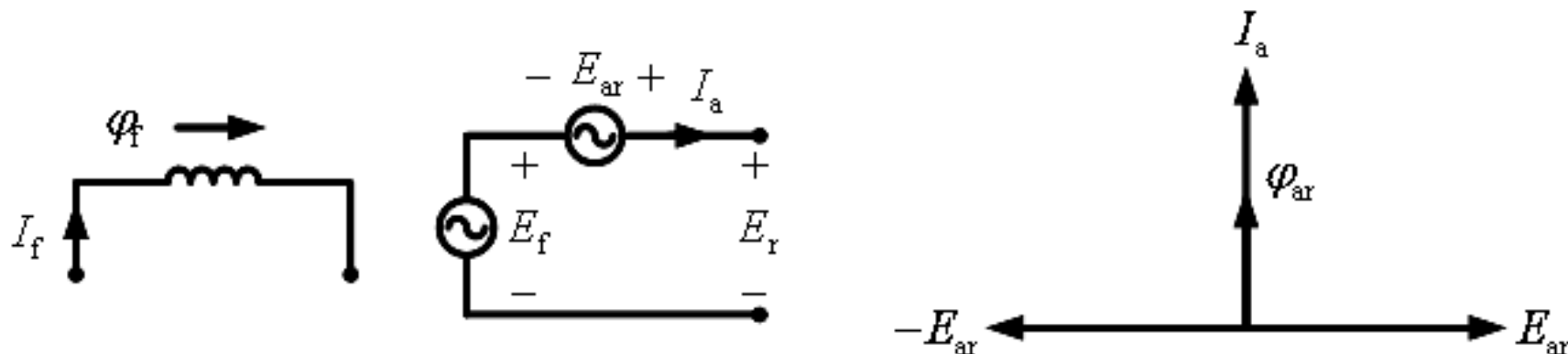
شار φ_{ar} بخش اعظم شار φ_a و φ_{al} بخش کوچکی از شار φ_a را تشکیل می دهد. لذا شار متوجه در شکاف هوایی (φ_r) از دو مؤلفه تشکیل شده است:

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. نتیجه دو ولتاژ القایی E_f و E_{ar} به نام ولتاژ متوجه معروف است که با E_r نمایش داده می شود. به عبارت دیگر E_r توسط شار متوجه φ_r حاصل شده است. به E_r علاوه بر لفظ ولتاژ متوجه، ولتاژ شکاف یا فاصله هوایی نیز گفته می شود.

فصل اول: ماشین های سنکرون



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

ولتاژ E_{ar} از شار φ_{ar} یا I_a به میزان 90° عقب تر است و یا I_a به میزان 90° از $-E_{ar}$ عقب تر است. لذا در رابطه فوق ولتاژ $-E_{ar}$ را می توان با افت ولتاژ دو سر یک راکتانس به نام

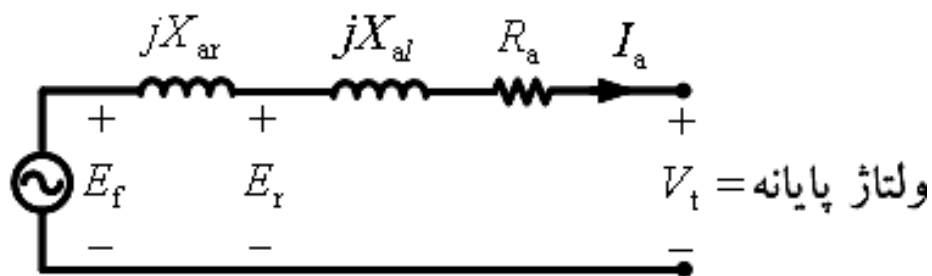
X_{ar} به ازاء عبور جریان I_a مدل نمود:

$$-E_{ar} = jX_{ar}I_a \rightarrow \bar{E}_f = \bar{E}_r + jX_{ar}\bar{I}_a$$

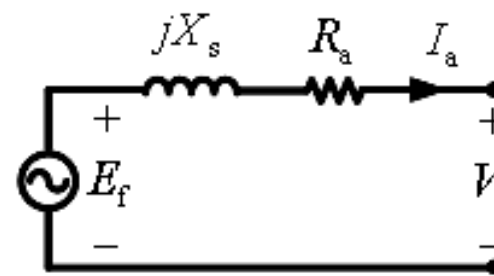
راکتانس X_{ar} به راکتانس عکس العمل آرمیچر یا راکتانس مغناطیس کنندگی معروف است.

فصل اول: ماشین های سنکرون

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

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

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

و یا:

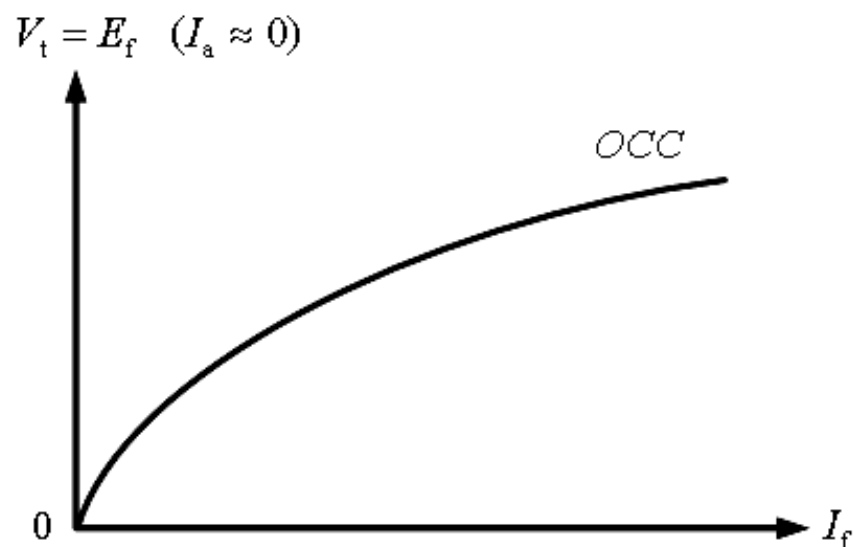
$$\bar{V}_t = \bar{E}_f - Z_s \bar{I}_a = \bar{E}_f - R_a \bar{I}_a - jX_s \bar{I}_a$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

آزمایش مدار باز ژنراتور سنکرون

شرایط آزمایش: ترمینال های ماشین باز و سرعت محرک اولیه (prime mover) برابر سرعت سنکرون

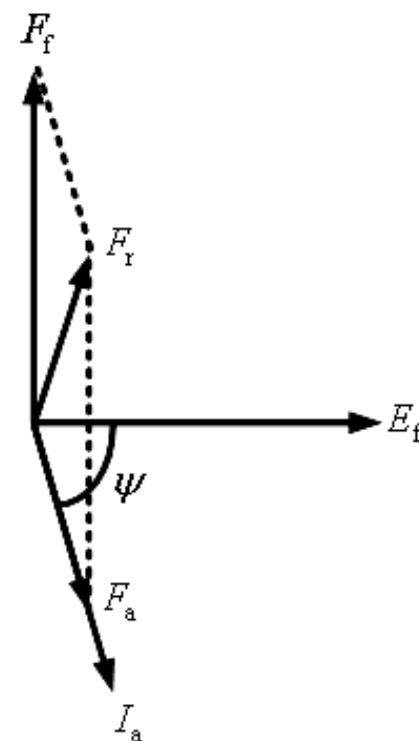
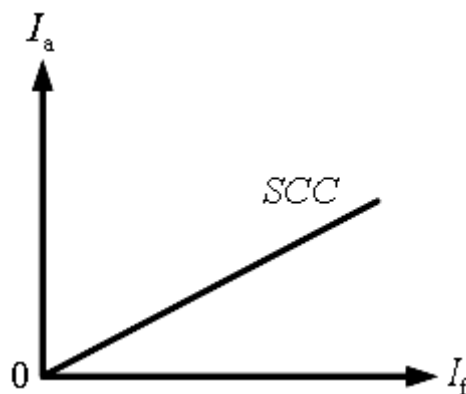
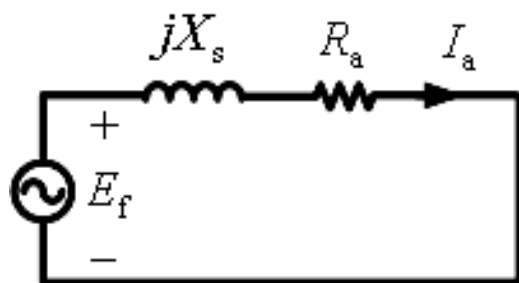
در این آزمایش با زیاد کردن I_f وارد ناحیه اشباع می شویم. تلفات ورودی شامل تلفات مکانیکی (که ثابت است) و تلفات هسته (که وابسته به ولتاژ است) می باشد.



فصل اول: ماشین های سنکرون

آزمایش اتصال کوتاه: SCC (Short Circuit Characteristic)

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

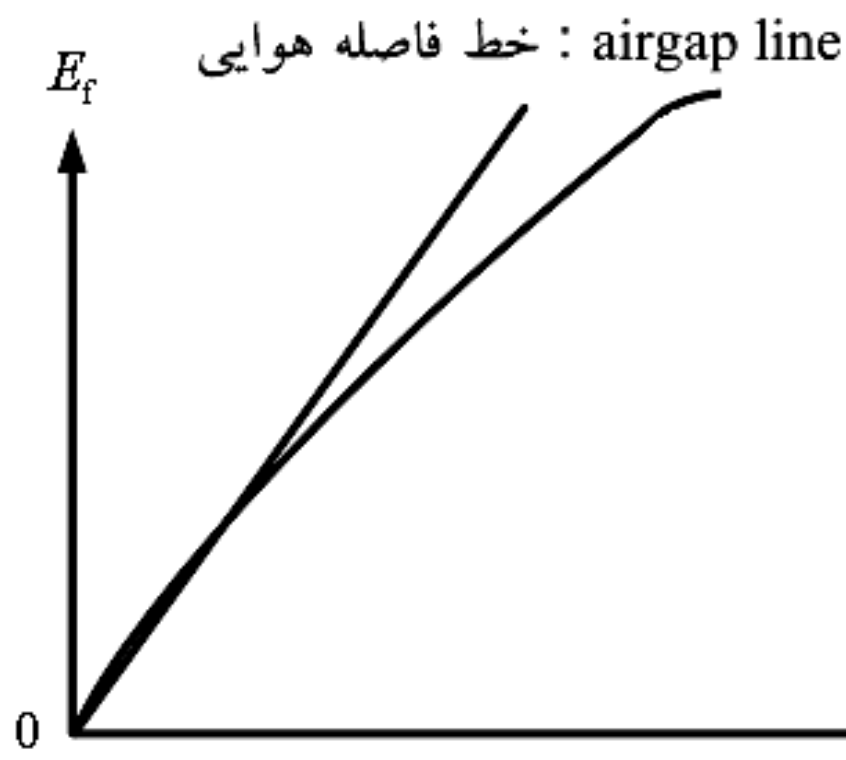


⇐ در شرایط اتصال کوتاه شار شکاف هوایی کم است. در نتیجه با اشباع روبرو نمی شویم و مشخصه اتصال کوتاه خطی خواهد بود.

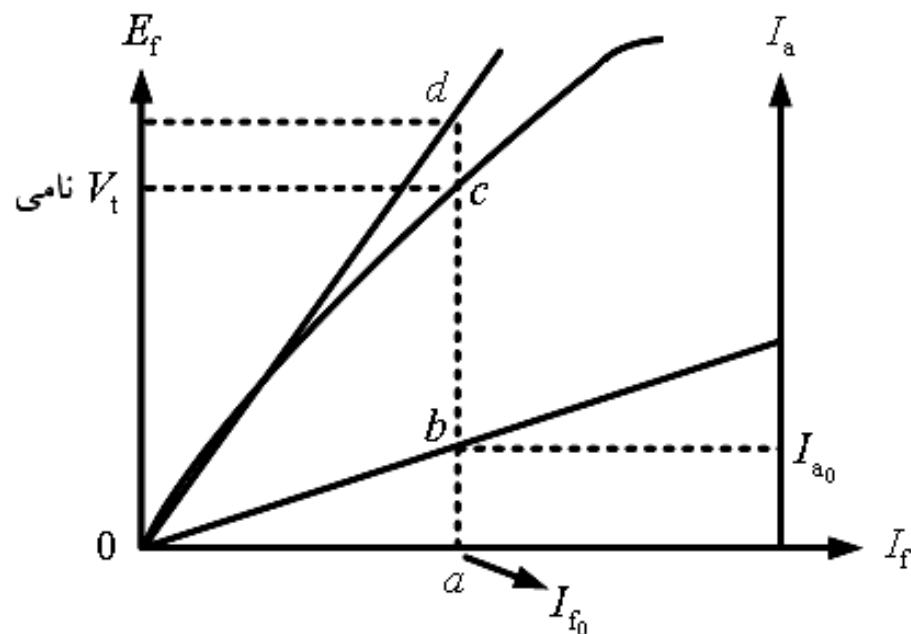
فصل اول: ماشین های سنکرون

محاسبه راکتانس سنکرون X_s

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



فصل اول: ماشین های سنکرون



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

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

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

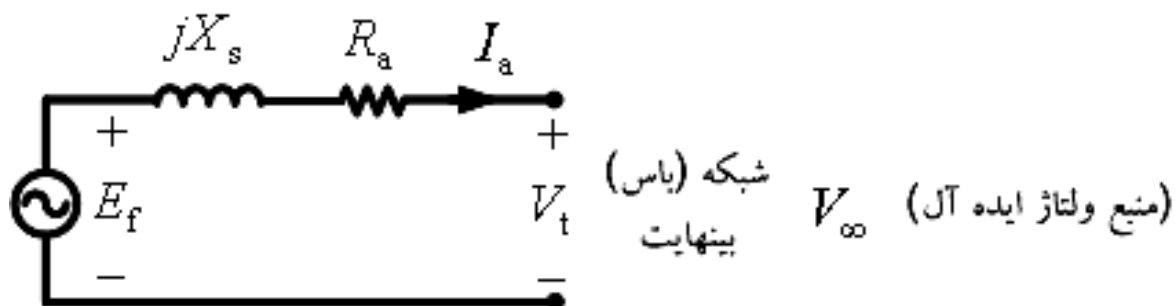
$Z_{s,us}$ or $X_{s,us}$: امپدانس یا راکتانس سنکرون اشباع نشده (روش تقریبی)

us: unsaturated

فصل اول: ماشین های سنکرون

امپدانس سنکرون اشباع شده (saturated)

ژنراتورهای سنکرون سه فاز عمدتاً به سیستم قدرت متصل اند و به ندرت به تنهایی 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 که 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.



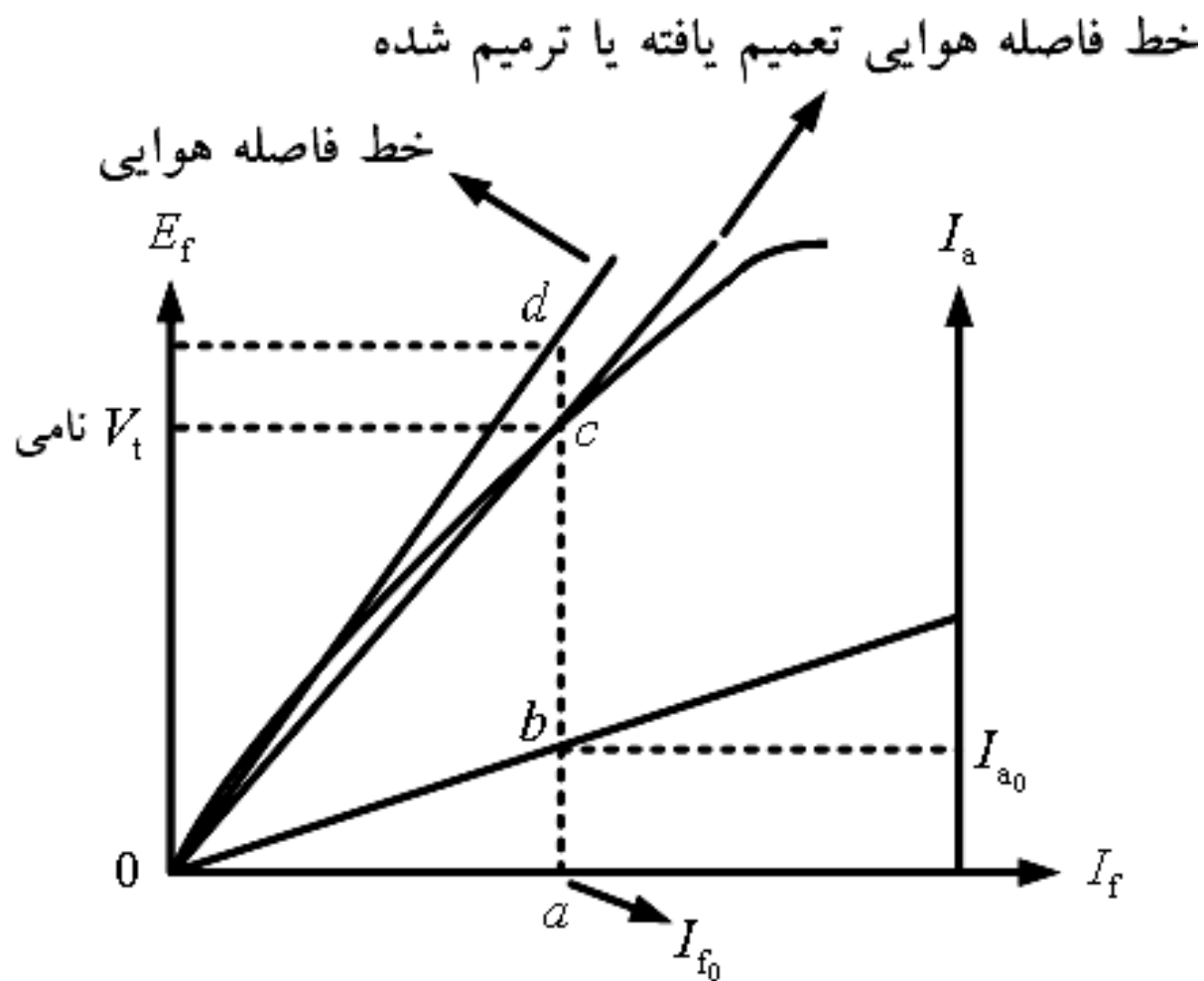
با توجه به افت ولتاژ کم روی امپدانس مقاومتی و نشتی ماشین $(R_a + jX_{al})$ می توان گفت که: $V_t \approx E_f \Leftarrow$ در حالت متصل شدن ماشین به باس بینهایت، شار فاصله هوایی تقریباً ثابت است.

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_f 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:

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

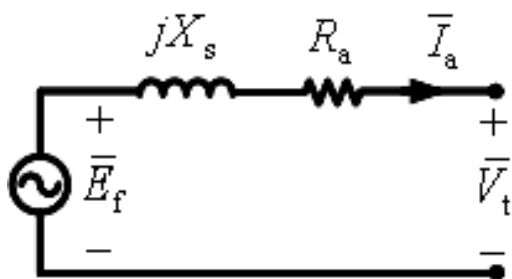
فصل اول: ماشین های سنکرون



فصل اول: ماشین های سنکرون

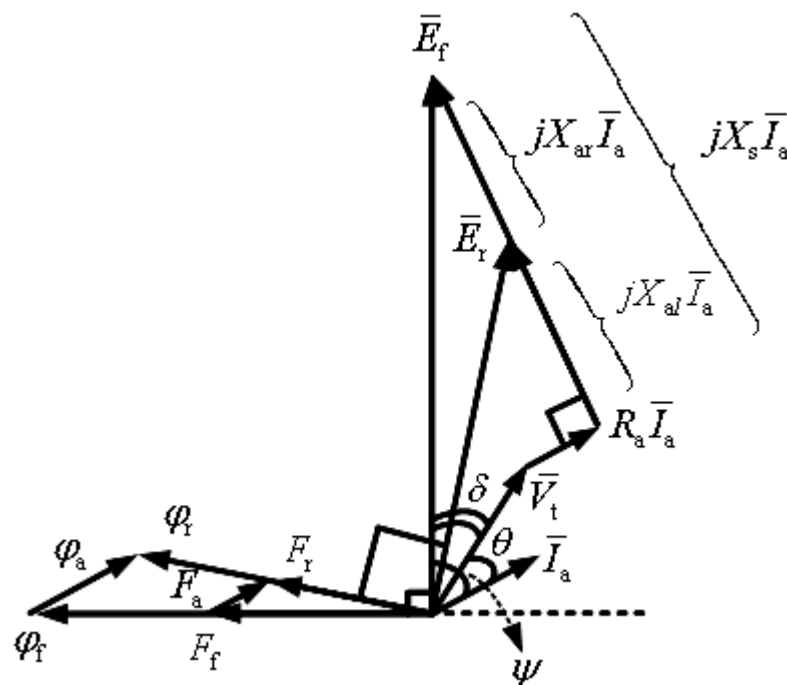
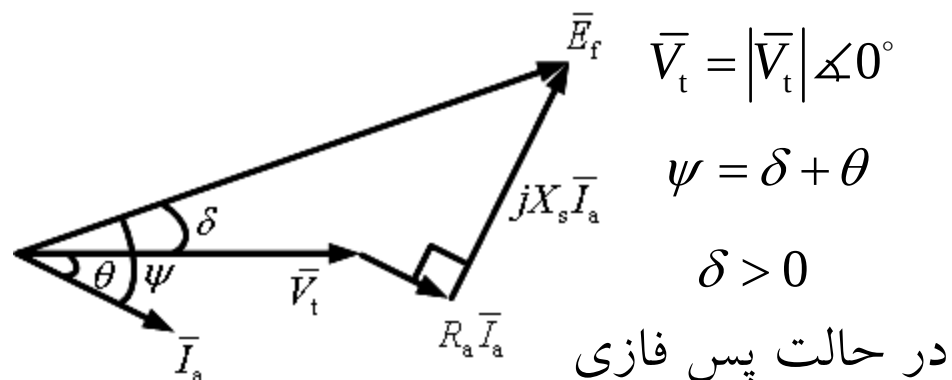
نمودار (دیاگرام) فازوری ماشین سنکرون

الف) ژنراتور سنکرون



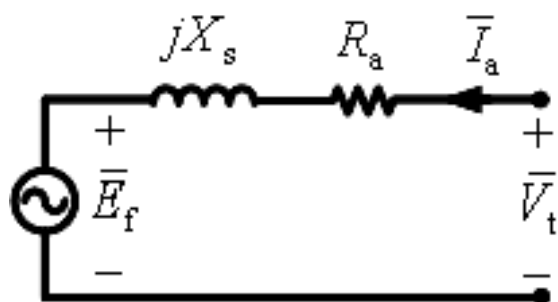
$$\bar{E}_f = \bar{V}_t + R_a \bar{I}_a + jX_s \bar{I}_a$$

δ : زاویه بار، زاویه توان، زاویه گشتاور



فصل اول: ماشین های سنکرون

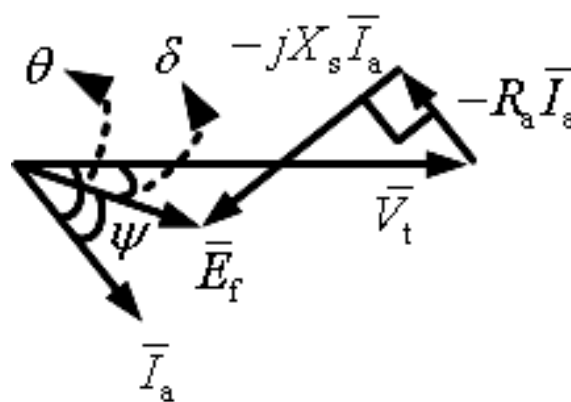
ب) موتور سنکرون



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

و یا:

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



$$\bar{V}_t = |\bar{V}_t| \angle 0^\circ$$

$$\psi = \theta - \delta$$

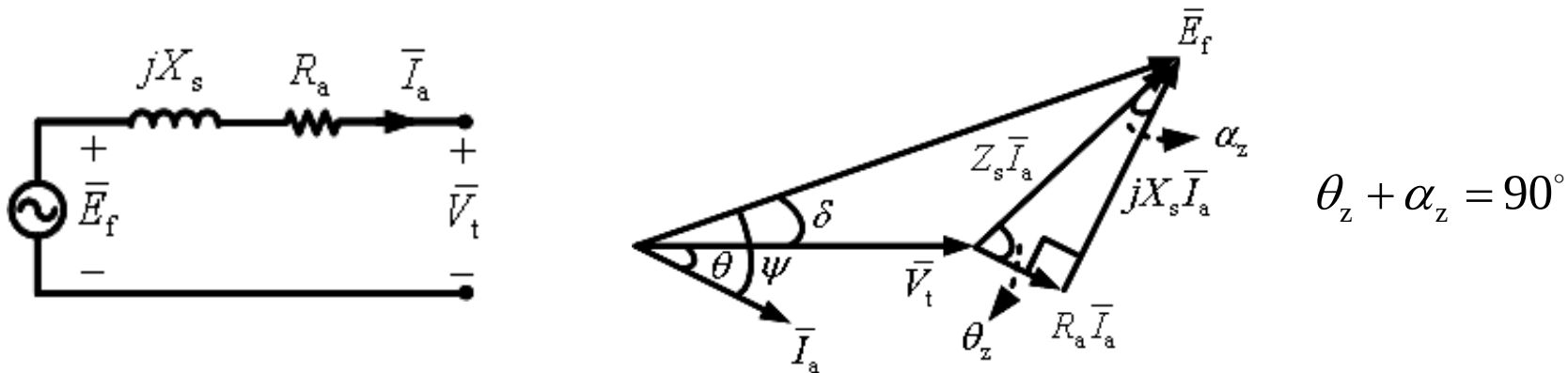
$$\delta < 0$$

در حالت پس فازی

در واقع گشتاور در ماشین های سنکرون از تقابل بین دو میدان F_f و F_r به وجود می آید.
اگر $\delta = 0 \Leftarrow$ گشتاور نداریم.

فصل اول: ماشین های سنکرون

مشخصه های توان و گشتاور در ماشین سنکرون (ژنراتور)



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

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

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

فصل اول: ماشین های سنکرون

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

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

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

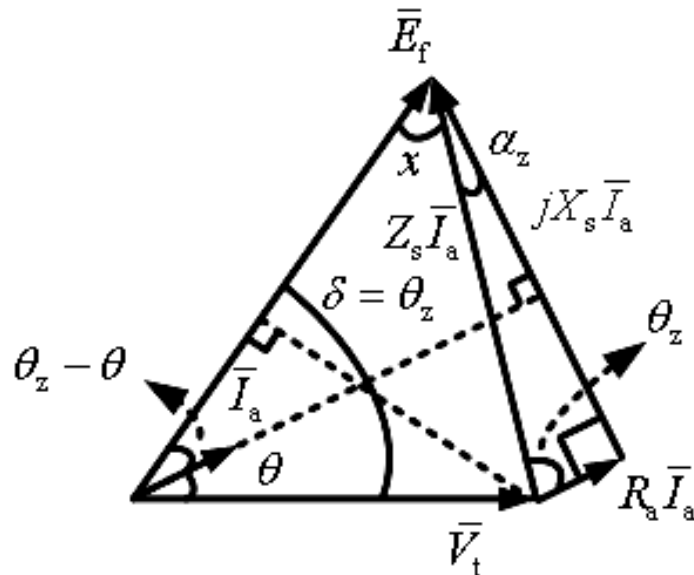
$$\bar{S} = P + jQ \Rightarrow \begin{cases} P = \frac{|\bar{V}_t| |\bar{E}_f|}{|Z_s|} \cos(\theta_z - \delta) - \frac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|} \cos \theta_z \\ Q = \frac{|\bar{V}_t| |\bar{E}_f|}{|Z_s|} \sin(\theta_z - \delta) - \frac{|\bar{V}_t|^2}{|Z_s|} \sin \theta_z \end{cases}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

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

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

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



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

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

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

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

فصل اول: ماشین های سنکرون

حال اگر از R_a صرفه نظر کنیم، داریم:

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

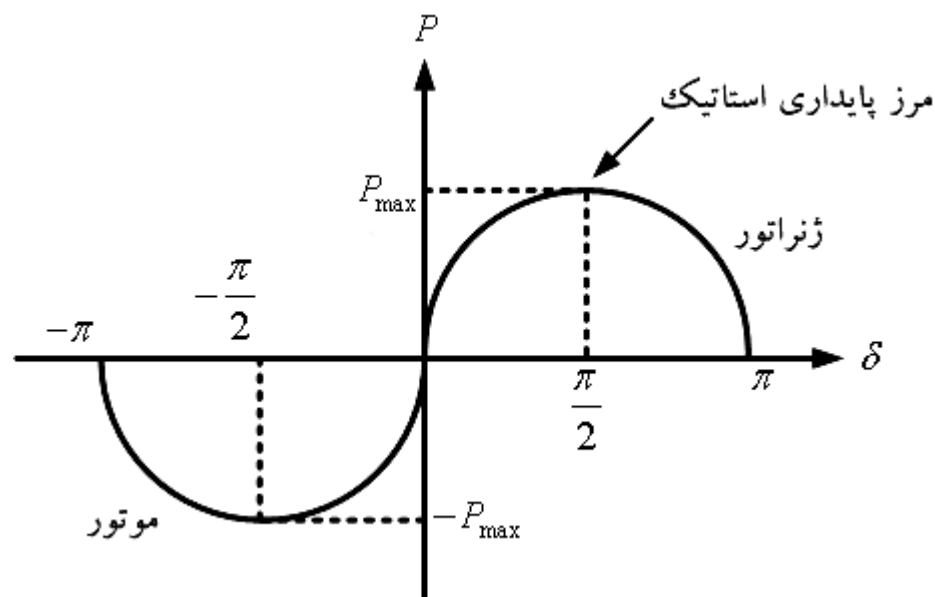
$$P_{\max|\delta=90^\circ} = \frac{|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s}, Q_{|P_{\max}} = -\frac{|\bar{V}_t|^2}{X_s}$$

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:

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

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. $P_{\max}$ (یا $T_{\max}$)

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)

فصل اول: ماشین های سنکرون

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.

