



ماشینهای الکتریکی ۲

غلامرضا کامیاب

POWEREN.IR

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 متقاضن
- انتقال مولفه ها در ترانسفورماتور
- روش های مقابله با مولفه هموپلار
- عدد شناسانی
- اتصالات خاص ترانسفورماتورهای سه فاز

• فصل دوم : ماشینهای سنکرون

ترانسفورماتورهای سه فاز

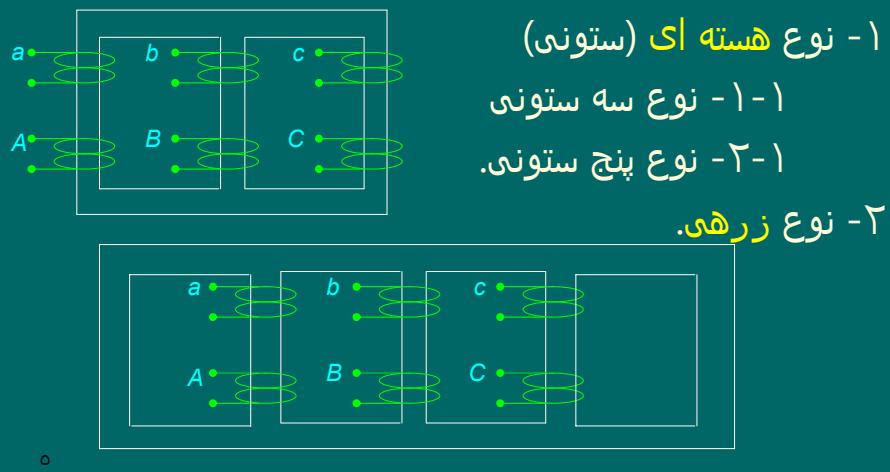
• نقش ترانسفورماتورهای سه فاز: تبدیل ولتاژ ژنراتورهای سه فاز برای انتقال و توزیع

• انواع ساخت ترانسفورماتورهای سه فاز:

- ١ - مجموعه سه ترانس تکفاز که بصورت سه فاز استفاده می شود.
- ٢- ترانسفورماتورهای سه فاز یکپارچه (اقتصادی تر است).

ترانسفورماتورهای سه فاز یکپارچه

- انواع هسته های ترانسفورماتورهای سه فاز یکپارچه:



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 87° برابر پایه های افقی باشند.

معادلات ولتاژ ترانسفورماتور سه فاز

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

فرضیات:

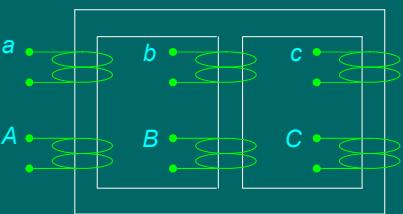
۱- ترانس از لحاظ مغناطیسی متقارن است یعنی رلوکتانس هر سه شاخه برابر است.

۲- μ آهن ثابت است.

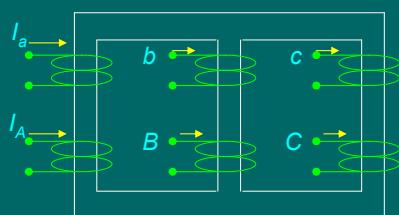
۳- همه سیم پیچها در یک جهت بسته شده اند و تعداد دورهای اولیه باهم و تعداد دورهای ثانویه با هم برابرند.

$$\begin{aligned} N_a &= N_b = N_c = N_1 \\ N_A &= N_B = N_C = N_2 \end{aligned}$$

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



شار حلقه شده در هر یک از سیم پیچهای اولیه



$$\lambda_a = L'_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + L_{aA} i_A + L_{aB} i_B + L_{aC} i_C$$

$$L'_{aa} = L_{aa} + L_{ia}$$

$$\lambda_b = L_{ba} i_a + L'_{bb} i_b + L_{bc} i_c + L_{bA} i_A + L_{bB} i_B + L_{bC} i_C$$

$$L'_{bb} = L_{bb} + L_{ib}$$

$$\lambda_c = L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L'_{cc} i_c + L_{cA} i_A + L_{cB} i_B + L_{cC} i_C$$

$$L'_{cc} = L_{cc} + L_{ic}$$

- L_{aa} اندوکتانس سیم پیچ a ناشی از شارهایی است که با سایر سیم پیچ‌ها تزویج دارد ولی L_{ia} اندوکتانس سیم پیچ a ناشی از شارهای نشتشی است که با سایر سیم پیچها تزویج ندارد.

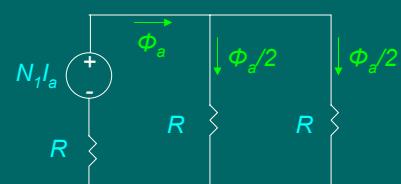
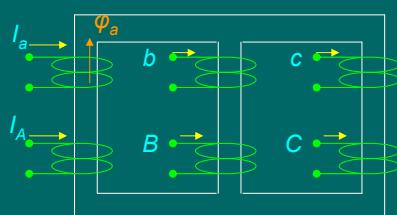
شکل ماتریسی شار حلقه شده سیم پیچهای اولیه

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

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}}_{\hat{L}_{s1}} + \underbrace{\begin{bmatrix} L_{ta} & 0 & 0 \\ 0 & L_{tb} & 0 \\ 0 & 0 & L_{tc} \end{bmatrix}}_{\hat{L}_{t1}} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} \end{bmatrix}}_{M=L_{t2}} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

$$\vec{\lambda}_1 = (L_{s1} + L_{t1}) \cdot \vec{i}_1 + M \cdot \vec{i}_2$$

محاسبه اندوکتانس L_{aa}



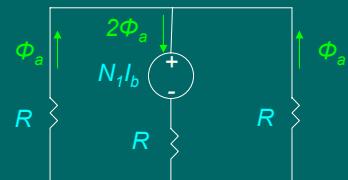
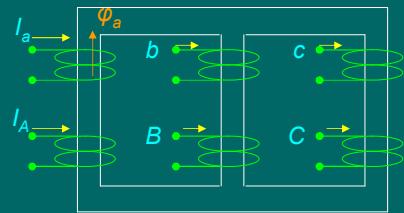
$$N_1 i_a = R \varphi_a + R \left(\frac{\Phi_a}{2} \right) \Rightarrow \varphi_a = \left(\frac{2 N_1 i_a}{3 R} \right)$$

$$L_{aa} = \left. \frac{\lambda_a}{i_a} \right|_{i_b=i_c=i_A=i_B=i_C=0} = \frac{N_1 \varphi_a}{i_a} = \frac{N_1 \left(\frac{2 N_1 i_a}{3 R} \right)}{i_a} = \frac{2 N_1^2}{3 R} = L_{s1}$$

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

و

محاسبه اندوکتانس L_{ab}



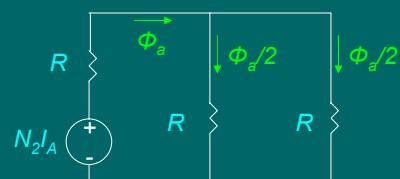
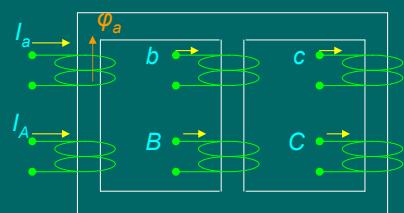
$$R\phi_a + N_1 i_b + R(2\phi_a) = 0 \Rightarrow \phi_a = -\frac{N_1 i_b}{3R}$$

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

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = -\frac{L_{S1}}{2}$$

۱۱

محاسبه اندوکتانس L_{aA}



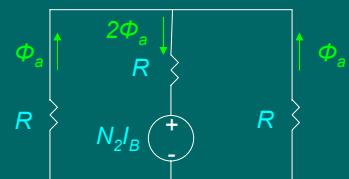
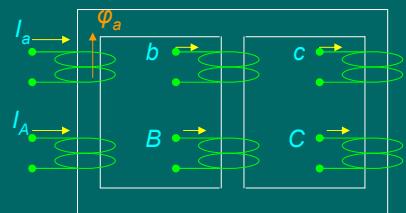
$$-N_2 i_A + R\phi_a + R\left(\frac{\phi_a}{2}\right) = 0 \Rightarrow \phi_a = \left(\frac{2N_2 i_A}{3R}\right)$$

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

$$L_{aA} = L_{bB} = L_{cC} = L_{S12}$$

۱۲

محاسبه اندوکتانس L_{aB}



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

$$L_{ab} = \left. \frac{\lambda_a}{i_B} \right|_{i_a = i_b = i_c = 0} = \frac{N_1 \phi_a}{i_B} = \frac{N_1 \left(-\frac{N_2 i_B}{3R} \right)}{i_B} = -\frac{N_1 N_2}{3R} = -\frac{L_{s12}}{2}$$

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

\

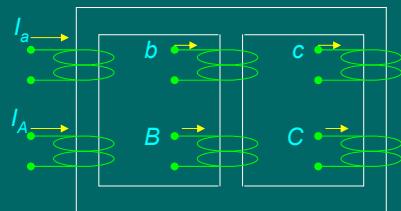
ماتریسهای اندوکتانس

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

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

\Sigma

روابط ولتاژ



$$\begin{aligned} i_a &= k_1 \left(\frac{dI_a}{dt} \right) \\ i_b &= k_2 \left(\frac{dI_b}{dt} \right) \\ i_c &= k_3 \left(\frac{dI_c}{dt} \right) \\ i_A &= R_1 + \frac{dI_A}{dt} = R_1 + \frac{d(I_a + I_b + I_c)}{dt} = R_1 + k_1 \frac{dI_a}{dt} + k_2 \frac{dI_b}{dt} + k_3 \frac{dI_c}{dt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{aa}^t &= L_{aa} + L_{ia} \\ L_{bb}^t &= L_{bb} + L_{ib} \\ L_{cc}^t &= L_{cc} + L_{ic} \end{aligned}$$

نحوه دات گذاری سیم پیچها

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

تعريف α

تعريف می کنیم: $\alpha = e^{j120} = 1 < 120^\circ$
 اگر α در یک فازور ضرب شود فقط فاز آنرا به اندازه 120° درجه اضافه می کند (در جهت مثلثاتی می چرخاند).
 می توان نشان داد:

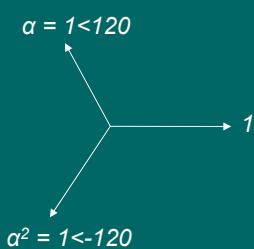
$$\alpha^2 = \alpha^* = 1 < -120^\circ$$

$$\alpha^3 = 1$$

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

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

و



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

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 120° جلوتر است و فاز b از فاز c 120° درجه جلوتر است.

