



تئوری جامع ماشینهای الکتریکی



نیمسال اول ۸۴-۸۳



مراجع اصلی :

1. “Dynamic simulation of electric machinery” Chee-Mun Ong
1998, Printice Hall Company
2. “Analysis of electric machinery” Paul.c krause 1991, Mc
Graw Hill Company)



دیگر مراجع :

3." General theory of electrical machines"

Bimbhara

1983, Khana publishers Delhi



سرفصلهای درس

- مقدمه : مفهوم مدل، انواع مدل
- مدلسازی و شبیه سازی با **simulink**
- مدلسازی ترانسفورماتور تکفاز
- مدلسازی بار
- ارائه مدل و بلوکهای شبیه سازی در حالت خطی
- ارائه مدل و بلوکهای شبیه سازی در حالت اشباع
- مدلسازی ترانسفورماتور سه فاز
- ارائه مدل و بلوکهای شبیه سازی در حالت خطی و اشباع



سرفصلهای درس

- تبدیلات در مهندسی برق
- تبدیلات کنکوردیا، پارک و...
- انتقال توان و تبدیلات
- تبدیل $qd0$ در مرجع ساکن
- تبدیل $qd0$ در مرجع گردان با سرعت سنکرون
- تبدیل $qd0$ در مرجع گردان با سرعت دلخواه



سرفصلهای درس

ماشین القائی

- مقدمه
- روابط ولتاژ و جریان
- روابط شارها و اندوکتانسها
- اعمال تبدیل پارک
- مدلسازی و ارائه بلوکها
- وارد کردن مسئله اشباع در مدلسازی



سرفصلهای درس

- بررسی رفتار موتور القایی
- مقادیر ویژه ماشین القایی و نحوه محاسبه آنها
- ارتباط بین مقادیر ویژه و پارامترهای موتور
- ماشینهای القایی تکفاز
- مدلسازی و ارائه بلوکها



سرفصلهای درس

ماشین سنکرون

- مقدمه
- بررسی مدل‌های ساده ماشین سنکرون در شرایط گذرا
- مدلسازی دینامیک
- روابط ولتاژ جریان
- روابط شارها و اندوکتانسها



سرفصلهای درس

- ماشین سنکرون
- اعمال تبدیل پارک
- اندوکتانسهای گذرا وتند گذر
- ثابتهای زمانی
- مدسازی ماشین سنکرون آهنربای دائم



نحوه ارزشیابی :

میان ترم ۲۵%

پایان ترم ۳۵%

پروژه و تکالیف ۴۰%

حداکثر 10% جابجائی



قسمت اول

مدلسازی و شبیه سازی



1) مدل ؟

مجموعه روابط ریاضی حاکم بر یک سیستم که توانایی پیش بینی رفتار آن سیستم را فراهم میکند.

2) مدل سازی ؟

بدست آوردن روابط ریاضی حاکم بر یک سیستم از طریق تحلیل، تجربه

3) شبیه سازی ؟

پیاده کردن یک مدل برای بدست آوردن پاسخ سیستم به ورودی یا ورودیهای مشخص



مدل :

مدلهای ریاضی به انواعی تقسیم میشوند :

خطی / غیر خطی

فشرده / گسترده

استاتیک / دینامیک

پیوسته / گسسته

افزایش دقت مدل ← افزایش پیچیدگی مدل

افزایش دقت مدل ← کاهش سرعت محاسبات



فرآیند شبیه سازی :

- 1- بدست آوردن روابط ریاضی حاکم بر مدل
- 2- انتخاب متغیرهای حالت، ورودیها و خروجیها
- 3- بازنویسی مجدد معادلات
- 4- پیاده سازی در محیط شبیه سازی (بدست آوردن بلوکها)
- 5- انتخاب روش انتگرال گیری، گام محاسبات و تفرانس
- 6- اجرای شبیه سازی



بررسی فرآیند مذکور برای یک سیستم ساده :

مدار RLC ساده

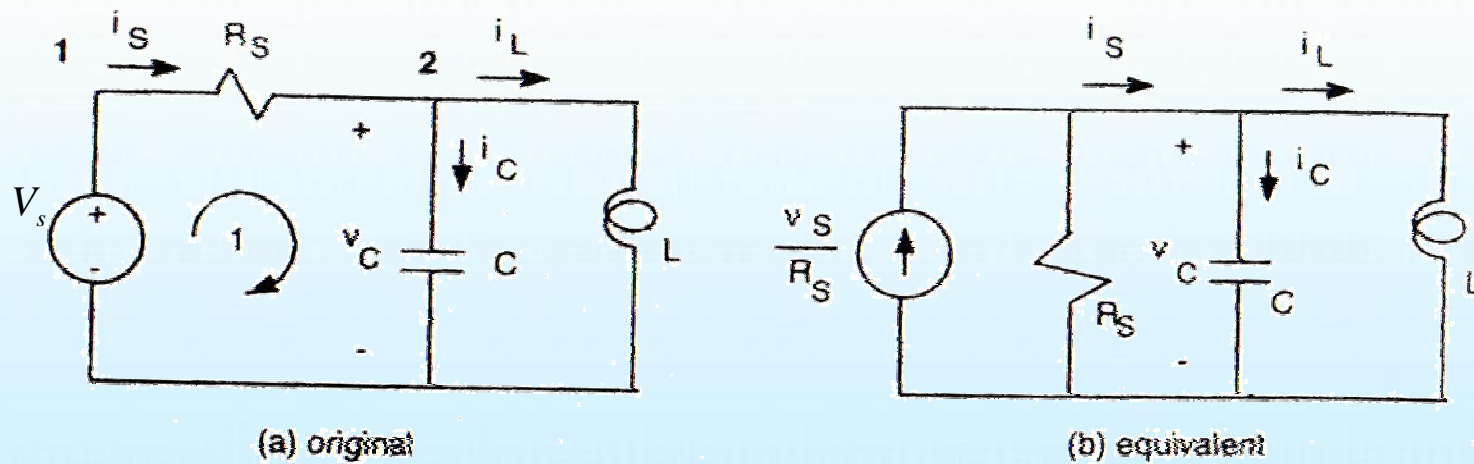


Figure 2.5 Parallel RLC circuit.

مدار RLC ساده

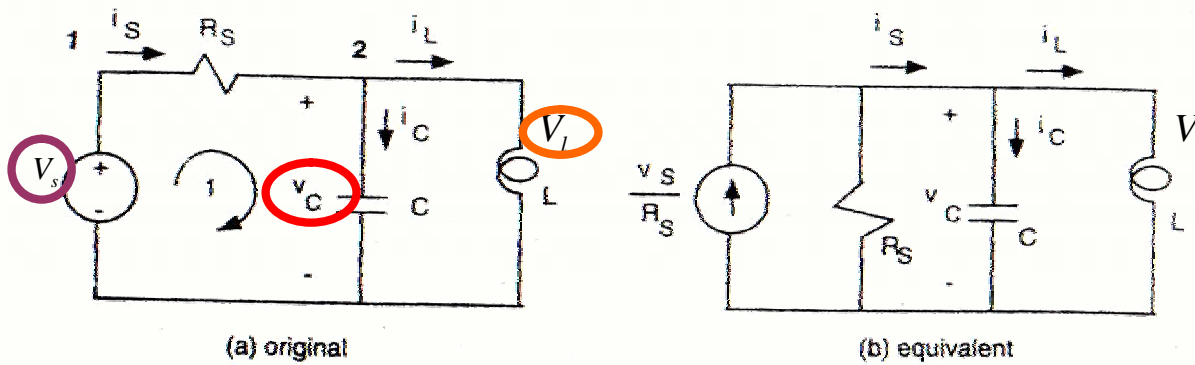


Figure 2.5 Parallel RLC circuit.

$$V_s = \left(\frac{V_C - V_s}{R_c} \right)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$V_c = V_L$$

$$V_c = \frac{1}{C} \int i_c dt$$

$$i_c = i_s - i_L$$



- تعیین متغیرهای حالت، ورودی و خروجی

- باز نویسی معادلات

- اجتناب از عملگر مشتق

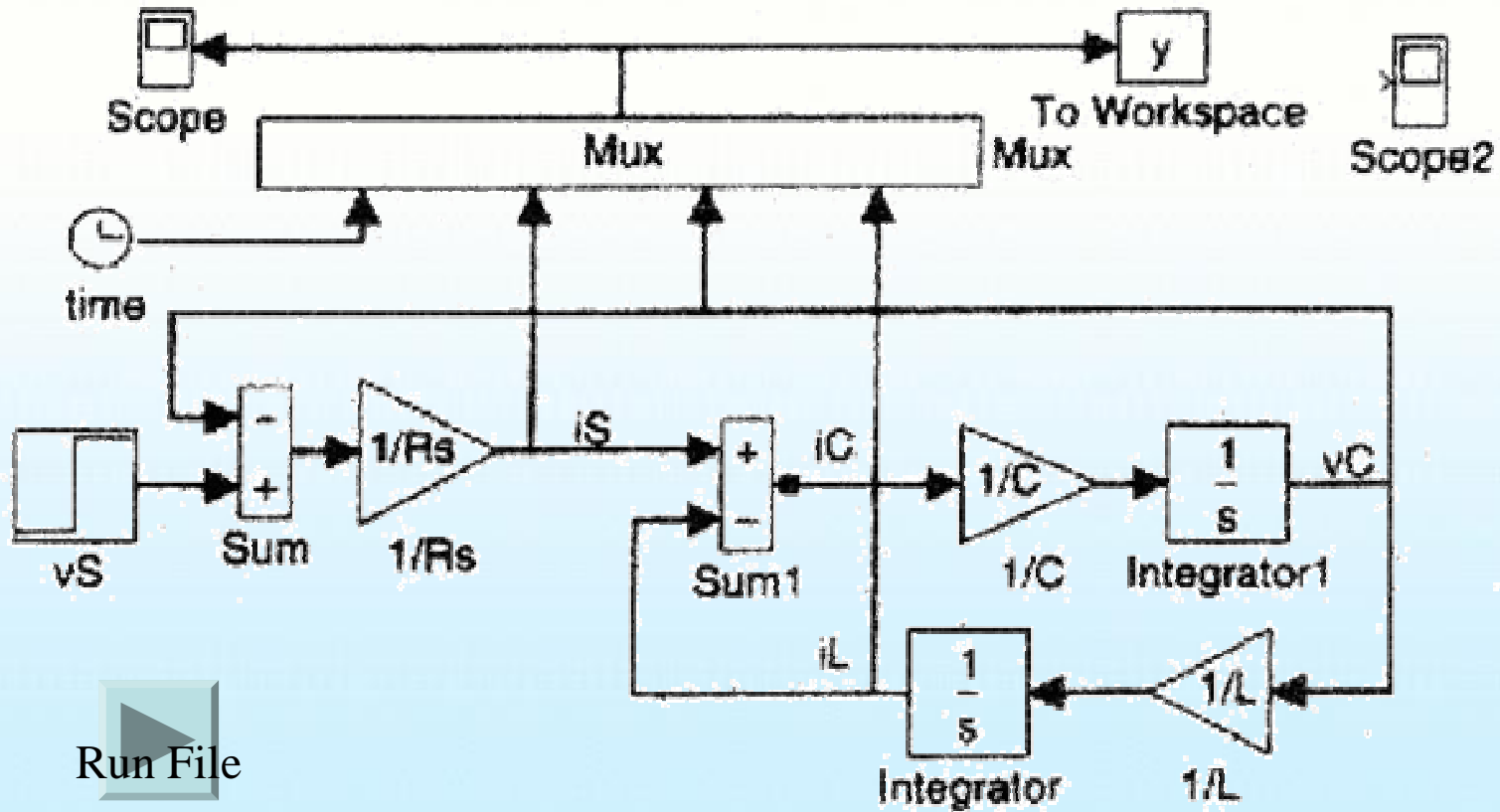
$$V_c = L \frac{di_L}{dt}$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int V_c dt$$

$$V_c = \frac{1}{C} \int \left[\left(\frac{V_c - V_s}{R_c} \right) - i_L \right] dt$$



بعد از بدست آوردن معادلات بلوکها را برای اجرای شبیه سازی بصورت زیر رسم میکنیم :





قسمت سوم

مدلسازی دینامیکی ترانسفورماتور تکفاز



مدلسازی دینامیکی ترانسفورماتور تکفاز :

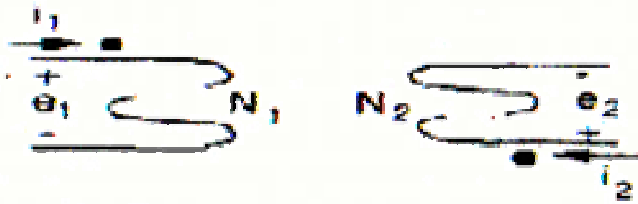
برای مدلسازی ترانسفورماتور تکفاز ابتدا مدلی برای ترانسفورماتور ایده آل بدست می آوریم.

ترانسفورماتور ایده آل

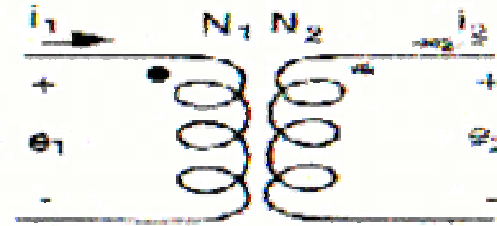
- جریان مغناطیس کنندگی آن برابر صفر است.
- تلفات هسته آن صفر در نظر گرفته میشود.
- شارهای پراکندگی آنرا صفر در نظر میگیریم.
- تلفات اهمی آن نیز صفر در نظر گرفته میشود.



در ترانسفورماتور ایده ال معادلات زیر برقرار میباشد:



(a) Windings and core of a two-winding transformer



(b) Circuit symbol of a two-winding transformer



(c) Referred value of Z_2

$$\sum_{j=1}^2 n_j i_j = 0 \rightarrow \begin{cases} \frac{i_1}{i_2} = \frac{n_2}{n_1} \\ e_1 = n_1 \frac{df_1}{dt} \\ e_2 = n_2 \frac{df_2}{dt} \end{cases} \Rightarrow f_1 = f_2 = f_m \Rightarrow \frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2}$$



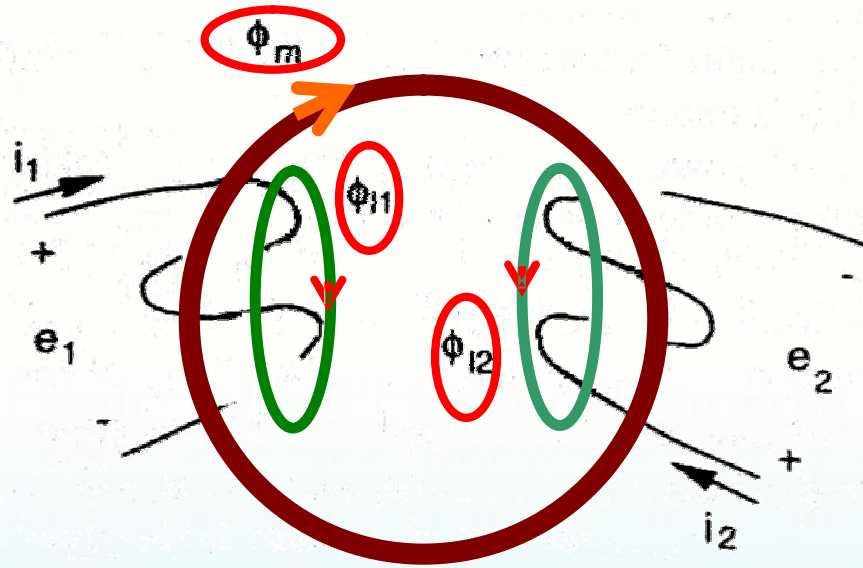
برای نزدیک کردن مدل به واقعیت :

• هسته ایدآل در نظر گرفته نمیشود (ولی کماکان از تلفات هسته صرف نظر میشود)

(
(

• مقاومت اهمی سیم پیچی در نظر گرفته میشود

٢) ترانسفورماتور واقعی :



$$f_1 = f_{L1} + f_m$$

$$l_1 = N_1 f_1 = N_1 f_{L1} + N_1 f_m$$

$$f_2 = f_{L2} + f_m$$

$$l_2 = N_2 f_2 = N_2 f_{L2} + N_2 f_m$$



روابط شاردها را بر
اساس پرمانس مینویسیم :

$$MMF = \mathfrak{R}f$$

$$MMF = \frac{f}{P}$$

$$I_1 = N_1 \left[(N_1 i_1 P_{L1}) + (N_1 i_1 + N_2 i_2) P_m \right]$$



$$I_1 = \underbrace{(N_1^2 P_{L1} + N_1^2 P_m)}_{L_{11}} i_1 + \underbrace{(N_1 N_2 P_m)}_{L_{12}} i_2$$



$$\& \longrightarrow I_2 = \underbrace{\begin{pmatrix} N_1 & N_2 & P_m \\ 1 & 4 & 2 \\ L_{21} & 4 & 3 \end{pmatrix}}_{L_{21}} i_1 + \underbrace{\begin{pmatrix} N_1^2 P_{L_1} + N_2^2 P_m \\ 1 & 4 & 4 \\ L_{22} & 2 & 4 \\ 4 & 4 & 3 \end{pmatrix}}_{L_{22}} i$$

ماتریس اندوکتانسهای ترانسفورماتور

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

↑ ?
↓ ?

$$L_{11} = L_{L1} + L_{m1}$$

$$L_{22} = L_{L2} + L_{m2}$$



$$\frac{L_{m_1}}{L_{m_2}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

رابطه بین اندوکتانسهای مغناطیسی :

جریان مغناطیس کنندگی معادل :

$$\begin{aligned}
 N_1 \mathbf{f}_m &= N_1 (\mathbf{f}_{m_1} + \mathbf{f}_{m_2}) = L_{m_1} i_1 + \frac{N_1}{N_2} N_2 \mathbf{f}_{m_2} \\
 &= L_{m_1} i_1 + \frac{N_1}{N_2} L_{m_2} i_2 = L_{m_1} \left(i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \right)
 \end{aligned}$$



معادلات ولتاژ- جریان ترانسفورماتور :

$$V_1 = r_1 i_1 + e_1$$

$$V_2 = r_2 i_2 + e_2$$

ولتاژ القایی را بر اساس اندوکتانسها و جریانها بازنویسی میکنیم :

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} = L_{L1} \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{N_2}{N_1} \frac{di_2}{dt} \right)$$

$$e_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} = L_{L2} \frac{di_2}{dt} + L_{m2} \left(\frac{di_2}{dt} + \frac{N_1}{N_2} \frac{di_1}{dt} \right)$$



انتقال ولتاژ القایی ثانویه به اولیه :

$$\begin{cases} e_1 = L_{L1} \frac{di_1}{dt} + \underline{L_{m1}} \frac{d}{dt} (i_1 + \underline{i'_2}) \\ e'_2 = L'_{L2} \frac{di'_2}{dt} + \underline{L_{m1}} \frac{d}{dt} (i_1 + \underline{i'_2}) \end{cases}$$



جایگذاری معادل ولتاژ القایی در روابط ولتاژ - جریان ترانسفورماتور

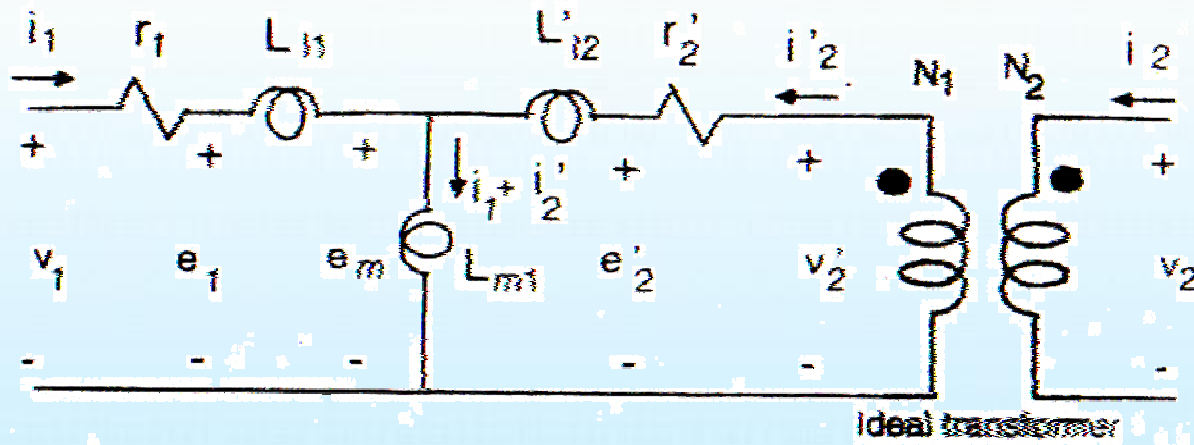
$$V_1 = r_1 i_1 + L_{L_1} \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{d}{dt} (i_1 + i'_2)$$

$$V'_2 = r'_2 i'_2 + L'_{L_2} \frac{di'_2}{dt} + L_{m1} \frac{d}{dt} (i_1 + i'_2)$$



بر اساس معادلات بدست آمده از ترانسفورماتور

مدل T





برای شبیه سازی ترانسفورماتور موارد زیر را انجام میدهیم:

۱. معادلات حاکم بر سیستم را مینویسیم
۲. ورودیها و خروجیها و متغیرهای حالت را مشخص می کنیم
۳. بازنویسی معادلات بصورت معادلات حالت
۴. پیاده سازی
۵. انتخاب روش انتگرال گیری، گام محاسبات و تفرانس
۶. اجرای شبیه سازی

در سیستم مورد بحث ما V_1 و V_2 را بعنوان ورودی سیستم و جریانهای i_1 و i_2 را بعنوان خروجی و λ_1 و λ_2 بعنوان متغیر حالت در نظر میگیریم.



