به نام خدا

ماشینهای الکتریکی ۳

غلامرضا کامیاب

مراجع

- ۱- "ماشینهای الکتریکی" تالیف فیتزجرالد
- ۲- " ماشینهای الکتریکی" تالیف پ س سن
- ۳- " ماشینهای الکتریکی" تالیف چاپمن
- ۴- " ماشینهای الکتریکی" تالیف بیم بهارا
- ۵- " ماشینهای الکتریکی" تالیف ال هاوری
- ۶- " ماشینهای الکتریکی" تالیف سلمون
- ...

مباحث

- فصل اول : ترانسفورماتورهای سه فاز شامل
  - مقدمه
  - معادلات ولتاژ ترانسفورماتورهای سه فاز
  - مولفه های متقارن
  - انتقال مولفه ها در ترانسفورماتور
  - روشهای مقابله با مولفه هموپلار
  - عدد شناسائی
  - اتصالات خاص ترانسفورماتورهای سه فاز
- فصل دوم : ماشینهای سنکرون

ترانسفورماتورهای سه فاز

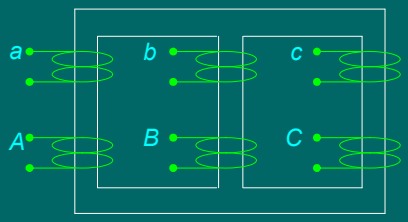
- نقش ترانسفورماتورهای سه فاز: تبدیل ولتاژ ژنراتورهای سه فاز برای انتقال و توزیع
- انواع ساخت ترانسفورماتورهای سه فاز:

۱- مجموعه سه ترانس تکفاز که بصورت سه فاز استفاده می شود.

۲- ترانسفورماتورهای سه فاز یکپارچه (اقتصادی تر است).

ترانسفورماتورهای سه فاز یکپارچه

- انواع هسته های ترانسفورماتورها ی سه فاز یکپارچه:

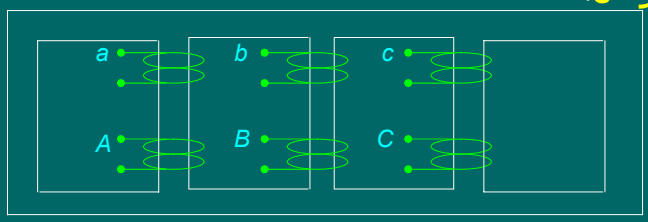


۱- نوع هسته ای (ستونی)

۱-۱- نوع سه ستونی

۱-۲- نوع پنج ستونی.

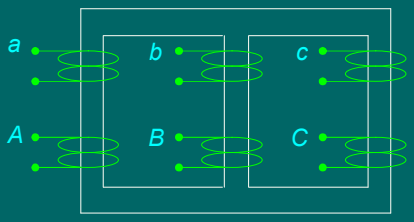
۲- نوع زرهی.



ترانسفورماتورهای هسته زرهی

- می توان نشان داد که اگر جهت پیچش سیم پیچهای سه فاز یکسان باشند، مقطع پایه های عمودی ۱ و ۴ باید نصف پایه های افقی باشند و مقطع پایه های ۲ و ۳ باید ۰.۸۷ برابر پایه های افقی باشند.

معادلات ولتاژ ترانسفورماتورسه فاز



- از روش مدارهای کوپله شده (تزویج) استفاده میشود.
- فرضیات:

۱- ترانس از لحاظ مغناتیسی متقارن است یعنی رلوکتانس هر سه شاخه برابراند.

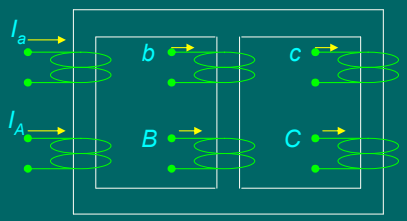
۲- μ آهن ثابت است.

۳- همه سیم پیچها دریک جهت بسته شده اند و تعداد دورهای اولیه باهم و تعداد دورهای ثانویه با هم برابراند.

$N_a=N_b=N_c=N_1$
$N_A=N_B=N_C=N_2$

۴- سیم پیچهای اولیه و ثانویه هر فاز روی یک ساق قرار دارند.

شار حلقه شده در هریک از سیم پیچهای اولیه



$$\lambda_a = L'_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + L_{aA} i_A + L_{aB} i_B + L_{aC} i_C$$
$$\lambda_b = L_{ba} i_a + L'_{bb} i_b + L_{bc} i_c + L_{bA} i_A + L_{bB} i_B + L_{bC} i_C$$
$$\lambda_c = L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L'_{cc} i_c + L_{cA} i_A + L_{cB} i_B + L_{cC} i_C$$

$$L'_{aa} = L_{aa} + L_{la}$$
$$L'_{bb} = L_{bb} + L_{lb}$$
$$L'_{cc} = L_{cc} + L_{lc}$$

- L_{aa} اندوکتانس سیم پیچ a ناشی از شارهائی است که با سایر سیم پیچ ها تزویج دارد ولی L_{la} اندوکتانس سیم پیچ a ناشی از شارهای نشتی است که با سایر سیم پیچها تزویج ندارد.

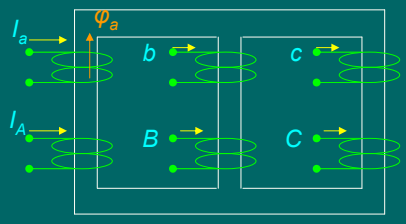
شکل ماتریسی شار حلقه شده سیم پیچهای اولیه

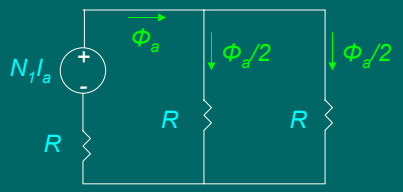
$$\begin{bmatrix}\lambda_a\\ \lambda_b\\ \lambda_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_{aa}+L_{la} & L_{ab} & L_{ac}\\ L_{ba} & L_{bb}+L_{lb} & L_{bc}\\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc}+L_{lc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\ i_b\\ i_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}L_{aA} & L_{aB} & L_{aC}\\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC}\\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cC}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_A\\ i_B\\ i_C\end{bmatrix}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\lambda_a\\ \lambda_b\\ \lambda_c\end{bmatrix}}_{\vec{\lambda}_1}=\left(\underbrace{\begin{bmatrix}L_{aa} & L_{ab} & L_{ac}\\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc}\\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc}\end{bmatrix}}_{L_{s1}}+\underbrace{\begin{bmatrix}L_{la} & 0 & 0\\ 0 & L_{lb} & 0\\ 0 & 0 & L_{lc}\end{bmatrix}}_{L_{l1}}\right)\underbrace{\begin{bmatrix}i_a\\ i_b\\ i_c\end{bmatrix}}_{\vec{i}_1}+\underbrace{\begin{bmatrix}L_{aA} & L_{aB} & L_{aC}\\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC}\\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC}\end{bmatrix}}_{M=L_{12}}\underbrace{\begin{bmatrix}i_A\\ i_B\\ i_C\end{bmatrix}}_{\vec{i}_2}$$

$$\vec{\lambda}_1=(L_{s1}+L_{l1}).\vec{i}_1+M.\vec{i}_2$$

محاسبه اندوکتانس L_{aa}



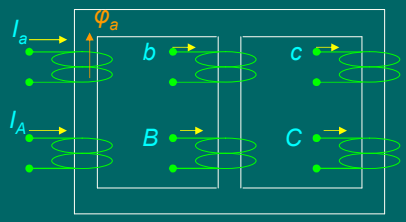


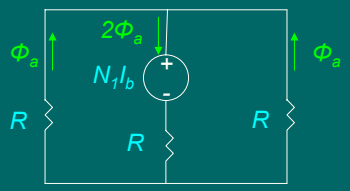
$$N_1 i_a = R\varphi_a + R\left(\frac{\varphi_a}{2}\right) \quad \Rightarrow \quad \varphi_a = \left(\frac{2N_1 i_a}{3R}\right)$$

$$L_{aa}=\left.\frac{\lambda_a}{i_a}\right|_{i_b=i_c=i_A=i_B=i_C=0}=\frac{N_1\varphi_a}{i_a}=\frac{N_1\left(\frac{2N_1 i_a}{3R}\right)}{i_a}=\frac{2N_1^2}{3R}=L_{S1}$$

$$L_{aa}=L_{bb}=L_{cc}=L_{s1}$$

محاسبه اندوکتانس L_{ab}



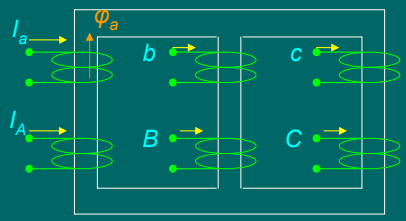


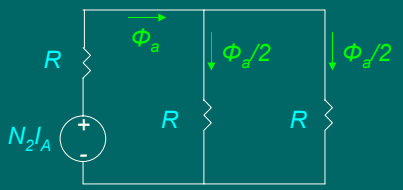
$$R\varphi_a + N_1 i_b + R(2\varphi_a) = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_a = -\frac{N_1 i_b}{3R}$$

$$L_{ab} = \left.\frac{\lambda_a}{i_b}\right|_{i_a=i_c=i_A=i_B=i_C=0} = \frac{N_1\varphi_a}{i_b} = \frac{N_1\left(-\frac{N_1 i_b}{3R}\right)}{i_b} = -\frac{N_1^2}{3R} = -\frac{L_{S1}}{2}$$

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = -\frac{L_{s1}}{2}$$

محاسبه اندوکتانس L_{aA}



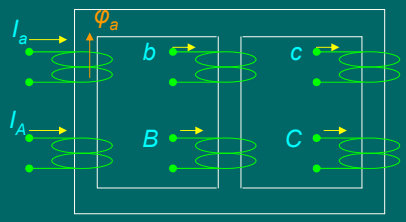


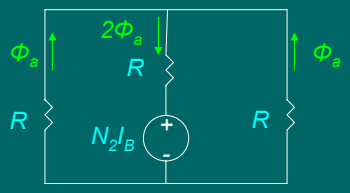
$$-N_2 i_A + R\varphi_a + R\left(\frac{\varphi_a}{2}\right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_a = \left(\frac{2N_2 i_A}{3R}\right)$$

$$L_{aA} = \left.\frac{\lambda_a}{i_A}\right|_{i_a=i_b=i_c=i_B=i_C=0} = \frac{N_1\varphi_a}{i_A} = \frac{N_1\left(\frac{2N_2 i_A}{3R}\right)}{i_A} = \frac{2N_1 N_2}{3R} = L_{S12}$$

$$L_{aA} = L_{bB} = L_{cC} = L_{s12}$$

محاسبه L_{aB} اندوکتانس





$$R\varphi_a + R(2\varphi_a) + N_2 i_B = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_a = -\frac{N_2 i_B}{3R}$$

$$L_{aB} = \left.\frac{\lambda_a}{i_B}\right|_{i_a = i_b = i_c = i_A = i_C = 0} = \frac{N_1 \varphi_a}{i_B} = \frac{N_1\left(-\frac{N_2 i_B}{3R}\right)}{i_B} = -\frac{N_1 N_2}{3R} = -\frac{L_{S12}}{2}$$

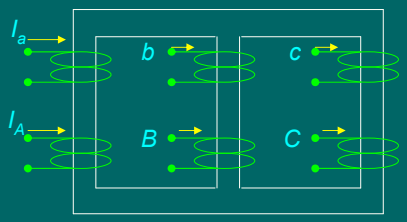
$$L_{aB} = L_{aC} = L_{bA} = L_{bC} = L_{cA} = L_{cB} = -\frac{L_{s12}}{2}$$

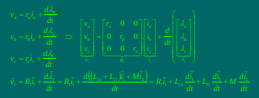
ماتریسهای اندوکتانس

$$L_{S1} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1} & -\frac{L_{s1}}{2} & -\frac{L_{s1}}{2} \\ -\frac{L_{s1}}{2} & L_{s1} & -\frac{L_{s1}}{2} \\ -\frac{L_{s1}}{2} & -\frac{L_{s1}}{2} & L_{s1} \end{bmatrix} = L_{s1} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s12} & -\frac{L_{s12}}{2} & -\frac{L_{s12}}{2} \\ -\frac{L_{s12}}{2} & L_{s12} & -\frac{L_{s12}}{2} \\ -\frac{L_{s12}}{2} & -\frac{L_{s12}}{2} & L_{s12} \end{bmatrix} = L_{s12} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

روابط ولتاژ





$$L^{t}_{aa} = L_{aa} + L_{la}$$
$$L^{t}_{bb} = L_{bb} + L_{lb}$$
$$L^{t}_{cc} = L_{cc} + L_{lc}$$

نحوه دات گذاری سیم پیچها

داتها باید طوری قرار گیرند که جریان ورودی به داتها شار هم جهت تولید کنند.