ب) مجموعه توالی منفی (acb): فاز a از فاز b 120° عقب تر است و فاز b از فاز c 120° درجه عقب تر است.

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

$$I_c^+ = \alpha I_a^+$$

$$I_b^+ = \alpha^2 I_a^+$$

$$I_c^- = \alpha^2 I_a^-$$

و

$$\begin{aligned} & \xrightarrow{\hspace{1cm}} I_a^0 \\ & \xrightarrow{\hspace{1cm}} I_b^0 = I_a^0 \\ & \xrightarrow{\hspace{1cm}} I_c^0 = I_a^0 \end{aligned}$$

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 :

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

I_p جریانهای فازی و I_s مولفه های متقارن جریانها هستند.

ماتریس تبدیل فورتسلکیو و معکوس آن :

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

مثال

$$\begin{cases} I_a = 1 < 0 \\ I_b = 0 \\ I_c = 0 \end{cases} \quad \text{مولفه متقارن جریانهای } I_a, I_b \text{ و } I_c \text{ را بدست آورید؟} \quad : \text{حل}$$

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

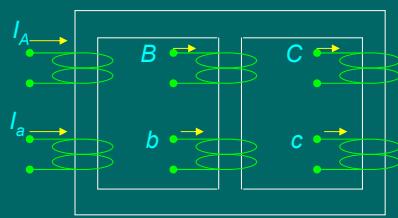
$$\begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a = 1 < 0 \\ I_b = 0 \\ I_c = 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 < 0 \\ 1 < 0 \\ 1 < 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix}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

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

انتقال مولفه های جریان در ترانس

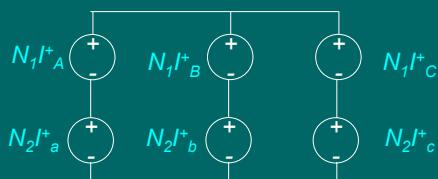
- فرض: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته بینهایت فرض می شود، در نتیجه سیستم خطی است و میتوان از جمع آثار استفاده کرد. یعنی میتوان به هریک از مولفه های مثبت، منفی و صفر را جداگانه بررسی کرد و سپس اثرات آنها را جمع نمود.

- جریانهای بار نامتقارن ثانویه را به مولفه هایشان تجزیه نموده و جریانهای اولیه را بدست می آوریم.
- هسته ترانس را سه ستونه است.



۷۱

انتقال مولفه های مثبت



مدار معادل مغناطیسی:

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

چون مولفه ها متقارن هستند.

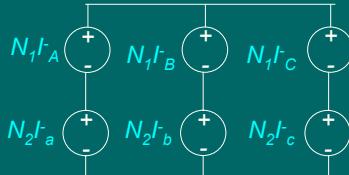
$$\begin{cases} I_b^+ = \alpha^2 I_a^+ \\ I_c^+ = \alpha I_a^+ \end{cases}$$

:نتایج نهائی

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

۷۲

انتقال مولفه های منفی



مدار معادل مغناطیسی :

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

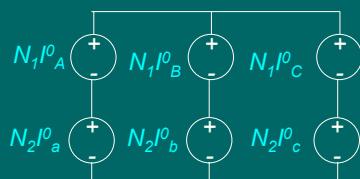
چون مولفه ها متقارن هستند.

$$\begin{cases} I_b^- = \alpha I_a^- \\ I_c^- = \alpha^2 I_a^- \end{cases} \quad \begin{cases} I_B^- = \alpha I_A^- \\ I_C^- = \alpha^2 I_A^- \end{cases} \quad \begin{cases} I_A^- = -\frac{N_2}{N_1} I_a^- \\ I_B^- = -\frac{N_2}{N_1} I_b^- \\ I_C^- = -\frac{N_2}{N_1} I_c^- \end{cases}$$

نتایج نهائی

γ

انتقال مولفه های صفر



- اگر امکان عبور جریان مولفه صفر از اولیه و ثانویه باشد، نیرو محرکه های اولیه و ثانویه هر شاخه یکدیگر را خنثی می کنند:

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

- اگر امکان عبور جریان فقط از یک طرف باشد و هسته سه ستونه باشد، شار مولفه صفر نمیتواند از هسته بگذرد و قسمتی از آن در داخل هوا می گذرد و ضمناً شار مخالف 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- تعییه کردن پایه های اضافی (ترانس پنج ستونه) - 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.

۲۵

مثال

- یک ترانسفورماتور سه فاز با اتصال Dy_05 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 مبنای قرارداده شود

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

۷۷

اتصالات ترانسهاي سه فاز و گروههای برداری

- بسته به شرایط کاری و نحوه استعمال ترانس، اولیه و ثانویه ممکن است ستاره، مثلث و یا ستاره شکسته (زیگزاگ) باشد.

- روش استاندارد بیان اتصالات و گروههای برداری:

- حروف بزرگ برای طرف فشار قوی Y, D A, B, C

- حروف کوچک برای فشار ضعیف $y, d \quad a, b, c$

- 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

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.

۳۷

مثال از ترانسهاي 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 ۰ درجه جلوتر است

ولتاژ بالا نسبت به ضعیف تر هم ۰ درجه جلوتر است.

۳۸

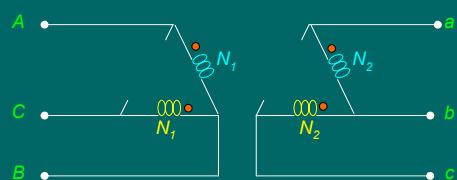
اتصالات خاص ترانسفورماتورهای سه فاز

- 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*)

۲۹

اتصال مثلث باز ($V-V$)

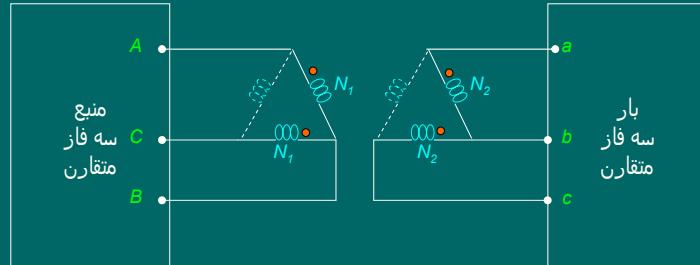
- ترانس یک فاز از اتصال مثلث-مثلث برداشته شده است:



مثال

- یک ترانس سه فاز مثبت-مثبت که از سه ترانس تکفار مشابه با مقادیر نامی S_{rated} و V_{rated1}/V_{rated2} تشکیل یافته است، توسط یک منبع سه فاز متقارن در اولیه تغذیه می شود و بار ثانویه متقارن است. اگریکی از سه ترانس تکفار از مدار خارج شود و ترانس با اتصال مثبت باز کار کند، ثابت کنید:
 - ولتاژ خروجی همچنان یک ولتاژ سه فاز متقارن است.
 - در اتصال مثبت باز، توان قابل تغذیه به میزان $0.58 \cdot$ درصد توان ظاهری قابل تغذیه در حالت مثبت-مثبت است.

• حل (الف):

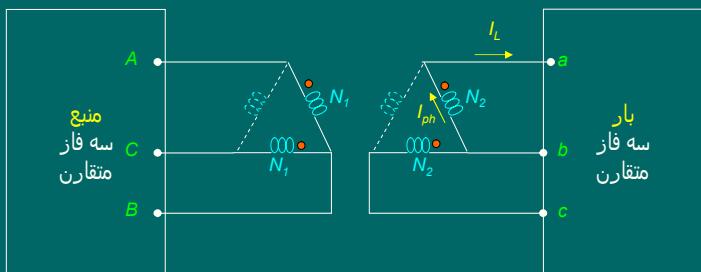


$$\begin{cases} V_{AB} = |V| < 0 \Rightarrow V_{ab} = K|V| < 0 \\ V_{BC} = |V| < -120 \Rightarrow V_{bc} = K|V| < -120 \\ V_{CA} = |V| < 120 \end{cases}$$

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

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

• حل قسمت ب)



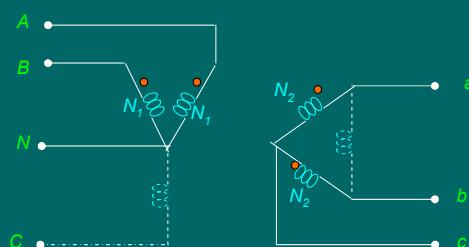
$$S_{out\Delta} = \sqrt{3}V_L I_L = \sqrt{3}V_{rated2} (\sqrt{3}I_{rated2}) = 3V_{rated2} I_{rated2} = 3S_{rated}$$