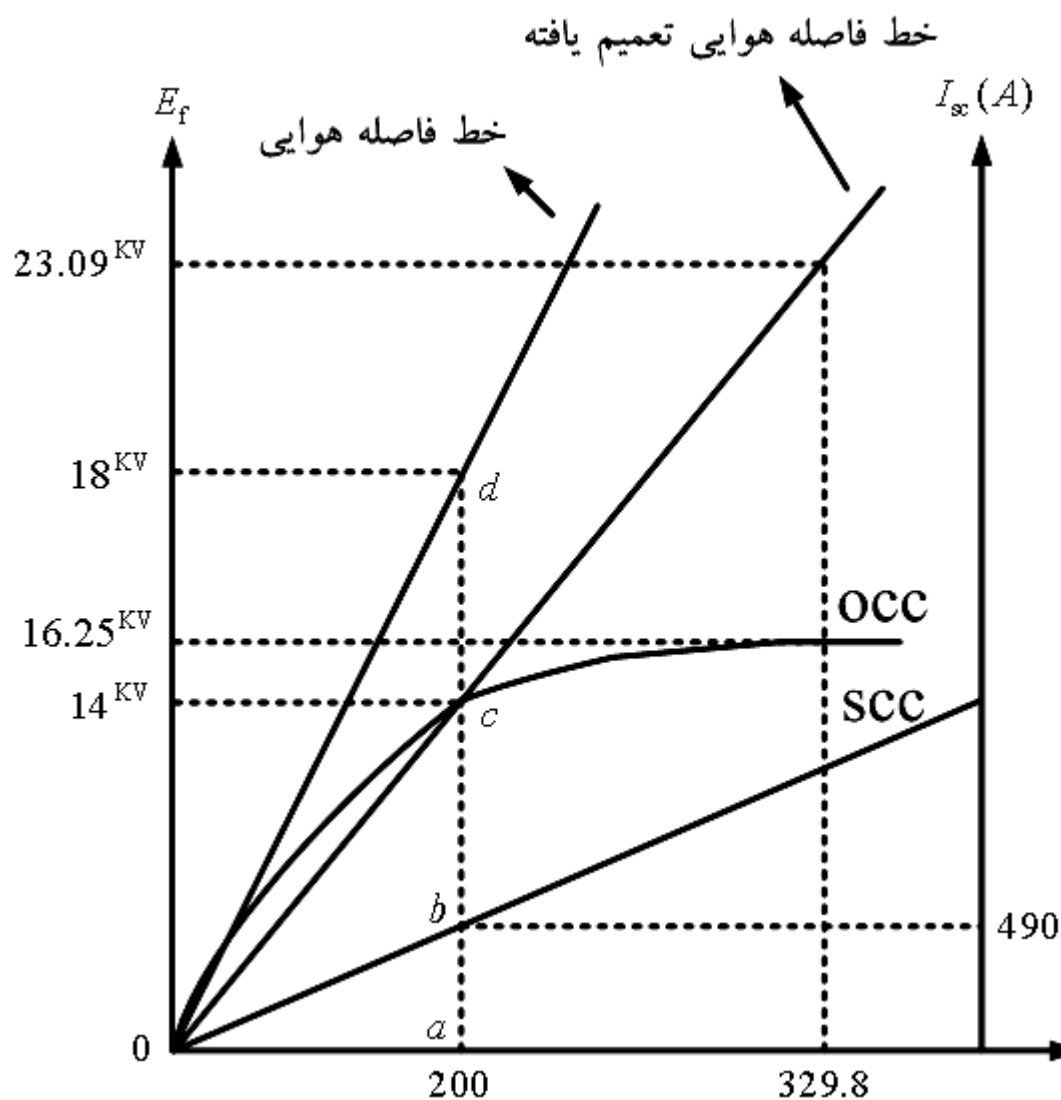
فصل اول: ماشین های سنکرون

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		

فصل اول: ماشین های سنکرون



حل: الف)

$$V_b = \frac{14000}{\sqrt{3}} = 8083 \text{ V/phase}$$

$$I_b = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 14000} = 412.41 \text{ A}$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{8083}{412.41} = 19.6 \Omega$$

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

فصل اول: ماشین های سنکرون

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

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

$$\bar{V}_t = 1^{\text{pu}} \angle 0^\circ, \quad pf = \cos \theta = 0.8 \, \text{lag} \rightarrow \theta = 36.87^\circ, \quad \bar{I}_a = 1^{\text{pu}} \angle -36.87^\circ \quad (\text{ب})$$

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

$$\bar{E}_f = 1 \angle 0^\circ + (0.84 \angle 89.8^\circ)(1 \angle -36.87^\circ) = 1.649^{\text{pu}} \angle 24^\circ \text{ or } 23.09^{\text{kv}} \angle 24^\circ$$

$$\Rightarrow |\bar{E}_f| = 23.09 \, \text{kv} \rightarrow I_f = 329.8 \, \text{A} \quad \text{از روی جدول و منحنی:}$$

(ج)

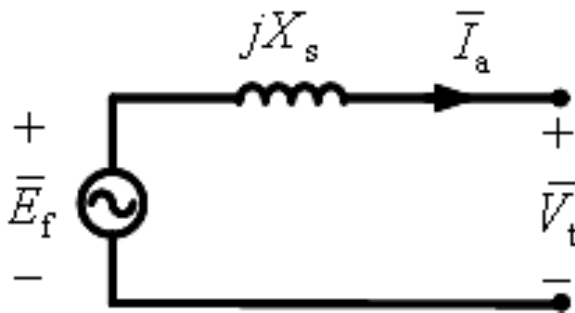
$$|\bar{E}_f| = |\bar{V}_t| = 16.25 \, \text{kv} \quad \text{از روی جدول و منحنی:}$$

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).

فصل اول: ماشین های سنکرون

(حل: الف)



$$\bar{V}_t = \frac{208}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 120^V \angle 0^\circ, \quad \bar{I}_a = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 208} \angle -36.87^\circ = 13.88^A \angle -36.87^\circ$$

$$\bar{E}_f = \bar{V}_t + Z_s \bar{I}_a = 120 \angle 0^\circ + (j8)(13.88 \angle -36.87^\circ) = 206.9^V \angle 25.5^\circ$$

$$\Rightarrow |\bar{E}_f|_{\text{Line}} = \sqrt{3} \times 206.9 = 358.4 \text{ V}, \quad \delta = 25.5^\circ$$

(ب)

$$|\bar{E}'_f| = 1.2 \times 206.9 = 248.28 \text{ V} \quad (E_f \propto n_s I_f)$$

$$P = P' \text{ (توان اکتیو ثابت)} \rightarrow 3 \frac{|\bar{V}_t| |\bar{E}_f|}{X_s} \sin \delta = 3 \frac{|\bar{V}_t| |\bar{E}'_f|}{X_s} \sin \delta'$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

$$\Rightarrow |\bar{E}_f| \sin \delta = |\bar{E}'_f| \sin \delta' \Rightarrow \delta' = \sin^{-1} \left(\frac{|\bar{E}_f| \sin \delta}{|\bar{E}'_f|} \right) = 21^\circ, \quad \bar{I}_a = \frac{\bar{E}'_f - \bar{V}_t}{jX_s}$$

$$\Rightarrow \bar{I}_a = \frac{248.28 \angle 21^\circ - 120 \angle 0^\circ}{j8} = 17.86^A \angle -51.5^\circ, \quad pf = \cos(51.5^\circ) = 0.62 \text{ lag}$$

$$Q = 3 \left(\frac{|\bar{V}_t| |\bar{E}'_f|}{X_s} \cos \delta' - \frac{|\bar{V}_t|^2}{X_s} \right) = 3 |\bar{V}_t|_{ph} |\bar{I}_a| \sin \theta = 3 \times 120 \times 17.86 \times \sin(51.5^\circ) = 5030 \text{ VAR}$$

(ج)

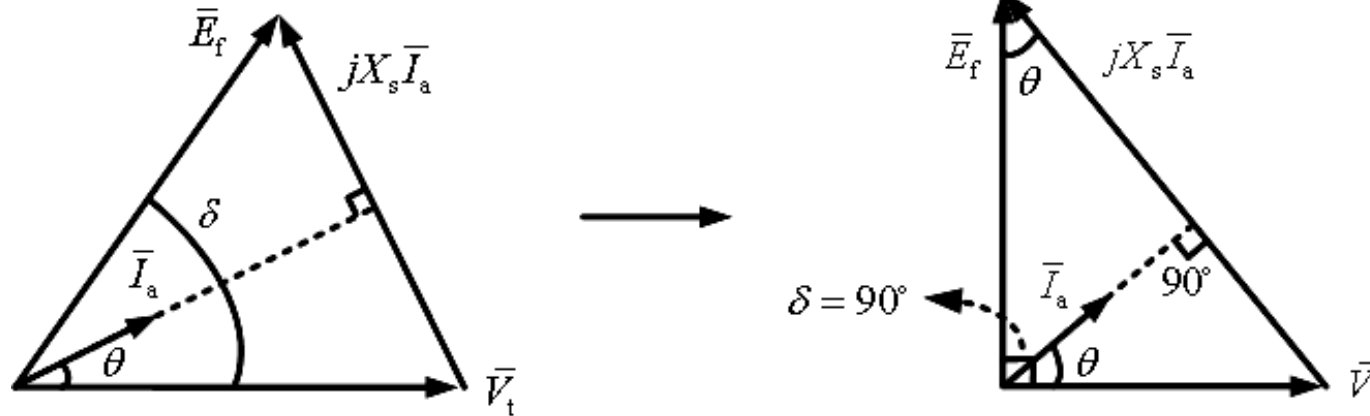
$$P_{\max} \Big|_{\delta=90^\circ} = 3 \frac{|\bar{V}_t| |\bar{E}_f|}{X_s} = 3 \frac{120 \times 206.9}{8} = 9320 \text{ W}, \quad \delta = 90^\circ : (R_a \approx 0) \text{ مرز پایداری}$$

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{E}'_f - \bar{V}_t}{jX_s} = \frac{206.9 \angle 90^\circ - 120 \angle 0^\circ}{j8} = 29.9^A \angle +30.1^\circ, \quad pf = \cos(30.1^\circ) = 0.865 \text{ lead}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

$$Q = 3 \left(\frac{|\bar{V}_t| |\bar{E}_f|}{X_s} \cos \delta - \frac{|\bar{V}_t|^2}{X_s} \right) = 3 \left(\frac{120 \times 206.9}{8} \cos(90^\circ) - \frac{120^2}{8} \right) = -5400 \text{ VAR}$$

راه دوم:



نمودار فازوری در حالت پیش فازی

نمودار فازوری در حالت حداکثر
توان (پیش فازی و $\delta = 90^\circ$)

$$|jX_s \bar{I}_a|^2 = |\bar{E}_f|^2 + |\bar{V}_t|^2 \Rightarrow |\bar{I}_a| = \left(\frac{206.9^2 + 120^2}{8^2} \right)^{1/2} = 29.9 \text{ A} , \theta = \tan^{-1} \left(\frac{120}{206.9} \right) = 30.1^\circ$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

مثال 3: ماشین مثال 2 را به صورت موتور سه فاز مورد بهره برداری قرار می دهیم و آن را به شبکه سه فاز 60 هرتز و 208 ولت متصل می کنیم. جریان مدار تحریک را طوری تنظیم می کنیم تا موتور 3 کیلو وات تحت ضریب توان واحد از شبکه بکشد.

الف) $|\bar{E}_f|$ و δ را به دست آورده و نمودار فازوری ماشین را رسم کنید.

ب) اگر جریان تحریک ثابت باشد و بار بر روی محور به تدریج افزایش یابد، $T_{\max}$ را محاسبه کنید.

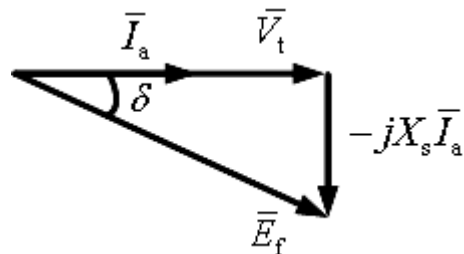
حل: الف) $P_{\text{in}} = 3000 = 3|\bar{V}_t||\bar{I}_a|\cos\theta = 3 \times 120 \times |\bar{I}_a| \times 1 \Rightarrow |\bar{I}_a| = 8.33 \text{ A}$

$$\rightarrow \bar{V}_t = 120^V \angle 0^\circ, \bar{I}_a = 8.33^A \angle 0^\circ, \bar{E}_f = \bar{V}_t - jX_s \bar{I}_a$$

$$\Rightarrow \bar{E}_f = 120 \angle 0^\circ - j8 \times 8.33 \angle 0^\circ = 137.3^V \angle -29^\circ \Rightarrow \delta = -29^\circ < 0$$

زاویه توان

(موتوری)



فصل اول: ماشین های سنکرون

(ب)

$$\delta = -90^\circ \rightarrow P_{\max} = 3 \frac{|\bar{V}_t| |\bar{E}_f|}{X_s} = 3 \frac{120 \times 137.3}{8} = 6179 \text{ W}$$

$$\omega_{\text{syn}} = 2\pi \times \frac{2}{P} f_s = 188.49 \text{ rad/sec}, \quad T_{\max} = \frac{P_{\max}}{\omega_{\text{syn}}} = 32.78 \text{ N.m}$$

مثال 4: ژنراتور سنکرون 6 قطبی، 60 هرتز و 480 ولت با اتصال ستاره دارای راکتانس سنکرون 1 اهم در هر فاز است. جریان بار کامل آرمیچر با ضریب توان پس فاز 0.8 برابر 60 آمپر است. این ژنراتور در بار کامل دارای تلفات باد و اصطکاک 1.5 کیلو وات و تلفات هسته 1 کیلو وات به ازای فرکانس 60 هرتز می باشد. از مقاومت اهمی آرمیچر صرفه نظر می شود. جریان میدان به گونه ای تنظیم می شود که ولتاژ بی باری برابر 480 ولت باشد. الف) سرعت دوران ژنراتور ب) ولتاژ دو سر ژنراتور در شرایط:

۱- جریان نامی و ضریب توان پس فاز 0.8

فصل اول: ماشین های سنکرون

۲- جریان نامی و ضریب توان واحد

۳- جریان نامی و ضریب توان پیش فاز 0.8

ج) وقتی ژنراتور با جریان نامی و ضریب توان 0.8 پس فاز کار می کند، بازده آن چقدر است؟

د) گشتاور محور در بار کامل که محرک اولیه فراهم می کند، چقدر است؟

ه) تنظیم ولتاژ ژنراتور در ضریب توان پس فاز 0.8 چقدر است؟ در ضریب توان واحد و نیز 0.8 پیش فاز چگونه؟

حل: الف)

$$n_s = \frac{2}{P} f_s = 20 \text{ rps or } 1200 \text{ rpm}$$

ب) ۱-

$$|\bar{E}_f| = \frac{480}{\sqrt{3}} \approx 277 \text{ V} , \bar{V}_t = |\bar{V}_t| \angle 0^\circ , \bar{I}_a = 60^A \angle -\cos^{-1}(0.8)$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

$$\bar{E}_f = \bar{V}_t + jX_s \bar{I}_a \rightarrow 277 \angle \delta_1 = |\bar{V}_t|_1 \angle 0^\circ + (j1)(60 \angle -36.87^\circ)$$

$$277 \angle \delta_1 = |\bar{V}_t|_1 + 36 + j48 \Rightarrow 277 = \sqrt{(|\bar{V}_t|_1 + 36)^2 + (48)^2}$$

$$\Rightarrow |\bar{V}_t|_1 = 236.8 \text{ V} , |\bar{V}_t|_1^{\text{Line}} = \sqrt{3} \times 236.8 \approx 410 \text{ V}$$

-۲

$$277 \angle \delta_2 = |\bar{V}_t|_2 \angle 0^\circ + (j1)(60 \angle 0^\circ) = |\bar{V}_t|_2 + j60 \Rightarrow 277 = \sqrt{(|\bar{V}_t|_2)^2 + (60)^2}$$

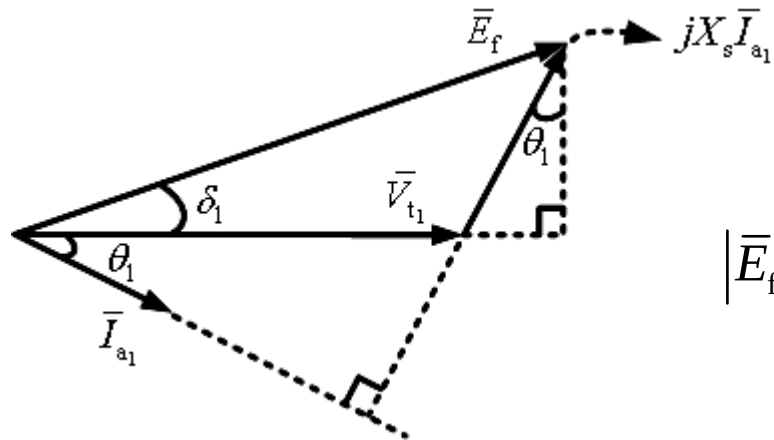
$$\Rightarrow |\bar{V}_t|_2 = 270.4 \text{ V} , |\bar{V}_t|_2^{\text{Line}} = \sqrt{3} \times 270.4 \approx 468.3 \text{ V}$$

-۳

$$277 \angle \delta_3 = |\bar{V}_t|_3 \angle 0^\circ + (j1)(60 \angle +36.87^\circ) = |\bar{V}_t|_3 - 36 + j48$$

$$\Rightarrow 277 = \sqrt{(|\bar{V}_t|_3 - 36)^2 + (48)^2} \Rightarrow |\bar{V}_t|_3 = 308.8 \text{ V} , |\bar{V}_t|_3^{\text{Line}} = \sqrt{3} \times 308.8 \approx 534.9 \text{ V}$$

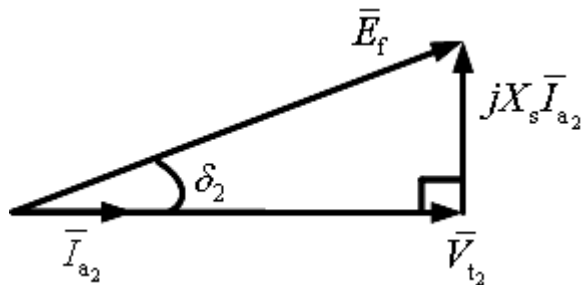
فصل اول: ماشین های سنکرون



-۱

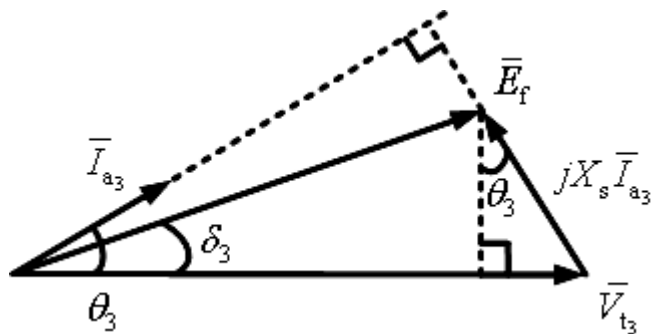
$$|\bar{E}_f|^2 = (|\bar{V}_{t1}| + X_s |\bar{I}_{a1}| \sin \theta_1)^2 + (X_s |\bar{I}_{a1}| \cos \theta_1)^2$$

-۲



$$|\bar{E}_f|^2 = (|\bar{V}_{t2}|)^2 + (X_s |\bar{I}_{a2}|)^2$$

-۳



$$|\bar{E}_f|^2 = (|\bar{V}_{t3}| - X_s |\bar{I}_{a3}| \sin \theta_3)^2 + (X_s |\bar{I}_{a3}| \cos \theta_3)^2$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

(ج)

$$P_{out} = 3|\bar{V}_t||\bar{I}_{a1}|\cos\theta_1 = 3(236.8)(60)(0.8) \approx 34.1 \text{ KW}$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{elec. Loss} + P_{core Loss} + P_{mech. Loss} = 34.1 + 0 + 1 + 1.5 = 36.6 \text{ KW}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{34.1}{36.6} \times 100 = 93.2 \% \text{ بازده}$$

(د)

$$\tau_{apply} = \frac{P_{in}}{\omega_m} = \frac{P_{in}}{\omega_{syn}} = \frac{36.6 \times 10^3}{2\pi \times 20} = 291.2 \text{ N.m} , \tau_{conversion} = \frac{34.1 \times 10^3}{2\pi \times 20} = 271.4 \text{ N.m}$$

(ه)

$$\%VR = \frac{|\bar{V}_t|_{NL} - |\bar{V}_t|_{FL}}{|\bar{V}_t|_{FL}} \times 100 , (\%VR)_1 = \frac{480 - 410}{410} \times 100 = 17.1 \%$$

$$(\%VR)_2 = \frac{480 - 468.3}{468.3} \times 100 = 2.5 \% , (\%VR)_3 = \frac{480 - 534.9}{534.9} \times 100 = -10.3 \%$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

مکان هندسی توان مختلط

$$\bar{S} = P + jQ, \quad P = \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s} \sin \delta, \quad Q = \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s} \cos \delta - \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_s}$$

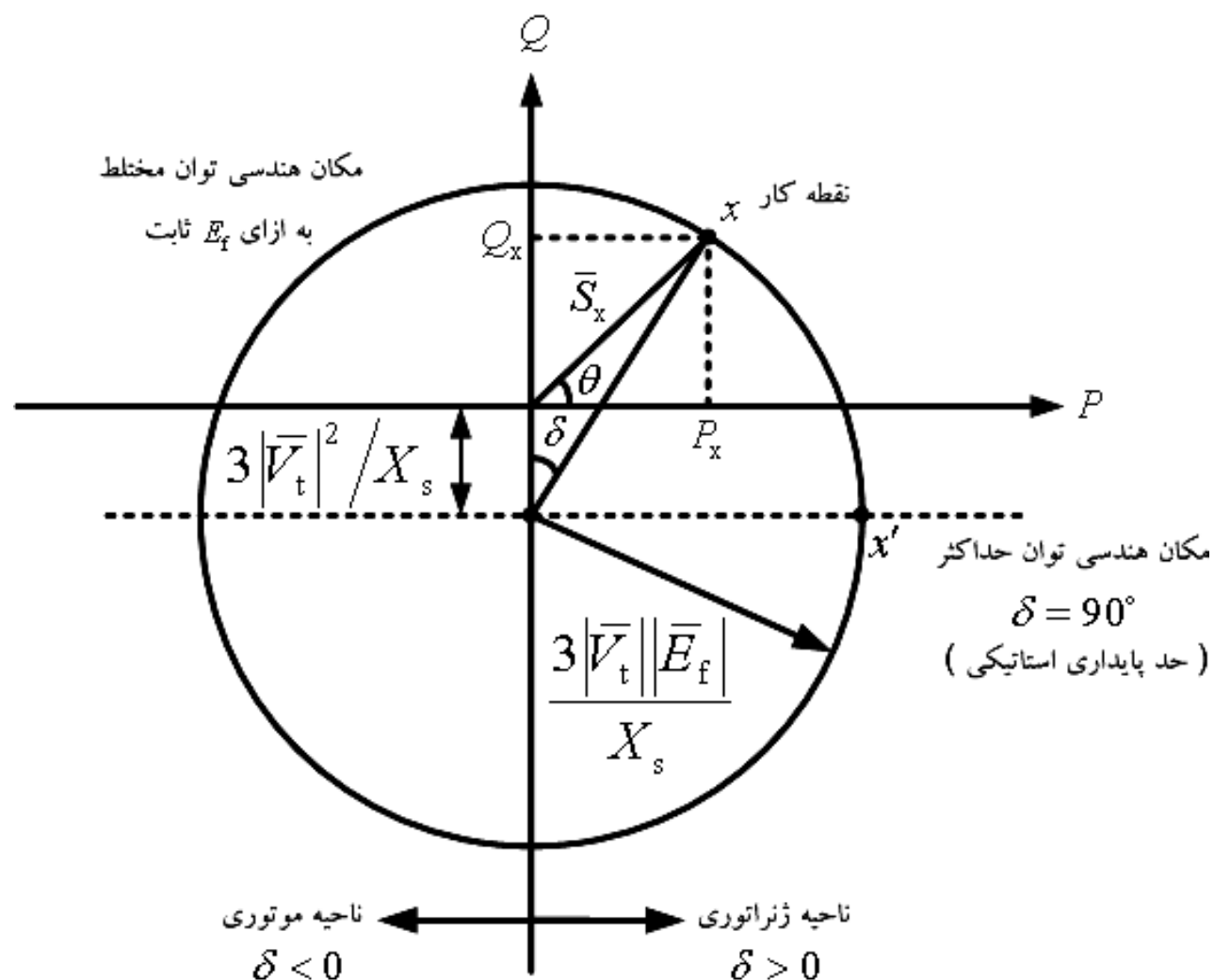
$$\Rightarrow P^2 = \left(\frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s} \right)^2 \sin^2 \delta, \quad \left(Q + \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s} \right)^2 \cos^2 \delta$$

$$\Rightarrow P^2 + \left(Q + \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s} \right)^2 (\sin^2 \delta + \cos^2 \delta) = \left(\frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s} \right)^2$$

$$\Rightarrow P^2 + \left(Q + \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s} \right)^2$$

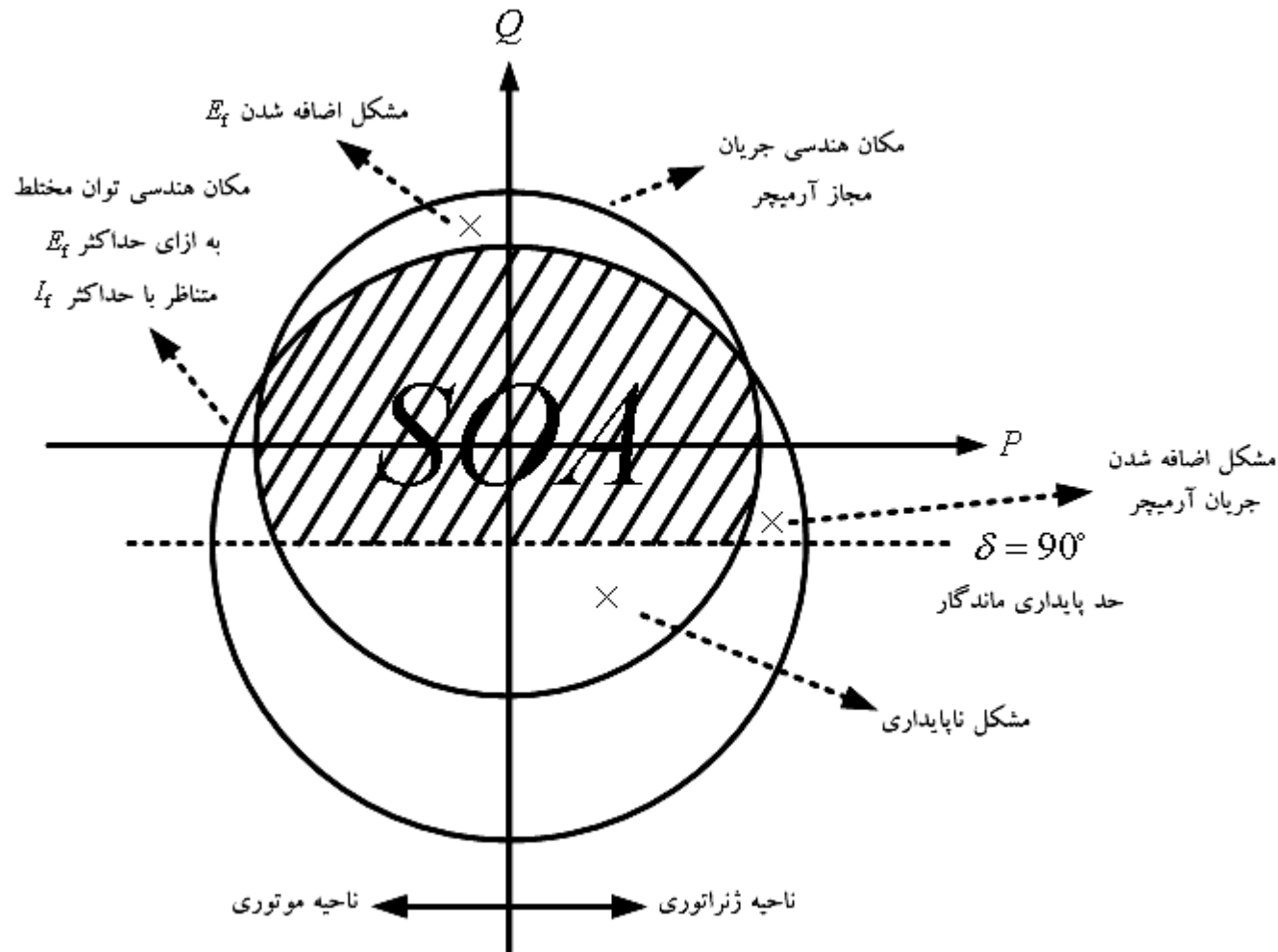
$$\text{معادله دایره: } (X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 = R^2 \Rightarrow X_0 = 0, \quad Y_0 = -\frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_s}, \quad R = \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون



فصل اول: ماشین های سنکرون

ناحیه کار ایمن: SOA :: Safe Operating Area



$$\begin{aligned}\bar{S} &= P + jQ \\ \Rightarrow |\bar{S}| &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\ &= 3|\bar{V}_t||\bar{I}_a|\end{aligned}$$

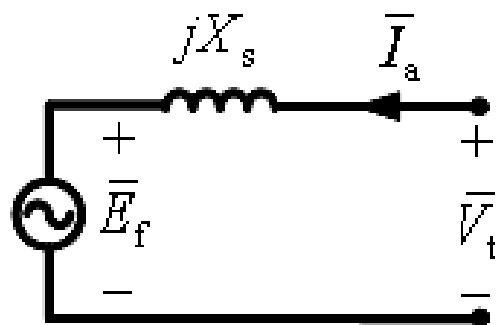
فصل اول: ماشین های سنکرون

کنترل ضریب توان

یکی از مزایای عمده موتورهای سنکرون سه فاز آن است که ضریب توان موتور را می توان با تغییر جریان تحریک (I_f) کنترل نمود. فرض کنید که موتور سنکرونی به شبکه بینهایت وصل باشد و توان اکتیو آن ثابت باشد. (بار موتور ثابت است.) با فرض ناچیز بودن مقاومت آرمیچر داریم:

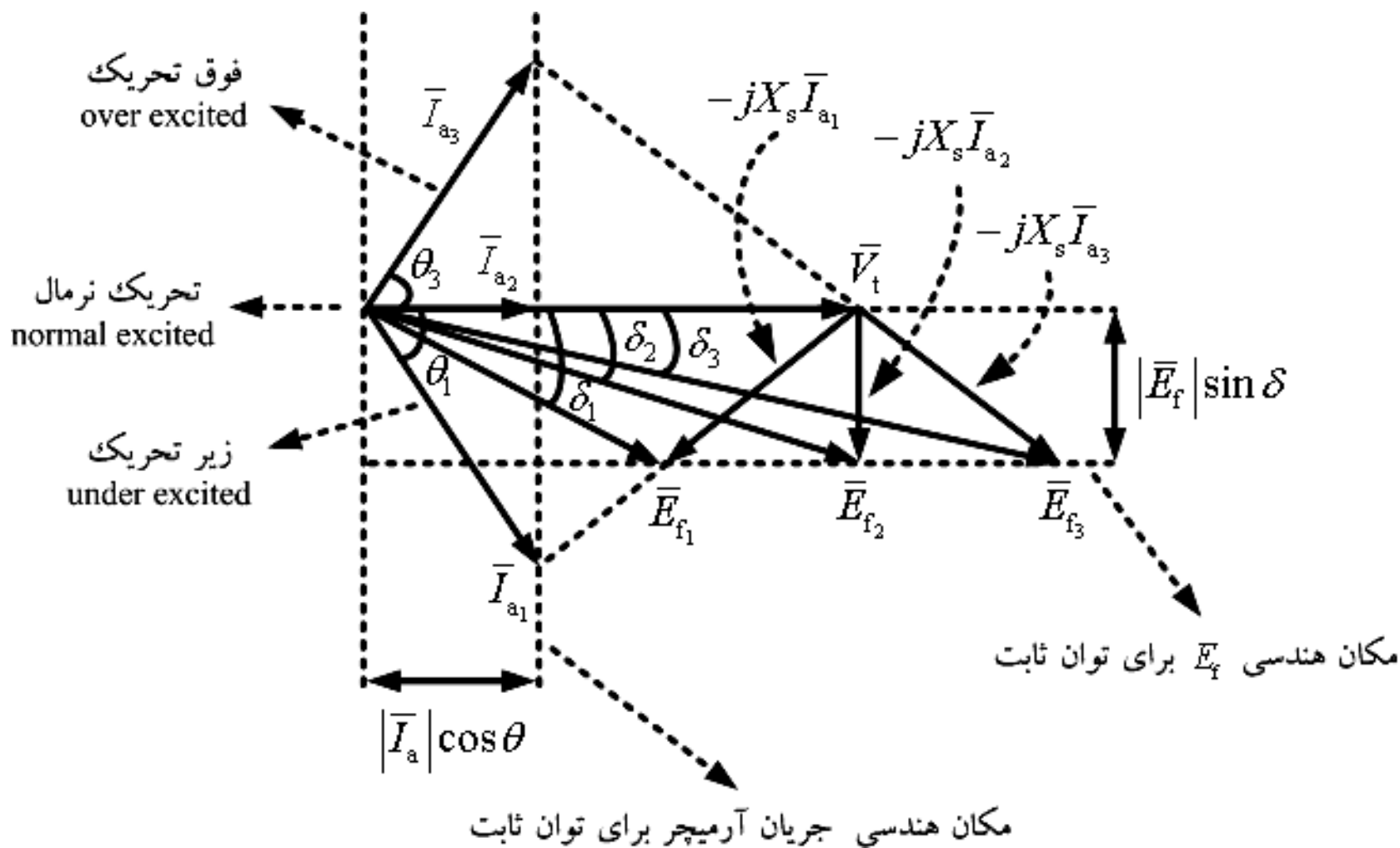
$$P = 3|\bar{V}_t||\bar{I}_a|\cos\theta = \text{ثابت}$$

$$\Rightarrow |\bar{I}_a|\cos\theta = \text{ثابت}, \quad P = \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_s}\sin\delta = \text{ثابت} \Rightarrow |\bar{E}_f|\sin\delta = \text{ثابت}$$



