

بسم الله الرحمن الرحيم



ماشین های الکتریکی ۲

محمدرضا مرادیان

- مقدمه
- اجزای تشکیل دهنده
- روابط حاکم بر رفتار
- مدلسازی (مدار معادل الکتریکی)
- آزمایش های ترانس (یافتن پارامترهای مدار معادل الکتریکی ترانس)
- بازده ترانس
- ضریب تنظیم ولتاژ

فصل دوم: آشنایی اجمالی با ترانسفورماتور سه فاز

فصل سوم: ماشین های آسنکرون (القایی) سه فاز

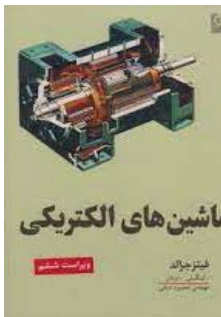
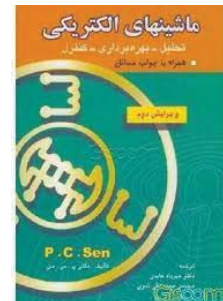
- مقدمه (آشنایی با انواع میدان)
- اجزای تشکیل دهنده ماشین و شرح وظایف آنها
- ساختارهای مختلف اجزا
- اصول عملکرد و حالت های کاری ماشین
- روابط حاکم بر رفتار و اصول تولید گشتاور
- مشخصه گشتاور-سرعت و کنترل ماشین

منابع و مراجع:

۱- تحلیل، بهره برداری و کنترل ماشین های الکتریکی

تالیف پ س سن

ترجمه دکتر مهرداد عابدی



۲- ماشین های الکتریکی

تالیف فیتز جرالد

ترجمه دیانی

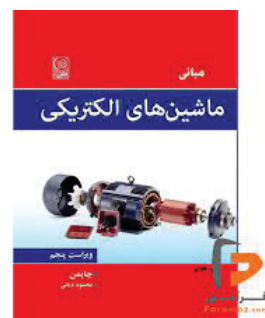
۳- دوره دو جلدی کتاب ماشین های الکتریکی

تالیف بیم بهارا

ترجمه دکتر سلطانی و دکتر لسانی



۴- مبانی ماشین های الکتریکی
تالیف چاپمن
ترجمه دیانی



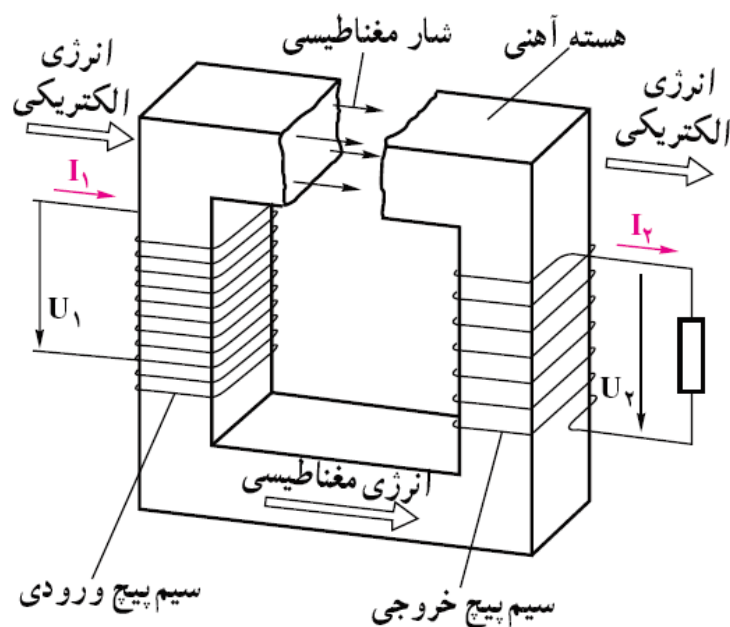
ارزشیابی درس شامل:

- ۱- میان ترم با ارزش ۶ نمره در تاریخ
- ۲- پایان ترم با ارزش ۱۴ نمره
- ۳- تمرین و فعالیت کلاسی با ارزش ۱ نمره مازاد بر ۲۰

فصل اول: ترانسفورماتور

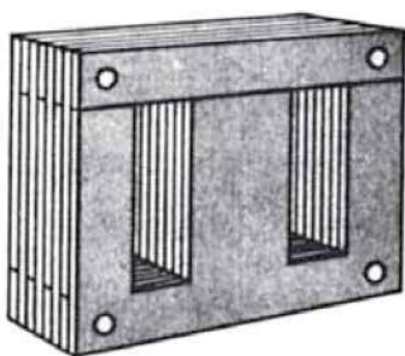


ساختار کلی ترانسفورماتور

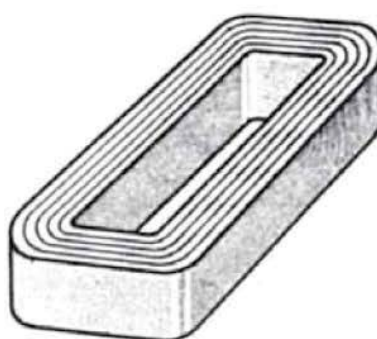


7

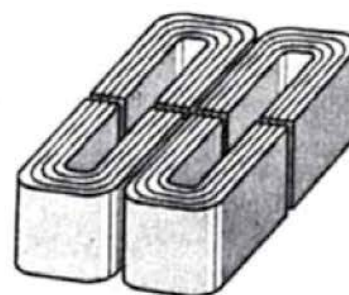
انواع هسته ترانسفورماتور



شکافدار



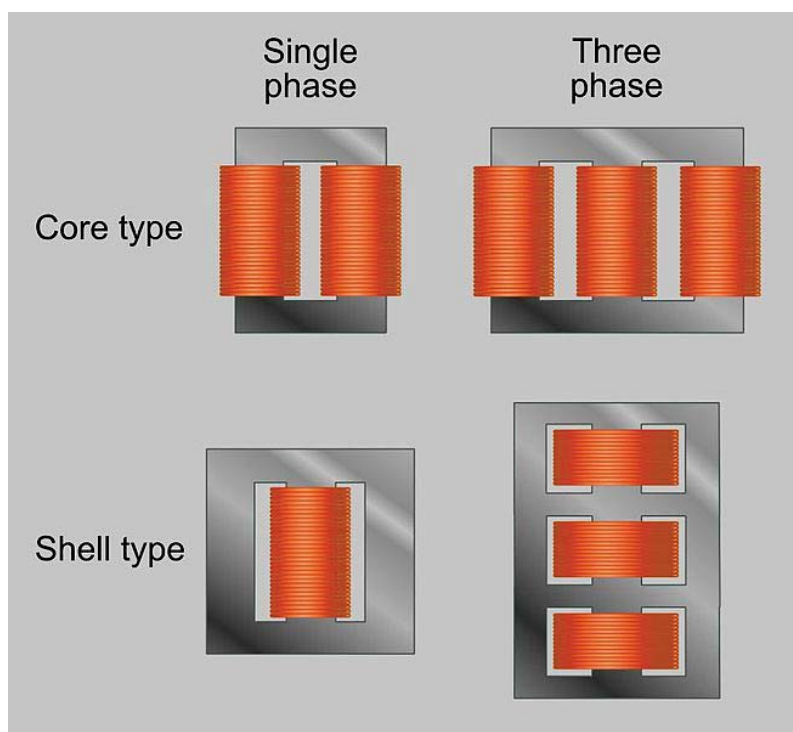
نواری



نواری برش خورده

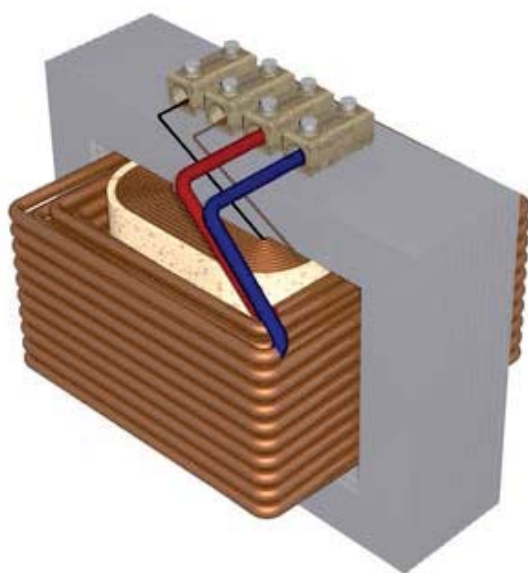
8

انواع ترانسفورماتور



9

شکل واقعی و شماتیک ترانسفورماتور تکفاز



10

کاربردهای ترانسفورماتور

۱- تبدیل ولتاژ یا جریان (مثل ترانسفورماتورهای قدرت)

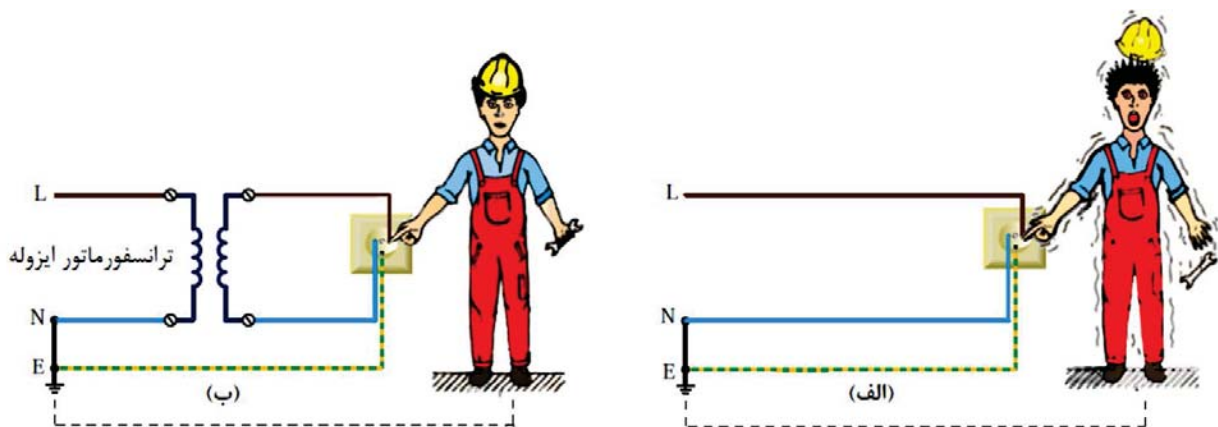
۲- اندازه گیری ولتاژ یا جریان (تجهیزات مورد استفاده در پست)

۳- تطبیق امپدانس (نمایش امپدانس به صورت غیر واقعی از دیدگاه سیستم دیگر)

۴- ایزولاسیون الکتریکی (تبادل انرژی بدون تماس الکتریکی)

11

ایزولاسیون و ایمنی



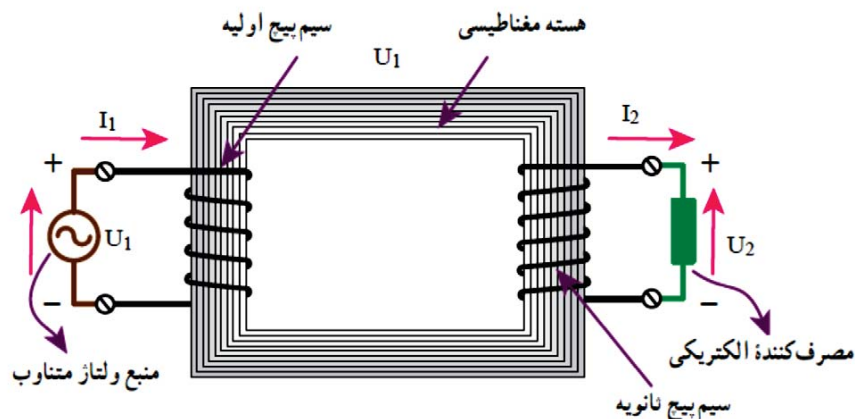
12

ترانس ایدیه آل

ترانسفورماتور / تلفاز ایده آل :

اجزاء :

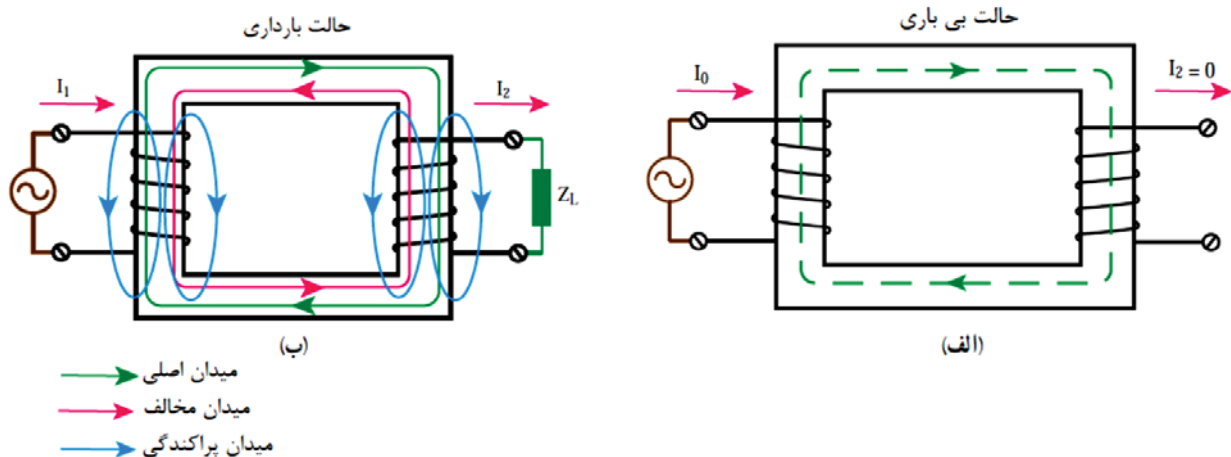
- سیم پیچ اولیه (درگاه ورود انرژی)
- هسته مغناطیسی
- سیم پیچ ثانویه (درگاه خروج انرژی)



13

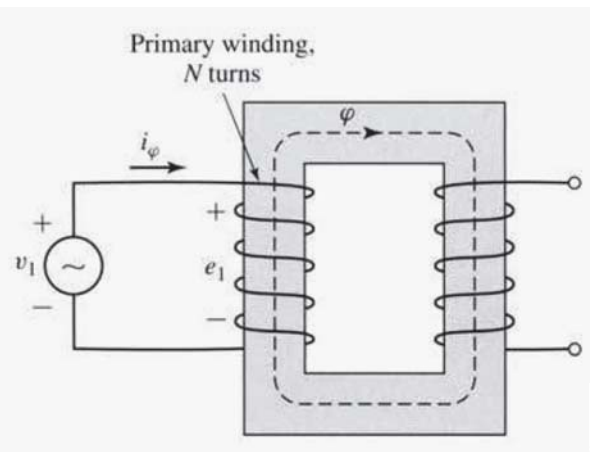
مفهوم بار در ترانس

- بار در ترانس به معنای جریان ثانویه است. بنابراین افزایش بار با کاهش امپدانس مصرف کننده و کاهش آن با افزایش امپدانس مصرف کننده محقق می گردد.



14

ترانس ایدیه آل در حالت بی باری



$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\phi = \phi_{\max} \sin \omega t$$

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = \omega N_1 \phi_{\max} \cos \omega t$$

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_{\max} = \sqrt{2} \pi f N_1 \phi_{\max}$$

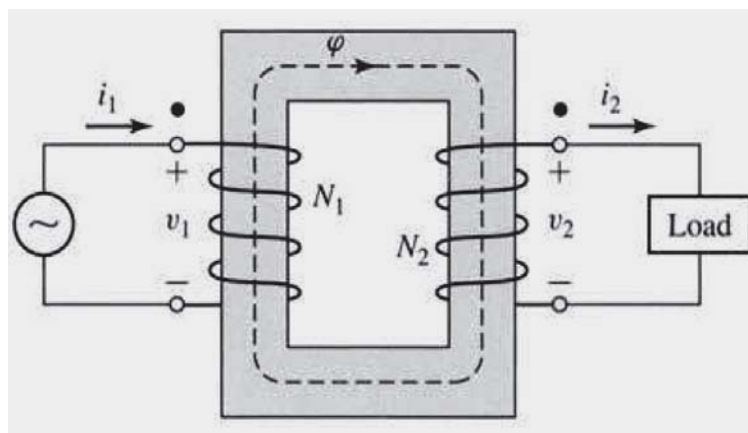
λ_1 = flux linkage of the primary winding

ϕ = flux in the core linking both windings

N_1 = number of turns in the primary winding

15

ترانس ایدیه آل در حالت بار داری



$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

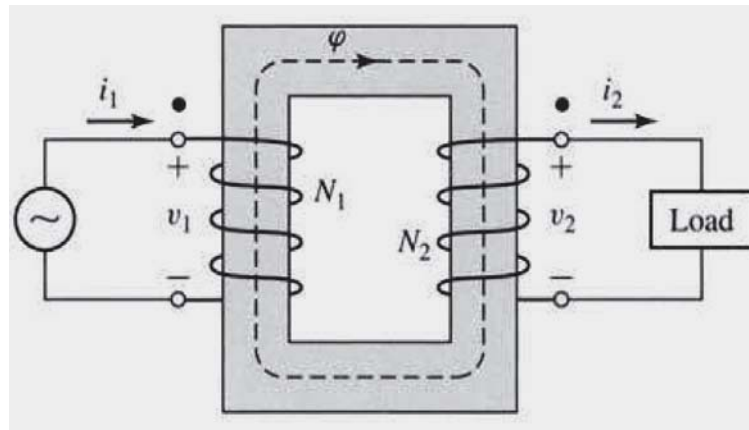


$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

در ترانسفورماتور ایده آل نسبت ولتاژ سیم پیچ ها با نسبت تعداد حلقه های آنها برابر است.

16

ترانس ایدیه آل در حالت بارداری



$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0$$

$$\Rightarrow N_1 i_1 = N_2 i_2$$

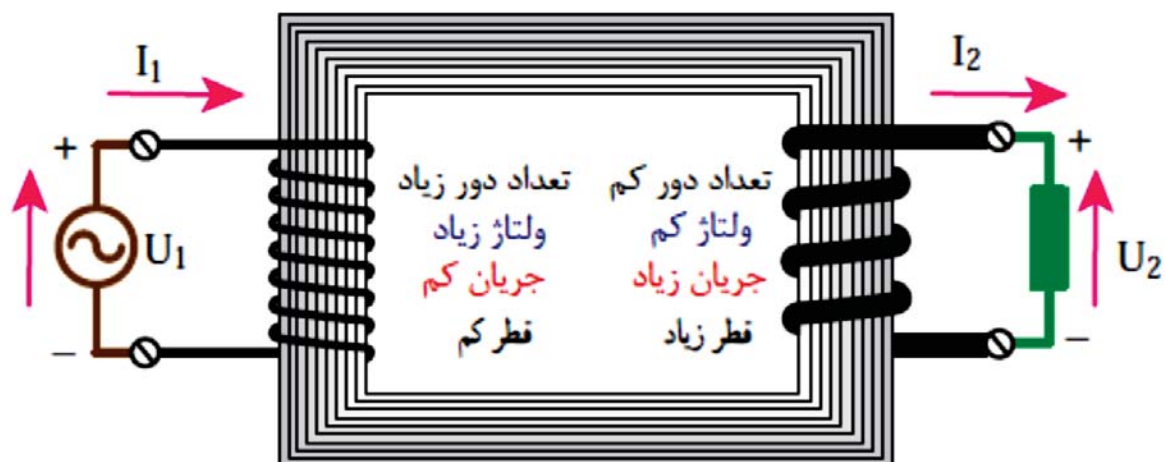
$$\Rightarrow \frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

در ترانسفورماتور ایده آل نسبت تعداد حلقه های سیم پیچ با عکس نسبت جریان عبوری از آنها برابر است.

در ترانسفورماتور ایده آل نسبت ولتاژ سیم پیچ ها با عکس نسبت جریان عبوری از آنها برابر است.

17

ساختار ترانس

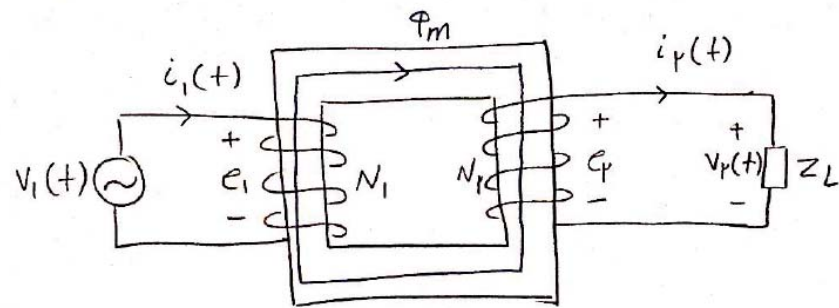


$$\Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

توان ظاهری ترانسفورماتور ایده آل در دو طرف اولیه و ثانویه بدون تغییر می باشد.

18

تحلیل ترانس ایده آل باردار



$$V_1(t) \Rightarrow i_1(t) \Rightarrow N_1 i_1(t) \Rightarrow \Phi_m(t) \begin{cases} \text{حسّاسی} \\ e_1(t) \end{cases}$$

$$e_2(t) \Rightarrow i_2(t) \Rightarrow N_2 i_2(t) \begin{cases} \text{القای متقابل} \\ e_2(t) \end{cases}$$

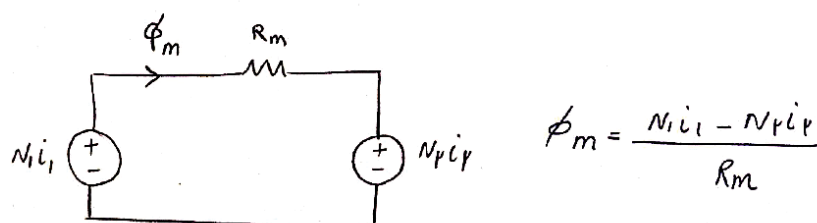
19

تحلیل ترانس ایده آل

امپدانسهای سیم پیچ:

$$N_1 i_1 \quad \text{امپدانس اولیه}$$

$$N_2 i_2 \quad \text{امپدانس ثانویه}$$



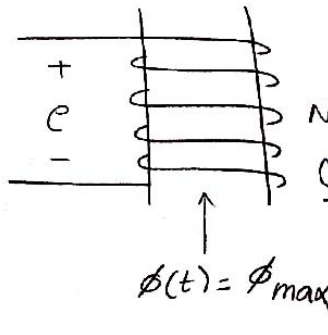
هستنی ایده آل $\rightarrow \mu \rightarrow \infty \Rightarrow R_m = \frac{L}{\mu A} = 0 \Rightarrow N_1 i_1 = N_2 i_2$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1}}$$

امپدانسهای سیم پیچ برابر هستند

20

ولتاژ القایی در اثر شار سینوسی



$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = N \omega \phi_{max} \sin(\omega t)$$

$$e_{rms} = \frac{e_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{N * 4.44 * f * \phi_{max}}{\sqrt{2}}$$

$$e_{rms} = 4.44 N f \phi_{max}$$

مقدار مؤثر ولتاژ القایی اولی: $e_1 = 4.44 N_1 f \phi_{max}$

مقدار مؤثر ولتاژ القایی ثانوی: $e_2 = 4.44 N_2 f \phi_{max}$

21

مثال



مثال: ترانس یک فاز به این رازای هسته‌ای با ابعاد $20 \times 20 \times 20$ cm در مدار آهن مفتاحی است. اگر تعداد حلقه‌های سیم پیچ اولی ۱۶۰۰ دور و ϕ_{max} چگالی شار هسته ۱۸ تسلا باشد ولتاژ تقریبی این ترانس در فرکانس ۵۰ هرتز چقدر خواهد بود؟

$A = 20 * 20 \text{ cm}$
 $\text{هستخونفتی} = 9\%$
 $N_1 = 1600$
 $B_m = 18 \text{ T}$

ترانس اولی: $V_1 = e_1 = 4.44 N_1 f \phi_{max}$
 $= 4.44 N_1 f A B_{max}$

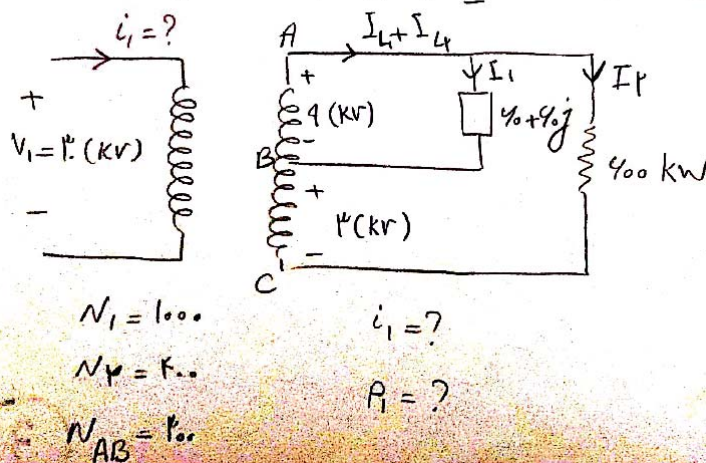
$A = 20 * 20 * 10^{-4} * 18 = 0.144 \text{ m}^2$
 $e_1 = V_1 = 4.44 * 1600 * 50 * 0.144 * 18$
 $e_1 = V_1 = 230 \text{ (volt)}$

$V = ?$
 $f = 50$

22

مثال

مثال: یک ترانس تک فاز ایده آل دارای هزار دور سیم پیچ در اولیه و ۴۰۰ دور سیم پیچ در ثانیه می باشد.
مطابق شکل با اهمی ۱۰۰ کیلو ولت بین سرهای A و C و بار سری با اهمی ۴۰٪ + ۴۰٪ j بین سرهای A و B
تغذیه شده است اگر قدرت دور سیم پیچ A و B برابر ۳۰۰ دور باشد و ولتاژ تغذیه اولیه ۳ کیلو ولت در نظر گرفته شود جریان و توان ورودی این ترانس را بدست آورید؟



(4)