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

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

اتصال ستاره باز - مثلث باز

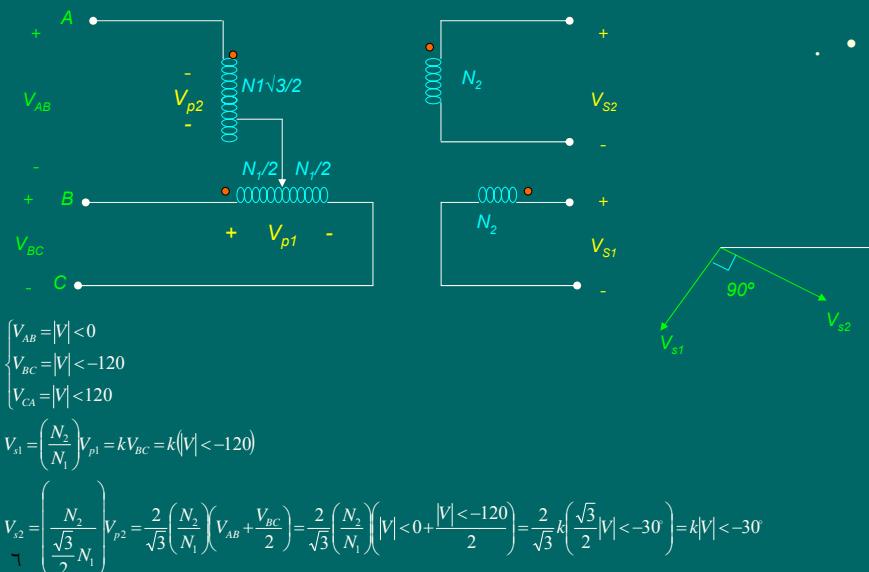
- دوفاز را به سه فاز تبدیل می کند.
- شبیه اتصال V-V است، با این تفاوت که ولتاژهای اولیه از دوفاز و یک ختی بدست می آیند و در ثانویه یک ولتاژ سه فاز تحویل می شود.
- از این اتصال برای تامین موقت برق سه فاز از دو فاز استفاده می شود.



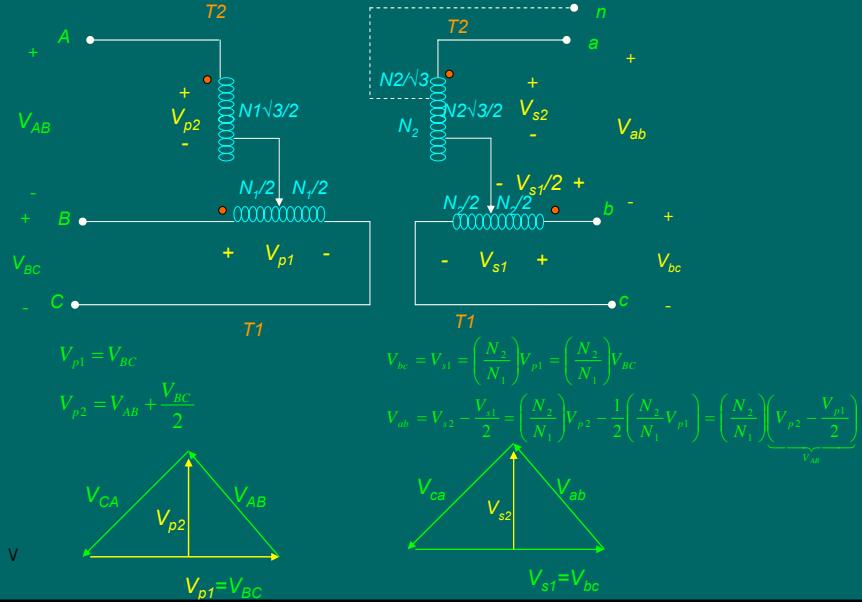
اتصال اسکات تی

- برای اتصال شبکه های سه فاز به شبکه های دوفاز قدیمی بکار می رود.
- یک ولتاژ سه فاز متقاضی ورودی را به یک ولتاژ دوفاز (با اختلاف فاز ۹۰ درجه) تبدیل می کند.
- از دو ترانسفورماتور تکفاز با مقادیر نامی مساوی تشکیل می شود که یکی از آنها در سیم پیچ اولیه اش یک انشعاب $\frac{1}{3/2} = 86.6\%$ درصد ولتاژ بار کامل دارد که به انشعاب میانی ترانس دوم وصل می شود.

ادامه اتصال اسکات تی



اتصال تی سه فاز (T-T) اتصال



ادامه اتصال تی سه فاز (T-T) اتصال

نحوه تبدیل ولتاژ:

- اعمال ولتاژ سه فاز در اولیه

- ایجاد ولتاژ دوفاز با اختلاف فاز 90° در سیم بیجهای اولیه ترانسفورماتورها

- ایجاد ولتاژ دوفاز در سیم بیجهای 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 دیگر سه فاز (اتصال مثلث باز و اتصال ستاره باز -

مثلث باز) این است که می‌توان سیم خنثی را به هر دو طرف اولیه و ثانویه گروه وصل کرد.

ماشین سنکرون

- کاربرد:

– ژنراتور سنکرون برای تولید برق در اندازه 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*)

٩

کاربرد ماشین

- ماشین قطب برجسته در ماشینهای کم سرعت کاربرد دارد زیرا در سرعت بالا، کفشهای بعلت نیروی گردی از مرکز جدا می شوند ولی برجستگی قطب سبب سینوسی ترشدن ولتاژ می شود.

- بنابراین:

– در نیروگاههای 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 می شود.

٤٠

ساختمان فیزیکی ماشین سنکرون

• شامل

- استاتور : قسمت ساکن

- رتور : قسمت متحرک

۱۴

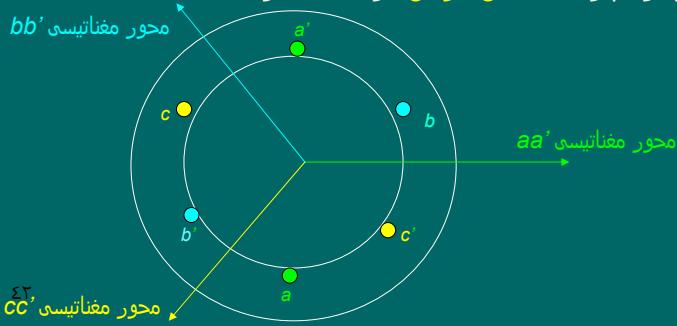
استاتور

• بر روی استاتوریک سیم پیچی سه فاز متقاضن قرار دارد که به آرمیچر می‌گوئیم.

- در حالت موتوری به آرمیچر یک جریان سه فاز می‌دهیم.

- در حالت ژنراتوری یک ولتاژ سه فاز در آرمیچر القاء می‌شود.

• جریان سه فاز آرمیچر، یک میدان گردان در فاصله هوانی ایجاد می‌کند.



رتور

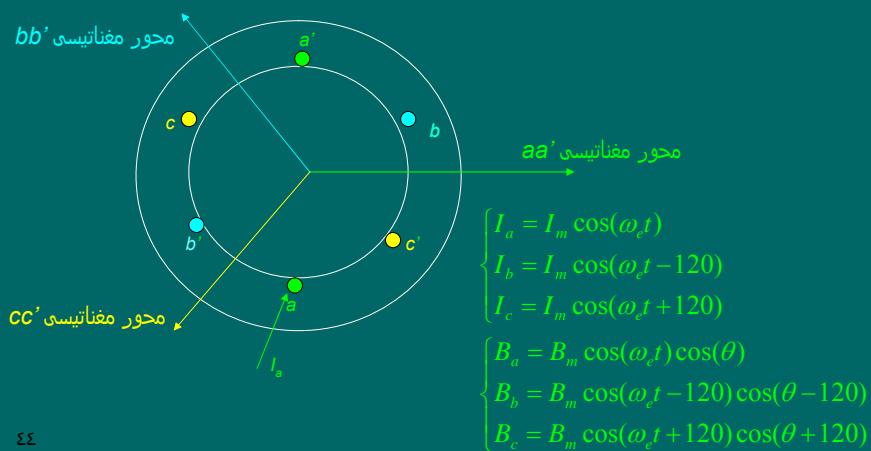
- رتور:

- 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 می‌کند.
- رتور با سرعت سنکرون درحال چرخش است. درنتیجه یک میدان گردان ایجاد میشود.
- در حالت **موتوری** رتور به دنبال میدان استاتور با سرعت سنکرون می‌چرخد.
- در حالت **ژنراتوری** میدان استاتور به دنبال رتور با سرعت سنکرون می‌چرخد.

۴

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 می‌شود.



۵۵

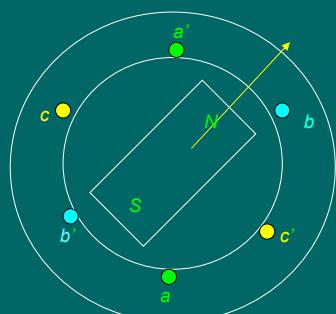
محاسبه میدان کل

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

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

ادامه اساس کار ماشین سنکرون

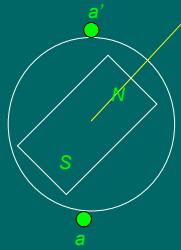
- اگر توسط رتور یک میدان گردان با دامنه ثابت ایجاد کنیم، در سیم پیچهای سه فاز متعادل استاتور یک ولتاژ سه فاز القاء می شود.



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

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'

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

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

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

- ولتاژ سایر فازها:

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

فرکانس ماشین P قطب

- در ماشین 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 برقرار اند:

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

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

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

سیم پیچی استاتور ماشین سنکرون

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

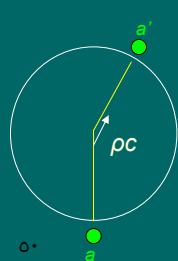
$$E_{rms} = 4.44 K_w N_{ph} \phi_m f_e$$

ضریب سیم پیچی

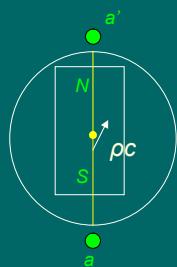
۴۹

گام قطب و گام کویل

- گام قطب (ρ_p): زاویه الکتریکی بین دو قطب مجاور است که همیشه 180° درجه الکتریکی می‌باشد زیرا ولتاژ القائی در هادیهای زیر دو نقطه متناظر در دو قطب مجاور همواره 180° 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.