تعریف α

تعریف می کنیم : $\alpha = e^{j120} = 1 < 120^{o}$

اگر α در یک فازور ضرب شود فقط فاز آنرا به اندازه ۱۲۰درجه اضافه می کند (در جهت مثلثاتی می چرخاند).

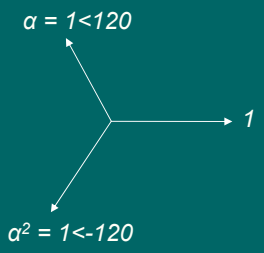
می توان نشان داد:

$$\alpha^2 = \alpha^* = 1 < -120^\circ$$

$$\alpha^3 = 1$$

$$(\alpha^2)^* = \alpha$$

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$$



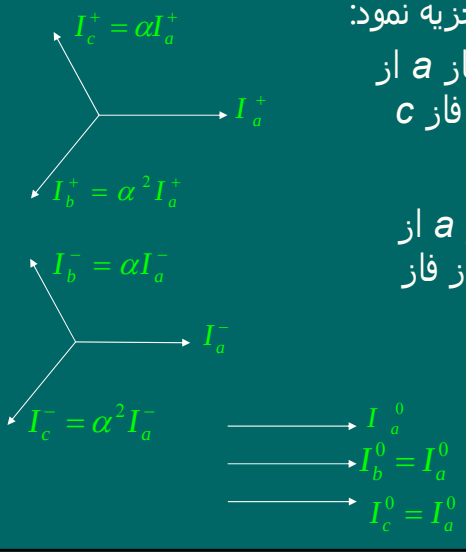
مولفه های متقارن

می توان نشان داد که هر مجموعه فازور سه فاز نامتقارن را می توان به سه مجموعه مولفه متقارن زیر تجزیه نمود:

الف) مجموعه توالی مثبت (*abc*): فاز *a* از فاز *b* ۱۲۰ جلوتر است و فاز *b* از فاز *c* ۱۲۰ درجه جلوتر است.

ب) مجموعه توالی منفی (*acb*): فاز *a* از فاز *b* ۱۲۰ عقب تر است و فاز *b* از فاز *c* ۱۲۰ درجه عقب تر است.

ج) مجموعه توالی صفر : هر سه فاز هم فاز و مساویند.



تجزیه به مولفه های متقارن

$$\begin{cases} I_a = I_a^+ + I_a^- + I_a^0 \\ I_b = I_b^+ + I_b^- + I_b^0 = \alpha^2 I_a^+ + \alpha I_a^- + I_a^0 \\ I_c = I_c^+ + I_c^- + I_c^0 = \alpha I_a^+ + \alpha^2 I_a^- + I_a^0 \end{cases}$$

شکل ماتریسی :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} \longrightarrow I_p = T.I_s \longrightarrow I_s = T^{-1} I_p$$

I_p جریانهای فازی و I_s مولفه های متقارن جریانها هستند.

ماتریس تبدیل فورتسکیو و معکوس آن :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \qquad T^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

مثال

$$\begin{cases} I_a = 1 < 0 \\ I_b = 0 \\ I_c = 0 \end{cases}$$

مولفه متقارن جریانهای I_a، I_b و I_c را بدست آورید؟

حل :

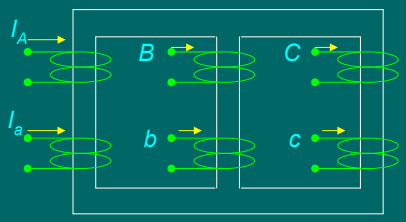
$$I_s = T^{-1} I_p$$

$$\begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a = 1 < 0 \\ I_b = 0 \\ I_c = 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 < 0 \\ 1 < 0 \\ 1 < 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} < 0 \\ \frac{1}{3} < 0 \\ \frac{1}{3} < 0 \end{bmatrix}$$

$$I_a^+ = I_a^- = I_a^0 = \frac{1}{3} < 0$$

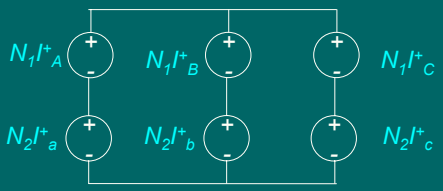
انتقال مولفه های جریان در ترانس

- فرض: ضریب نفوذپذیری مغناتیسی هسته بینهایت فرض می شود، در نتیجه سیستم خطی است و میتوان از جمع آثار استفاده کرد. یعنی میتوان به هریک از مولفه های مثبت، منفی و صفر را جداگانه بررسی کرده وسپس اثرات آنها را جمع نمود.
- جریانهای بار نامتقارن ثانویه را به مولفه هایشان تجزیه نموده و جریانهای اولیه را بدست می آوریم.
- هسته ترانس را سه ستونه است.



انتقال مولفه های مثبت

مدار معادل مغناتیسی :



$$\begin{cases} -N_2 I_a^+ - N_1 I_A^+ + N_1 I_B^+ + N_2 I_b^+ = 0 \\ -N_2 I_b^+ - N_1 I_B^+ + N_1 I_C^+ + N_2 I_c^+ = 0 \\ I_A^+ + I_B^+ + I_C^+ = 0 \end{cases} \longrightarrow$$

چون مولفه ها متقارن هستند.

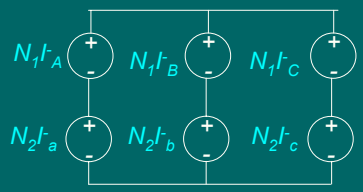
$$\begin{cases} I_b^+ = \alpha^2 I_a^+ \\ I_c^+ = \alpha I_a^+ \end{cases} \quad \begin{cases} I_B^+ = \alpha^2 I_A^+ \\ I_C^+ = \alpha I_A^+ \end{cases}$$

نتایج نهائی:

$$\begin{cases} I_A^+ = -\frac{N_2}{N_1} I_a^+ \\ I_B^+ = -\frac{N_2}{N_1} I_b^+ \\ I_C^+ = -\frac{N_2}{N_1} I_c^+ \end{cases}$$

انتقال مولفه های منفی

مدار معادل مغناتیسی :



$$\begin{cases} -N_2 I_a^- - N_1 I_A^- + N_1 I_B^- + N_2 I_b^- = 0 \\ -N_2 I_b^- - N_1 I_B^- + N_1 I_C^- + N_2 I_c^- = 0 \\ I_A^- + I_B^- + I_C^- = 0 \end{cases}$$

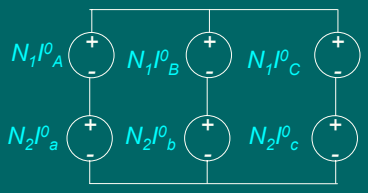
چون مولفه ها متقارن هستند.

$$\begin{cases} I_b^- = \alpha I_a^- \\ I_c^- = \alpha^2 I_a^- \end{cases} \quad \begin{cases} I_B^- = \alpha I_A^- \\ I_C^- = \alpha^2 I_A^- \end{cases}$$

نتایج نهائی:

$$\begin{cases} I_A^- = -\frac{N_2}{N_1} I_a^- \\ I_B^- = -\frac{N_2}{N_1} I_b^- \\ I_C^- = -\frac{N_2}{N_1} I_c^- \end{cases}$$

انتقال مولفه های صفر



- اگر امکان عبورجریان مولفه صفر از اولیه و ثانویه باشد، نیرومحرکه های اولیه و ثانویه هر شاخه یکدیگر را خنثی می کنند:

$$N_2 I_a^0 + N_1 I_A^0 = 0 \quad \Rightarrow \quad I_A^0 = -\frac{N_2}{N_1} I_a^0$$

- اگر امکان عبورجریان فقط از یک طرف باشد و هسته سه ستونه باشد، شار مولفه صفرنمیتواند از هسته بگذرد و قسمتی از آن در داخل هوا می گذرد و ضمنا شارمخالف ندارد. بنابراین این شار زیاد، جریانهای فوکوی شدید ایجاد می کند و باعث داغ شدن هسته میگردد.

روشهای از بین بردن شار مولفه صفر در هسته

۱- استفاده از یک سیم پیچ سوم مثلث که با ایجاد جریان گردشی در آن شار مخالف تولید شود.
۲- تعبیه کردن پایه های اضافی (ترانس پنج ستونه)
۳- استفاده از اتصال زیگزاگ (ستاره شکسته) : در این اتصال در هر پایه دو شار هموپلار مخالف جهت تولید می شود که یکدیگر را خنثی می کنند.

مثال

- یک ترانسفورماتور سه فاز با اتصال $Dy_0 5$ با ولتاژهای نامی $20KV/400V$ مفروض است. در ثانویه این ترانسفورماتور بارهای a و b با مشخصات زیر تحت ولتاژ نامی تغذیه می شوند. مطلوبست

الف) تعیین جریان فازها و نول ثانویه

ب) تعیین جریان خطوط در اولیه

ولتاژ فاز a در ثانویه مبنا قرار داده شود.

$$Load_a = \begin{cases} 5KW \\ 0.5lag \end{cases} \quad Load_b = \begin{cases} 8KW \\ 0.5lag \end{cases}$$

اتصالات ترانسهای سه فاز و گروههای برداری

- بسته به شرایط کاری و نحوه استعمال ترانس، اولیه وثانویه ممکن است ستاره، مثلث و یا ستاره شکسته (زیگزاگ) باشد.
- روش استاندارد بیان اتصالات و گروههای برداری:
  - حروف بزرگ برای طرف فشار قوی A, B, C Y, D
  - حروف کوچک برای فشار ضعیف a, b, c y, d
- در اتصالات مختلف ولتاژ های همنام در اولیه و ثانویه ممکن است اختلاف فاز داشته باشند. این مقدار اختلاف فاز را با یک عدد مشخص می کنند که عدد شناسائی یا گروه برداری ترانسفورماتور می نامند.

عدد شناسائی برابر نسبت اختلاف فاز دو ولتاژ همنام در اولیه و ثانویه بر ۳۰ درجه است بشرطی که سمت ولتاژ بالا جلو باشد.
روش ساعت: بردار ولتاژ بالا بعنوان دقیقه شمار و روی عدد ۱۲ قرار داده می شود. در اینصورت بردار ولتاژ پائین روی هر شماره ای از ساعت که قرار بگیرد، آن شماره عدد ساعت ترانس است.

مثال از ترانسهای سه فاز و گروههای برداری

- مثال:

Dy1y1

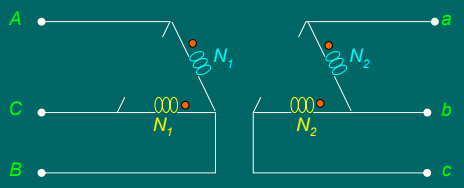
فشار قوی مثلث است
فشار ضعیف ستاره است
فشار ضعیف تر ستاره
ولتاژ بالا نسبت به ولتاژ ضعیف ۳۰ درجه جلوتر است
ولتاژ بالا نسبت به ضعیف تر هم ۳۰ درجه جلوتر است.

اتصالات خاص ترانسفورماتورهای سه فاز

- اتصالات مهم دو ترانس در سیستم سه فاز عبارتند از:
  - اتصال مثلث باز (*V-V*)
  - اتصال ستاره باز –مثلث باز
  - اتصال اسکات تی (*Scott-T*)
  - اتصال تی سه فاز (*Three-phase T Connection*)

اتصال مثلث باز (*V-V*)

- ترانس یک فاز از اتصال مثلث-مثلث برداشته شده است:



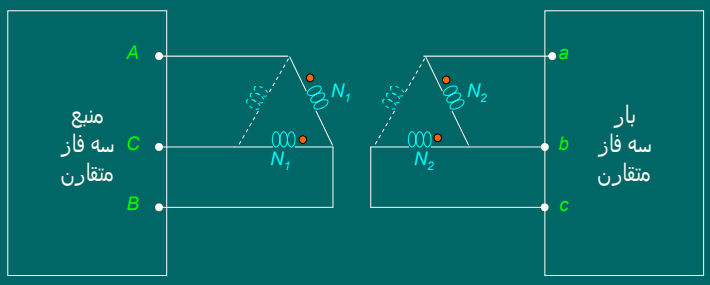
مثال

- یک ترانس سه فاز مثلث-مثلث که از سه ترانس تکفاز مشابه با مقادیر نامی V_{rated1} / V_{rated2} و S_{rated} تشکیل یافته است، توسط یک منبع سه فاز متقارن دراولیه تغذیه می شود و بار ثانویه متقارن است. اگریکی از سه ترانس تکفاز از مدار خارج شود و ترانس با اتصال مثلث باز کار کند، ثابت کنید:

الف) ولتاژ خروجی همچنان یک ولتاژ سه فاز متقارن است.

ب) دراتصال مثلث باز، توان قابل تغذیه به میزان ۰.۵۸ درصد توان ظاهری قابل تغذیه در حالت مثلث-مثلث است.