23

حل مثال

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{V_{AC}}{3 \text{ kV}} = \frac{400}{1000} \Rightarrow V_{AC} = 12 \text{ (kV)}$$

$$\frac{V_{AB}}{V_{AC}} = \frac{N_{AB}}{N_{AC}} \Rightarrow \frac{V_{AB}}{12} = \frac{400}{400} \Rightarrow V_{AB} = 12 \text{ (kV)}$$

$$V_{BC} = 3 \text{ (kV)}$$

چون نسبت V_{AB} به V_{BC} برابر ۴ است

$$I_{L1} = \frac{V_{AB}}{Z_{L1}} = \frac{12000}{40 + j40} = \frac{12000}{\sqrt{2} \cdot 40} \angle -45^\circ$$

$$P = V_{AC} * I_{L2} \Rightarrow P = 12000 * I_{L2}$$

$$I_{L2} = \frac{400}{12} = 33.33 \text{ A}$$

24

حل مثال

اصل برای این درهای قدرت و معادله: این در مجرب = این در معادله

$$N_{Li} = N_{AB} (I_{L1} + I_{Lr}) + N_{BC} I_{Lr}$$

$$1000 I_1 = 100 * \left(\frac{150}{\sqrt{2}} \angle -45^\circ + 50 \right) + 100 * 50$$

$$I_1 = 48.1^{(A)} \angle -27.9^\circ$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \phi_1$$

$$\phi_1 = 0 - (-27.9) = 27.9^\circ$$

$$P_1 = 2.4^{kW} * 48.1 * \cos(27.9) \Rightarrow P_1 = 0 \text{ (kW)}$$

$$Q = V_1 I_1 \sin \phi_1 \text{ (var)}$$

$$S = V_1 I_1 \text{ (VA)}$$

25

مثال

➤ ترانسی با نسبت ولتاژ ۴۰/۴۴۰ ولت و تعداد دور سیم پیچ اولیه ۵۵۰ دور مفروض است هسته ترانس از جنسی است که حداکثر چگالی شار آن ۱.۲ تسلا می باشد. حداقل سطح مقطع این ترانس برای فرکانس ۵۰ و ۴۰۰ هرتز چقدر باید باشد؟

$$\phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1} = \frac{440}{(4.44)(50)(550)} = 3.6 \times 10^{-3} \text{ wb} \quad \checkmark \text{ برای فرکانس ۵۰}$$

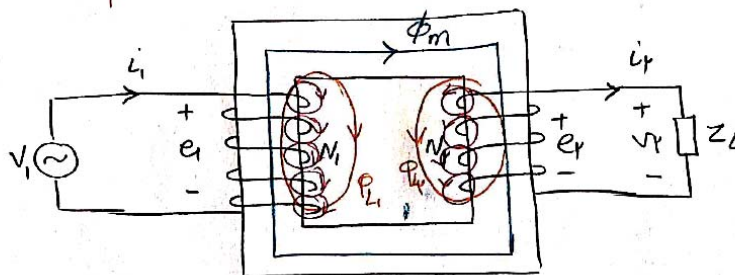
$$A_{\min} = \frac{\phi_m}{B_{\max}} = \frac{3.6 \times 10^{-3} \text{ wb}}{1.2 T} = 3 \times 10^{-3}$$

$$\phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1} = \frac{440}{(4.44)(400)(550)} = 0.45 \times 10^{-3} \text{ wb} \quad \checkmark \text{ برای فرکانس ۴۰۰}$$

$$A_{\min} = \frac{\phi_m}{B_{\max}} = \frac{0.45 \times 10^{-3} \text{ wb}}{1.2 T} = 0.375 \times 10^{-3}$$

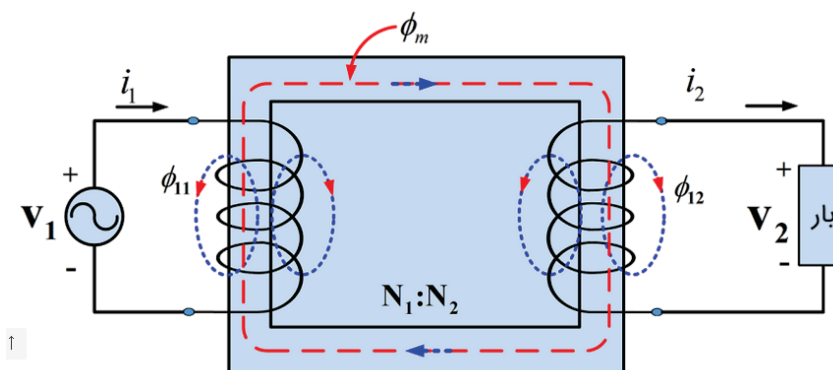
26

تراش و افش :

$$\text{میانگین واقعی} = \text{میانگین ایدئال} + \sqrt{\text{فاکتورهای غیر ایدئال}}$$


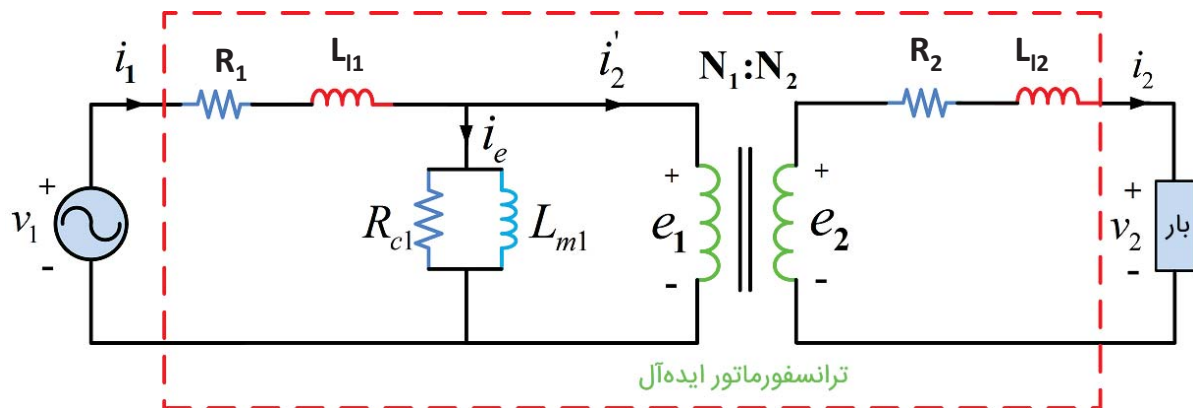
$$\text{در اینس واقع} : \begin{cases} v \neq e \\ v \simeq e \end{cases}$$

2004



- **سوی جریان در سیم پیچ ثانویه**
- **تأثیرات جاری شدن جریان در ثانویه**
 - داغ شدن سیم پیچ ثانویه
 - آمپر دور مخالف شار مغناطیس کننده
 - شار پراکندگی سیم پیچ ثانویه

مدار معادل ترانس واقعی در حوزه زمان



i_e : جریان تحریک

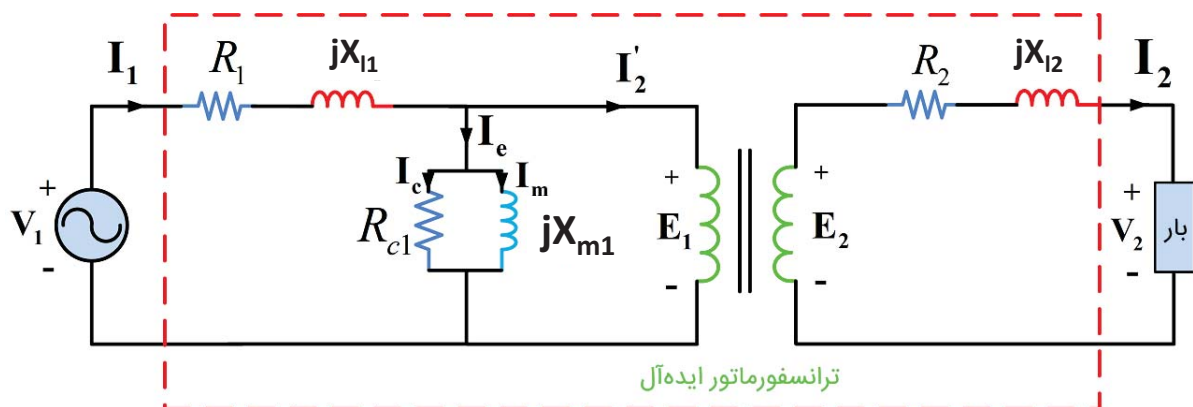
$i_e = i_m + i_c$
جریان تلفات ساز
جریان مغناطیس هسته

$$N_1 i_2' = N_2 i_2$$

$$i_2' = \frac{N_2 i_2}{N_1}$$

29

مدار معادل الکتریکی ترانسفورماتور واقعی در حالت دائمی سینوسی



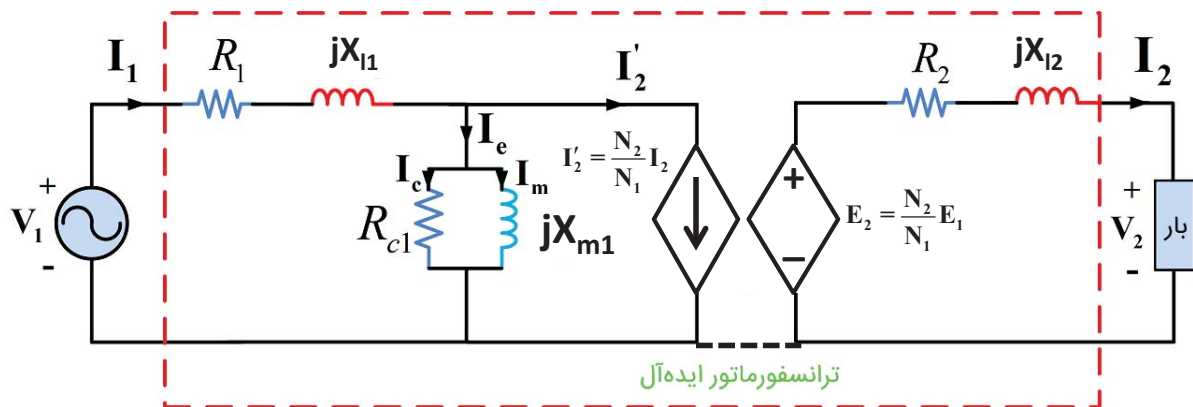
$$\frac{\hat{E}_1}{\hat{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

V_1 ولتاژ اولیه
 V_2 ولتاژ ثانویه
 I_1 جریان اولیه
 I_2 جریان ثانویه

R_1 مقاومت سیم پیچی اولیه
 R_2 مقاومت سیم پیچی ثانویه
 R_c مقاومت مدل تلفات هسته
 X_{11} مدل شار نشتی سیم پیچی اولیه
 X_{12} مدل شار نشتی سیم پیچی ثانویه
 X_m مدل شار مغناطیس کنندگی هسته

30

مدار معادل الکتریکی ترانس باردار به کمک منابع وابسته



31

مدار معادل الکتریکی خالص

• هیچ یک از مدارهای معادل اخیر برای ترانس واقعی، مدارهای مناسبی نیستند چرا که یا دارای المان مغناطیسی (ترانس ایده آل) و یا منابع وابسته هستند. به کمک قوانین ارجاع، می توان اقدام به حذف این المانهای نامتعارف نموده و به یک مدار معادل خالص الکتریکی رسید.

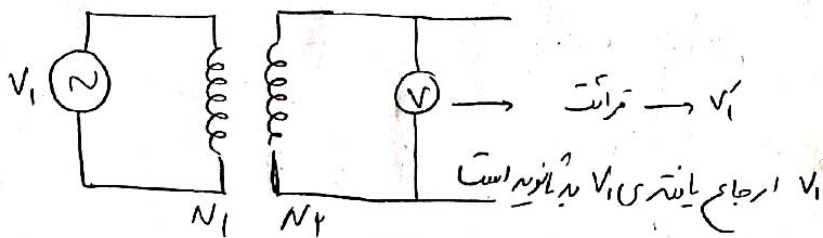
• قوانین ارجاع کمیت ها در ترانس ایده آل

- قانون ارجاع ولتاژ
- قانون ارجاع شدت جریان
- قانون ارجاع امپدانس

32

قانون ارجاع ولتاژ

بسیار مهم



(۱) ارجاع ولتاژ:

$$\frac{V_1'}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow V_1' = \frac{N_2}{N_1} V_1$$

ارجاع ولتاژ:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1) \frac{N_1}{N_2} V_2 = V_2' \\ 2) \frac{N_2}{N_1} e_1 = e_1' \end{array} \right.$$

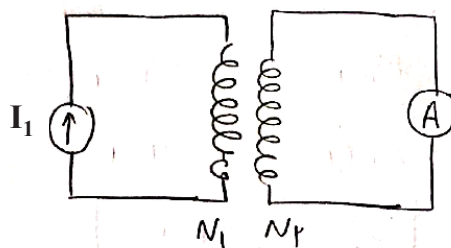
نسبت تبدیل ارجاع = $\frac{\text{تعداد دورسیم پیچ مقصد}}{\text{تعداد دورسیم پیچ مبدأ}}$

* برای ارجاع ولتاژ باید نسبت تبدیل ارجاع در یکت ولتاژ ضرب شود *

33

قانون ارجاع شدت جریان

(۲) ارجاع شدت جریان:



شدت I_1'

* ارجاع یافته‌ی جریان I_1 به I_1' عکس تبدیل ارجاع را ضرب می‌کنیم *

$$\frac{I_1'}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow I_1' = \frac{N_1}{N_2} I_1$$

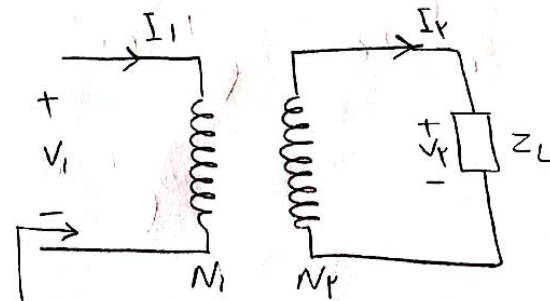
* برای ارجاع شدت جریان باید عکس نسبت تبدیل ارجاع در شدت جریان ضرب شود *

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

34

قانون ارجاع امپدانس

۳) ارجاع امپدانس :



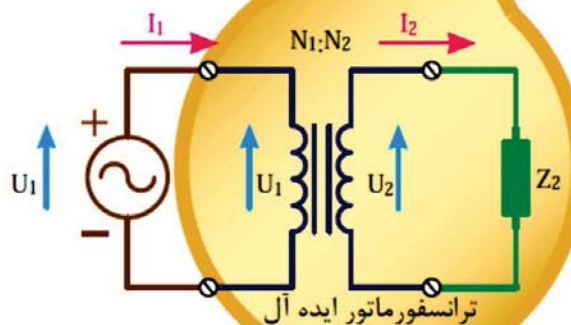
$$\left. \begin{aligned} Z_r &= \frac{V_r}{I_r} \\ Z_r' &= \frac{V_1}{I_1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{Z_r'}{Z_r} = \left(\frac{V_1}{V_r} \right) * \left(\frac{I_r}{I_1} \right) \Rightarrow Z_r' = \left(\frac{N_1}{N_r} \right)^2 Z_r$$

جاری ارجاع امپدانس باید به نسبت تبدیل ارجاع ریختی امپدانس هدرب اسود *

35

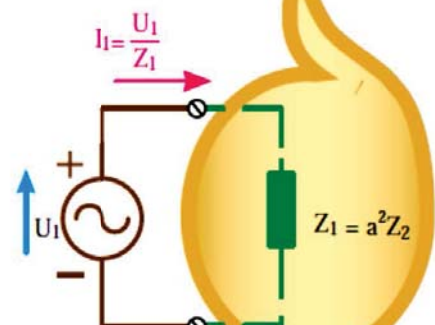
ارجاع امپدانس

از دیدگاه منبع تغذیه
این دو بخش متناظر
با یکدیگر می باشند.



ترانسفورماتور ایده آل

بار واقعی



بار منتقل شده به طرف اولیه

36

ارجاع امپدانس، اندوکتانس و کاپاسیتانس

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2$$

$$R'_1 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 R_1$$

تذکره:

مانند ارجاع امپدانس را می‌توان برای ارجاع سلفا (اندوکتانس) نیز استفاده کنیم.

$$X = L\omega$$

$$* \begin{cases} L'_{L_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 L_{L_1} \\ L'_{L_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{L_2} \end{cases}$$

37

ارجاع امپدانس، اندوکتانس و کاپاسیتانس

تذکره:

در ارجاع ظرفیت خازن (C) لازم است عکس مجزور نسبت تبدیل ارجاع را در ظرفیت فاراد F

خازن ضرب نمی‌کنیم.

$$C'_L = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 C_L$$



$$X_C = \frac{1}{C\omega}$$

38

مدارهای معادل ارجاع یافته ترانس

- بطور کلی برای هر ترانس دو مدار معادل ارجاع یافته قابل ترسیم است:

– مدار معادل ارجاع یافته به اولیه (مدار معادل از دید اولیه)
همه پارامترهای مدار ثانویه را به سیم پیچ اولیه ارجاع می دهیم.

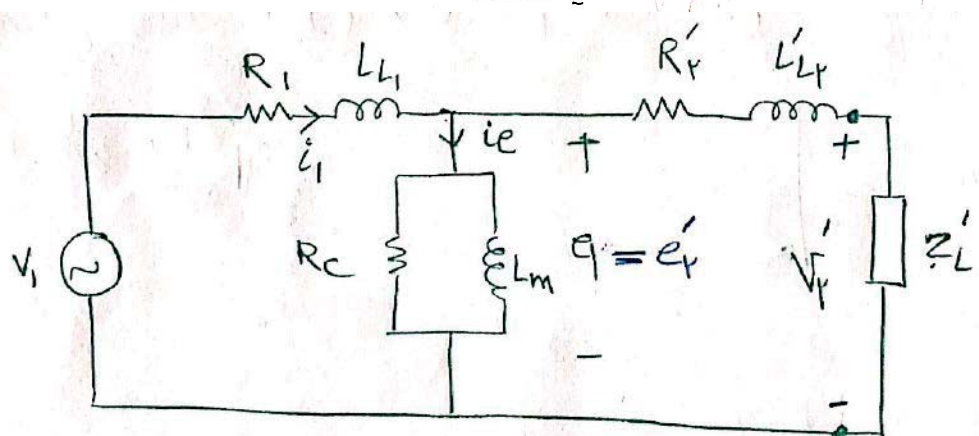
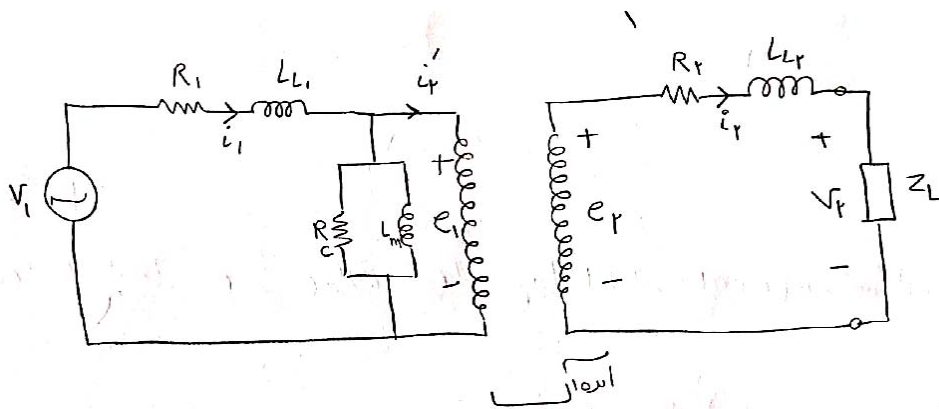
– مدار معادل ارجاع یافته به ثانویه (مدار معادل از دید ثانویه)
همه پارامترهای مدار اولیه را به سیم پیچ ثانویه ارجاع می دهیم.

خیلی مهم سوال

امتحان ترم پیش

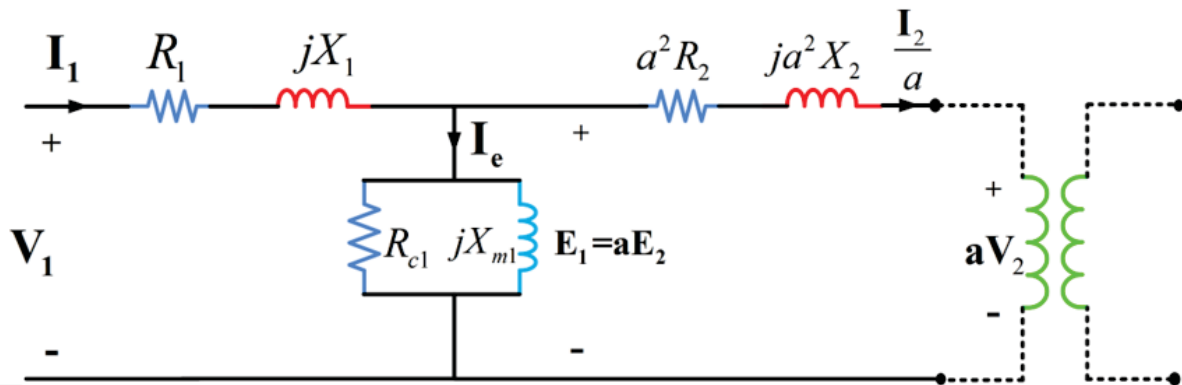
39

مدار معادل ارجاع یافته به اولیه در حوزه زمان



40

مدار معادل ترانس از دید اولیه (در حالت دائمی سینوسی)



$$V_2' = \frac{N_1}{N_2} V_2$$

$$R_2' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2$$

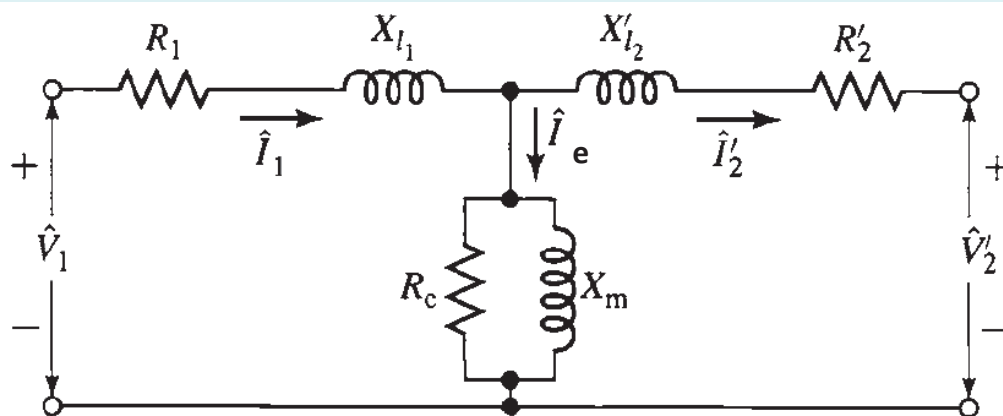
$$X_m = 2\pi f L_m$$

$$\hat{I}_2' = \frac{N_2}{N_1} \hat{I}_2$$

$$X_{l_2}' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 X_{l_2}$$

41

روابط حاکم بر مدار معادل از دید اولیه



$$E_1 = E_1' = V_1' + (R_1' + jX_{l_1}') I_1'$$

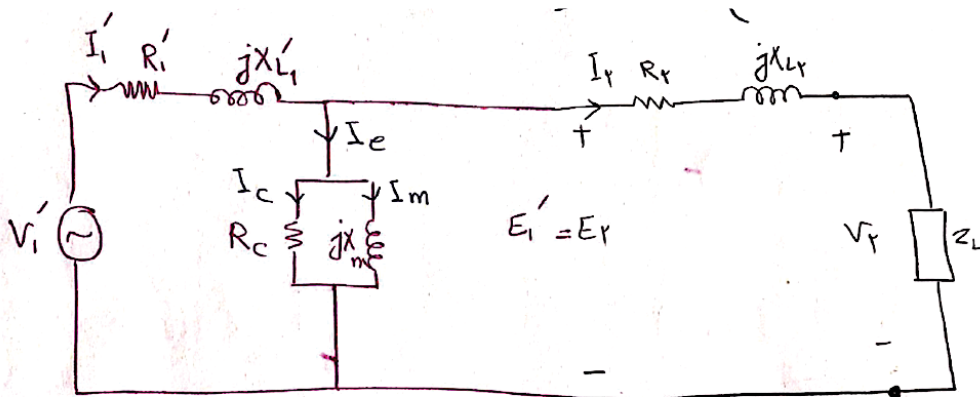
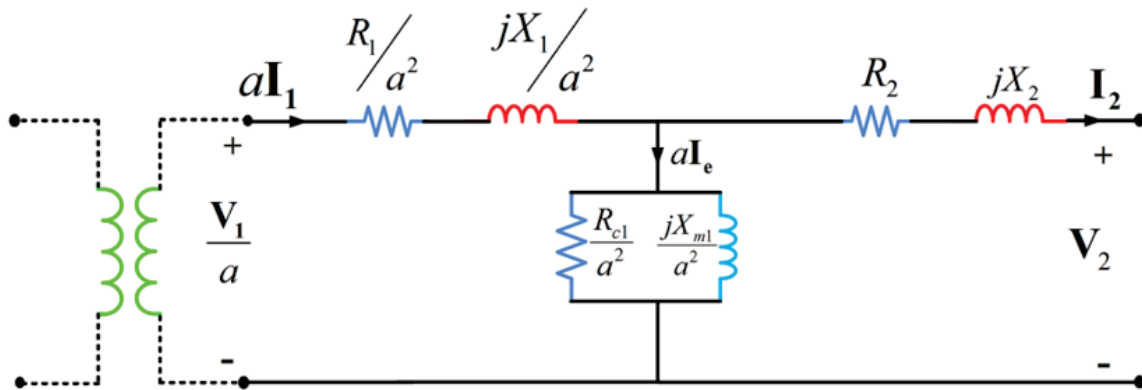
$$I_c = \frac{E_1}{R_c} \Rightarrow I_m = \frac{E_1}{jX_m} \Rightarrow I_e = I_c + I_m$$

$$I_1 = I_e + I_1'$$

$$V_1 = E_1 + (R_1 + jX_{l_1}) I_1$$

42

مدار معادل ارجاع یافته به ثانویه در حوزه فازور

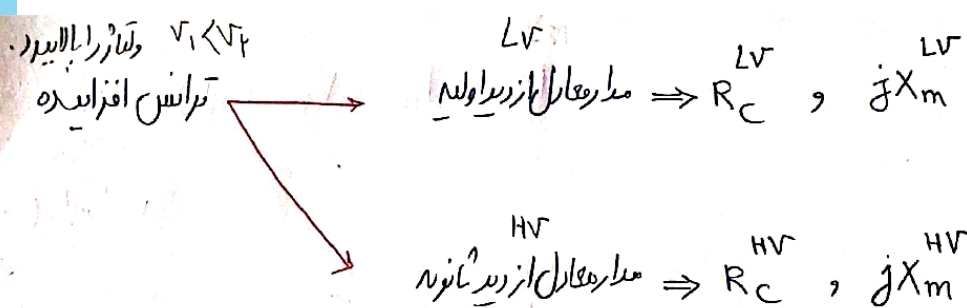


$$\begin{aligned} R_1' &= \left(\frac{N_2}{N_1}\right) R_1 \\ X_{L1}' &= \left(\frac{N_2}{N_1}\right) X_{L1} \\ V_1' &= \frac{N_2}{N_1} V_1 \\ I_1' &= \frac{N_1}{N_2} I_1 \end{aligned}$$

43

نماد پارامترهای هسته در ارجاع

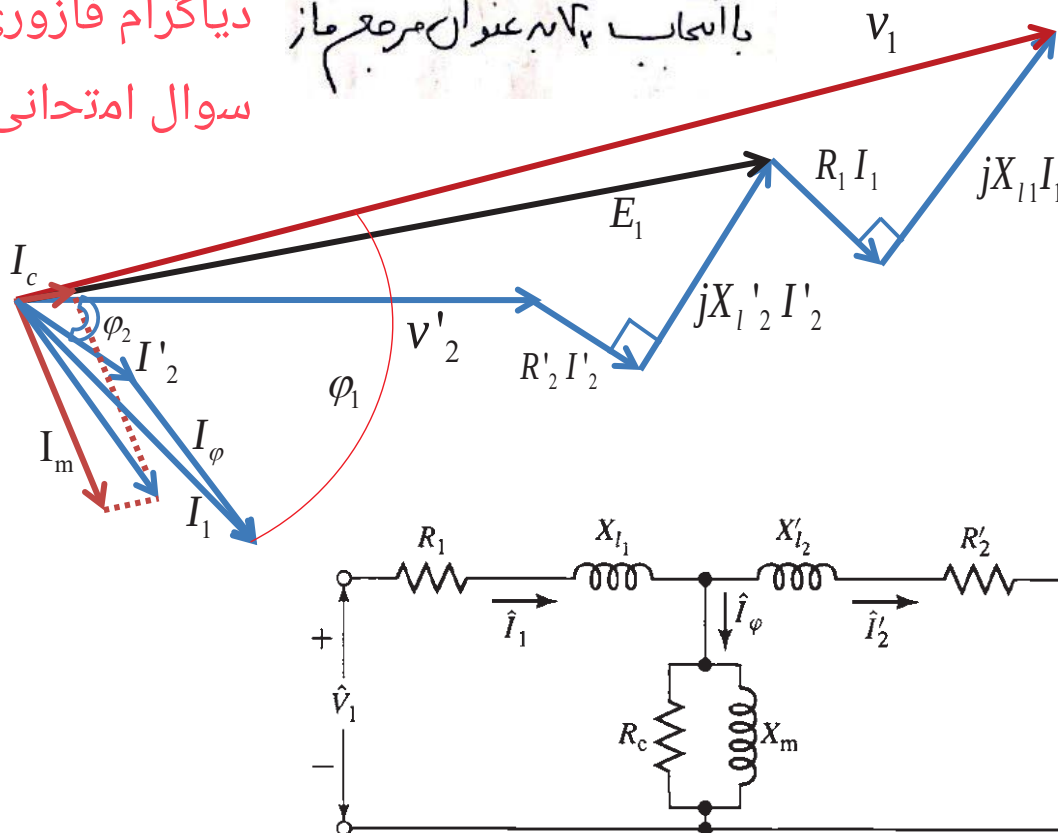
از آنجایی که هسته ترانس متعلق به یک سیستم سیم اولیه و ثانویه است نمی توان از نماد (ـ) برای ارجاع پارامترهای هسته استفاده نمود و پس برای آنکه مشخص شود که مقادیر مدتها با هسته در سیستم سیم اولیه و ثانویه متفاوت هستند می توان برای R_c و X_m که در سیستم سیم سار ضعیف ظاهر می شود از بالا نویسی (Low voltage) و برای حالتی که در سیم سار قوی ظاهر می شود از بالا نویسی (High voltage) استفاده نماییم.