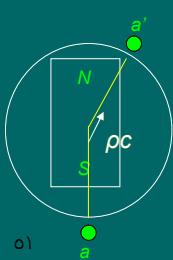


انواع سیم پیچی از نظر گام کویل



- سیم پیچی گام کامل : اگر گام کویل برابر گام قطب باشد.

سیم پیچی از نوع گام کامل است.



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

o۱

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:

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

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

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

o۲

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:

$$\text{تعداد شیارهای دو قطب} = 2\text{Pole} \times 3\text{phase} \times \text{slot/pole/phase}$$

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

۵

فرمول ضریب سیم پیچی

$$K_w = K_d \cdot K_p \quad K_p = \sin\left(\frac{\nu\rho_c}{2}\right)$$

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

- ν : شماره هارمونیک
- n : تعداد شیار در هر کمریند فاز
- γ : گام شیار
- ρ_c : گام کویل

۵۴

رسم دیاگرام سیم پیچی

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

تعداد شیارهای دو قطب = $2Pole \times 3phase \times$

$$1slot/pole/phase=6slot$$

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

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

۸۰

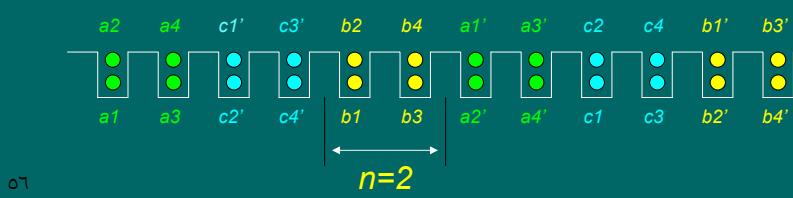
مثال

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

تعداد شیارهای دو قطب = $2Pole \times 3phase \times 2slot/pole/phase=12slot$

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

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



۸۱

ادامه حل مثال

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

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

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

۵۰V

مثال

- رسم دیاگرام سیم پیچی دو لایه، گام کویل ۵ شیار با ۲ شیار در فاز در قطب (2slot/pole/phase)

حل:

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

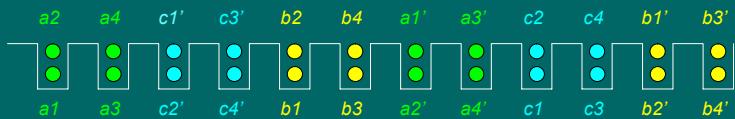
$$\rho_c = 5\gamma = 5 \times 30 = 150^\circ elec$$

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

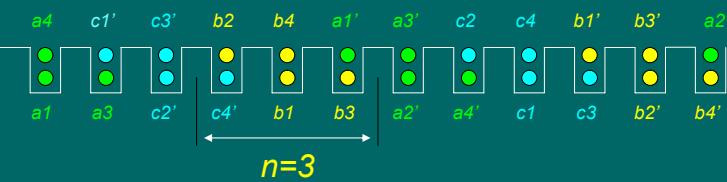
۵۱

ادامه مثال

- رسم دیاگرام سیم پیچی گام کامل:



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



ادامه حل مثال

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

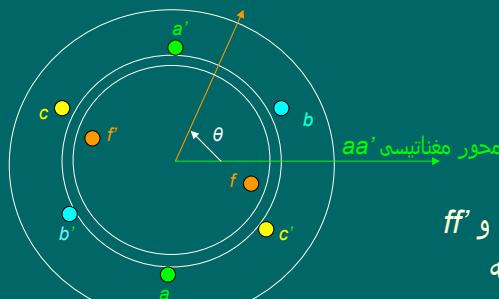
$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{n\gamma}{2}\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{3 \times 30}{2}\right)}{3 \times \sin\left(\frac{30}{2}\right)} = 0.9107$$

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

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'' سیم پیچهای گسترده هستند که بصورت مرکز مدل شده اند.

۷۱

شار حلقه شده در سیم پیچ'

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

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

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

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

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

۷۲

a

ادامه محاسبه شار حلقه شده در سیم پیچ

$$\begin{aligned}\lambda_a &= L_{aa}\dot{i}_a + L_{ab}\dot{i}_b + L_{ac}\dot{i}_c + L_{af}\dot{i}_f \\ \lambda_a &= (L_{a0} + L_{al})\dot{i}_a + \left(-\frac{1}{2}L_{a0}\right)\dot{i}_b + \left(-\frac{1}{2}L_{a0}\right)\dot{i}_c + (L_{f0}\cos\theta)\dot{i}_f \\ \lambda_a &= L_{al}\dot{i}_a + L_{a0}\left(\dot{i}_a - \frac{1}{2}\dot{i}_b - \frac{1}{2}\dot{i}_c\right) + (L_{f0}\cos\theta)\dot{i}_f \\ \lambda_a &= L_{al}\dot{i}_a + L_{a0}\left(\dot{i}_a - \frac{1}{2}\underbrace{(\dot{i}_b + \dot{i}_c)}_{-\dot{i}_a}\right) + \underbrace{(L_{f0}\cos\theta)\dot{i}_f}_{\lambda_{af}} \\ \lambda_a &= L_{al}\dot{i}_a + \frac{3}{2}L_{a0}\dot{i}_a + \lambda_{af} \quad ; \quad \lambda_{af} = L_{f0}I_f \cos\theta\end{aligned}$$

محاسبه ولتاژ سیم پیچ

$$\begin{aligned}\lambda_a &= L_{aa}\dot{i}_a + L_{ab}\dot{i}_b + L_{ac}\dot{i}_c + L_{af}\dot{i}_f \\ \lambda_a &= (L_{a0} + L_{al})\dot{i}_a + \left(-\frac{1}{2}L_{a0}\right)\dot{i}_b + \left(-\frac{1}{2}L_{a0}\right)\dot{i}_c + (L_{f0}\cos\theta)\dot{i}_f \\ v_a &= R_a\dot{i}_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = R_a\dot{i}_a + \frac{d\left(L_{al}\dot{i}_a + \frac{3}{2}L_{a0}\dot{i}_a + \lambda_{af}\right)}{dt} \\ v_a &= R_a\dot{i}_a + L_{al}\underbrace{\frac{di_a}{dt}}_{I_m} + \frac{3}{2}L_{a0}\underbrace{\frac{di_a}{dt}}_{e_a} + \underbrace{\frac{d\lambda_{af}}{dt}}_{V_a} \\ v_a &= R_a\dot{i}_a + L_{al}\frac{di_a}{dt} + L_m\frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_a &= R_a I_a + j\omega L_{al} I_a + j\omega L_m I_a + E_a \\ V_a &= R_a I_a + jX_l I_a + jX_m I_a + E_a\end{aligned}$$

محاسبه ولتاژ سیم پیچ 'aa'

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

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



راکتانس عکس العمل آرمیچر X_m

راکتانس نشتی آرمیچر X_l

راکتانس سنکرون $X_s = X_m + X_l$

ولتاژ داخلی تحریک E_a

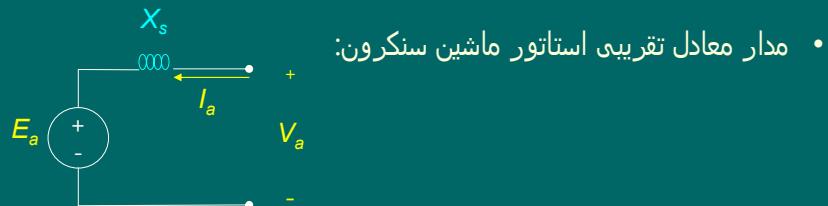
ولتاژ داخلی ناشی از شار برآید E_R

٧٥

مدار معادل تقریبی استاتور ماشین سنکرون

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

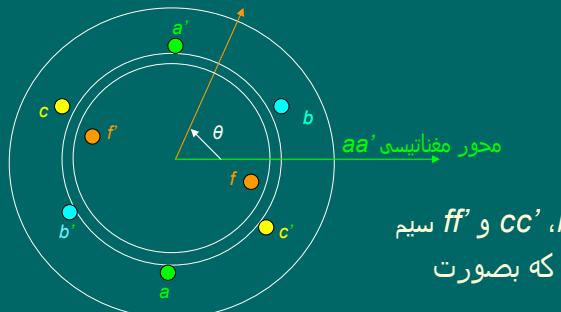
$$V_a = R_a I_a + j \underbrace{(X_l + X_m)}_{X_s} I_a + E_a$$



٧٦

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

- یک ماشین سه فاز، دوقطبی، رتور استوانه‌ای زیر را در نظر می‌گیریم.



- سیم پیچهای 'cc', 'bb', 'aa' و 'ff' سیم پیچهای گسترده هستند که بصورت متقارن مدل شده‌اند.

۷۷

شار فاصله هوائی

- جریان تحریک (I_x)، نیرو محرکه تحریک (F_x) را در فاصله هوائی ایجاد می‌کند.

- جریانهای سه فاز آرمیچر (I_s)، نیرو محرکه آرمیچر (F_{ar}) را در فاصله هوائی ایجاد می‌کند.

- نیرو محرکه برآیند (F_s) از جمع نیرو محرکه تحریک و نیرو محرکه آرمیچر بدست می‌آید.

$$F_s = \vec{F}_x + \vec{F}_{ar}$$

$$\varphi_s = P \cdot \vec{F}_s = P \cdot (\vec{F}_x + \vec{F}_{ar})$$

• P پرمانس مسیر است.