بازنویسی معادلات برای اجرای شبیه سازی :

$$y_1 = w_b l_1 \rightarrow l_1 = \frac{y_1}{w_b}$$

$$v_1 = r_1 i_1 + \frac{d l_1}{dt}$$

$$v_1 = r_1 i_1 + \frac{1}{w_b} \frac{d y_1}{dt}$$

$$v_2' = r_2' i_2' + \frac{1}{w_b} \frac{d y_2'}{dt}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow y_1 &= w_b \int (v_1 - r_1 i_1) dt \\ y_2' &= w_b \int (v_2' - r_2' i_2') dt \end{aligned}$$



$$y_1 = w_b L_{L_1} i_1 + y_m = x_{L_1} i_1 + y_m$$

$$y_2' = w_b L_{L_2}' i_2' + y_m = x_{L_2}' i_2' + y_m$$

$$y_m = w_b L_{m1} (i_1 + i_2')$$

$$i_1 = \frac{y_1 - y_m}{x_{L_1}}$$

$$i_2' = \frac{y_2' - y_m}{x_{L_2}'}$$

1

2



$$y_m = x_{m1} \left[\frac{y_1 - y_m}{x_{L1}} + \frac{y_2' - f_m}{x_{L2}'} \right]$$

$$y_m = x_M \left[\frac{y_1}{x_{L1}} + \frac{y_2'}{x_{L2}'} \right]$$

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_{L1}} + \frac{1}{x_{L2}'} + \frac{1}{x_{m1}}$$

$$y_1 = w_b \int \left[V_1 - r_1 \left(\frac{y_1 - y_m}{x_{L1}} \right) \right] dt$$

$$y_2' = w_b \int \left[V_2' - r_2' \left(\frac{y_2' - y_m}{x_{L2}'} \right) \right] dt$$

3



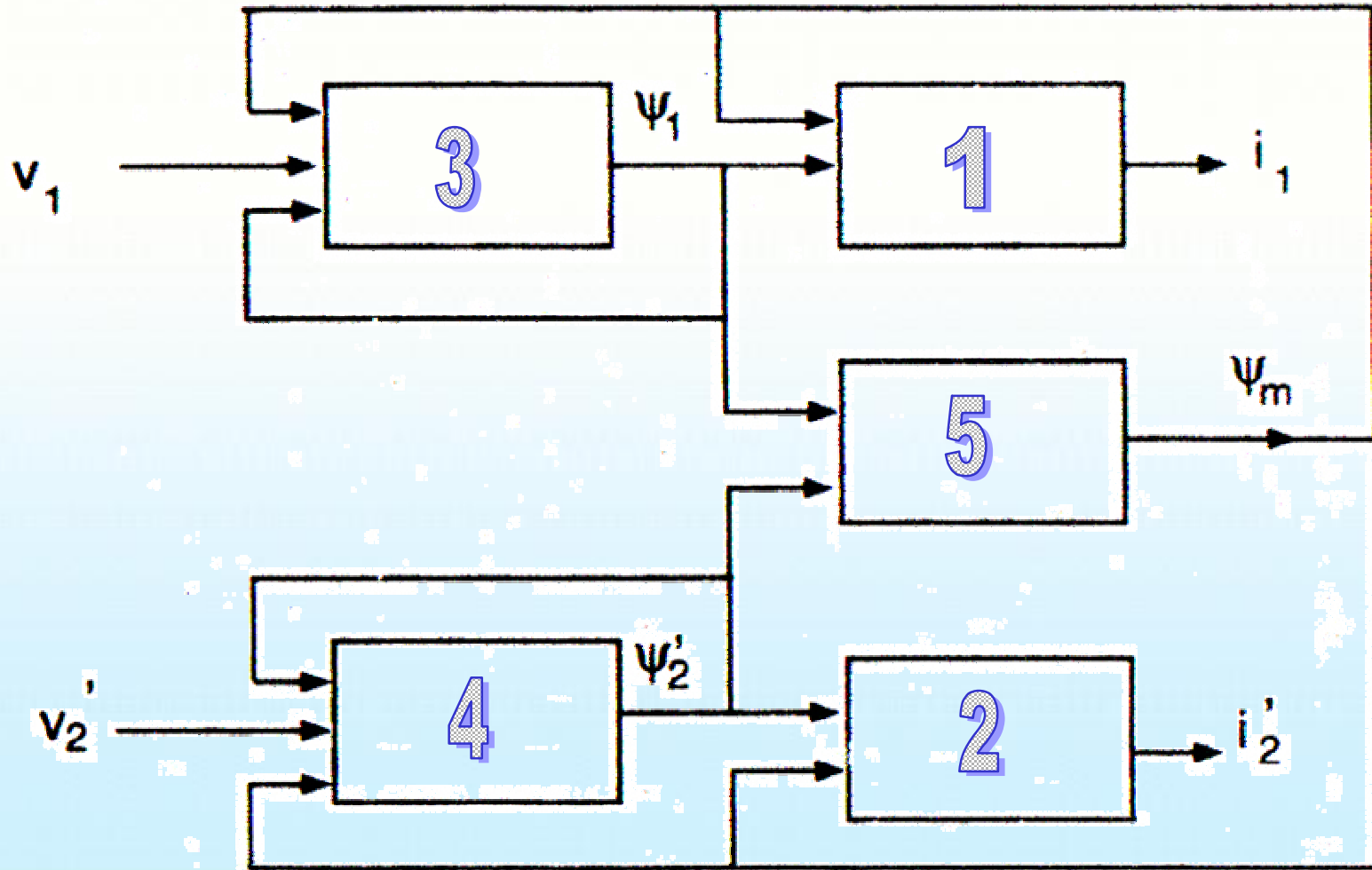
4

$$y_m = x_M \left[\frac{y_1}{x_{L1}} + \frac{y_2'}{x_{L2}'} \right]$$

5

بلوك دياگرام كلي تشبيه سازي

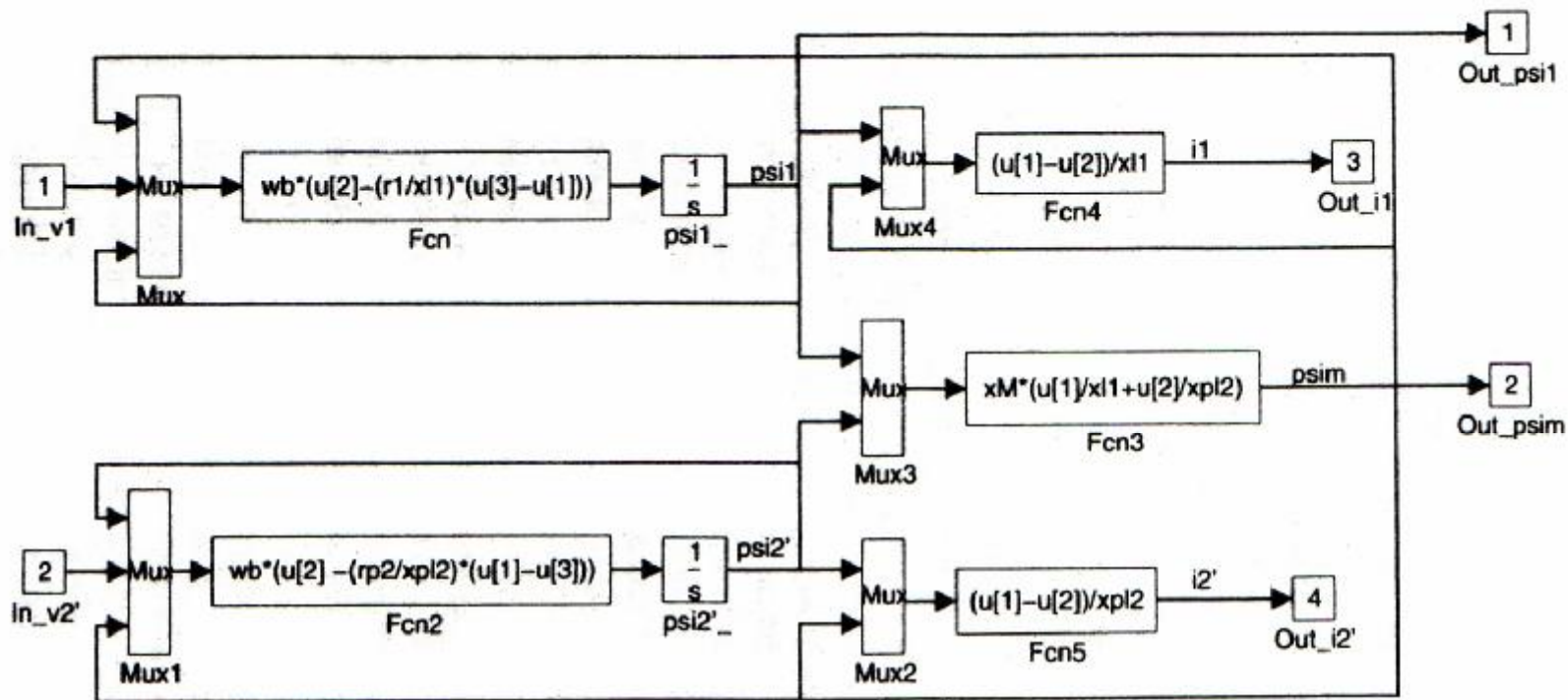
بلوك دياگرام كلي تشبيه سازي



پایه سازی مدل



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳





شبیه سازی حالت اتصال کوتاه و مدار باز در ترانسفورماتور :

$$V_2' = 0$$

اتصال کوتاه

$$i_2' = 0$$

مدار باز



2. مدار باز

با استفاده از روابط موجود :

$$i'_2 = 0 \quad \longrightarrow \quad v'_2 = \frac{1}{b} \frac{d}{dt} \quad v'_2 = \frac{1}{b} \frac{d}{dt} y_m$$

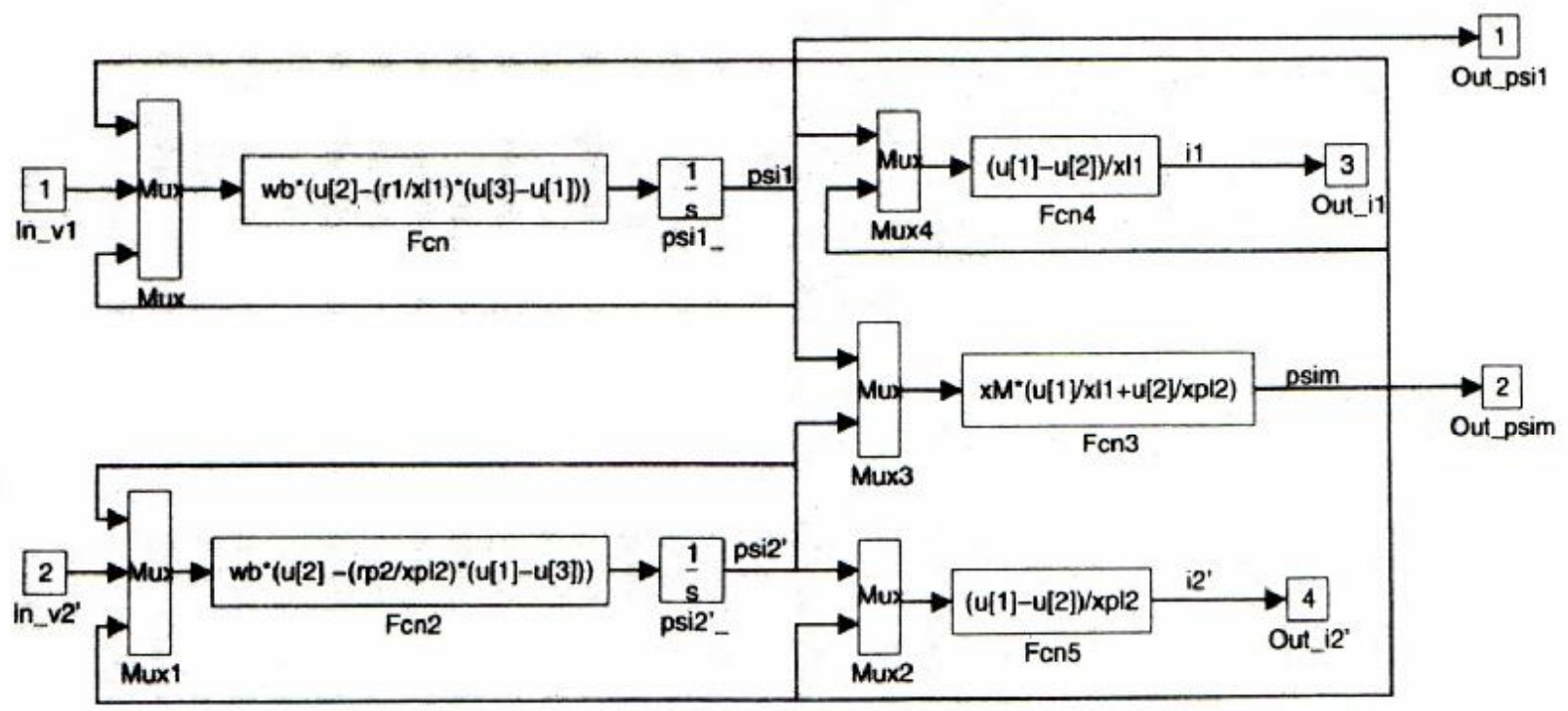
$$\begin{cases} y_m = x_{m1} (i_1 + i'_2) = x_{m1} i_1 \\ y_1 = x_{L1} i_1 + x_{m1} i_1 \end{cases} \quad \longrightarrow \quad y_m = \frac{x_{m1}}{x_{m1} + x_{L1}} y_1$$

$$V'_2 = \frac{1}{w_b} \frac{X_{m1}}{X_{m1} + X_{L1}} \frac{dy_1}{dt}$$

بنیاده سازی مدل



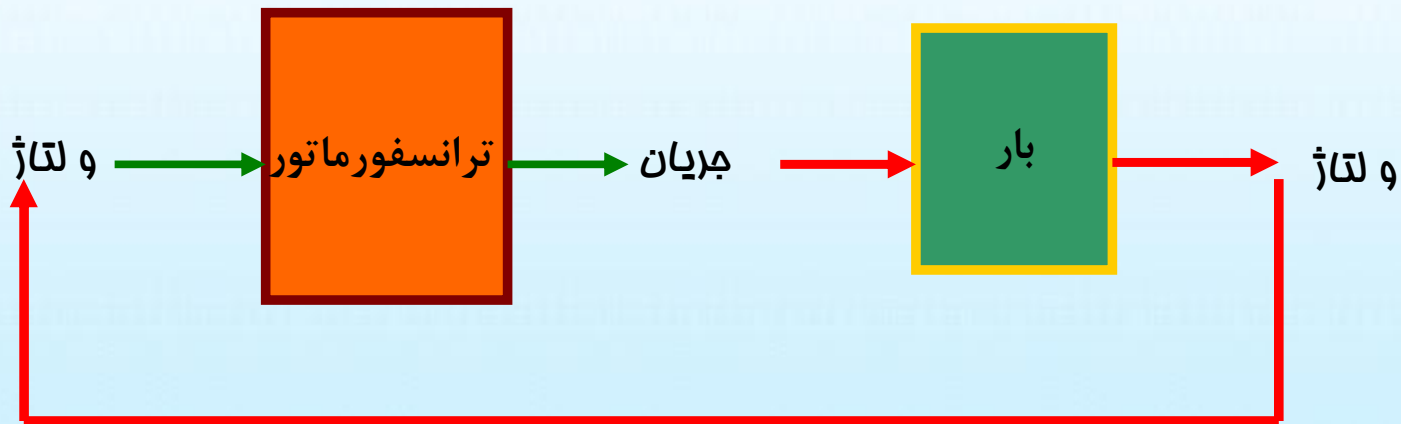
دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳





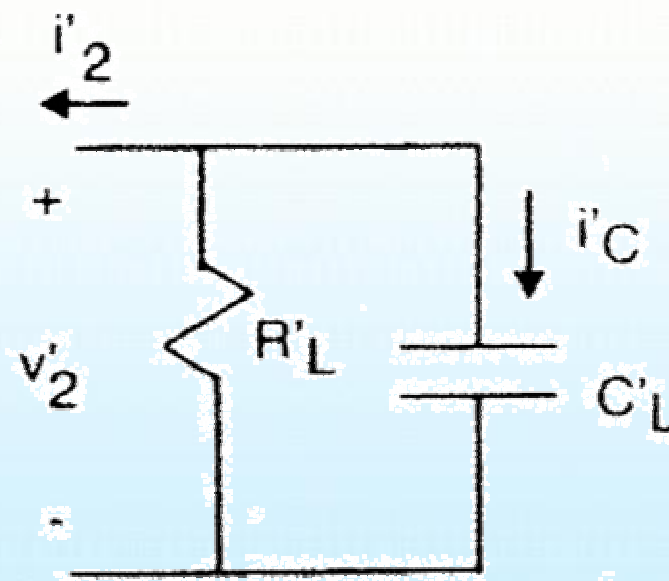
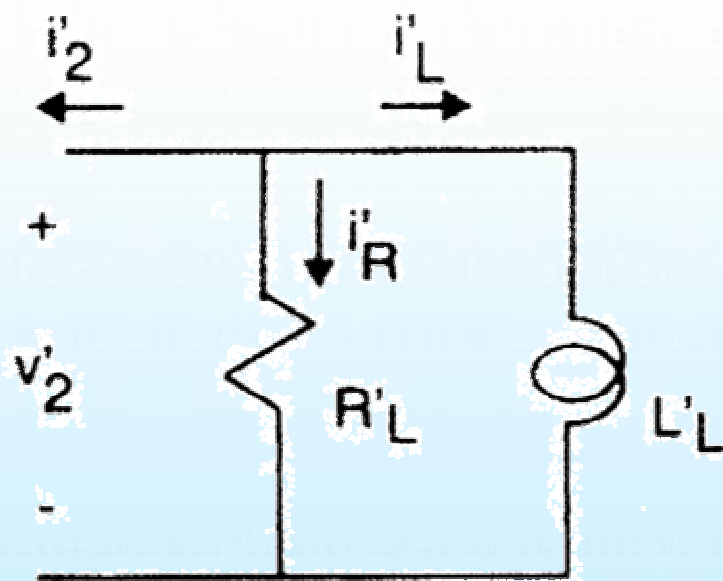
مدلسازی بار

قبلا دیدیم شرایط ساده مانند بی باری و اتصال کوتاه را چگونه میتوان شبیه سازی کرد. اکنون اگر باری در ترمینالها ی یک ترانسفورماتور داشته باشیم، میتوان آنرا در قالب یک مدار RC , RL مدلسازی نمود.





مدلسازی بار در قالب یک مدار RC , RL



مدلسازی بار در قالب مدار RL

$$V_2' = R_L' i_2' = R_L' (-i_2' - i_L')$$

$$i_L' = \frac{1}{L'} \int V_2' dt = B_L' w_b \int V_2' dt$$

$$V_2' = R_L' [i_2' - w_b B_L' \int V_2' dt]$$





با توجه به مدل ارائه شده بایست مقادیر ادمیتانس معادل را بر اساس خصوصیات بار داشته باشیم :

$$V'_2 = R'_L [i'_2 - w_b B'_L \int V'_2 dt]$$

$$S = VI^* = Y^* V^2$$

$$Y' = \frac{S_L^*}{V_{2rated}^2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2} = G'_L + jB'_L$$



مدلسازی بار در قالب مدار RC

$$V'_2 = \frac{1}{C'_L} \int i'_c dt$$

$$V'_2 = \frac{-W_b}{B'_L} \int \left[i'_2 + \frac{V'_2}{R'_L} \right] dt$$

$$Y' = \frac{S_L^*}{V_{rated}^2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2} = G'_L + jB'_L$$



$$i_1 = \frac{y_1 - y_m}{x_{L1}} \quad 1$$

$$i'_2 = \frac{y'_2 - y_m}{x'_{L2}} \quad 2$$

$$y_1 = w_b \int \left[V_1 - r_1 \left(\frac{y_1 - y_m}{x_{L1}} \right) \right] dt \quad 3$$

$$y'_2 = w_b \int \left[V'_2 - r'_2 \left(\frac{y'_2 - y_m}{x'_{L2}} \right) \right] dt \quad 4$$

$$y_m = x_M \left[\frac{y_1}{x_{L1}} + \frac{y'_2}{x'_{L2}} \right] \quad 5$$

BACK



قسمت چهارم

پدیده اشباع مغناطیسی



پدیده اشباع مغناطیسی

الف- ماهیت پدیده اشباع مغناطیسی

ب- مضرات پدیده اشباع مغناطیسی

ج- تاثیر پدیده اشباع مغناطیسی بر پارامترهای ترانسفورماتور

د- نحوه تغییر مدل برای در نظر گرفتن پدیده اشباع مغناطیسی



تأثیر پدیده اشباع مغناطیسی بر پارامترهای ترانسفورماتور

همانطور که میدانیم شارواندوکتانس پراکندگی در ترانسفورماتوره میزانی کمی متأثر از پدیده اشباع مغناطیسی است.