- حل الف):

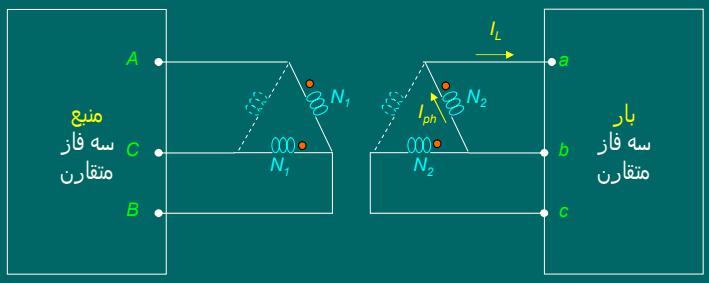


$$\begin{cases} V_{AB} = |V| < 0 \;\Rightarrow\; V_{ab} = K.|V| < 0 \\ V_{BC} = |V| < -120 \;\Rightarrow\; V_{bc} = K.|V| < -120 \\ V_{CA} = |V| < 120 \end{cases}$$

$$KVL: \quad V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0$$

$$V_{ca} = -(V_{ab} + V_{bc}) = -(K.|V| < 0 + K.|V| < -120) = K.|V| < +120$$

- حل قسمت ب)



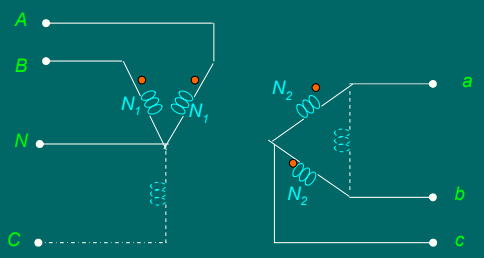
$$S_{out\Delta} = \sqrt{3}.V_L.I_L = \sqrt{3}.V_{rated2}.\left(\sqrt{3}I_{rated2}\right) = 3.V_{rated2}.I_{rated2} = 3S_{rated}$$

$$S_{outV} = \sqrt{3}.V_L.I_L = \sqrt{3}.V_{rated2}.I_{rated2} = \sqrt{3}S_{rated}$$

$$\frac{S_{outV}}{S_{out\Delta}} = \frac{\sqrt{3}S_{rated}}{3S_{rated}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \approx 0.58$$

اتصال ستاره باز –مثلث باز

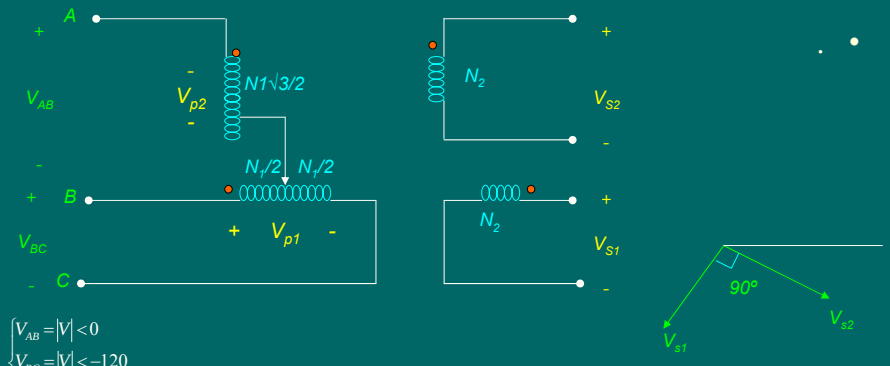
- دوفاز را به سه فاز تبدیل می کند.
- شبیه اتصال *V-V* است، با این تفاوت که ولتاژهای اولیه از دوفاز و یک خنثی بدست می آیند و در ثانویه یک ولتاژ سه فاز تحویل می شود.
- از این اتصال برای تامین موقت برق سه فاز از دو فاز استفاده می شود.



اتصال اسکات تی

- برای اتصال شبکه های سه فاز به شبکه های دوفاز قدیمی بکار می رود.
- یک ولتاژ سه فاز متقارن ورودی را به یک ولتاژ دوفاز (با اختلاف فاز ۹۰درجه) تبدیل می کند.
- از دو ترانسفورماتور تکفاز بامقادیر نامی مساوی تشکیل می شود که یکی از آنها درسیم پیچ اولیه اش یک انشعاب √3/2=86.6% درصد ولتاژ بار کامل دارد که به انشعاب میانی ترانس دوم وصل می شود.

ادامه اتصال اسکات تی



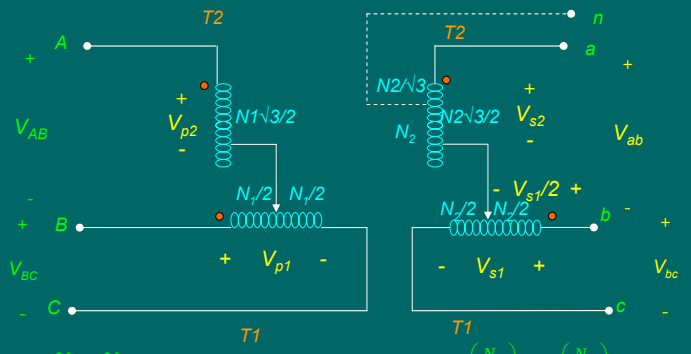
- .

$$\begin{cases} V_{AB} = |V| < 0 \\ V_{BC} = |V| < -120 \\ V_{CA} = |V| < 120 \end{cases}$$

$$V_{s1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) V_{p1} = kV_{BC} = k\left(|V| < -120\right)$$

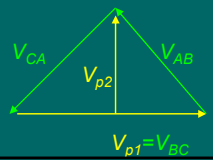
$$V_{s2} = \left(\frac{N_2}{\frac{\sqrt{3}}{2}N_1}\right) V_{p2} = \frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{N_2}{N_1}\right)\left(V_{AB} + \frac{V_{BC}}{2}\right) = \frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{N_2}{N_1}\right)\left(|V| < 0 + \frac{|V| < -120}{2}\right) = \frac{2}{\sqrt{3}} k\left(\frac{\sqrt{3}}{2}|V| < -30^\circ\right) = k|V| < -30^\circ$$

اتصال تی سه فاز (اتصال*T-T*)



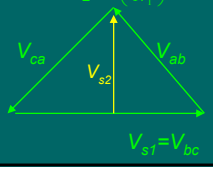
$$V_{p1} = V_{BC}$$

$$V_{p2} = V_{AB} + \frac{V_{BC}}{2}$$



$$V_{bc} = V_{s1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)V_{p1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)V_{BC}$$

$$V_{ab} = V_{s2} - \frac{V_{s1}}{2} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)V_{p2} - \frac{1}{2}\left(\frac{N_2}{N_1}V_{p1}\right) = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)\underbrace{\left(V_{p2} - \frac{V_{p1}}{2}\right)}_{V_{AB}}$$



ادامه اتصال تی سه فاز (اتصال*T-T*)

- نحوه تبدیل ولتاژ:

- اعمال ولتاژ سه فاز در اولیه
- ایجاد ولتاژ دوفاز با اختلاف فاز ۹۰درجه در سیم پیچهای اولیه ترانسفورماتورها
-ایجاد ولتاژ دوفاز در سیم پیچهای ثانویه در یک سطح ولتاژ دیگر
- ایجاد ولتاژ سه فاز در ثانویه در یک سطح ولتاژ دیگر

- موارد استفاده از اتصال *T-T*:

- تبدیل ولتاژ سه فاز به دو فاز در یک سطح ولتاژ دیگر با استفاده از دوترانسفورماتور
- تبدیل ولتاژ سه فاز به سه فاز در یک سطح ولتاژ دیگر با استفاده از دوترانسفورماتور

- مزیت اتصال *T-T* نسبت به اتصالات دیگرسه فاز (اتصال مثلث باز و اتصال ستاره باز-مثلث باز) این است که می توان سیم خنثی رابه هر دو طرف اولیه و ثانویه گروه وصل کرد.

ماشین سنکرون

- کاربرد:
  - ژنراتور سنکرون برای تولید برق دراندازه های زیاد در نیروگاهها،برای تولید برق در توانهای پائین مانند ژنراتورهای جوشکاری.
  - موتور سنکرون: برای اصلاح ضریب توان دریک شبکه
- انواع ماشینهای سنکرون بر اساس نوع ساختمان رتور:
  - قطب برجسته (*Salient Pole synchronous machine*)
  - قطب صاف (*round rotor*)

کاربرد ماشین

- ماشین قطب برجسته در ماشینهای کم سرعت کاربرد دارد زیرا در سرعت بالا، کفشکها بعلت نیروی گریز از مرکز جدا می شوند ولی برجستگی قطب سبب سینوسی ترشدن ولتاژ می شود.
- بنابراین:
  - درنیروگاههای آبی که سرعت کم است از ژنراتورهای قطب برجسته با تعداد قطبهای زیاد استفاده می شود.
  - در ژنراتورهای جوشکاری که توسط یک موتور احتراقی یا دیزل ژنراتور می چرخد و تعداد دورکم است از ژنراتور سنکرون قطب برجسته استفاده می شود.
  - در نیروگاههای بخاری که سرعت توربین بخار بالاست از ژنراتور قطب صاف با تعداد قطبهای کم استفاده میشود.

ساختمان فیزیکی ماشین سنکرون

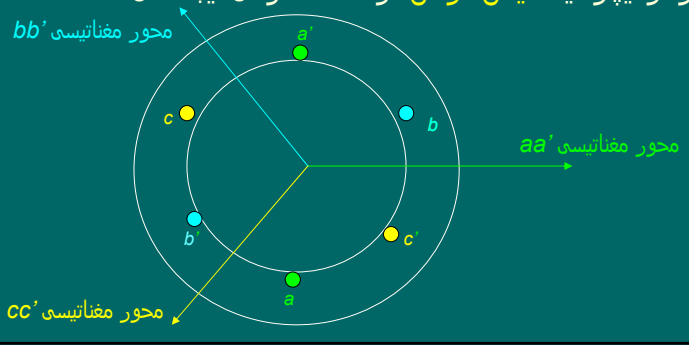
- شامل

- استاتور : قسمت ساکن

- رتور : قسمت متحرک

استاتور

- بر روی استاتوریک سیم پیچی سه فاز متقارن قرار دارد که به آرمیچر می گوئیم.
  - در حالت موتوری به آرمیچر یک جریان سه فاز می دهیم.
  - در حالت ژنراتوری یک ولتاژ سه فاز در آرمیچر القاء می شود.
- جریان سه فاز آرمیچر، یک میدان گردان در فاصله هوائی ایجاد می کند.

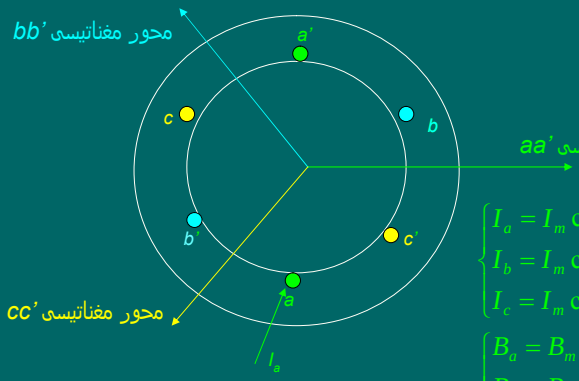


رتور

- رتور:
  - یک سیم پیچ با تحریک *DC* است که به آن تحریک میگوئیم.
  - سیم پیچ تحریک میدان مغناطیسی لازم برای تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی را ایجاد می کند.
  - رتوربا سرعت سنکرون درحال چرخش است. درنتیجه یک میدان گردان ایجاد میشود.
- در حالت موتوری رتور به دنبال میدان استاتور باسرعت سنکرون می چرخد.
- در حالت ژنراتوری میدان استاتور به دنبال رتور باسرعت سنکرون می چرخد.

اساس کار ماشین سنکرون

- ۱- اگر به یک سیم پیچ سه فاز متعادل، یک جریان سه فاز متقارن داده شود، یک میدان گردان با دامنه ثابت (میدان سنکرون) ایجاد می شود.



$$\begin{cases} I_a = I_m \cos(\omega_e t) \\ I_b = I_m \cos(\omega_e t - 120) \\ I_c = I_m \cos(\omega_e t + 120) \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_a = B_m \cos(\omega_e t)\cos(\theta) \\ B_b = B_m \cos(\omega_e t - 120)\cos(\theta - 120) \\ B_c = B_m \cos(\omega_e t + 120)\cos(\theta + 120) \end{cases}$$

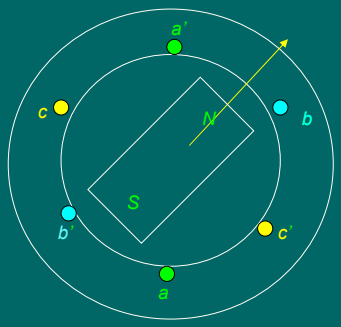
محاسبه میدان کل

$$
\begin{aligned}
B &= B_a + B_b + B_c = \\
&B_m \cos(\omega_e t)\cos(\theta) \\
&+ B_m \cos(\omega_e t - 120)\cos(\theta - 120) \\
&+ B_m \cos(\omega_e t + 120)\cos(\theta + 120) \\
&= \frac{B_m}{2}\left(\cos(\theta + \omega_e t) + \cos(\theta - \omega_e t)\right) \\
&+ \frac{B_m}{2}\left(\cos(\theta + \omega_e t - 240) + \cos(\theta - \omega_e t)\right) \\
&+ \frac{B_m}{2}\left(\cos(\theta + \omega_e t + 240) + \cos(\theta - \omega_e t)\right) \\
&= \frac{3B_m}{2}\cos(\theta - \omega_e t)
\end{aligned}
$$

- فرکانس زاویه ای چرخش میدان همان فرکانس جریان سه فاز استاتور است.