۷۸

ولتاژ فاصله هوایی

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

$$|E_{ag}| = \frac{K_w N \omega \phi_s}{\sqrt{2}} = \frac{K_w N \omega (P |\vec{F}_s|)}{\sqrt{2}} = \underbrace{\left(\frac{K_w N \omega P}{\sqrt{2}} \right)}_m |\vec{F}_s| = m |\vec{F}_s|$$

- طبق قانون فارادی ولتاژ فاصله هوایی نسبت به شار فاصله هوایی و در نتیجه نسبت به نیرو محکم که فاصله هوایی به اندازه ۹۰ درجه پس‌فاز است. بنابراین

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

۷۹

تفکیک ولتاژ فاصله هوایی

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

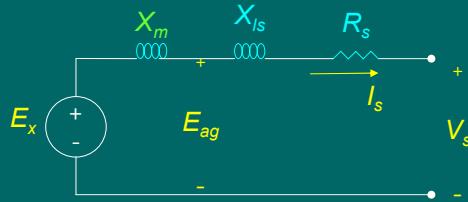
$$E_x = -jmF_x = -j \underbrace{\left(\frac{K_w N \omega P}{\sqrt{2}} \right)}_m \underbrace{(N_x I_x)}_{F_x} = -jk_x I_x$$

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

- ولتاژ تحریک است که فقط به جریان تحریک بستگی دارد.
- 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:



راکانس عکس العمل آرمیچر X_m

راکانس نشتی آرمیچر X_{ls}

راکانس سنکرون $X_s = X_m + X_{ls}$

ولتاژ داخلی تحریک E_x

ولتاژ داخلی ناشی از شار برآیند E_{ag}

ولتاژ عکس العمل آرمیچر E_{ar}

$$E_x = V_s + R_s I_s + jX_m I_s + jX_{ls} I_s$$

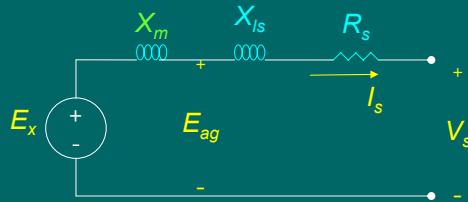
$$E_x = V_s + R_s I_s + j(X_{ls} + X_m) I_s$$

$$E_{ar} = -jX_m I_s$$

$$\text{V1} \quad E_{ag} = E_x + E_{ar}$$

دیاگرام فازوری ماشین سنکرون در حالت ژنراتوری

- مدار معادل استاتور ماشین سنکرون در حالت ژنراتوری:



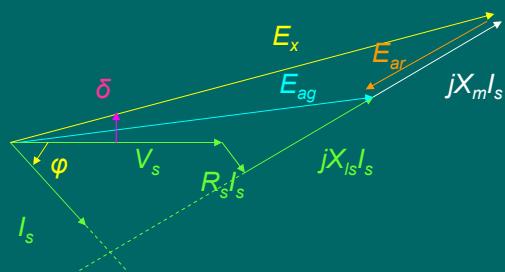
$$E_x = V_s + R_s I_s + jX_m I_s + jX_{ls} I_s$$

$$E_x = V_s + R_s I_s + j(X_{ls} + X_m) I_s$$

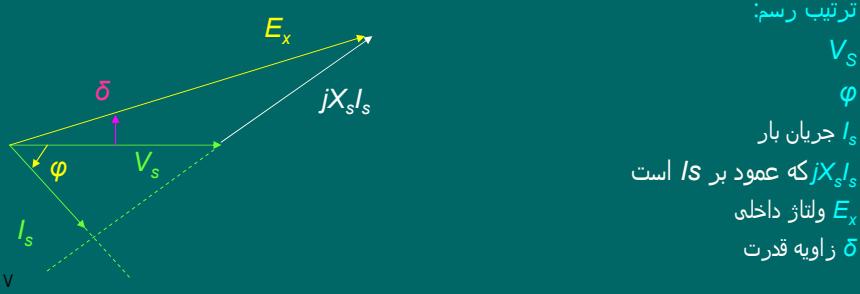
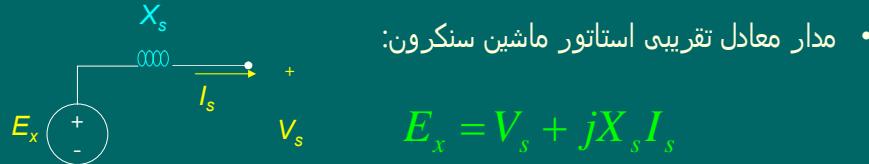
$$E_{ar} = -jX_m I_s$$

$$E_{ag} = E_x + E_{ar}$$

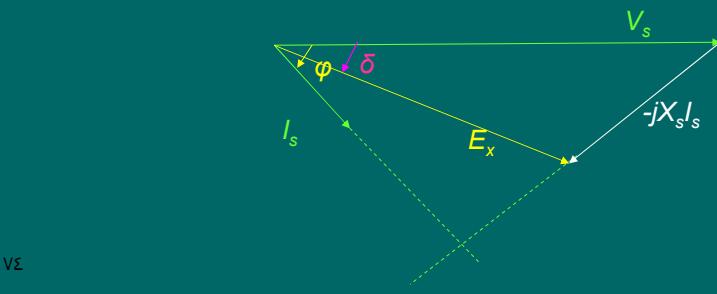
V1



مدار معادل تقریبی استاتور ماشین سنکرون در حالت ژنراتوری



مدار معادل تقریبی استاتور ماشین سنکرون در حالت موتوری



دیاگرام پخش توان در ژنراتور سنکرون

$$P_{in} = T_{app} \cdot \omega_m \quad \xrightarrow{\text{تلفات مسی}} \quad P_{out} = 3|V_s||I_s| \cos \varphi$$

تلفات مسی تلفات هسته تلفات باد و نامعین
اصطکاک P_{core} استاتور
 P_{stray} $P_{f\&w}$ P_{cus}

۷۰

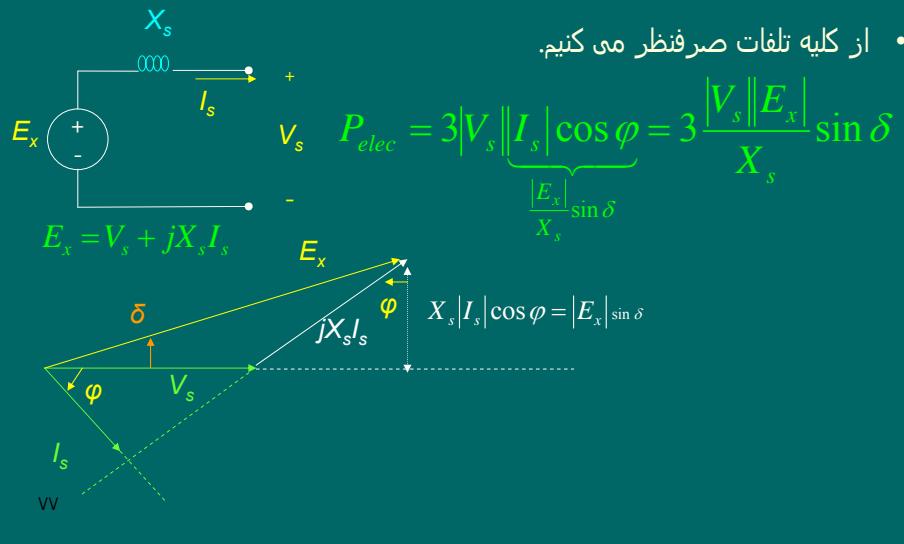
دیاگرام پخش توان در موتور سنکرون

$$P_{out} = T_{out} \cdot \omega_m \quad \xleftarrow{\text{تلفات مکانیکی}} \quad P_{in} = 3|V_s||I_s| \cos \varphi$$

تلفات تلفات هسته تلفات مسی
مکانیکی P_{core} استاتور
 P_{mech} P_{cus}

۷۱

فرمول توان ماشین قطب صاف



مثال ۲-۴

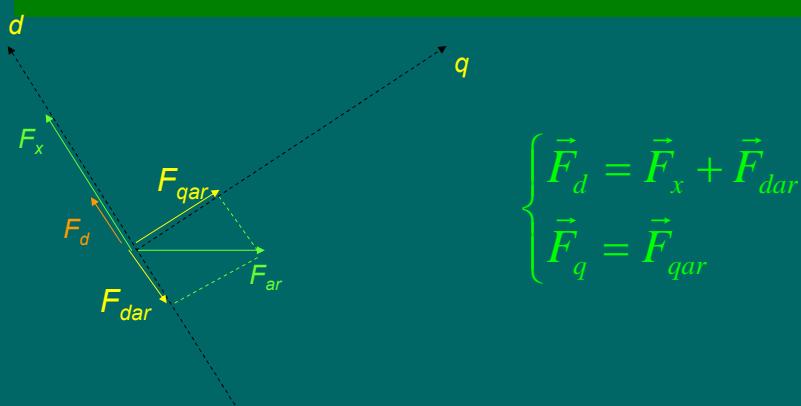
- یک موتور سنکرون سه فاز ۴۵ کیلوولت آمپر، ۲۰۸ ولت، ۶۰ هرتز، ۸ پیش فاز با اتصال مثلث، دارای راکتانس سنکرون ۲.۵ اهم بر فاز است و از مقاومت استاتور صرفنظر می‌شود. تلفات ناشی از اصطکاک و تهويه آن ۱.۵ کیلووات و تلفات هسته اش ۱.۰ کیلووات است. مطلوب است
 - (الف) محاسبه ولتاژ داخلی تحریک و زاویه قدرت با فرض اینکه بار شفت ۱۵hp و ضریب توان موتور ۸ پیش فاز باشد.
 - (ب) اگر بار شفت به ۳۰hp افزایش یابد، ضریب توان جدید موتور چقدر است؟

ماشین سنکرون قطب برجسته

- ماشینهای سنکرون سرعت کم که تعداد قطبها زیاد دارند، از نوع قطب برجسته ساخته می‌شوند.
- در ماشینهای قطب صاف، فاصله هوایی یکنواخت است و شار عکس العمل آرمیچر در کلیه نقاط فاصله هوایی یکسان است. بنابراین عکس العمل آرمیچر را توانستیم با یک راکتانس X_m مدل کنیم.
- در ماشینهای قطب برجسته، فاصله هوایی غیریکنواخت است. بنابراین محور طولی d و عرضی q تعریف می‌کنیم و عکس العمل آرمیچر را با X_{mq} مدل می‌کنیم. شار عکس العمل آرمیچر در امتداد محور طولی d بیشتر است.