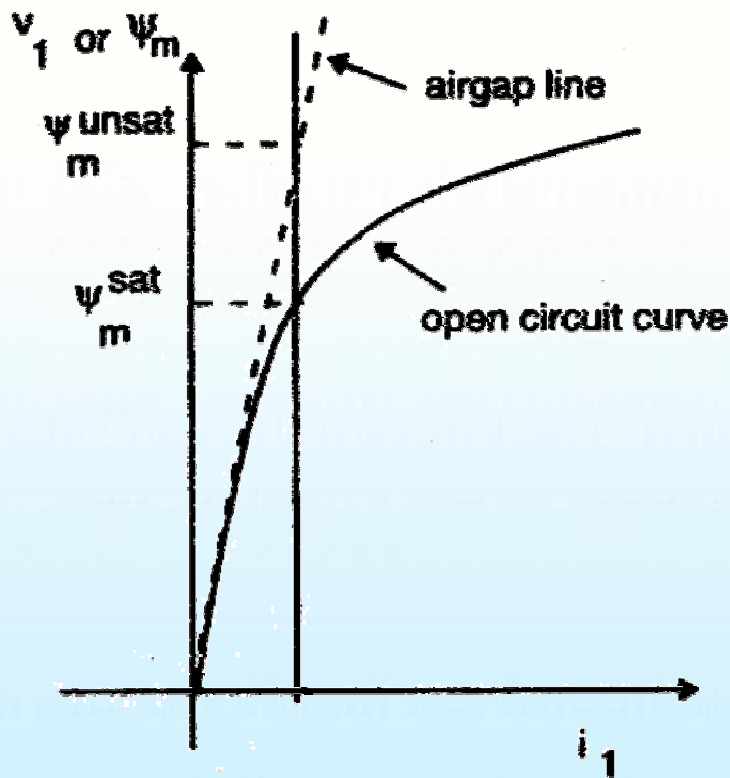
اما شارواندوکتانس مغناطیس کنندگی کاملاً متأثر از میزان اشباع مغناطیسی میباشد.

بدلیل فوق و بدلیل پیچیدگی ماهیت شارپراکندگی در بررسی پدیده اشباع فقط تأثیر آن بر شار مغناطیس کنندگی در نظر گرفته میشود

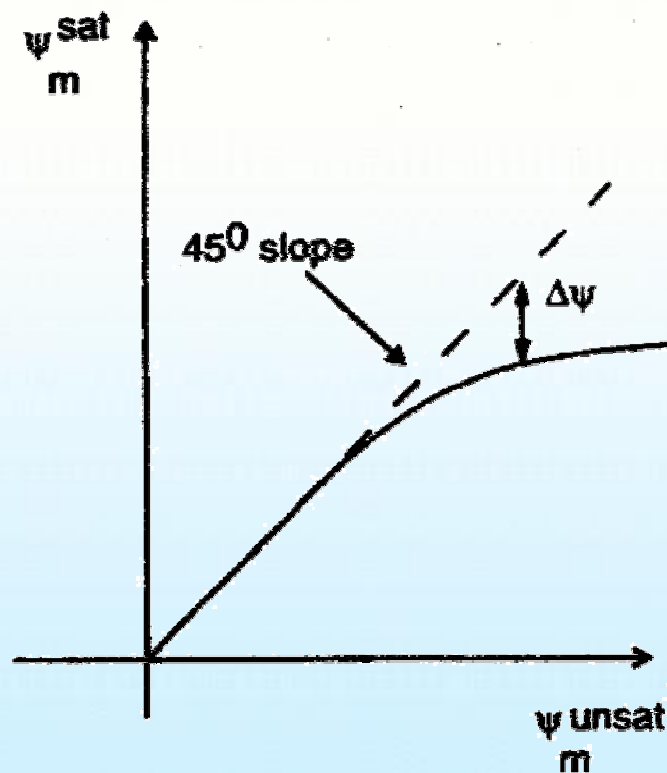
منحنی اشباع



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



(a) Open-Circuit Curve



(b) Saturated versus unsaturated flux linkage



نحوه وارد کردن پدیده اشباع مغناطیسی در مدل ترانسفورماتور :

1 استفاده از یک مقدار مناسب راکتانس مغناطیس کنندگی در هر مرحله از شبیه سازی

$$K_s = \frac{y_m^{sat}}{y_m^{unsat}} \leq 1$$

$$K_s = \frac{y_m^{sat}}{i_m^{sat}} \cdot \frac{i_m^{sat}}{y_m^{unsat}} = \frac{X_m^{sat}}{X_m^{unsat}}$$



نحوه وارد کردن پدیده اشباع مغناطیسی در مدل ترانسفورماتور :

2 تخمین جریان مغناطیس کنندگی توسط یک منبع بر حسب شار مغناطیسی

$$i = f(y_m)$$



نحوه وارد کردن پدیده اشباع مغناطیسی در مدل ترانسفورماتور :

3 استفاده از رابطه بین شار مغناطیسی اشباع شده و خطی

$$y_m^{unsat} = w_b L_{m1}^{unsat} (i_1 + i'_2)$$

$$i_1 = \frac{y_1 - y_m^{sat}}{X_{L1}} \quad 3$$

$$i'_2 = \frac{y'_2 - y_m^{sat}}{X'_{L2}} \quad 4$$



استفاده از رابطه بین شار مغناطیسی اشباع شده و خطی

$$\frac{y_m^{unsat}}{X_{m1}^{unsat}} = \left[\frac{y_1}{x_{L1}} + \frac{y'_2}{x'_{L2}} - \frac{y_m^{sat}}{x_{L1}} - \frac{y_m^{sat}}{x'_{L2}} \right]$$

$$\psi_m^{unsat} = \psi_m^{sat} + \Delta\psi_m$$

$$y_m^{sat} \left(\frac{1}{x_{m1}^{unsat}} + \frac{1}{x_{L1}} + \frac{1}{x'_{L2}} \right) = \left[\frac{y_1}{x_{L1}} + \frac{y'_2}{x'_{L2}} - \frac{\Delta y}{x_m^{unsat}} \right]$$



استفاده از رابطه بین شار مغناطیسی اشباع شده و خطی

$$y_m^{sat} = x_M \left[\frac{y_1}{x_{L1}} + \frac{y_2'}{x_{L2}'} - \frac{\Delta y}{x_m^{unsat}} \right] \quad 5$$

$$\frac{1}{x_M} = \left(\frac{1}{x_{m1}^{unsat}} + \frac{1}{x_{11}} + \frac{1}{x_{12}'} \right)$$

همانطور که از معادلات قبل مشخص است تنها فرق مدل خطی با مدل اشباع در مقدار

میباشد در نتیجه مدل ما همان مدل قبلی است به اضافه ~~بلوک اشباع~~



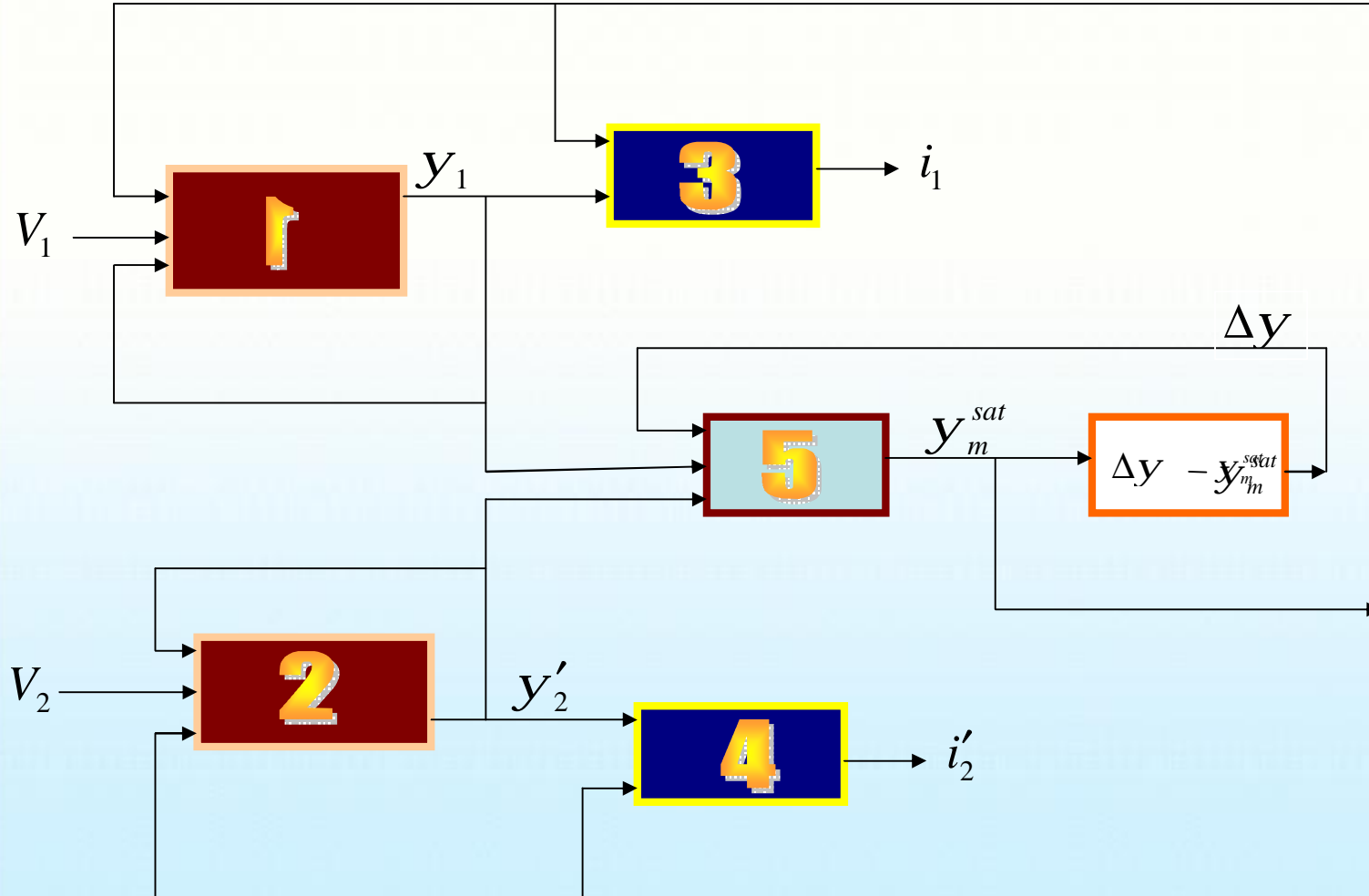
$$\frac{\Delta y}{x_m^{unsat}}$$

بلوك دياگرام كلي شبیه سازي

بلوك دياگرام كلي شبیه سازي



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوري جامع ماسينهاي الكتريكي / دكتور واحدی / پاييز ۸۳





نحوه ساخت بلوک اشباع

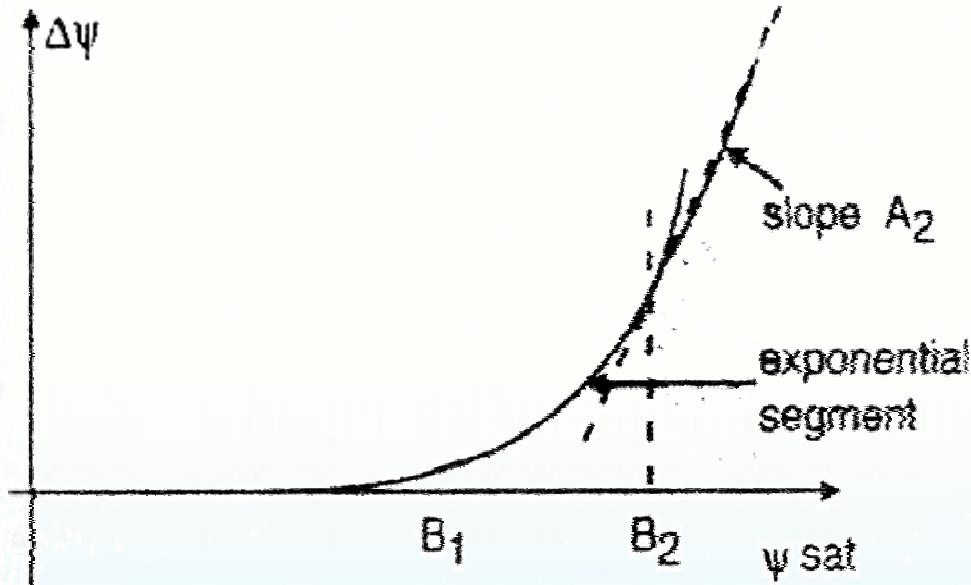
۱. تقریب زدن منحنی اشباع

۲.

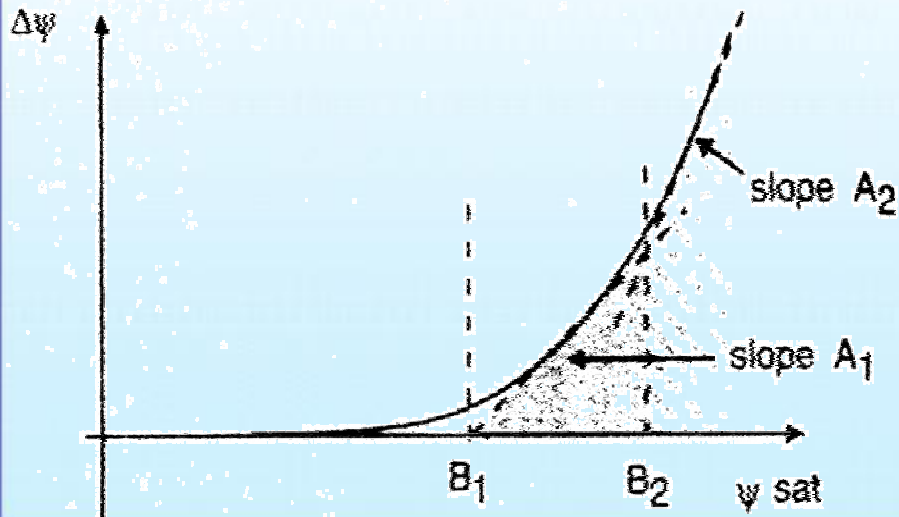
استفاده از look up table



تقریب دو تکه خطی و سه تکه خطی



تقریب دو تکه خطی



تقریب سه تکه



روش تقریب زدن منحنی اشباع

تقریب سه تکه

$$\left\{ \begin{array}{ll} y_m^{sat} < B_1 & \Delta y = 0 \\ B_1 \leq y_m^{sat} < B_2 & \Delta y = a e^{b(y_m^{sat} - B_1)} \\ y_m^{sat} > B_2 & \Delta y = A_2(y_m^{sat} - B_2) + \Delta y(B_2) \end{array} \right.$$

بازگشت



تقریب زدن منحنی اشباع
روش

تقریب دو تکه قطعی

$$\Delta y = A_1 (y_m^{sat} - B_1) + A_2 y_m^{sat} - B_1$$

$$A_1 = \begin{cases} slope\ 1 & y_m^{sat} > B_1 \\ 0 & other\ po\ int\ s \end{cases}$$

$$A_2 = \begin{cases} slope\ 2 - slope\ 1 & y_m^{sat} > B_2 \\ 0 & other\ po\ int\ s \end{cases}$$

بازگشت



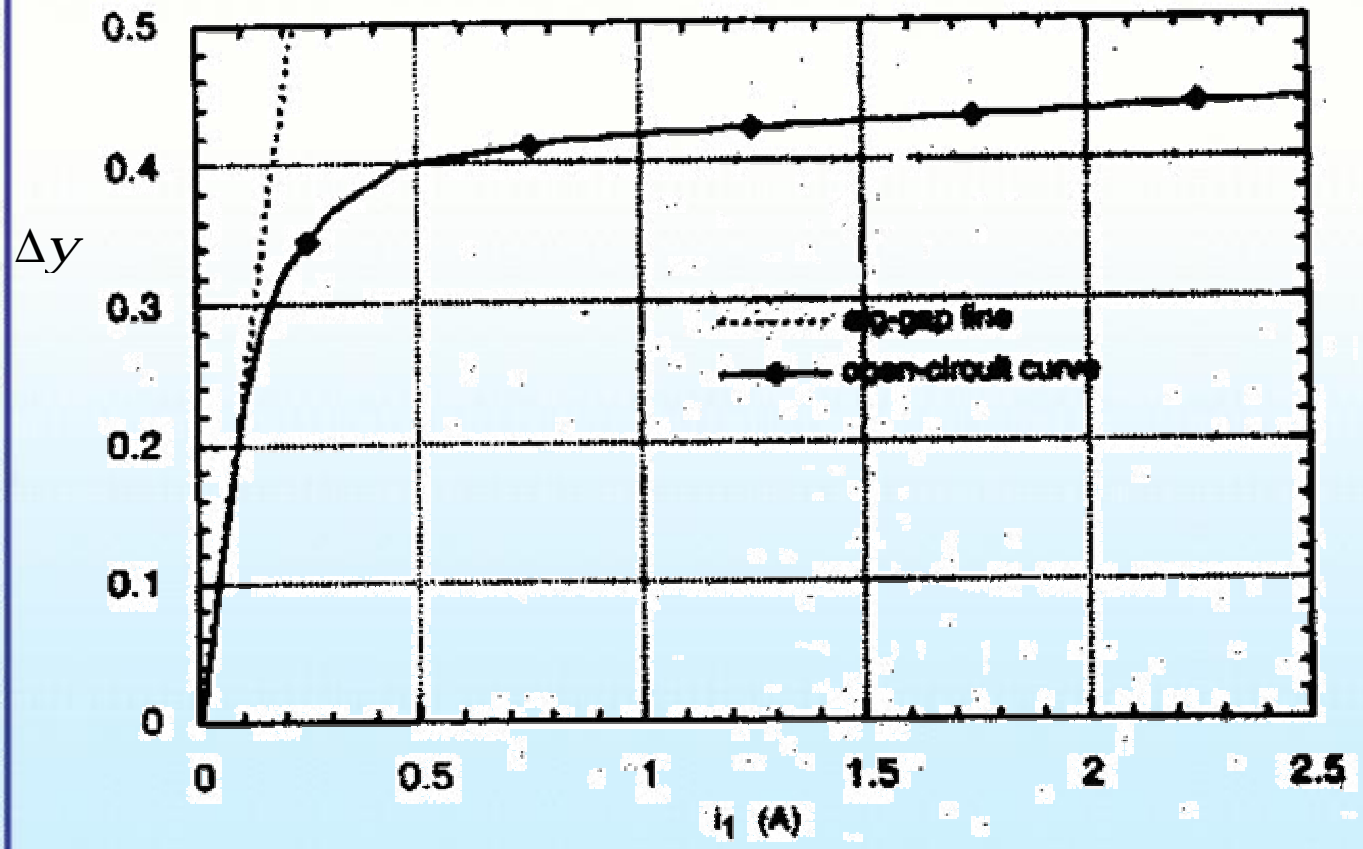
استفاده از look up table

در این روش یک جدول داده دو ستونه که شامل مقادیر Δy بر حسب y_m میباشد، آماده و طی فرایند شبیه سازی به آن مراجعه میشود.