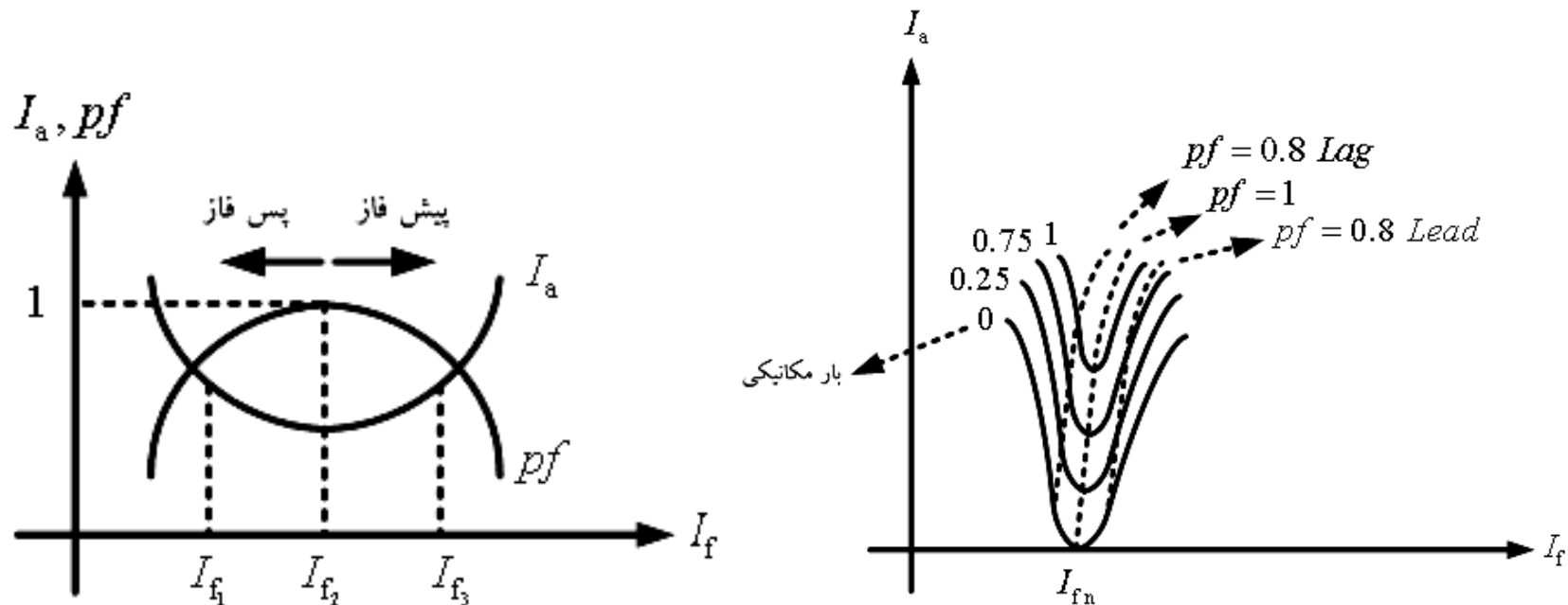
$$\bar{E}_f = \bar{V}_t - jX_s\bar{I}_a$$

فصل اول: ماشین های سنکرون



فصل اول: ماشین های سنکرون

نکته: در حالت زیر تحریک موتور از شبکه P و Q می کشد (حالت پس فاز) و در حالت فوق تحریک موتور از شبکه P می کشد ولی Q به شبکه تزریق می کند (حالت پیش فاز) و در حالت تحریک عادی یا نرمال موتور فقط P از شبکه می کشد (ضریب توان واحد). شکل زیر منحنی تغییرات جریان آرمیچر بر حسب جریان تحریک را تحت توان اکتیو ثابت نشان می دهد که به منحنی V معروف است. منحنی تغییرات ضریب توان (pf) بر حسب جریان تحریک به منحنی V وارونه معروف است.



فصل اول: ماشین های سنکرون

نکته: از این مزیت موتور سنکرون می توان استفاده کرد و ضریب توان کارخانجات را بهبود بخشید زیرا در حالت فوق تحریک، موتور همانند خازن عمل می کند و می تواند Q به شبکه تزریق کند. اگر موتور سنکرون در حالت بی باری مورد استفاده قرار گیرد، (توان اکتیو صفر) در این صورت با تغییر جریان تحریک می توان آن را به صورت یک خازن و یا یک سلف مورد بهره برداری قرار داد. در شرایط فوق تحریک و زیر تحریک ضریب توان موتور بی بار صفر است. موتورهای سنکرون بی بار را کندانسور سنکرون می نامند و برای تنظیم ولتاژ انتهای خطوط انتقال انرژی مورد استفاده قرار می گیرند.

مثال: یک موتور سنکرون سه فاز 5 مگا ولت آمپری، 60 هرتز و 11 کیلو ولتی مفروض است. مقاومت استاتور ناچیز و راکتانس سنکرون 10 اهم است. ماشین به شبکه 11 کیلو ولتی و 60 هرتزی وصل است و در شرایط کندانسور سنکرون مورد بهره برداری قرار می گیرد. از تلفات چرخشی (هسته + مکانیکی) صرفه نظر می شود.

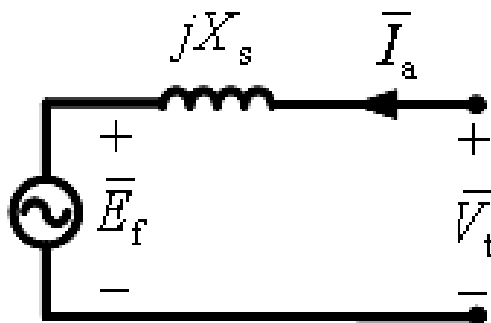
الف) در حالت تحریک نرمال جریان استاتور را بیابید و نمودار فازوری را رسم کنید.

فصل اول: ماشین های سنکرون

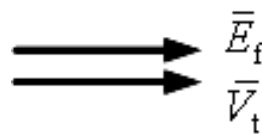
- ب) اگر جریان تحریک به میزان 50% نسبت به حالت تحریک نرمال افزایش یابد، جریان استاتور و ضریب توان را به دست آورده و نمودار فازوری را رسم کنید.
- ج) اگر جریان تحریک به میزان 50% نسبت به حالت تحریک نرمال کاهش یابد، جریان استاتور و ضریب توان را به دست آورده و نمودار فازوری را رسم کنید.
- د) اگر تلفات چرخشی موتور 80 کیلو وات باشد، در حالت تحریک نرمال، جریان استاتور و E_f را حساب کرده و نمودار فازوری را رسم کنید.

حل: الف)

$$\cos \theta = 1, P = 3|\bar{V}_t||\bar{I}_a|\cos \theta = 0 \Rightarrow |\bar{I}_a| = 0$$



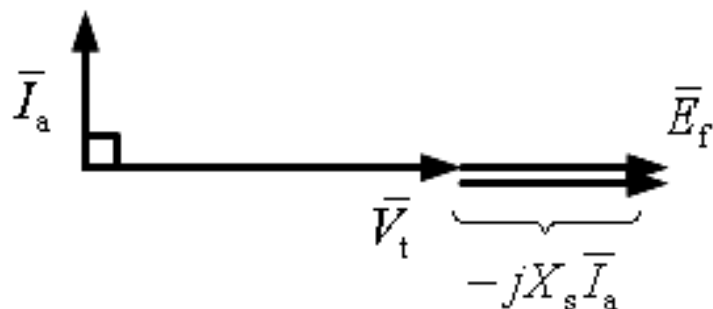
$$\bar{I}_a = 0 \Rightarrow \bar{V}_t = \bar{E}_f = \frac{11000}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 6350.9 \text{ V}$$



فصل اول: ماشین های سنکرون

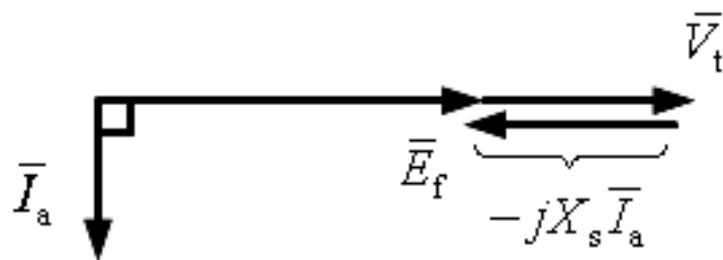
(ب) پیشفاز

$$\delta = 0 \Rightarrow \bar{I}_a = \frac{6350.9 \angle 0^\circ - 1.5 \times 6350.9 \angle 0^\circ}{j10} = 317.55^A \angle +90^\circ$$



(ج) پسفاز

$$\delta = 0 \Rightarrow \bar{I}_a = \frac{6350.9 \angle 0^\circ - 0.5 \times 6350.9 \angle 0^\circ}{j10} = 317.55^A \angle -90^\circ$$

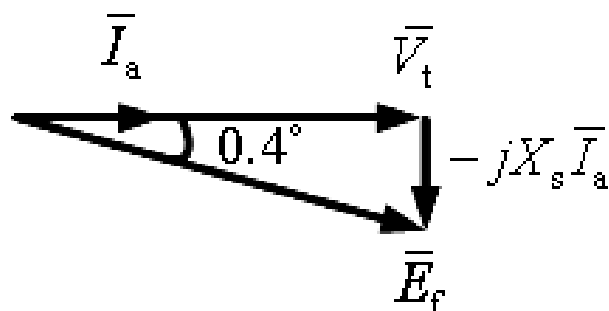


فصل اول: ماشین های سنکرون

(د)

$$P = 3|\bar{V}_t||\bar{I}_a|\cos\theta = 80000, \cos\theta = 1, |\bar{V}_t| = 6350.9 \text{ V}$$

$$\Rightarrow |\bar{I}_a| = 4.2 \text{ A}, \bar{E}_f = \bar{V}_t - jX_s\bar{I}_a = 6350.9\angle 0^\circ - 4.2 \times 10\angle +90^\circ = 6351\angle -0.4^\circ$$

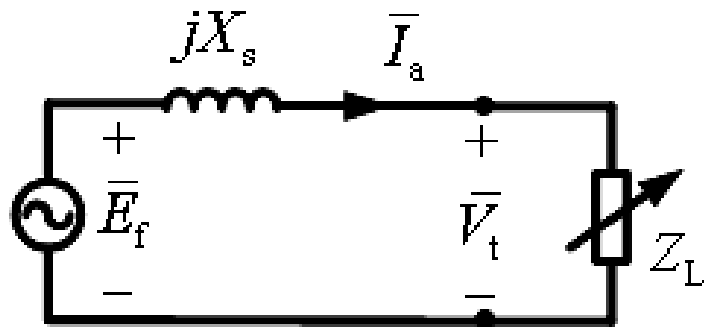


ژنراتورهای سنکرون مستقل

ژنراتورهای سنکرون عمدتاً به شبکه بینهایت وصل اند و شبکه به هم پیوسته را تغذیه می کنند. اما ژنراتورهای کوچکی هم یافت می شوند که بار محلی و مستقلی را تغذیه می کنند. (مانند ژنراتورهای اضطراری در بیمارستانها، ادارات، کارخانجات و ...) در اینگونه ژنراتورها، موتورهای دیزل اغلب محرک اولیه آنها هستند و محور را تحت سرعت ثابت سنکرون به چرخش در می آورند.

فصل اول: ماشین های سنکرون

با تغییر بار ژنراتور مستقل، ولتاژ پایانه آن تغییر می کند. بر روی این ژنراتورها معمولاً تنظیم کننده ولتاژ اتوماتیک (AVR: Automatic Voltage Regulator) نصب می شود تا جریان تحریک را جهت حصول به V_t ثابت، کنترل نماید.



در حالت بی باری: $\bar{I}_a = 0$, $|\bar{V}_t| = |\bar{E}_f|$

در حالت اتصال کوتاه: $\bar{V}_t = 0$, $\bar{I}_a = \frac{\bar{E}_f}{jX_s} = \bar{I}_{sc}$

در نتیجه اگر جریان بار بین صفر و $|\bar{E}_f|/X_s$ تغییر کند، در این صورت ولتاژ پایانه $(|\bar{V}_t|)$ بین $|\bar{E}_f|$ و صفر تغییر خواهد کرد. لذا اگر جریان تحریک (I_f) در اثناء تغییرات جریان بار، ثابت بماند، ولتاژ پایانه $(|\bar{V}_t|)$ در محدوده وسیعی تغییر خواهد کرد و تنظیم ولتاژ بسیار نامطلوب خواهد بود.

فصل اول: ماشین های سنکرون

برای بار سلفی داریم:

$$Z_L = jX_L$$

$$\bar{V}_t = \bar{E}_f - jX_s \bar{I}_a = jX_s \bar{I}_{sc} - jX_s \bar{I}_a = jX_s (\bar{I}_{sc} - \bar{I}_a)$$

$$\Rightarrow |\bar{V}_t| \angle 0^\circ = jX_s (|\bar{I}_{sc}| \angle -90^\circ - |\bar{I}_a| \angle -90^\circ) = jX_s (-j(|\bar{I}_{sc}| - |\bar{I}_a|)) = X_s (|\bar{I}_{sc}| - |\bar{I}_a|)$$

$$\Rightarrow |\bar{V}_t| = X_s (|\bar{I}_{sc}| - |\bar{I}_a|) \quad (1)$$

و برای بار مقاومتی:

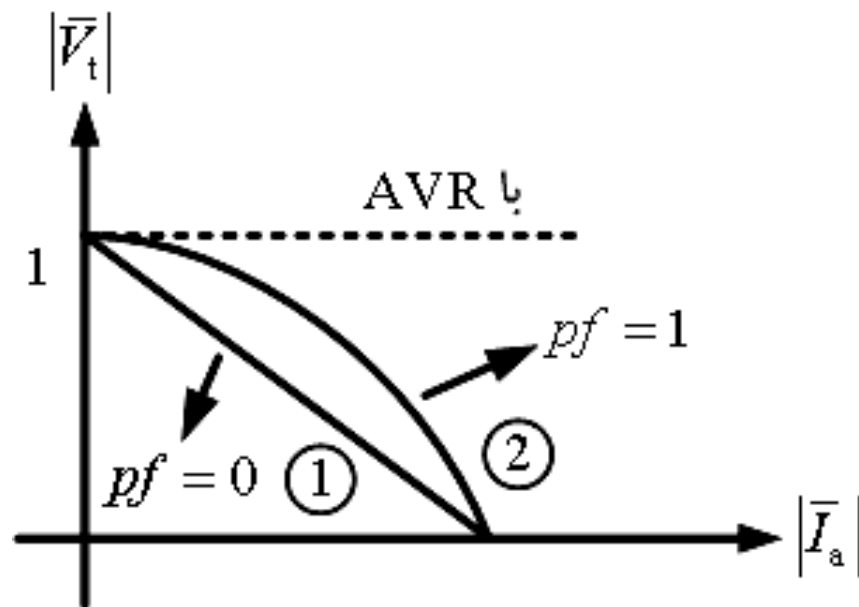
$$|\bar{I}_a| = \frac{|\bar{E}_f|}{\sqrt{R_L^2 + X_s^2}} = \frac{X_s |\bar{I}_{sc}|}{\sqrt{R_L^2 + X_s^2}} \Rightarrow |\bar{I}_a|^2 (R_L^2 + X_s^2) = X_s^2 |\bar{I}_{sc}|^2$$

$$\bar{V}_t = R_L \bar{I}_a \Rightarrow R_L^2 = \frac{|\bar{V}_t|^2}{|\bar{I}_a|^2} \Rightarrow |\bar{I}_a|^2 \left(\frac{|\bar{V}_t|^2}{|\bar{I}_a|^2} + X_s^2 \right) = X_s^2 |\bar{I}_{sc}|^2$$

$$\Rightarrow |\bar{V}_t|^2 + X_s^2 |\bar{I}_a|^2 = X_s^2 |\bar{I}_{sc}|^2 \Rightarrow \frac{|\bar{V}_t|^2}{(X_s |\bar{I}_{sc}|)^2} + \frac{|\bar{I}_a|^2}{|\bar{I}_{sc}|^2} = 1 \quad (2)$$

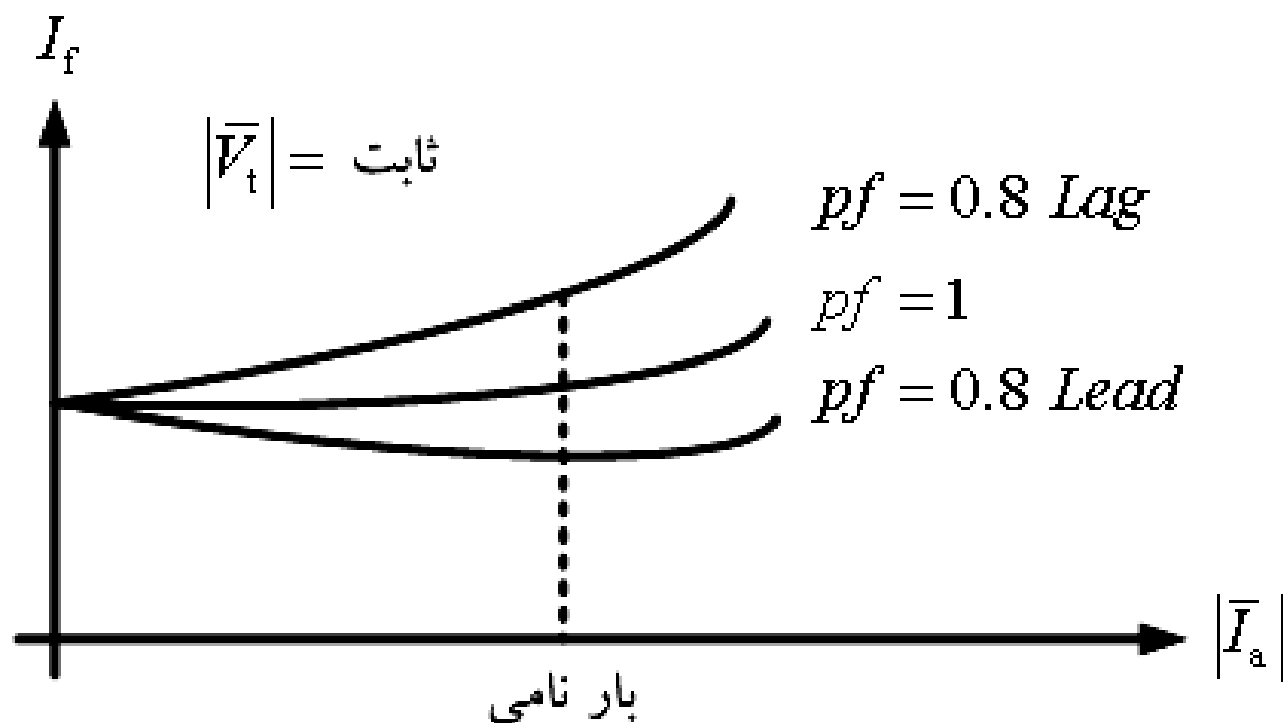
فصل اول: ماشین های سنکرون

رابطه ① تغییرات خطی $\bar{V}_t$ بر حسب $\bar{I}_a$ را نمایان می سازد و رابطه ② یک ربع بیضی را نشان می دهد.



در ضریب توان های کم و جریان های زیاد $|\bar{I}_a|$ ، ولتاژ پایانه به شدت سقوط می کند.

فصل اول: ماشین های سنکرون



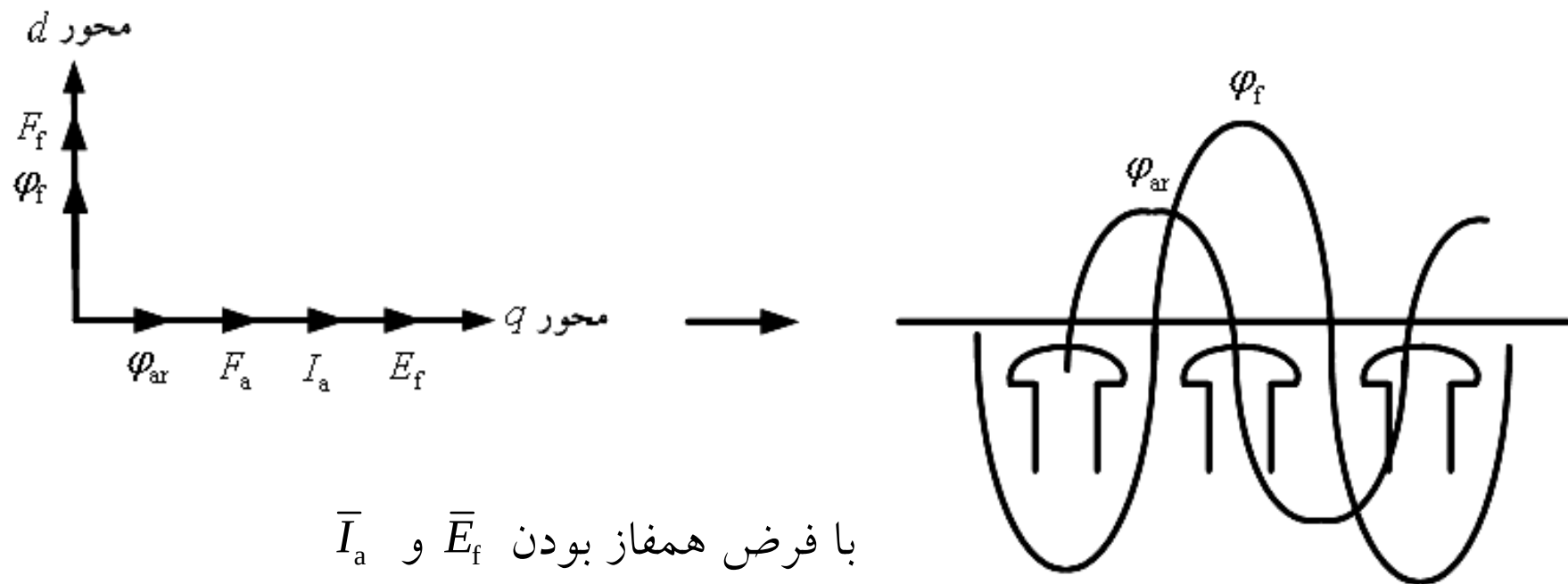
منحنی شکل روبرو تغییرات جریان تحریک مورد نیاز جهت ثابت نگه داشتن $|\bar{V}_t|$ در ازاء جریان های مختلف $|I_a|$ را نشان می دهد.

فصل اول: ماشین های سنکرون

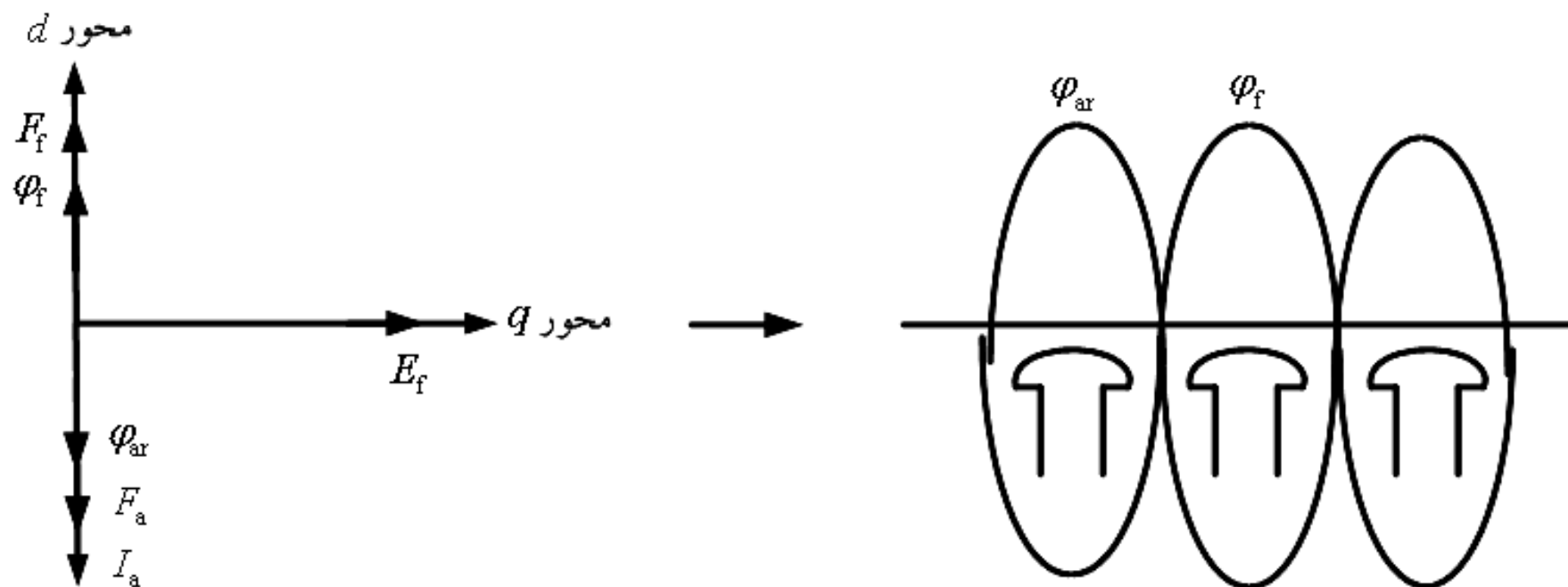
ژنراتورهای سنکرون قطب برجسته

در ماشین های سنکرون قطب برجسته با شکاف هوایی غیر یکنواخت روبرو هستیم. لذا عکس العمل آرمیچر یا mmf آرمیچر، شار بیشتری در امتداد محور قطب ها که به محور مستقیم (Direct axis) معروف است، تولید می کند. علت این امر آن است که طول شکاف هوایی در این امتداد بسیار کم است. همچنین واضح است که عکس العمل آرمیچر یا mmf آرمیچر شار کمتری در امتداد محور متعامد که به محور عرضی (Quadrature axis) معروف است، تولید می کند، زیرا طول فاصله هوایی در این امتداد نسبتاً زیاد است. در ماشین های روتور استوانه ای شار در کلیه نقاط فاصله هوایی یکسان است، زیرا در این ماشین ها، شکاف هوایی یکنواخت است. در نتیجه راکتانس X_{ar} که مدل عکس العمل آرمیچر در ماشین های با روتور استوانه ای است، دیگر جهت مدل سازی عکس العمل آرمیچر در ماشین های قطب برجسته قابل قبول نخواهد بود.

فصل اول: ماشین های سنکرون

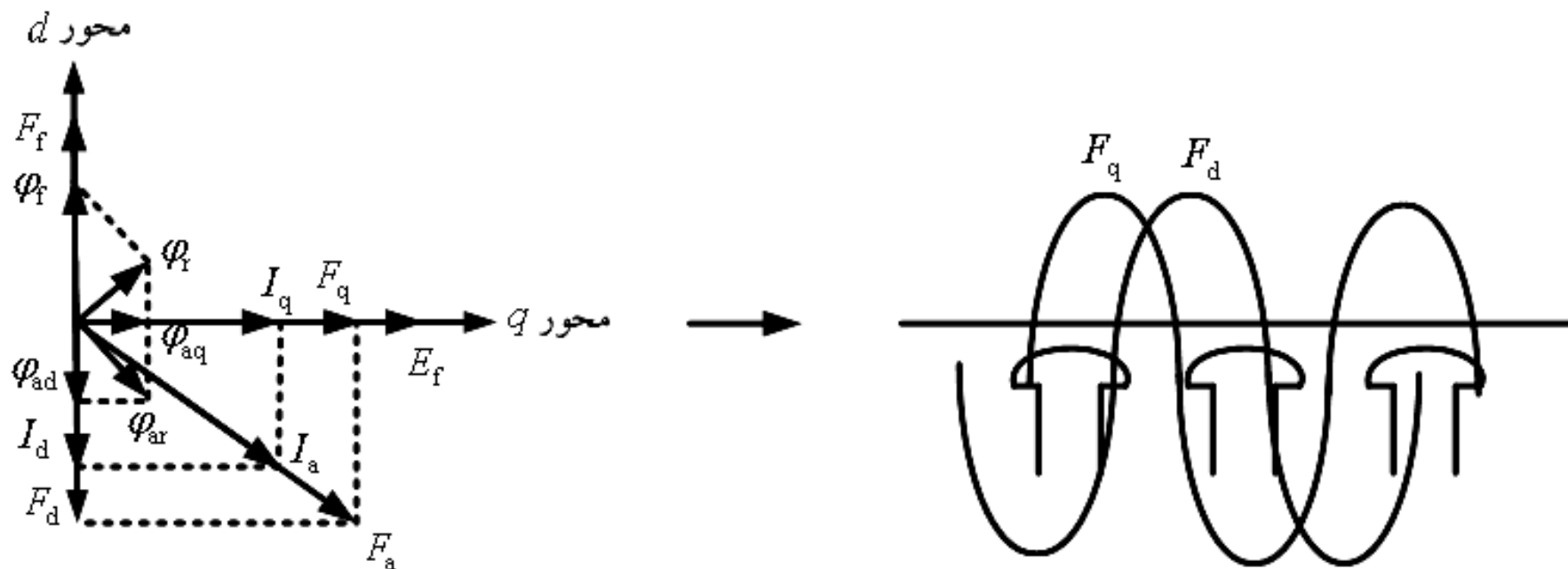


فصل اول: ماشین های سنکرون



با فرض اختلاف فاز 90° بین $\bar{E}_f$ و $\bar{I}_a$
(پس فاز)

فصل اول: ماشین های سنکرون



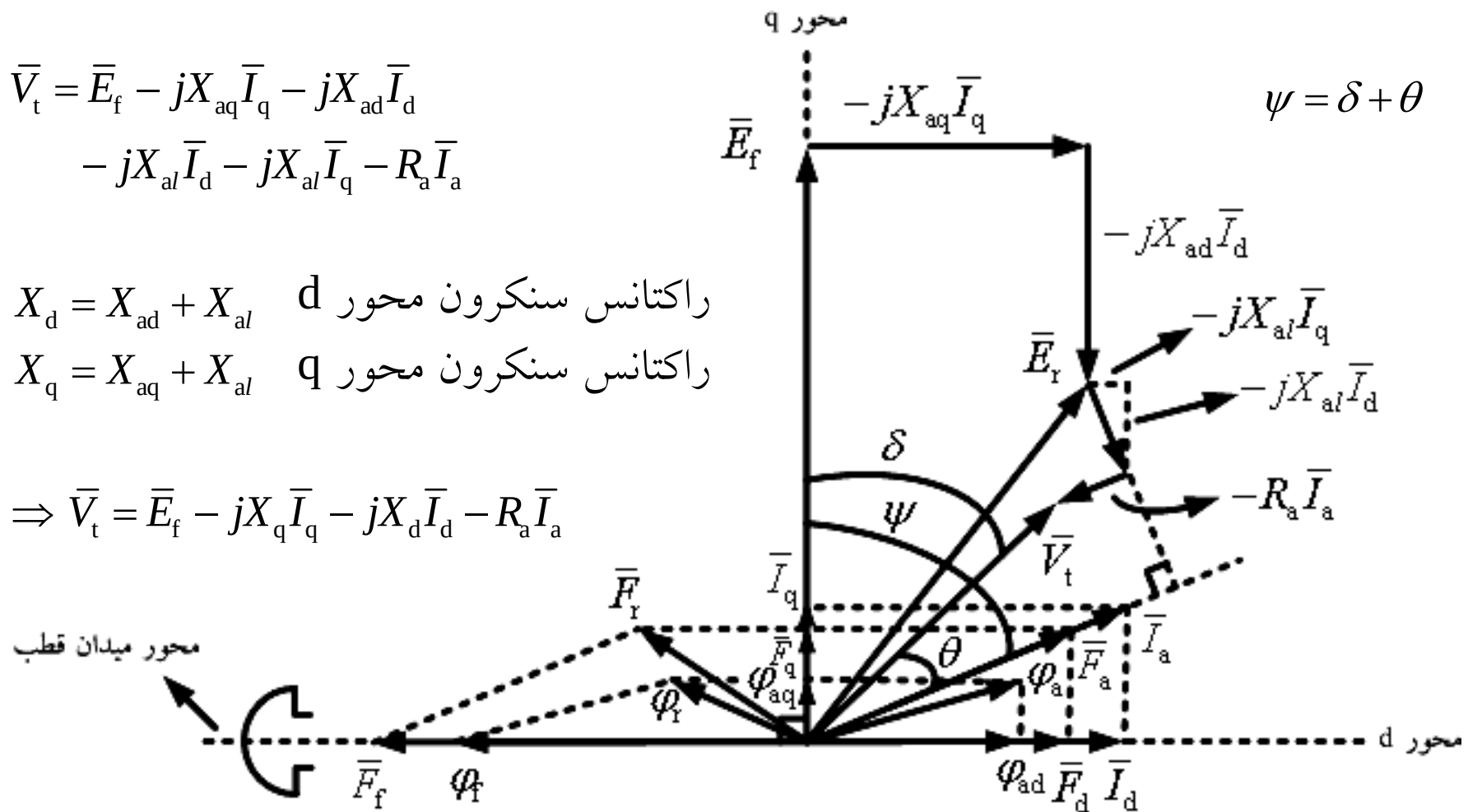
در نتیجه چون X_{ar} ثابت نیست، X_s ثابت نداریم. ملاحظه می شود که اگر ψ زاویه پس فاز باشد، مؤلفه محور طولی F_d ضد مغناطیس کننده است و بلعکس اگر ψ زاویه پیش فاز باشد، مؤلفه محور طولی F_d مغناطیس کننده است. مؤلفه محور عرضی F_q تنها در موج شار میدان، اعوجاج ایجاد می کند.