۷۹

تجزیه عکس العمل آرمیچر



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

۸۰

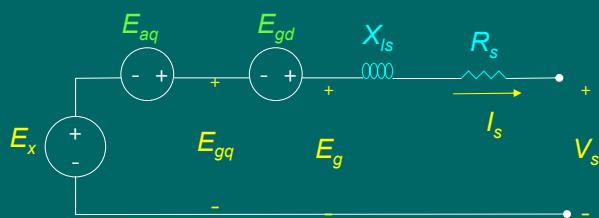
ولتاژ فاصله هوائی

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

۱۱

مدار معادل ماشین قطب بر جسته

- مدار معادل استاتور ماشین سنکرون قطب بر جسته در حالت ژنراتوری:



$$\begin{cases} E_{gq} = E_x + E_{aq} \\ E_x = E_{gd} + E_{gq} = V_s + R_s I_s + jX_{ls} I_s \\ -E_{aq} = jm_d \vec{F}_{dar} = jX_{md} I_{ds} \\ -E_{gd} = jm_q \vec{F}_q = jX_{mq} I_{qs} \end{cases}$$

۱۲

محاسبه ولتاژ داخلی تحریک

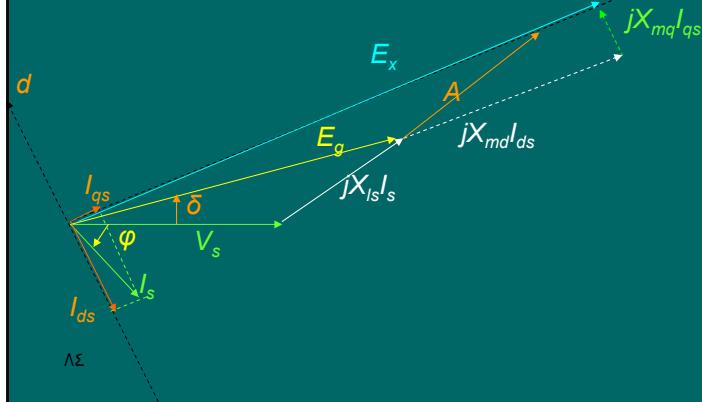
• از مقاومت Rs صرفنظر می شود.

$$\begin{aligned}
 E_x &= V_s + R_s I_s + jX_{ls} I_s - E_{aq} - E_{gd} \\
 &\quad - E_{aq} = jm_d \bar{F}_{dar} = jX_{md} I_{ds} \\
 &\quad - E_{gd} = jm_q \bar{F}_q = jX_{mq} I_{qs} \\
 E_x &= V_s + R_s I_s + jX_{ls} \underbrace{I_s}_{(I_{ds} + I_{qs})} + jX_{md} I_{ds} + jX_{mq} I_{qs} \\
 E_x &= V_s + R_s I_s + jX_{ls} (I_{ds} + I_{qs}) + jX_{md} I_{ds} + jX_{mq} I_{qs} \\
 E_x &= V_s + R_s I_s + j(\underbrace{X_{ls} + X_{md}}_{X_{ds}}) I_{ds} + j(\underbrace{X_{ls} + X_{mq}}_{X_{qs}}) I_{qs} \\
 E_x &= V_s + R_s I_s + jX_{ds} I_{ds} + jX_{qs} I_{qs} \\
 E_x &\cong V_s + jX_{ds} I_{ds} + jX_{qs} I_{qs}
 \end{aligned}$$

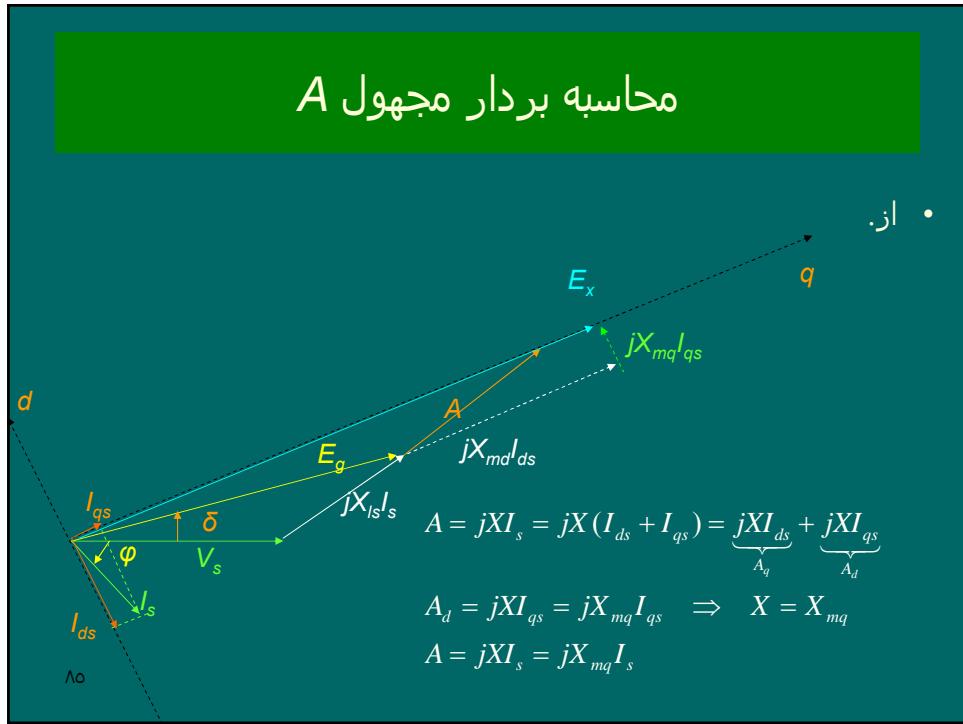
دیاگرام فازوری مدار فوق

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

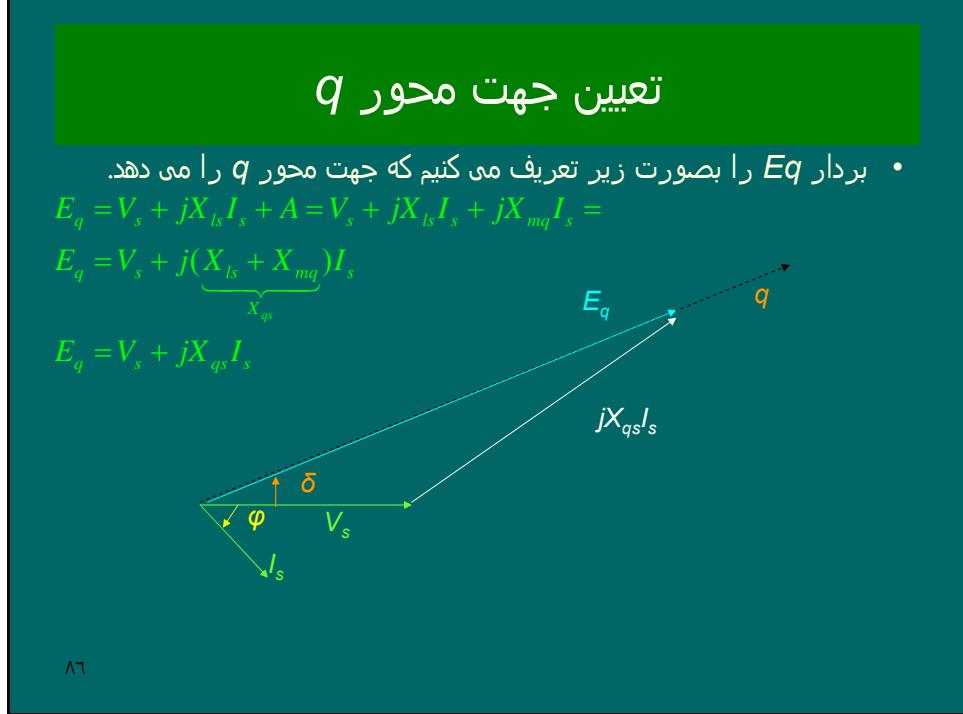
$$E_x = \underbrace{V_s + jX_{ls} I_s}_{E_g} + jX_{md} I_{ds} + jX_{mq} I_{qs}$$



محاسبه بردار مجهول A



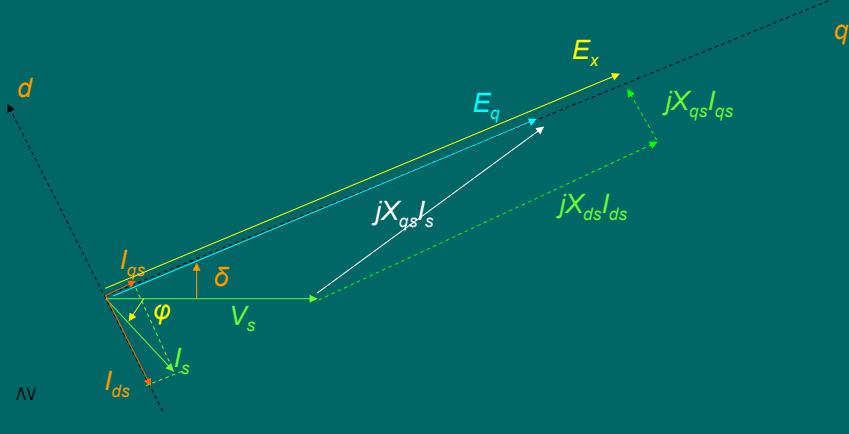
تعیین جهت محور q



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

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

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

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

خلاصه روابط ماشین سنکرون

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

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

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

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

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

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

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

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

مثال ۲-۶

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

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

- 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

$$\vec{V}_s = |V_s| < 0 = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1327.9v \quad \cdot \quad \text{حل:}$$

$$|I_s| = \frac{14 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 2300} = 3514.3A$$