44

دیگرام فازوری ترانس (مدل کامل و باریس فاز)

بانتخاب ۲ کتاب به عنوان مرجع فارسی
دیگرام فازوری
سوال امتحانی



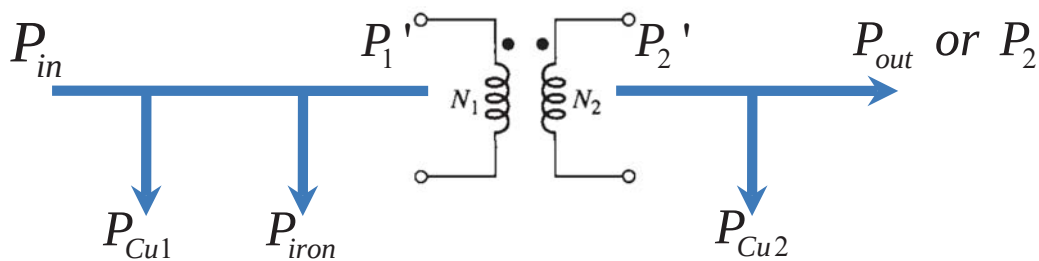
زوایای قدرت ورودی و خروجی ترانس

تفاضل الزوئی بار عین من کسور زاویه اس $\rightarrow \angle I_2' - \angle v_2' = \Phi_2$ زاویه قدرت مغناطیسی (بار)

تفاضل الزوئی بار مغناطیسی عین من کسور زاویه اس $\rightarrow \angle I_1 - \angle v_1 = \Phi_1$ زاویه قدرت مغناطیسی (بار)

$$\varphi_1 > \varphi_2 \quad \text{Cos}(\varphi_1) < \text{Cos}(\varphi_2)$$

دیاگرام توزیع توان اکتیو



$$P_{in} = v_1 i_1 \cos(\varphi_1)$$

$$P_2' = e_2 i_2 \cos(\varphi_2')$$

$$P_{Cu1} = R_1 i_1^2$$

$$P_{Cu2} = R_2 i_2^2$$

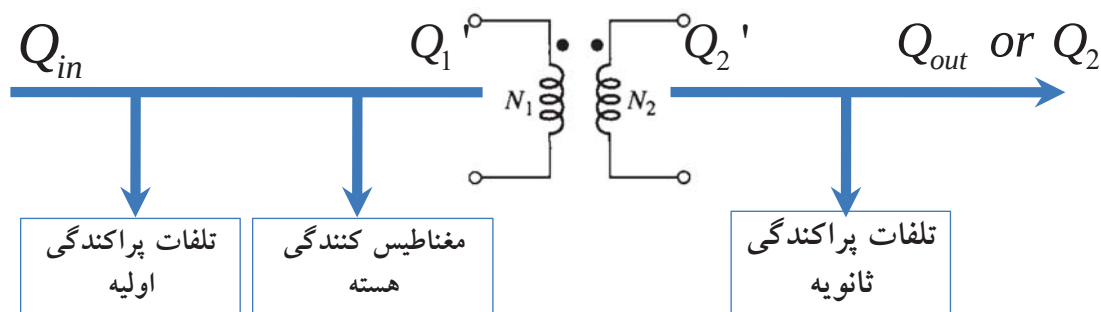
$$P_{iron} = R_c i_c^2 = \frac{e_1^2}{R_c}$$

$$P_1' = e_1 i_2' \cos(\varphi_1')$$

$$P_2 = v_2 i_2 \cos(\varphi_2)$$

47

دیاگرام توزیع توان راکتیو



$$Q_{in} = v_1 i_1 \sin(\varphi_1)$$

$$Q_2' = e_2 i_2 \sin(\varphi_2')$$

$$Q_1' = e_1 i_2' \sin(\varphi_1')$$

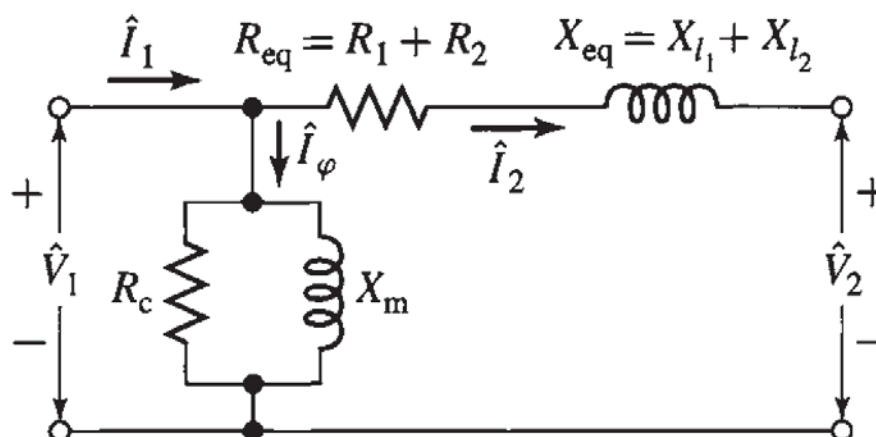
$$Q_2 = v_2 i_2 \sin(\varphi_2)$$



48

مدار معادل های تقریبی ترانسفورماتور

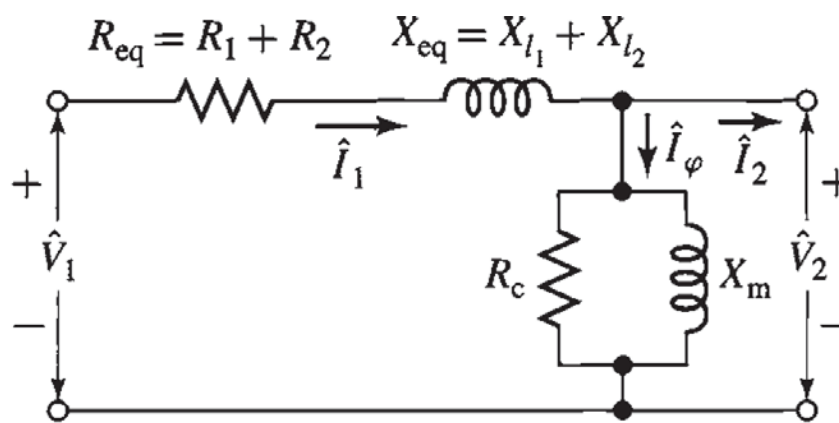
مدل صرف نظر از افت ولتاژ سیم پیچ اولیه هسته



49

مدار معادل های تقریبی ترانسفورماتور

مدل تغذیه ترانس با ولتاژ خروجی

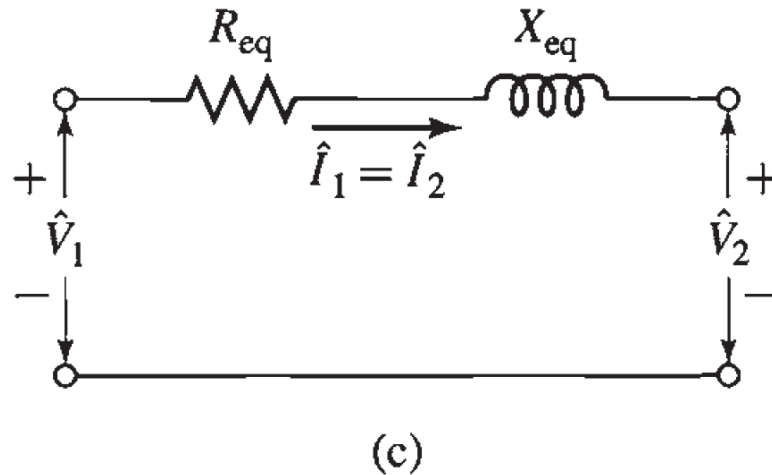


(b)

50

مدار معادل های تقریبی ترانسفورماتور

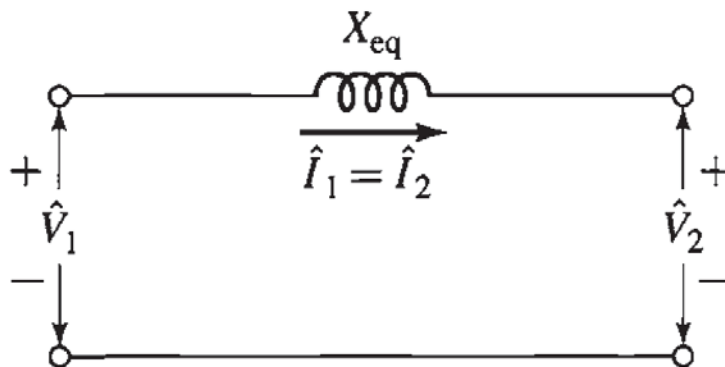
مدل صرفنظر از هسته



51

مدار معادل های تقریبی ترانسفورماتور

مدل راکتانسی ترانس



کدام مدل ؟



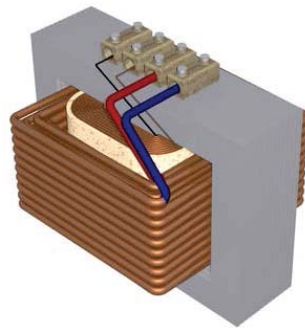
52

آزمایشهای ترانس

- ✓ برای بدست آوردن پارامترهای ترانس آزمایشهای زیر پیشنهاد می شود:
- ۱- آزمایش مدار باز (بی باری) (Open Circuit Test (OCT))
- ۲- آزمایش اتصال کوتاه (Short Circuit Test (SCT))

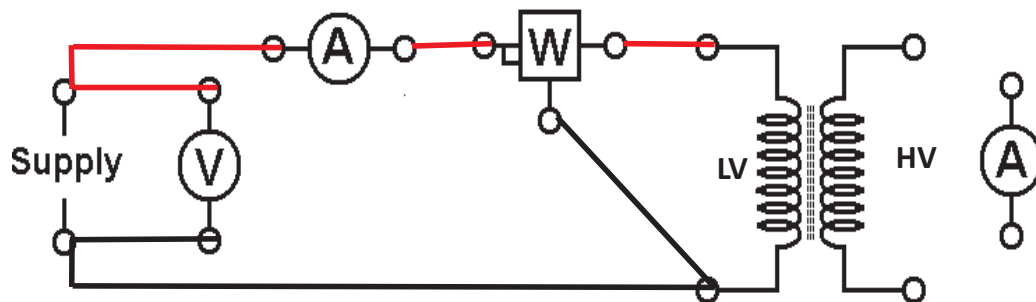
✓ تفاوت سیم پیچهای ترانس:

فشار ضعیف: تعداد دور آن کم است، ضخامت سیم پیچ زیاد می باشد.
فشارقوی: تعداد دور آن زیاد است، ضخامت سیم پیچ کم است.



53

آزمایش مدار باز ترانس



Supply = Rated Voltage

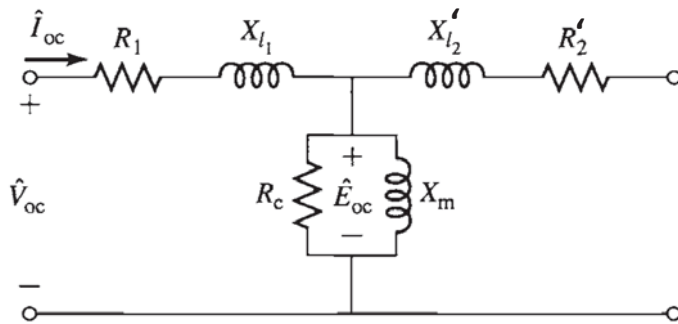
✓ منبع ولتاژ با ولتاژ نامی به سمت فشار ضعیف وصل شود و سمت فشار قوی مدار باز باشد.

✓ اندازه گیری مقادیر ولتاژ، جریان و توان. P_{oc} ، I_{oc} ، V_{oc}

✓ در این آزمایش توصیه می شود که ولتاژ تغذیه LV برابر مقدار نامی باشد تا عدد قرائت شده توسط واتمتر مبین تلفات نامی هسته ترانس باشد. (تلفات هسته با مجذور ولتاژ رابطه دارد.)

54

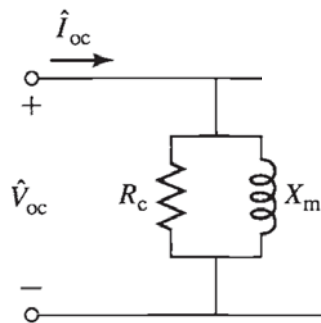
آزمایش مدار باز ترانس



(a)

$$Z_{oc} = R_1 + jX_{l1} + Z_{\varphi}$$

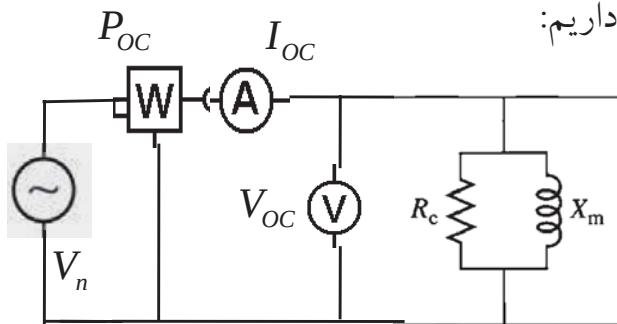
$$= R_1 + jX_{l1} + \frac{R_c (jX_m)}{R_c + jX_m}$$



55

آزمایش مدار باز ترانس

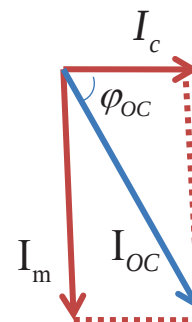
✓ اگر در این آزمایش از مقاومت اهمی و اندوکتانس پراکندگی سیم پیچ فشار ضعیف صرف نظر کنیم در این صورت داریم:



$$P_{oc} = V_{oc} I_{oc} \cos(\varphi_{oc})$$

$$\cos(\varphi_{oc}) = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}} \Rightarrow \varphi_{oc} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}}\right)$$

$$\begin{cases} I_c = I_{oc} \cos(\varphi_{oc}) \\ I_m = I_{oc} \sin(\varphi_{oc}) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_c = \frac{V_{oc}}{I_c} \\ X_m = \frac{V_{oc}}{I_m} \end{cases}$$



معتبر در LV

56

علل انجام OCT سمت LV

۱- ولتاژ نامی سمت LV کمتر بوده و این سادگی آزمایش به همراه ایمنی آنرا به همراه دارد.

۲- جریان نامی سمت LV بزرگتر بوده و لذا I_{oc} که معادل جریان تحریک ترانس می باشد و ۳ تا ۵ درصد جریان نامی است، مقدار قابل توجهی بوده که می توان با دقت مناسب اندازه گیری نمود.

۳- در صورت تشخیص اشتباه سیم پیچهای فشار قوی و فشار ضعیف اتصال ولتاژ نامی فشار ضعیف به سیم پیچ فشار قوی مشکلی نداشته در صورتیکه عکس این مورد موجب آسیب عایق بندی ترانس و سوختن آن خواهد شد.

سوال) آیا می توان آزمایش OCT را سمت HV ترتیب داد؟

57

چند نکته

• نکات آزمایش بی باری:

۱- عدد آمپر متر در این آزمایش معرف جریان نامی تحریک ترانس می باشد که هسته برای مغناطیس شدن کامل نیاز دارد و بطور نسبی در ترانس های مرغوب ۳ تا ۵ درصد جریان نامی ترانس است.

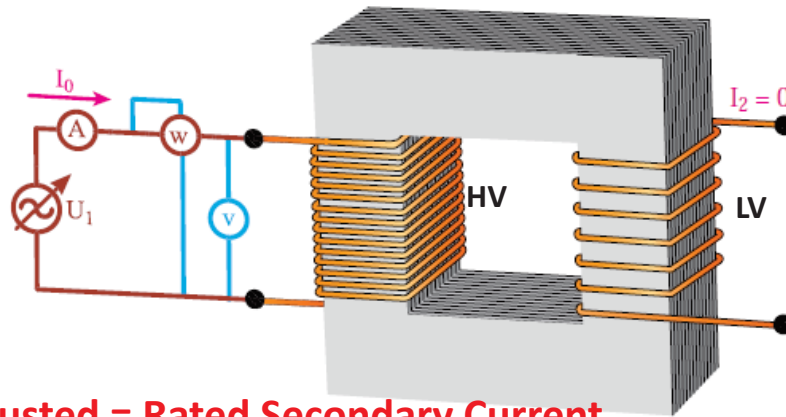
$$(I_e)_n = I_{oc}$$

۲- عدد وات متر در این آزمایش تلفات نامی هسته ترانس است و تا وقتی ولتاژ تغذیه ترانس نامی باشد، مستقل از آنکه بار چقدر است، مقدار تلفات هسته ثابت و برابر با عدد وات متر بی باری است.

$$(P_c)_n = P_{oc}$$

58

آزمایش اتصال کوتاه ترانس



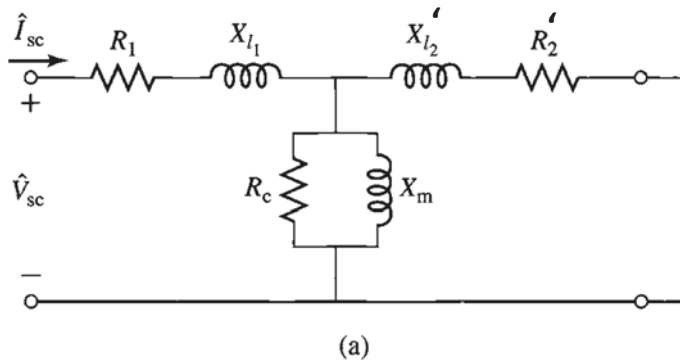
Supply Adjusted = Rated Secondary Current

- ✓ اتصال منبع ولتاژ قابل کنترل (با ولتاژ ابتدایی صفر) به سمت فشار قوی و اتصال کوتاه کردن سمت فشار ضعیف.
- ✓ افزایش ولتاژ منبع تا جاییکه جریان سمت فشار ضعیف برابر جریان نامی شود.
- ✓ اندازه گیری و ثبت مقادیر ولتاژ، جریان و توان $(P_{sc} - I_{sc} - V_{sc})$

59

آزمایش اتصال کوتاه ترانس

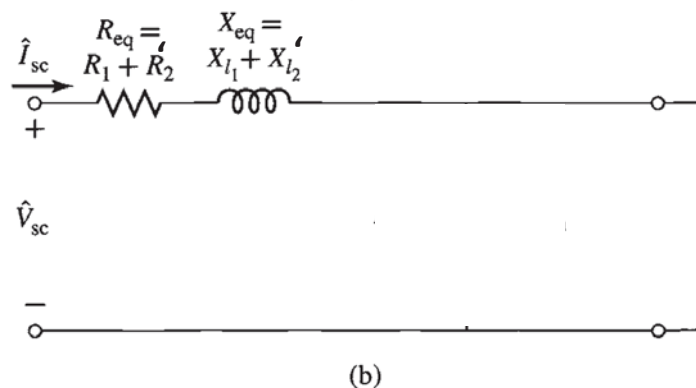
با فرض ترانس کاهنده



$$Z_{sc} = R_1 + jX_{l1} + \frac{Z_{\phi}(R_2' + jX_{l2}')}{Z_{\phi} + R_2' + jX_{l2}'}$$

$$Z_{sc} \approx R_1 + jX_{l1} + R_2' + jX_{l2}'$$

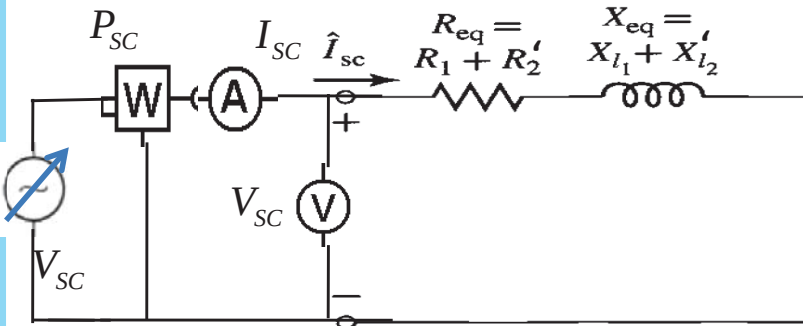
$$= R_{eq} + jX_{eq}$$



60

آزمایش اتصال کوتاه ترانس

✓ با توجه به اینکه مشخصات هسته نسبت به R'_2 , X'_{l2} بسیار بزرگتر هستند، می توان از شاخه هسته با تقریب خوب در برابر سیم پیچ ثانویه صرف نظر کرد.



$$P_{SC} = R_{eq} I_{SC}^2 \quad R_{eq} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2}$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = |R_{eq} + jX_{eq}| = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

چون جریان آزمایش
اتصال کوتاه نامی است،
مقدار عدد واتمتر در
این آزمایش برابر با
تلفات مس نامی ترانس
می باشد.

61

محاسبه اندوکتانس های X_{l1} , X'_{l2} به کمک X_{eq}

$$\begin{cases} L_{11} = \frac{N_1 \phi_{11}}{I_1} \\ L_{12} = \frac{N_2 \phi_{12}}{I_2} \end{cases} \Rightarrow \frac{L_{11}}{L_{12}} = \frac{N_1}{N_2} \frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

$$\Rightarrow L_{11} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{12} = L'_{12} \Rightarrow L_{11} = L'_{12}$$

$$\Rightarrow X_{11} = X'_{12} = \frac{X_{eq}}{2}$$

62

محاسبه مقاومتهای R_1 , R'_2 به کمک R_{eq}

$$\begin{cases} R_1 = \rho \frac{L_1}{A_1} \\ R_2 = \rho \frac{L_2}{A_2} \end{cases} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2} \frac{A_2}{A_1}$$

با فرض برابری مقطع هسته برای اولیه و ثانویه:

$$\begin{cases} \frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1}{N_2} \\ \frac{A_1}{A_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \end{cases} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \Rightarrow R_1 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2 \Rightarrow R_1 = R'_2$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{eq}}{2}$$

63

علل انجام آزمایش SCT سمت فشار قوی

- * علل انجام آزمایش SCT در سمت HV :
- ۱- اندازه گیری جریان نامی در سمت HV به خاطر کوچک بودن سائز جریان سازه تر است.
- ۲- تنظیم ولتاژ برای نقطه ظهور ولتاژ در این آزمایش سمت HV ساده تر در مقیاس است.

$$\left. \begin{array}{l} 10 \text{ KVA} \\ 20 \text{ KV} \\ 400 \text{ V} \end{array} \right\} \begin{array}{l} A \\ 0.5 \\ 25 \end{array}$$

- ۳- در صورت تشخیص اشتباه سیم ها عبور جریان نامی HV از سیم سیم ۲۷ مشکلی نداشت ولی عکس آن منجر به سوختن ترانس می شود.

64

UK% یا درصد ولتاژ اتصال کوتاه ترانس

- نسبت ولتاژ تغذیه در آزمایش اتصال کوتاه به ولتاژ نامی متناسب را UK% ترانس می گویند.

$$\%UK = \frac{V_{sc}}{V_n}$$

- این شاخصه با ظرفیت توانی ترانس رابطه معکوس دارد.