دیاگرام فازوری ژنراتور سنکرون قطب برجسته در حالت پس فازی

$$\psi = \delta + \theta$$

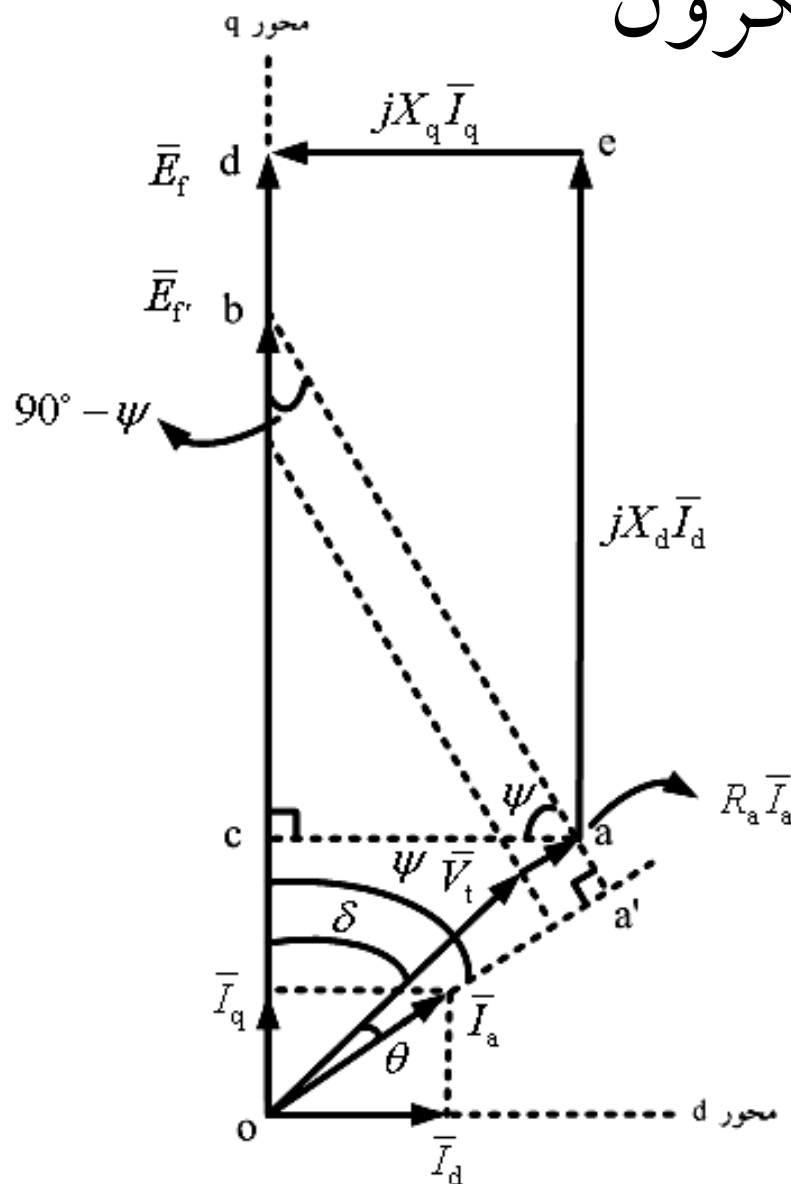
$$X_q = X_{aq} + X_{al} \quad \text{q راکتانس سنکرون محور}$$

$$\Rightarrow \bar{V}_t = \bar{E}_f - jX_q \bar{I}_q - jX_d \bar{I}_d - R_a \bar{I}_a$$



فصل اول: ماشین های سنکرون

دیاگرام فازوری ژنراتور سنکرون
در حالت پس فازی



$$\cos(\psi) = \frac{ac}{ab} \Rightarrow ac = ab \cos(\psi)$$

$$ed = |jX_q \bar{I}_q| = X_q |\bar{I}_q|, \quad \cos(\psi) = \frac{|\bar{I}_q|}{|\bar{I}_a|}$$

$$\Rightarrow |\bar{I}_q| = |\bar{I}_a| \cos(\psi) \Rightarrow ed = X_q |\bar{I}_a| \cos(\psi)$$

$$ac = ed \Rightarrow ab \cos(\psi) = X_q |\bar{I}_a| \cos(\psi)$$

$$\Rightarrow ab = X_q |\bar{I}_a|, \quad \vec{ab} = jX_q \bar{I}_a$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

$$bd = cd - cb, \quad cd = X_d |\bar{I}_d|, \quad \sin(\psi) = \frac{cb}{X_q |\bar{I}_a|} \Rightarrow cb = X_q |\bar{I}_a| \sin(\psi)$$

$$\Rightarrow bd = X_d |\bar{I}_d| - X_q |\bar{I}_a| \sin(\psi), \quad \sin(\psi) = \frac{|\bar{I}_d|}{|\bar{I}_a|} \Rightarrow |\bar{I}_d| = |\bar{I}_a| \sin(\psi)$$

$$\Rightarrow bd = X_d |\bar{I}_d| - X_q |\bar{I}_d| = (X_d - X_q) |\bar{I}_d| \Rightarrow \vec{bd} = j(X_d - X_q) \bar{I}_d$$

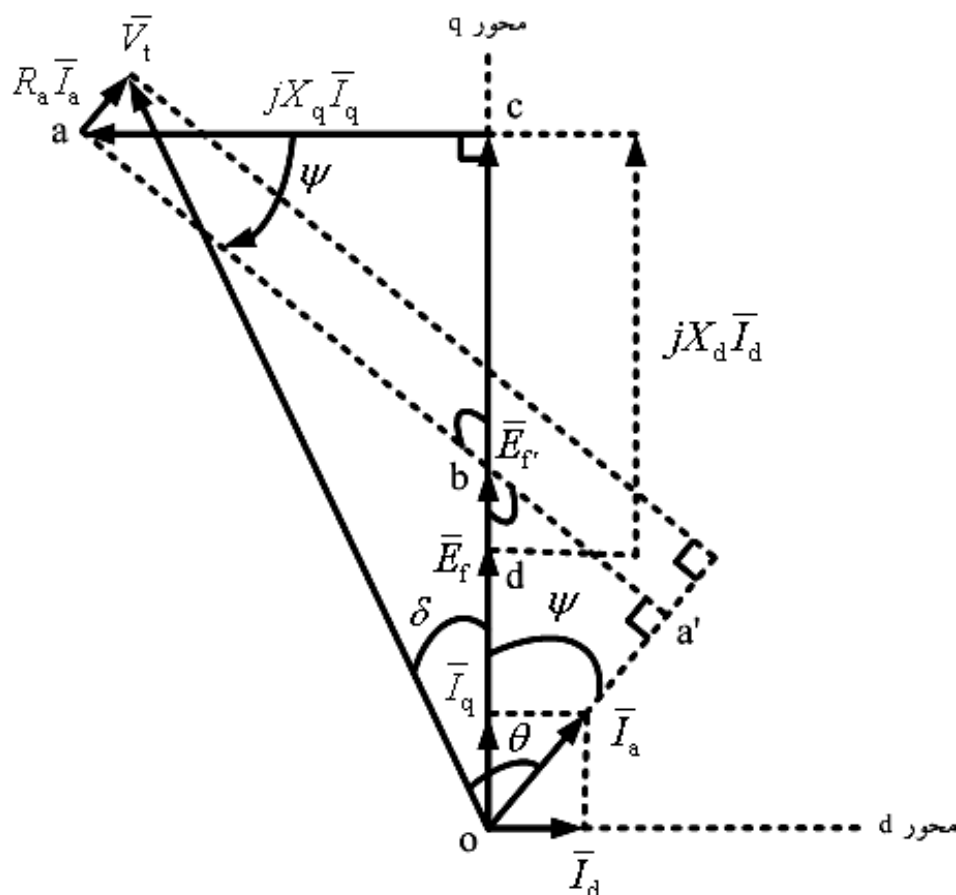
$$KVL: \bar{E}_f = \bar{V}_t + R_a \bar{I}_a + jX_d \bar{I}_d + jX_q \bar{I}_q \quad \text{or:} \quad \bar{E}_f = \bar{V}_t + R_a \bar{I}_a + jX_q \bar{I}_a + j\bar{I}_d (X_d - X_q)$$

$$|\bar{E}_f| = |\bar{V}_t| \cos(\delta) + R_a |\bar{I}_q| + X_d |\bar{I}_d|, \quad X_q |\bar{I}_q| = |\bar{V}_t| \sin(\delta) + R_a |\bar{I}_d|$$

$$\overset{\Delta}{oa'b}: \tan(\psi) = \frac{|\bar{V}_t| \sin(\theta) + X_q |\bar{I}_a|}{|\bar{V}_t| \cos(\theta) + R_a |\bar{I}_a|}$$

Age Group	Percentage
18-24	~10%
25-34	~45%
35-44	~35%
45-54	~15%
55-64	~8%
65-74	~4%
75-84	~2%
85+	~1%

دیاگرام فازوری موتور سنکرون در حالت پس فازی



$$\cos(\psi) = \frac{ca}{ba} \Rightarrow ca = ba \cos(\psi)$$

$$ca = \left| jX_q \bar{I}_q \right| = X_q \left| \bar{I}_q \right|, \quad \cos(\psi) = \frac{\left| \bar{I}_q \right|}{\left| \bar{I}_a \right|}$$

$$\Rightarrow \left| \bar{I}_q \right| = \left| \bar{I}_a \right| \cos(\psi) \Rightarrow ca = X_q \left| \bar{I}_a \right| \cos(\psi)$$

$$\Rightarrow ba \cos(\psi) = X_q \left| \bar{I}_a \right| \cos(\psi)$$

$$\Rightarrow ba = X_q \left| \bar{I}_a \right|, \quad \vec{ba} = jX_q \bar{I}_a$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

$$db = dc - bc, \quad dc = X_d |\bar{I}_d|, \quad \sin(\psi) = \frac{bc}{X_q |\bar{I}_a|} \Rightarrow bc = X_q |\bar{I}_a| \sin(\psi)$$

$$\Rightarrow db = X_d |\bar{I}_d| - X_q |\bar{I}_a| \sin(\psi), \quad \sin(\psi) = \frac{|\bar{I}_d|}{|\bar{I}_a|} \Rightarrow |\bar{I}_d| = |\bar{I}_a| \sin(\psi)$$

$$\Rightarrow db = X_d |\bar{I}_d| - X_q |\bar{I}_d| = (X_d - X_q) |\bar{I}_d| \Rightarrow \vec{db} = j(X_d - X_q) \bar{I}_d$$

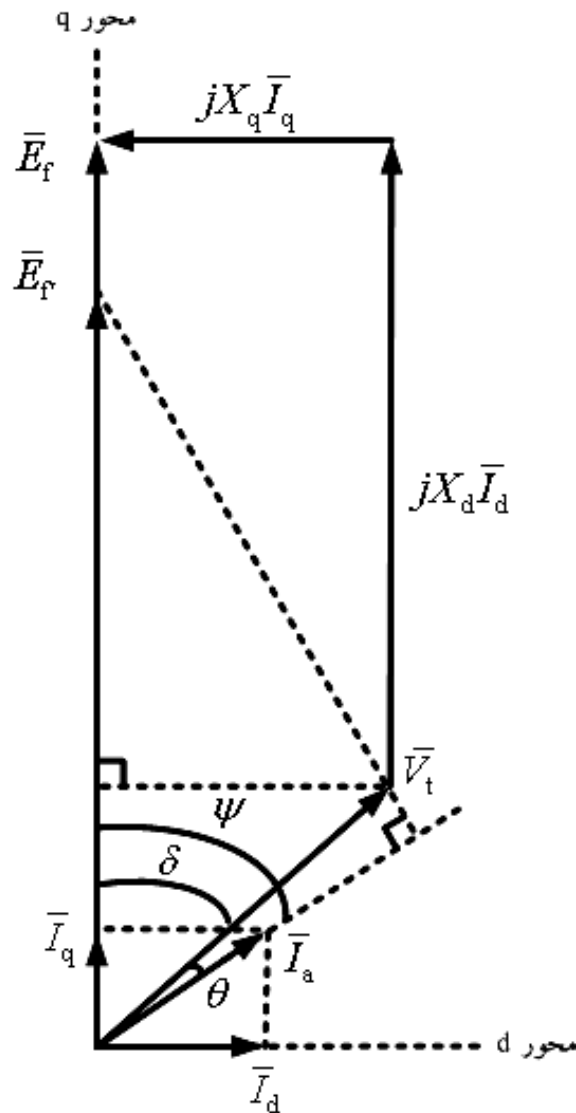
$$KVL: \bar{V}_t = \bar{E}_f + jX_d \bar{I}_d + jX_q \bar{I}_q + R_a \bar{I}_a \quad \text{or:} \quad \bar{V}_t = \bar{E}_f + j\bar{I}_d (X_d - X_q) + jX_q \bar{I}_a + R_a \bar{I}_a$$

$$|\bar{E}_f| = |\bar{V}_t| \cos(\delta) - R_a |\bar{I}_q| - X_d |\bar{I}_d|, \quad X_q |\bar{I}_q| = |\bar{V}_t| \sin(\delta) + R_a |\bar{I}_d|$$

$$\overset{\Delta}{oa'b}: \tan(\psi) = \frac{|\bar{V}_t| \sin(\theta) - X_q |\bar{I}_a|}{|\bar{V}_t| \cos(\theta) - R_a |\bar{I}_a|}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

دیاگرام فازوری ژنراتور سنکرون در حالت پس فازی
با صرف نظر از مقاومت آرمیچر



$$|\bar{V}_t| \sin(\delta) = X_q |\bar{I}_q| = X_q |\bar{I}_a| \cos(\psi) = X_q |\bar{I}_a| \cos(\delta + \theta)$$

$$= X_q |\bar{I}_a| [\cos(\delta) \cos(\theta) - \sin(\delta) \sin(\theta)]$$

$$\Rightarrow (|\bar{V}_t| + X_q |\bar{I}_a| \sin(\theta)) \sin(\delta) = (X_q |\bar{I}_a| \cos(\theta)) \cos(\delta)$$

$$\Rightarrow \tan(\delta) = \frac{X_q |\bar{I}_a| \cos(\theta)}{|\bar{V}_t| + X_q |\bar{I}_a| \sin(\theta)}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

روابط توان در این حالت (صرف نظر از R_a)

$$|\bar{I}_q| = \frac{|\bar{V}_t| \sin(\delta)}{X_q}, \quad |\bar{I}_d| = \frac{|\bar{E}_f| - |\bar{V}_t| \cos(\delta)}{X_d}$$

$$\bar{E}_f = |\bar{E}_f| \angle 0^\circ, \quad \bar{V}_t = |\bar{V}_t| \angle -\delta, \quad |\bar{I}_a| = |\bar{I}_q| - j|\bar{I}_d|$$

$$\bar{S} = 3\bar{V}_t \bar{I}_a^* = 3(|\bar{V}_t| \angle -\delta) (|\bar{I}_q| + j|\bar{I}_d|) = 3(|\bar{V}_t| \angle -\delta) \left(\frac{|\bar{V}_t| \sin(\delta)}{X_q} + j \frac{|\bar{E}_f| - |\bar{V}_t| \cos(\delta)}{X_d} \right)$$

$$\Rightarrow \bar{S} = \left(\frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_q} \sin(\delta) \right) \angle (-\delta) + \left(\frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \right) \angle (90^\circ - \delta) - \left(\frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_d} \cos(\delta) \right) \angle (90^\circ - \delta)$$

$$\Rightarrow \bar{S} = \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_q} \sin(\delta) \cos(\delta) - j \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_q} \sin^2(\delta) + \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \sin(\delta) + j \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \cos(\delta)$$

$$- \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_d} \cos(\delta) \sin(\delta) - j \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_d} \cos^2(\delta)$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

$$\bar{S} = P + jQ \Rightarrow \begin{cases} P = \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_q} \sin(\delta) \cos(\delta) + \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \sin(\delta) - \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_d} \cos(\delta) \sin(\delta) \\ Q = -\frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_q} \sin^2(\delta) + \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \cos(\delta) - \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_d} \cos^2(\delta) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P = \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \sin(\delta) + \frac{3|\bar{V}_t|^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin(2\delta) = P_f + P_r \\ Q = \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \cos(\delta) - 3|\bar{V}_t|^2 \left(\frac{\sin^2(\delta)}{X_q} + \frac{\cos^2(\delta)}{X_d} \right) \end{cases}$$

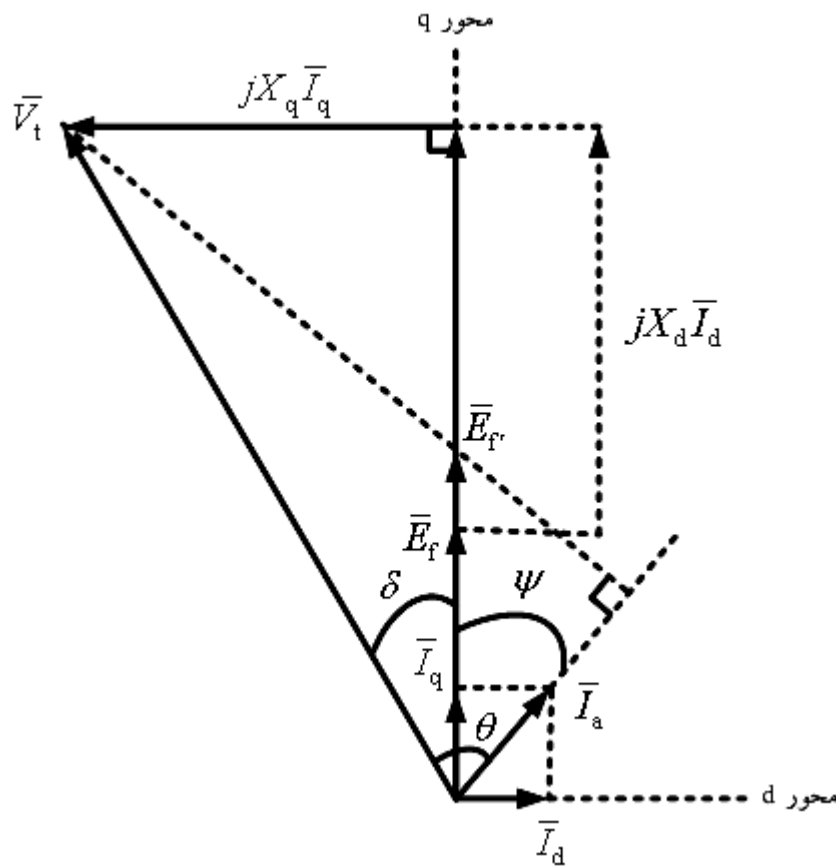
P_f : توان اکتیوی است که E_f تأمین می کند و مشابه رابطه ژنراتور قطب صاف است. (توان الکترومغناطیسی)

P_r : توان اکتیوی است که به خاطر برجستگی قطب ها حاصل شده و به E_f بستگی ندارد. (توان رلوکتانسی)

نکته: واضح است که اگر $X_d = X_q$ به روابط ژنراتور قطب صاف می رسیم.

فصل اول: ماشین های سنکرون

دیاگرام فازوری موتور سنکرون در حالت پس فازی با
صرف نظر از مقاومت آرمیچر



$$|\bar{V}_t| \sin(\delta) = X_q |\bar{I}_q| = X_q |\bar{I}_a| \cos(\psi) =$$

$$X_q |\bar{I}_a| \cos(\theta - \delta) =$$

$$X_q |\bar{I}_a| [\cos(\theta) \cos(\delta) + \sin(\theta) \sin(\delta)]$$

$$\Rightarrow (|\bar{V}_t| - X_q |\bar{I}_a| \sin(\theta)) \sin(\delta) =$$

$$(X_q |\bar{I}_a| \cos(\theta)) \cos(\delta)$$

$$\Rightarrow \tan(\delta) = \frac{X_q |\bar{I}_a| \cos(\theta)}{|\bar{V}_t| - X_q |\bar{I}_a| \sin(\theta)}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

روابط توان در این حالت (صرف نظر از R_a)

$$|\bar{I}_q| = \frac{|\bar{V}_t| \sin(\delta)}{X_q}, \quad |\bar{I}_d| = \frac{|\bar{V}_t| \cos(\delta) - |\bar{E}_f|}{X_d}$$

$$\bar{E}_f = |\bar{E}_f| \angle 0^\circ, \quad \bar{V}_t = |\bar{V}_t| \angle \delta, \quad |\bar{I}_a| = |\bar{I}_q| - j|\bar{I}_d|$$

$$\bar{S} = 3\bar{V}_t \bar{I}_a^* = 3(|\bar{V}_t| \angle \delta) (|\bar{I}_q| + j|\bar{I}_d|) = 3(|\bar{V}_t| \angle \delta) \left(\frac{|\bar{V}_t| \sin(\delta)}{X_q} + j \frac{|\bar{V}_t| \cos(\delta) - |\bar{E}_f|}{X_d} \right)$$

$$\Rightarrow \bar{S} = \left(\frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_q} \sin(\delta) \right) \angle (\delta) + \left(\frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_d} \cos(\delta) \right) \angle (90^\circ + \delta) - \left(\frac{3|\bar{V}_t| |\bar{E}_f|}{X_d} \right) \angle (90^\circ + \delta)$$

$$\Rightarrow \bar{S} = \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_q} \sin(\delta) \cos(\delta) + j \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_q} \sin^2(\delta) - \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_d} \cos(\delta) \sin(\delta) + j \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_d} \cos^2(\delta) \\ + \frac{3|\bar{V}_t| |\bar{E}_f|}{X_d} \sin(\delta) - j \frac{3|\bar{V}_t| |\bar{E}_f|}{X_d} \cos(\delta)$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

$$\bar{S} = P + jQ \Rightarrow \begin{cases} P = \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_q} \sin(\delta) \cos(\delta) - \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_d} \cos(\delta) \sin(\delta) + \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \sin(\delta) \\ Q = \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_q} \sin^2(\delta) + \frac{3|\bar{V}_t|^2}{X_d} \cos^2(\delta) - \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \cos(\delta) \end{cases}$$

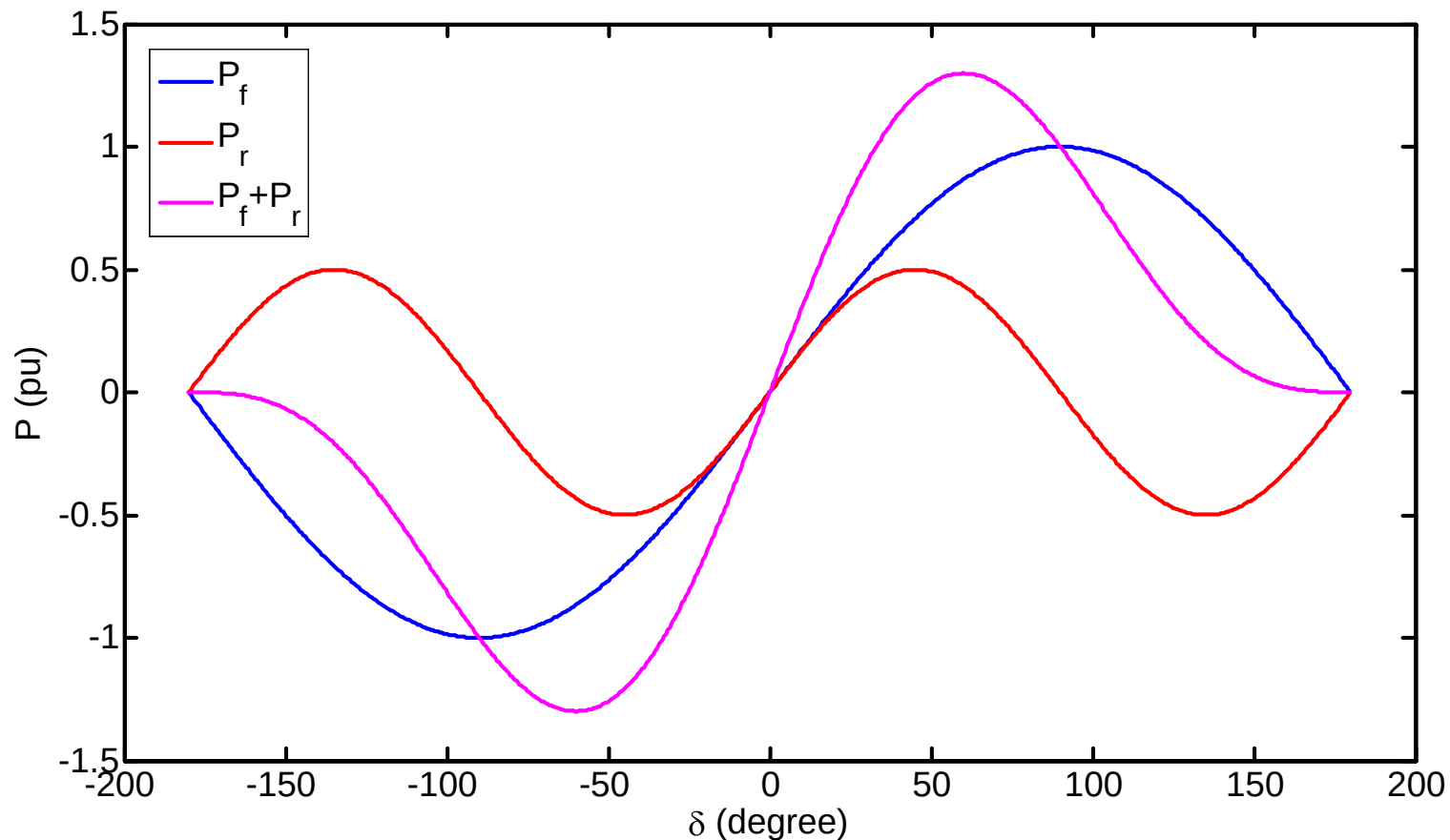
$$\Rightarrow \begin{cases} P = \frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \sin(\delta) + \frac{3|\bar{V}_t|^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin(2\delta) = P_f + P_r \\ Q = -\frac{3|\bar{V}_t||\bar{E}_f|}{X_d} \cos(\delta) + 3|\bar{V}_t|^2 \left(\frac{\sin^2(\delta)}{X_q} + \frac{\cos^2(\delta)}{X_d} \right) \end{cases}$$

$$T_e = \frac{P}{\omega_{\text{syn}}} = \frac{P_f + P_r}{\omega_{\text{syn}}} = T_f + T_r$$

ملاحظه می گردد که در صورت صفر بودن مدار تحریک ($E_f = 0$) باز هم گشتاور خواهیم داشت (بر خلاف ماشین های قطب صاف). کاربرد: کندانسور سنکرون

فصل اول: ماشین های سنکرون

نکته: $P_{\max}$ در ماشین های سنکرون قطب برجسته بیشتر از $P_{\max}$ در ماشین های سنکرون قطب صاف است و در زاویه ای کمتر از 90° رخ می دهد.



فصل اول: ماشین های سنکرون

مثال: یک موتور سنکرون سه فاز 50 مگا ولت آمپر، 60 هرتز، 11 کیلو ولت و چهار قطب مفروض است و داریم: $x_d = 0.8 pu$, $x_q = 0.4 pu$ بار موتور به گونه ای است که جریان نامی را تحت ضریب توان 0.8 پس فاز از شبکه می کشد. تلفات چرخشی ماشین $0.15 pu$ است. از مقاومت آرمیچر صرف نظر می شود.

(الف) ولتاژ تحریک در سیستم پریونیت را به دست آورید.

(ب) توان اکتیو ناشی از تحریک و نیز برجستگی قطب ها را محاسبه کنید.

(ج) اگر جریان تحریک صفر شود، آیا ماشین سنکرونیزم خود را از دست می دهد؟

(د) اگر قبل از آنکه جریان تحریک صفر شود، بار از روی محور ماشین برداشته شود، در این حالت جریان موتور و ضریب توان آن را به دست آورده و نمودار فازوری ماشین را رسم کنید.