ادامه اساس کار ماشین سنکرون

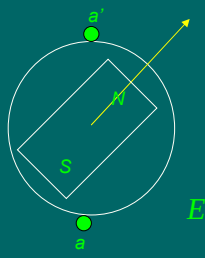
- ۲ - اگر توسط رتور یک میدان گردان با دامنه ثابت ایجاد کنیم، در سیم پیچهای سه فاز متعادل استاتور یک ولتاژ سه فاز القاء می شود.



$$
\begin{cases}
E_{aa'}(t) = E_m \sin(\omega t) \\
E_{bb'}(t) = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\
E_{cc'}(t) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)
\end{cases}
$$

القاء ولتاژ در سیم پیچ فاز a

- شار حلقه شده در سیم پیچ فاز a یک کسینوس است و یک ولتاژ سینوسی در آن القاء می کند.



شار حلقه شده در aa'

$$\phi_{aa'}(t) = \phi_m \cos(\omega t)$$

$$E_{aa'}(t) = -N\frac{d\phi_{aa'}(t)}{dt} = N\phi_m \omega \sin(\omega t) = E_m \sin(\omega t)$$

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

- ولتاژ سایر فازها:

$$E_{bb'}(t) = E_m \sin(\ t - 120^\circ) \quad E_{cc'}(t) = E_m \sin(\ t + 120^\circ)$$

فرکانس ماشین P قطب

- درماشین ۴ قطبی به ازای هر دور چرخش رتور دو سیکل کامل ولتاژ القاء می شود. بنابراین فرکانس ولتاژ القائی دو برابر فرکانس چرخش رتور است.
- بطورکلی در ماشین P قطبی، فرکانس ولتاژ القائی P/2 برابر فرکانس چرخش رتور است. بنابراین روابط زیر برقرارند:

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

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

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

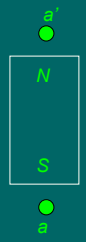
سیم پیچی استاتور ماشین سنکرون

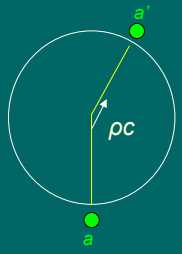
- برای تولید ولتاژ سینوسی، سیم پیچی استاتور ماشینهای سنکرون واقعی از نوع گسترده (توزیع شده) معمولا با گام کسری است ولی برای تحلیل با یک سیم پیچ متمرکز با گام کامل جایگزین می شود که تعداد دور آن در ضریب سیم پیچی (K_w) ضرب می شود.

$$E_{rms} = 4.44 K_w N_{ph} \phi_m f_e$$

ضریب سیم پیچی

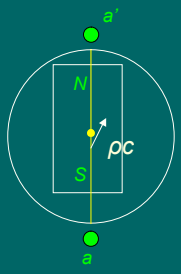
گام قطب و گام کویل



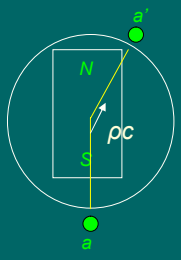


- گام قطب (ρ_p): زاویه الکتریکی بین دو قطب مجاور است که همیشه ۱۸۰ درجه الکتریکی می باشد زیرا ولتاژ القائی در هادیهای زیر دو نقطه متناظر در دو قطب مجاور همواره ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند.
- گام کویل (سیم پیچ ρ_c): زاویه الکتریکی بین هادیهای دو طرف یک کویل است. ولتاژ القائی هادیهای دو طرف به اندازه گام کویل اختلاف فاز دارند.

انواع سیم پیچی از نظر گام کویل



- سیم پیچی گام کامل : اگر گام کویل برابر گام قطب باشد. سیم پیچی از نوع گام کامل است.
- سیم پیچی گام کسری : اگرگام کویل کمتر از گام قطب باشد، سیم پیچی از نوع گام کسری است.



گام شیار

- گام شیار (γ) زاویه الکتریکی بین دو شیار مجاور است.
- اگر تعداد کل شیارهای استاتور (N_s) معلوم باشد، گام شیار بر حسب الکتریکی از رابطه زیر بدست می آید:

$$\gamma = \left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{360^\circ mech}{N_s}\right) \quad ^\circ elec$$

- معمولا تعداد شیارهای دو قطب (N_2) معلوم است که در اینصورت گام شیار بر حسب الکتریکی از رابطه زیر بدست می آید:

$$\gamma = \left(\frac{360^\circ elec}{N_2}\right)$$

تعداد شیار در دو قطب

- چون سیم پیچی استاتور در هر دو قطب تکرار می شود، دیاگرام سیم پیچی فقط برای دو قطب زسم می گردد. بنابراین باید تعداد شیارها در دو قطب را داشته باشیم.
- اگر تعداد شیار در قطب در فاز (*slot/pole/phase*) معلوم باشد، تعداد کل شیارهای دو قطب و برای هر سه فاز برابر است با:

تعداد شیارهای دو قطب = *2Pole* × *3phase* × *slot/pole/phase*

- اگر تعدا شیارهای بین دو انتهای یک کویل را داشته باشیم، گام کویل برابر حاصلضرب این تعدا شیارها در گام شیار می باشد.

فرمول ضریب سیم پیچی

$$K_w = K_d . K_p$$

$$K_p = \sin\left(\frac{\upsilon \rho_c}{2}\right)$$

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{n\gamma}{2}\right)}{n.\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}$$

- υ : شماره هارمونیک
- γ : گام شیار
- n: تعداد شیار در هر کمربند فاز
- pc : گام کویل

رسم دیاگرام سیم پیچی

- مثال : رسم دیاگرام سیم پیچی متمرکز با گام کامل
- حل:

تعداد شیارهای دو قطب = *2Pole × 3phase × 1slot/pole/phase=6slot*

$$\gamma = \left(\frac{360^\circ elec}{N_s}\right) = \left(\frac{360^\circ ele}{6}\right) = 60 \quad ^\circ elec$$

$$\rho_c = 6\gamma = 6 \times 30 = 180^\circ elec$$

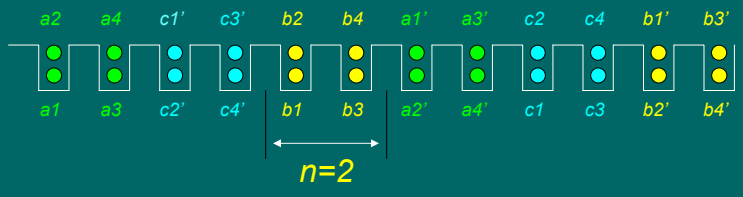
مثال

- رسم دیاگرام سیم پیچی دو لایه، گام کویل ۶ شیار و ۲ شیار در فاز در قطب
- حل:

تعداد شیارهای دو قطب = *2Pole × 3phase × 2slot/pole/phase=12slot*

$$\gamma = \left(\frac{360^\circ elec}{N_s}\right) = \left(\frac{360^\circ ele}{12}\right) = 30 \quad ^\circ elec$$

$$\rho_c = 6\gamma = 6 \times 30 = 180^\circ elec$$



ادامه حل مثال

$$K_p = \sin\left(\frac{\upsilon\rho_c}{2}\right) = \sin\left(\frac{1\times 180^\circ elec}{2}\right) = 1$$

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{n\gamma}{2}\right)}{n.\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{2\times 30}{2}\right)}{2\times\sin\left(\frac{30}{2}\right)} = 0.9659$$

$$K_w = K_d.K_p = 0.9659\times 1 = 0.9659$$

مثال

- رسم دیاگرام سیم پیچی دو لایه، گام کویل ۵ شیار با ۲ شیار در فاز در قطب (*2slot/pole/phase*)
- حل: تعداد شیارهای دو قطب = *2Pole × 3phase × 2slot/pole/phase=12slot*

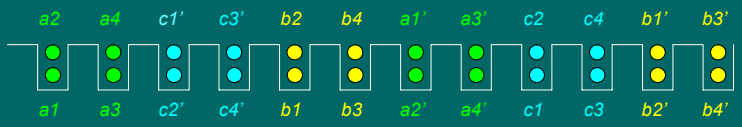
$$\gamma = \left(\frac{360^\circ elec}{N_s}\right) = \left(\frac{360^\circ ele}{12}\right) = 30 \quad ^\circ elec$$

$$\rho_c = 5\gamma = 5\times 30 = 150^\circ elec$$

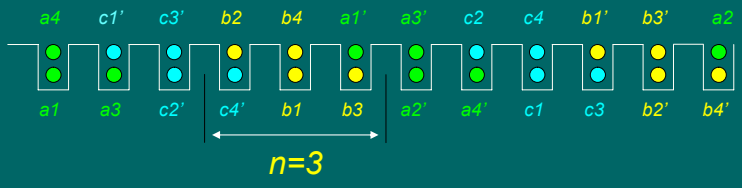
- چون گام کویل کوچکتر از گام قطب (۱۸۰ درجه الکتریکی) است، این سیم پیچی از نوع گام کسری است. برای رسم دیاگرام سیم پیچی، ابتدا دیاگرام سیم پیچی گام کامل را رسم می کنیم.

ادامه مثال

- رسم دیاگرام سیم پیچی گام کامل:



- برای رسم گام کسری ۱۵۰ درجه، سرهای بالائی را یک شیار به چپ می بریم.



ادامه حل مثال

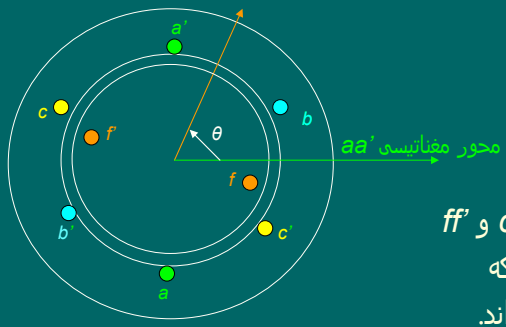
$$K_p = \sin\left(\frac{\upsilon\rho_c}{2}\right) = \sin\left(\frac{1\times 150^\circ elec}{2}\right) = 0.9659$$

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{n\gamma}{2}\right)}{n.\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{3\times 30}{2}\right)}{3\times\sin\left(\frac{30}{2}\right)} = 0.9107$$

$$K_w = K_d.K_p = 0.9659\times 0.9107 = 0.8796$$

مدار معادل ماشین سنکرون قطب صاف به روش سیم پیچهای تزویج

- هدف: ارائه مدار معادلی که روابط ولتاژ و جریان ماشین سنکرون را در حالت پایدار نشان دهد.
- یک ماشین سه فاز، دوقطبی، رتور استوانه ای زیر را در نظر می گیریم.



- سیم پیچهای *aa'*، *bb'*، *cc'* و *ff'* سیمپیچهای گسترده هستند که بصورت متمرکز مدل شده اند.

شار حلقه شده در سیم پیچ *aa'*

- .