استفاده از look up table



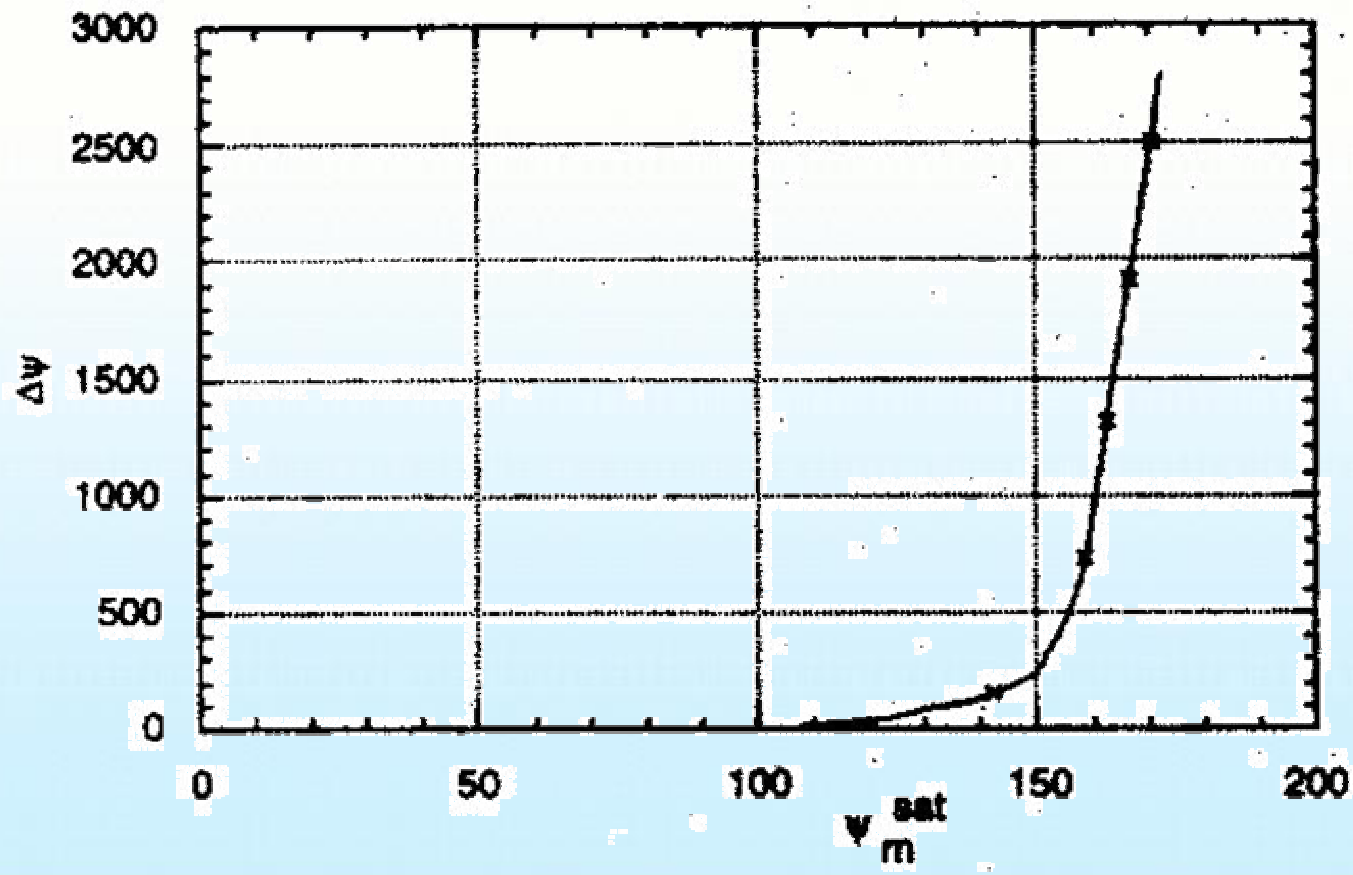
دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



استفاده از look up table



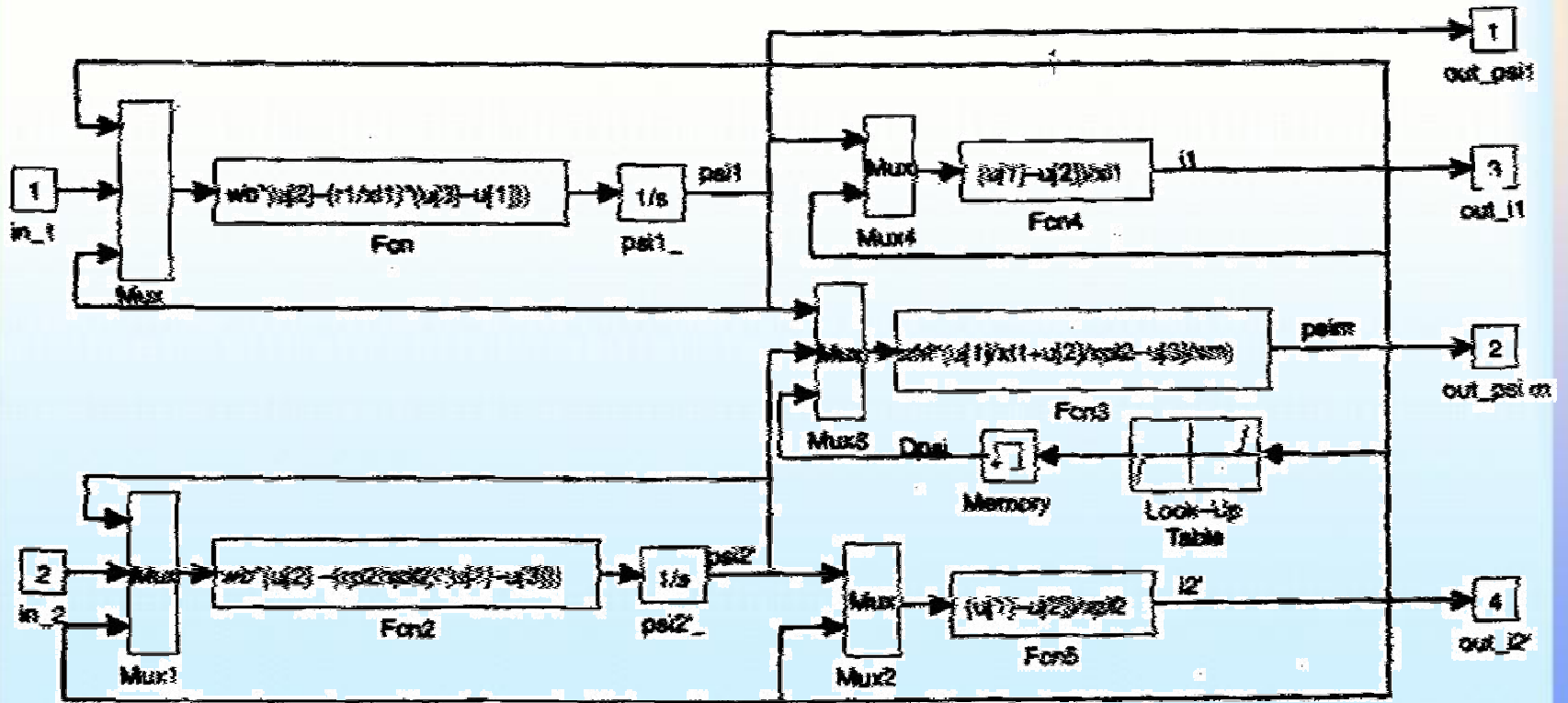
دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



پیاده سازی مدل



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳





$$y_1 = w_b \int \left[V_1 - r_1 \left(\frac{y_1 - y_m}{x_{L1}} \right) \right] dt \quad 1$$

$$y'_2 = w_b \int \left[V'_2 - r'_2 \left(\frac{y'_2 - y_m}{x'_{L2}} \right) \right] dt \quad 2$$

$$y_m^{sat} = x_M \left[\frac{y_1}{x_{L1}} + \frac{y'_2}{x'_{L2}} - \frac{\Delta y}{x_m^{unsat}} \right] \quad 5$$

$$i_1 = \frac{y_1 - y_m^{sat}}{X_{L1}} \quad 3$$

$$i'_2 = \frac{y'_2 - y_m^{sat}}{X'_{L2}} \quad 4$$

[BACK](#)



قسمت پنجم

شبیه سازی ترانسفورماتور سه فاز



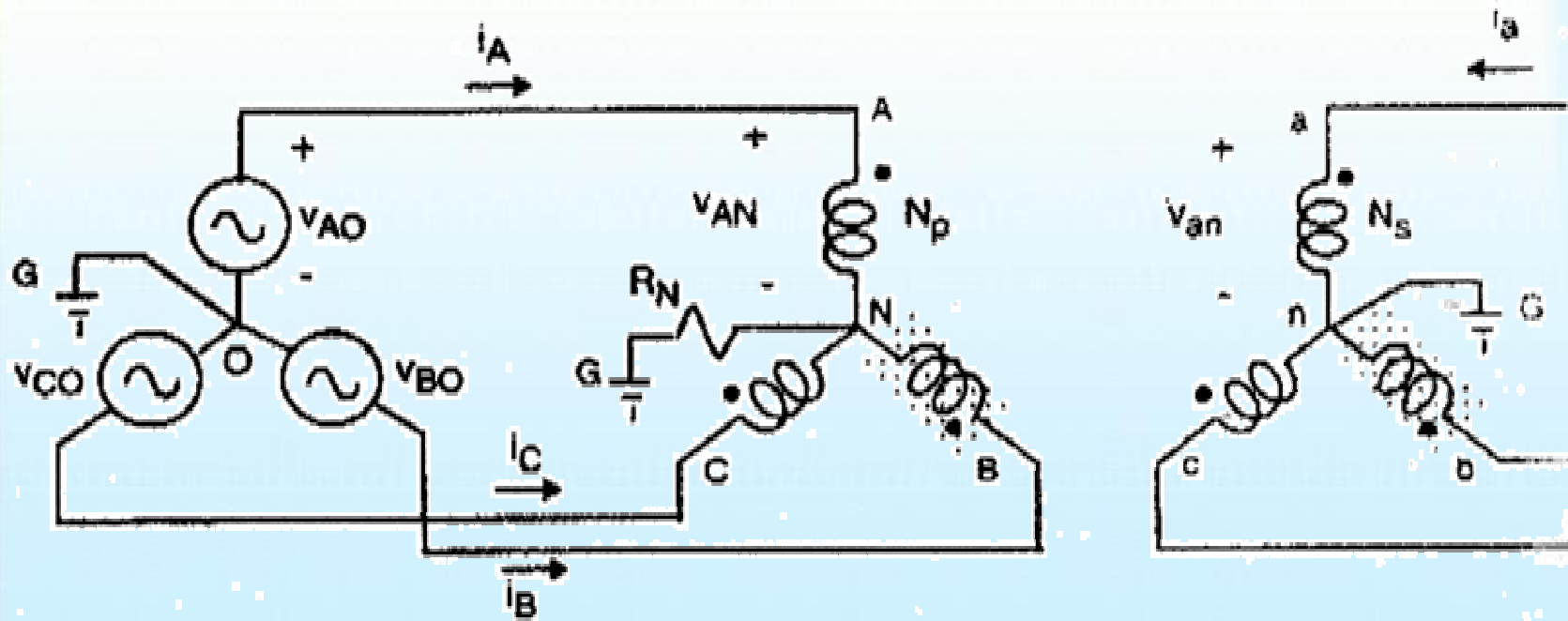
شبیه سازی ترانسفورماتور سه فاز

- با توجه به اینکه در شبکه های برق عموماً ترانسفورماتور سه فاز بکار میرود، لازم است نحوه شبیه سازی ترانسفورماتور سه فاز را بررسی کنیم.
- برای شبیه سازی ترانسفورماتور سه فاز از بلوکهای ترانسفورماتور تکفاز استفاده میکنیم.
- در این شبیه سازی نوع اتصالات سیم پیچی ترانسفورماتور مهم است ولی آرایش مدار مغناطیسی و تاثیرات آن در نظر گرفته نمی شود.