(حل: الف)

$$\bar{V}_t = 1^{pu} \angle 0^\circ , \bar{I}_a = 1^{pu} \angle -36.87^\circ$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

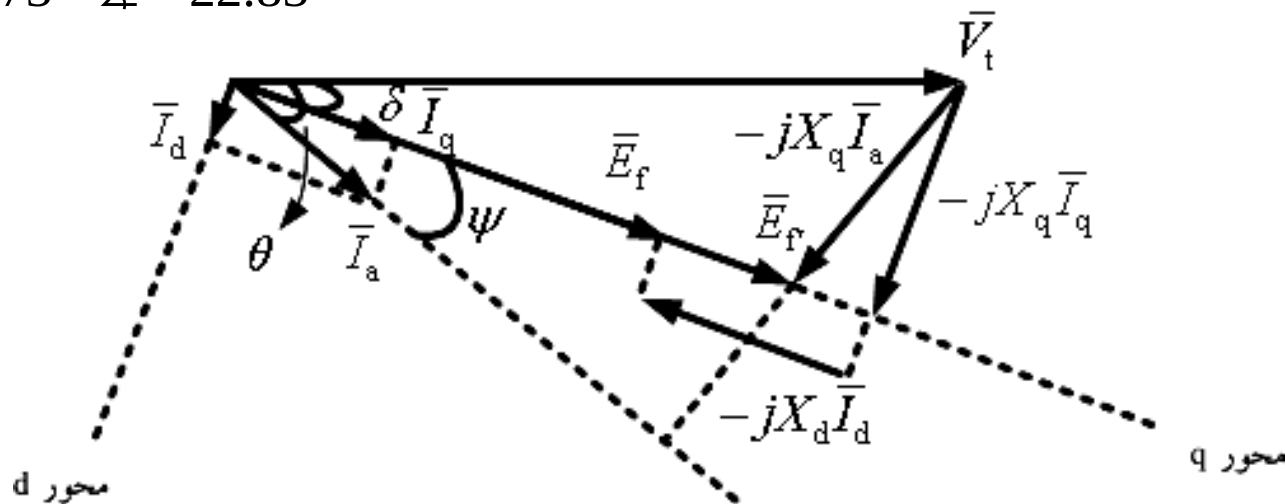
$$\tan(\delta) = \frac{X_q |\bar{I}_a| \cos(\theta)}{|\bar{V}_t| - X_q |\bar{I}_a| \sin(\theta)} = \frac{0.4 \times 1 \times 0.8}{1 - 0.4 \times 1 \times 0.6} = 0.421 \Rightarrow \delta = 22.83^\circ$$

$$|\bar{I}_d| = |\bar{I}_a| \sin(\psi) = |\bar{I}_a| \sin(\theta - \delta) = 0.243 \text{ pu}$$

$$|\bar{I}_q| = |\bar{I}_a| \cos(\psi) = |\bar{I}_a| \cos(\theta - \delta) = 0.97 \text{ pu}$$

$$|\bar{E}_f| = |\bar{V}_t| \cos(\delta) - X_d |\bar{I}_d| = 1 \times \cos(22.83^\circ) - 0.8 \times 0.243 = 0.73 \text{ pu}$$

$$\Rightarrow \bar{E}_f = 0.73 \text{ pu} \angle -22.83^\circ$$



فصل اول: ماشین های سنکرون

(ب) توان اکتیو ورودی
ناشی از تحریک

$$P_f = \frac{|\bar{V}_t| |\bar{E}_f|}{X_d} \sin(\delta) = \frac{1 \times 0.73}{0.8} \sin(22.83^\circ) = 0.35 \text{ pu}$$

$$P_r = \frac{|\bar{V}_t|^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin(2\delta) = \frac{1^2 \times (0.8 - 0.4)}{2 \times 0.8 \times 0.4} \sin(2 \times 22.83^\circ) = 0.45 \text{ pu}$$

توان اکتیو ورودی ناشی از برجستگی قطب ها

(ج)

$$P_{r_{\max}} \Big|_{\delta=45^\circ} = \frac{|\bar{V}_t|^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin(2\delta) = \frac{1^2 \times (0.8 - 0.4)}{2 \times 0.8 \times 0.4} \times 1 = 0.63 \text{ pu}$$

ماشین نمی تواند به کار خود ادامه دهد. $P_{r_{\max}} < P_{in} \Rightarrow P_{in} = 0.35 + 0.45 = 0.8 \text{ pu}$

(د) در این حالت:

$$P_{in} = 0.15 \text{ pu} , P_f = 0 \Rightarrow P_r = 0.63 \sin(2\delta) = 0.15 \Rightarrow \delta = 6.89^\circ$$

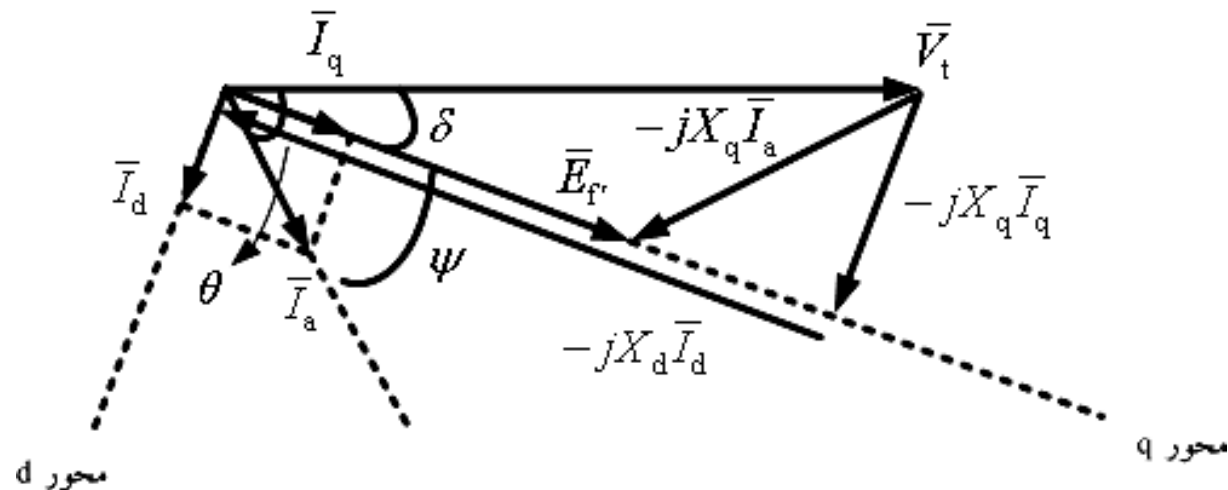
فصل اول: ماشین های سنکرون

$$\bar{E}_f = 0, |\bar{V}_t| \cos \delta = X_d |\bar{I}_d| \Rightarrow |\bar{I}_d| = \frac{1 \times \cos(6.89^\circ)}{0.8} = 1.24 \text{ pu}$$

$$|\bar{V}_t| \sin \delta = X_q |\bar{I}_q| \Rightarrow |\bar{I}_q| = \frac{1 \times \sin(6.89^\circ)}{0.4} = 0.3 \text{ pu} \rightarrow |\bar{I}_a| = \sqrt{|\bar{I}_d|^2 + |\bar{I}_q|^2} = 1.276 \text{ pu}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{|\bar{I}_d|}{|\bar{I}_q|} \right) = 76.4^\circ \rightarrow \theta = \psi + \delta = 76.4^\circ + 6.89^\circ = 83.3^\circ$$

$$\rightarrow pf = \cos(83.3^\circ) = 0.117 \text{ lag}$$



فصل اول: ماشین های سنکرون

مثال: یک موتور سنکرون سه فاز 12 کیلو ولت، 15 مگا ولت آمپر و 60 هرتز با راکتانس های سنکرون محور d و q به ترتیب $1.2 pu$ و $0.6 pu$ از شبکه ای با ولتاژ و فرکانس نامی تغذیه می گردد. (از تلفات چرخشی و مقاومت آرمیچر صرف نظر می شود.)

الف) حداکثر توان ورودی تحت شرایط تحریک صفر رخ می دهد. این توان را حساب کنید و جریان استاتور و ضریب توان را به دست آورید.

ب) توان اسمی (نامی) خروجی با حداقل تحریک حاصل می شود. $|\bar{E}_f|$ حداقل را حساب کنید.

$$\bar{E}_f = 0 \Rightarrow P_f = 0 \rightarrow P_{in} = P_{out} = P_{r_{max}} \Big|_{\delta=45^\circ} = \frac{1^2 \times (1.2 - 0.6)}{2 \times 1.2 \times 0.6} = 0.417 \text{ pu} \quad (\text{حل: الف})$$

$$X_d |\bar{I}_d| = X_q |\bar{I}_q| = |\bar{V}_t| \cos \delta = |\bar{V}_t| \sin \delta = 1 \times \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow \begin{cases} |\bar{I}_d| = 0.59 \text{ pu} \\ |\bar{I}_q| = 1.18 \text{ pu} \end{cases}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

$$\rightarrow |\bar{I}_a| = \sqrt{|\bar{I}_d|^2 + |\bar{I}_q|^2} = 1.32 \text{ pu} , \psi = \tan^{-1} \left(\frac{|\bar{I}_d|}{|\bar{I}_q|} \right) = 26.6^\circ \rightarrow \theta = \psi + \delta = 71.6^\circ$$

$$\rightarrow pf = \cos(71.6^\circ) = 0.312 \text{ lag}$$

(ب)

$$P_{\max} = 1 \text{ pu} , P = \frac{|\bar{E}_f| \times 1}{1.2} \sin(\delta) + \frac{1^2 \times (1.2 - 0.6)}{2 \times 1.2 \times 0.6} \sin(2\delta)$$

$$\Rightarrow P = 0.83 |\bar{E}_f| \sin(\delta) + 0.417 \sin(2\delta)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = 0 \Rightarrow 0.83 |\bar{E}_f| \cos(\delta) + 0.834 \cos(2\delta) = 0 \Rightarrow 0.83 |\bar{E}_f| = -\frac{0.834 \cos(2\delta)}{\cos(\delta)}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

$$\begin{aligned}\rightarrow P_{\max} = 1 &= -\frac{0.834 \cos(2\delta)}{\cos(\delta)} \sin(\delta) + 0.417 \sin(2\delta) \\ \Rightarrow 1 &= -0.834 \cos(2\delta) \tan(\delta) + 0.417 \sin(2\delta) \\ \Rightarrow 1 &= -0.834 (2 \cos^2(\delta) - 1) \tan(\delta) + 0.417 \sin(2\delta) \\ \Rightarrow 1 &= -0.834 (2 \cos(\delta) \sin(\delta) - \tan(\delta)) + 0.417 \sin(2\delta) \\ \Rightarrow 1 &= -0.834 \sin(2\delta) + 0.834 \tan(\delta) + 0.417 \sin(2\delta) \\ \Rightarrow \tan(\delta) &= 1.2 + 0.5 \sin(2\delta) \rightarrow \delta = 58.5^\circ \Rightarrow |\bar{E}_f| = 0.87 \text{ pu}\end{aligned}$$

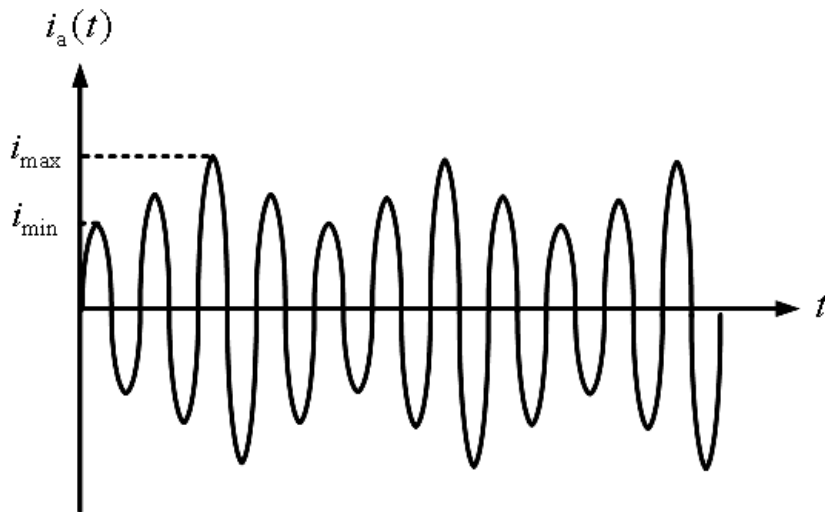
نکته: هر چقدر $\downarrow |\bar{E}_f| \Leftarrow \delta \uparrow$ تا جایی که به $P_{\max}$ برسیم.

فصل اول: ماشین های سنکرون

تعیین X_d و X_q

X_d و X_q را می توان از طریق آزمایش لغزش به دست آورد. در این آزمایش مدار تحریک را باز نگه می داریم ($I_f = 0$) و روتور را تحت سرعتی کمتر از سرعت سنکرون می چرخانیم. در این حال استاتور را به برق سه فاز AC وصل می کنیم.

نکته: جهت چرخش روتور باید هم جهت چرخش میدان گردان استاتور باشد. چون $I_f = 0 \Leftarrow |\bar{E}_f|$ در استاتور صفر خواهد بود. در نتیجه ولتاژ اعمال شده به استاتور باید کوچک باشد تا جریان زیادی نکشد. با توجه به برجستگی قطب ها جریان استاتور به صورت شکل زیر خواهد بود. با توجه به حداقل و حداکثر جریان ها، X_d و X_q برابر خواهند بود با:

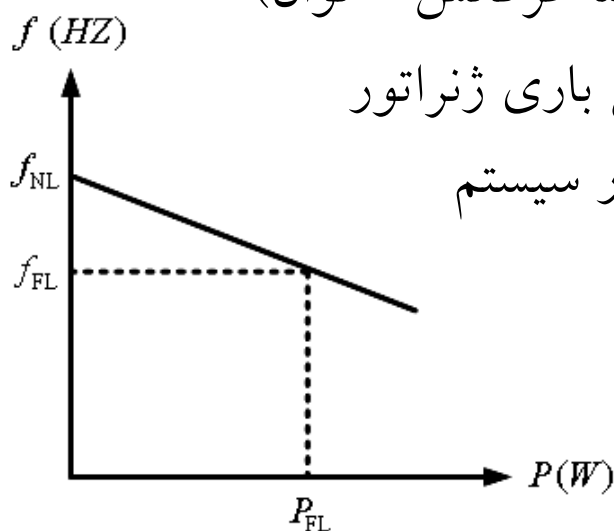


$$X_d = \frac{|\bar{V}_t|}{i_{\min} / \sqrt{2}}, \quad X_q = \frac{|\bar{V}_t|}{i_{\max} / \sqrt{2}}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

کار موازی ژنراتورهای AC

ژنراتورها توسط محرک اولیه چرخانده می شوند. معمول ترین محرک ها توربین بخار است. تمام محرک های اولیه تمایل دارند که به طور مشابه عمل کنند یعنی با افزایش توان کشیده شده از آنها سرعت چرخش آنها کاهش پیدا می کند. به طور کلی کاهش سرعت غیر خطی است ولی معمولاً از گاورنر استفاده می شود تا کاهش سرعت نسبت به افزایش تقاضای توان را خطی سازد. اکثر ژنراتورها طبق تعریف زیر کاهش سرعتی در حدود 2 تا 4% دارند. از آنجا که سرعت با فرکانس رابطه خطی دارد، می توان برای هر ژنراتور نمودار فرکانس بر حسب توان را رسم کرد. (مشخصه فرکانس - توان)



f_{NL} : فرکانس بی باری ژنراتور

f_{sys} : فرکانس کار سیستم

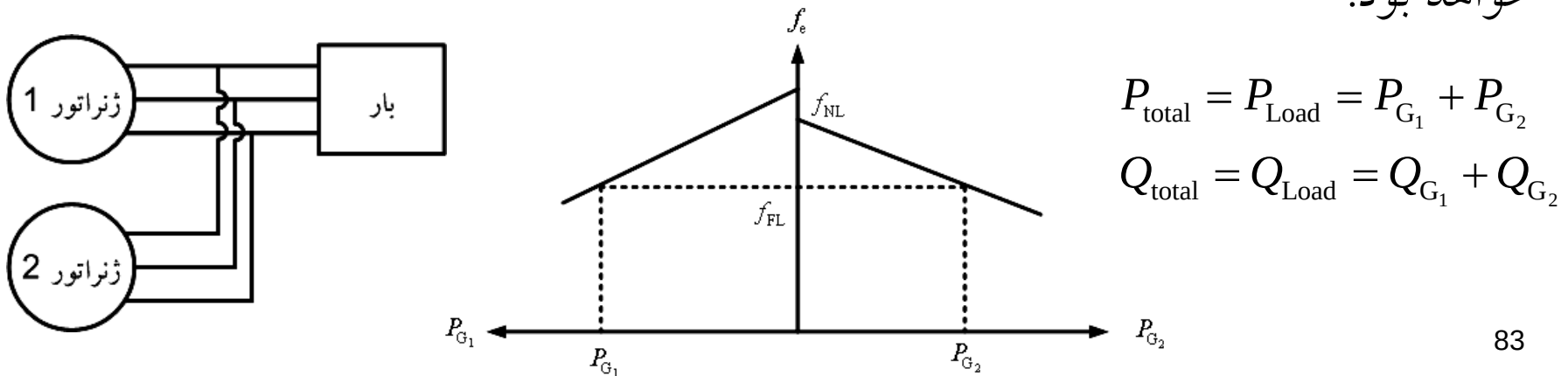
$$\%SR \triangleq \frac{n_{NL} - n_{FL}}{n_{FL}} \times 100$$

$P = S_p (f_{NL} - f_{sys})$: توان خروجی ژنراتور

$$S_p = \frac{P_{FL}}{f_{NL} - f_{FL}} \text{ : شیب خط}$$

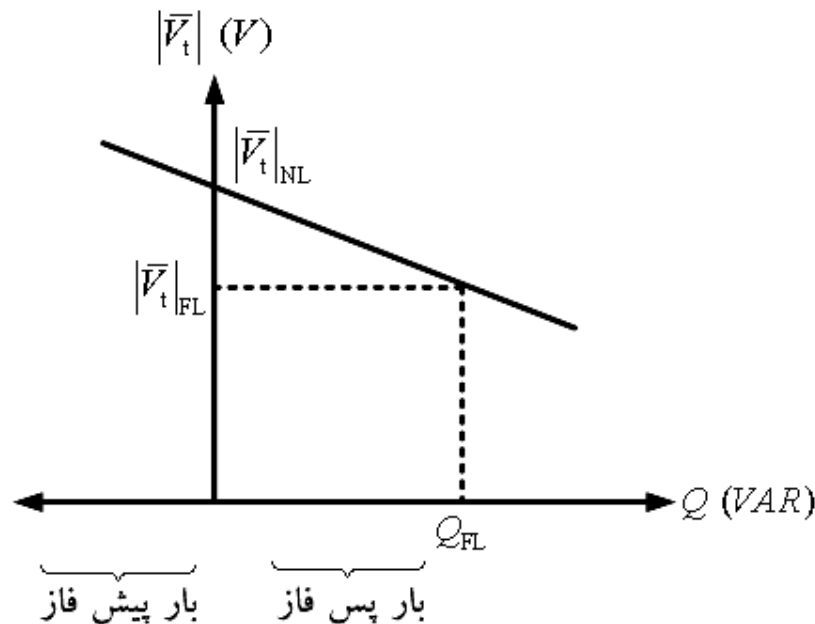
فصل اول: ماشین های سنکرون

هنگامی که یک ژنراتور انفرادی به تنهایی کار می کند، توان حقیقی (اکتیو) و راکتیو تغذیه شده توسط ژنراتور ثابت بوده و به تقاضای توان توسط بار محدود می شود. فرکانس و ولتاژ دو سر ماشین با تنظیم گاورنر و میدان تحریک تغییر داده می شود. هنگامی که ژنراتوری موازی با یک شین بینهایت کار می کند، فرکانس و ولتاژ دو سر آن توسط شین بینهایت تثبیت می شود و توان اکتیو و راکتیو با تنظیم گاورنر و جریان میدان تغییر می کند. هنگامی که ژنراتوری موازی با ژنراتور هم اندازه دیگری کار کند، محدودیت اساسی این است که مجموع توان های اکتیو و راکتیو تغذیه شده توسط دو ژنراتور باید مساوی با P و Q مورد تقاضای بار باشد و نیز محدودیت ثابت بودن توان یک ژنراتور مفروض، وجود ندارد. دیاگرام فرکانس-توان چنین سیستمی به صورت زیر خواهد بود:



فصل اول: ماشین های سنکرون

هرگاه گاورنر G_2 توان اکتیو G_2 را افزایش دهد، منحنی فرکانس - توان G_2 به سمت بالا جا به جا می شود. حال در فرکانس اصلی f_1 ، توان تغذیه شده توسط G_1 و G_2 بیشتر از تقاضای بار خواهد شد، یعنی سیستم نمی تواند به کار خود با همان فرکانس قبلی ادامه دهد. در حقیقت تنها یک فرکانس وجود دارد که در آن مجموع توان های خروجی دو ژنراتور برابر P_{Load} می شود. آن فرکانس از فرکانس اصلی کل سیستم بیشتر است. در آن فرکانس G_2 قدرتی بیشتر از قبل و G_1 قدرتی کمتر از قبل را تأمین می کند.



برای توان راکتیو هم می توان به کمک مدار تحریک مشخصه ولتاژ - توان خطی به دست آورد. در اینجا نیز وقتی دو ژنراتور هم اندازه با هم به طور موازی باری را تغذیه می کنند، افزایش جریان تحریک یکی، باعث صعود ولتاژ دو سیستم می شود.

فصل اول: ماشین های سنکرون

مثال: یک بار سه فاز توسط دو ژنراتور هم اندازه موازی تغذیه می شود. ژنراتور 1 فرکانس بی باری 61.5 Hz و شیب $S_{P_1} = 1 \text{ MW/Hz}$ دارد. ژنراتور 2 فرکانس بی باری 61 Hz و شیب $S_{P_2} = 1 \text{ MW/Hz}$ دارد. این دو ژنراتور در حال تغذیه یک بار 2.5 MW با ضریب توان 0.8 پس فاز هستند. الف) فرکانس کار و قدرت تحویلی هر ژنراتور را به دست آورید. ب) در صورت افزایش توان بار به اندازه یک مگا وات فرض (الف) را تکرار کنید. ج) در فرض (ب) اگر فرکانس بی باری ژنراتور 2 توسط گاورنرش به 61.5 Hz صعود کند، فرکانس کار و قدرت هر ژنراتور را تعیین کنید.

حل: الف)

$$P_{G_1} + P_{G_2} = 2.5 \text{ MW} , P_{G_1} = S_{P_1} (f_{NL_1} - f_{sys}) , P_{G_2} = S_{P_2} (f_{NL_2} - f_{sys})$$

$$\Rightarrow 2.5 = 1(61.5 - f_{sys}) + 1(61 - f_{sys}) \Rightarrow f_{sys} = 60 \text{ Hz}$$

$$\Rightarrow P_{G_1} = 1(61.5 - 60) = 1.5 \text{ MW} , P_{G_2} = 1(61 - 60) = 1 \text{ MW}$$

فصل اول: ماشین های سنکرون

(ب)

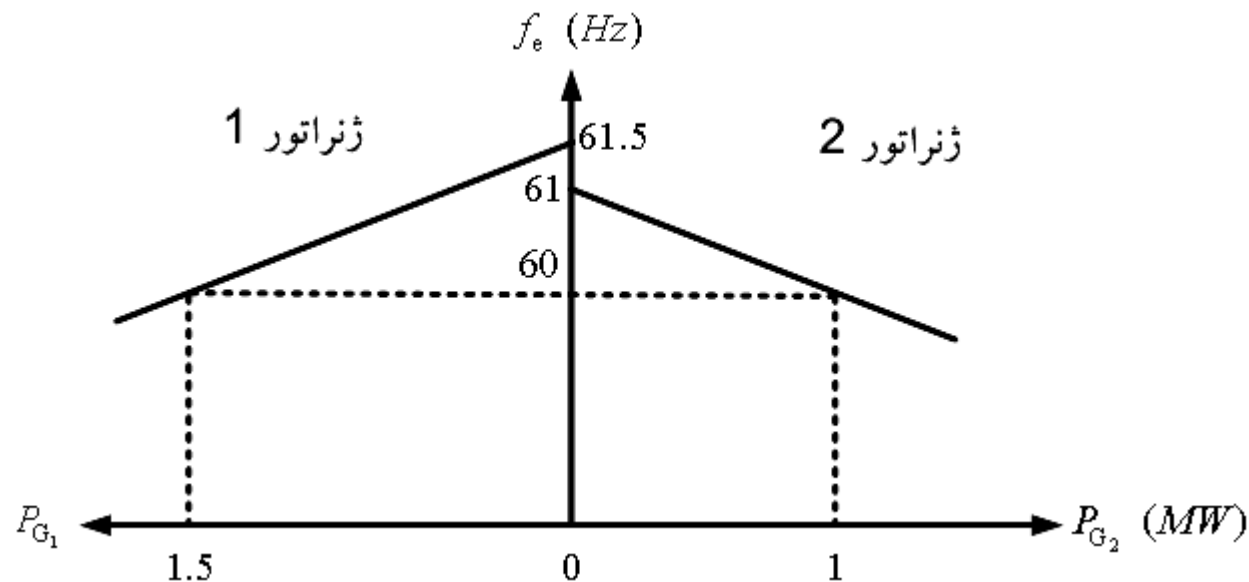
$$3.5 = 1(61.5 - f_{\text{sys}}) + 1(61 - f_{\text{sys}}) \Rightarrow f_{\text{sys}} = 59.5 \text{ Hz}$$

$$\Rightarrow P_{G_1} = 1(61.5 - 59.5) = 2 \text{ MW} , P_{G_2} = 1(61 - 59.5) = 1.5 \text{ MW}$$

(ج)

$$3.5 = 1(61.5 - f_{\text{sys}}) + 1(61.5 - f_{\text{sys}}) \Rightarrow f_{\text{sys}} = 59.75 \text{ Hz}$$

$$\Rightarrow P_{G_1} = 1(61.5 - 59.75) = 1.75 \text{ MW} , P_{G_2} = P_{G_1} = 1.75 \text{ MW}$$



فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

مقدمه:

امروزه تقریباً تمام سیستم های تولید، انتقال و توزیع قدرت در دنیا، سیستم های AC سه فاز هستند. وظیفه ترانسفورماتورهای سه فاز کاهش تلفات انتقال است. برای این منظور در سمت تولید، از ترانس های افزایشده جهت کاهش جریان و در نتیجه کاهش تلفات خط استفاده شده و در سمت توزیع از ترانس های کاهشده جهت افزایش جریان برای تأمین بارهای صنعتی، تجاری و خانگی استفاده شده است.

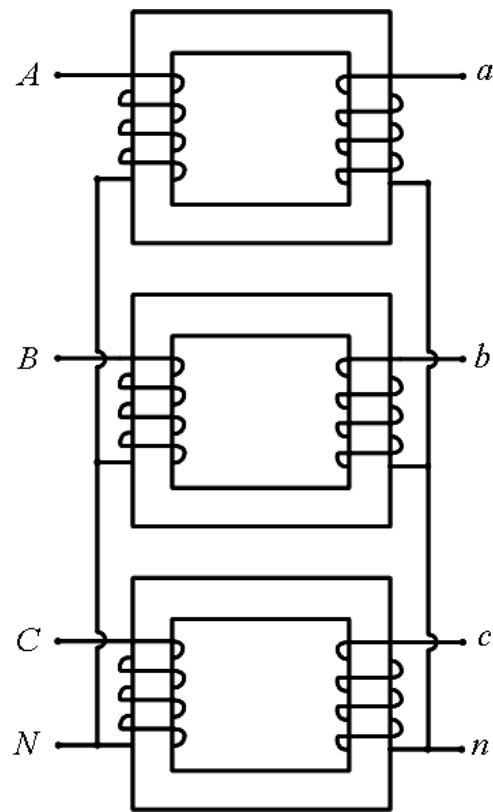
انواع ترانسفورماتورهای سه فاز از نظر ساختمان:

اولین آرایشی که به عنوان ترانس سه فاز مطرح شده و به کار رفته است، شامل سه ترانس تکفاز است که در کنار هم به صورت یک مجموعه تحت عنوان گروه ترانسفورماتور سه فاز (Three-phase Transformer Bank) مورد استفاده قرار گرفته است (ترانس سه پارچه).

حسن: در این آرایش، امکان تعویض هر کدام از فازها در صورت بروز نقص در آن فاز وجود دارد، بدون این که انتقال توان به کلی متوقف شود (اتصال مثلث باز)

عیب: وزن بالای هسته

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز



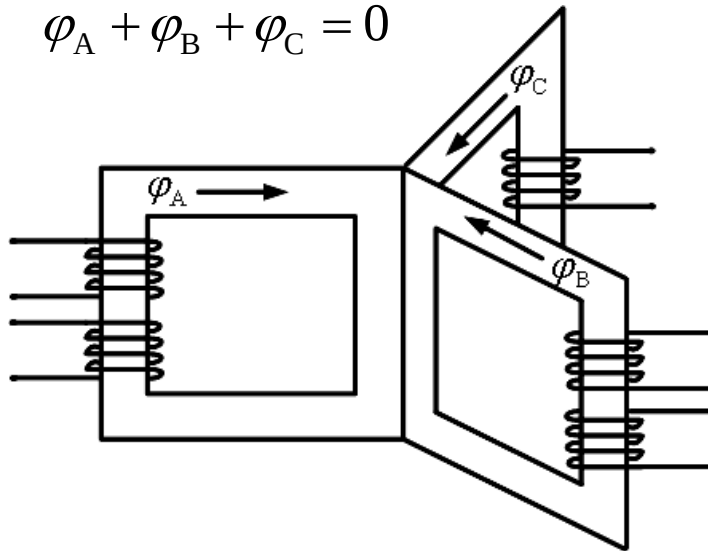
اتصال
Yy

ترانسفورماتورهای یک پارچه سه فاز همانند ترانسفورماتورهای تکفاز از نوع هسته ای (core type) یا زرهی (shell type) هستند.

سیر تکاملی ترانس های سه فاز هسته ای:

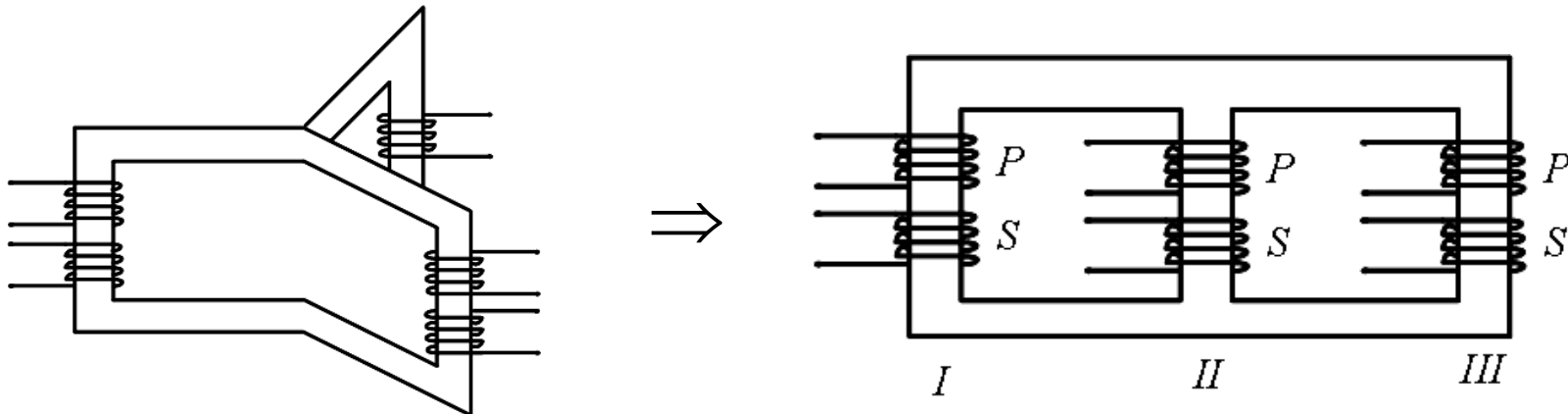
در حالت کار متعادل شار عبوری از ستون وسط صفر است، بنابراین حذف آن بلامانع است.

$$\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C = 0$$



فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

ساخت چنین هسته ای بسیار مشکل و گران قیمت است. همچنین حجم مورد نیاز برای قرار دادن ترانس (حجم مخزن یا تانک) زیاد است.