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

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

ادامه حل مثال ۶-۲

$$\begin{aligned}
 \delta &= \tan^{-1} \left(\frac{|X_{qs}| |I_s| \cos \varphi}{|V_s| - |X_{qs}| |I_s| \sin \varphi} \right) \\
 &= \tan^{-1} \left(\frac{+0.24 \times 3514.3 \times \cos(+36.87^\circ)}{1327.9 - 0.24 \times 3514.3 \times \sin(+36.87^\circ)} \right) = 39.38^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 |E_x| &= |V_s| \cos \delta - X_{ds} |I_s| \sin(\varphi - \delta) \\
 &= 1327.9 \times \cos 39.38^\circ - 0.37 \times 3514.3 \times \sin(+36.87^\circ - 39.38^\circ) = 1083.4
 \end{aligned}$$

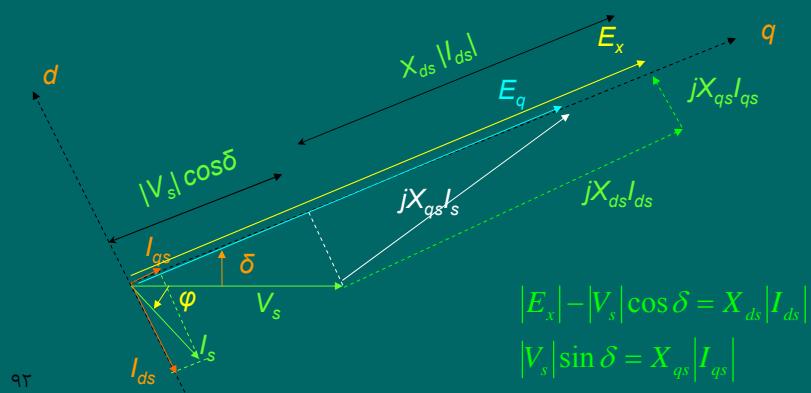
$$\begin{aligned}
 \tilde{E}_x &= |E_x| < \delta = 1083.4 < 39.38^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{I}_{qs} &= +|I_s| \cos(\varphi - \delta) < \delta = \\
 &= +3514.3 \times \cos(+36.87^\circ - 39.38^\circ) < 39.38^\circ = 3511 < 39.38^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{I}_{ds} &= +|I_s| \sin(\varphi - \delta) < (\delta + 90^\circ) \\
 &= 3514.3 \times \sin(+36.87^\circ - 39.38^\circ) < (39.38^\circ + 90^\circ) = \\
 &= -153.9 < 129.38^\circ = 153.9 < (129.38^\circ - 180^\circ) = 153.9 < -50.62^\circ
 \end{aligned}$$

مشخصه $P-\delta$ ماشین قطب بر جسته

- از مقاومت R_s و تلفات هسته صرفنظر می‌کنیم.
- دیاگرام فازوری ماشین قطب بر جسته را در حالت ژنراتوری و پس فاز رسم می‌کنیم:



ادامه مشخصه P - δ ماشین قطب برجسته

$$\begin{aligned}
 S &= 3V_s I_s^* = 3(V_s| - \delta)(I_{qs}| - j|I_{ds}|)^* \\
 &= 3(V_s|\cos\delta - j|V_s|\sin\delta)(I_{qs}| + j|I_{ds}|) = \\
 &= 3\underbrace{|V_s|(I_{qs}|\cos\delta + |I_{ds}|\sin\delta)}_P + j3\underbrace{|V_s|(I_{ds}|\cos\delta - |I_{qs}|\sin\delta)}_Q \\
 P &= 3|V_s|(I_{qs}|\cos\delta + |I_{ds}|\sin\delta) = \\
 &= 3|V_s|\left(\frac{|I_{qs}|}{X_{qs}}\cos\delta + \frac{|I_{ds}|}{X_{ds}}\sin\delta\right) \\
 P &= \underbrace{3\frac{|V_s||E_x|}{X_{ds}}\sin\delta}_R + \underbrace{\frac{3}{2}|V_s|^2\left(\frac{1}{X_{qs}} - \frac{1}{X_{ds}}\right)\sin(2\delta)}_R
 \end{aligned}$$

• محور q را
 مبنای می
 گیریم و
 توان مختلط
 خروجی
 ژنراتور را
 محاسبه می
 کنیم:

معرفی اجزاء توان اکتیو ماشین قطب برجسته

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

• توان سنکرون: P_x
 • توان رلوکاتانسی: P_R

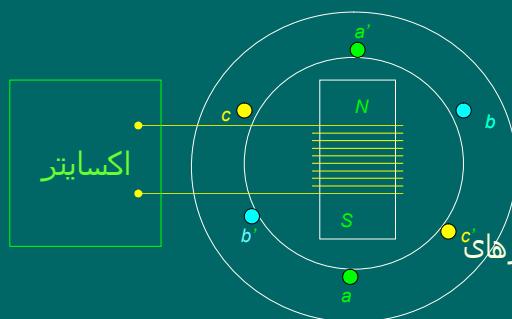
چند تذکر در مورد توان اکتیو ماشین قطب برجسته

- اگر $Xds = Xqs = Xs$ فرض شود، همان روابط ماشین قطب صاف بدست می آید.
- در ماشینهای قطب برجسته بیشتر از P_{max} در قطب صاف است و در $90^\circ < \delta < 90^\circ$ 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.

۹۵

تحریک کننده (اکسایتر) ژنراتورهای سنکرون

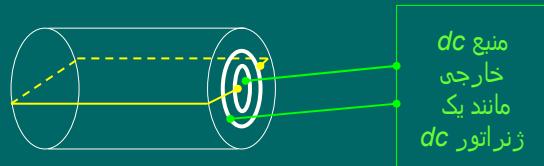
- مدار تحریک هر ژنراتور سنکرون باید توسط یک جریان dc تغذیه شود. این جریان dc توسط اکسایتر تامین می شود.



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

۹۶

تحریک کننده های با جاروبک



- این روش در ژنراتورهای کوچک بکار می‌رود.
- اشکالات اکسایترهای با جاروبک:
 - چون جاروبکها سائیده می‌شوند، مرتباً باید تحت کنترل و نگهداری و تعییر قرار گیرند.
 - بعلت مقاومت جاروبکها بر روی آنها افت ولتاژ و تلفات توان ایجاد می‌شود.