شبه سازی ترانسفورماتور سه فاز

1 اتصال ستاره - ستاره

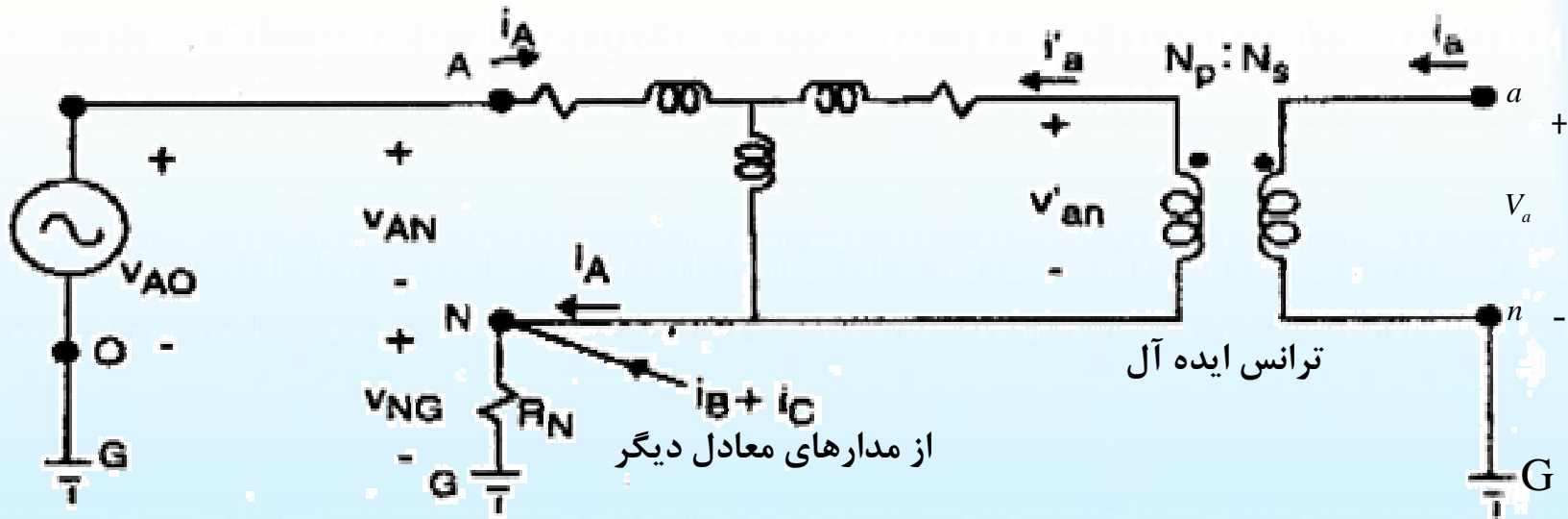




شبه سازی ترانسفورماتور سه فاز

مدار معادل یکی از ترانسفورماتورها با اتصالات بیرونی

$$Y = Y$$





روابط ولتاژ ترمینالها و ولتاژ نقطه زمین

$$V_{AG} = V_{Ao} \rightarrow V_{AN} = V_{AG} - V_{NG}$$

$$V_{BG} = V_{Bo} \rightarrow V_{BN} = V_{BG} - V_{NG}$$

$$V_{CG} = V_{Co} \rightarrow V_{CN} = V_{CG} - V_{NG}$$

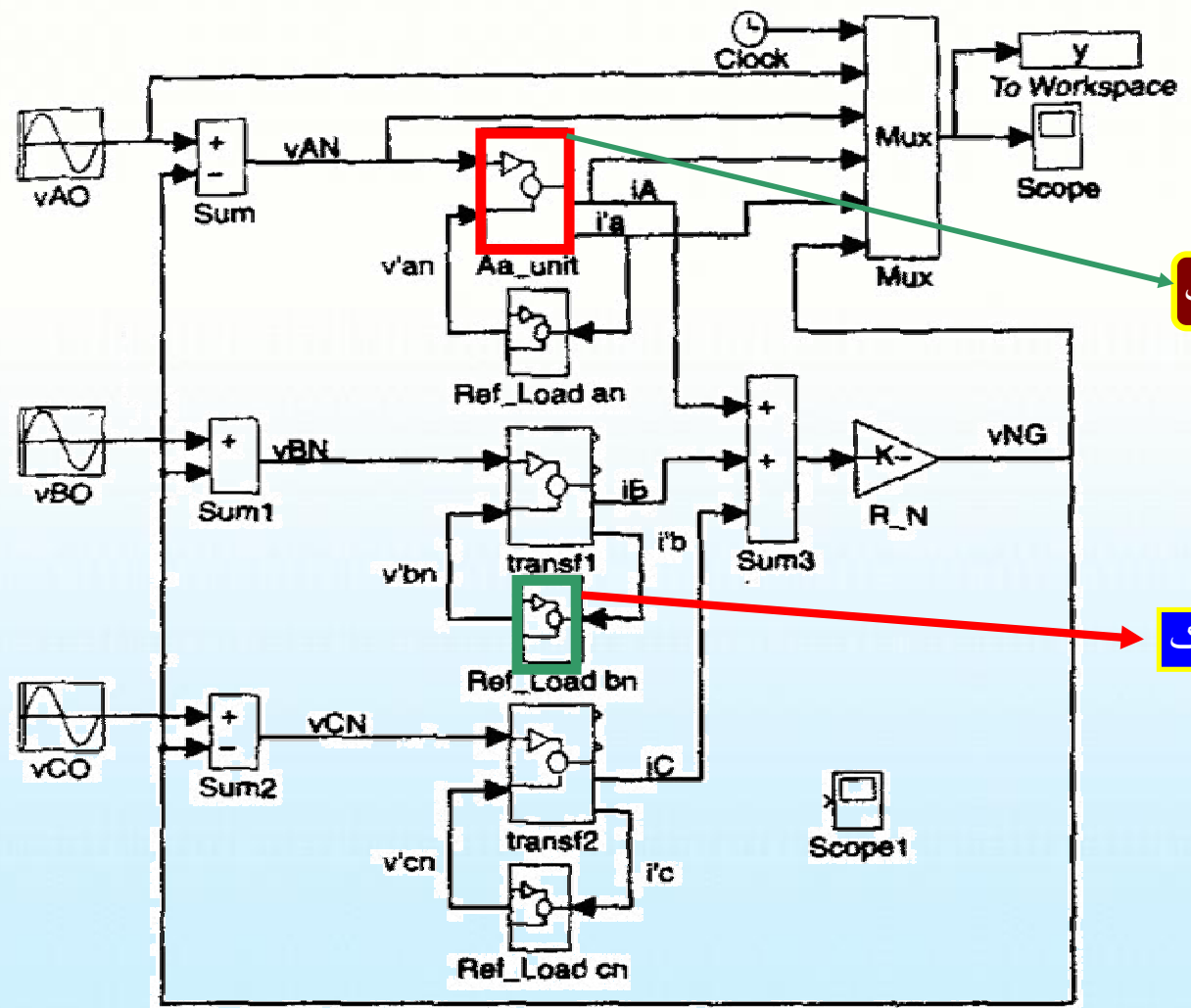


$$V_{NG} = R_N (i_A + i_B + i_C)$$

پلوت‌های شبیه سازی Y-Y



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



دیدن داخل بلوک

دیدن داخل بلوک

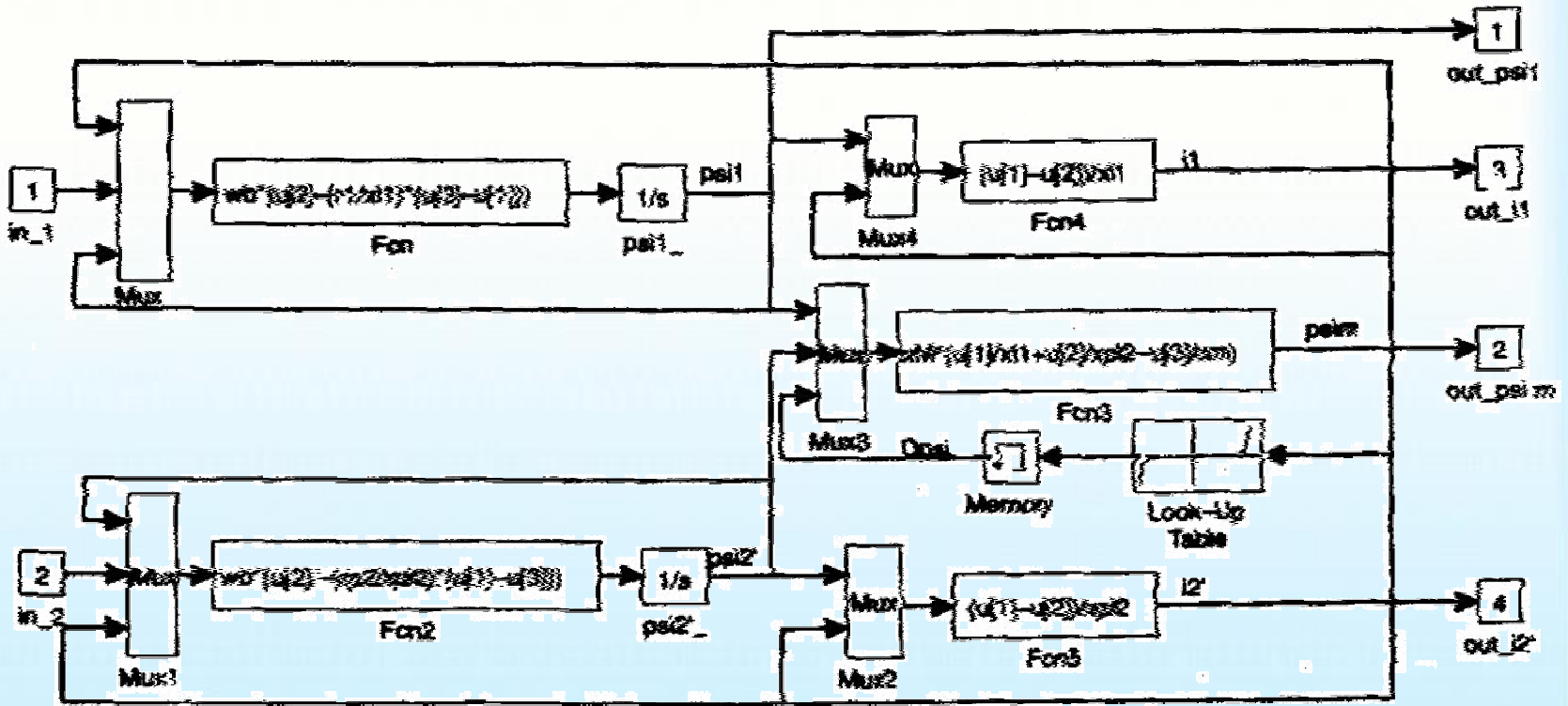


Run File

داخل بلوک شبیه سازی Aa



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



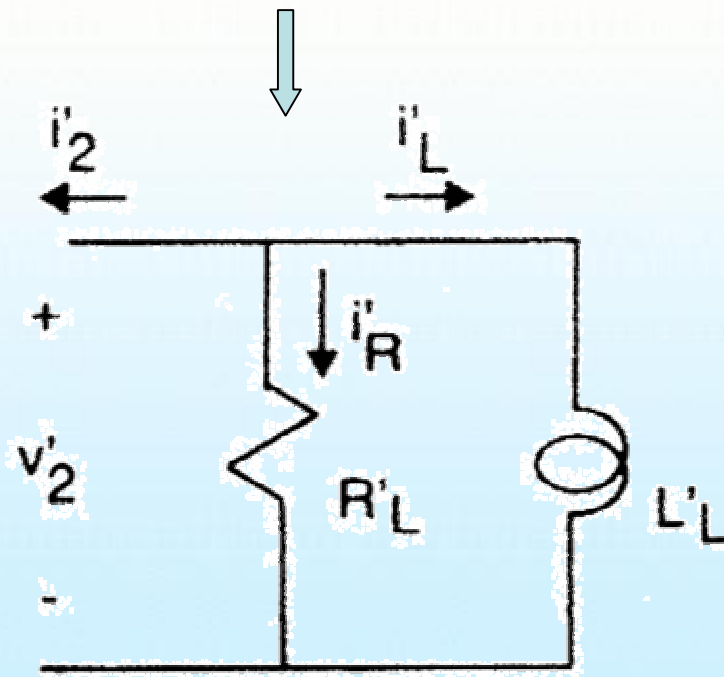
بازگشت



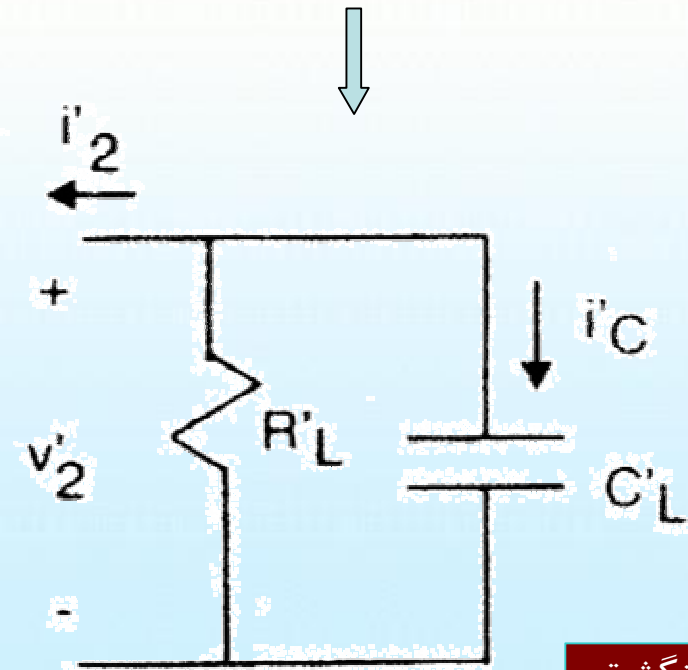
داخل بلوی شبیه سازی Ref_Load An

بسته به نوع بار

RL



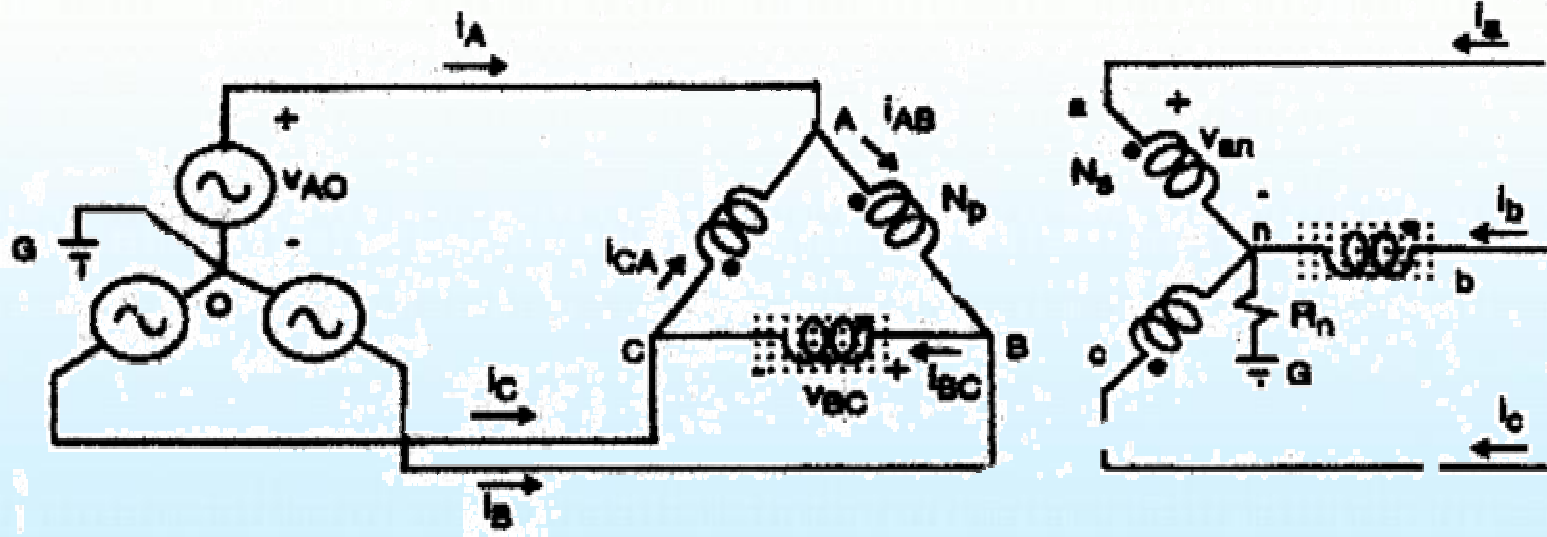
RC



بازگشت



اتصال مثلث - ستاره

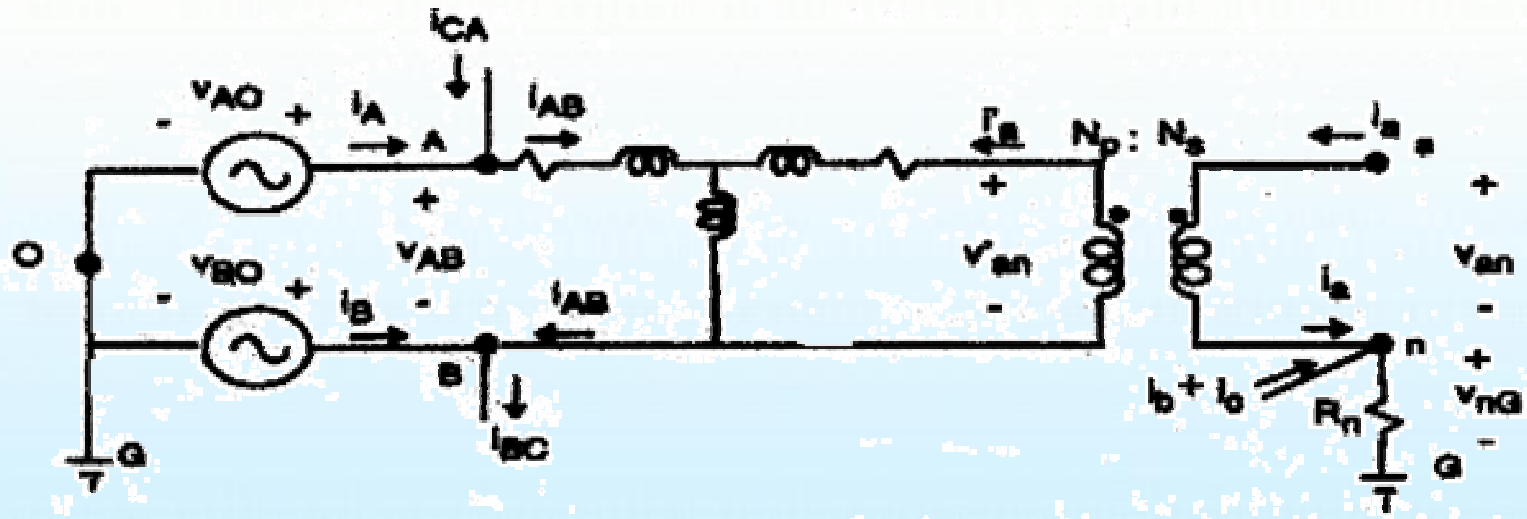




شبه سازی ترانسفورماتور سه فاز

$\Delta - Y$

مدار معادل یکی از ترانسفورماتورها با اتصالات بیرونی





روابط ولتاژ ترمینالها و ولتاژ نقطه زمین

$$\begin{aligned} \text{ولتاژ ورودی} \rightarrow V_{AB} = V_{A0} - V_{B0} & \quad \rightarrow V_{BC} = V_{B0} - V_{C0} \\ & \quad \rightarrow V_{CA} = V_{C0} - V_{A0} \end{aligned}$$

$$V_{AB} = V_{A0} - V_{B0}$$

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}$$

$$V_{BC} = V_{B0} - V_{C0}$$

$$i_B = i_{BC} - i_{AB}$$

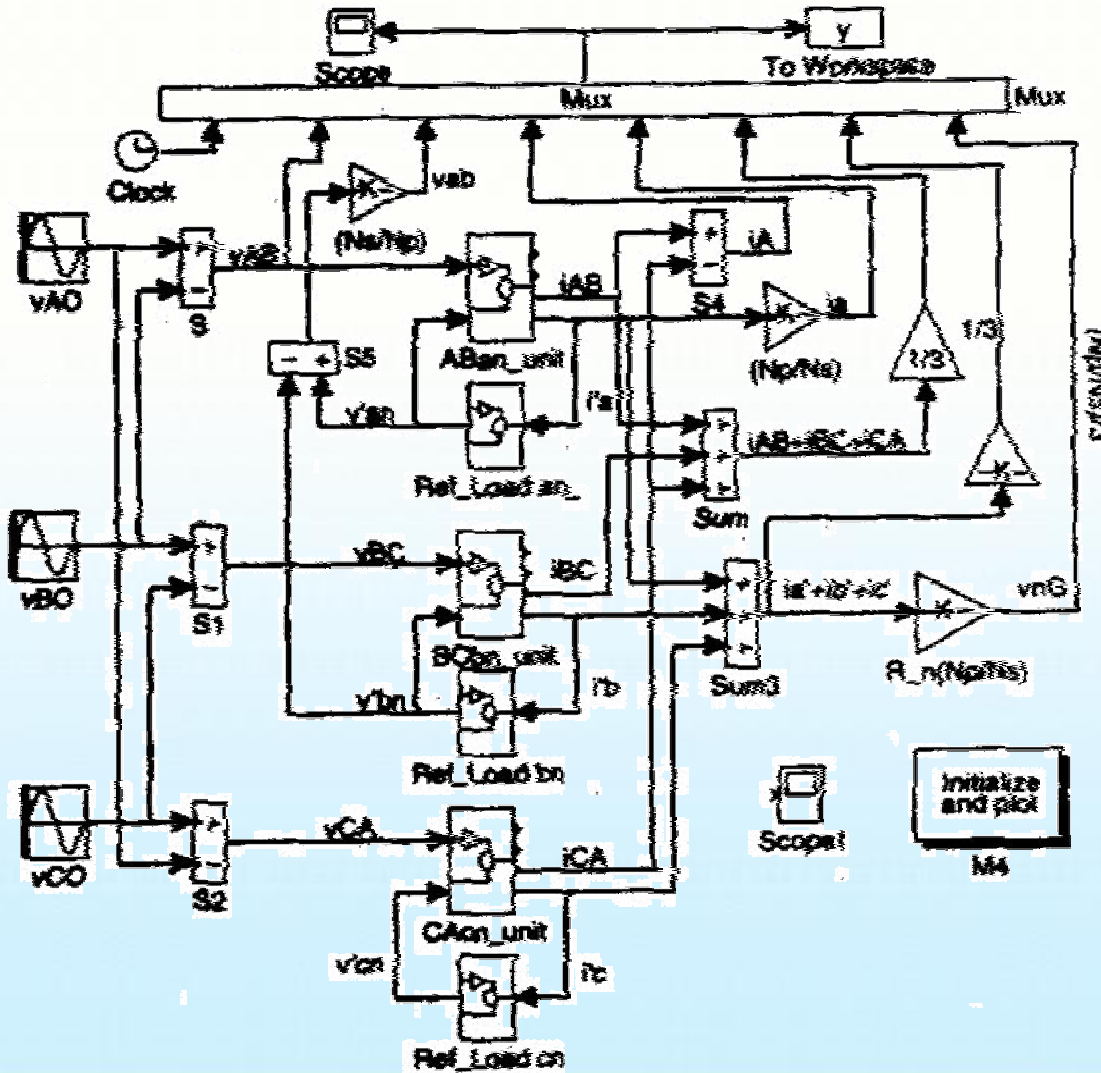
$$V_{CA} = V_{C0} - V_{A0}$$

$$i_C = i_{CA} - i_{BC}$$



$\Delta - Y$

بلوک‌های شبیه سازی



Run File



قسمت ششم

تبدیلات ریاضی در مهندسی برق





تبدیلات ریاضی در مهندسی برق

هدف از استفاده تبدیل های ریاضی یکی از موارد زیر میباشد:

1. مجزا کردن (Decoupled) متغیرها
2. تسهیل حل معادلات با ضرایب متغیر با زمان
3. ارجاع متغیرها به یک چارچوب مشترک



تبدیلات بکار رفته در مهندسی برق

۱. تبدیل فور تسکیو (مولفه های متقارن)

۲. تبدیل کلاری

۳. تبدیل کنکور دیا

۴. تبدیل پارک

۵. تبدیل استنلی



تبدیل فورتسکیو

برای مطالعه شرایط نامتعادل در سیستمهای قدرت و اجزا آن نظیر ژنراتورها، ترانسفورماتورها و موتورهای الکتریکی بکار میرود. در واقع یک سیستم نامتعادل سه فاز به سه سیستم متعادل سه فاز تبدیل و محاسبات در این فضا انجام میشود.

$$[f_{o12}] = [T_{o12}] [f_{abc}] \quad \rightarrow \quad [T_{o12}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$a = e^{j \frac{2\pi}{3}}$$



تبدیل معکوس

$$[f_{abc}] = [T_{o12}]^{-1} [f_{o12}] \quad \longrightarrow \quad [T_{o12}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

در روابط مربوط به تبدیل f میتواند ولتاژ، جریان یا شار باشد.



تبدیل کلارک

یک تبدیل سه فاز به دو فاز می باشد و دارای یک مولفه هموپلار است.

تبدیل معکوس

$$[f_{ab0}] = [T_{ab0}][f_{abc}]$$

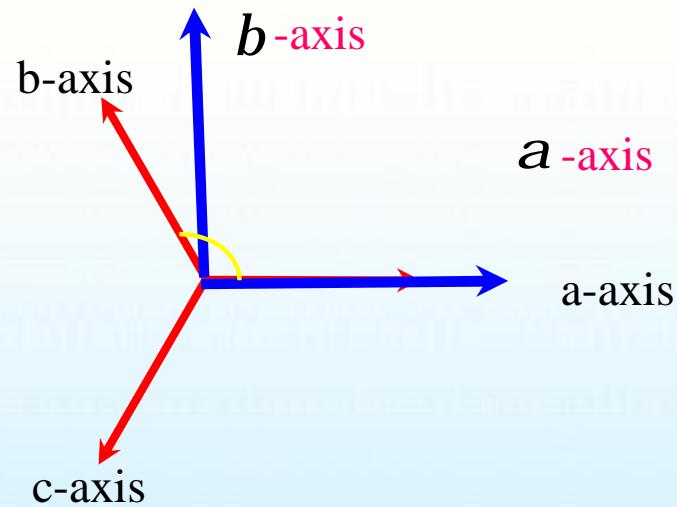
$$[T_{ab0}] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[f_{abc}] = [T_{ab0}]^{-1}[f_{ab0}]$$

$$[T_{ab0}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$



نمونه تبدیل سه فاز به دو فاز





مثال

توان لحظه ای یک سیستم سه فاز را با شرایط بار اهمی در نظر بگیرید :

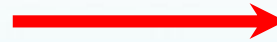
$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = V_m \sin wt \\ V_b = V_m \sin\left(wt - \frac{2p}{3}\right) \\ V_c = V_m \sin\left(wt + \frac{2p}{3}\right) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_a = I_m \sin wt \\ i_b = I_m \sin\left(wt - \frac{2p}{3}\right) \\ i_c = I_m \sin\left(wt + \frac{2p}{3}\right) \end{array} \right.$$



در لحظه $wt = \frac{p}{2}$ توان لحظه ای سیستم برابر است با :

$$\begin{cases} V_a = V_m \\ V_b = -\frac{V_m}{2} \\ V_c = -\frac{V_m}{2} \end{cases}$$



$$p = \frac{3V_m I_m}{2}$$

$$\begin{cases} i_a = I_m \\ i_b = \frac{-I_m}{2} \\ i_c = \frac{-I_m}{2} \end{cases}$$



در لحظه $wt = \frac{p}{2}$ ولتاژ و جریان لحظه ای تبدیل یافته توسط تبدیل کلارک و توان لحظه ای

مربوطه به شکل زیر میباشند :

$$\begin{cases} V_a = V_m \\ V_b = 0 \\ V_0 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} I_a = I_m \\ I_b = 0 \\ I_0 = 0 \end{cases}$$



$$p = V_m I_m$$



تبدیل کنکوردیا

همان تبدیل کلارک است با این تفاوت که این تبدیل حافظ توان میباشد.
 یک ماتریس تبدیل زمانی میتواند حافظ توان باشد که ماتریس متعامد باشد.
 ماتریسی متعامد است که معکوس آن با ترانسپوز آن برابر باشد .

$$[f_{\alpha\beta 0}] = [T_{\alpha\beta 0}][f_{abc}] \quad \rightarrow \quad [T_{ab0}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$



در لحظه $wt = \frac{p}{2}$ ولتاژ و جریان لحظه ای تبدیل یافته همان سیستم قبلی توسط تبدیل کنکوردیا

و توان لحظه ای مربوطه به شکل زیر میباشند :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \\ V_b = 0 \\ V_c = 0 \end{array} \right.$$



$$p = \frac{3}{2} V_m I_m$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_a = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \\ i_b = 0 \\ i_0 = 0 \end{array} \right.$$



تبدیل n فازه به دو فازه

$$[f_{xy}] = [T(q)][F_{1,2,3,\dots,n}]$$

$$T(q) = \frac{\sqrt{2}}{n} \begin{bmatrix} \cos \frac{p}{2} q & \cos(\frac{p}{2} q - a) & \cos[\frac{p}{2} q - (n-1)a] \\ \sin \frac{p}{2} q & \sin(\frac{p}{2} q - a) & \sin[\frac{p}{2} q - (n-1)a] \end{bmatrix}$$

$$[F_{1,2,3,\dots,n}] = [T(q)]^{-1} [f_{xy}]$$



تبدیل پارک

تاریخچه

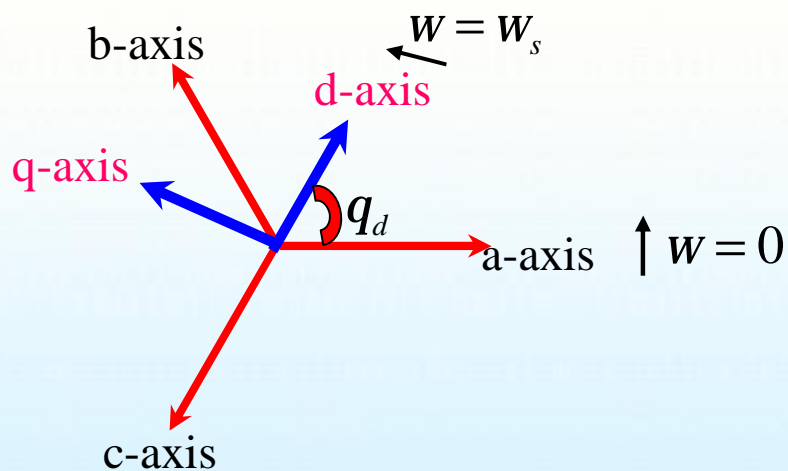
مزایا

انواع بکار رفته



حالت اول

محور q 90 درجه جلوتر از محور d





ماتریس تبدیل

$$[F_{dq0}] = [T_{dq0}(q_d)][F_{abc}] = \begin{bmatrix} fd \\ fq \\ f0 \end{bmatrix} \rightarrow [T_{dq0}(q_d)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q_d & \cos(q_d - \frac{2p}{3}) & \cos(q_d + \frac{2p}{3}) \\ -\sin q_d & -\sin(q_d - \frac{2p}{3}) & -\sin(q_d + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$q_d = \omega t + q_0$$