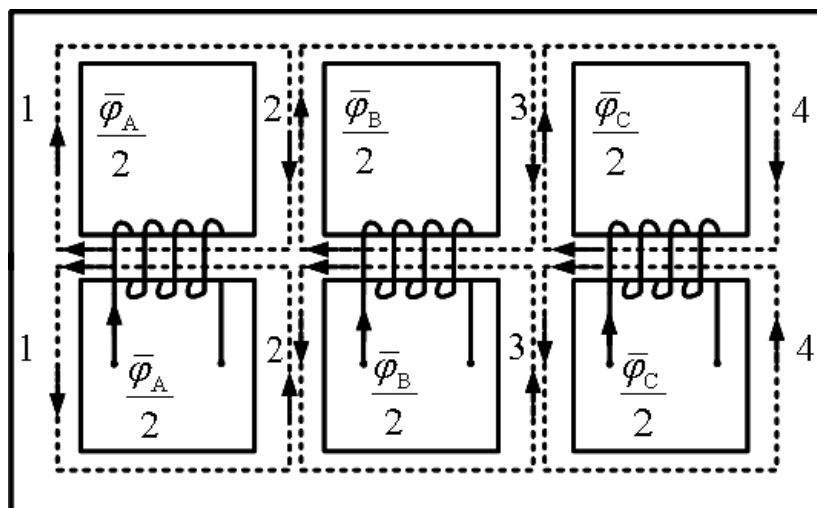


با بررسی مدار معادل مغناطیسی شکل فوق خواهیم دید که مقاومت مغناطیسی در مقابل شار ساقه مرکزی II، کمتر از مقاومت مغناطیسی مسیر شار ساقه های I و III است. بنابراین جریان تحریک در سیم پیچ ساقه مرکزی کمتر از دو سیم پیچ دیگر است. با این وجود اختلاف جریان های تحریک آنقدر کم است که اثر عمده و اساسی روی عمل ترانس سه فاز نوع هسته ای نخواهد داشت.

$$Ni_e = \mathfrak{R} \varphi, \quad \varphi = cte, \quad \mathfrak{R} \downarrow \Rightarrow i_e \downarrow$$

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

عیب دیگر ترانس های سه فاز با هسته ستونی این است که در حالت کار نامتعادل که جمع شارها صفر نیست، شار متوجه مسیر خود را از داخل دیواره تانک می بندد که این باعث افزایش حرارت ترانس و کاهش راندمان می شود. برای رفع این عیب گاهی از آرایش زیر استفاده می شود:



هسته زرهی (پنج ستونه)

در مدارهای مغناطیسی ساقه های 2 و 3، شار متوجه تفاضل برداری مؤلفه های شار است:

$$\text{شار متوجه در ساقه 2} = \frac{\bar{\varphi}_A}{2} - \frac{\bar{\varphi}_B}{2} = \frac{\varphi \angle 0^\circ - \varphi \angle -120^\circ}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varphi \angle +30^\circ$$

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

در نتیجه اندازه شار متوجه در ساقه 2 و به طور مشابه در ساقه 3، $\sqrt{3}/2$ برابر اندازه شار در ناحیه مرکزی هسته است. بنابراین برای داشتن چگالی شار یکسان، سطح مقطع نواحی 2 و 3، $\sqrt{3}/2 = 86.6\%$ ناحیه مرکزی هسته است. برای ساقه های 1 و 4 سطح مقطع 50% ناحیه مرکزی هسته است. حال اگر سیم پیچ B در جهت عکس پیچیده شود، خواهیم داشت:

$$\text{شار متوجه در ساقه 2} = \frac{\bar{\varphi}_A}{2} + \frac{\bar{\varphi}_B}{2} = \frac{\varphi \angle 0^\circ + \varphi \angle -120^\circ}{2} = \frac{\varphi}{2} \angle -60^\circ$$

در نتیجه در این حالت، سطح مقطع نواحی 1، 2، 3 و 4، یکسان و برابر نصف سطح مقطع شاخه مرکزی خواهد شد (صرفه جویی اقتصادی).

نکته: مدارهای مغناطیسی ترانس های هسته ای به یکدیگر وابسته بوده در حالی که در ترانس های زرهی مستقل از یکدیگرند.

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

نکته: در ترانس های سه فاز برای به دست آوردن پارامترهای مدار معادل، مانند ترانس تکفاز، دو آزمایش مدار باز و اتصال کوتاه صورت می گیرد. از آزمایش مدار باز پارامترهای شاخه موازی و از آزمایش اتصال کوتاه پارامترهای شاخه سری در مدار معادل به دست می آیند. در ترانس سه فاز نتایج آزمایش های مدار باز و اتصال کوتاه ممکن است در حالت اتصال ستاره یا مثلث به دست آمده باشند. ما همیشه با توجه به نوع اتصال، مقادیر مربوط به یک فاز را به دست می آوریم، سپس مطابق روشی که در ترانس تکفاز دنبال می شد، به محاسبه پارامترها می پردازیم.

انواع اتصالات در ترانس های سه فاز معرفی نمادها و قراردادهای:

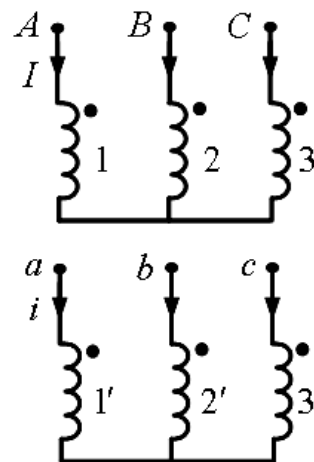
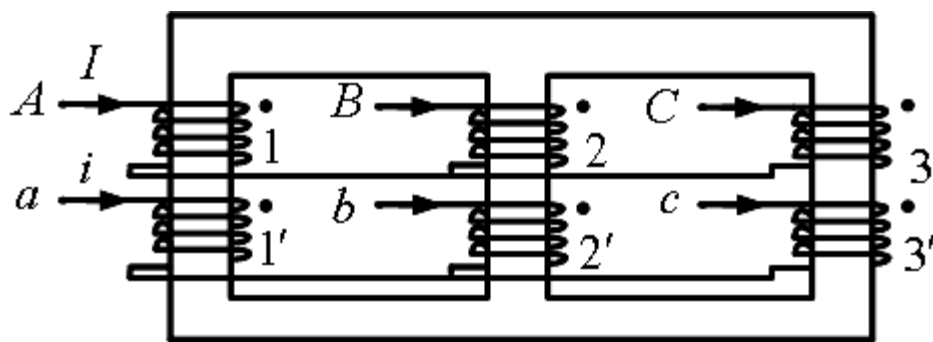
الف) از آنجا که اسامی اولیه و ثانویه بستگی به چگونگی قرارگیری ترانسفورماتور در مدار الکتریکی دارد و ما ترانس را مستقل از شبکه بررسی می کنیم، لذا از این عناوین استفاده نمی کنیم و به جای آنها از عبارات فشار قوی و فشار ضعیف برای نامیدن پیچک ها استفاده می کنیم.

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

ب) حروف به کار رفته برای نامگذاری کمیت های سمت فشار قوی به صورت بزرگ و در طرف فشار ضعیف به صورت کوچک استفاده می شود. مثلاً Yd : ترانسی است با اتصال ستاره در طرف فشار قوی و اتصال مثلث در طرف فشار ضعیف

ج) نسبت تبدیل ترانس سه فاز عبارت است از نسبت ولتاژ خط فشار قوی به ولتاژ خط فشار ضعیف

د) با توجه به شکل قرارگیری پیچک ها در یک ترانس واقعی، به صورت نمادین آنها را به شکل زیر نشان می دهیم که در این شکل پیچک های 1 و $1'$ روی یک ساق هسته قرار دارند و ولتاژ القایی در آنها همفاز می باشد.



فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

ه) اسامی ABC و abc کاملاً دلخواه به پیچک ها نسبت داده می شوند، اما برای نشان دادن توالی، ترتیب آنها در توالی مثبت همیشه به یکی از سه صورت ABC، CAB و BCA است.

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

ز) عبارت است از نسبت تبدیل فاز یا نسبت بین ولتاژ پیچک های قرار گرفته روی یک ستون:

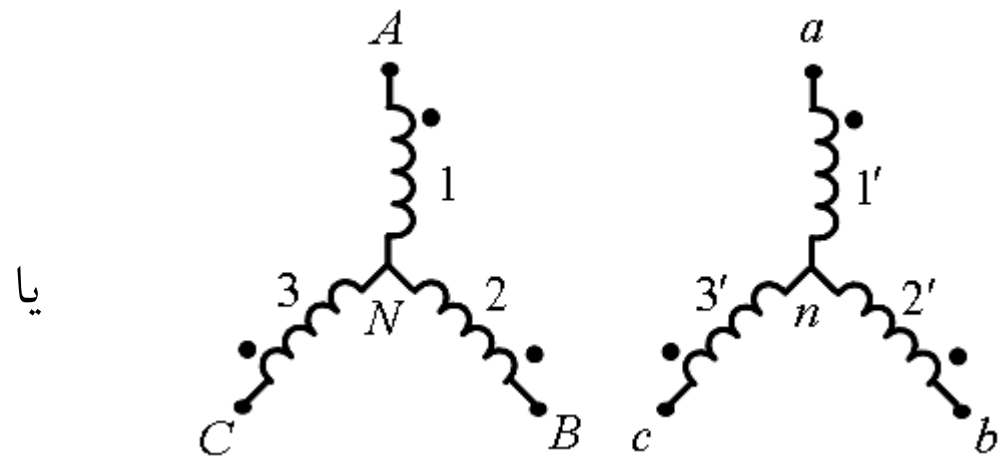
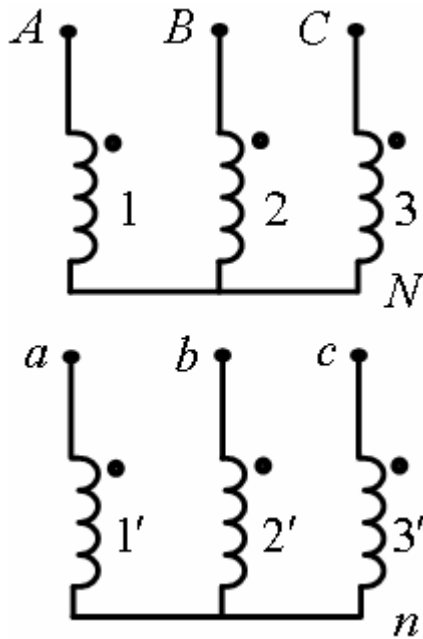
$$\frac{V}{v} = \frac{N}{n} = k \quad \text{or} \quad \frac{I}{i} = \frac{n}{N} = \frac{1}{k}$$

بسته به اینکه اولیه و ثانویه به چه شکلی سربندی شده باشند، اتصالات گوناگونی برای ترانس ایجاد می شود:

۱- اتصال ستاره ستاره (Yy یا $YNyn$)

از این اتصال زمانی استفاده می شود که ولتاژ یا جریان کم است یا به سر وسط نیاز باشد.

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز



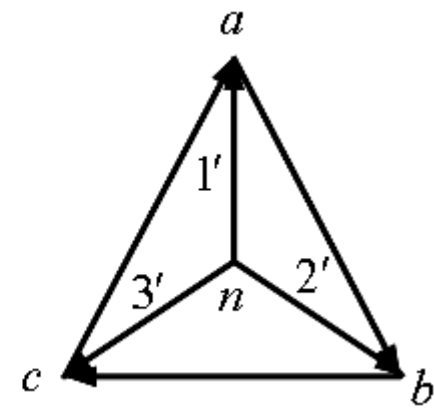
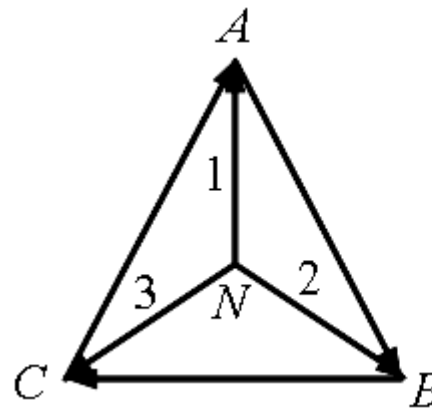
دیاگرام فازوری (برداری):

$$|\bar{V}_{AN}| = V, \quad |\bar{V}_{an}| = v$$

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

$$|\bar{V}_{ab}| = |\bar{V}_{an} - \bar{V}_{bn}| = \sqrt{3}v$$

$$\Rightarrow \frac{|\bar{V}_{AB}|}{|\bar{V}_{ab}|} = \frac{\sqrt{3}V}{\sqrt{3}v} = k$$

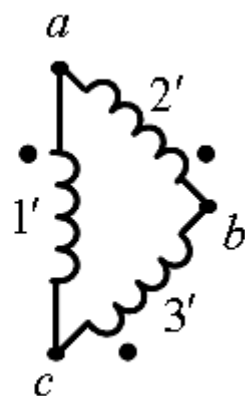
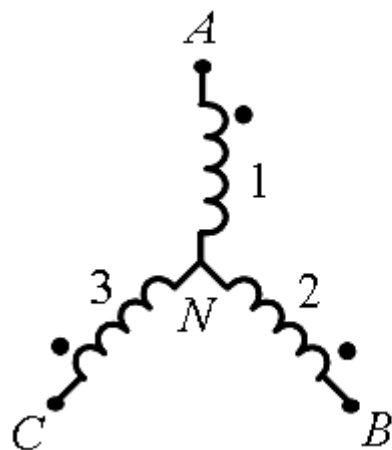
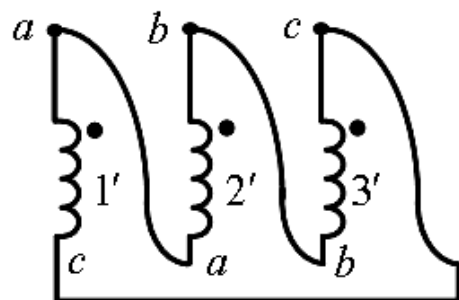
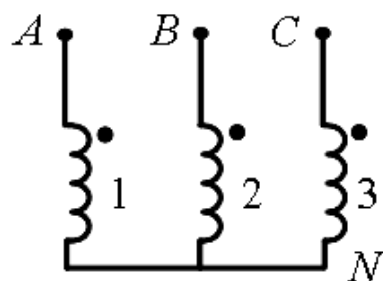


فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

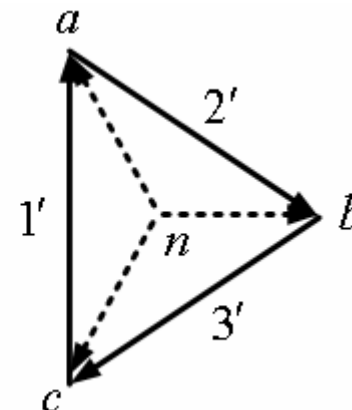
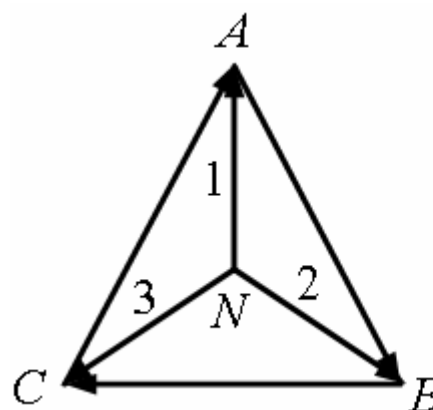
۲- اتصال ستاره مثلث (Yd یا YNd) (کاهنده)

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

دیاگرام فازوری (برداری):



یا



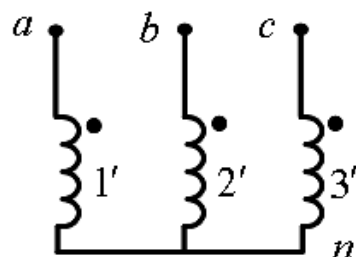
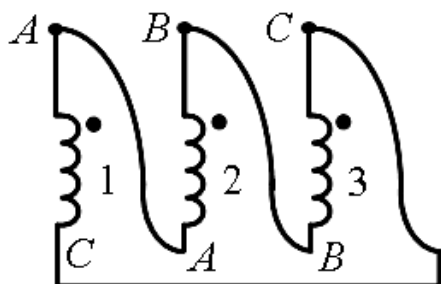
$$|\bar{V}_{AB}| = |\bar{V}_{AN} - \bar{V}_{BN}| = \sqrt{3}V$$

$$|\bar{V}_{ab}| = v \Rightarrow \frac{|\bar{V}_{AB}|}{|\bar{V}_{ab}|} = \frac{\sqrt{3}V}{v} = \sqrt{3}k$$

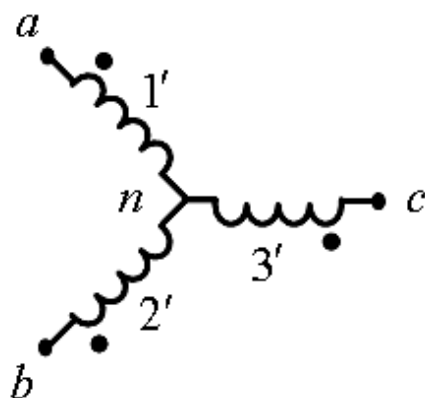
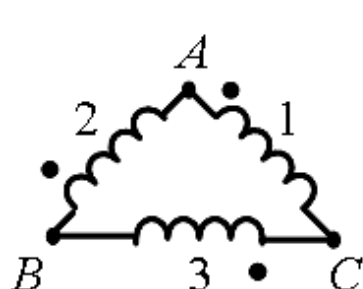
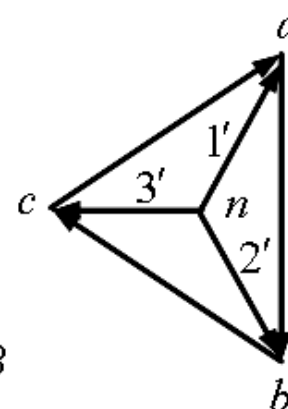
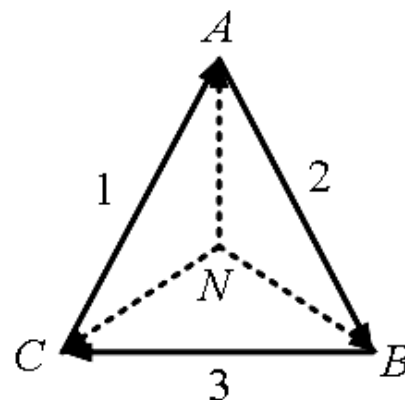
فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

۳- اتصال مثلث ستاره (Dyn یا Dy) (افزاینده)

دیاگرام فازوری (برداری):



یا



$$|\bar{V}_{AB}| = V$$

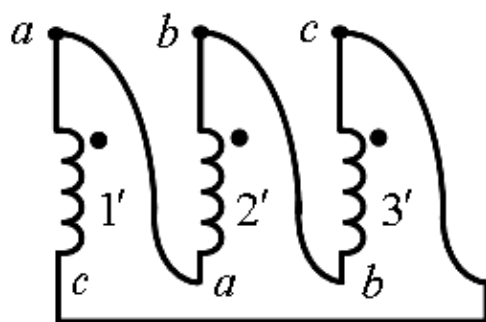
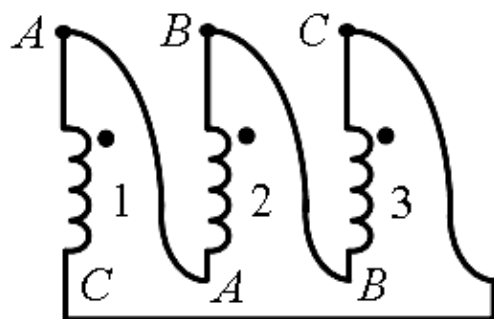
$$|\bar{V}_{ab}| = |\bar{V}_{an} - \bar{V}_{bn}| = \sqrt{3}v$$

$$\Rightarrow \frac{|\bar{V}_{AB}|}{|\bar{V}_{ab}|} = \frac{V}{\sqrt{3}v} = \frac{k}{\sqrt{3}}$$

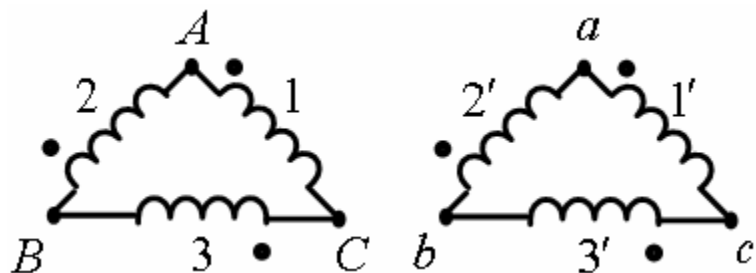
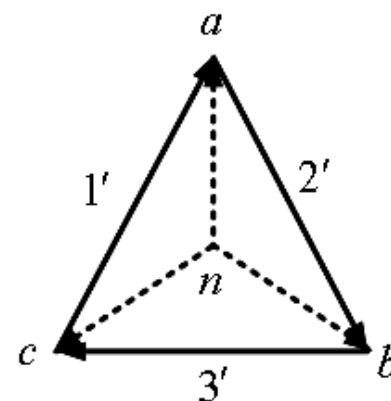
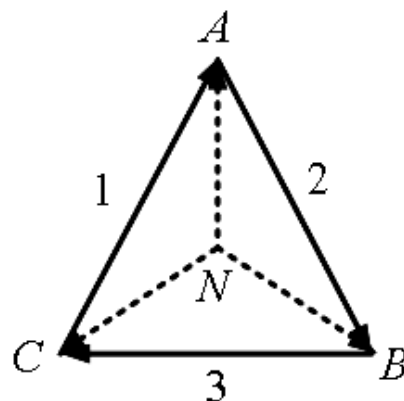
فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

۴- اتصال مثلث مثلث (Dd)

دیاگرام فازوری (برداری):



یا



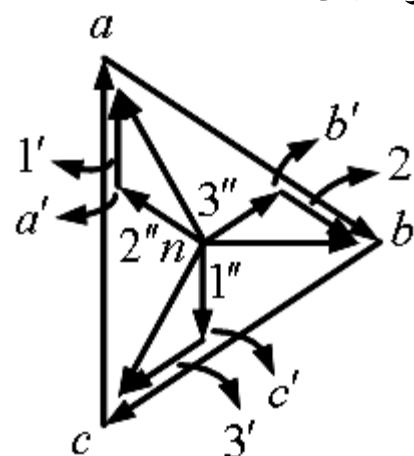
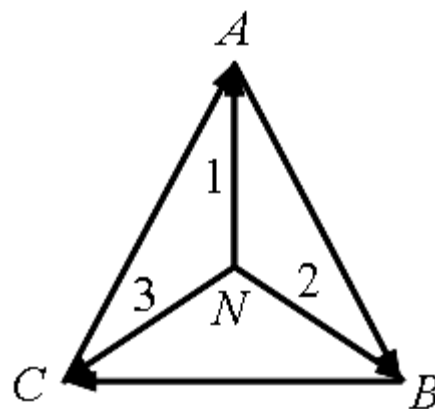
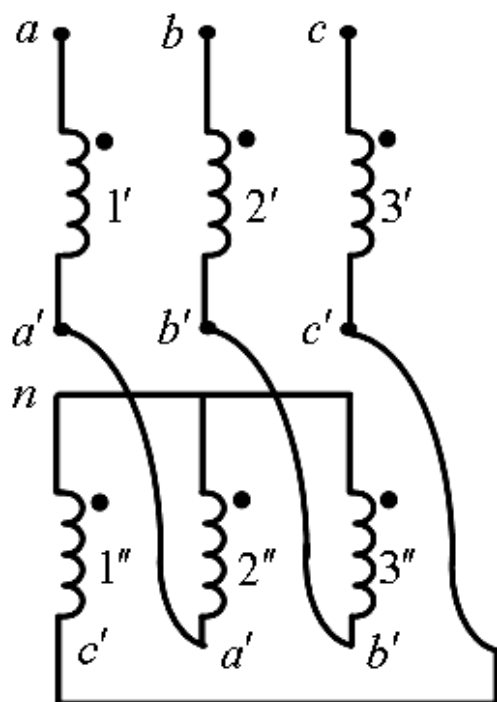
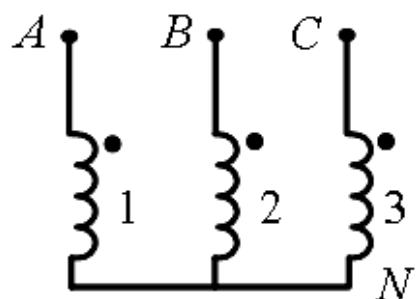
$$|\bar{V}_{AB}| = V, \quad |\bar{V}_{ab}| = v$$

$$\Rightarrow \frac{|\bar{V}_{AB}|}{|\bar{V}_{ab}|} = \frac{V}{v} = k$$

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

۵- اتصال ستاره زیگزاگ (YZ)

دیاگرام فازوری (برداری):



$$\bar{V}_{na} = \bar{V}_{na'} + \bar{V}_{a'a}$$

$$\bar{V}_{nb} = \bar{V}_{nb'} + \bar{V}_{b'b}$$

$$\bar{V}_{nc} = \bar{V}_{nc'} + \bar{V}_{c'c}$$

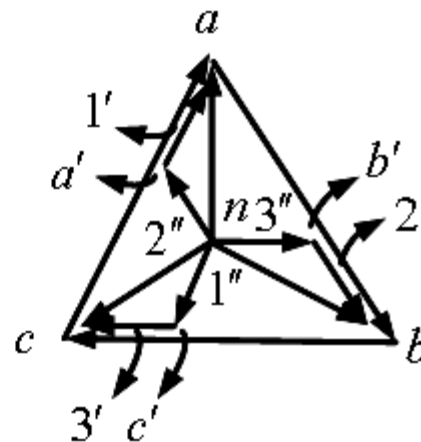
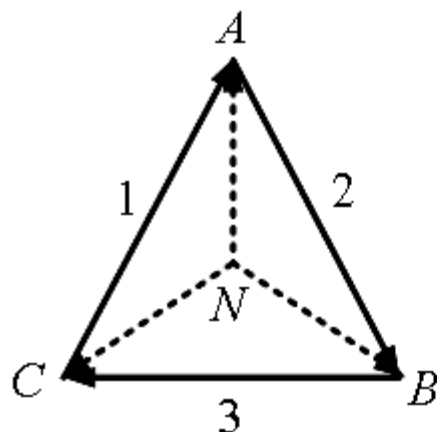
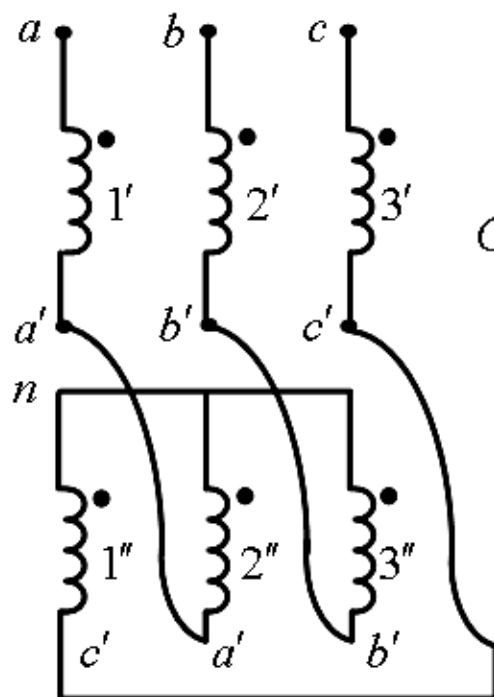
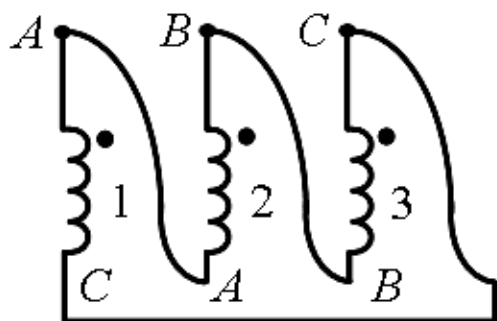
$$|\bar{V}_{AB}| = |\bar{V}_{AN} - \bar{V}_{BN}| = \sqrt{3}V, \quad |\bar{V}_{an}| = |\bar{V}_{aa'} + \bar{V}_{a'n}| = \sqrt{3} \frac{V}{2}$$

$$|\bar{V}_{ab}| = |\bar{V}_{an} - \bar{V}_{bn}| = \sqrt{3} \left(\sqrt{3} \frac{V}{2} \right) \Rightarrow \frac{|\bar{V}_{AB}|}{|\bar{V}_{ab}|} = \frac{\sqrt{3}V}{\sqrt{3} \left(\sqrt{3} \frac{V}{2} \right)} = \frac{2}{\sqrt{3}} k$$

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

۶- اتصال مثلث زیگزاگ (Dz)

دیاگرام فازوری (برداری):



$$\bar{V}_{na} = \bar{V}_{na'} + \bar{V}_{a'a}$$

$$\bar{V}_{nb} = \bar{V}_{nb'} + \bar{V}_{b'b}$$

$$\bar{V}_{nc} = \bar{V}_{nc'} + \bar{V}_{c'c}$$

$$|\bar{V}_{AB}| = V, \quad |\bar{V}_{an}| = |\bar{V}_{aa'} + \bar{V}_{a'n}| = \sqrt{3} \frac{V}{2}$$

$$|\bar{V}_{ab}| = |\bar{V}_{an} - \bar{V}_{bn}| = \sqrt{3} \left(\sqrt{3} \frac{V}{2} \right) \Rightarrow \frac{|\bar{V}_{AB}|}{|\bar{V}_{ab}|} = \frac{V}{\sqrt{3} \left(\sqrt{3} \frac{V}{2} \right)} = \frac{2}{3} k$$

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

نکته: حسن ترانس با اتصال زیگزاگ آن است که نامتعادلی را کم می کند. مطابق اشکال فوق اگر جریانی از یک فاز فشار قوی عبور کند، بین دو فاز فشار ضعیف تقسیم می شود و به این صورت نامتعادلی را کمتر می کند.