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + L_{af} i_f$$

$$L_{aa} = L_{a0} + L_{al}$$

$$L_{ab} = L_{a0} \cos(120^\circ) = -\frac{1}{2} L_{a0}$$

$$L_{ac} = L_{a0} \cos(-120^\circ) = -\frac{1}{2} L_{a0}$$

$$L_{af} = L_{f0} \cos\theta$$

a

ادامه محاسبه شار حلقه شده در سیم پیچ aa’

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + L_{af} i_f$$

$$\lambda_a = (L_{a0} + L_{al}) i_a + \left(-\frac{1}{2} L_{a0}\right) i_b + \left(-\frac{1}{2} L_{a0}\right) i_c + (L_{f0} \cos\theta) i_f$$

$$\lambda_a = L_{al} i_a + L_{a0}\left(i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c\right) + (L_{f0} \cos\theta) i_f$$

$$\lambda_a = L_{al} i_a + L_{a0}\left(i_a - \frac{1}{2}\underbrace{(i_b + i_c)}_{-i_a}\right) + \underbrace{(L_{f0} \cos\theta) i_f}_{\lambda_{af}}$$

$$\lambda_a = L_{al} i_a + \frac{3}{2} L_{a0} i_a + \lambda_{af} \quad ; \quad \lambda_{af} = L_{f0} I_f \cos\theta$$

محاسبه ولتاژ سیم پیچ aa’

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + L_{af} i_f$$

$$\lambda_a = (L_{a0} + L_{al}) i_a + \left(-\frac{1}{2} L_{a0}\right) i_b + \left(-\frac{1}{2} L_{a0}\right) i_c + (L_{f0} \cos\theta) i_f$$

$$v_a = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = R_a i_a + \frac{d\left(L_{al} i_a + \frac{3}{2} L_{a0} i_a + \lambda_{af}\right)}{dt}$$

$$v_a = R_a i_a + L_{al} \frac{di_a}{dt} + \underbrace{\frac{3}{2} L_{a0}}_{L_m} \frac{di_a}{dt} + \underbrace{\frac{d\lambda_{af}}{dt}}_{e_a}$$

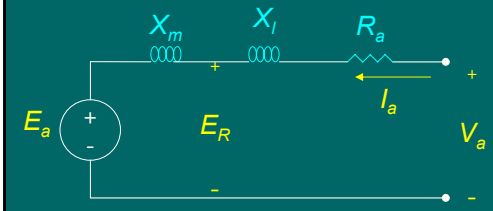
$$v_a = R_a i_a + L_{al} \frac{di_a}{dt} + L_m \frac{di_a}{dt} + e_a$$

$$V_a = R_a I_a + j\underbrace{\omega L_{al}}_{X_l} I_a + j\underbrace{\omega L_m}_{X_m} I_a + E_a$$

$$V_a = R_a I_a + jX_l I_a + jX_m I_a + E_a$$

محاسبه ولتاژ سیم پیچ aa’

$$V_a = R_a I_a + jX_l I_a + jX_m I_a + E_a$$
$$V_a = R_a I_a + j\underbrace{(X_l + X_m)}_{X_s} I_a + E_a$$

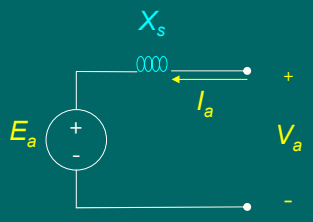


- مدار معادل استاتور ماشین سنکرون:

X_m راکتانس عکس العمل آرمیچر
X_l راکتانس نشتی آرمیچر
$X_s=X_m+X_l$ راکتانس سنکرون
E_a ولتاژ داخلی تحریک
E_R ولتاژ داخلی ناشی از شار برآیند

مدار معادل تقریبی استاتور ماشین سنکرون

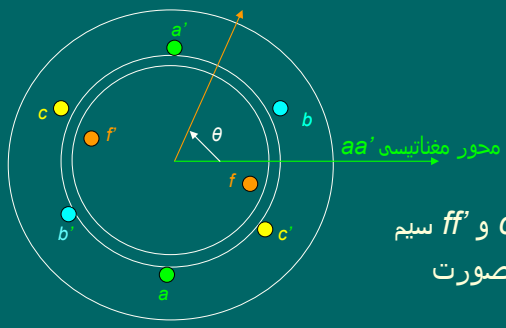
$$V_a = R_a I_a + jX_l I_a + jX_m I_a + E_a$$
$$V_a = R_a I_a + j\underbrace{(X_l + X_m)}_{X_s} I_a + E_a$$



- مدار معادل تقریبی استاتور ماشین سنکرون:

مدار معادل ماشین سنکرون قطب صاف با استفاده از اثرات متقابل بین میدانها

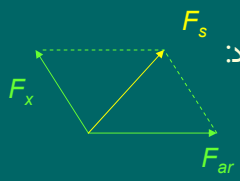
- یک ماشین سه فاز، دوقطبی، رتور استوانه ای زیر را در نظر می گیریم.



- سیم پیچهای aa'، bb'، cc' و ff' سیم پیچهای گسترده هستند که بصورت متمرکز مدل شده اند.

شار فاصله هوائی

- جریان تحریک (I_x)، نیرو محرکه تحریک (F_x) را در فاصله هوائی ایجاد می کند.
- جریانهای سه فاز آرمیچر (I_s)، نیرو محرکه آرمیچر (F_{ar}) را در فاصله هوائی ایجاد می کند.
- نیرو محرکه برآیند (F_s) از جمع نیرومحرکه تحریک و نیرو محرکه آرمیچر بدست می آید.
- نیرومحرکه برآیند شار فاصله هوائی (φ_s) را ایجاد می کند:



$$\varphi_s = P.\vec{F}_s = P.(\vec{F}_X + \vec{F}_{ar})$$

- P پرمانس مسیر است.

ولتاژ فاصله هوائی

- شار فاصله هوائی یک ولتاژ در سیم پیچهای استاتور القاء می کندکه به آن ولتاژ فاصله هوائی (*Air gap Voltage*) می گویند و با رابطه زیر بدست می آید:

$$\left|E_{ag}\right| = \frac{K_w N \omega \overbrace{\varphi_s}^{P\left|\vec{F}_s\right|}}{\sqrt{2}} = \frac{K_w N \omega \left(P.\left|\vec{F}_s\right|\right)}{\sqrt{2}} = \underbrace{\left(\frac{K_w N \omega P}{\sqrt{2}}\right)}_{m}\left|\vec{F}_s\right| = m\left|\vec{F}_s\right|$$

- طبق قانون فارادی ولتاژ فاصله هوائی نسبت به شار فاصله هوائی و در نتیجه نسبت به نیرومحرکه فاصله هوائی به اندازه ۹۰ درجه پسفاز است. بنابراین

$$E_{ag} = -jm\vec{F}_s$$

تفکیک ولتاژ فاصله هوائی

$$E_{ag} = -jm\vec{F}_s = -jm(\vec{F}_X + \vec{F}_{ar}) = \underbrace{-jm\vec{F}_X}_{E_X} \underbrace{-jm\vec{F}_{ar}}_{E_{ar}} = E_X + E_{ar}$$

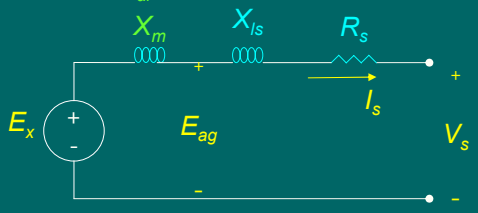
$$E_x = -jmF_X = -j\underbrace{\left(\frac{K_w N \omega P}{\sqrt{2}}\right)}_{m}\underbrace{\left(N_X I_X\right)}_{F_X} = -jk_x I_X$$

$$E_{ar} = -jmF_{ar} = -j\underbrace{\left(\frac{K_w N \omega P}{\sqrt{2}}\right)}_{m}\underbrace{\left(N_s I_s\right)}_{F_{ar}} = -j\underbrace{\left(\frac{K_w N \omega P}{\sqrt{2}} N_s\right)}_{X_m} I_s = -jX_m I_s$$

- E_x ولتاژ تحریک است که فقط به جریان تحریک بستگی دارد.
- E_{ar} ولتاژ عکس العمل آرمیچر است که ضریبی از جریان آرمیچر می باشد

مدار معادل ماشین سنکرون از دید آرمیچر

- مدار معادل استاتور ماشین سنکرون در حالت ژنراتوری:



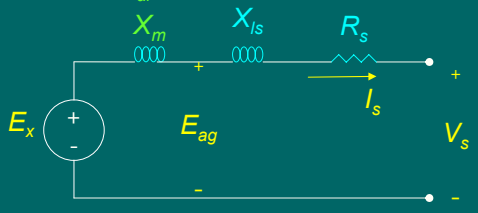
$$E_x = V_s + R_s I_s + jX_m I_s + jX_{ls} I_s$$
$$E_x = V_s + R_s I_s + j\underbrace{(X_{ls} + X_m)}_{X_s} I_s$$

$$E_{ar} = -jX_m I_s$$
$$E_{ag} = E_x + E_{ar}$$

X_m راکتانس عکس العمل آرمیچر
X_{ls} راکتانس نشتی آرمیچر
X_s=X_m+X_{ls} راکتانس سنکرون
E_x ولتاژ داخلی تحریک
E_{ag} ولتاژ داخلی ناشی از شار برآیند
E_{ar} ولتاژ عکس العمل آرمیچر

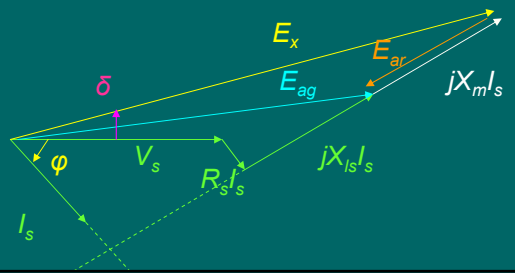
دیاگرام فازوری ماشین سنکرون در حالت ژنراتوری

- مدار معادل استاتور ماشین سنکرون در حالت ژنراتوری:

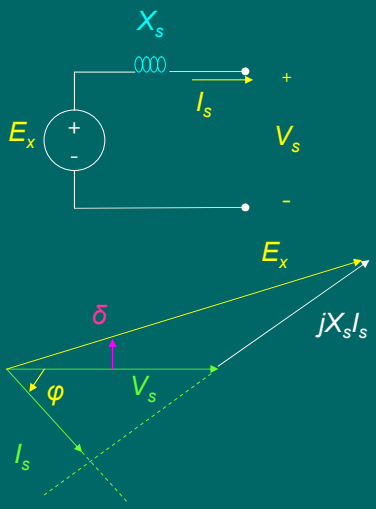


$$E_x = V_s + R_s I_s + jX_m I_s + jX_{ls} I_s$$
$$E_x = V_s + R_s I_s + j\underbrace{(X_{ls} + X_m)}_{X_s} I_s$$

$$E_{ar} = -jX_m I_s$$
$$E_{ag} = E_x + E_{ar}$$



مدار معادل تقریبی استاتور ماشین سنکرون در حالت ژنراتوری



- مدار معادل تقریبی استاتور ماشین سنکرون:

$$E_x = V_s + jX_sI_s$$

ترتیب رسم:

V_S

φ

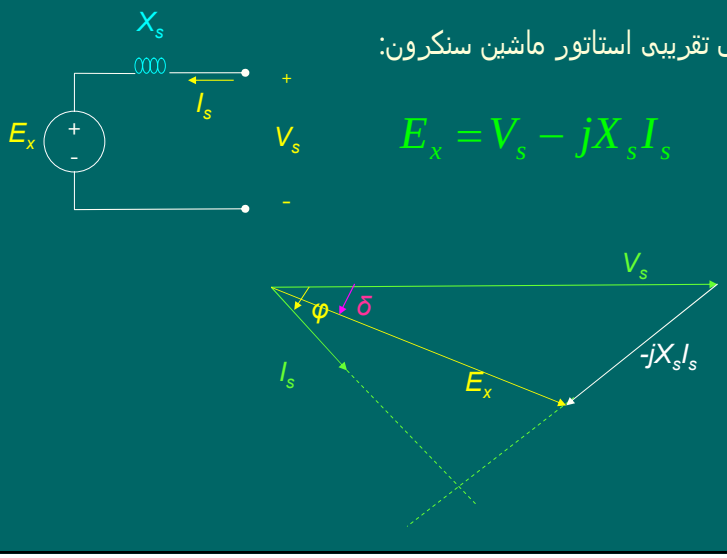
I_s جریان بار

jX_sI_s که عمود بر Is است

E_x ولتاژ داخلی

δ زاویه قدرت

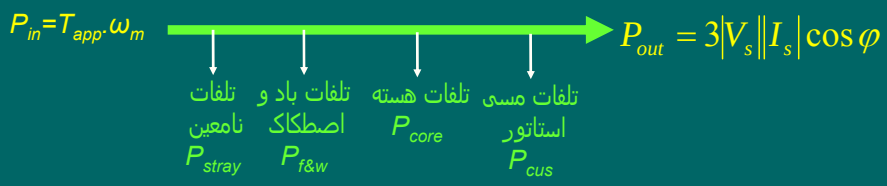
مدار معادل تقریبی استاتور ماشین سنکرون در حالت موتوری



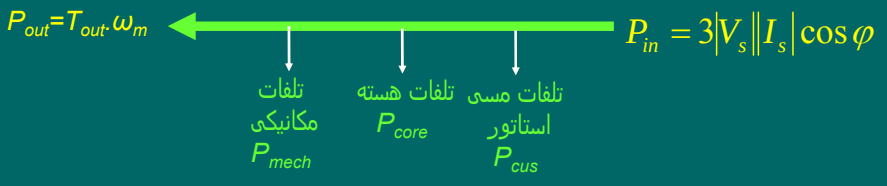
- مدار معادل تقریبی استاتور ماشین سنکرون:

$$E_x = V_s - jX_sI_s$$

دیاگرام پخش توان در ژنراتور سنکرون

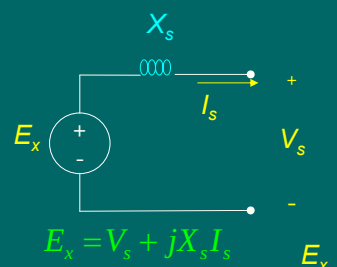


دیاگرام پخش توان در موتور سنکرون



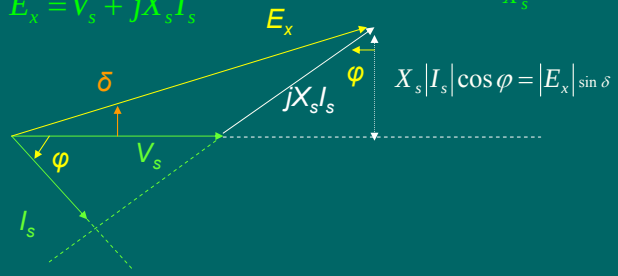
فرمول توان ماشین قطب صاف

- از کلیه تلفات صرفنظر می کنیم.