ولتاژ اتصال کوتاه به درصد	نوع ترانسفورماتور
۴ تا ۱۰	ترانسفورماتورهای قدرت سه فاز
۸ تا ۱۰	ترانسفورماتورهای منابع تغذیه

65

مثال

یک ترانس تکفاز ده کیلو ولت آمپر ۲۲۰۰/۲۲۰ ولت، ۶۰ هرتز مفروض است نتایج آزمایش بی باری و اتصال کوتاه به قرار زیر باشد در این صورت:

الف) پارامترهای مدار معادل را نسبت به دو سمت LV و HV بدست آورید؟

ب) جریان تحریک چند درصد جریان نامی است؟

ج) ضریب توان ترانس در حالت بی باری و اتصال کوتاه چقدر است؟

$$\text{SCT} \begin{cases} P_{sc} = 215\text{w} \\ I_{sc} = 4.55\text{A} \\ V_{sc} = 150\text{v} \end{cases} \quad \text{OCT} \begin{cases} P_{oc} = 100\text{w} \\ I_{oc} = 2.5\text{A} \\ V_{oc} = 220\text{v} \end{cases} \quad I_{1n} = \frac{P_n}{V_{1n}} = \frac{10000}{2200} = 4.55\text{A}$$

$$\text{الف:} \quad \cos(\varphi_{oc}) = \left(\frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}} \right) = \left(\frac{100}{220 \times 2.5} \right) = 0.18 \quad \varphi_{oc} = \cos^{-1}(0.18)$$

$$\begin{cases} R_c = \frac{V_{oc}}{I_c} = \frac{V_{oc}}{I_{oc} \cos(\varphi_{oc})} = \frac{220}{2.5 \times 0.18} = 484\Omega \\ X_M = \frac{V_{oc}}{I_M} = \frac{V_{oc}}{I_{oc} \sin(\varphi_{oc})} = 89.4\Omega \end{cases}$$

پارامترهای بدست آمده در سمت ثانویه ترانس است.

66

مثال

$$R_{eq} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{215}{(4.55)^2} = 10.38\Omega \Rightarrow R_1 = R'_2 = \frac{R_{eq}}{2} = \frac{10.38}{2} = 5.19\Omega$$

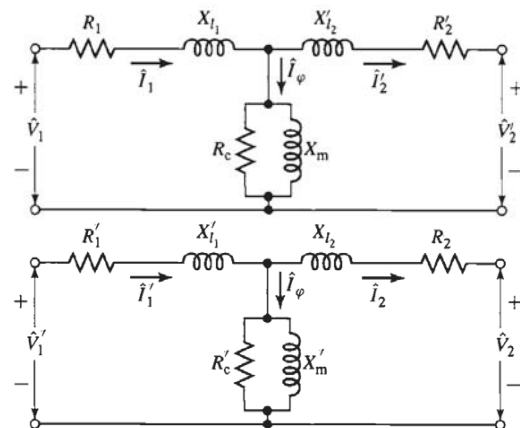
$$Z_{eq} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{150}{4.55} = 32.97\Omega \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{(32.97)^2 - (10.38)^2} = 31.9\Omega$$

$$\Rightarrow X_{l1} = X'_{l2} = \frac{X_{eq}}{2} = \frac{31.9}{2} = 15.65\Omega$$

پارامترهای بدست آمده در سمت اولیه ترانس است.

$$HV: \begin{cases} R_1 = R'_2 = 5.19\Omega \\ X_{l1} = X'_{l2} = j15.95\Omega \end{cases} \begin{cases} R_C = 10^2 \times 484\Omega \\ X_M = 10^2 \times 89.4\Omega \end{cases}$$

$$LV: \begin{cases} R'_1 = R_2 = 10^{-2} \times 5.19\Omega \\ X'_{l1} = X_{l2} = 10^{-2} \times j15.95\Omega \end{cases} \begin{cases} R'_C = 484\Omega \\ X'_M = 89.4\Omega \end{cases}$$



67

مثال

$$\begin{cases} I_e = I_{OC} \\ \%I_e = \frac{I_e}{I_{2n}} = \frac{2.5}{45.5} \times 100 = 5.5\% \end{cases}$$

ب:

ج:

$$\begin{cases} \cos(\varphi_{OC}) = 0.18 \\ \cos(\varphi_{SC}) = \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} = 0.315 \end{cases}$$

68

هـ) تلفات نامی هسته‌ای ترانس را یافته و تعیین کنید. ترانس با ولتاژ ۱۱۰۰ ولت تغذیه می‌شود.
مقدار تلفات هسته‌ای خواهد بود.

ولتاژ تغذیه را نصف کنیم و ولتاژ دیگر هسته‌ای تلفات می‌شود.
 $(P_c)_n = P_{oc} = 100 \text{ W}$

ولتاژ تلفات
 $P_c = \frac{E^2}{R_c} \Rightarrow P_c \propto (V)^2 \Rightarrow P_c = \left(\frac{1}{2}\right)^2 * (P_c)_n = \frac{1}{4} * 100 = 25 \text{ (watt)}$

۶) تلفات مس این ترانس را برای بار نامی و % درصد بار نامی به دست آورید.
حد درازات اتصال کوتاه ۲۷۵ (watt)
جریان آن % درصد جریان نامی باشد.

$(P_{cu})_n = P_{sc} = 215 \text{ (watt)}$

$P_{cu} = R_{eq} I^2 \Rightarrow P_{cu} \propto I^2$
 $\Rightarrow P_{cu} = \left(\frac{1}{4}\right)^2 * (P_{cu})_n = 0.0625 * 215 = 13.4375 \text{ watt}$
بار ترانس $\rightarrow$ بار $\uparrow$ جریان $\uparrow$ ترانس

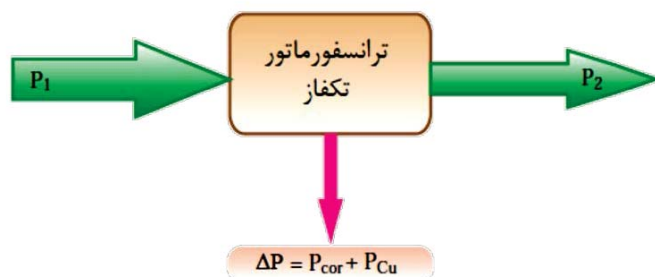
69

بازده (Efficiency)



Ratio between Input power and Output Power

$$\eta = \frac{\text{Output Power}}{\text{Input Power}}$$



$$\text{Input} = \text{Output} + \text{Losses}$$

$$\eta = \frac{\text{Output Power}}{\text{Output Power} + \text{Losses}}$$

$$\eta = \frac{\text{Input Power} - \text{Losses}}{\text{Input Power}}$$

مباحث راندمان:

- ۱- راندمان در نقطه کار
- ۲- راندمان ماکزیمم
- ۳- راندمان در بازه های زمانی

70

راندمان در نقطه کار

واحد اطلاعاتی از ترانس نقطه کار آن معلوم است باید آن را محاسبه کرد P_{out} و P_{loss}
 به کمک روابط معمول در شرایط زیر می‌توانیم:

حالت اول) بار ترانس $K\%$ بار نامی یا مرتب بر آن معلوم:

$$P_{out} = \frac{K\% \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2}{S_{out}}$$

$$\eta = \frac{AS_n \cos \varphi}{AS_n \cos \varphi + P_{core} + A^2 P_{Cu_n}}$$

$$P_{loss} = P_c + P_{cu}$$

طوبی باری → رانندگی

$$P_c = P_{oc}$$

$$A = \frac{K}{100}$$

$$P_{cu} = \left(\frac{K}{100}\right)^2 (P_{cu})_n = \left(\frac{K}{100}\right)^2 P_{sc}$$

71

راندمان در نقطه کار

حالت دوم) نقطه کار بار برابر محاسبه معلوم است:

گاهی است بر آن جایی سبب و توان جابجایی آن محاسبه می‌شود

$$P_{out} = V_r I_r \cos \varphi_r$$

$$P_c = R_c I_c^2 \quad \text{یا} \quad \frac{E^2}{R_c}$$

$$P_{out} = V_r' I_r' \cos \varphi_r'$$

$$P_{cu} = R_{eq} I_r'^2$$

نسبتی به R_{eq} دارد در آنجا است
 از این برای همین جریانی است
 می‌دانیم.

72

بازده ماکزیمم

انرجائی کے تغیر یا ترانس بائٹ تغیر در اندام می شود در این بخش می خواهیم باری را شناسای کنیم که در ترانس تغیر بین اندامان را از خود بجای می گذارد و انرژی که بار در ترانس به معنای جریان است و جریان نیز فارادی باشد باید بدینیم در ترانس بعضی خنثی ها می باشد و زاویه ای در این است که در اندامان آن ماکزیمم شود.

$$R_{eq} I_r^2 = P_c \quad \text{خنثی می باشد}$$

در جریان که اندامان ماکزیمم می شود تلفات مسخ نیز تلفات آهن در این می کنند.

$$(R_1 + R_r') I_r'^2 = P_{oc}$$

$$I_r' = \sqrt{\frac{P_{oc}}{R_1 + R_r'}}$$

$$\eta_{max} \Rightarrow P_{cu} = P_c \Rightarrow P_{loss} = 2P_c = 2P_{oc}$$

73

بازده ماکزیمم

نکته: اگر در k بارانی اندامان ماکزیمم شود می توان گفت: $P_{cu} = P_{oc}$

$$\left(\frac{k}{100}\right)^2 P_{sc} = P_{oc}$$

$$k = 100 \sqrt{\frac{P_{oc}}{P_{sc}}}$$

چه زاویه ای؟

نکته: تغیر بین اندامان برای بار مقادیر $(\mu_r = 1)$ ظاهر می شود.

74

مثال: یک ترانس 10KVA، 2200/220، 60Hz مفروض است. تلفات هسته ۱۰۰ وات و تلفات مس نامی در سمت فشار قوی ۲۱۵ وات می باشد. اگر امپدانس اتصال کوتاه ترانس در سمت فشار قوی معادل $10.4 + j31.3$ اهم باشد مطلوبست:

- الف) راندمان ترانس در شرایط ۷۵ درصد بار نامی و ضریب توان ۰.۶ درصد؟
 ب) در شرایط بازده ماکزیمم توان خروجی و بازده ماکزیمم را بدست آورید؟
 ج) بازده ماکزیمم در چه درصدی از بار نامی رخ می دهد؟

75



$$\eta = \frac{S_n K \cos(\varphi_2)}{S_n K \cos(\varphi_2) + P_c + K^2 P_{Cu n}} = \frac{10000 \times 0.75 \times 0.6}{10000 \times 0.75 \times 0.6 + 100 + (0.75)^2 \times 215}$$

$$\% \eta = 95.32\%$$

(ب)

شرایط راندمان ماکزیمم

$$P_c = R_{eq} I_2'^2$$

$$\cos(\varphi_2) = 1$$

$$I_2' = \sqrt{\frac{P_{oc}}{R_{eq}}} = \sqrt{\frac{100}{10.4}} = 3.1A$$

$$\% \eta_{max} = \frac{V_2' I_2' \cos(\varphi_2)}{V_2' I_2' \cos(\varphi_2) + P_c + P_{iron}} \times 100 = \frac{2200 \times 3.1 \times 1}{2200 \times 3.1 \times 1 + 100 + 100} \times 100 = 97.15\%$$

(ج)

$$\% \text{Load} = \frac{I_2'}{I_{2n}} \times 100 \quad I_{2n} = \frac{10000}{2200} = 4.55 \quad \% \text{Load} = \frac{3.1}{4.55} \times 100 = 68\%$$

$$\% \text{Load} = 100 \sqrt{\frac{P_{oc}}{P_{sc}}} = 100 \sqrt{\frac{100}{215}} = 68\%$$

76

راندان ماکزیم

ج) اگر خواهم سیر راندان برای خانواده که بارهای با ضریب توان ۰/۸ را به دست آورم مقدار آن

چقدر است؟

ج) * «میدانای» راندان مانند سیم سوره هم از سیم به ضریب توان بارها در به عبارت دیگر سیم سیم
مسئله مستقل از مقدار سیم سیر راندان در ۷۸٪ بارهای ظاهری شود *

۰/۸ P_{out} و ۷۸٪ بارهای

$$\eta_{max} = \frac{P_{out}}{P_{out} + 2P_{oc}} * 100 = \frac{\frac{KVA}{10} * 0.8 * 0.8}{\left(\frac{KVA}{10} * 0.8 * 0.8\right) + (2 * 100 * 0.1^2)} = 94.4\%$$

77

بازده در بازه های زمانی



$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{out} + W_{loss}}$$

η_{AD} شبانه روز

η_w واقعی

η_m ماهیان

η_s فصلی

η_y سالانه

* واحدهای انرژی به صورت استقاره قرار می گیرند سبب به نوع انرژی ترانس

چگونگی سنجش است به شکل زیر است: Wh (وات ساعت)

kWh (کیلووات ساعت)

MWh (مگاوات ساعت)

$$W_{out} = \sum_i (W_{out})_i$$

$$W_{loss} = \sum_i (W_{loss})_i$$

78

بازده شبانه روزی

مثال: یک ترانس 50KVA، 2400/240، 60Hz، $P_{oc}=200w$ و $P_{sc}=500w$ مفروض است. راندمان شبانه روزی این ترانس را بدست آورید با فرض اینکه بارگذاری ترانس در شبانه روز براساس جدول زیر باشد:

درصد بار	%0	%50	%75	%100	%110
Cos(ϕ)	----	1	0.8 Lag	0.9Lag	1
ساعت	6	6	6	3	3

$$W_{out} = 0 + 0.5 \times 50 \times 1 \times 6 + 0.75 \times 50 \times 0.8 \times 6 + 1 \times 50 \times 0.9 \times 3 + 1.1 \times 50 \times 1 \times 3 = 630 KWh$$

$$W_{iron} = \frac{200 \times 24}{1000} = 4.8 KWh$$

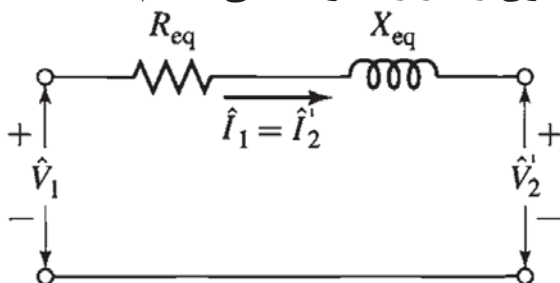
$$W_{cu} = 0 + (0.5)^2 \times 500 \times 6 + (0.75)^2 \times 500 \times 6 + (1)^2 \times 500 \times 3 + (1.1)^2 \times 500 \times 3 = 5760 = 5.67 KWh$$

$$\% \eta_{AD} = \frac{W_{out}}{W_{in}} \times 100 = \frac{W_{out}}{W_{out} + W_{iron} + W_{cu}} \times 100 = \frac{630}{630 + 4.8 + 5.67} \Rightarrow \% \eta_{AD} = 98.35\%$$

79

ضریب تنظیم ولتاژ (درصد رگولاسیون)

با تغییر بار ترانس، افت ولتاژ المانهای مدل ترانس تغییر می کند. در صورت ثابت بودن ولتاژ تغذیه ترانس، ولتاژ تحویل شده به بار میتواند تغییر کند که برای نشان دادن میزان تغییرات ما رگولاسیون ولتاژ را تعریف می کنیم:



$$\%R = \frac{|V_1| - |V'_{2n}|}{|V'_{2n}|} \times 100$$

$$V'_{2n} = V_{1n}$$

$$V_1 = V'_2 + (R_{eq} + jX_{eq})I'_2$$

80

مثال



در مورد ترانس مثال قبل برای هریک از شرایط زیر رگولاسیون را حساب کنید؟
 الف) بار ترانس ۷۵ درصد بار نامی با ضریب توان ۰/۶ پسفاز؟
 ب) بار ترانس ۷۵ درصد بار نامی با ضریب توان ۰/۶ پیشفاز؟

(الف)

$$\left. \begin{aligned} \text{HV : } I'_{2n} = I_{1n} &= \frac{10000}{2200} = 4.55\text{A} \\ I'_2 &= 0.75I'_{2n} = 0.75 \times 4.55 = 3.41\text{A} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I'_2 = 3.41 \angle (\cos^{-1}(0.6)_{\text{lag}}) = 3.41 \angle (-53.1)$$

$$V_1 = V'_2 + (R_{\text{eq}} + jX_{\text{eq}})I'_2 = 2200 \angle 0 + (10.38 + j31.9) \times 3.41 \angle (-53.1)$$

$$V_1 = 2306.94 \angle (0.9)^\circ$$

$$\%R = \frac{2306.94 - 2200}{2200} \times 100 = 4.86\%$$

81

مثال



(ب)

$$\left. \begin{aligned} \text{HV : } I'_{2n} = I_{1n} &= \frac{10000}{2200} = 4.55\text{A} \\ I'_2 &= 0.75I'_{2n} = 0.75 \times 4.55 = 3.41\text{A} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I'_2 = 3.41 \angle (\cos^{-1}(0.6)_{\text{lead}}) = 3.41 \angle (53.1)$$

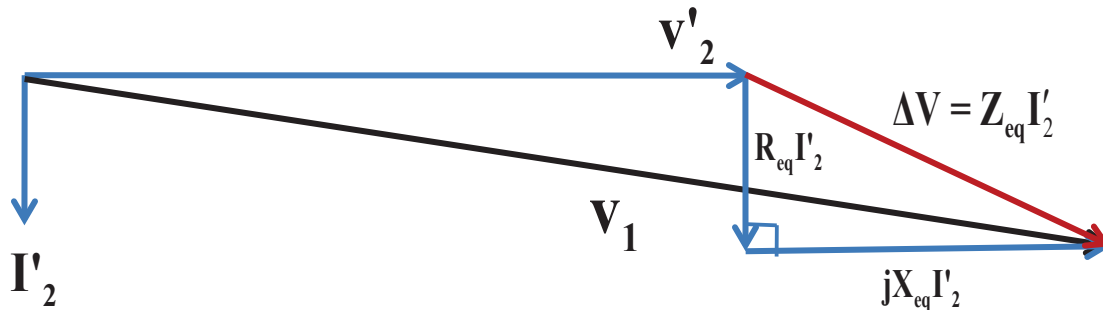
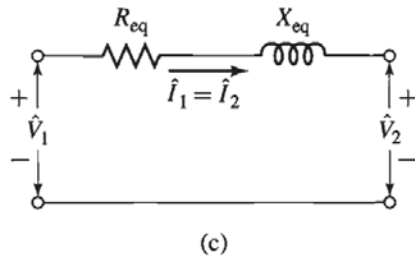
$$V_1 = V'_2 + (R_{\text{eq}} + jX_{\text{eq}})I'_2 = 2200 \angle 0 + (10.38 + j31.9) \times 3.41 \angle (53.1)$$

$$V_1 = 2137.9 \angle (2.48)^\circ$$

$$\%R = \frac{2137.9 - 2200}{2200} \times 100 = -2.82\%$$

82

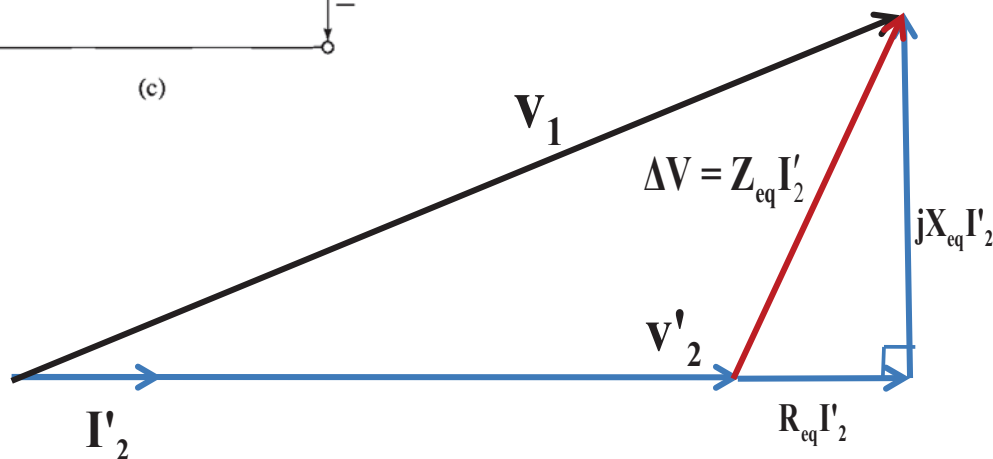
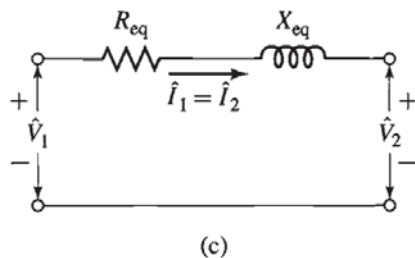
دیاگرام فازوری برای مدل تقریبی و بار سلفی خالص



درصد رگولاسیون مثبت

83

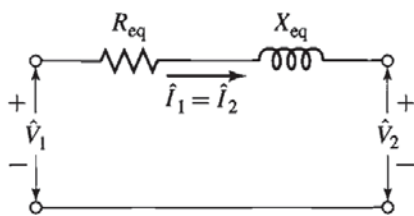
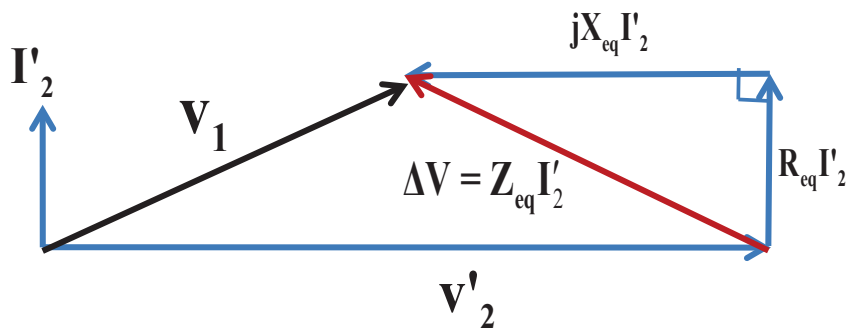
دیاگرام فازوری برای مدل تقریبی و بار مقاومتی خالص



درصد رگولاسیون مثبت

84

دیاگرام فازوری برای مدل تقریبی و بار خازنی خالص



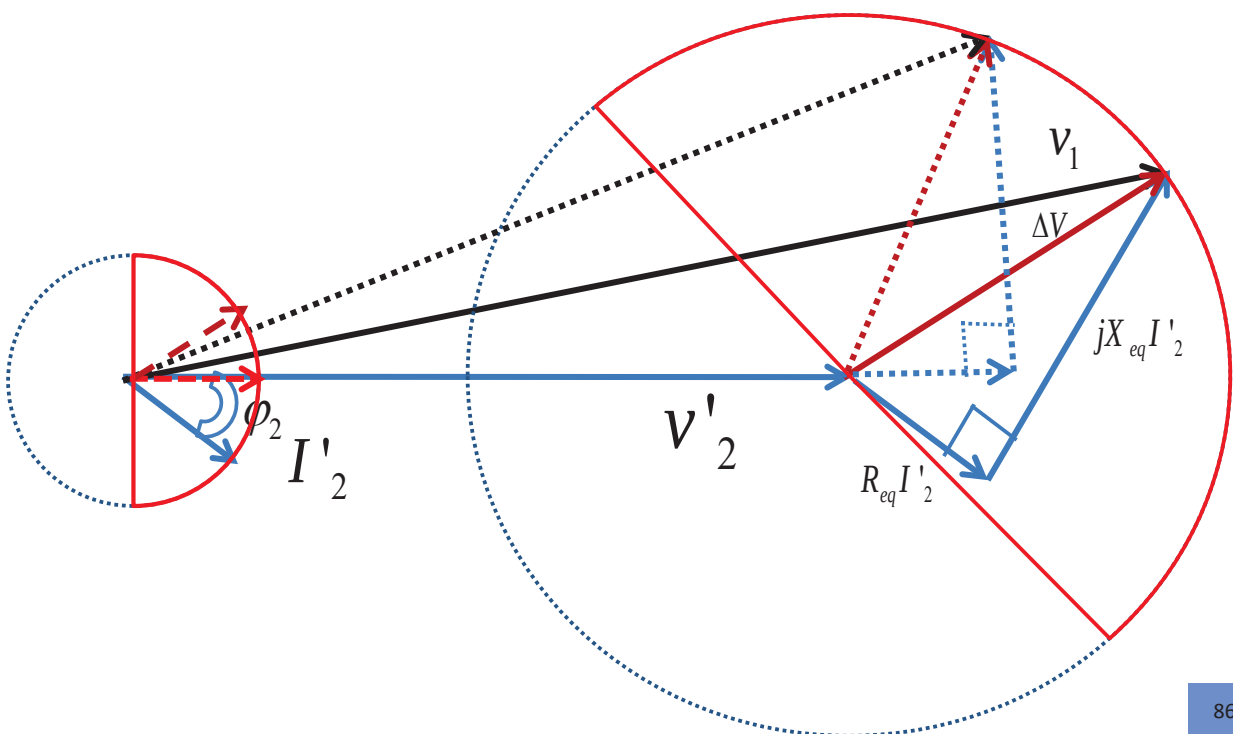
(c)

درصد رگولاسیون منفی

85

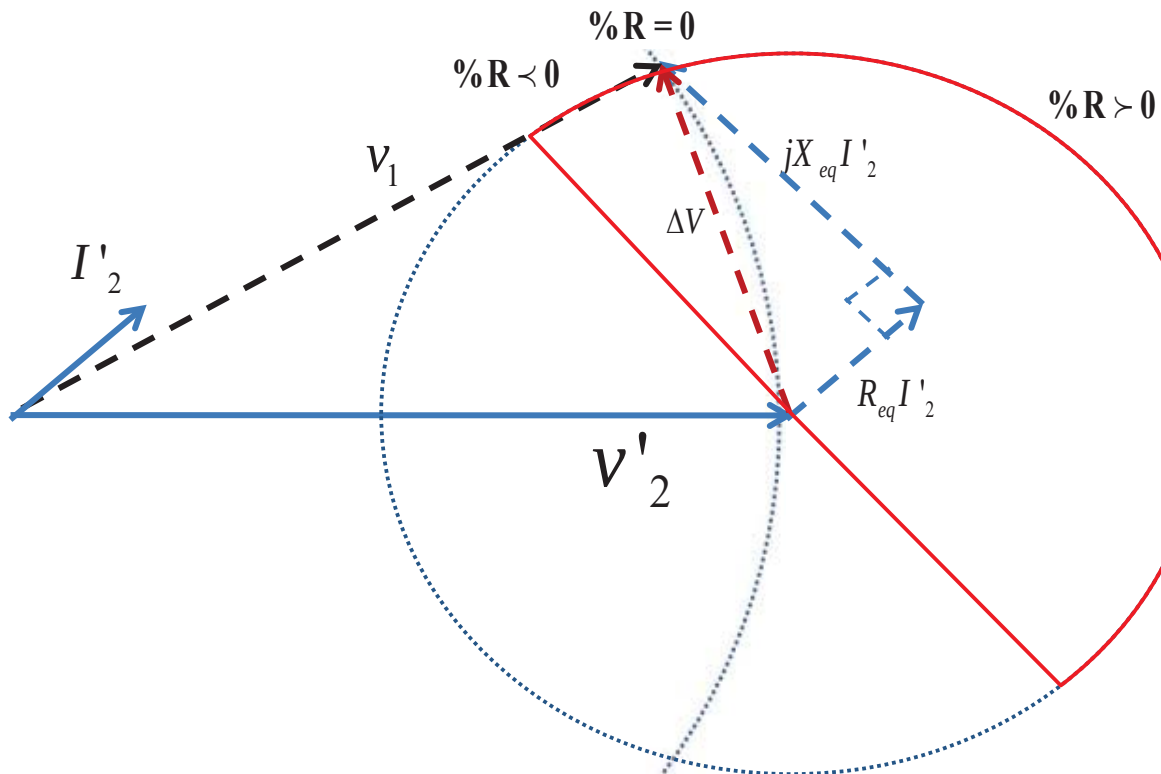
دیاگرام دایره ای ترانس

اندازه جریان ثابت فرض شده و فاز آن از بدترین شرایط پس فازی تا بدترین شرایط پیش فازی تغییر می نماید.