گروه برداری

در اتصالات مختلف ترانسفورماتور، ولتاژ خط فشار قوی و ولتاژ خط فشار ضعیف مربوط ممکن است دارای اختلاف فاز و یا هیچ گونه اختلاف برداری نباشد. این اختلاف فاز زمانی را ممکن است به صورت درجه یا به وسیله روش ساده تری که روش ساعت نامیده می شود، نشان داد. بر اساس این روش، بردار ولتاژ خطی (فازی) فشار قوی را عقربه دقیقه شمار که همیشه روی ساعت 12 قرار دارد و بردار ولتاژ خطی (فازی) فشار ضعیف مربوط با عقربه ساعت شمار نشان داده می شود. برای ترانس سه فاز دو سیم پیچه به طریق روش ساعت، علامت اول بیانگر اتصال سیم پیچ فشار قوی، علامت دوم بیانگر اتصال سیم پیچ فشار ضعیف و علامت سوم بیانگر اختلاف فاز بین ولتاژ خط فشار قوی و فشار ضعیف مربوط که

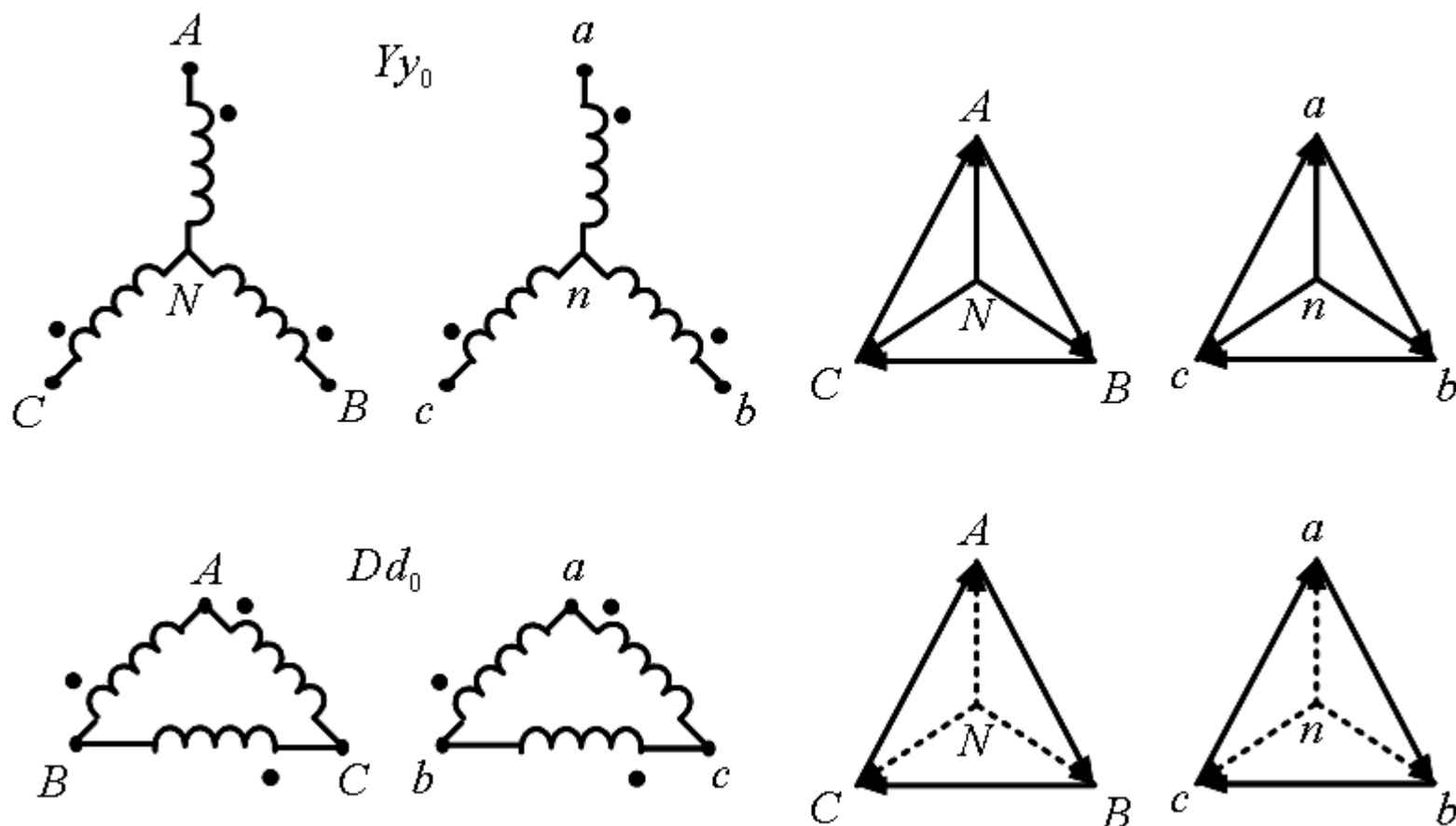
فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

شماره عقربه ساعت شمار است، می باشد. برای مثال علامت Yd_{11} بیانگر ترانس سه فازی است که سیم پیچ فشار قوی آن به صورت ستاره و سیم پیچ فشار ضعیف مثلث و بردار ولتاژ خط طرف فشار ضعیف بر روی ساعت 11 یعنی 30° جلوتر از موقعیت ساعت صفر فشار قوی است. برای ترانس های سه فاز سه سیم پیچه، حرف اول مربوط به سیم پیچ فشار قوی و حروف بعدی برای نحوه اتصال دو سیم پیچ دیگر به ترتیب کاهش ولتاژ است. به علاوه دو حرف آخر مربوط به شماره ساعت سیم پیچی های متناظر می باشند به طوری که بردار سیم پیچ فشار قوی به عنوان مبنا، در ساعت صفر قرار دارد. برای مثال علامت Dy_1y_1 و یا Yy_0d_1

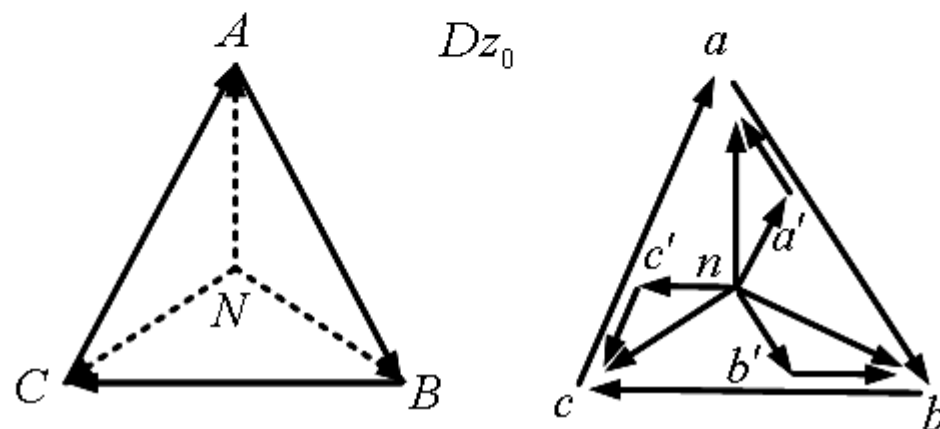
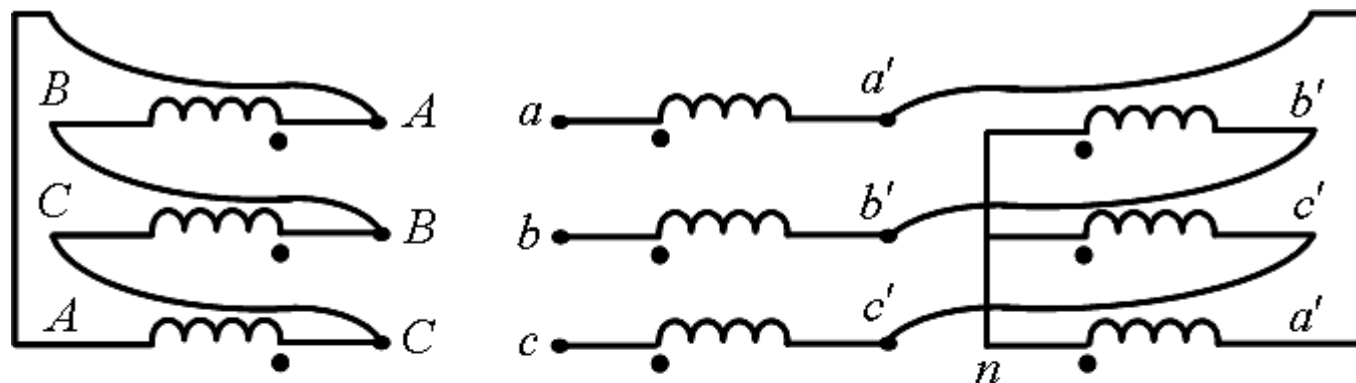
اختلاف زاویه برداری بین ولتاژهای خط فشار قوی و فشار ضعیف بستگی به جهت پیچش سیم پیچ ها و نحوه اتصال سه فاز دارد. از این رو در ترانس سه فاز علاوه بر اطلاعات مربوط به نحوه اتصالات فشار قوی و فشار ضعیف (مثلث، ستاره یا زیگزاگ) اختلاف فاز بین ولتاژ خطی فشار قوی و فشار ضعیف نیز باید مشخص گردد. به همین جهت 4 گروه برداری وجود دارد. گروه شماره یک (اختلاف فاز صفر درجه (ساعت 12))، گروه شماره دو (اختلاف فاز 180° درجه (ساعت 6))، گروه شماره سه (اختلاف فاز منفی 30° درجه (ساعت 1)) و گروه شماره چهار (اختلاف فاز مثبت 30° درجه (ساعت 11))

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

الف) گروه شماره یک (اختلاف فاز صفر درجه) (ساعت 12)

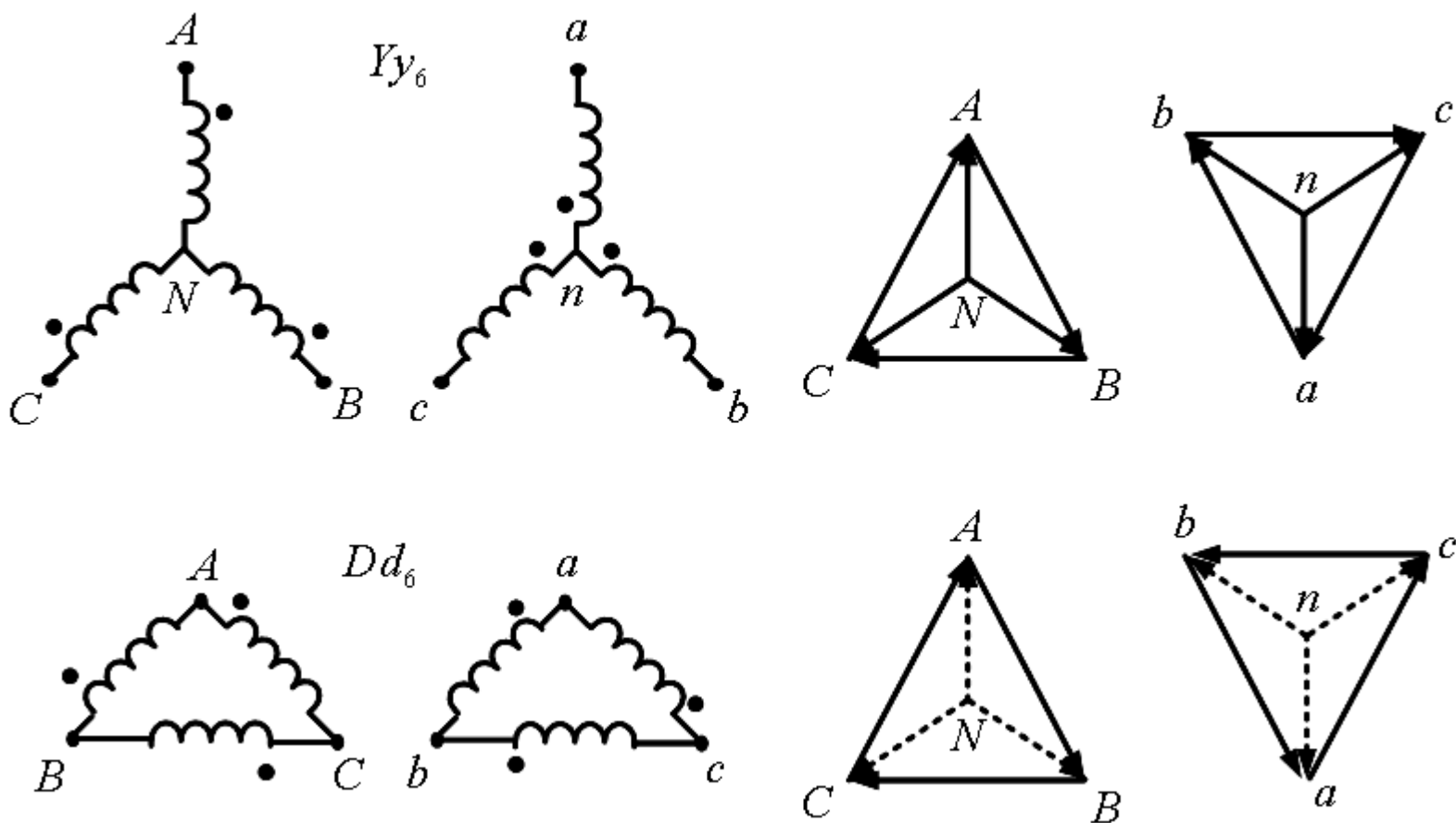


فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز



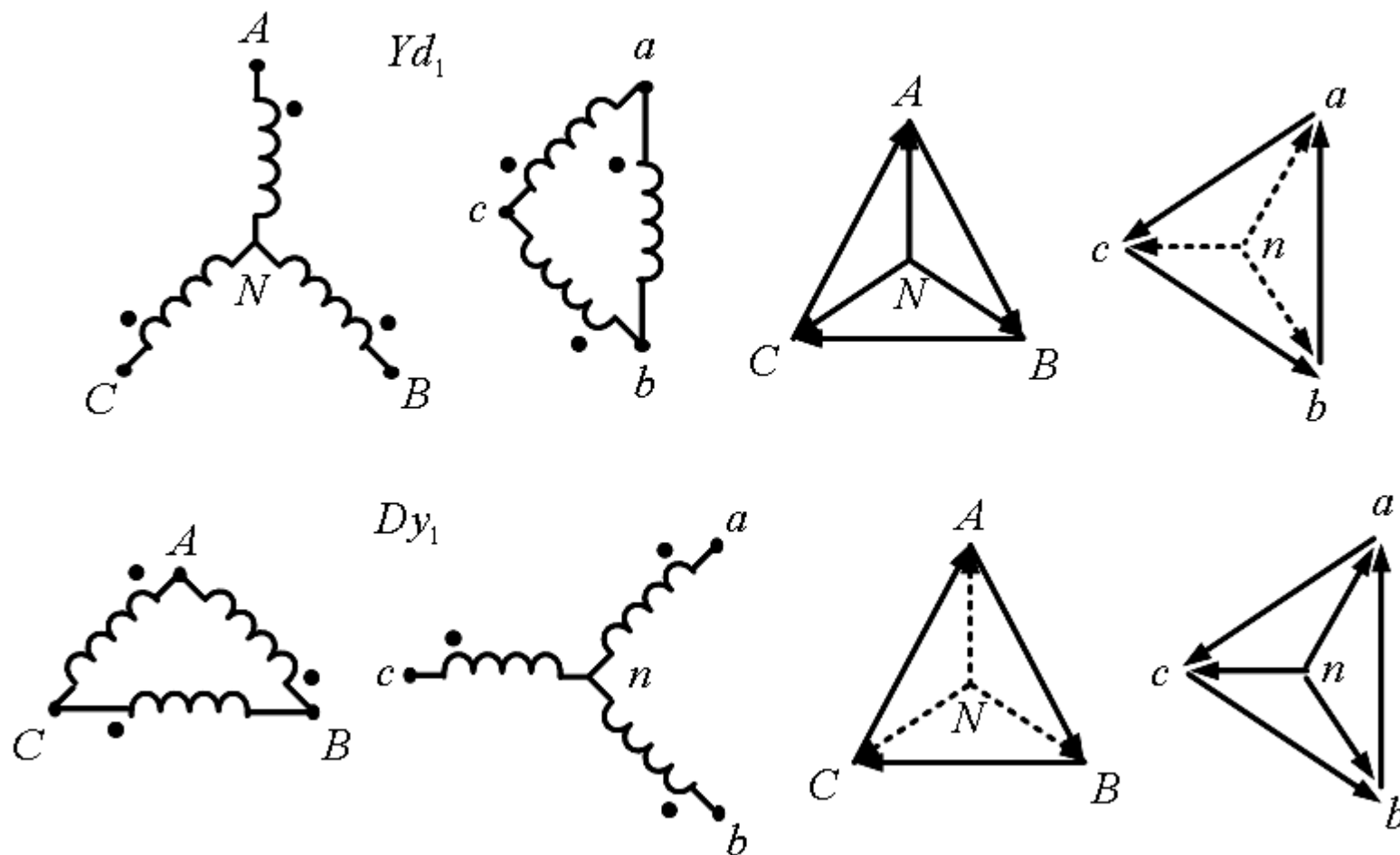
فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

(ب) گروه شماره دو (اختلاف فاز 180 درجه) (ساعت 6)



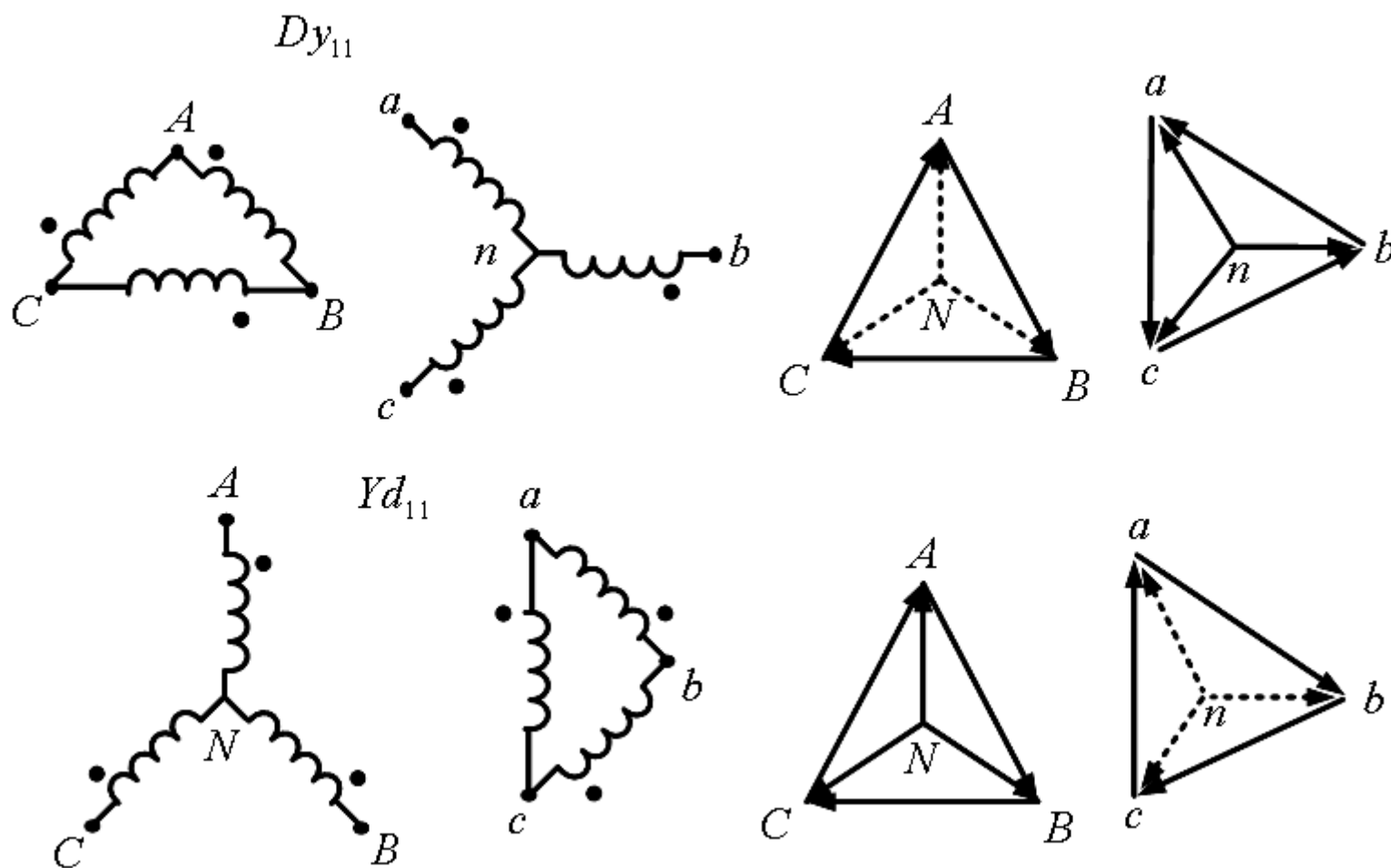
فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

(ج) گروه شماره سه (اختلاف فاز منفی 30 درجه) (ساعت 1)



فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

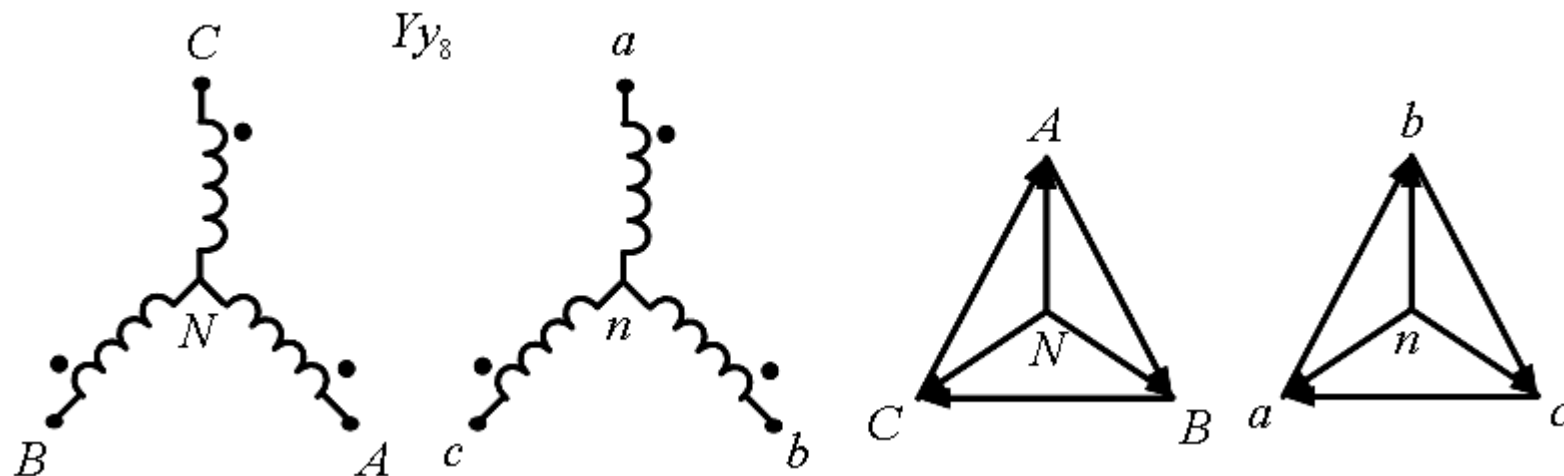
(د) گروه شماره چهار (اختلاف فاز مثبت 30 درجه) (ساعت 11)



فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

تأثیر جهت پلاریته و توالی فاز

تغییر پلاریته (نقطه) باعث شیف فاز 180 درجه می شود. (مقایسه Yy_0 و Yy_6)
جهت بررسی توالی فاز یک تغییرات دوره ای در طرف اولیه (فشار قوی) در اتصال Yy_0 از ABC به CAB ایجاد می کنیم:



در نتیجه ساعت ترانس به اندازه 120 درجه در جهت مثلثاتی شیف می خورد.

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

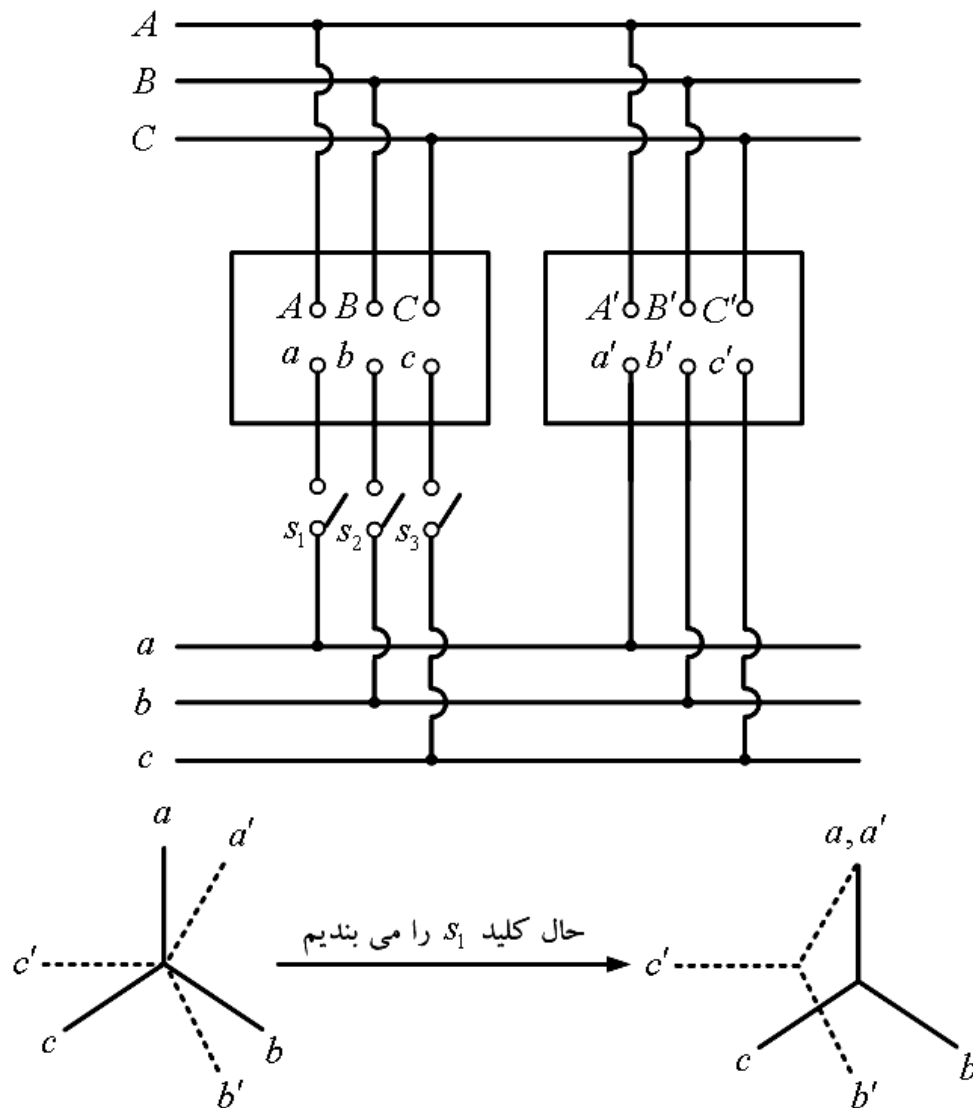
موازی کردن ترانسفورماتورهای سه فاز

روابط اصلی همانند روابط موازی کردن ترانسفورماتورهای تکفاز است. شرایط ضروری برای موازی کردن ترانسفورماتورهای سه فاز جهت کسب نتیجه مطلوب به صورت زیر است:

- ۱- نسبت تبدیل ولتاژهای خط ترانس ها باید یکسان باشند.
 - ۲- باید پلاریته ترانس ها یکسان باشند.
 - ۳- $u_k\%$ ترانس ها یکسان باشند. ($u_k\%$: ولتاژ نسبی اتصال کوتاه)
 - ۴- نسبت راکتانس های نشتی معادل به مقاومت های معادل برای تمام ترانس ها یکسان باشد.
- شرایط چهارگانه بالا برای موازی کردن ترانس های تکفاز نیز کارایی داشت. اضافه بر این چهار شرط، دو شرط اساسی دیگر برای موازی کردن ترانس های سه فاز باید برقرار باشد:

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

۵- گروه یکسان (اختلاف فاز برابر)
مثال نقض: اتصال ترانس های گروه 1 و 3 :

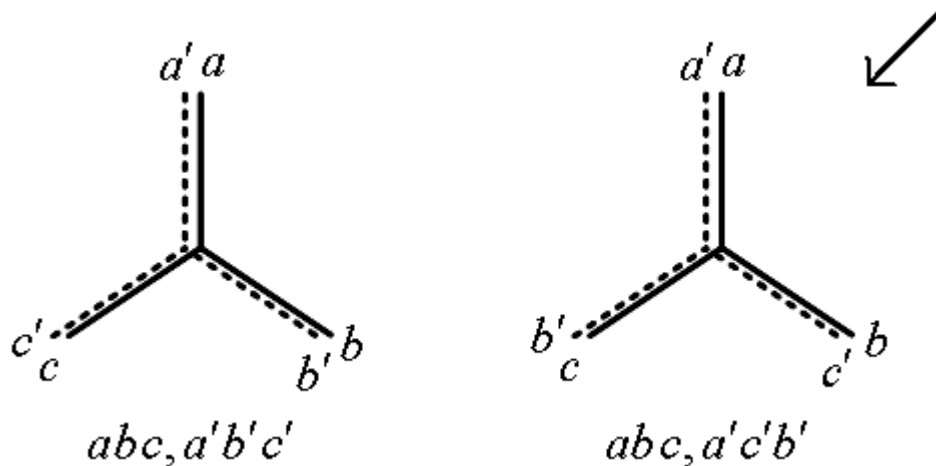


هیچ قانون مداری به ما دیکته نمی کند که مرکز ستاره های دو دیاگرام بر هم منطبق شود. حال اگر کلید s_2 که دارای ولتاژ bb' است، بسته شود، جریان گردشی بزرگی از فاز A و B می گذرد که ممکن است آسیب برساند.

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

۶- توالی فاز یکسان

ولتاژ کلیدهای s_2 و s_3 به ترتیب برابر bb' و cc' که مخالف صفر است.



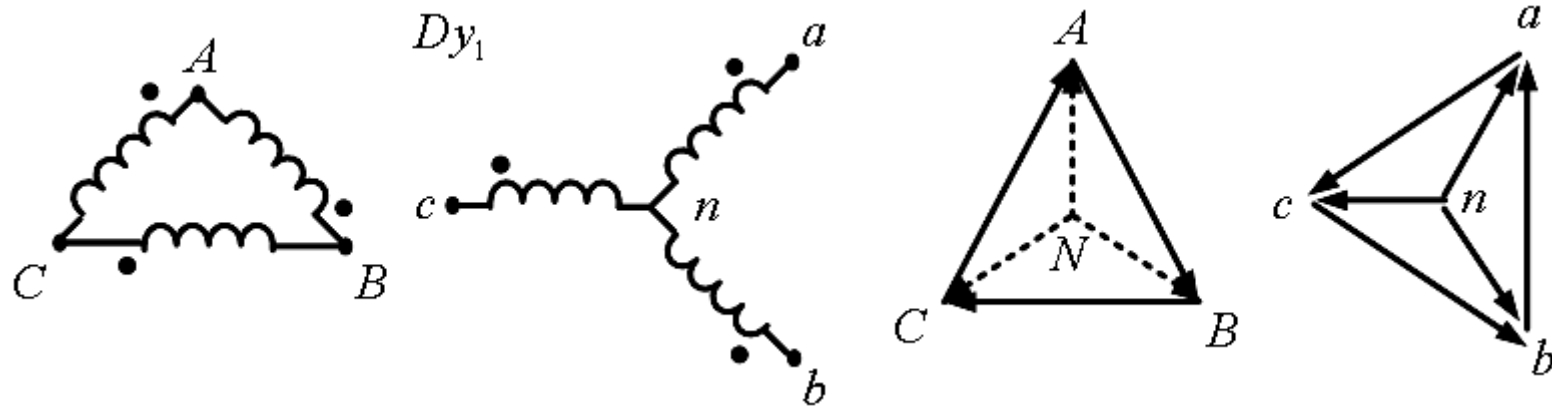
مثال: نشان دهید که چگونه می توان دو ترانس Yd_{11} از گروه چهار را با ترانس Dy_1 از گروه سه موازی کرد؟

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

حل: ولتاژهای خط و فاز ترانس Yd_{11} به اندازه 60° درجه از ولتاژهای خط و فاز ترانس با اتصال Dy_1 جلوترند.