$$P_{elec} = 3|V_s|\underbrace{|I_s|\cos\varphi}_{\frac{|E_x|}{X_s}\sin\delta} = 3\frac{|V_s||E_x|}{X_s}\sin\delta$$

$$E_x = V_s + jX_sI_s$$



$$X_s|I_s|\cos\varphi = |E_x|\sin\delta$$

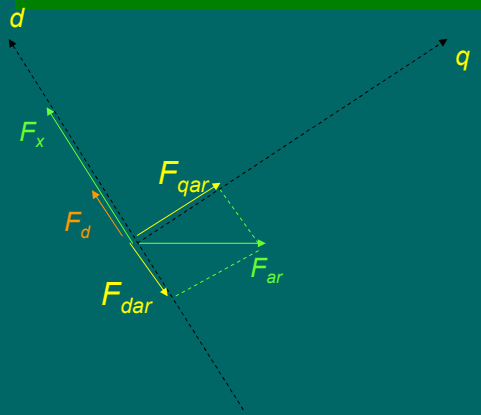
مثال ۲-۴

- یک موتور سنکرون سه فاز ۴۵کیلوولت آمپر، ۲۰۸ ولت، ۶۰ هرتز، ۰.۸ پیش فاز با اتصال مثلث، دارای راکتانس سنکرون ۲.۵ اهم بر فاز است و از مقاومت استاتور صرفنظر می شود. تلفات ناشی از اصطکاک و تهویه آن ۱.۵ کیلووات و تلفات هسته اش ۱.۰ کیلووات است. مطلوبست
- الف) محاسبه ولتاژداخلی تحریک و زاویه قدرت با فرض اینکه بار شفت *15hp* و ضریب توان موتور ۰.۸ پیش فاز باشد.
- ب) اگر بار شفت به *30hp* افزایش یابد، ضریب توان جدید موتور چقدر است؟

ماشین سنکرون قطب برجسته

- ماشینهای سنکرون سرعت کم که تعداد قطبهای زیاد دارند، از نوع قطب برجسته ساخته می شوند.
- درماشینهای قطب صاف، فاصله هوائی یکنواخت است و شار عکس العمل آرمیچر در کلیه نقاط فاصله هوائی یکسان است. بنابراین عکس العمل آرمیچر را توانستیم بایک راکتانس X_m مدل کنیم.
- در ماشینهای قطب برجسته، فاصله هوائی غیریکنواخت است. بنابراین محور طولی d و عرضی q تعریف می کنیم و عکس العمل آرمیچر را با X_{md} و X_{mq} مدل می کنیم. شارعکس العمل آرمیچردرامتداد محورطولی d بیشتر است.

تجزیه عکس العمل آرمیچر



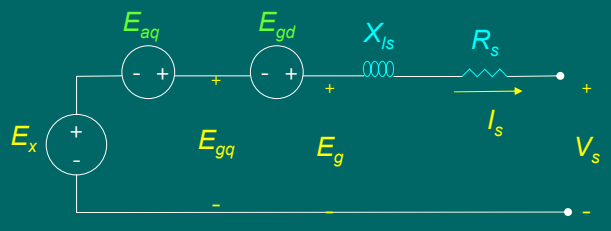
$$\begin{cases} \vec{F}_d = \vec{F}_x + \vec{F}_{dar} \\ \vec{F}_q = \vec{F}_{qar} \end{cases}$$

ولتاژ فاصله هوائی

$$\begin{cases} E_{gq} = -jm_d\vec{F}_d = -jm_d(\vec{F}_x + \vec{F}_{dar}) = \\ \quad = \underbrace{(-jm_d\vec{F}_x)}_{E_x} + \underbrace{(-jm_d\vec{F}_{dar})}_{E_{aq}} = E_x + E_{aq} \\ E_{gd} = -jm_q\vec{F}_q = -jm_q\vec{F}_{qar} \end{cases}$$

مدار معادل ماشین قطب برجسته

- مدار معادل استاتور ماشین سنکرون قطب برجسته در حالت ژنراتوری:



$$\begin{cases} E_{gq} = E_x + E_{aq} \\ E_g = E_{gd} + E_{gq} = V_s + R_s I_s + jX_{ls} I_s \end{cases}$$

$$-E_{aq} = jm_d\vec{F}_{dar} = jX_{md} I_{ds}$$

$$-E_{gd} = jm_q\vec{F}_q = jX_{mq} I_{qs}$$

محاسبه ولتاژ داخلی تحریک

- از مقاومت Rs صرفنظر می شود.

$$E_x = V_s + R_s I_s + jX_{ls} I_s - E_{aq} - E_{gd}$$

$$\begin{cases} -E_{aq} = jm_d \vec{F}_{dar} = jX_{md} I_{ds} \\ -E_{gd} = jm_q \vec{F}_q = jX_{mq} I_{qs} \end{cases}$$

$$E_x = V_s + R_s I_s + jX_{ls} \underbrace{I_s}_{(I_{ds} + I_{qs})} + jX_{md} I_{ds} + jX_{mq} I_{qs}$$

$$E_x = V_s + R_s I_s + jX_{ls} (I_{ds} + I_{qs}) + jX_{md} I_{ds} + jX_{mq} I_{qs}$$

$$E_x = V_s + R_s I_s + j(\underbrace{X_{ls}}_{X_{ds}} + X_{md}) I_{ds} + j(\underbrace{X_{ls}}_{X_{qs}} + X_{mq}) I_{qs}$$

$$E_x = V_s + R_s I_s + jX_{ds} I_{ds} + jX_{qs} I_{qs}$$

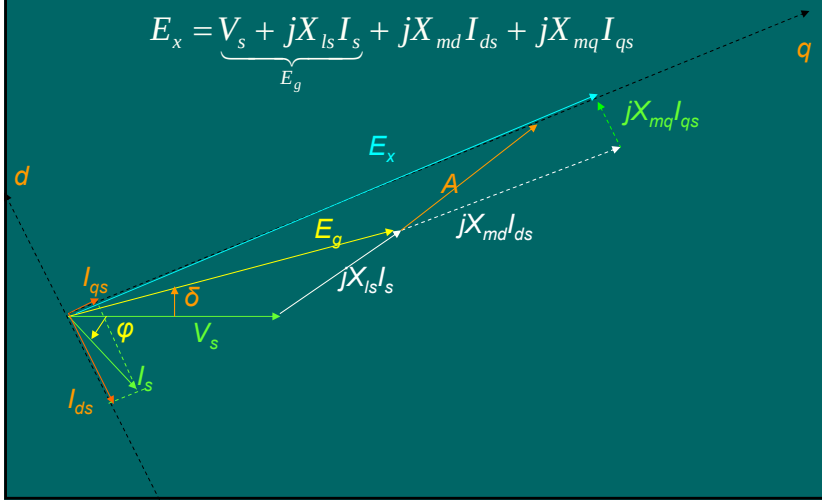
$$E_x \cong V_s + jX_{ds} I_{ds} + jX_{qs} I_{qs}$$

دیاگرام فازوری مدار فوق

$$E_g = E_{gd} + E_{gq} = V_s + jX_{ls} I_s$$

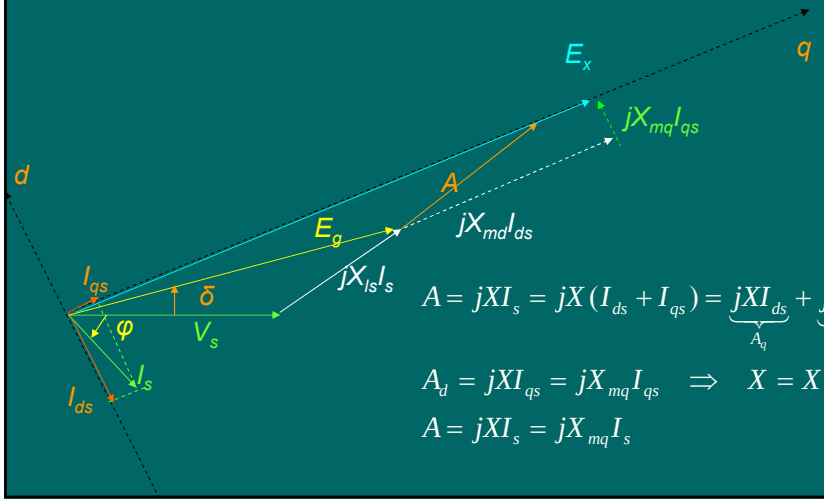
$$E_x = \underbrace{V_s + jX_{ls} I_s}_{E_g} + jX_{md} I_{ds} + jX_{mq} I_{qs}$$

- از.



محاسبه بردار مجهول A

- از.



$$A = jXI_s = jX(I_{ds} + I_{qs}) = \underbrace{jXI_{ds}}_{A_q} + \underbrace{jXI_{qs}}_{A_d}$$

$$A_d = jXI_{qs} = jX_{mq}I_{qs} \quad \Rightarrow \quad X = X_{mq}$$

$$A = jXI_s = jX_{mq}I_s$$

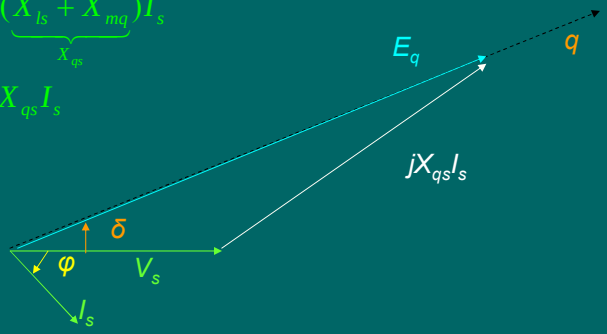
تعیین جهت محور q

- بردار Eq را بصورت زیر تعریف می کنیم که جهت محور q را می دهد.

$$E_q = V_s + jX_{ls}I_s + A = V_s + jX_{ls}I_s + jX_{mq}I_s =$$

$$E_q = V_s + j\underbrace{(X_{ls} + X_{mq})}_{X_{qs}}I_s$$

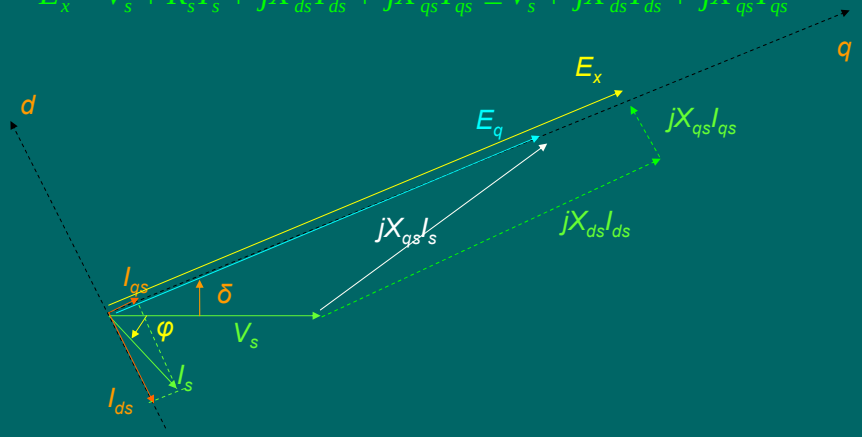
$$E_q = V_s + jX_{qs}I_s$$



خلاصه روابط و دیاگرام فازوری ماشین قطب برجسته

$$E_q = V_s + R_s I_s + jX_{qs} I_s \cong V_s + jX_{qs} I_s$$

$$E_x = V_s + R_s I_s + jX_{ds} I_{ds} + jX_{qs} I_{qs} \cong V_s + jX_{ds} I_{ds} + jX_{qs} I_{qs}$$



مثال ۲-۵

- یک ژنراتور سنکرون سه فاز ۲۰ مگاولت آمپر، ۲.۳ کیلوولت دارای مشخصات زیر است:

$X_{ds}=0.37\Omega$ $X_{qs}=0.24\Omega$ $r_s=0$

- اگر این ژنراتور بار ۱۴ مگاولت آمپر را در ولتاژ نامی و با ضریب توان ۰.۸ پس فاز تغذیه کند؛ مطلوبست محاسبه اندازه و زاویه ولتاژ داخلی E_x

خلاصه روابط ماشین سنکرون

- علامتهای بالا مربوط به حالت ژنراتوری و علامتهای پائین مربوط به حالت موتوری هستند.

$$\vec{V}_s = |V_s| < 0$$

$$\vec{I}_s = |I_s| < \varphi \quad ; \quad \begin{cases} \varphi < 0 & if \quad lag \\ \varphi > 0 & if \quad lead \end{cases}$$