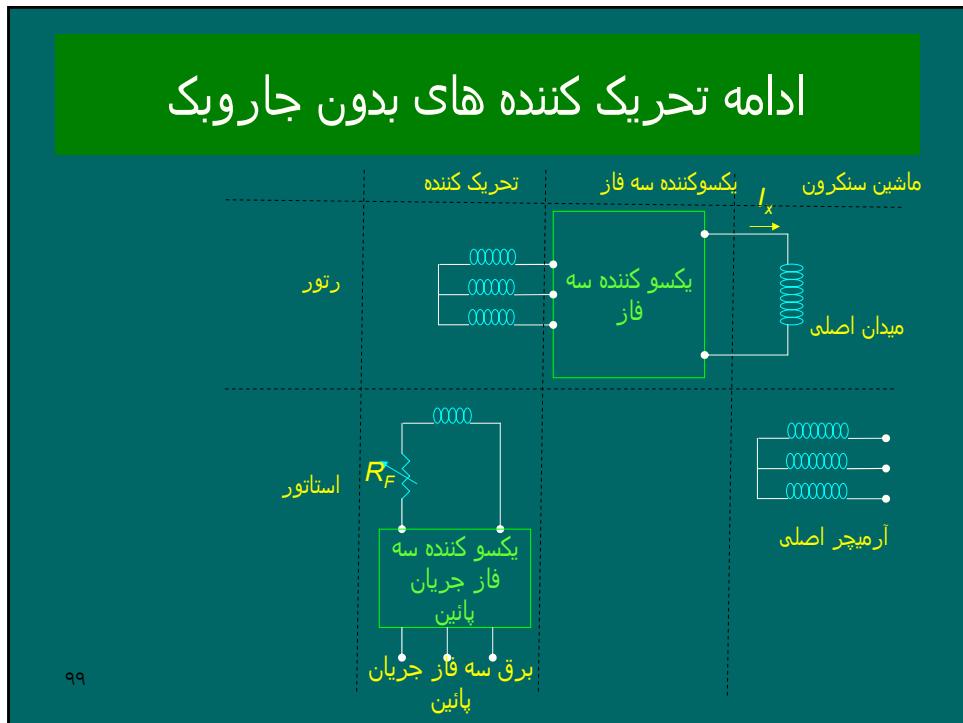
۹۷

تحریک کننده های بدون جاروبک

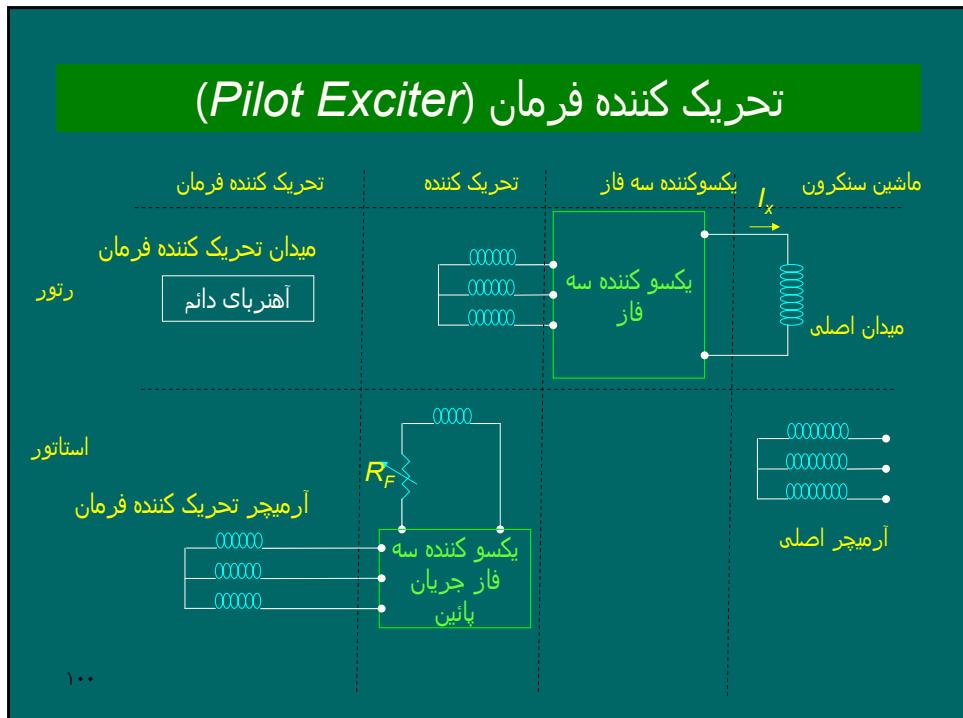
- اکسایتر بدون جاروبک یک ژنراتور سنکرون کوچک است که تحریک آن بر روی استاتور و آرمیجر آن بر روی رتور نصب می‌شود. آرمیجر یک ولتاژ سه فاز تولید می‌کند که توسط یک مدار یکسوکننده سه فاز که بر روی رتور است، یکسو می‌شود و سپس مدار تحریک (میدان) اصلی ژنراتور سنکرون اصلی را تغذیه می‌کند.
- با کنترل کردن جریان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

۹۸

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 آرمیجر 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.

۱۰۱

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:
 - آزمایش مدار باز (O.C.C.).
 - آزمایش اتصال کوتاه (S.C.C.)

۱۰۲

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 (I_x)، 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.

۱۰

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 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.

۱۰۴

تعیین راکتانس سنکرون از روی منحنی های OCC و SCC

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

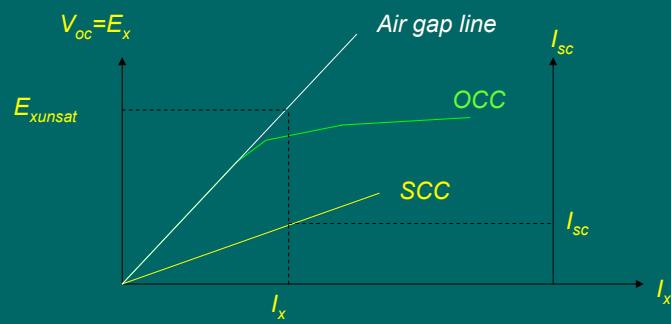
۱۰۵

تعیین راکتانس سنکرون غیراشباع

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

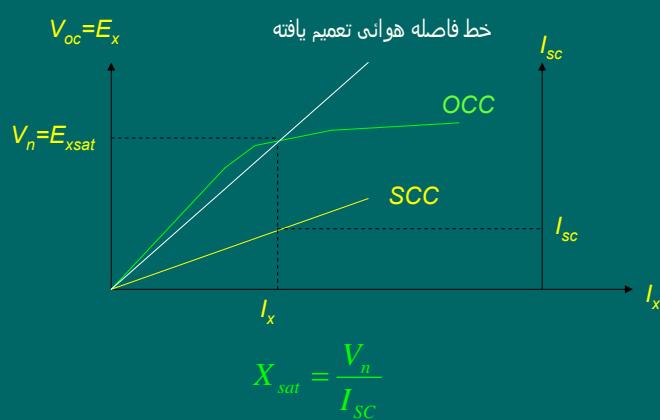
۱۰۶

شکل برای تعیین راکتانس سنکرون غیر اشباع



۱۰۷

تعیین راکتانس سنکرون اشباع در ولتاژ نامی



۱۰۸

تعریف نسبت اتصال کوتاه (SCR)

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

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

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

۱۰۹

مثال

برای یک ماشین سنکرون $220V$, $45KVA$, $45Hz$ و 6 قطب با اتصال ستاره اطلاعات زیر از مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه بدست آمده است.

از مشخصه مدار باز:

در جریان تحریک $2.84A$, ولتاژ خط به خط ترمینال 220 ولت است.

از خط فاصله هوائی:

در جریان تحریک $2.20A$, ولتاژ خط به خط ترمینال 202 ولت است.

از مشخصه اتصال کوتاه:

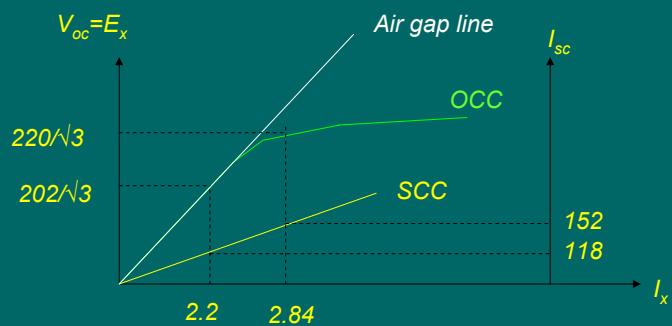
در جریان تحریک $2.20A$, جریان اتصال کوتاه 118 آمپر است و

در جریان تحریک $2.84A$, جریان اتصال کوتاه 102 آمپر است.

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

حل:

ادامه حل مثال:



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

دامه حل مثال:

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

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

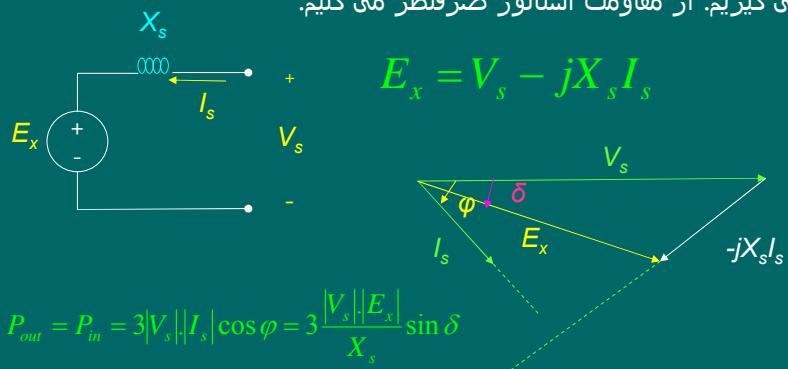
$$SCR = \frac{1}{X_{satPu}} = \frac{1}{0.777} = 1.29$$

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

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

اثر تغییر جریان تحریک بر روی یک موتور سنکرون

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

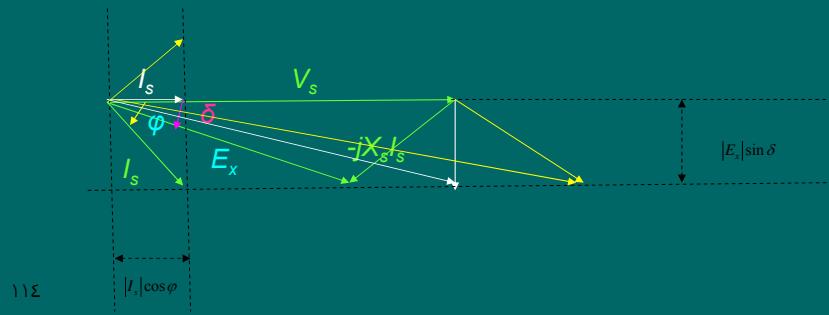


۱۱

ادامه اثر تغییر جریان تحریک

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

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



مثال ۲-۶

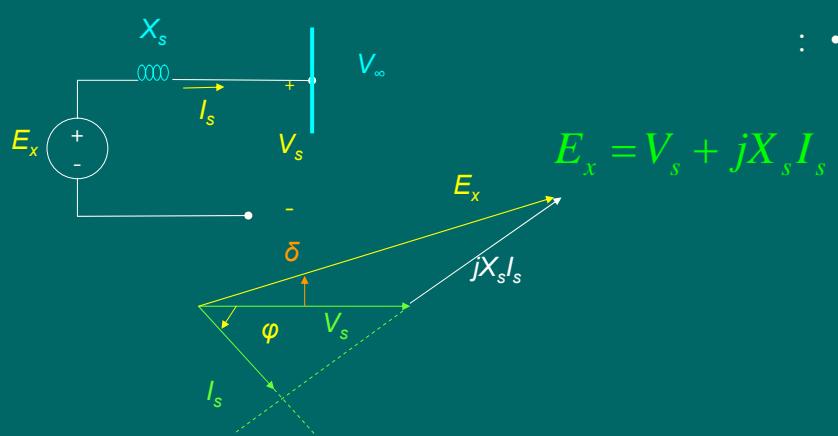
- یک ژنراتور سنکرون سه فاز چهار قطبی ۵ کیلوولت آمپر، ۶۰ ولت، ۶۰ هرتز با اتصال ستاره، به یک بس بی نهایت با ولتاژ و فرکانس نامی متصل است. مقاومت استاتور و راکتانس سنکرون ماشین عبارتند از:

$$X_s = 0.8 \Omega/\text{phase} \quad r_s = 0$$

- الف) اگر ماشین توان نامی خود را در ضریب قدرت ۰.۸ پس فاز به بس بی نهایت تحويل 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 را کمیو زنراتور را باید.

۱۱۵

حل مثال:



۱۱۶

حل مثال:

الف: •

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

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

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

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

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

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

)V

ادامه حل مثال:

ب: •

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

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

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

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

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

$$E_x = V_s + jX_s I_s$$

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

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

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

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

)A