86

رگولاسیون صفر و علامت رگولاسیون برای انواع بار



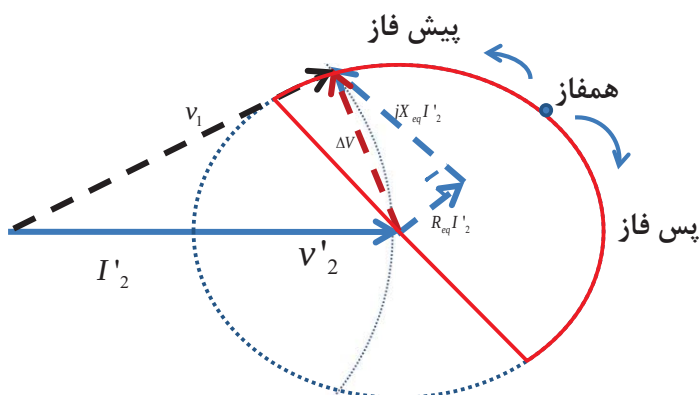
87

انواع بار و علامت رگولاسیون

• انواع بار

- بار پس فاز
- بار همفاز
- بار پیش فاز

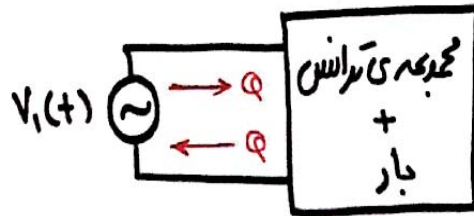
- درصد رگولاسیون مثبت
- درصد رگولاسیون صفر
- درصد رگولاسیون منفی



88

علامت رگولاسیون و سوی جاری شدن راکتیو

ترانس سیستم پس فاز مصرف کننده راکتیو است و پس از ترانس می توان پس فاز، هم فاز یا پس فاز با پس فاز را بر این اساس می توان گفت.



توان راکتیو از منبع $\Rightarrow$ مجموعه ترانس و بار $\Rightarrow$ بار پس فاز یا هم فاز $\Rightarrow R > 0$
 به مجموعه ترانس

89

علامت رگولاسیون و سوی جاری شدن راکتیو

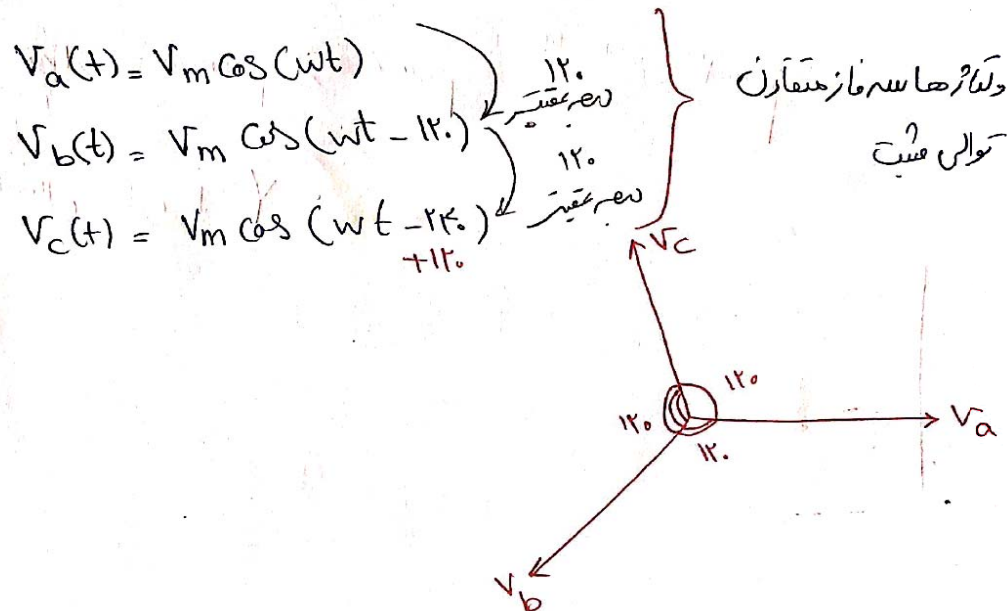
$R > 0$ $\Rightarrow$ کمبود راکتیو $\Rightarrow$ راکتیو مصرف ترانس $\Rightarrow$ راکتیو تولیدی بار
 از منبع دریافت می شود
 $R = 0$ $\Rightarrow$ تبادل راکتیو
 منبع ندارد
 $R < 0$ $\Rightarrow$ اضافه راکتیو $\Rightarrow$ راکتیو مصرفی ترانس $\Rightarrow$ راکتیو تولیدی بار
 به منبع تحویل می شود

$R > 0$ $\Rightarrow$ راکتیو از منبع دریافت می شود
 $R = 0$ $\Rightarrow$ راکتیو با منبع مبادله نمی شود
 $R < 0$ $\Rightarrow$ راکتیو به منبع تحویل می شود

90

سیستم سه فاز متقارن

هر سیستم متشکل از سه فاز با اندازه‌ی ولتاژ و جریان مشابه و امپدانسهای یکسان به تنهایی اصطلاحاً متقارن است. ۱۲۰ درجه‌ای بین فازهای ولتاژ و جریان سه فاز وجود داشته باشد، سه فاز متقارن می‌گوئیم.



91

اتصالات سه فاز

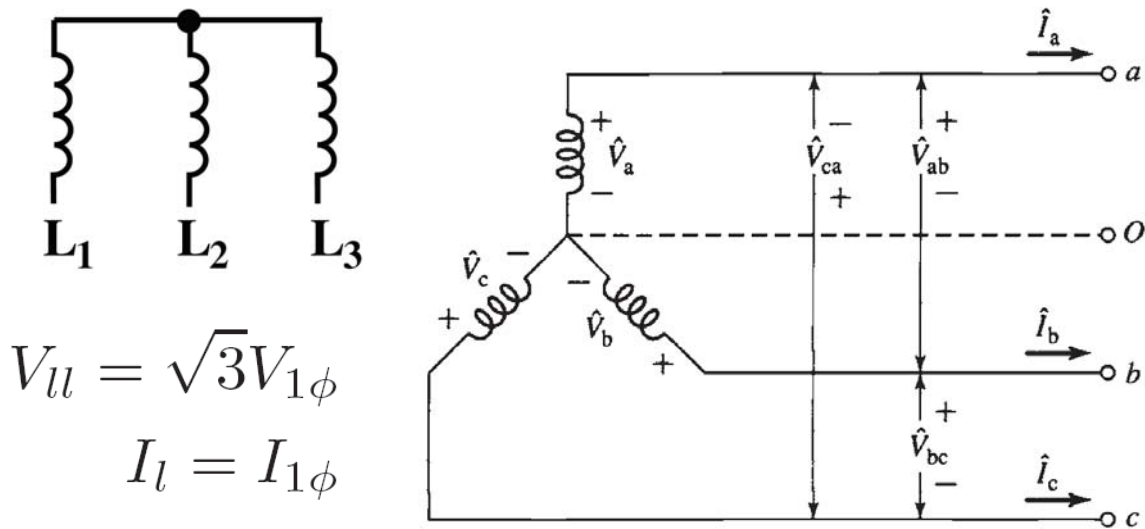
* اتصالات سه فاز:

سه فاز $\equiv$ سه سیستم تک فاز $\equiv$ ۶ سیستم $\xrightarrow{\text{اتصالات}}$ ۳ سیستم

92

انواع اتصالات سه فاز

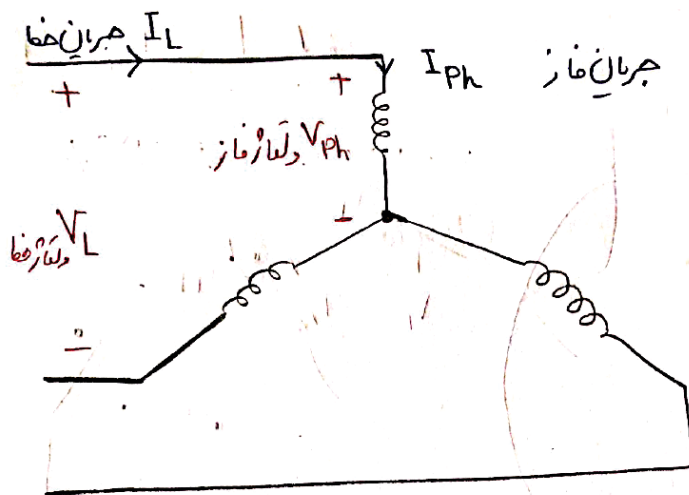
۱- اتصال ستاره Y



(اتصال ستاره ← ولتاژ بالا به ما می‌دهد)
 تحمل ولتاژش بالا است

93

اتصال ستاره



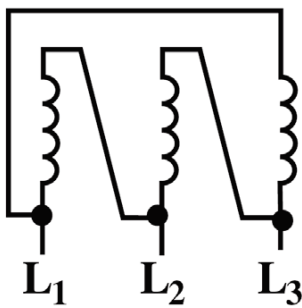
$V_L = \sqrt{3} V_{Ph}$
 $I_L = I_{Ph}$

برای ولتاژهای اتصال ستاره

94

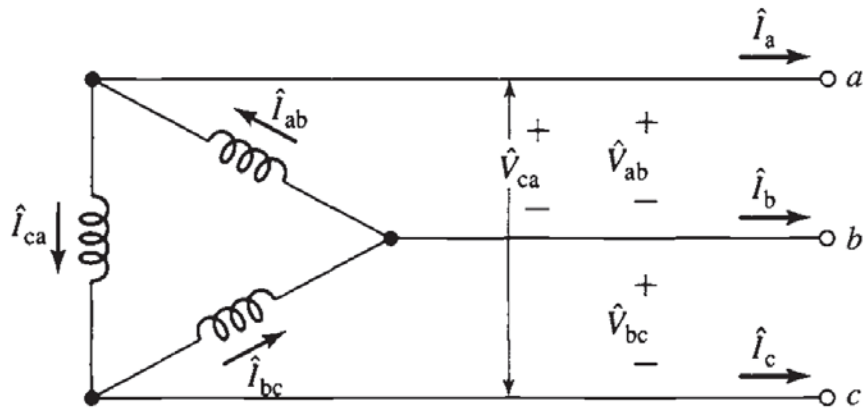
انواع اتصالات سه فاز

۱- اتصال مثلث Δ



$$V_{ll} = V_{1\phi}$$

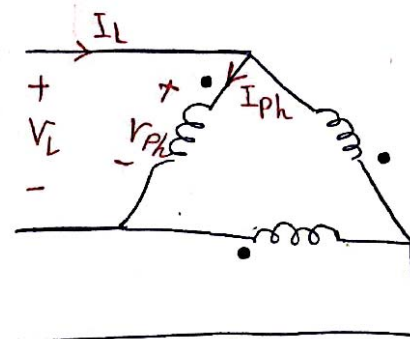
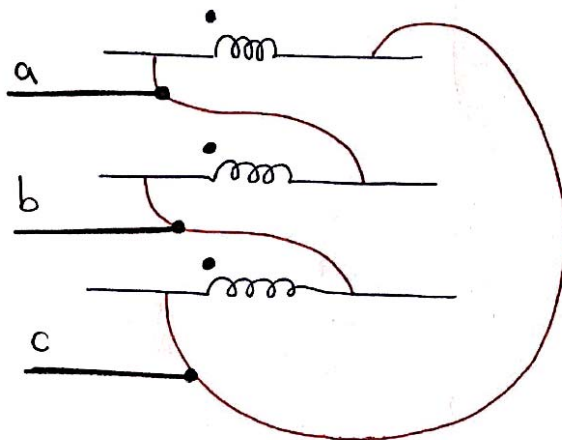
$$I_l = \sqrt{3} I_{1\phi}$$



اتصال مثلث ← جریان‌های بالارابه‌های اهد
تخل جریان‌های بالارابه‌ای است.

95

اتصال مثلث



$$V_L = V_{Ph}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_{Ph}$$

دیرری‌های اتصال مثلث

96

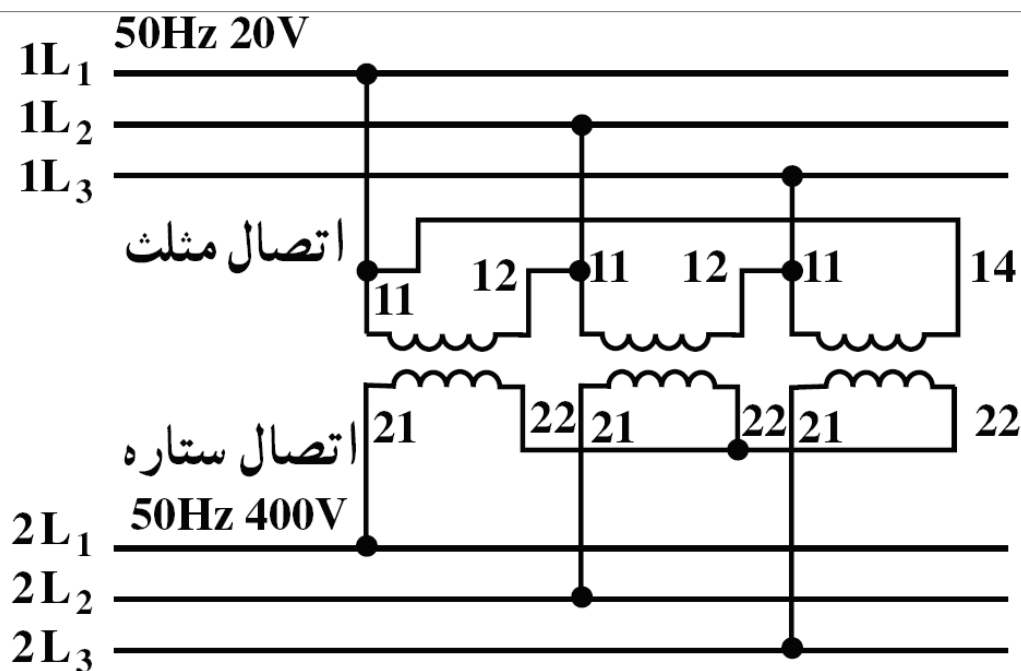
روابط انواع توان در سه فاز

$$\begin{aligned}
 \text{توان ظاهری} \quad S &= 3 V_{Ph} I_{Ph} \quad \underline{S} = \sqrt{3} V_L I_L \\
 \text{توان واقعی} \quad P &= 3 V_{Ph} I_{Ph} \cos \varphi \quad \underline{P} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi \\
 \text{توان واکنشی} \quad Q &= 3 V_{Ph} I_{Ph} \sin \varphi \quad \underline{Q} = \sqrt{3} V_L I_L \sin \varphi
 \end{aligned}$$

مستطیل
ستاره
مثلث

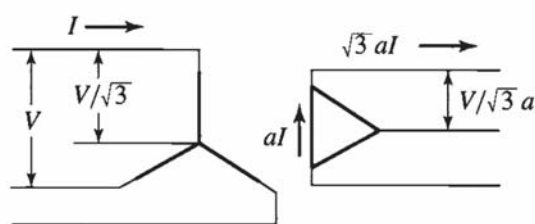
97

انواع اتصالات سه فاز

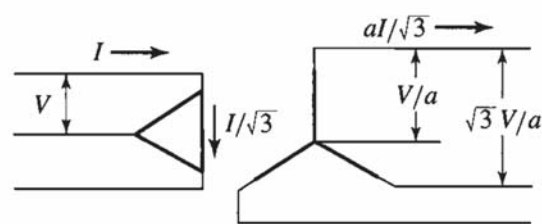


98

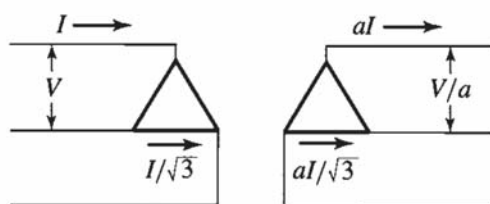
انواع اتصالات سه فاز



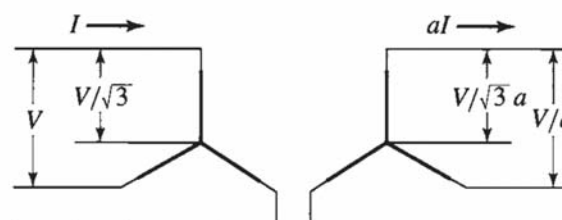
(a) Y-Δ connection



(b) Δ-Y connection



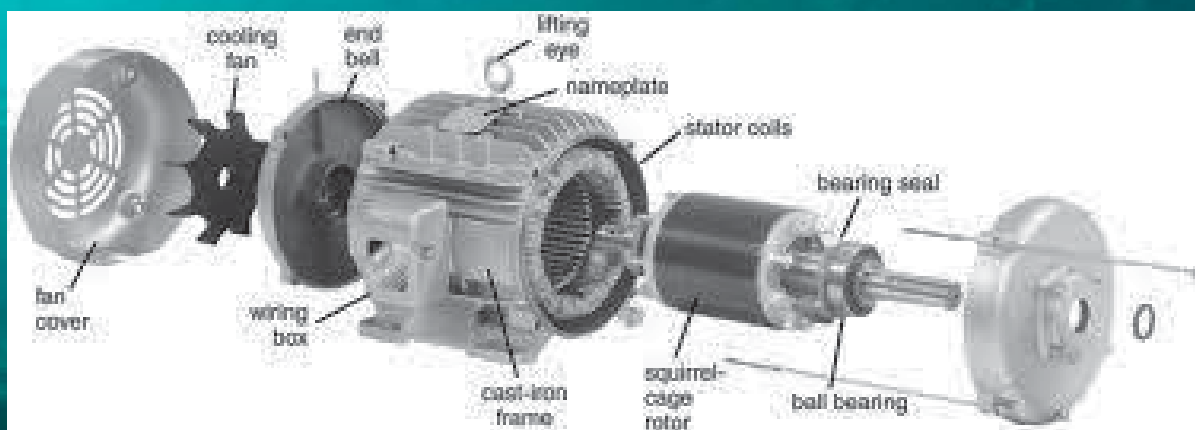
(c) Δ-Δ connection



(d) Y-Y connection

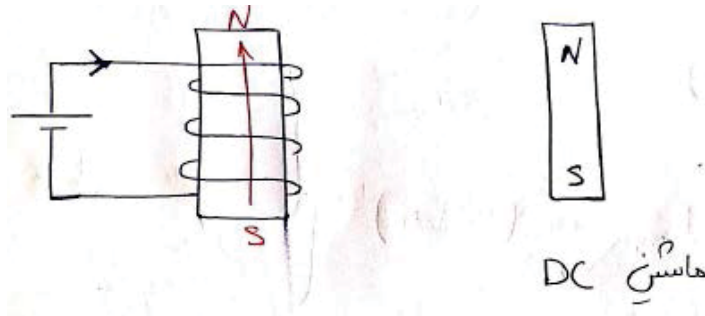


فصل دوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون سه فاز



یادآوری انواع میدانها

۱- میدان مغناطیسی ثابت: محل قطبها و قدرت میدان همواره ثابت است. مانند میدان در ماشین DC

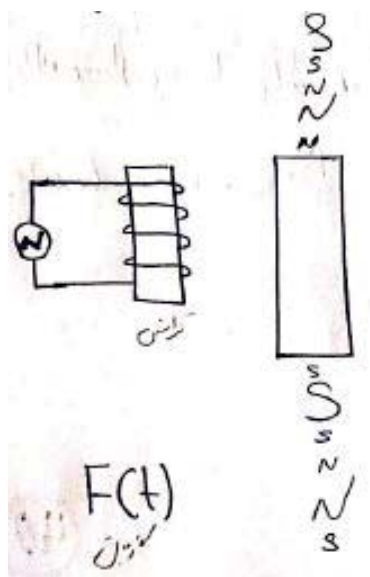


ثابت $F =$: نیروی محرکه مغناطیسی
(mmF) (ampere-turns)

101

یادآوری انواع میدانها

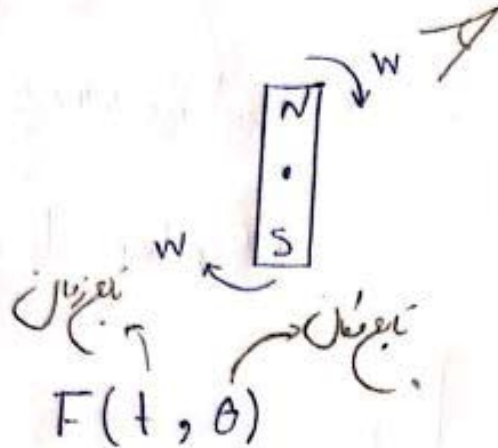
۲- میدان مغناطیسی تپشی: راستای میدان ثابت ولی اندازه و جهت آن با گذشت زمان متناوباً تغییر می کند. مانند میدان ترانس



102

یادآوری انواع میدانها

۳- میدان دوار: میدانی است با قدرت ثابت که محل قطبها با سرعت زاویه ای ثابت ω حول محور دورانی که از مرکز دو قطب می گذرد می چرخد. مانند میدان ماشینهای سه فاز AC



103

تابع ریاضی نیروی محرکه مغناطیسی میدان دوار

$$F(t, \theta) = F_{max} \cos(\theta - \omega t)$$
 (مقدار مغناطیسی)

میدان را استوار کرد $\Rightarrow \cos(\theta - \omega t) = 1$

قطب N لجاست $\Rightarrow F(t, \theta) = F_{max}$

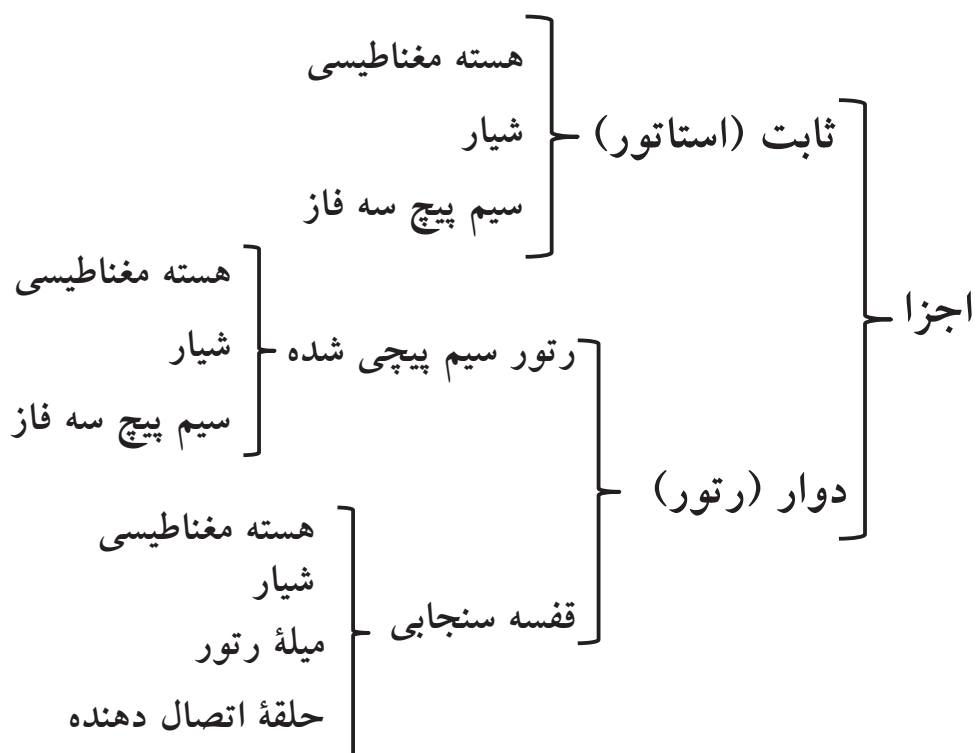
نتیجه $\Rightarrow \theta - \omega t = 0 \Rightarrow \boxed{\theta = \omega t}$

حرکت دایره ای با سرعت زاویه ای ω (میدان را استوار کرد)
 هر آنی میدان، میانی است دوار $\Rightarrow$ قطب N ظاهر شود نقطه به نقطه θ در حال تغییر است.
 چون t متغیره در هر لحظه θ داریم.