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{\pm X_{qs}|I_s|\cos\varphi}{|V_s| \mp X_{qs}|I_s|\sin\varphi}\right)$$

$$|E_x| = |V_s|\cos\delta \mp X_{ds}|I_s|\sin(\varphi - \delta)$$

$$\widetilde{E}_x = |E_x| < \delta$$

$$\widetilde{I}_{qs} = \pm|I_s|\cos(\varphi - \delta) < \delta$$

$$\widetilde{I}_{ds} = \pm|I_s|\sin(\varphi - \delta) < (\delta + 90)$$

مثال ۲-۶

- یک ژنراتور سنکرون سه فاز ۲۰ مگاولت آمپر، ۲.۳ کیلوولت دارای مشخصات زیر است:

$X_{ds}=0.37\Omega$ $X_{qs}=0.24\Omega$ $r_s=0$

- اگر این ژنراتور بار ۱۴ مگاولت آمپر را در ولتاژ نامی و با ضریب توان ۰.۸ پیش فاز تغذیه کند؛ مطلوبست محاسبه اندازه و زاویه ولتاژ داخلی E_x

- حل:

$$\vec{V}_s = |V_s| < 0 = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1327.9v$$

$$|I_s| = \frac{14\times10^6}{\sqrt{3}\times2300} = 3514.3A$$

$$Lead \quad \Rightarrow \quad \varphi = +\cos^{-1}0.8 = +36.87^\circ$$

$$I_s = |I_s| < \varphi = 3514.3 < +36.87^\circ$$

ادامه حل مثال ۲-۶

- حل:

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{+X_{qs}|I_s|\cos\varphi}{|V_s| - X_{qs}|I_s|\sin\varphi}\right)$$

$$= \tan^{-1}\left(\frac{+0.24\times 3514.3\times\cos(+36.87^\circ)}{1327.9 - 0.24\times 3514.3\times\sin(+36.87^\circ)}\right) = 39.38^\circ$$

$$|E_x| = |V_s|\cos\delta - X_{ds}|I_s|\sin(\varphi-\delta)$$

$$= 1327.9\times\cos 39.38 - 0.37\times 3514.3\times\sin(+36.87^\circ - 39.38^\circ) = 1083.4$$

$$\tilde{E}_x = |E_x| < \delta = 1083.4 < 39.38^\circ$$

$$\tilde{I}_{qs} = +|I_s|\cos(\varphi-\delta) < \delta =$$

$$= +3514.3\times\cos(+36.87^\circ - 39.38^\circ) < 39.38^\circ = 3511 < 39.38^\circ$$

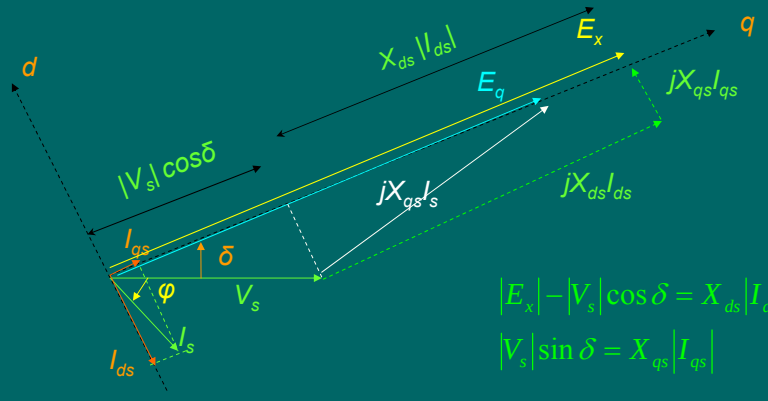
$$\tilde{I}_{ds} = +|I_s|\sin(\varphi-\delta) < (\delta+90)$$

$$= 3514.3\times\sin(+36.87^\circ - 39.38^\circ) < (39.38^\circ + 90^\circ) =$$

$$= -153.9 < 129.38^\circ = 153.9 < (129.38^\circ - 180^\circ) = 153.9 < -50.62^\circ$$

مشخصه P-δ ماشین قطب برجسته

- از مقاومت R_s و تلفات هسته صرفنظر می کنیم.
- دیاگرام فازوری ماشین قطب برجسته را در حالت ژنراتوری و پس فاز رسم می کنیم:



$$|E_x| - |V_s|\cos\delta = X_{ds}|I_{ds}|$$

$$|V_s|\sin\delta = X_{qs}|I_{qs}|$$

ادامه مشخصه P-δ ماشین قطب برجسته

- محور q را مبنا می گیریم و توان مختلط خروجی ژنراتور را محاسبه می کنیم:

$$S = 3V_s I_s^* = 3\left(|V_s| \angle -\delta\right)\left(|I_{qs}| - j|I_{ds}|\right)^*$$

$$= 3\left(|V_s|\cos\delta - j|V_s|\sin\delta\right)\left(|I_{qs}| + j|I_{ds}|\right) =$$

$$= \underbrace{3|V_s|\left(|I_{qs}|\cos\delta + |I_{ds}|\sin\delta\right)}_{P} + \underbrace{j3|V_s|\left(|I_{ds}|\cos\delta - |I_{qs}|\sin\delta\right)}_{Q}$$

$$P = 3|V_s|\left(|I_{qs}|\cos\delta + |I_{ds}|\sin\delta\right) =$$

$$= 3|V_s|\left(\frac{\overbrace{|V_s|\sin\delta}^{|I_{qs}|}}{X_{qs}}\cos\delta + \frac{\overbrace{|E_x| - |V_s|\cos\delta}^{|I_{ds}|}}{X_{ds}}\sin\delta\right) =$$

$$P = 3\frac{|V_s|\cdot|E_x|}{X_{ds}}\sin\delta + \frac{3}{2}|V_s|^2\left(\frac{1}{X_{qs}} - \frac{1}{X_{ds}}\right)\sin(2\delta)$$

معرفی اجزاء توان اکتیو ماشین قطب برجسته

$$P = \underbrace{3\frac{|V_s|\cdot|E_x|}{X_{ds}}\sin\delta}_{P_x} + \underbrace{\frac{3}{2}|V_s|^2\left(\frac{1}{X_{qs}} - \frac{1}{X_{ds}}\right)\sin(2\delta)}_{P_R}$$

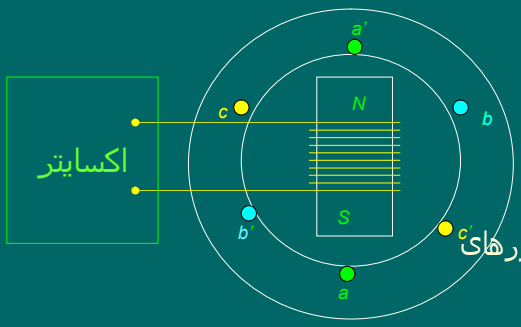
- P_x : توان سنکرون
- P_R: توان رلوکتانسی

چند تذکر در مورد توان اکتیو ماشین قطب برجسته

- اگر $Xds=Xqs=Xs$ فرض شود، همان روابط ماشین قطب صاف بدست می آید
- P_{max} در ماشینهای قطب برجسته بیشتر از P_{max} در قطب صاف است و در $\delta<90$ رخ می دهد.
- توان اکتیو در حالت ژنراتوری در ناحیه اول و در حالت موتوری در ناحیه سوم قرار دارد.
- اگر جریان تحریک صفر باشد، در ماشینهای قطب برجسته توان رلوکتانسی وجود دارد و در ماشینهای قطب صاف توان صفر است.

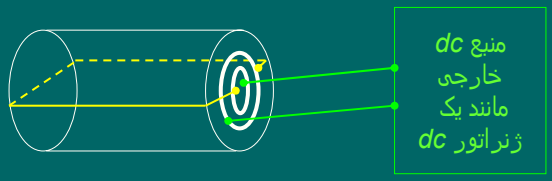
تحریک کننده (اکسایتر) ژنراتورهای سنکرون

- مدار تحریک هر ژنراتور سنکرون باید توسط یک جریان *dc* تغذیه شود. این جریان *dc* توسط اکسایتر تامین می شود.



- انواع اصلی اکسایترهای ژنراتورهای سنکرون:
  - تحریک کننده های با جاروبک
  - تحریک کننده های بدون جاروبک

تحریک کننده های با جاروبک

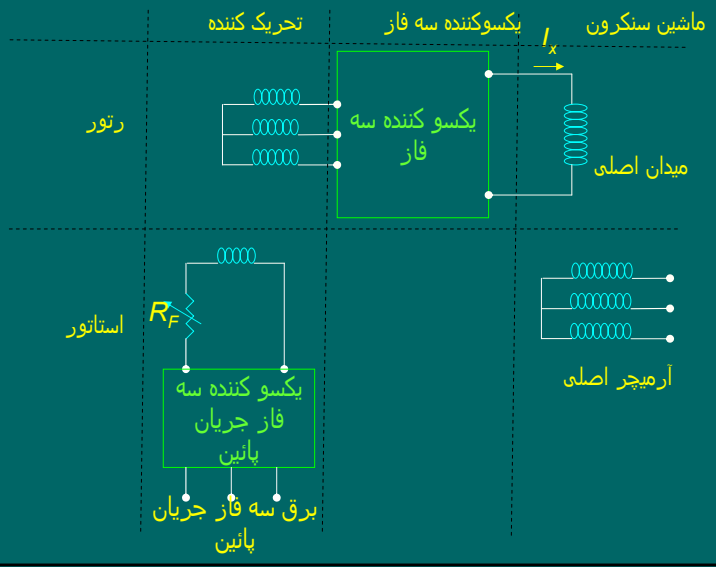


- این روش در ژنراتورهای کوچک بکار می رود.
- اشکالات اکسایترهای باجاروبک:
  - چون جاروبکها سائیده می شوند، مرتبا باید تحت کنترل و نگهداری و تعمیر قرار گیرند.
  - بعلت مقاومت جاروبکها بر روی آنها افت ولتاژ و تلفات توان ایجاد می شود.

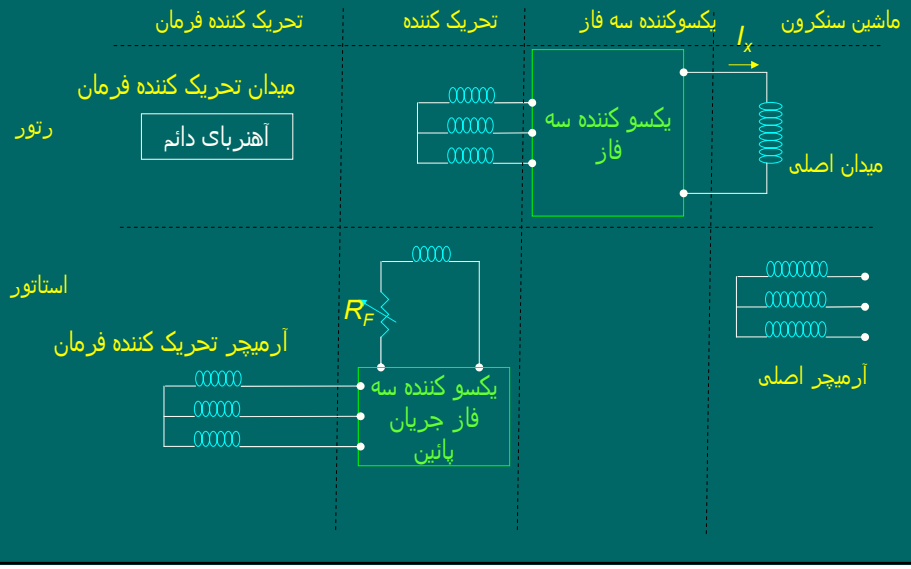
تحریک کننده های بدون جاروبک

- اکسایتر بدون جاروبک یک ژنراتور سنکرون کوچک است که تحریک آن بر روی استاتور و آرمیچر آن بر روی رتور نصب می شود. آرمیچر یک ولتاژ سه فاز تولید می کند که توسط یک مدار یکسوکننده سه فاز که بر روی رتور است، یکسو میشود و سپس مدار تحریک (میدان) اصلی ژنراتور سنکرون اصلی را تغذیه می کند.
- با کنترل کردن جریان تحریک اکسایتر بدون جاروبک که بر روی استاتور قرار دارد، می توان جریان تحریک زنراتور اصلی را کنترل نمود.

ادامه تحریک کننده های بدون جاروبک



تحریک کننده فرمان (*Pilot Exciter*)



ادامه تحریک کننده فرمان (*Pilot Exciter*)

- برای اینکه هیچ منبع تغذیه خارجی مورد نیاز نباشد، از تحریک کننده فرمان استفاده می شود. تحریک کننده فرمان ژنراتور سنکرون کوچکی است که رتور آن آهنربای دائم بوده و آرمیچر آن یک سیم پیچ سه فاز بر روی استاتور است. تحریک کننده فرمان را روی محور ژنراتور اصلی نصب می کنند و با آن می چرخدو یک ولتاژ سه فاز تولید می کند که پس از یکسوسازی مدار تحریک اکسایتر را تغذیه می کند.