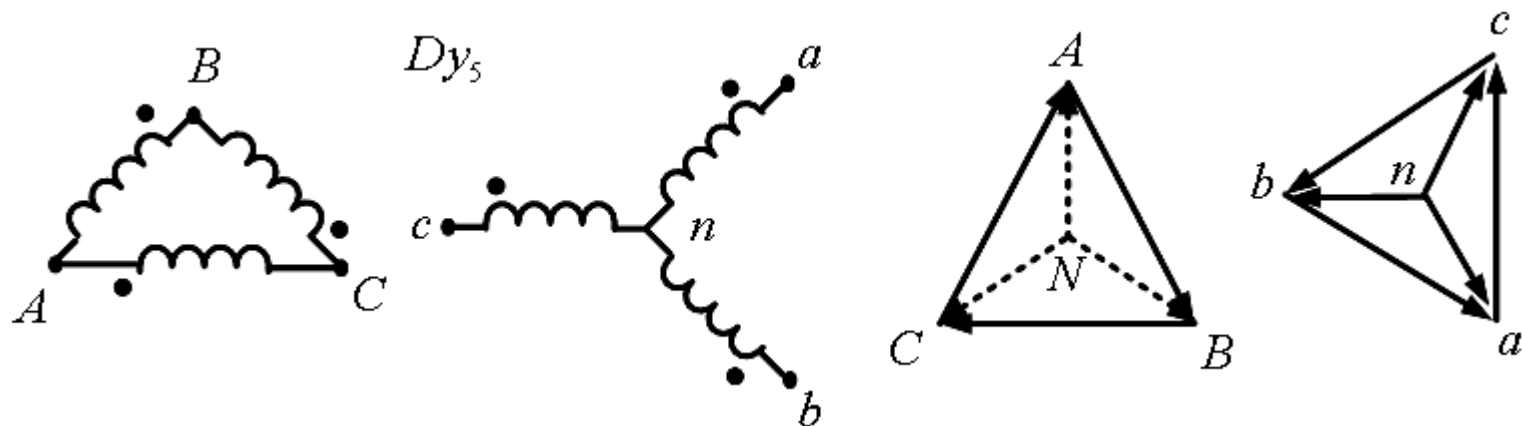
نکته: $60^\circ = 180^\circ - 120^\circ$

اتصال Dy_1 را در نظر می گیریم:

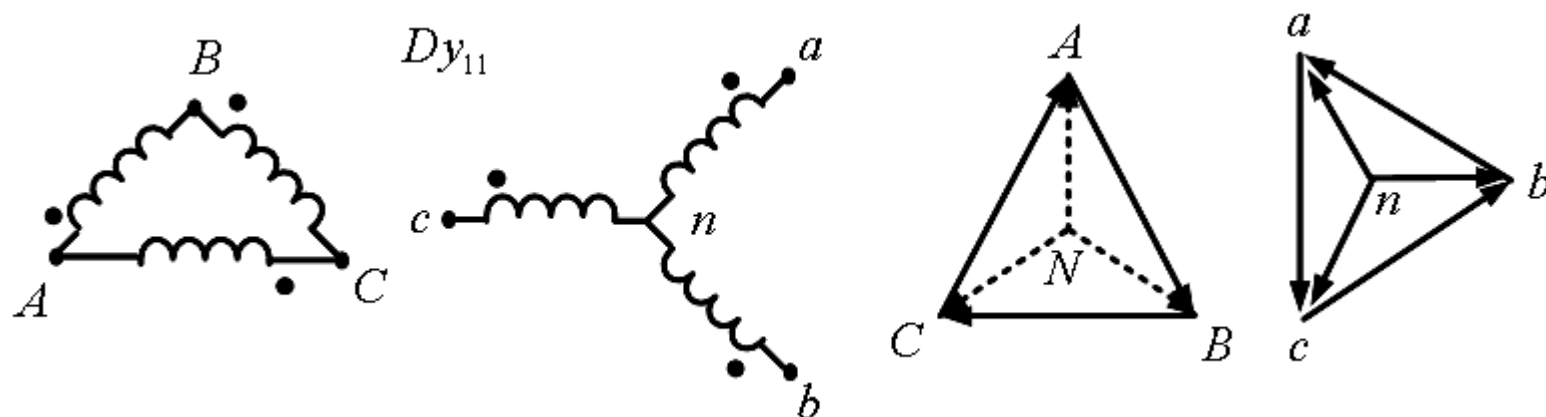


مرحله اول: از طریق تبدیل ABC به CAB و سپس BCA در ورودی ترانس با اتصال خروجی آن را به اندازه $2 \times 120^\circ = 240^\circ$ یا -120° می چرخانیم:

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

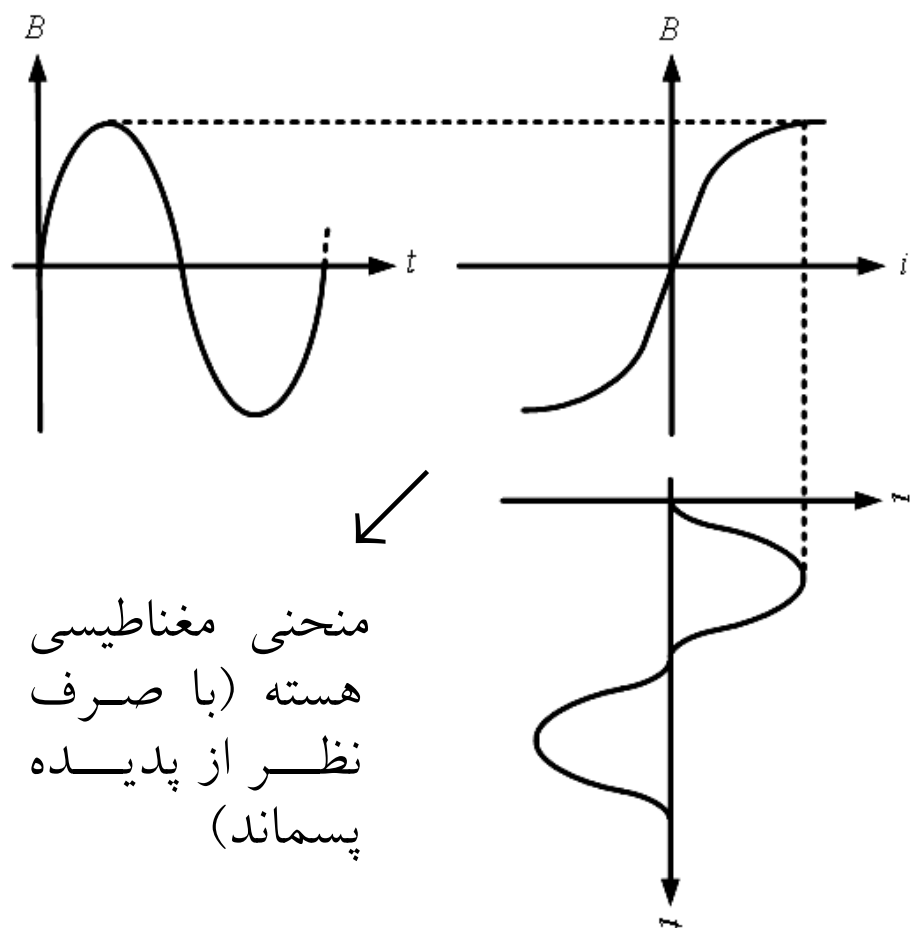


مرحله دوم: از طریق تغییر پلارایته سیم پیچ ها (چه در ورودی و چه در خروجی)، خروجی را مجدداً به اندازه 180 درجه می چرخانیم:



فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

پدیده تحریک در ترانسفورماتور - هارمونیک ها و اثر آنها در ترانس سه فاز



عامل ایجاد هارمونیک ها در ترانس هایی که با منبع سینوسی تغذیه می شوند، مشخصه مغناطیسی غیرخطی هسته می باشد. می دانیم که ولتاژ با مشتق شار متناسب است. لذا اگر ولتاژ سینوسی به ترانسی اعمال شود، شار نیز باید سینوسی باشد. اما با توجه به شکل روبرو، برای داشتن شار سینوسی، یک جریان غیرسینوسی لازم است که ترکیبی است از مؤلفه اصلی و مؤلفه های فرد دیگر.

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

شکل موج جریان شامل هارمونیک های مرتبه اول، سوم، پنجم و سایر مؤلفه های فرد است که فقط هارمونی های اول و سوم از نظر دامنه قابل ملاحظه اند.

مؤلفه اول:

سه فاز متقارن، توالی مثبت

$$\begin{cases} I_{A_1} = I_{m_1} \sin(\omega t) \\ I_{B_1} = I_{m_1} \sin(\omega t - 120^\circ) \Rightarrow I_{A_1} + I_{B_1} + I_{C_1} = 0 \\ I_{C_1} = I_{m_1} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases}$$

مؤلفه سوم:

سه موج همفاز

$$\begin{cases} I_{A_3} = I_{m_3} \sin(3\omega t) \\ I_{B_3} = I_{m_3} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{m_3} \sin(3\omega t) \Rightarrow I_{A_3} + I_{B_3} + I_{C_3} = 3I_{m_3} \sin(3\omega t) \\ I_{C_3} = I_{m_3} \sin 3(\omega t + 120^\circ) = I_{m_3} \sin(3\omega t) \end{cases}$$

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

مؤلفه پنجم:

سه فاز متقارن، توالی منفی

$$\begin{cases} I_{A_5} = I_{m_5} \sin(5\omega t) \\ I_{B_5} = I_{m_5} \sin 5(\omega t - 120^\circ) = I_{m_3} \sin(5\omega t + 120^\circ) \Rightarrow I_{A_5} + I_{B_5} + I_{C_5} = 0 \\ I_{C_5} = I_{m_5} \sin 5(\omega t + 120^\circ) = I_{m_3} \sin(5\omega t - 120^\circ) \end{cases}$$

مشکلات هارمونیکی بودن جریان تحریک

۱- تزریق مؤلفه های فرکانس بالا به شبکه. (البته به دلیل کوچک بودن جریان تحریک، مشکل حادی نخواهیم داشت).

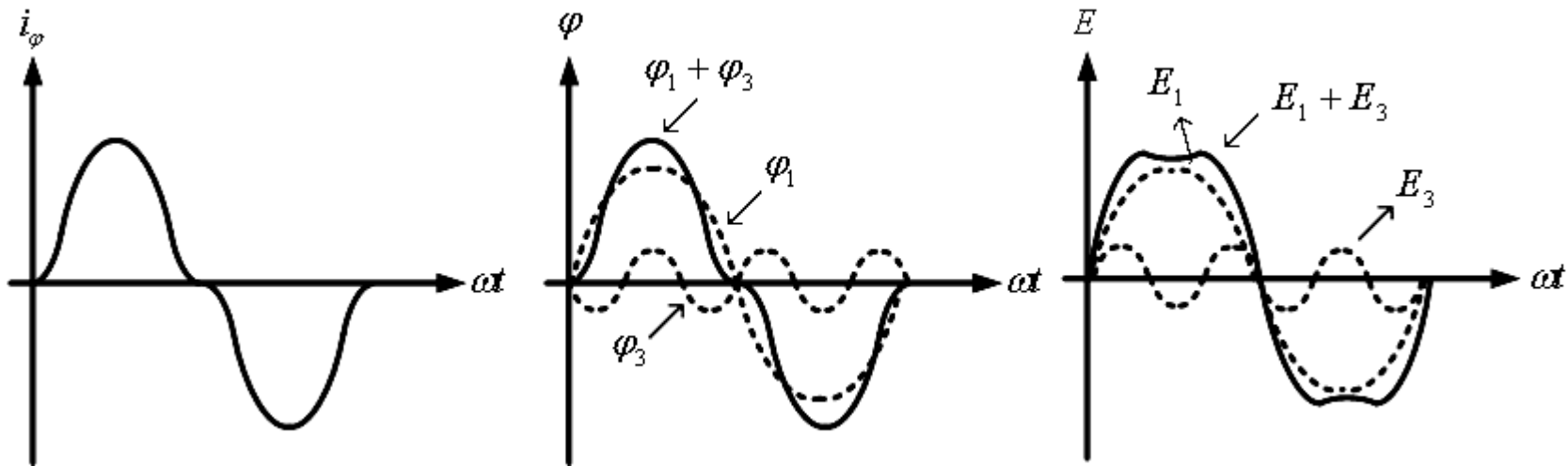
۲- یکی از دیگر مسائلی که از هارمونیک ها ناشی می شود، مربوط به مؤلفه سوم می باشد. دیدیم که حاصل جمع امواج سه فاز ناشی از این مؤلفه صفر نمی باشد، در حالی که حاصل جمع مؤلفه های دیگر صفر است. به همین خاطر در مدارات سه فاز باید برای مسیر برگشت این مؤلفه تمهیداتی اندیشید (مثلاً اتصال سیم چهارم). در غیر این صورت برقراری آن ممکن نبوده و باعث بروز مشکلاتی می شود.

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

جریان مغناطیس کننده سینوسی و غیرسینوسی در ترانس تکفاز

برای ولتاژ منبع سینوسی، شار نیز سینوسی است، اما جریان مغناطیس کننده باید حاوی هارمونیک سوم شدیدی باشد. جریان های با فرکانس مضرب 3 در سیم پیچی ترانس می تواند تنها وقتی وجود داشته باشد که emf با فرکانس مضرب 3 ظاهر شود، اما emf با فرکانس مضرب 3 تنها توسط شار با فرکانس مضرب 3 می تواند القاء شود. بنابراین شکل موج واقعی شار ترکیبی است از موج شار سینوسی و موج شار هارمونیک سوم. انحراف موج شار منتج از شکل سینوسی بستگی به مقدار چگالی شار هسته دارد. اگر ترانس در چگالی شار بالاتری در هسته کار کند، جریان هارمونیک سوم بیشتر تقویت می شود و بنابراین emf هارمونیک سوم E_3 قوی تری برای به گردش در آوردن آن لازم است. مقدار بزرگ E_3 تنها می تواند با مقدار بزرگ شار هارمونیک سوم φ_3 القاء شود. در نتیجه موج شار منتج (شار سینوسی φ_1 + شار هارمونیک سوم شدید φ_3) در چگالی شار بالاتر، از موج سینوسی ایده آل بسیار فاصله می گیرد. اگر ترانس اجازه عبور جریان های مغناطیس کننده هارمونیک ها را بدهد، خواهیم داشت:

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز



معادله یک موج شار قله دار (نوک تیز):

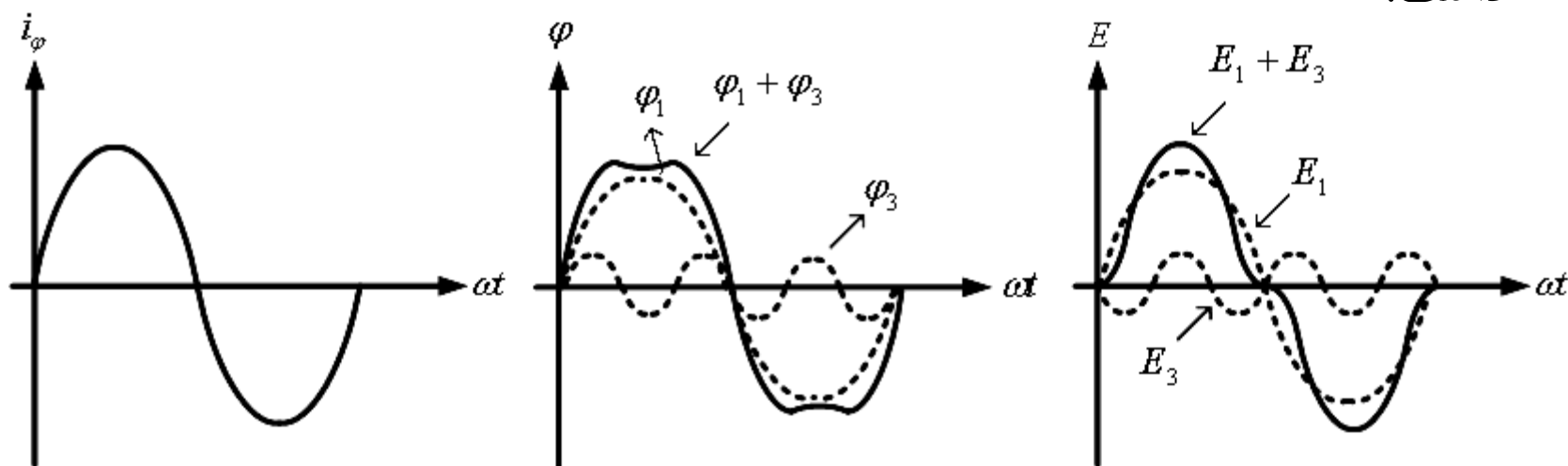
$$\phi(t) = \phi_{m_1} \sin(\omega t) - \phi_{m_3} \sin(3\omega t) - \phi_{m_5} \sin(5\omega t) - \dots$$

معادله یک موج emf سر صاف (زینی):

$$e = -\frac{d\phi(t)}{dt} = -\omega \left[\phi_{m_1} \cos(\omega t) - 3\phi_{m_3} \cos(3\omega t) - 5\phi_{m_5} \cos(5\omega t) - \dots \right]$$

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

اگر به دلایلی هارمونیک های جریان مغناطیس کننده نتواند عبور کند، خواهیم داشت:



معادله یک موج شار سر صاف (زینی):

$$\varphi(t) = \varphi_{m_1} \sin(\omega t) + \varphi_{m_3} \sin(3\omega t) + \varphi_{m_5} \sin(5\omega t) + \dots$$

معادله یک موج emf قله دار (نوک تیز):

$$e = -\frac{d\varphi(t)}{dt} = -\omega \left[\varphi_{m_1} \cos(\omega t) + 3\varphi_{m_3} \cos(3\omega t) + 5\varphi_{m_5} \cos(5\omega t) + \dots \right]$$

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

پدیده هارمونیک در ترانس های سه فاز به عوامل زیر وابسته است:

۱- نوع اتصال سیم پیچ ترانس (ستاره، مثلث و یا زیگزاگ)

۲- مدار مغناطیسی سه فاز (مجزا و یا به هم پیوسته)

حال فرض می کنیم که ولتاژهای اعمالی به صورت زیر باشد:

$$\begin{cases} V_A = V_{m_1} \sin(\omega t) + V_{m_3} \sin(3\omega t) + V_{m_5} \sin(5\omega t) + \dots \\ V_B = V_{m_1} \sin(\omega t - 120^\circ) + V_{m_3} \sin 3(\omega t - 120^\circ) + V_{m_5} \sin 5(\omega t - 120^\circ) + \dots \\ V_C = V_{m_1} \sin(\omega t + 120^\circ) + V_{m_3} \sin 3(\omega t + 120^\circ) + V_{m_5} \sin 5(\omega t + 120^\circ) + \dots \end{cases}$$

اتصال ستاره

$$\text{ولتاژ خط : } \bar{V}_{AB} = \bar{V}_A - \bar{V}_B, \quad \bar{V}_{AB_3} = \bar{V}_{A_3} - \bar{V}_{B_3} = V_{m_3} \sin(3\omega t) - V_{m_3} \sin(3\omega t - 120^\circ) = 0$$

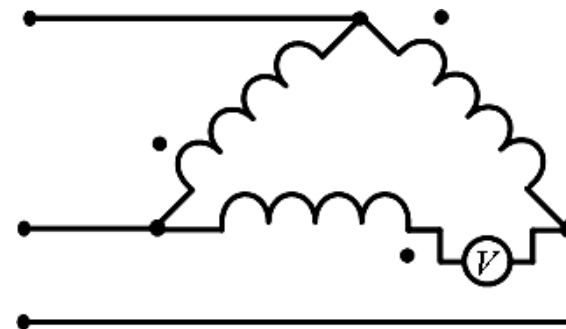
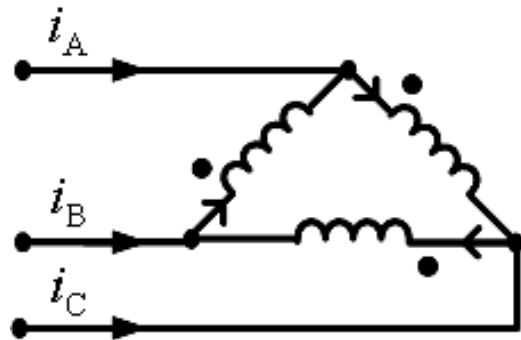
در نتیجه برای اتصال ستاره حتی اگر ولتاژهای فاز شامل هارمونیک های مضرب سه باشند، ولتاژهای خط تهی از این هارمونیک های مضرب سه می باشند.

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

اتصال مثلث

در این اتصال با توجه به اینکه ترمینال های با پلاریته متفاوت به یکدیگر متصل می شوند، اگر سه سیم پیچی در یک نقطه باز شود و یک ولت متر مطابق شکل زیر متصل گردد، قرائت ولت متر صفر خواهد بود به شرطی که تنها نیروهای محرکه الکتریکی موج اصلی و هارمونیک های غیر مضرب سه در سه فاز موجود باشند. حال اگر این emf ها شامل هارمونیک های مضرب سه نیز باشند، خواهیم داشت:

$$V = 3\sqrt{E_3^2 + E_9^2 + \dots}$$



فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

اگر ولت‌متر برداشته شود و به جای آن یک آمپر‌متر قرار بگیرد، آنگاه هارمونیک سوم جریان I_3 (با صرف نظر کردن از I_9 و ...) اندازه‌گیری می‌شود. در هر صورت هارمونیک سوم جریان نمی‌تواند در خطوط یک ترانس با اتصال مثلث، موجود باشد زیرا:

$$i_{A_3} = i_{AB_3} - i_{CA_3} = I_{m_3} \sin(3\omega t) - I_{m_3} \sin(3\omega t + 120^\circ) = 0$$

در نتیجه هارمونیک سوم جریان مغناطیس‌کننده می‌تواند در مثلث بسته شود، اما در خط قادر به جاری شدن نیست.

نکته: نیروهای محرکه الکتریکی مضرب سه، حتی در سیم پیچی‌های اتصال مثلث بین خطوط ظاهر نمی‌گردد. این پدیده ناشی از این حقیقت است که نیروهای محرکه الکتریکی کاملاً با افت‌های امپدانس مربوط، ناشی از هارمونیک جریان مضرب سه، به حالت تعادل و موازنه می‌رسند. برای مثال اگر هر فاز شامل E_3 ، هارمونیک سوم نیروی محرکه الکتریکی و Z_3 ، امپدانس هارمونیک سوم باشد، آنگاه جریان، ناشی از هارمونیک سوم جریان I_3 در مثلث بسته به صورت زیر است:

$$I_3 = \frac{3E_3}{3Z_3} = \frac{E_3}{Z_3}, \quad E_3 = Z_3 I_3$$

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

در نتیجه در هر فاز، E_3 کاملاً با افت پتانسیل هارمونیک سوم $Z_3 I_3$ برابر است. همین نتیجه برای سایر هارمونیک های مضرب سه نیز صحیح است.

یک ترانس در مدارهای سه فاز بر اساس نوع هسته می تواند ترانس سه فاز نوع هسته ای و یا ترانس سه فاز نوع پیوسته ای (زرهی) و یا یک بانک از سه ترانس تکفاز باشد. از دید مدارهای مغناطیسی، ترانس سه فاز به دو دسته تقسیم می شوند:

۱- ترانس های سه فازی که برای سه فاز مدارهای مغناطیسی مستقل و مجزا دارند.

۲- ترانس های سه فازی که برای سه فاز مدارهای مغناطیسی پیوسته و تزویج شده دارند.

الف) اتصال (بدون اتصال زمین):

۱- ترانس های با مدارهای مغناطیسی مجزا و مستقل:

$$\begin{cases} I_{A_3} = I_{m_3} \sin(3\omega t) \\ I_{B_3} = I_{m_3} \sin(3\omega t) \\ I_{C_3} = I_{m_3} \sin(3\omega t) \end{cases} \Rightarrow I_n = I_{A_3} + I_{B_3} + I_{C_3} = 3I_{m_3} \sin(3\omega t) = 0 \Rightarrow I_{m_3} = 0$$

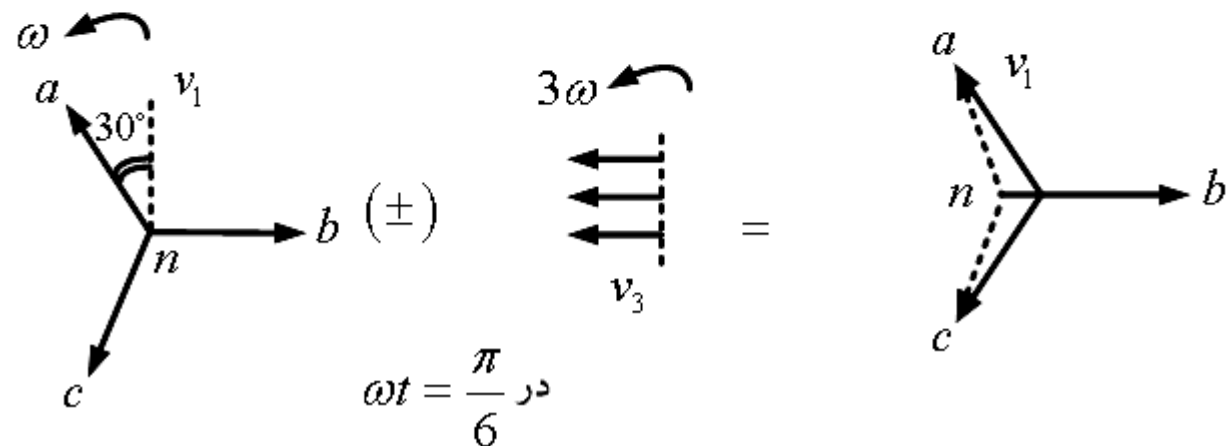
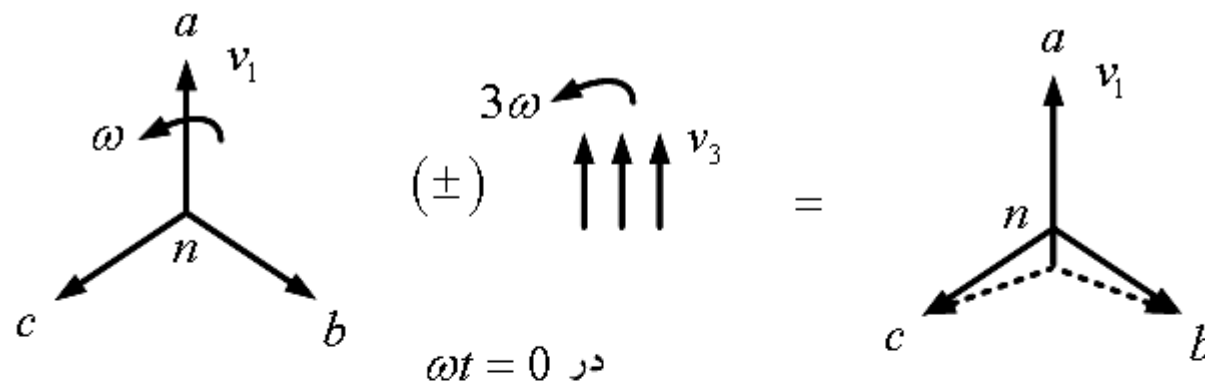
فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

در نتیجه جریان های هارمونیک سوم قادر به جاری شدن در خطوط و فازهای ترانس با اتصال Yy بدون اتصال زمین نیستند. در نتیجه شکل موج جریان ها فاقد هارمونیک سوم است. در نتیجه شار سر صاف و ولتاژ emf قله دار است. از آنجا که مدار مغناطیسی ترانس مجزا است، مقاومت مغناطیسی مسیر شار ϕ_3 بسیار کم است. در نتیجه ϕ_3 درصد بزرگی از شار اصلی ϕ_1 را تشکیل می دهد: $((\phi_3 \text{ حدود } 20\% \phi_1 \text{ است}))$ در نتیجه $((E_1 \text{ حدود } 60\% E_3 \text{ است}))$

بنابراین، emf هر فاز در سیم پیچی اولیه و ثانویه قله دار است و دارای دامنه 160% دامنه مؤلفه اصلی emf است. این ولتاژهای ماکزیمم ممکن است به عایق بندی ترانس آسیب برسانند. در نتیجه در سیستم های HV مورد استفاده قرار نمی گیرند. توجه: ولتاژهای خط تهی از ولتاژهای هارمونیک سوم است. در نتیجه این ولتاژها سینوسی اند.

نکته: با توجه به اینکه $\phi_3 = 20\% \phi_1$ مقدار مؤثر ولتاژ برداری منتهی به $\sqrt{1^2 + 0.6^2} = 1.17$ برابر مؤلفه اصلی ولتاژ فاز است. بنابراین رابطه ولتاژ فاز $\sqrt{3}$ = ولتاژ خط درست نمی باشد. اثر دیگر emf هارمونیک سوم، نوسان نقطه ختشی در فرکانس $3f$ است:

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز



فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

از آنجا که ترانس به یک شبکه سه فاز با قدرت زیاد متصل است، رأس های a ، b و c بردارهای اصلی نمی توانند تغییر موقعیت بدهند. در نتیجه این نقطه خنثی در فرکانس $3f$ تغییر محل می دهد. در نتیجه بی ثباتی و نوسان را در ولتاژ خط به نقطه خنثی ستاره خواهیم داشت.

۲- ترانس های با مدار مغناطیسی وابسته یا تزویج شده:

مسیر برگشت شارهای هارمونیک سوم و مضارب آن، هوا و یا روغن اطراف هسته است. مقاومت مغناطیسی مسیر بالا می باشد. در نتیجه شارهای مضارب 3 و بنابراین emf های مضارب 3 کوچک هستند. در نتیجه ولتاژهای فاز به امواج سینوسی نزدیک تر می شوند.

ب) اتصال Yy با نقطه خنثی

در این نوع اتصال جریان های هارمونیک سوم در سیم پیچی های فاز و در خطوط وجود دارند و از طریق زمین مسیر خود را می بندند. در نتیجه شکل موج شار و بنابراین ولتاژهای فاز سینوسی اند و $V_L = \sqrt{3}V_\phi$ و نقطه خنثی پایدار است.

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

اشکال عمده این نوع اتصال وجود جریان های هارمونیک سوم در خطوط انتقال است که تداخل قابل توجهی در مدارهای مخابراتی که به موازات خطوط انتقال کشیده شده اند، ایجاد می کنند.

ج) اتصال Dy

ولتاژ تغذیه سینوسی اعمال شده به ترانس Dy جریان مغناطیس کننده سینوسی در خطوط ایجاد می کند. این جریان در سیم پیچی های ترانس باعث سرصاف شدن موج شار می گردد. در نتیجه شار شامل هارمونیک سوم شدیدی خواهد بود. در نتیجه emf های با مضرب 3 به وجود می آیند. این emf در مثلث بسته جریان هارمونیک سوم برقرار می سازد. در نتیجه جریان سیم پیچی ترانس شامل جریان مغناطیس کننده سینوسی به همراه یک هارمونیک سوم جریان مغناطیس کننده می باشد. اما جریان خطوط انتقال همچنان فاقد هارمونیک سوم هستند. شار ϕ_3 با سیم پیچی ثانویه نیز پیوند دارد. در نتیجه مقدار کمی هارمونیک سوم emf (1% ولتاژ نامی) در فازهای ثانویه القاء می شود. اما ولتاژهای خط خروجی تهی از هارمونیک های سوم emf می باشند.

فصل دوم: ترانسفورماتور سه فاز

د) اتصال Yd

از آنجا که هارمونیک سوم جریان قادر به جاری شدن در سیم پیچی های اتصال ستاره یک ترانس نیست، جریان مغناطیس کننده موج سینوسی خواهد بود. در نتیجه شکل موج شار سرصاف است. در نتیجه شامل هارمونیک سوم شدیدی است. در نتیجه تولید emf هارمونیک سوم در سیم پیچی اولیه و ثانویه می کند. ثانویه به صورت مثلث بسته است. در نتیجه ایجاد جریان هارمونیک سوم در مثلث بسته می کند. اما در خط خروجی جریان هارمونیک سوم نخواهیم داشت.

ه) اتصال Dd

جریان خطوط سینوسی در نتیجه شار سرصاف شامل هارمونیک سوم در نتیجه emf شامل هارمونیک سوم چه در اولیه و چه در ثانویه، اما همچنان ولتاژها سینوسی اند.