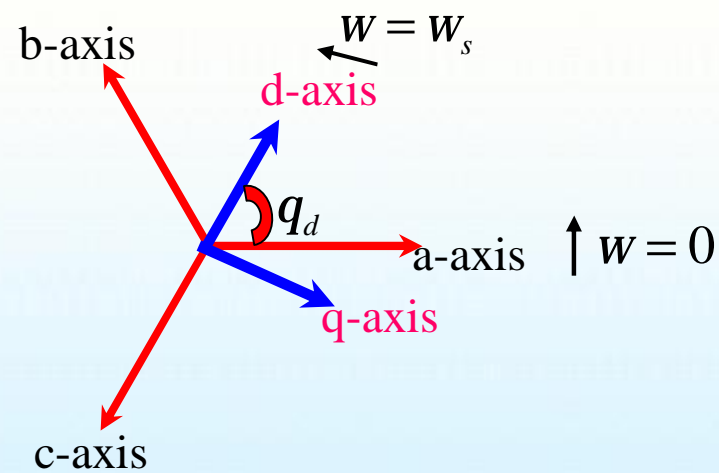
تبدیل معکوس

$$[F_{abc}] = [T_{dq0}(q_d)]^{-1}[F_{dq0}] \rightarrow [T_{dq0}(q_d)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos q_d & -\sin q_d & 1 \\ \cos(q_d - \frac{2p}{3}) & -\sin(q_d - \frac{2p}{3}) & 1 \\ \cos(q_d + \frac{2p}{3}) & -\sin(q_d + \frac{2p}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$



حالت دوم

محور q 90 درجه عقبتر از محور d





ماتریس تبدیل

$$[F_{dq0}] = [T_{dq0}(q_d)][F_{abc}] = \begin{bmatrix} fd \\ fq \\ f \mathbf{0} \end{bmatrix} \rightarrow [T_{dq0}(q_d)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q_d & \cos(q_d - \frac{2p}{3}) & \cos(q_d + \frac{2p}{3}) \\ \sin q_d & \sin(q_d - \frac{2p}{3}) & \sin(q_d + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

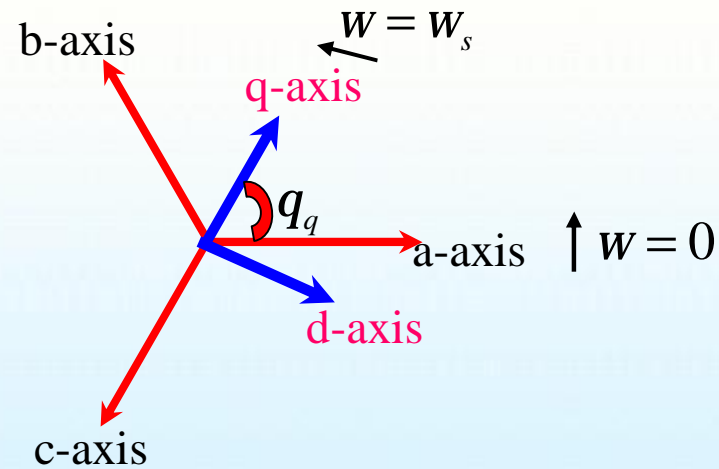
تبدیل معکوس

$$[F_{abc}] = [T_{dq0}(q_d)]^{-1}[F_{dq0}] \rightarrow [T_{dq0}(q_d)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos q_d & \sin q_d & 1 \\ \cos(q_d - \frac{2p}{3}) & \sin(q_d - \frac{2p}{3}) & 1 \\ \cos(q_d + \frac{2p}{3}) & \sin(q_d + \frac{2p}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$



حالت سوم

این حالت مانند قسمت اول است با این تفاوت که جای محور q با d عوض میشود.





ماتریس تبدیل

$$[F_{qd0}] = [T_{qd0}(q_q)][F_{abc}] = \begin{bmatrix} fq \\ fd \\ f \mathbf{0} \end{bmatrix} \rightarrow [T_{qd0}(q_q)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q_q & \cos(q_q - \frac{2p}{3}) & \cos(q_q + \frac{2p}{3}) \\ \sin q_q & \sin(q_q - \frac{2p}{3}) & \sin(q_q + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

تبدیل معکوس

$$[F_{abc}] = [T_{qd0}(q_q)]^{-1}[F_{qd0}] \rightarrow [T_{qd0}(q_q)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos q_q & \sin q_q & 1 \\ \cos(q_q - \frac{2p}{3}) & \sin(q_q - \frac{2p}{3}) & 1 \\ \cos(q_q + \frac{2p}{3}) & \sin(q_q + \frac{2p}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$



تبدیل یک سیستم سه فاز سینوسی

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_m \cos \omega t \\ V_m \cos(\omega t - \frac{2p}{3}) \\ V_m \cos(\omega t + \frac{2p}{3}) \end{bmatrix}$$

$$[V_{qd0}] = [T_{qd0}] [V_{abc}]$$

$$[V_{qd0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q_q & \cos(q_q - \frac{2p}{3}) & \cos(q_q + \frac{2p}{3}) \\ \sin q_q & \sin(q_q - \frac{2p}{3}) & \sin(q_q + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \cos \omega t \\ V_m \cos(\omega t - \frac{2p}{3}) \\ V_m \cos(\omega t + \frac{2p}{3}) \end{bmatrix}$$



تبدیل یک سیستم سه فاز سینوسی

$$[V_{qd0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q_q & \cos(q_q - \frac{2p}{3}) & \cos(q_q + \frac{2p}{3}) \\ \sin q_q & \sin(q_q - \frac{2p}{3}) & \sin(q_q + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \cos wt \\ V_m \cos(wt - \frac{2p}{3}) \\ V_m \cos(wt + \frac{2p}{3}) \end{bmatrix}$$

$$[V_{qd0}] = \frac{2V_m}{3} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} \cos(q_q - wt) \\ -\frac{3}{2} \sin(wt - q_q) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[V_{qd0}] = V_m \begin{bmatrix} \cos(q_q - wt) \\ \sin(q_q - wt) \\ 0 \end{bmatrix}$$



تبدیل یک سیستم سه فاز سینوسی

$$V_{qd0} = V_m \begin{bmatrix} \cos(q_q - wt) \\ \sin(q_q - wt) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$q_q = wt + q_0 \quad \longrightarrow \quad V_{qd0} = V_m \begin{bmatrix} \cos q_0 \\ \sin q_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

انتقال توان در تبدیل پارک

$$P_{abc} = [V_{abc}]^T [i_{abc}]$$

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$[i_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$[V_{qd0}] = [T_{qd0}] [V_{abc}]$$

$$[V_{abc}] = [T_{qd0}]^{-1} [V_{qd0}]$$

$$\rightarrow P_{abc} = \left([T_{qd0}]^{-1} [V_{qd0}] \right)^T \left([T_{qd0}]^{-1} [i_{qd0}] \right)$$



از طرفی $\rightarrow [T_{qd0}(qq)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos qq & \sin qq & 1 \\ \cos(qq - \frac{2p}{3}) & \sin(qq - \frac{2p}{3}) & 1 \\ \cos(qq + \frac{2p}{3}) & \sin(qq + \frac{2p}{3}) & 1 \end{bmatrix}$

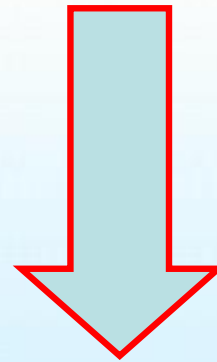
$\& \rightarrow ([T_{qd0}(q_q)]^{-1})^T = \begin{bmatrix} \cos qq & \cos(qq - \frac{2p}{3}) & \cos(qq + \frac{2p}{3}) \\ \sin qq & \sin(qq - \frac{2p}{3}) & \sin(qq + \frac{2p}{3}) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

در نتیجه به دست خواهیم آورد $\Rightarrow ([T_{qd0}]^{-1})^T [T_{qd0}]^{-1} = \begin{bmatrix} 3/2 & 0 & 0 \\ 0 & 3/2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$



پس →

$$P_{abc} = \frac{3}{2} V_q I_q + \frac{3}{2} V_d I_d + 3V_0 I_0$$



این تبدیل حافظ توان نیست .



$$P_{abc} = [V_{qd0}]^T \left([T_{qd0}]^{-1} \right)^T [T_{qd0}]^{-1} [i_{qd0}]$$

$$\left([T_{qd0}]^{-1} \right)^T [T_{qd0}]^{-1} = [I]$$



اگر بخواهیم حافظ توان باشد:

$$\left([T_{qd0}]^{-1} \right)^T = [T_{qd0}] \Rightarrow [T_{qd0}]^{-1} = [T_{qd0}]^T$$

یعنی ترانزفاده ماتریس با معکوس آن باید برابر باشد. به تعبیر دیگر باید ماتریس متعامد باشد.



تبدیل تعمیم یافته پارک (qd0)

$$[F_{qd0}] = [T_{qd0}(q)] [F_{abc}] = \begin{bmatrix} fq \\ fd \\ f_0 \end{bmatrix} \rightarrow [T_{qd0}(q)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q & \cos(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q + \frac{2p}{3}) \\ \sin q & \sin(q - \frac{2p}{3}) & \sin(q + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$



سرعت چرخش محور q سرعتی دلخواه (سنکرون، غیر سنکرون یا صفر) است



قسمت هفتم

کلیات ماشین القایی



ماشین القایی (آسنکرون یا اندوکسیونی)

شامل موتور و ژنراتور بصورت زیر تقسیم بندی میشود :

موتور های القایی }
گردشی (معمولی)
خطی

ژنراتور های القایی عموماً در نیروگاههای بادی و نظایر آن استفاده میشوند

موتورهای القایی معمولی قریب 90% موتورهای مورد استفاده در صنعت را تشکیل میدهند.

موتورهای خطی اغلب در سیستمهای حمل و نقل ریلی و تجهیزات نظامی بکار برده میشوند.

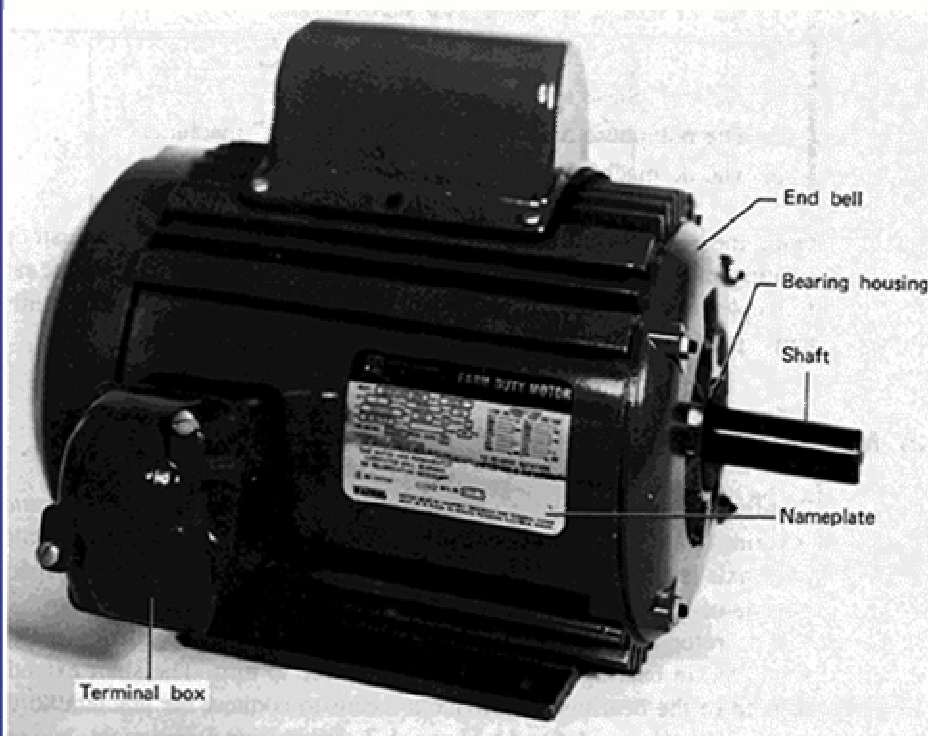
کاربرد موتور ها:



۷۰٪ انرژی الکتریکی توسط موتور های القایی مصرف می شود

مزایای موتور های القایی:

- ۱- سادگی و استحکام ساختمان
- ۲- عدم نیاز به تعمیر و مراقبت مستمر
- ۳- قیمت پایینتر نسبت به DC



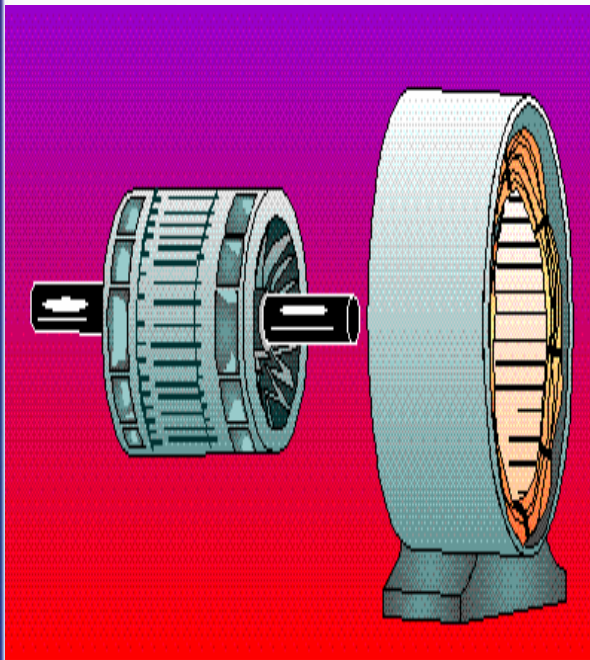
معایب موتور های القایی

- ۱- کنترل پیچیده تر
- ۲- ضریب قدرت نسبتا پایین و عدم کنترل توان راکتیو



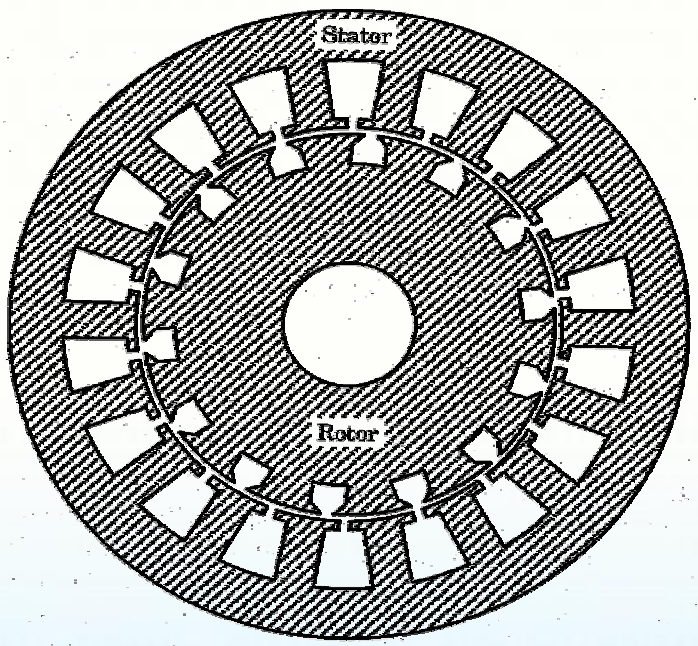
موتور القایی :

- ۱- تکفاز ← مصارف خانگی
- ۲- دو فاز ← موارد خاص در صنعت
- ۳- سه فاز ← عموم مصارف صنعتی

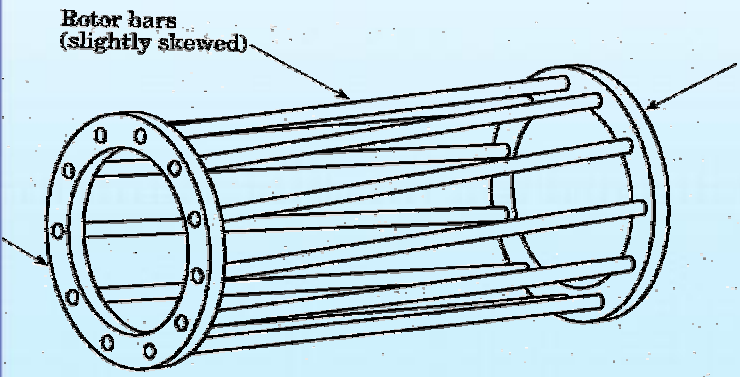


ساختمان موتور های القایی } استاتور (ثابت)
روتور (گردان)

هر دو جزاز دو قسمت هسته و سیم پیچی تشکیل شده است
هسته برای از بین بردن تلفات فوکو یا کم کردن آن ورقه
ورقه میشود



(a)



(b)

سیم پیچی شده

قفس سنجابی

روتور موتور های القایی

شمش مسی (موتور بزرگ)

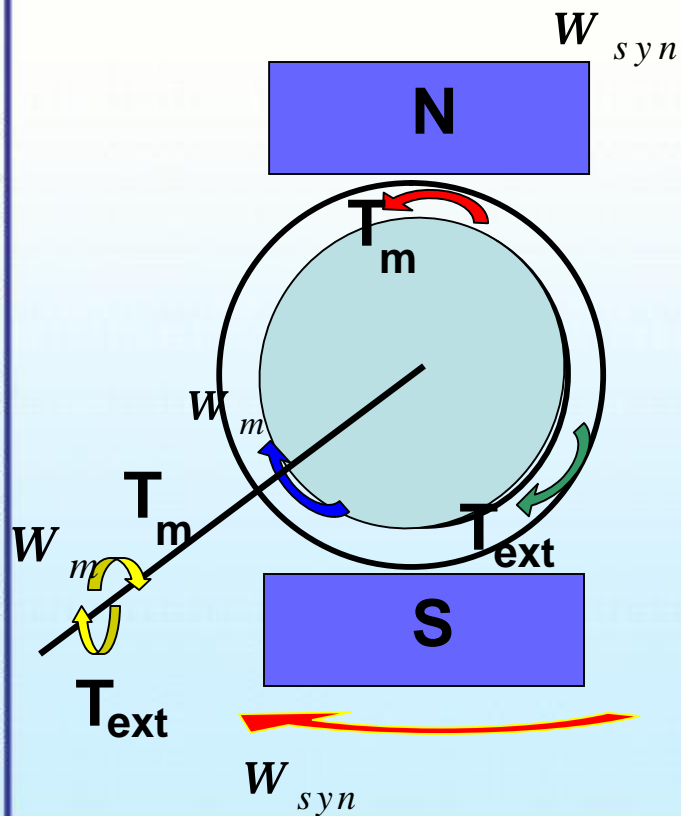
شمش آلومینیوم (موتور کوچک)

روتور قفس سنجابی



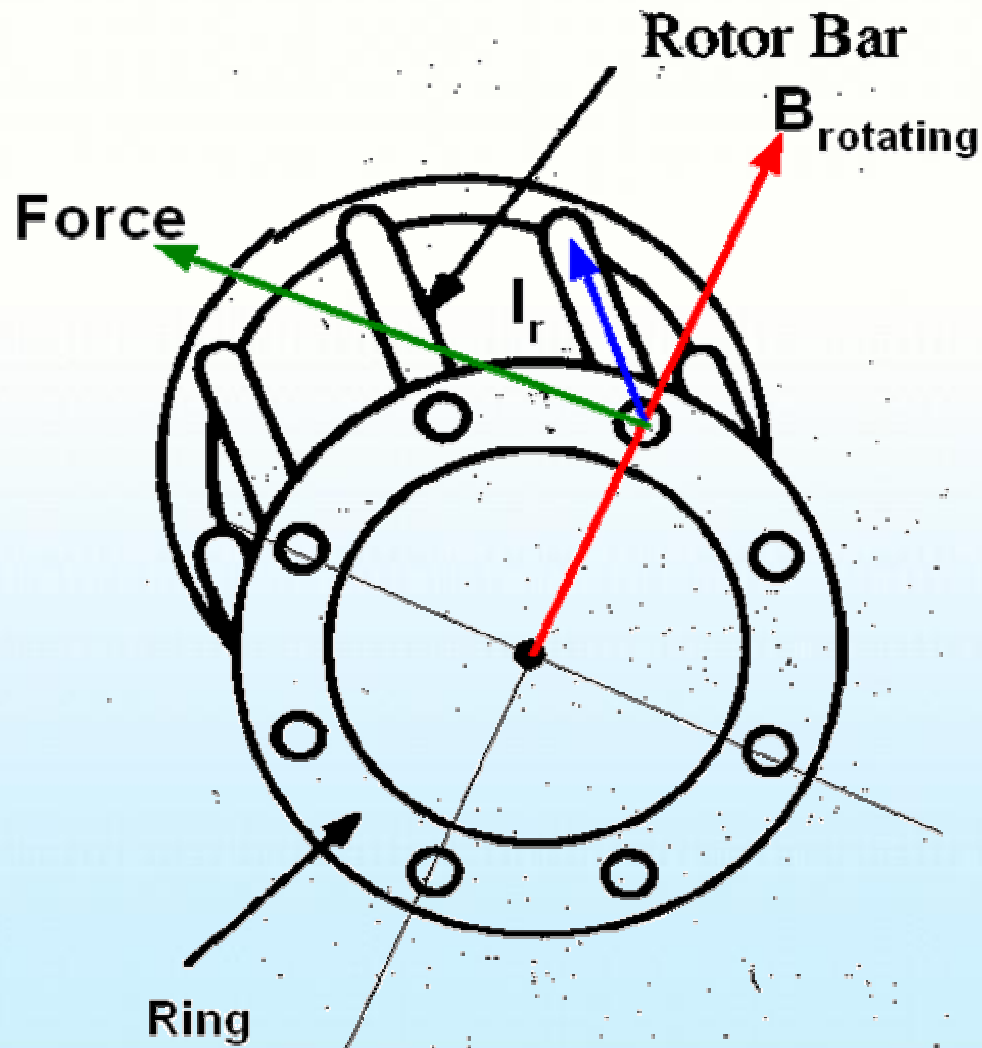
اساس کار موتور های القایی

هنگامی که دو قطب یک آهن ربا با یک سرعت زاویه ای معین در حول یک سیم پیچی می چرخانیم درون سیم پیچ طبق قانون فاراده ولتاژ و جریانی القا می شود که مطابق قانون لنز با عامل بوجود آورنده اش مخالفت می کند



سیم پیچ گشتاوری ایجاد میکند تا رتور در جهت حرکت آهنربا بچرخد و سرعت نسبی بین این دو کم شود.