اندازه و تعیین راکتانس سنکرون در ماشین سنکرون قطب صاف

- راکتانس سنکرون در هر جریان تحریک توسط دو مشخصه که از دو آزمایش بدست می آیند، تعیین می شود:

۱- آزمایش مدار باز (*O.C.C.*).

۲- آزمایش اتصال کوتاه (*S.C.C*)

آزمایش مدار باز (بی باری) ژنراتور

- رتور ژنراتور سنکرون را در سرعت سنکرون می چرخانیم تا فرکانس سنکرون داشته باشیم.
- با افزایش تدریجی جریان تحریک (Ix)، ولتاژ ترمینالهای ژنراتور را که همان ولتاژ داخلی Ex است، اندازه گیری می کنیم و منحنی زیر را رسم می کنیم که منحنی مشخصه OCC می گویند.
- OCC ابتدا خط راست است و سپس اشباع می شود.

آزمایش اتصال کوتاه ژنراتور

- رتور ژنراتور سنکرون را در سرعت سنکرون می چرخانیم تا فرکانس سنکرون داشته باشیم.
- با افزایش تدریجی جریان تحریک (I_x)، جریان اتصال کوتاه I_{SC} و جریان I_x را مرحله به مرحله اندازه گیری می کنیم و منحنی زیر را رسم می کنیم که منحنی مشخصه SCC می گویند.
- منحنی SCC یک خط راست است.

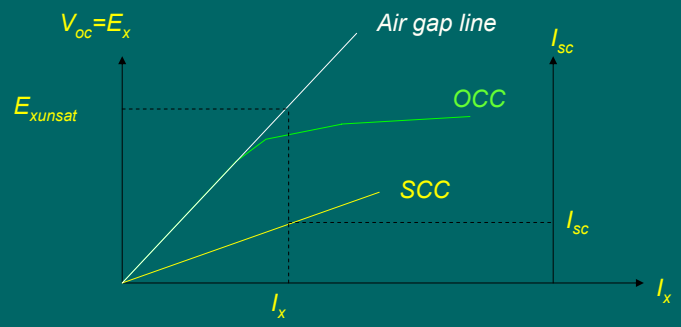
تعیین راکتانس سنکرون از روی منحنی های *OCC* و *SCC*

- دو راکتانس سنکرون داریم:
  - راکتانس سنکرون غیراشباع (X_{unsat})
  - راکتانس سنکرون اشباع (X_{sat}).

تعیین راکتانس سنکرون غیراشباع

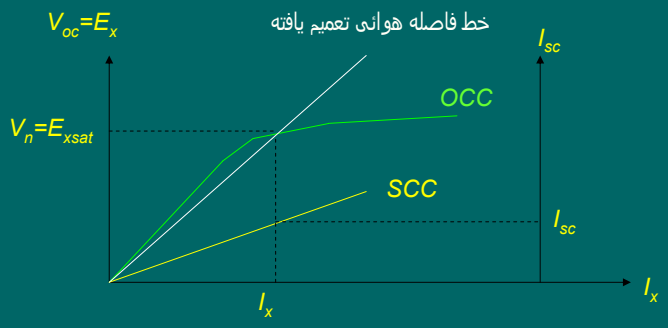
- منحنی های *OCC* و *SCC* را رسم می کنیم.
- خط مماس بر *OCC* را رسم نموده و خط فاصله هوائی (*Air gap line*) می نامیم.
- برای جریان تحریک مورد نظر (*Ix*) از خط فاصله هوائی E_{Xunsat} را خوانده و از منحنی *SCC*، جریان I_{SC} می خوانیم.
- راکتانس سنکرون غیر اشباع را برای جریان تحریک مورد نظر از تقسیم E_{Xunsat} بر I_{SC} بدست می آوریم.

شکل برای تعیین راکتانس سنکرون غیراشباع



$$X_{unsat} = \frac{E_{Xunsat}}{I_{SC}}$$

تعیین راکتانس سنکرون اشباع در ولتاژ نامی



$$X_{sat} = \frac{V_n}{I_{SC}}$$

تعریف نسبت اتصال کوتاه (*SCR*)

$$SCR = \frac{\text{جریان تحریک مورد نیاز برای ولتاژ نامی آرمیچر در مدار باز}}{\text{جریان تحریک مورد نیاز برای جریان نامی آرمیچر در اتصال کوتاه}}$$

می توان نشان داد که نسبت اتصال کوتاه برابر عکس مقدار پریونیت راکتانس سنکرون اشباع شده است.

$$SCR = \frac{1}{X_{sat}}$$

مثال

برای یک ماشین سنکرون *220v*، *45KVA*، *60Hz* و ۶ قطب با اتصال ستاره اطلاعات زیر از مشخصه های مدار باز و اتصال کوتاه بدست آمده است.

از مشخصه مدار باز:

در جریان تحریک *2.84A*، ولتاژ خط به خط ترمینال ۲۲۰ ولت است.

از خط فاصله هوائی:

در جریان تحریک *2.20A*، ولتاژ خط به خط ترمینال ۲۰۲ ولت است.

از مشخصه اتصال کوتاه:

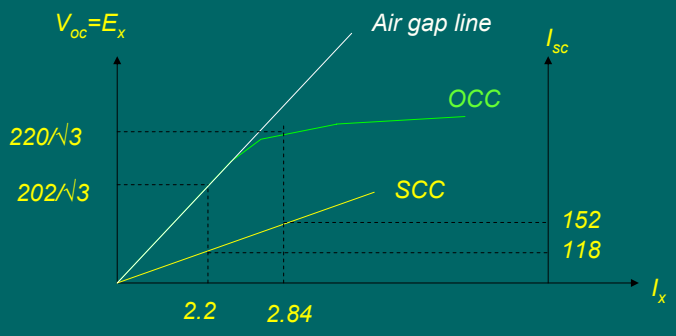
در جریان تحریک *2.20A*، جریان اتصال کوتاه ۱۱۸ آمپر است و

در جریان تحریک *2.84A*، جریان اتصال کوتاه ۱۵۲ آمپر است.

مطلوبست محاسبه راکتانس سنکرون غیراشباع و راکتانس سنکرون اشباع و نسبت اتصال کوتاه.

حل:

ادامه حل مثال:



$$X_{unsat} = \frac{\frac{202V}{\sqrt{3}}}{118A} = 0.987\frac{\Omega}{phase} \qquad X_{sat} = \frac{\frac{220V}{\sqrt{3}}}{152A} = 0.836\frac{\Omega}{phase}$$

دامه حل مثال:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(220V)^2}{45KVA} = 1.076\Omega$$

$$X_{satPu} = \frac{X_{sat}}{Z_{base}} = \frac{0.836}{1.076} = 0.777Pu$$

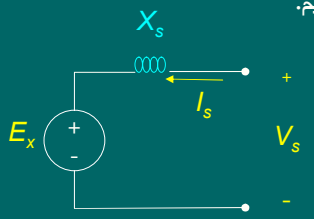
$$SCR = \frac{1}{X_{satPu}} = \frac{1}{0.777} = 1.29$$

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3}\times V_{SLine}} = \frac{45000VA}{\sqrt{3}\times 220V} = 118A$$

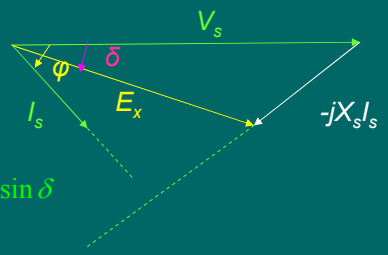
$$SCR = \frac{2.84A}{2.20A} = 1.29$$

اثر تغییر جریان تحریک بر روی یک موتور سنکرون

- یک موتور سنکرون قطب صاف با بار ثابت و ولتاژ ترمینالهای ثابت در نظر می گیریم. از مقاومت استاتور صرفنظر می کنیم:



$$E_x = V_s - jX_s I_s$$

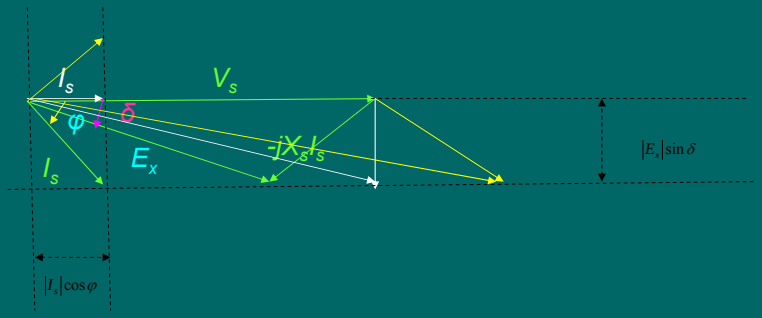


$$P_{out} = P_{in} = 3|V_s||I_s|\cos\varphi = 3\frac{|V_s||E_x|}{X_s}\sin\delta$$

ادامه اثر تغییر جریان تحریک

$$P_{out} = P_{in} = 3|V_s||I_s|\cos\varphi = 3\frac{|V_s||E_x|}{X_s}\sin\delta = cons\tan t$$

$$\begin{cases} |I_s|\cos\varphi = cons\tan t \\ |E_x|\sin\delta = cons\tan t \end{cases}$$



مثال ۶-۲

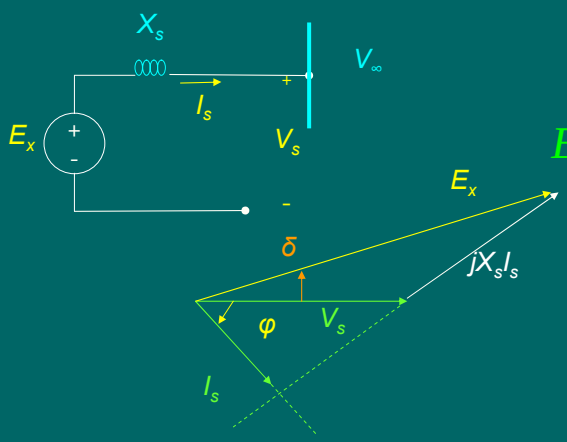
- یک ژنراتورر سنکرون سه فاز چهار قطبی ۵کیلوولت آمپر، ۲۰۸ ولت، ۶۰ هرتز با اتصال ستاره ، به یک باس بی نهایت با ولتاژ و فرکانس نامی متصل است. مقاومت استاتور و راکتانس سنکرون ماشین عبارتند از:

rs=0 و *Xs=0.8Ω/phase*

- الف) اگر ماشین توان نامی خود را در ضریب قدرت ۰.۸ پس فاز به باس بی نهایت تحویل دهد، ولتاژ داخلی تحریک و زاویه قدرت را حساب کنید.
- ب) اگر جریان تحریک ۲۰ درصد افزایش یابد ولی توان مکانیکی توربین ثابت بماند، جریان استاتور و ضریب قدرت و توان راکتیو زنراتور رابیابید.

حل مثال:

- :



$$E_x = V_s + jX_sI_s$$

حل مثال:

- الف:

$$\vec{V}_s = |V_s| < 0 = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120 < 0v$$

$$|I_s| = \frac{5000VA}{\sqrt{3} \times 208} = 13.87A$$

$$I_s = |I_s| < \varphi = 13.87 < -\cos^{-1} 0.8 = 13.87 < -36.87^\circ$$

$$E_x = V_s + jX_s I_s = 120 < 0 + j0.8 \times \left(13.87 < -36.87^\circ\right) =$$

$$E_x = 127 < 4^\circ$$

$$|E_x| = 127 \quad \delta = 4^\circ$$

ادامه حل مثال:

- ب:

$$|E_x|_{new} = 1.2 \times |E_x|_{old} = 1.2 \times 127 = 152.4$$

$$P_{new} = P_{old} \quad \Rightarrow \quad 3\frac{|V_s| \cdot |E_x|_{new}}{X_s} \sin\delta_{new} = 3\frac{|V_s| \cdot |E_x|_{old}}{X_s} \sin\delta_{old}$$

$$|E_x|_{new} \sin\delta_{new} = |E_x|_{old} \sin\delta_{old}$$

$$152.4 \times \sin\delta_{new} = 127 \times \sin 4^\circ \quad \Rightarrow \quad \delta_{new} = 3.33^\circ$$

$$E_{x new} = |E_x|_{new} < \delta_{new} = 152.4 < 3.33^\circ$$

$$E_x = V_s + jX_s I_s$$

$$I_s = \frac{E_x - V_s}{jX_s} = \frac{152.4 < 3.33^\circ - 120 < 0}{j0.8} = 41.67 < -74.6^\circ$$

$$\varphi = 0 - \left(-74.6^\circ\right) = 74.6^\circ$$

$$P.F. = \cos\varphi = \cos 74.6^\circ = 0.266lag$$

$$Q = 3|V_s| \cdot |I_s| \sin\varphi = 3 \times 120 \times 41.67 \times \sin 74.6^\circ = 14463VA > 0$$