نتیجه $\Rightarrow \theta + \omega t = 0 \Rightarrow \boxed{\theta = -\omega t}$
 (میدان را استوار کرد)

104

اجزای ماشین آسنکرون سه فاز



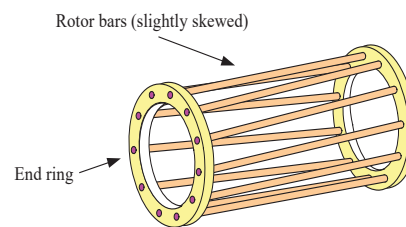
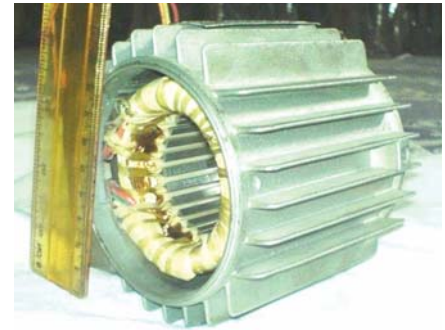
105

قسمت های مختلف یک موتور القایی



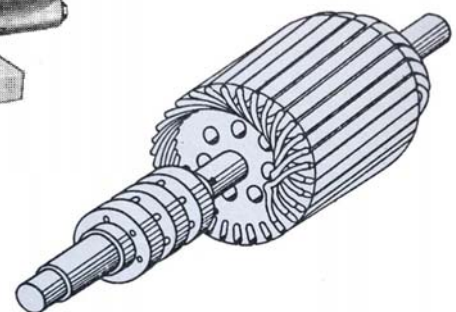
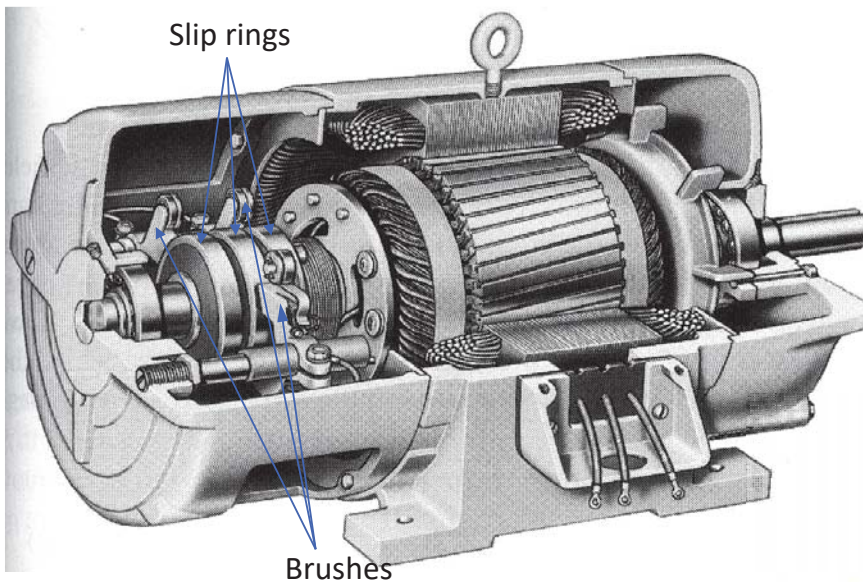
106

اجزای استاتور و رتور



107

رتور سیم پیچی شده



108

- مهمترین وظیفه استاتور ماشین القایی ایجاد میدان دوار مغناطیسی در فضای داخل ماشین می باشد.

➤ انواع سیم بندی:

۱- استاتور با سیم بندی متمرکز

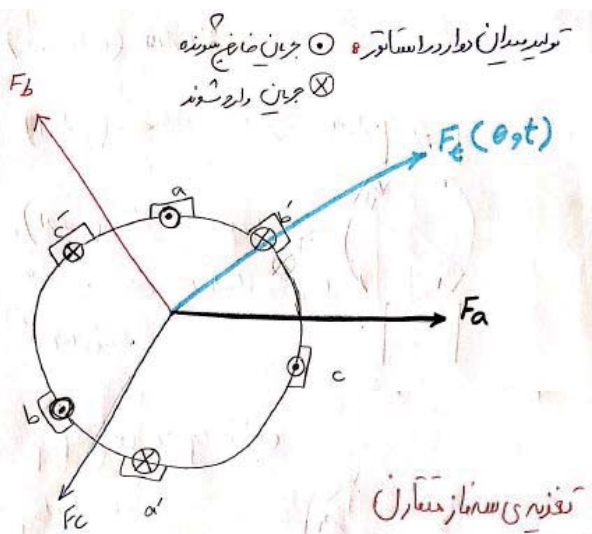
سیم بندی فازها متمرکز بوده و دارای اختلاف فاز مکانی ۱۲۰ درجه می باشد.

۲- استاتور با سیم بندی پخش شده متقارن سینوسی

سطح استاتور بینهایت شیار دارد و در هر شیار هر سه فاز را داریم ولی برای هر فاز تعداد سیمها متفاوت است.

109

استاتور با سیم بندی متمرکز



تقریبی سینوسoidal :

$$\begin{cases} i_a(t) = I_m \cos(\omega_s t) \\ i_b(t) = I_m \cos(\omega_s t - 120^\circ) \\ i_c(t) = I_m \cos(\omega_s t + 120^\circ) \end{cases}$$

خاموش : $N_a = N_b = N_c = N_m$

110

استاتور با سیم بندی متمرکز

میدان ضریبی در استاتور $F_a = N_a i_a = N_m I_m \cos(\omega_s t) \rightarrow F_a$: میدان مقادیری فاز a

میدان مقادیری فاز b : $F_b = N_b i_b = N_m I_m \cos(\omega_s t - 120^\circ)$

میدان ضریبی در استاتور F_b و با تأخیر زمانی نسبت به ضریبات فاز a .

میدان مقادیری فاز c : $F_c = N_c i_c = N_m I_m \cos(\omega_s t + 120^\circ)$

میدان ضریبی در استاتور F_c و با تأخیر زمانی نسبت به ضریبات فاز a .

$$F_t = \vec{F_a} + \vec{F_b} + \vec{F_c}$$

111

استاتور با سیم بندی متمرکز

$$F_t(t, \theta) = F_a \cos \theta + F_b \cos(\theta - 120^\circ) + F_c \cos(\theta + 120^\circ)$$

$$= N_m I_m \left[\cos \theta \cos(\omega_s t) + \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega_s t - 120^\circ) + \cos(\theta + 120^\circ) \cos(\omega_s t + 120^\circ) \right]$$

$$\text{فرمول: } \cos n \cos y + \cos(n - 120^\circ) \cos(y - 120^\circ) + \cos(n + 120^\circ) \cos(y + 120^\circ)$$

$$\Rightarrow \frac{3}{2} \cos(n - y)$$

$$F_t(\theta, t) = \frac{3}{2} N_m I_m \cos(\theta - \omega_s t)$$

میدان مغناطیسی در استاتور با سرعت $\omega_s = 2\pi f_s$ و فرکانس برق استاتور

112

میدان چپ گرد

عمر بن: مات لند اگر جای دواز از قندیم سیم پیچ استاتور عوض مسور سلطان حاصل از استاتور
کماکان دار برده با طمان سرعت مسردن ولس در خلاف جهت طواهر مقرر.

113

رتور موتور القایی

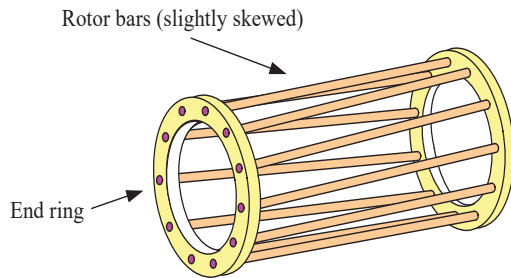
✓ رتور سیم پیچی شده:

- دارای یک سیم پیچ سه فاز مشابه با استاتور، درون شیارهای ایجاد شده بر هسته آهنی رتور است.
- سرهای سیم پیچ رتور به کمک حلقه های لغزان و جاروبکها به قسمت ساکن ماشین متصل می شود (اغلب اتصال سه فاز آن به صورت ستاره است).
- استهلاک بیشتر از رتور قفسه سنجابی و کمتر از موتور DC.
- برای توانهای بالاتر از 100KW مناسب است.

114

رتور موتور القایی

✓ رتور قفسه سنجابی:

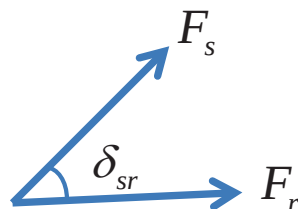


- تزریق آلومینیوم مذاب به داخل هسته رتور و ایجاد میله ها و حلقه های انتهایی.
- استهلاک ناچیز، طول عمر بالا، سادگی ساخت، حجم کم، قیمت پایین و تطابق تعداد قطب رتور و استاتور.

115

شرایط ایجاد گشتاور پایدار

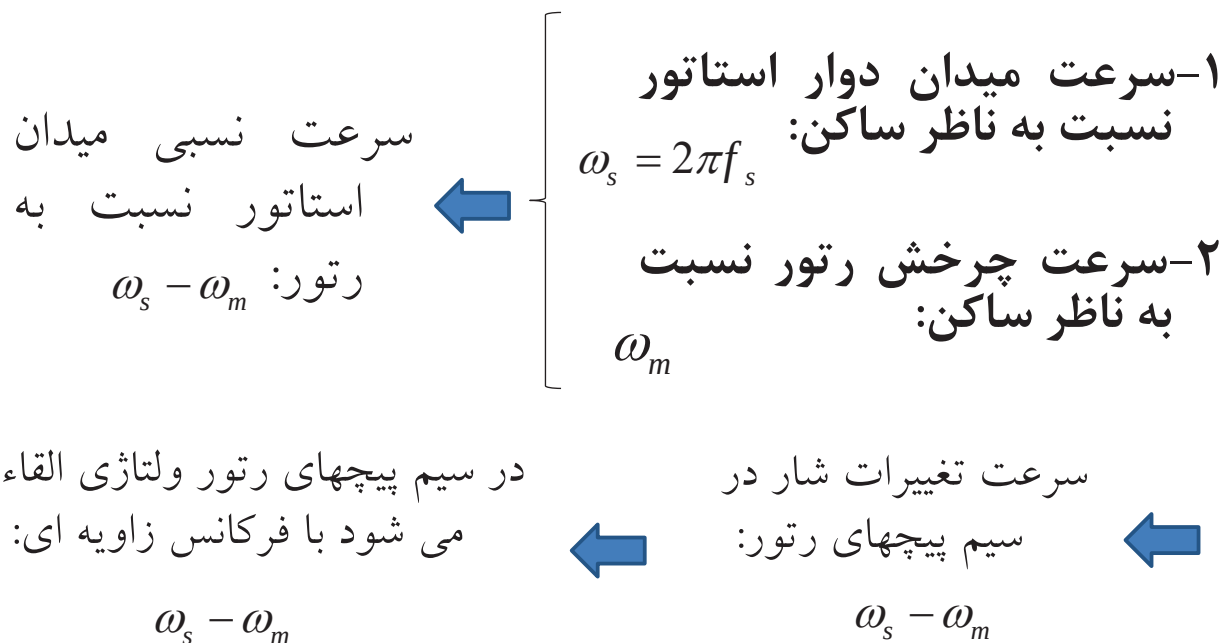
- ۱- وجود دو میدان مغناطیسی با اندازه ثابت.
- ۲- زاویه بین محورهای دو میدان ثابت بماند و زاویه نباید صفر باشد.
- ۳- برابری تعداد قطبهای دو میدان.



$$T = K F_s F_r \sin(\delta_{sr})$$

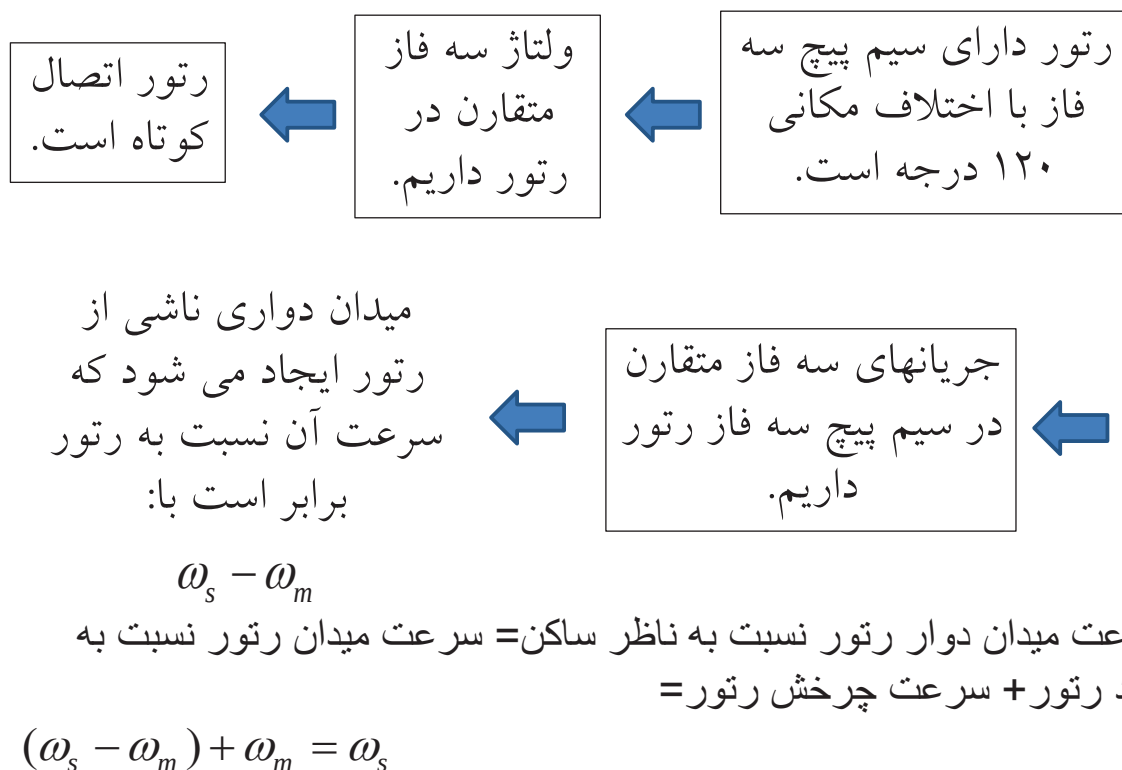
116

تحلیل عملکرد ماشین آسنکرون



117

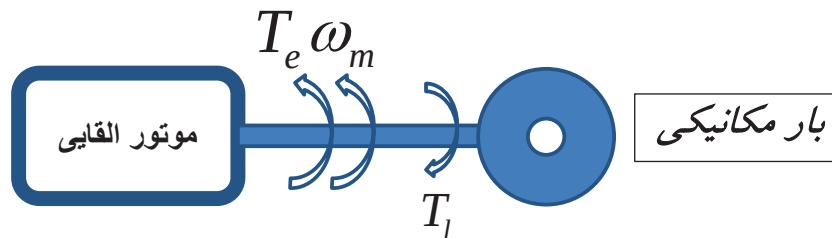
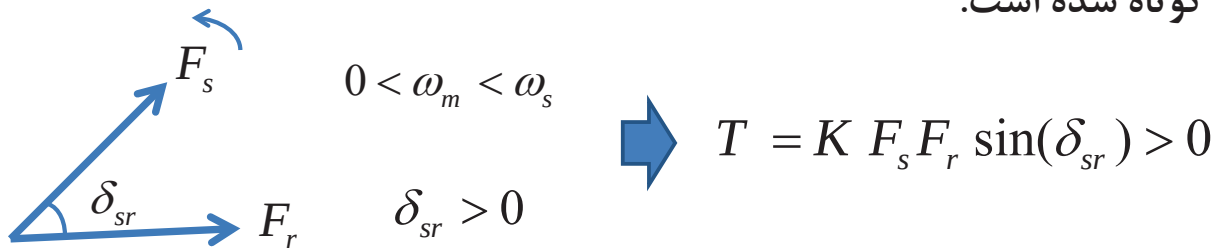
تحلیل عملکرد ماشین آسنکرون



118

حالات کاری مختلف ماشین القایی

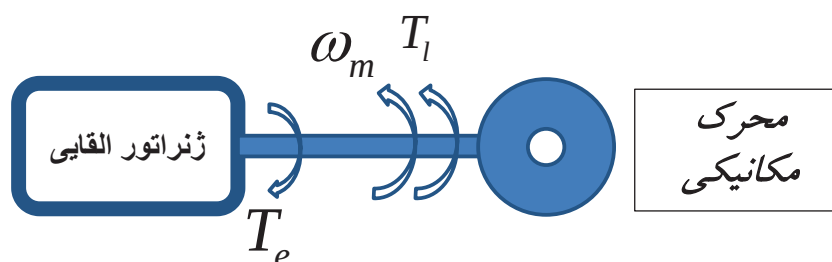
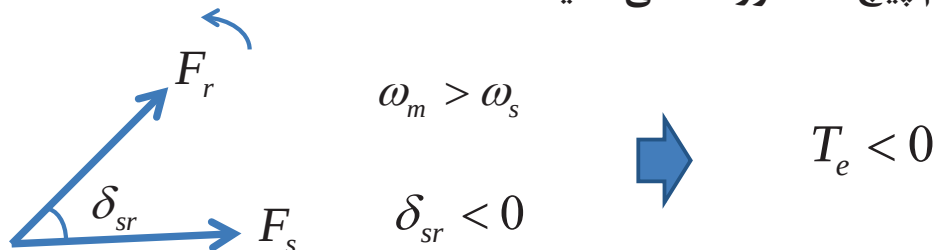
۱- حالت موتوری: استاتور با برق سه فاز متقارن تغذیه شده و رتور اتصال کوتاه شده است.



119

حالات کاری مختلف ماشین القایی

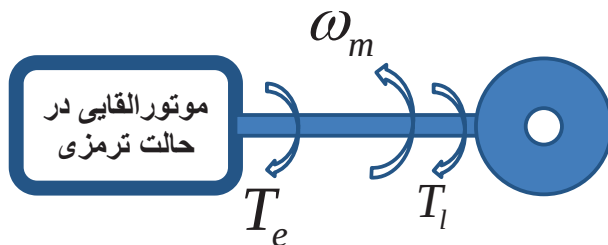
۲- حالت ژنراتوری: محور ماشین با محرک مکانیکی با سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون چرخانده شده و ضمناً توان راکتیو مورد نیاز ماشین را نیز تأمین می کنیم. در شرایط مناسب، ژنراتور با کمک پس ماند مغناطیس، برق سه فاز را در سیم پیچ استاتور القا می نماید.



120

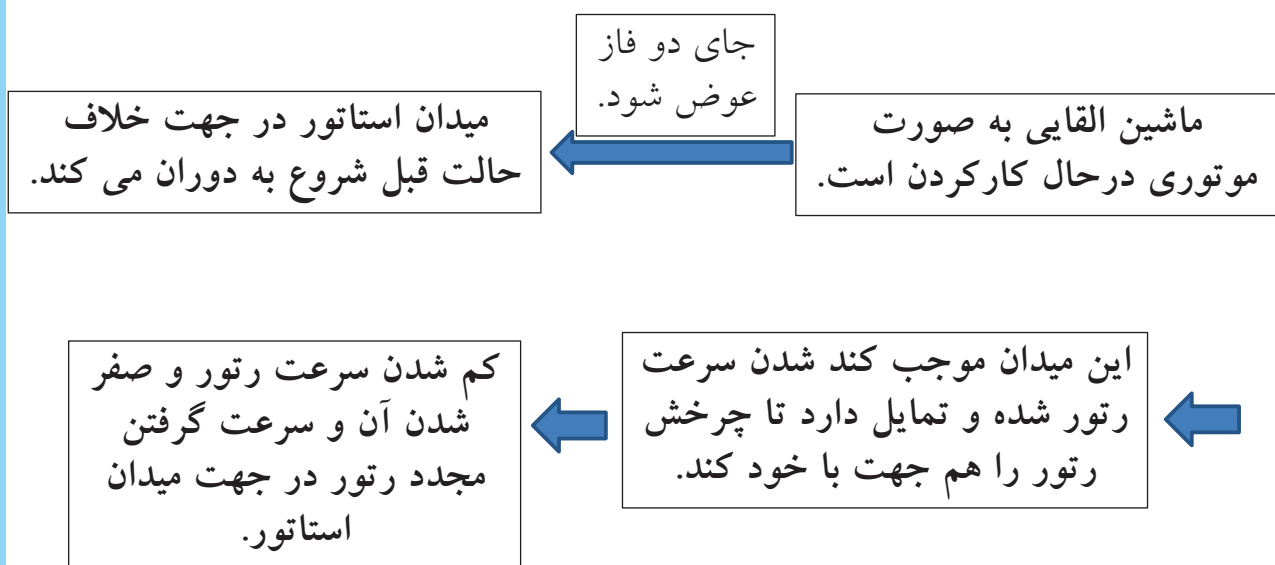
حالات کاری مختلف ماشین القایی

۳- حالت ترمزی: فرض کنید یک موتور القایی بصورت راستگرد در حال کار باشد و بخواهیم در کوتاهترین زمان ممکن متوقف شود. اگر جای دو فاز از سه فاز تغذیه استاتور را عوض کنیم، حرکت راستگرد موتور تا توقف محور کند شده و در صورت تداوم این شرایط، موتور بصورت چپگرد ادامه خواهد داد. به مدت کند شدن حرکت تا توقف اصطلاحاً حالت عملکرد ترمزی گفته می شود. در طول مدت عملکرد ترمزی، محور در خلاف جهت میدان دوار استاتور می چرخد.



121

تحلیل حالت ترمزی



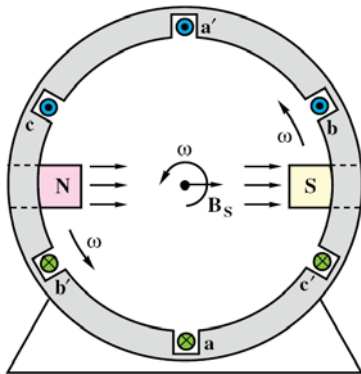
۴- حالت مبدل فرکانسی (اسلاید ۱۳۷)

122

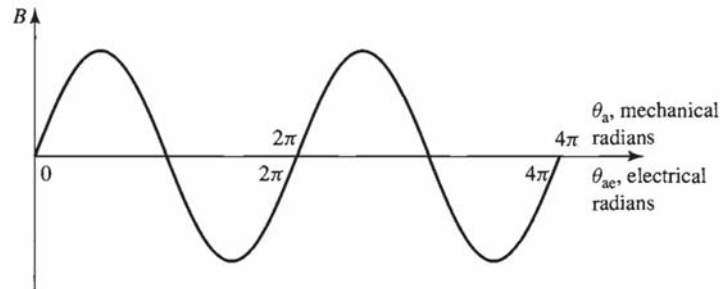
مفهوم سرعت و زاویه الکتریکی و مکانیکی

• یک دور مکانیکی معادل ۳۶۰ درجه زاویه مکانیکی است و یک چرخش کامل محور را مشخص می کند.

• یک دور الکتریکی معادل ۳۶۰ درجه زاویه الکتریکی است و مقدار زاویه چرخشی است که ما را از مثلاً قطب N مجدداً به قطب N برساند.



سیستم دو قطب

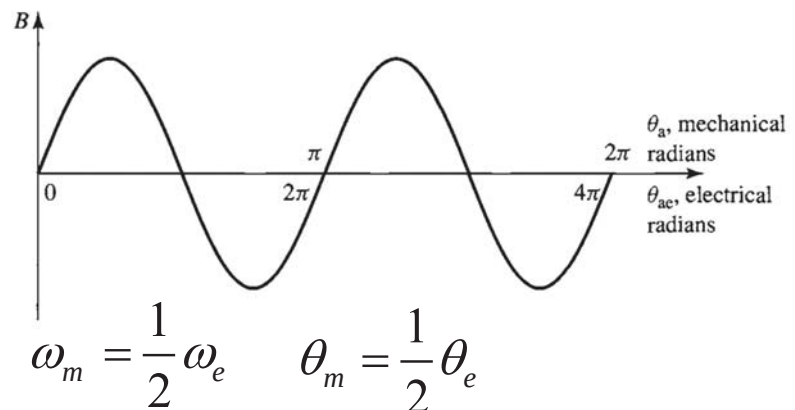
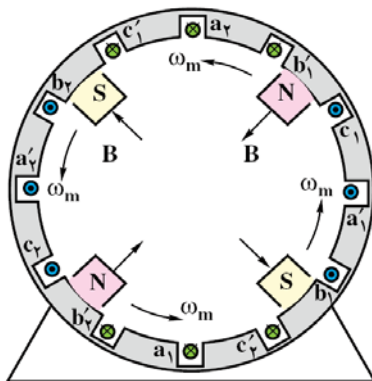


$$\left. \begin{array}{l} \theta_m \quad \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \\ \theta_e \quad \frac{d\theta_e}{dt} = \omega_e \end{array} \right\} \omega_m = \omega_e$$

123

سرعت الکتریکی و مکانیکی

• سیستم چهار قطب



• سیستم p قطب

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad \theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$$

124

سرعت سنکرون و مفهوم لغزش

- سرعت سنکرون ماشین که در آن P تعداد قطبهای ماشین است :

$$\omega_s = 2\pi f_s \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)_e$$

$$N_s = \frac{120f_s}{P} \text{ (rpm)}$$

$$N_s = \frac{2f_s}{P} \text{ (rps)}$$

$$f_s = 50 \text{ Hz}$$

P	ω_s (rpm)
2	3000
4	1500
6	1000
8	750
10	600
12	500

- مفهوم لغزش s : از آنجاییکه محور ماشین القایی هرگز در سرعت سنکرون نمی چرخد، مقدار اختلاف این سرعتها با کمیت لغزش ارزیابی می شود.

$$\text{لغزش} = \frac{\text{سرعت نسبی رتور نسبت به میدان دوار استاتور}}{\text{سرعت میدان دوار استاتور}}$$

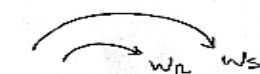
$$S = \frac{\omega_s \pm \omega_m}{\omega_s}$$

125

لغزش



حالت اول (دور رتور در جهت میدان دوار استاتور می چرخد)



$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \Rightarrow \omega_m = (1-s)\omega_s$$

حالت دوم (دور رتور در خلاف جهت میدان استاتور می چرخد)



$$s = \frac{\omega_s + \omega_m}{\omega_s} \Rightarrow \omega_m = (s-1)\omega_s$$

1) ω_s و ω_m باید با واحد یکسان جایگزین شوند (rpm / rps / rad/s)

2) ω_s و ω_m باید هر دو الکتریکی یا مکانیکی جایگزین شوند.

126

لغزش و حالات عملکرد ماشین القایی

① عملکرد مسدودی :

اتوار اتصال کوتاه و اتصال استاتور با برق سه فاز تقدیر ← چرخش آلودر در جهت میدان استاتور با سرعتی کمتر از سرعت سنکرون.