اساس کار موتور های القایی





میدان مغناطیسی گردان

استاتور یک موتور القایی سه فاز با سه کلاف متمرکز را در نظر بگیرید هر چند در عمل سیم پیچی های مربوط به هر فاز داخل چندین شیار قرار گرفته اند. فرض میکنیم محور سیم پیچها با یکدیگر 120 درجه اختلاف فاز مکانی داشته باشند چگالی شار یا شدت میدان مغناطیسی یا mmf استاتور هر فاز به شکل زیر است

$$F_a = K i_a \cos(q)$$

$$F_b = K i_b \cos\left(q - \frac{2p}{3}\right)$$

$$F_c = K i_c \cos\left(q + \frac{2p}{3}\right)$$



اگر جریان متناوب سینوسی از کلافها بگذرد در این صورت mmf ضربانی یا نوسانی حاصل میشود, که دامنه و جهت آن به مقدار لحظه ای جریان عبوری از سیم پیچی بستگی دارد.

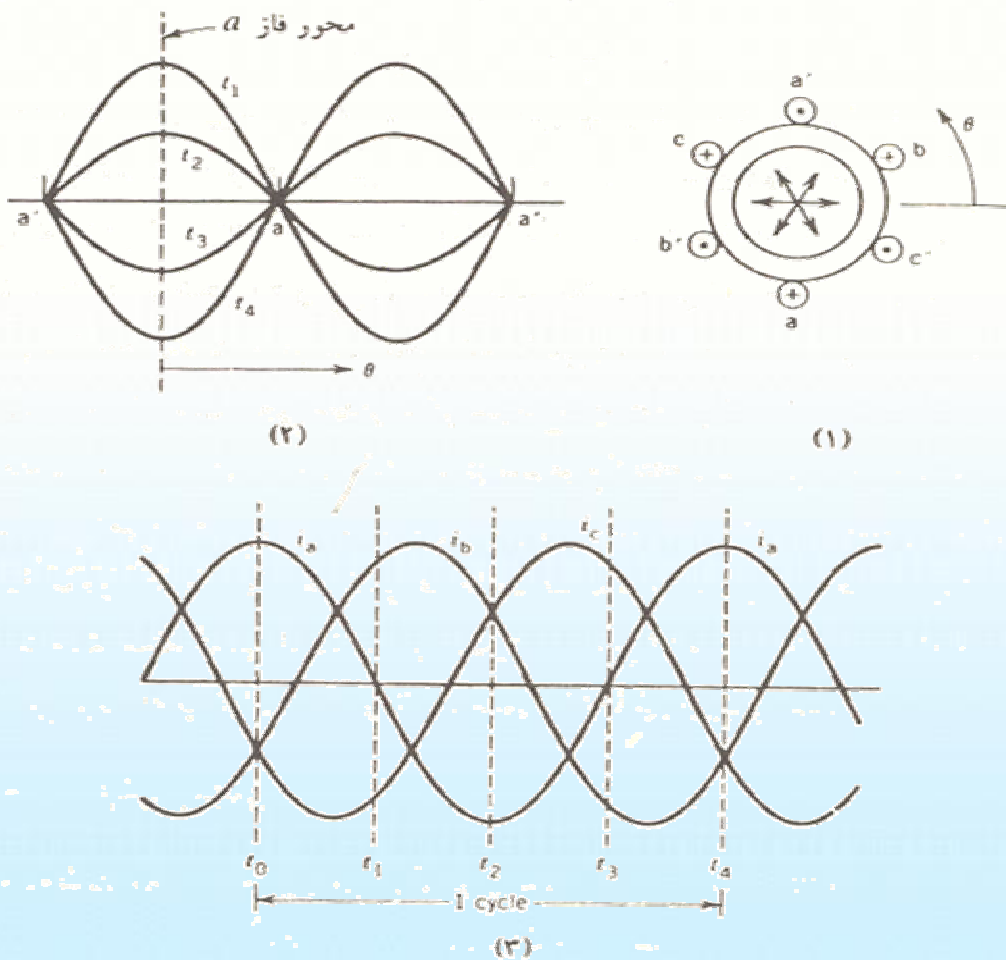
$$i_a = I_m \cos(wt)$$

$$i_b = I_m \cos(wt - \frac{2p}{3})$$

$$i_c = I_m \cos(wt + \frac{2p}{3})$$



در این صورت هر فاز موج mmf مربوطه را با توزیع سینوسی در فضا ایجاد می کند



شکل ۵-۴ mmf ضربانی یا نوسانی



هنگامی که شکل موج برآیند ناشی از جاری شدن جریان سه فاز سینوسی را بدست آوریم، یک موج با دامنه ثابت که در حوزه مکان جابجا میشود بدست می آید :

$$F_T = F_a + F_b + F_c$$

$$F_T = K I_m \left[\cos\left(\omega t - \frac{2p}{3} \right) \cos\left(q - \frac{2p}{3} \right) + \cos\left(\omega t + \frac{2p}{3} \right) \cos\left(q + \frac{2p}{3} \right) + \cos \omega t \cos q \right]$$

$$F_c = \frac{3}{2} K I_m \cos(q - \omega t)$$

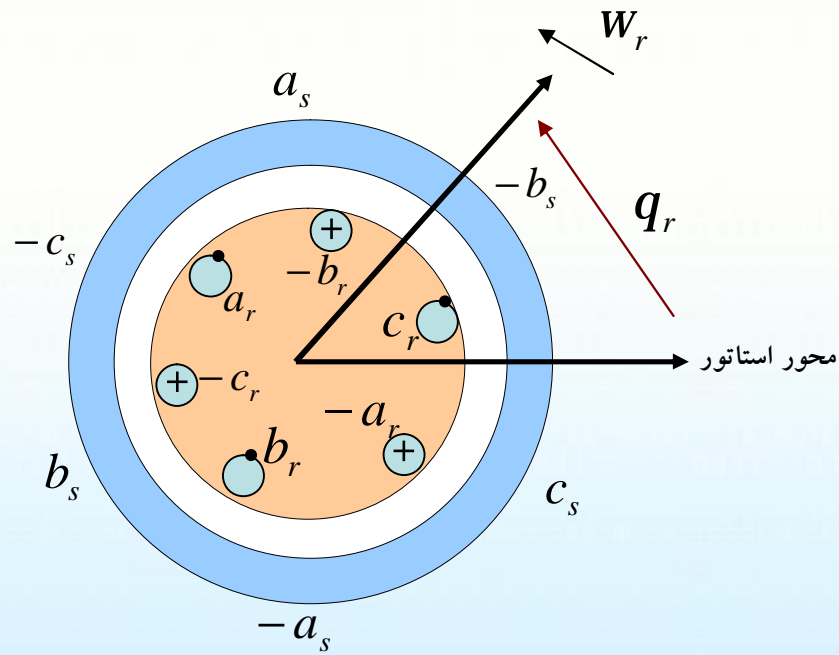


قسمت هشتم

مدلسازی ماشین القائی در سیستم abc



معادلات ولتاژ- جریان ماشین القایی سه فاز





معادلات ولتاژ و جریان

استاتور

$$V_{as} = r_s i_{as} + \frac{d}{dt} \lambda_{as}$$

$$V_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \lambda_{bs}$$

$$V_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \lambda_{cs}$$

رور

$$V_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d}{dt} \lambda_{ar}$$

$$V_{br} = r_r i_{br} + \frac{d}{dt} \lambda_{br}$$

$$V_{cr} = r_r i_{cr} + \frac{d}{dt} \lambda_{cr}$$



معادلات شار - جریان

$$\begin{bmatrix} I_s^{abc} \\ I_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow [I_s^{abc}]^T = [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]$$

$$\rightarrow [i_s^{abc}]^T = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]$$

$$[L_{ss}^{abc}] = \begin{bmatrix} L_{aa}^s & L_{ab}^s & L_{ac}^s \\ L_{ba}^s & L_{bb}^s & L_{bc}^s \\ L_{ca}^s & L_{cb}^s & L_{cc}^s \end{bmatrix}$$



ماتریس اندوکتانس استاتور

ماتریس اندوکتانس استاتور یک ماتریس با عناصر نا متغیر با زمان بوده و مولفه های آن عبارتند از :

اندوکتانس پراکندگی فاز استاتور (L_{1s})

اندوکتانس مغناطیس کنندگی فاز استاتور (L_{ss})

اندوکتانس متقابل بین فاز سیم پیچهای استاتور (L_{sm})

$$[L_{ss}^{abc}] = \begin{bmatrix} L_{1s} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{1s} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{1s} + L_{ss} \end{bmatrix}$$



ماتریس اندوکتانس رتور

ماتریس اندوکتانس رتور یک ماتریس با عناصر نا متغیر با زمان بوده و مولفه های آن عبارتند از :

اندوکتانس پراکندگی فازرتور (L_{lr})

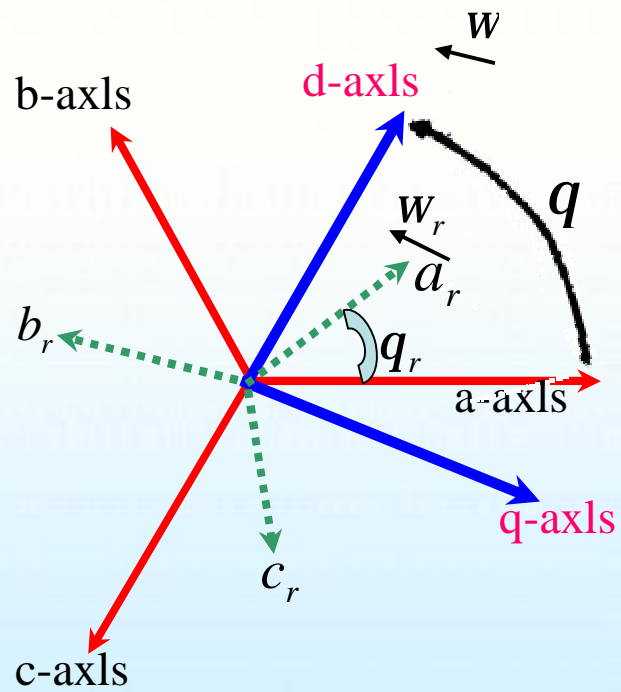
اندوکتانس مغناطیس کنندگی فاز رتور (L_{rr})

اندوکتانس متقابل بین فاز سیم پیچهای رتور (L_{rm})

$$\begin{bmatrix} L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa}^r & L_{ab}^r & L_{ac}^r \\ L_{ba}^r & L_{bb}^r & L_{bc}^r \\ L_{ca}^r & L_{cb}^r & L_{cc}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix}$$



قابهای مرجع در ماشین القایی سه فاز





ماتریس اندوکتانس متقابل استاتور-رتور

ماتریس اندوکتانس متقابل استاتور-رتور یک ماتریس با عناصر متغیر با زمان بوده و مولفه های آن عبارتند از :

زاویه بین فاز اول سیم پیچهای استاتور و رتور (q_r)
 اندوکتانس متقابل بین فاز سیم پیچهای استاتور و رتور (L_{sr})

$$\mathbf{L}_{sr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{asar} & L_{asbr} & L_{ascr} \\ L_{bsar} & L_{bsbr} & L_{bscr} \\ L_{csar} & L_{csbr} & L_{cscr} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{sr}^{abc} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$



ماتریس اندوکتانس متقابل استاتور- رتور

ماتریس اندوکتانس متقابل رتور- استاتور نیز یک ماتریس با عناصر متغیر با زمان بوده و مولفه های آن عبارتند از :

زاویه بین فازول سیم پیچهای استاتور و رتور (q_r)
اندوکتانس متقابل بین فاز سیم پیچهای استاتور و رتور (L_{sr})

$$[L_{rs}^{abc}] = \begin{bmatrix} L_{aras} & L_{arbs} & L_{arcs} \\ L_{bras} & L_{brbs} & L_{brcs} \\ L_{cras} & L_{crbs} & L_{crCs} \end{bmatrix}$$

$$[L_{rs}^{abc}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos q_r & \cos(q_r - \frac{2p}{3}) & \cos(q_r + \frac{2p}{3}) \\ \cos(q_r + \frac{2p}{3}) & \cos q_r & \cos(q_r - \frac{2p}{3}) \\ \cos(q_r - \frac{2p}{3}) & \cos(q_r + \frac{2p}{3}) & \cos q_r \end{bmatrix}$$



مقدار q_r به سرعت رتور و طبعا به زمان وابسته است :

$$q_r = w_r t + q_{r0}$$

همانگونه که ملاحظه میشود ماتریس $[L_{rs}^{abc}]$ ترانهاده ماتریس

$[L_{sr}^{abc}]$ میباشد :

$$\rightarrow [L_{rs}^{abc}] = [L_{sr}^{abc}]^T$$



معادلات ولتاژ - جریان

$$\begin{bmatrix} V_s^{abc} \\ V_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s^{abc} & 0 \\ 0 & R_r^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \right)$$

$$[R_r^{abc}] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[R_s^{abc}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[L_{ss}^{abc}] = \begin{bmatrix} L_{1s} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{1s} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{1s} + L_{ss} \end{bmatrix}$$



معادلات ولتاژ - جریان

$$\begin{bmatrix} V_s^{abc} \\ V_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s^{abc} & 0 \\ 0 & R_r^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \right)$$

$$[L_{rr}^{abc}] = \begin{bmatrix} L_{1r} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{1r} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{1r} + L_{rr} \end{bmatrix}$$

$$[L_{rs}^{abc}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos q_r & \cos(q_r - \frac{2p}{3}) & \cos(q_r + \frac{2p}{3}) \\ \cos(q_r + \frac{2p}{3}) & \cos q_r & \cos(q_r - \frac{2p}{3}) \\ \cos(q_r - \frac{2p}{3}) & \cos(q_r + \frac{2p}{3}) & \cos q_r \end{bmatrix}$$



قسمت نهم

مدلسازی ماشین القائی در سیستم qd0



در معادلات ولتاژ - جریان :

کمیات فازها به هم وابسته هستند

ماتریس اندوکتانس متغیر با زمان است

پس برای سهولت محاسبات و حل مشکلات فوق از تبدیل ($qd0$)

در قاب مرجع گردان با سرعت دلخواه ($q = w t + q_0$) استفاده میکنیم .

لازم به ذکر است که ماتریس تبدیل مولفه های استاتور ورتور، بدلیل تفاوت

سرعت نسبی قاب مرجع با رتور و استاتور، متفاوت میباشد :



روابط تبدیل (qd0) برای مولفه های استاتور :

$$\begin{cases} [f_s^{qd0}] = [T_{qd0}(\underline{q})][f_s^{abc}] \\ [f_s^{abc}] = [T_{qd0}(\underline{q})]^{-1}[f_s^{qd0}] \end{cases}$$

$$[T_{qdo}(\underline{q})] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \underline{q} & \cos(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q + \frac{2p}{3}) \\ \sin q & \sin(q - \frac{2p}{3}) & \sin(q + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$



روابط تبدیل (qd0) برای مولفه های رتور :

$$\begin{cases} [f_r^{qd0}] = [T_{qd0}(q - q_r)] [f_r^{abc}] \\ [f_r^{abc}] = [T_{qd0}(q - q_r)]^{-1} [f_r^{qd0}] \end{cases}$$

$$[T_{qd0}(q - q_r)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(q - q_r) & \cos(q - q_r - \frac{2p}{3}) & \cos(q - q_r + \frac{2p}{3}) \\ \sin(q - q_r) & \sin(q - q_r - \frac{2p}{3}) & \sin(q - q_r + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

معادلات ولتاژ - جریان استاتور

اعمال تبدیل بر روی مولفه های استاتور و روتور جداگانه انجام میشود:

$$[V_s^{abc}] = [R_s^{abc}] [i_s^{abc}] + \frac{d}{dt} [\lambda_s^{abs}]$$

$$[V_s^{abc}] = [T_{qd0}(q)]^{-1} [V_s^{qd0}]$$

$$[i_s^{abc}] = [T_{qd0}(q)]^{-1} [i_s^{qd0}]$$

$$[I_s^{abc}] = [T_{qd0}(q)]^{-1} [I_s^{qd0}]$$

با جایگزینی مقادیر ولتاژ، جریان و شار سه فاز با مقادیر متناظر قاب مرجع گردان داریم:

$$[T_{qd0}(q)]^{-1} [V_s^{qd0}] = [R_s^{abc}] [T_{qd0}(q)]^{-1} [i_s^{qd0}] + p([T_{qd0}(q)]^{-1} [I_s^{qd0}])$$



معادلات ولتاژ - جریان استاتور

حال طرفین معادله ولتاژ- جریان را در ماتریس $[T_{qd0}(q)]$ ضرب میکنیم

$$[T_{qd0}(q)][T_{qd0}(q)]^{-1}[V_s^{qd0}] =$$

$$[T_{qd0}(q)][R_s^{abc}][T_{qd0}(q)]^{-1}[i_{as}^{qd0}] + [T_{qd0}(q)]p([T_{qd0}(q)]^{-1}[I_s^{qd0}])$$

ماتریس مقاومت استاتور را بصورت زیر میتوان نوشت :

$$[R_s^{abc}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} = R_s [I]$$

با جایگزینی ماتریس مقاومت داریم :

$$[V_s^{qd0}] = R_s [T_{qd0}(q)][I][T_{qd0}(q)]^{-1}[i_{as}^{qd0}] + [T_{qd0}(q)]p([T_{qd0}(q)]^{-1}[I_s^{qd0}])$$



معادلات ولتاژ - جریان استاتور

پس از ساده سازی و بسط رابطه شار دور داریم :

$$[V_s^{qd0}] = [R_s^{qd0}][i_s^{qd0}] + [T(q)][T(q)]^{-1} p[I_s^{qd0}] + [T(q)]p[T(q)]^{-1}[I_s^{qd0}]$$

$$[V_s^{qd0}] = [R_s^{qd0}][i_s^{qd0}] + p[I_s^{qd0}] + [T(q)]p[T(q)]^{-1}[I_s^{qd0}]$$

$$p[T(q)]^{-1} = \frac{d}{dt}[T(q)]^{-1} = \frac{d}{dq}[T(q)]^{-1} \frac{dq}{dt}$$

$$[T(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$



معادلات ولتاژ - جریان استاتور

$$\frac{d}{dq} ([T(q)]^{-1}) = \begin{bmatrix} -\sin q & \cos q & 0 \\ -\sin(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q - \frac{2p}{3}) & 0 \\ -\sin(q + \frac{2p}{3}) & -\cos(q + \frac{2p}{3}) & 0 \end{bmatrix}$$

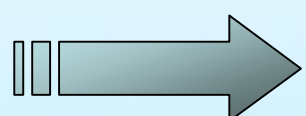
$$\begin{aligned} [T(q)](P[T(q)]^{-1}) &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q & \cos(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q + \frac{2p}{3}) \\ \sin q & \sin(q - \frac{2p}{3}) & \sin(q + \frac{2p}{3}) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \Rightarrow [T(q)] \left(\frac{1}{2} \frac{d}{dq} [T(q)]^{-1} \right) &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dq} \begin{bmatrix} \sin(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q - \frac{2p}{3}) \\ \sin(q + \frac{2p}{3}) & -\cos(q + \frac{2p}{3}) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$



معادلات ولتاژ - جریان استاتور

$$\underbrace{[V_s^{qd0}]}_{(1)} = \underbrace{[R_s^{qd0}]}_{(2)} [i_s^{qd0}] + p \underbrace{[I_s^{qd0}]}_{(3)} + w \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [I_s^{qd0}]$$