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq w_m < w_s \\ s &= \frac{w_s - w_m}{w_s} \end{aligned} \right\} \Rightarrow 0 < s < 1$$

$w_m \uparrow \Rightarrow s \downarrow$

سین آلودر $w_m = 0 \rightarrow s = 1$

$\uparrow$ بار مکانیکی $\Rightarrow w_m \downarrow \Rightarrow s \uparrow$

$s \propto \text{بار}$

127

لغزش و حالات عملکرد ماشین القایی

۲- عملکرد ترمزی

عملکرد ترمزی مربوط به زمان است که سرعت محور کاهش می یابد و به ترتیب می رسد.

w_s w_m

$$s = \frac{w_s + w_m}{w_s} \quad \left| \begin{array}{l} s > 1 \\ s < 2 \end{array} \right| \Rightarrow 1 < s < 2$$

۳- عملکرد ژنراتوری

محور با سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون در جهت میدان استاتور چرخانده می شود.

w_s $w_m > w_s$

$$s = \frac{w_s - w_m}{w_s} \left\{ \Rightarrow s < 0 \right.$$

128

لغزش و حالات عملکرد ماشین القایی

۴- حالت مبدل فرکانسی:

اگر موتور القایی را به یک منبع سه فاز متقارن با فرکانس f_s متصل کنیم، در اینصورت سرعت میدان دوار استاتور برابر است با:

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

در حالیکه رتور با سرعت ω_m در حال چرخش باشد، سرعت این میدان نسبت به سیم پیچ رتور برابر است با:

$$\omega_r = \omega_s \pm \omega_m = s \omega_s \Rightarrow 2\pi f_r = s \times 2\pi f_s$$

بنابراین فرکانس زاویه ای برق القایی در رتور می شود:

$$f_r = s f_s$$

اکنون اگر برق سه فازی به عنوان ورودی به استاتور متصل نماییم و برق سه فاز القایی در رتور را بعنوان خروجی در نظر بگیریم، عملکرد مبدل فرکانسی ماشین رقم می خورد. بدیهی است برای آنکه فرکانس مطلوبی در خروجی داشته باشیم، لازم است محرک مکانیکی مناسبی برای کنترل اندازه و جهت چرخش محور در اختیار داشته باشیم.

129

لغزش در حالات کاری مختلف ماشین

• حالت موتوری

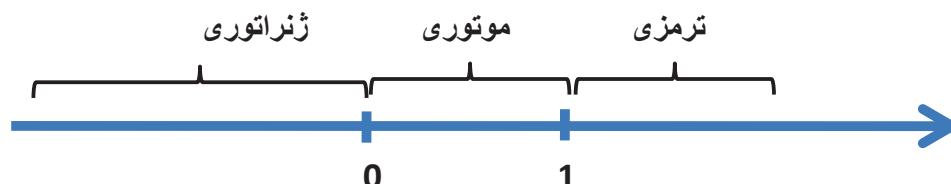
$$\omega_r < \omega_s \Rightarrow 0 < S < 1$$

• حالت ژنراتوری

$$\omega_r > \omega_s \Rightarrow S < 0$$

• حالت ترمزی

$$2 > S \geq 1$$



130

Example



A 208-V, 10hp, four pole, 60 Hz, Y-connected induction motor has a full-load slip of 5 percent

- 1. What is the synchronous speed of this motor?**
- 2. What is the rotor speed of this motor at rated load?**
- 3. What is the rotor frequency of this motor at rated load?**
- 4. What is the shaft torque of this motor at rated load?**

131

Solution



$$1. \quad n_{sync} = \frac{120 f_e}{P} = \frac{120(60)}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

$$2. \quad n_m = (1 - s)n_s \\ = (1 - 0.05) \times 1800 = 1710 \text{ rpm}$$

$$3. \quad f_r = s f_e = 0.05 \times 60 = 3 \text{ Hz}$$

$$4. \quad \tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{2\pi \frac{n_m}{60}} \\ = \frac{10 \text{ hp} \times 746 \text{ watt / hp}}{1710 \times 2\pi \times (1/60)} = 41.7 \text{ N.m}$$

132

مدار معادل ماشین القایی

• مقایسه موتور القایی با ترانس تشابه:

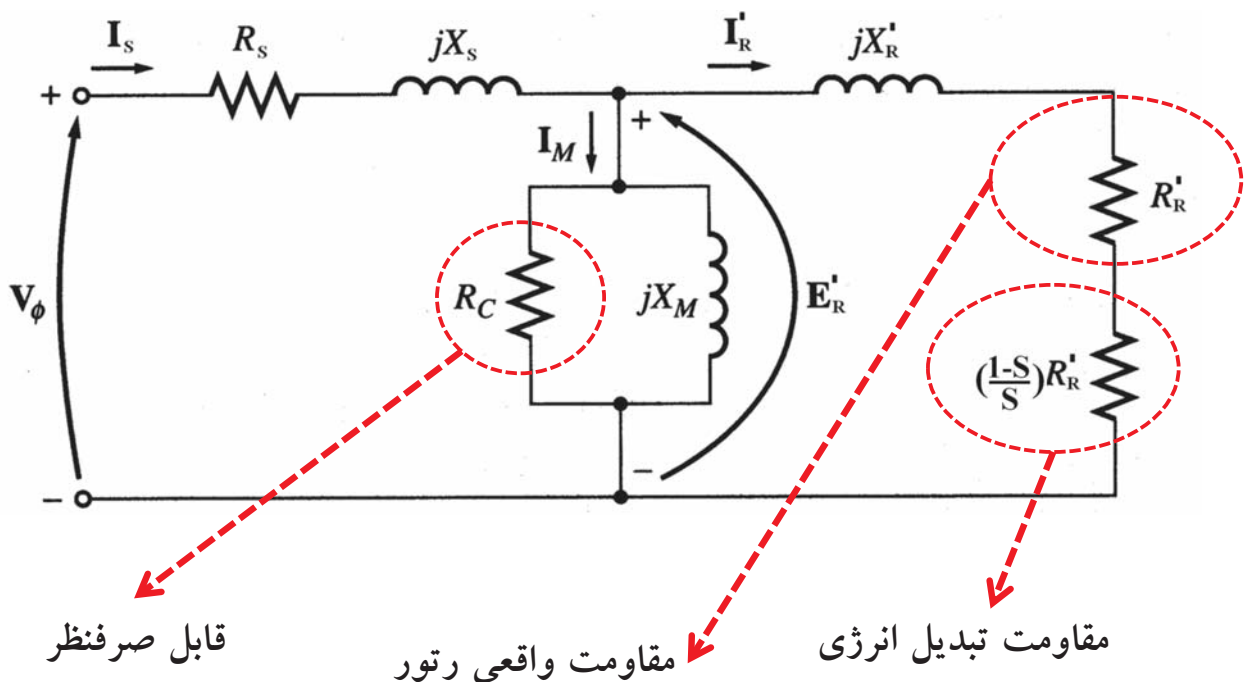
- هر دو از دو سیم پیچ برای تبادل انرژی بهره می برند.
- هر دو از سیستم واسط مغناطیسی برای تبدیل انرژی بهره می گیرند.

تفاوت:

- نوع تبدیل انرژی
- تفاوت فرکانس کاری دو سیم پیچ
- وجود فاصله هوایی در مسیر عبور شار برای موتور
- تلفاتهای مکانیکی در موتور

133

مدار معادل ماشین القایی

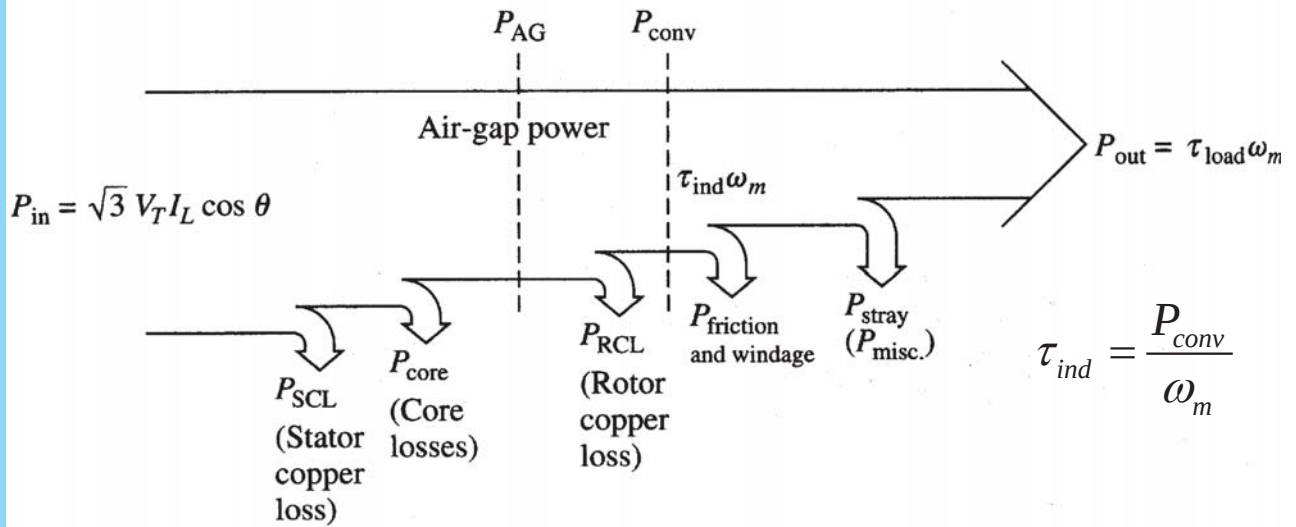


قوانین ارجاع مشابه ترانس

134



دیاگرام توزیع توان اکتیو



$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta = 3 V_{ph} I_{ph} \cos \theta$$

$$P_{SCL} = 3 I_s^2 R_s$$

$$P_{AG} = P_{in} - (P_{SCL} + P_{core})$$

$$P_{RCL} = 3 I_R'^2 R_R'$$

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$$

$$P_{out} = P_{conv} - (P_{f+w} + P_{stray})$$

135

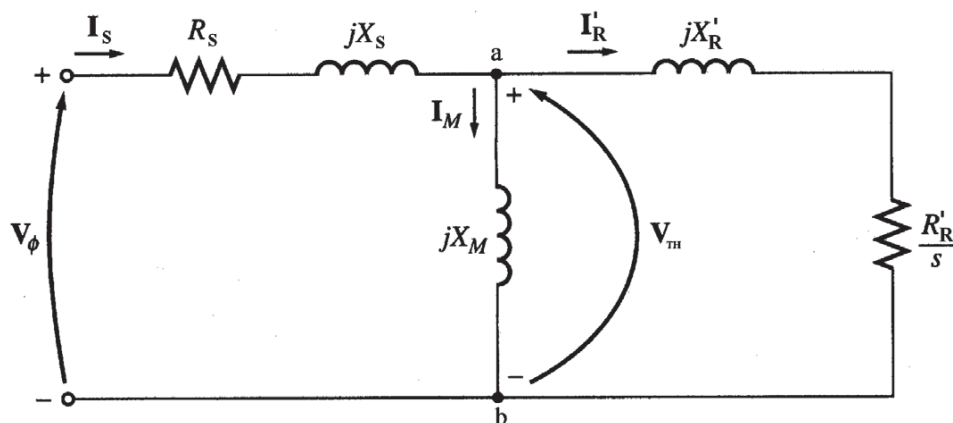
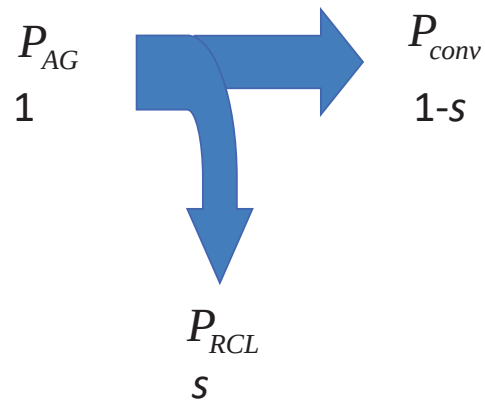


روابط توان

$$\frac{P_{AG}}{1} = \frac{P_{RCL}}{s} = \frac{P_{conv}}{1-s}$$

$$P_{conv} = (1-s)P_{AG}$$

$$P_{AG} = \frac{P_{RCL}}{s}$$



136

روابط توان

✓ توان مکانیکی ناخالص : $P_{conv} = P_m = (1-s) \cdot P_{AG} = P_{AG} - P_{RCL}$

✓ تلفات اهمی مسی رتور: $P_{RCL} = s \cdot P_{AG} = 3 \cdot I_R^2 \cdot R'_R$

✓ توان خروجی یا مکانیکی خالص : $P_{out} = P_m - (P_{wf} + P_{stray})$

✓ گشتاور خالص خروجی: $T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{\omega_s (1-s)}$

✓ گشتاور ناخالص الکترومغناطیسی: $T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{P_{AG} (1-s)}{\omega_s (1-s)} = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$

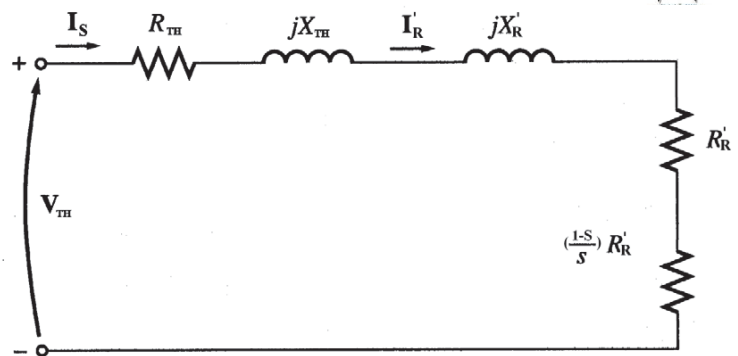
137



مدار معادل تونن استاتور دیده شده از رتور:

$$\bar{V}_{th} = \frac{jX_m}{R_s + j(X_s + X_m)} \cdot \bar{V}$$

$$Z_{th} = jX_m \parallel (R_s + jX_{ls}) = \frac{R_s + jX_{ls}}{1 + jX_m(R_s + jX_{ls})}$$



$$I'_R = \frac{V_{th}}{Z_{th} + Z'_R} = \frac{V_{th}}{\left(\frac{R'_R}{s} + R_{th} \right) + j(X_{th} + X'_R)}$$

$$|I'_R| = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(\frac{R'_R}{s} + R_{th} \right)^2 + (X_{th} + X'_R)^2}}$$

138

آزمایشهای موتور القایی

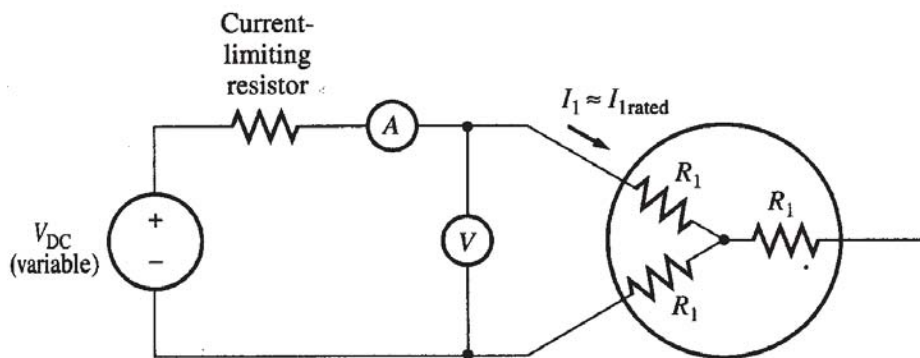
۱- آزمایش DC

۲- آزمایش بی باری (NLT)

۳- آزمایش رتور قفل شده (BRT)

139

آزمایش DC



اتصال مثلث

$$\frac{V_{DC}}{I_{DC}} = R_s^{\Delta} \parallel R_s^{\Delta} = \frac{2}{3} R_s^{\Delta}$$

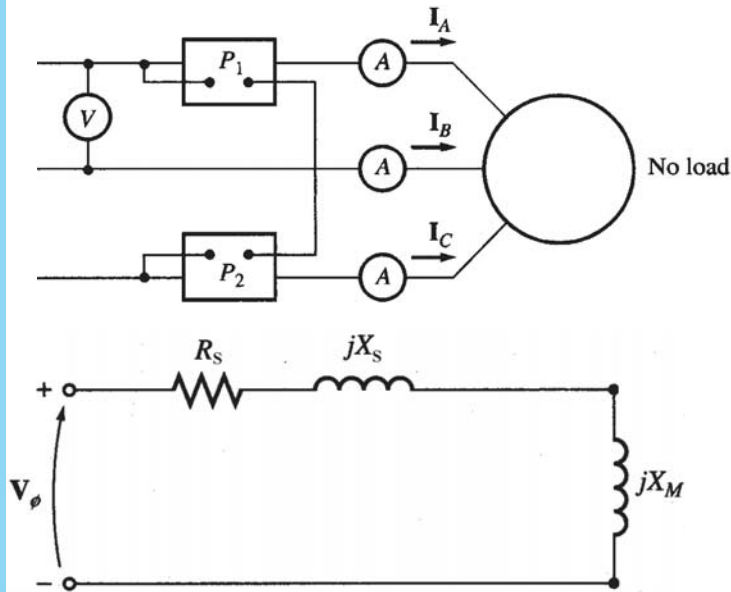
$$R_s = \frac{1}{3} R_s^{\Delta} = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}}$$

اتصال ستاره

$$R_s = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}}$$

140

۲- آزمایش بی باری (NLT)



➤ موتور بدون بار باشد.

➤ ولتاژ تغذیه موتور ولتاژ نامی است.

➤ مقادیر ولتاژ، جریان و توان اندازه گیری شود.

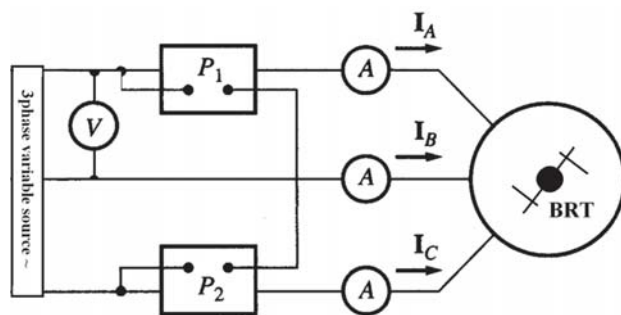
$$P_{NL} = P_{cus} + P_{rot}$$

$$P_{cus}^{\phi} = R_s I_{NL}^2$$

$$P_{rot} = P_{NL} - (3P_{cus}^{\phi})$$

141

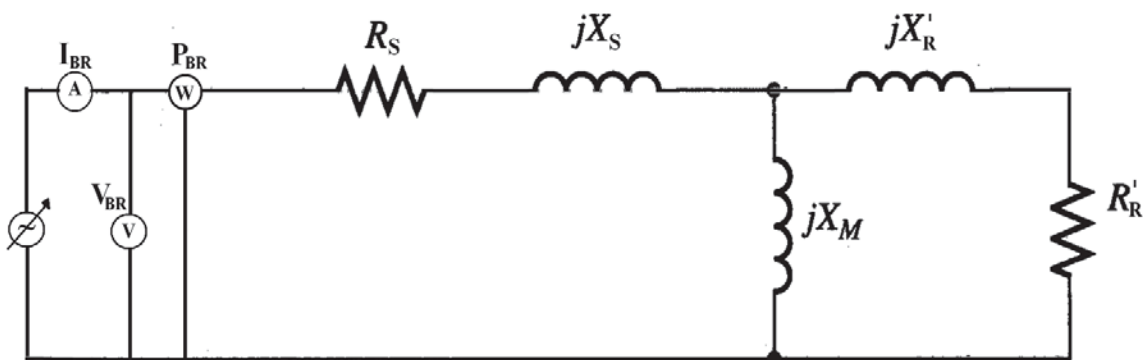
۳- آزمایش رتور قفل شده (BRT)



➤ رتور موتور قفل شود.

➤ موتور به یک منبع ولتاژ با دامنه قابل تنظیم و فرکانس ۲۵ درصد نامی متصل شود.

➤ مقادیر ولتاژ، جریان و توان اندازه گیری شود.



142

تحلیل نتایج آزمایشها

۱- در آزمایش DC مقاومت استاتور R_s بدست می آید.

۲- آزمایش بی باری

$$P_{Rot} = P_{NL} - (3R_s I_{NL}^2) \quad [1]$$

$$Z_{NL} = \frac{V_{NL}^{\phi}}{I_{NL}}$$

$$R_{NL} = \frac{P_{NL}^{\phi}}{I_{NL}^2}$$

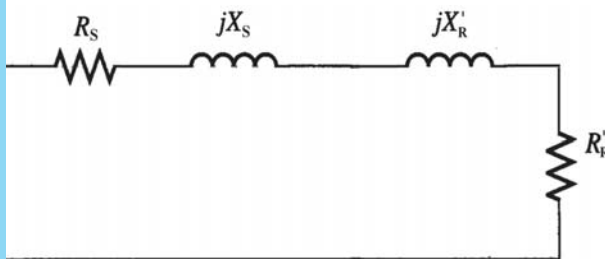


$$X_{NL} = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2}$$

$$X_s + X_m = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2} \quad [2]$$

143

تحلیل نتایج آزمایشها



۳- آزمایش رتور قفل شده

(الف) تحلیل تقریبی

(از هسته در برابر رتور صرفنظر شود)

$$P_{BR} = 3(R_s + R'_R)I_{BR}^2$$



$$R'_R = \frac{P_{BR}}{3I_{BR}^2} - R_s \quad [3]$$

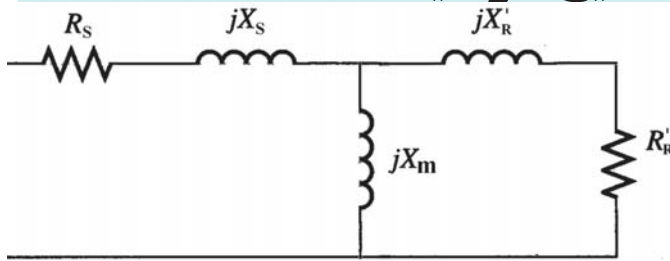
$$|Z_{BR}| = \frac{V_{BR}^{\phi}}{I_{BR}} = (R_s + R'_R) + j(X_s + X'_R) \Rightarrow X_s + X'_R = \sqrt{Z_{BR}^2 - (R_s + R'_R)^2}$$

$$X_s = X'_R = \frac{1}{2} \sqrt{Z_{BR}^2 - (R_s + R'_R)^2} \quad [4] \quad \text{در فرکانس } f'_s$$

$$\text{در فرکانس } f_s \quad X_s = X'_R = \frac{f_s}{f'_s} \frac{1}{2} \sqrt{Z_{BR}^2 - (R_s + R'_R)^2} \quad [5]$$

144

تحلیل نتایج آزمایشها



۳- آزمایش رتور قفل شده
(ب) روش دقیق

$$Z = jX_m \parallel (R'_R + jX'_R)$$

$$R = \text{Real}(Z) = \frac{X_m^2 R'_R}{R_R'^2 + (X_m + X'_R)^2}, R'_R \ll (X_m + X'_R)$$

$$R'_R = \left(\frac{X_m + X'_R}{X_m} \right)^2 R \quad [6]$$

$$P_{BR}^\phi = 3(R + R'_R)I_{BR}^2$$

$$R = \frac{P_{BR}^\phi}{I_{BR}^2} - R_s \quad [7]$$

$$|Z_{BR}| = \frac{V_{BR}^\phi}{I_{BR}} = (R_s + R) + j(X_s + X'_R)$$

$$X_s + X'_R = \sqrt{Z_{BR}^2 - (R_s + R)^2}$$

در فرکانس f_s

$$X_s \equiv X'_R = \frac{f_s}{f'_s} \frac{1}{2} (X_s + X'_R) \quad [8]$$

145

الگوریتم محاسبات دقیق

۱- محاسبه R_s از آزمایش DC

۲- محاسبه $X_m + X_s$ و P_{Rot} از آزمایش بی باری

۳- محاسبه R (مقاومت ظاهری رتور و هسته) از رابطه ۷

۴- محاسبه X_{BR} و به کمک X_s و X'_R با اعمال ضریب اصلاح فرکانس از رابطه ۸

۵- جایگزینی X در رابطه ۲ و بدست آوردن X_{BR}

۶- جایگزینی X و X'_R در رابطه ۶ و محاسبه R_{BR}

146

مثال

یک موتور القایی قفسه سنجایی با مشخصات زیر مفروض است
پارامترهای موتور را بدست آورید.
استاتور اتصال ستاره دارد.

motor

$$V_n = 2200\text{v}$$

$$P_n = 60\text{Hp}$$

$$f_n = 60\text{Hz}$$

$$p = 6$$

DC Test :

$$R_s = 2.8\Omega$$

NLT

$$V_{nl} = 2200\text{v}$$

$$P_{nl} = 1600\text{w}$$

$$f_{nl} = 60\text{Hz}$$

$$I_{nl} = 4.5\text{A}$$

BRT

$$V_{Br} = 270\text{v}$$

$$P_{Br} = 9000\text{w}$$

$$f_{Br} = 15\text{Hz}$$

$$I_{Br} = 25\text{A}$$

147

$$DC\ Test : \quad R_s = 2.8\Omega$$

حل:

$$NLT : P_{Rot} = P_{NL} - (3R_s I_{NL}^2) = 1600 - (3 \times 2.8 \times 4.5^2)$$

$$P_{Rot} = 1429.9\text{w}$$

$$R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3I_{NL}^2} = \frac{1600}{3 \times 4.5^2} \Rightarrow R_{NL} = 26.34\Omega$$

$$Z_{NL} = \frac{V_{NL}}{I_{NL}} = \frac{2200 / \sqrt{3}}{4.5} = 282.27\Omega$$

$$X_{NL} = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2} = \sqrt{282.27^2 - 26.34^2} = 281\Omega$$

$$X_s + X_m = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2} = 281\Omega$$

148

الف) روش تقریبی:

$$P_{BR} = 3(R_s + R'_R)I_{BR}^2$$

$$R'_R = \frac{P_{BR}}{3I_{BR}^2} - R_s = \frac{9000}{3 \times 25^2} - 2.8 = 2\Omega$$

$$Z_{BR} = \frac{V_{BR}}{I_{BR}} = \frac{270/\sqrt{3}}{25} = 6.24\Omega$$

$$X_s + X'_R = \sqrt{Z_{BR}^2 - (R_s + R'_R)^2} = \sqrt{6.24^2 - (2.8 + 2)^2} = 3.98$$

$$X_s \approx X'_R = \frac{f_s}{f'_s} \frac{1}{2} (X_s + X'_R) \Big|_{F_s} = \frac{60}{15} \frac{1}{2} (3.98) \Big|_{50Hz} = 7.96\Omega$$

$$X_s + X_m = 281\Omega \Rightarrow X_m = 281 - 7.96 = 273.04\Omega$$

149

ب) روش دقیق:

$$P_{BR} = 3(R_s + R)I_{BR}^2$$

$$R = \frac{P_{BR}}{3I_{BR}^2} - R_s = \frac{9000}{3 \times 25^2} - 2.8 = 2\Omega$$

$$Z_{BR} = \frac{V_{BR}}{I_{BR}} = \frac{270/\sqrt{3}}{25} = 6.24\Omega = |(R_s + R) + j(X_s + X'_R)|$$

$$X_s + X'_R = \sqrt{Z_{BR}^2 - (R_s + R)^2} = \sqrt{6.24^2 - (2.8 + 2)^2} = 3.98$$

$$X_s \approx X'_R = \frac{f_s}{f'_s} \frac{1}{2} (X_s + X'_R) = \frac{60}{15} \frac{1}{2} (3.98) \Big|_{50Hz} = 7.96\Omega$$

$$NLT : X_s + X_m = 281\Omega \Rightarrow X_m = 281 - 7.96 = 273.04\Omega$$

$$R'_R = \left(\frac{X_m + X'_R}{X_m} \right)^2 R = \left(\frac{273.04 + 7.96}{273.04} \right)^2 \times 2 \Rightarrow R' = 2.12\Omega$$

150

تمرین



The following test data were taken on a 7.5-hp, four-pole, 208-V, 60-Hz, design A, Y-connected IM having a rated current of 28 A.

DC Test:

$$V_{DC} = 13.6 \text{ V}$$

$$I_{DC} = 28.0 \text{ A}$$

No-load Test:

$$V_l = 208 \text{ V}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$I = 8.17 \text{ A}$$

$$P_{in} = 420 \text{ W}$$

Locked-rotor Test:

$$V_l = 25 \text{ V}$$

$$f = 15 \text{ Hz}$$

$$I = 27.9 \text{ A}$$

$$P_{in} = 920 \text{ W}$$

Sketch the per-phase equivalent circuit of this motor.

151

گستاور الکترومغناطیسی



$$\left. \begin{aligned} P_e &= 3 \cdot \frac{(1-S)}{S} R'_R \cdot I_R'^2 \\ P_m &= T \cdot \omega_m \end{aligned} \right\} \Rightarrow T \cdot \omega_m = 3 \cdot \frac{(1-S)}{S} R'_R \cdot I_R'^2$$

$$T_L = T_e = \frac{3}{\omega_m} \cdot \frac{(1-S)}{S} R'_R \cdot I_R'^2$$

$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega_{er} \Rightarrow T_e = \frac{3P}{2\omega_m} \cdot \frac{(1-S)}{S} R'_R \cdot I_R'^2$$

$$S = \frac{\omega_e - \omega_{er}}{\omega_e} \Rightarrow \omega_{er} = (1-S) \omega_e$$

152

$$T_e = \frac{P}{2} \times \frac{3}{2\pi f_s} \times \frac{R'_R}{S} \times I_R'^2$$

$$I'_R = \frac{V_{th}}{\left(\frac{R'_R}{S} + R_{th} \right) + j(X_{th} + X'_R)}$$

$$\Rightarrow |I'_R| = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(\frac{R'_R}{S} + R_{th} \right)^2 + (X_{th} + X'_R)^2}}$$

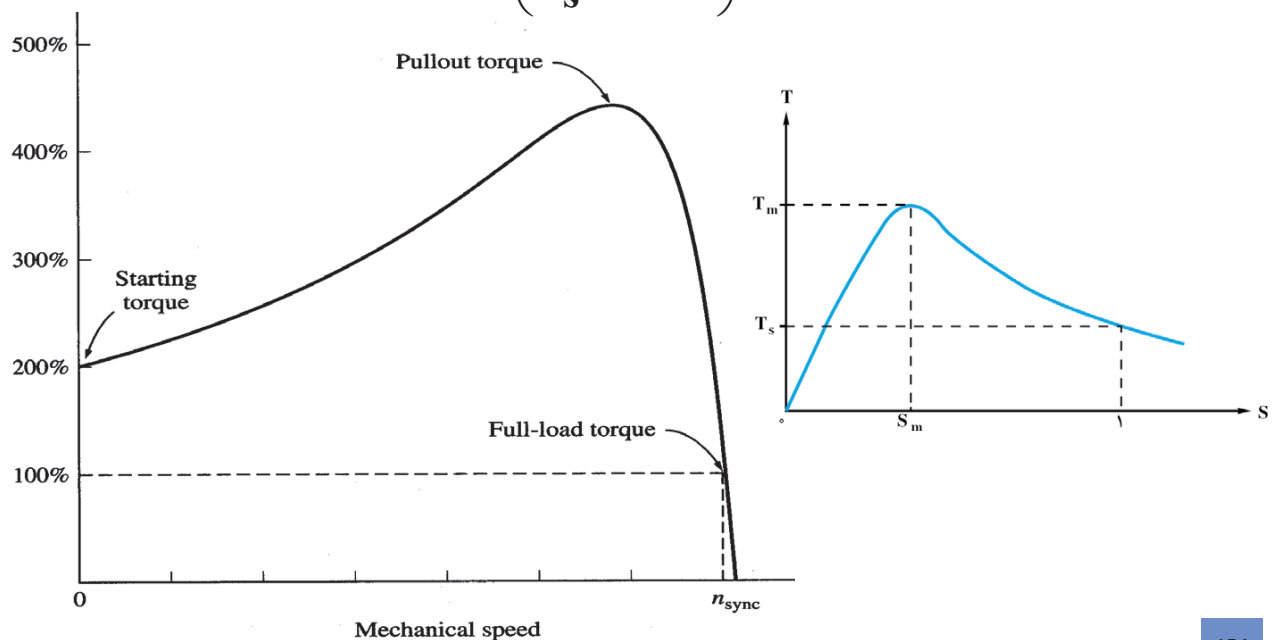
$$T_e = \frac{P}{2} \times \frac{3}{2\pi f_s} \times \frac{R'_R}{S} \times \frac{V_{th}^2}{\left(\frac{R'_R}{S} + R_{th} \right)^2 + (X_{th} + X'_R)^2}$$

153

گشتاور الکترومغناطیسی از روی مدار معادل تونن



$$T_e = \frac{P}{2} \times \frac{3}{2\pi f_s} \times \frac{R'_R}{S} \times \frac{V_{th}^2}{\left(\frac{R'_R}{S} + R_{th} \right)^2 + (X_{th} + X'_R)^2}$$



154

لغزش در گشتاور ماکزیمم

چون گشتاور الکترومغناطیسی متناسب است با توان فاصله هوایی پس برای داشتن گشتاور ماکزیمم کافی است در مدار معادل تونن امپدانس بار را (شاخه رتور) برابر مزدوج مختلط امپدانس منبع (مدل تونن) در نظر بگیریم.

$$R_{th} + jX_{th} = \frac{R'_R}{S} - jX'_R \Rightarrow R_{th} + j(X_{th} + X'_R) = \frac{R'_R}{S}$$

$$\frac{R'_R}{S} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2} \Rightarrow S = \frac{R'_R}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2}}$$

$$S_{Tmax} = \frac{R'_R}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2}}$$

$$\text{if } R_{th} \approx 0 \text{ then } S_{Tmax} = \frac{R'_R}{(X_{th} + X'_R)}$$

155

بررسی گشتاور ماکزیمم

$$T_{max} = \frac{P}{2} \frac{3}{\omega_e} \cdot \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2} \cdot \frac{V_{th}^2}{\sqrt{\left(\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2} + R_{th}\right)^2 + (X_{th} + X'_R)^2}}$$

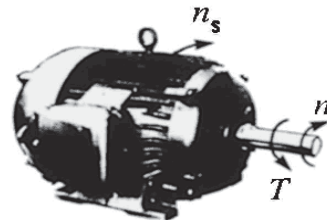
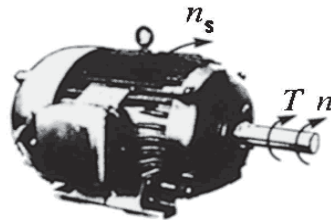
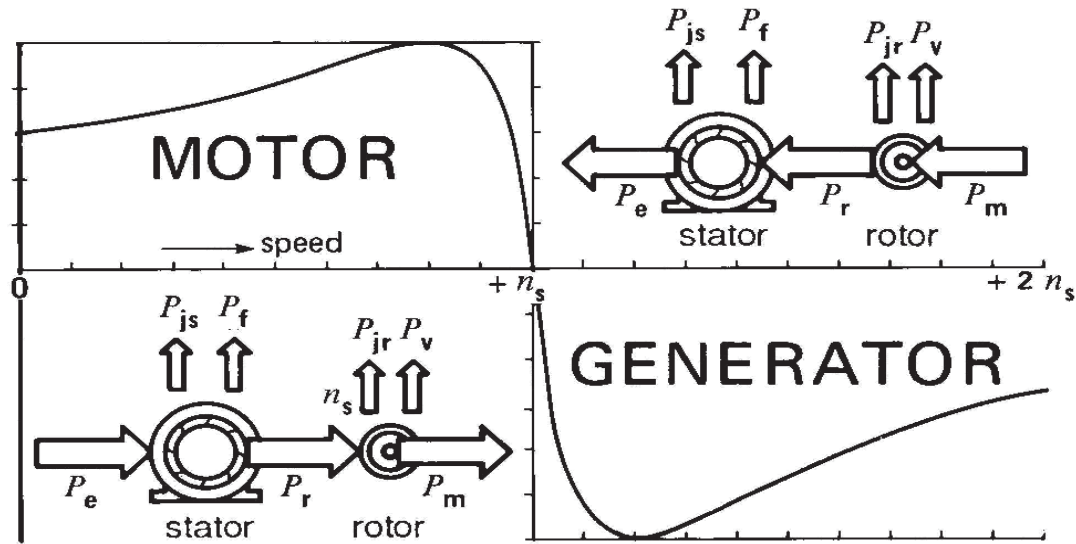
$$\text{مخرج کسر فوق} = 2\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2} \times (\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2} + R_{th})$$

$$T_{max} = \frac{P}{4} \frac{3}{2\pi f_s} \frac{V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2}}$$

$$\text{if } R_{th} \approx 0 \text{ then } T_{max} = \frac{P}{4} \frac{3}{2\pi f_s} \frac{V_{th}^2}{X_{th} + X'_R}$$

156

منحنی مشخصه گشتاور-سرعت ماشین القایی

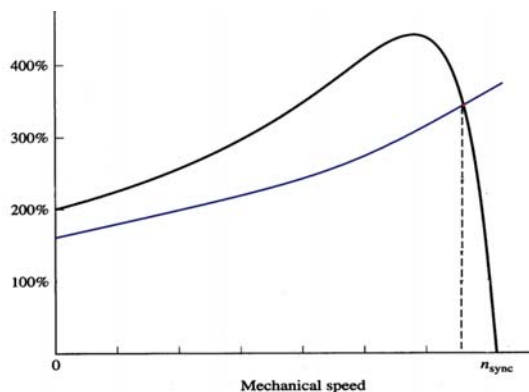


157

نقاط کار موتور القایی

$$\sum T = J \cdot \alpha \Rightarrow |T_e - T_L| = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$\text{steady state } \omega_m = cte \Rightarrow \frac{d\omega_m}{dt} = 0 \Rightarrow T_e = T_L$$

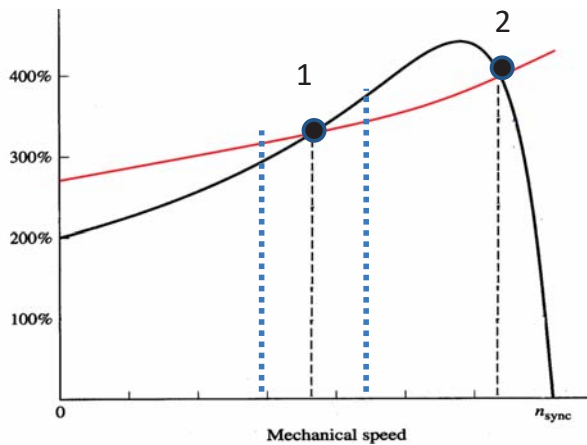


نقطه کار موتور از محل تلاقی مشخصه گشتاور-سرعت بار با مشخصه موتور حاصل می گردد.

158

نقاط کار موتور القایی

بطور معمول نقطه کاری که در بخش نزولی مشخصه موتور باشد، نقطه کار پایدار سیستم محسوب می گردد.



نقطه کار ۱ ناپایدار ولی نقطه کار ۲ پایدار است.

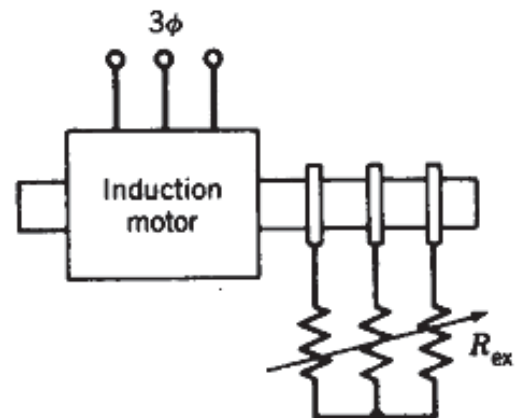
159

کنترل مشخصه گشتاور سرعت موتور به کمک مقاومت رتور

افزودن مقاومت خارجی به هر فاز سیم پیچی رتور، در موتورهای با رتور سیم بندی شده

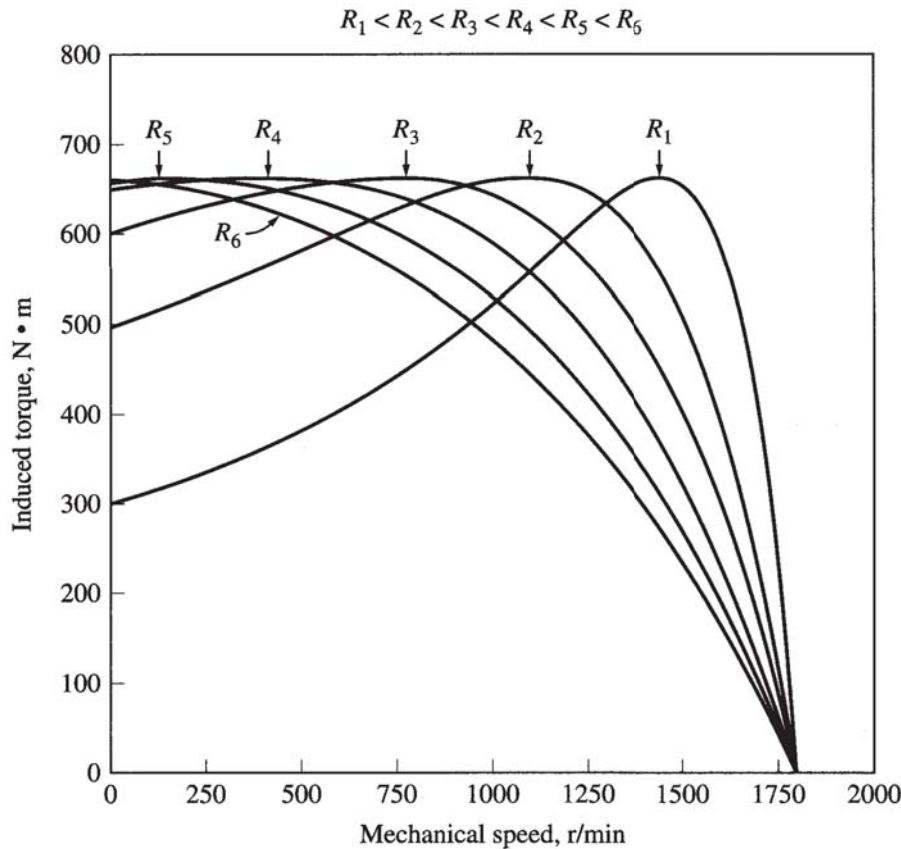
$$S_{Tmax} = \frac{R'_R + R'_{ex}}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2}}$$

$$T_{max} = cte$$



160

کنترل مشخصه گشتاور سرعت موتور به کمک مقاومت رتور

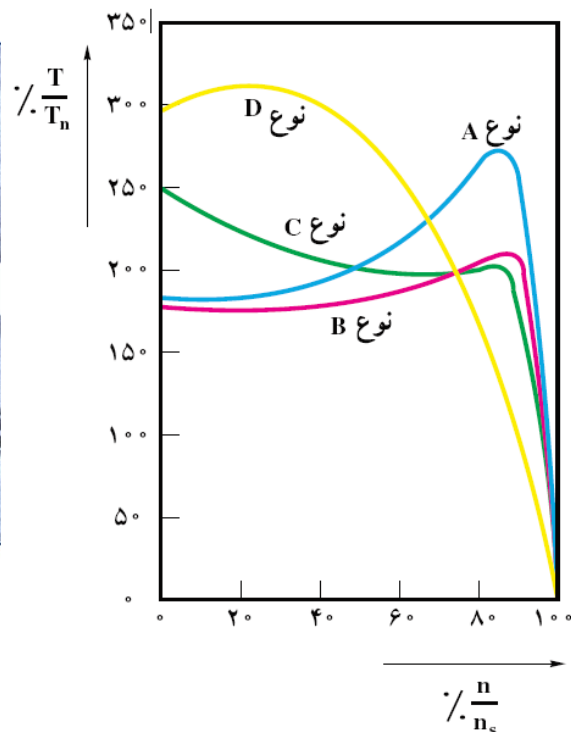
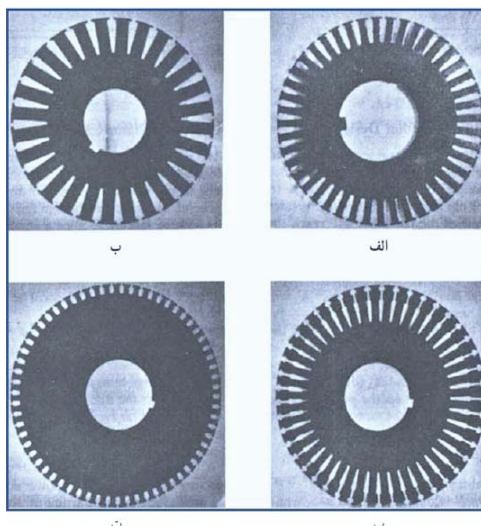


افزودن مقاومت خارجی
به هر فاز سیم پیچی
رتور، در موتورهای با
رتور سیم بندی شده

161

کلاس موتور القایی قفسه سنجابی:

- الف - نوع A : با شیارهای بزرگ و نزدیک به سطح (رتور با امپدانس کم)
- ب - نوع B : با شیارهای بزرگ و عمیق (رتور با راکتانس زیاد)
- پ - نوع C : رتور دو قفسی (رتور با امپدانس دوگانه)
- ت - نوع D : با شیارهای کوچک نزدیک به سطح (رتور با مقاومت زیاد)



162

مثال

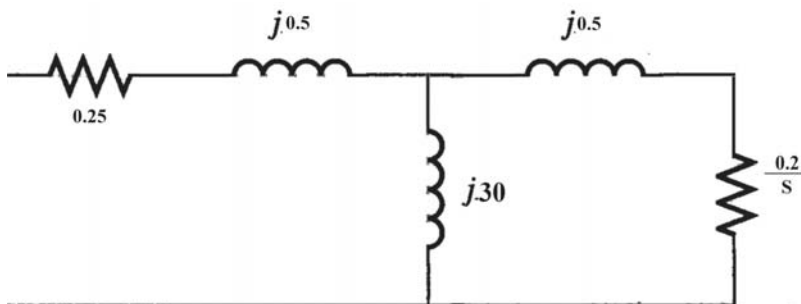
یک موتور القایی سه فاز چهارقطب، ۶۰ هرتز، ۴۶۰ ولت با سرعت نامی ۱۷۴۰ دور بر دقیقه مفروض است. مقادیر مدار معادل ماشین به صورت زیر می باشد و تلفات چرخشی ۱۷۰۰ وات است. به هر یک از قسمت‌های زیر پاسخ دهید:

$$R_s = 0.25\Omega ; R'_R = 0.2\Omega; X_s = 0.5\Omega; X'_R = 0.5\Omega; X_m = 30\Omega$$

الف) اگر موتور به ولتاژ نامی متصل شود جریان راه اندازی چقدر است؟

(ولتاژی که ماهیت آن معلوم نیست ولتاژ خط است)

163



$$S = 1; Z_{in} = j30 \parallel (0.5j + 0.2) + 0.25 + j0.5 = 1.08 \angle -66^\circ \Omega$$

$$I_{st} = \frac{V_s}{Z_{in}} = \frac{460 / \sqrt{3}}{1.08 \angle -66^\circ} = 245.9 \angle -66^\circ A$$

ب) گشتاور راه انداز ماشین چقدر است؟

$$\left. \begin{aligned} T_e &= \frac{3P}{2w_e} \cdot \frac{R'_R}{S} \cdot I_r'^2 \\ I_r' &= \frac{j30}{0.2 + j30} I_{st} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} S &= 1; P = 4; \\ w &= 2\pi f_s = 120\pi \end{aligned} \quad T_{st} = 185.2 N.m$$

164

ج) لغزش نامی موتور را محاسبه کنید؟

$$n_s = 2\pi f_s \times \frac{60}{2\pi} \times \frac{2}{P} = 1800 \text{ rpm}$$

$$S_n = \frac{1800 - 1740}{1800} = 0.033$$

د) جریان نامی موتور را محاسبه کنید؟

$$S = 0.033; Z_{in} = j30 \parallel (0.5j + \frac{0.2}{0.033}) + 0.25 + j0.5$$

$$I_n = \frac{V_s}{Z_{in}} = \frac{460 / \sqrt{3}}{5.89 + 2.11j} = 43.19 \angle -19.7^\circ A$$

165

ه) ضریب توان نامی و گشتاور نامی موتور را محاسبه کنید؟

$$\text{ضریب توان} = \cos(19.7) = 0.94$$

$$Z_{th} = jX_m \parallel (R_s + jX_{ls}) = j30 \parallel (0.25 + j0.5) = 0.24 + j0.49$$

$$\bar{V}_{th} = \frac{jX_m}{R_s + j(X_s + X_m)} \cdot \bar{V} = \frac{j30}{0.25 + j(0.5 + 30)} \cdot \frac{460}{\sqrt{3}} = 261.3$$

$$I'_R = \frac{V_{th}}{Z_{th} + Z'_R} = \frac{261}{\left(\frac{0.2}{0.033} + R_{th}\right) + j(X_{th} + 0.5)} = 40.92 \angle -8.9^\circ$$

$$T_e = \frac{3P}{2\omega_e} \cdot \frac{R'_R}{S} \cdot I_r'^2 = \frac{3 \times 4}{2 \times 2\pi \times 60} \cdot \frac{0.2}{0.033} \times 40.92^2$$

$$T_e = 161.5 \text{ Nm}$$

166

و) راندمان موتور در شرایط نامی چند است؟

$$P_m = T_e \cdot \omega_{mr} = 161.5 \times 1740 \times \frac{2\pi}{60} = 29427.3 \text{ W}$$

$$P_{out} = P_m - P_{rot} = 29427.3 - 1700 = 27727.3 \text{ W} \quad \text{توان مفید مکانیکی}$$

$$P_{in} = 3V_{ph} I_{ph} \cos(\varphi) = 3 \times \frac{460}{\sqrt{3}} \times 43.19 \times 0.94 = 32349 \text{ W}$$

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{27727.3}{32349} \times 100 = 85.7\%$$

ز) درچه لغزشی گشتاور ماکزیمم رخ می دهد؟

$$S_{T_{max}} = \frac{R'_R}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2}} = \frac{0.2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2}} = 0.196$$

167

ح) گشتاور ماکزیمم چقدر است؟

$$T_{max} = \frac{P}{4} \frac{3}{2\pi f_s} \frac{V_{th}^2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2} + R_{th}} = 431.68 \text{ N.m}$$

ت) اگر بخواهیم ماکزیمم گشتاور در زمان راه اندازی باشد به هر فاز رتور چند اهم مقاومت باید اضافه کرد؟ $(N_s/N_r)=10$

$$R'_R + R'_x = \text{مقاومت ظاهری رتور} \quad S_{T_{max}} = 1 \Rightarrow 1 = \frac{R'_R + R'_x}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_R)^2}}$$

$$\Rightarrow R'_x = 0.818 \Omega$$

$$R_x = \left(\frac{N_r}{N_s}\right)^2 \times R' = \frac{1}{100} \times 0.818 \Omega$$

168

تمرین

پارامترهای مدار معادل در طرف استاتور هر فاز یک موتور آسنکرون سه فازه ۱۰hp با ولتاژ نامی ۴۶۰ V ولت و ۶۰ Hz هرتز و ۴ قطبی و دور نامی ۱۷۶۵.۷ با اتصال ستاره سیم پیچی استاتور از این قرار می باشد: تلفات چرخشی ۲۷۶/۷W می باشد.

$$\bar{V}_s = 460 / \sqrt{3} \angle 0$$

$$P_n = 10 \times 746 = 7460 \text{ W}$$

$$R_s = 0.6837\Omega, \quad R'_R = 0.451\Omega$$

$$X_s = 1.57\Omega, \quad X'_R = 1.57\Omega \quad X_m = 56\Omega$$

با استفاده از مدار معادل واقعی موتور در ولتاژ و فرکانس نامی کمیات زیر را محاسبه کنید:

الف) لغزش و دور نامی ب) لغزش ماکزیمم ج) گشتاور ماکزیمم د) گشتاور راه اندازی ه) جریان راه اندازی و) راندمان ز) ضریب قدرت ح) مقاومت خارجی لازم که باید در مدار، ته، با ه فاز سه، ک د تا گشتاور، راه انداز، با د با

169

پاسخ های نهایی

$$R_{th} = 0.6468\Omega$$

$$X_{th} = 1.53486$$

$$\bar{V}_{th} = 258.32 \angle 0.68$$

$$P_{out} = 7460W$$

$$P_m = 7736.7W$$

$$s_n = 0.019$$

$$N_r = 1765.7 \text{ rpm}$$

$$s_{max} = 0.1422$$

$$\omega_s = 60\pi \text{ (red / sec)}$$

$$T_{max} = 139.068Nm$$

$$T_{Start} = 44.1642Nm$$

$$\bar{I}_r = 78.44 \angle -69.848A$$

$$\bar{I}_{Start} = 80.64A \angle -70.297$$

$$Z_{in} = 19.88 + j11.01 = 22.726 \angle 28.98\Omega$$

$$\bar{I}_s = 11.686 \angle -28.98 \text{ A}$$

$$P.F = \cos\phi = \cos 28.98^\circ = 0.875$$

$$P_{in} = 8145.091W$$

$$\eta = 91.59\%$$

$$R_{ext} = 2.3153\Omega$$