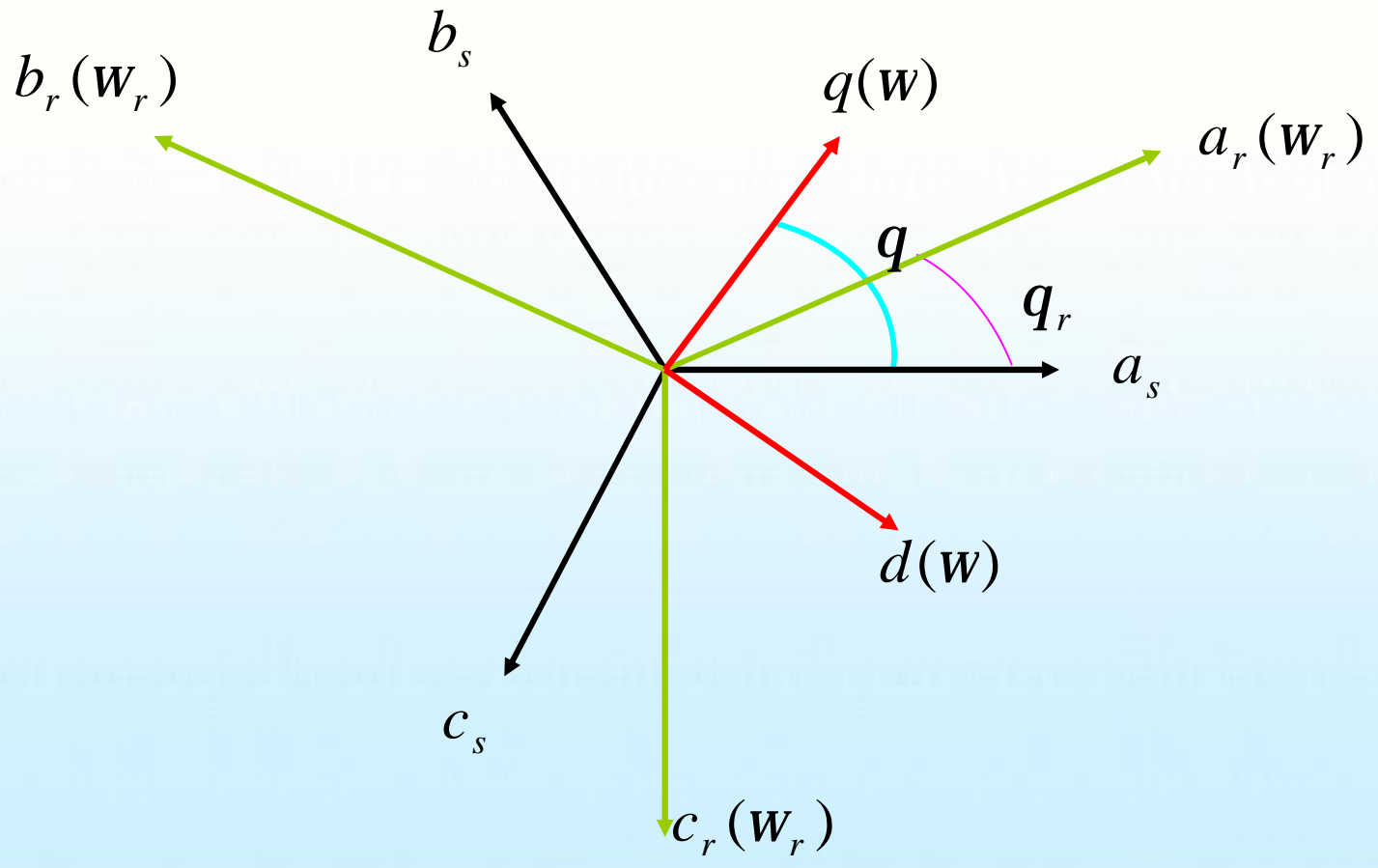
در رابطه فوق بخش اول ولتاژ اهمی، بخش دوم ولتاژ ترانسفورمری و بخش سوم ولتاژ گردشی میباشد که به سرعت نسبی قاب مرجع و محور سیم پیچها بستگی دارد:



$\left\{ \begin{array}{l} V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} l_{qs} + w l_{ds} \\ V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} l_{ds} - w l_{qs} \\ V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d}{dt} l_{os} \end{array} \right.$

معادلات ولتاژ - جریان رتور

$$\begin{bmatrix} V_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{abc} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} l_r^{abc} \end{bmatrix}$$



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



معادلات ولتاژ - جریان رتور

حال تبدیل (qd0) را بر مولفه های رتور اعمال میکنیم:

$$[V_r^{abc}] = [T_{qd0}(q - q_r)]^{-1} [V_r^{qd0}]$$

$$[i_r^{abc}] = [T_{qd0}(q - q_r)]^{-1} [i_r^{qd0}]$$

$$[I_r^{abc}] = [T_{qd0}(q - q_r)]^{-1} [I_r^{qd0}]$$



با جایگزینی مقادیر ولتاژ، جریان و شار سه فاز با مقادیر متناظر در قاب مرجع گردان داریم:

$$[T_{qd0}(q - q_r)]^{-1} [V_r^{qd0}] = [R_r^{abc}] [T_{qd0}(q - q_r)]^{-1} [i_r^{qd0}] + p([T_{qd0}(q - q_r)]^{-1} [I_r^{qd0}])$$



معادلات ولتاژ - جریان رتور

روابط ولتاژ- جریان روتور نیز مشابه با معادلات استاتور بدست میآید:

$$\begin{bmatrix} V_r^{qd0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r^{qd0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{qd0} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} l_r^{qd0} \end{bmatrix} + (w - w_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_r^{qd0} \end{bmatrix}$$



معادلات شار - جریان استاتور

حال تبدیل (qd0) را بر روی روابط شار - جریان استاتور اعمال می کنیم :

$$\begin{bmatrix} I_s^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{sr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{abc} \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} T(q) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_s^{qd0} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(q) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_s^{qd0} \end{bmatrix}}_{\text{تبدیل (qd0) برای متغیرهای استاتور}} + \underbrace{\begin{bmatrix} L_{sr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(q - qr) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_r^{qd0} \end{bmatrix}}_{\text{تبدیل (qd0) برای متغیرهای رتور}}$$

تبدیل (qd0) برای متغیرهای استاتور

تبدیل (qd0) برای متغیرهای رتور



معادلات شار- جریان استاتور

پس از ساده سازی روابط داریم:

$$[T(q)]^{-1} [I_s^{qd0}] = [L_{ss}^{abc}] [T(q)]^{-1} [i_s^{qd0}] + [L_{sr}^{abc}] [T(q - qr)]^{-1} [i_r^{qd0}]$$

$$[I_s^{qd0}] = [T(q)] [L_{ss}^{abc}] [T(q)]^{-1} [i_s^{qd0}] + [T(q)] [L_{sr}^{abc}] [T(q - qr)]^{-1} [i_r^{qd0}]$$

ماتریس اندوکتانس خودی استاتور (qd0)

ماتریس اندوکتانس متقابل استاتور-رتور (qd0)




$$\Rightarrow [I_s^{qd0}] = [L_{ss}^{qd0}] [i_s^{qd0}] + [L_{sr}^{qd0}] [i_r^{qd0}]$$



ماتریس اندوکتانس خودی استاتور (qd0):

$$[L_{ss}^{qd0}] = [T(q)] [L_{ss}^{abc}] [T(q)]^{-1}$$

$$= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q & \cos(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q + \frac{2p}{3}) \\ \sin q & \sin(q - \frac{2p}{3}) & \sin(q + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{1s} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{1s} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{1s} + L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q & \sin q & 1 \\ \cos(q - \frac{2p}{3}) & \sin(q - \frac{2p}{3}) & 1 \\ \cos(q + \frac{2p}{3}) & \sin(q + \frac{2p}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow [L_{ss}^{qd0}] = \begin{bmatrix} L_{1s} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1s} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{1s} \end{bmatrix}$$



ماتریس اندوکتانس متقابل استاتور- رتور (qd0):

$$[L_{sr}^{qd0}] = [T(q)] [L_{sr}^{abc}] [T(q - qr)]^{-1}$$

$$\rightarrow [L_{sr}^{qd0}] = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



معادلات شار- جریان رتور

$$\begin{bmatrix} I_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{abc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{rs}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} T(q - q_r) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_r^{qd0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(q - q_r) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_r^{qd0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{rs}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(q) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_s^{qd0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_r^{qd0} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} T(q - q_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(q - q_r) \end{bmatrix}^{-1}}_{\text{ماتریس اندوکتانس خودی رتور (qd0)}} \begin{bmatrix} i_r^{qd0} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} T(q - q_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{rs}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(q) \end{bmatrix}^{-1}}_{\text{ماتریس اندوکتانس متقابل رتور-استاتور (qd0)}} \begin{bmatrix} i_s^{qd0} \end{bmatrix}$$

ماتریس اندوکتانس خودی رتور (qd0)

ماتریس اندوکتانس متقابل رتور-استاتور (qd0)

$$\begin{bmatrix} I_r^{qd0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{rr}^{qd0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{qd0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{rs}^{qd0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{qd0} \end{bmatrix}$$



ماتریس اندوکتانس خودی رتور (qd0):

$$[L_{rr}^{qd0}] = \begin{bmatrix} L_{1r} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1r} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{1r} \end{bmatrix}$$

ماتریس اندوکتانس متقابل رتور-استاتور (qd0):

$$[L_{rs}^{qd0}] = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



معادلات شار- جریان

$$\begin{bmatrix} l_{qs} \\ l_{ds} \\ l_{os} \\ l_{qr} \\ l_{dr} \\ l_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1s} + \frac{3}{2} L_{ss} & 0 & 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1s} + \frac{3}{2} L_{ss} & 0 & 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{1s} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 & L_{lr} + \frac{3}{2} L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 & L_{lr} + \frac{3}{2} L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{or} \end{bmatrix}$$



کاهش پارامترهای ماتریس

ماتریسهای بدست آمده بر حسب پارامترهای $L_{ss}, L_{sr}, L_{ls}, L_{rr}, L_{lr}$ هستند. برای کاستن از این پارامترها از روابط زیر که با صرف نظر کردن از افت فشار مغناطیسی در هسته استاتور و رتور بدست آمده، استفاده میکنیم:

$$L_{ss} = \frac{N_s^2}{R_g} = N_s^2 P_g \quad \rightarrow \quad L_{sm} = N_s^2 P_g \cos \frac{2p}{3} = \frac{-1}{2} L_{ss}$$

$$L_{rr} = N_r^2 P_g \quad L_{rm} = N_r^2 P_g \cos \frac{2p}{3} = -\frac{1}{2} L_{rr}$$

$$L_{sr} = N_s N_r P_g \quad \rightarrow \quad L_{sr} = (N_s^2 P_g) (N_r / N_s)$$



معادلات ولتاژ - جریان

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{os} \\ V'_{qr} \\ V'_{dr} \\ V'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & & & \\ 0 & R_s & 0 & & & \\ 0 & 0 & R_s & & & \\ & & & R'_r & 0 & 0 \\ & & & 0 & R'_r & 0 \\ & & & 0 & 0 & R'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_{qs} \\ l_{ds} \\ l_{os} \\ l'_{qr} \\ l'_{dr} \\ l'_{or} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & w & 0 & & & \\ -w & 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & \\ & & & 0 & w - w_r & 0 \\ & & & -(w - w_r) & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{qs} \\ l_{ds} \\ l_{os} \\ l'_{qr} \\ l'_{dr} \\ l'_{or} \end{bmatrix}$$

انتقال کمیتها به طرف استاتور

$$\frac{\lambda'_{qr}}{\lambda_{qr}} = \frac{N_s}{N_r} \quad \frac{i'_{qr}}{i_{qr}} = \frac{N_r}{N_s}$$

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{Ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 & \frac{3}{2}\left(\frac{N_s}{N_r}\right)L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{Ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 & \frac{3}{2}\left(\frac{N_s}{N_r}\right)L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{Ls} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}\left(\frac{N_s}{N_r}\right)L_{sr} & 0 & 0 & \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2(L_{Lr} + L_{rr}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}\left(\frac{N_s}{N_r}\right)L_{sr} & 0 & 0 & \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2(L_{Lr} + L_{rr}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{Lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix}$$

$$\frac{3}{2}\left(\frac{N_s}{N_r}\right)L_{sr} = \frac{3}{2}\left(\frac{N_s}{N_r}\right)N_s N_r P_g = \frac{3}{2}N_s^2 P_g = \frac{3}{2}L_{ss}$$



معادلات شار- جریان

پس از ساده سازی داریم :

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{os} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1s} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1s} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{1s} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 & L'_{1r} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 & L'_{1r} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{1r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix}$$



معادلات شار- جریان نهایی

با استفاده از $L_{ss} = \frac{2}{3}L_m$ در نهایت داریم :

$$\begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{os} \\ I'_{qr} \\ I'_{dr} \\ I'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1s} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{1s} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{1s} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{1r} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{1r} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{1r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix}$$



معادلات ولتاژ - جریان استاتور

از آنجا که معمولا راکتانسها بجای اندوکتانسها در اختیار قرار میگیرد، بنابراین ترجیح داده میشود که معادلات بر حسب راکتانسها نوشته شود. در نتیجه معادلات ولتاژ - جریان استاتور به صورت زیر تغییر میکند :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{qs} = Ri_{qs} + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y_{qs} + \frac{w}{w_b} y_{ds} \\ v_{ds} = Ri_{ds} + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y_{ds} - \frac{w}{w_b} y_{qs} \end{array} \right.$$



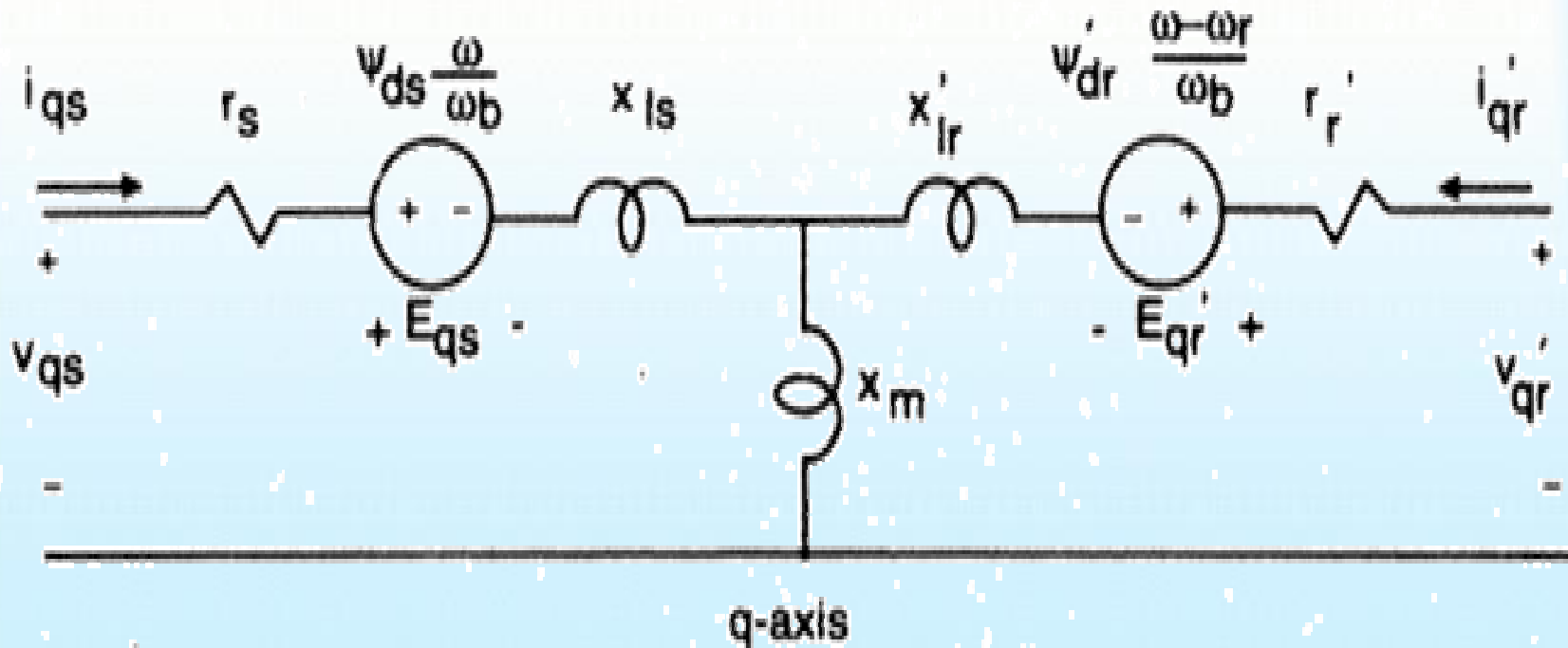
معادلات ولتاژ - جریان رتور

$$\left\{ \begin{aligned} v'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} y'_{qr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} y'_{dr} \\ v'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} y'_{dr} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} y'_{qr} \end{aligned} \right.$$



مدل مدارای محور q

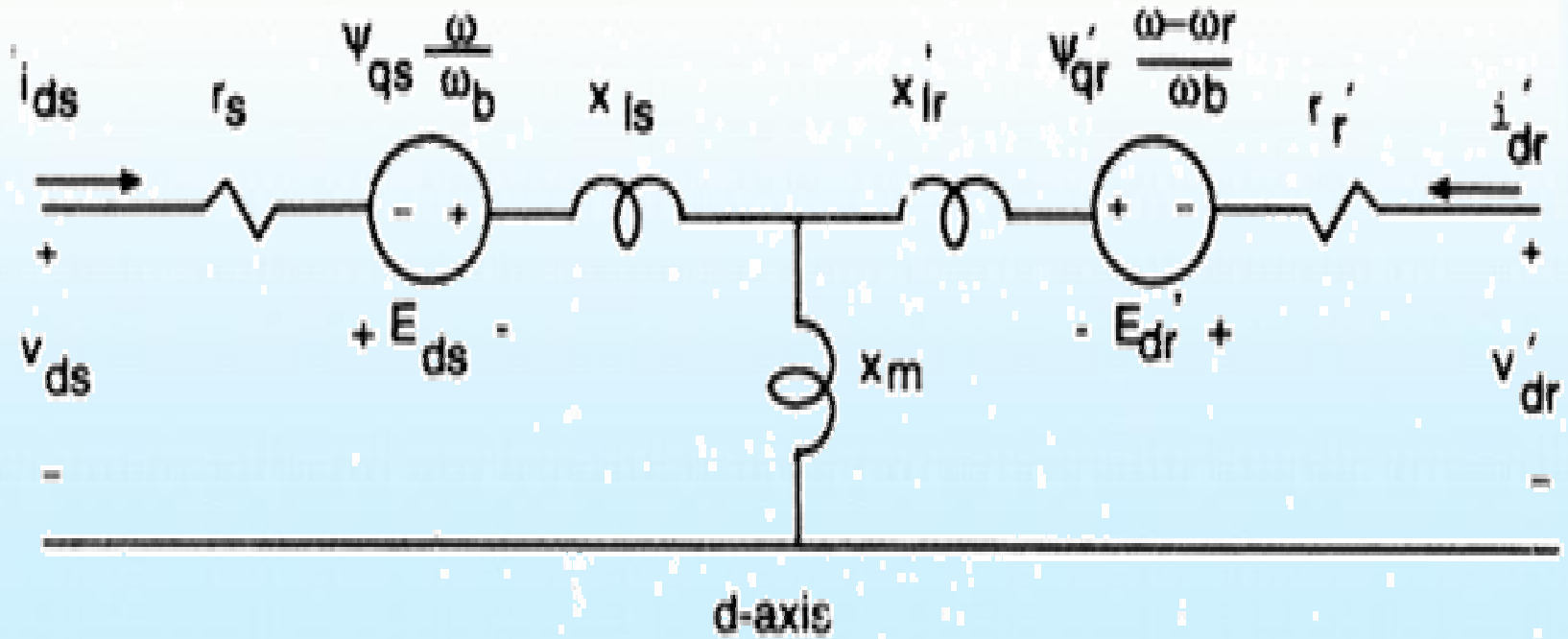
با توجه به دو رابطه بدست آمده، میتوان مدل مدارای بر روی محور q را بدست آورد.





مدل مداری محور d

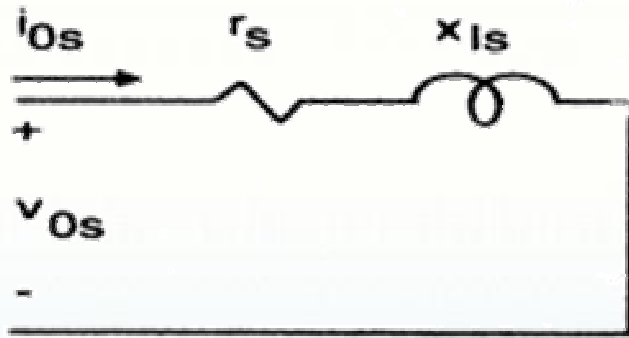
برای بدست آوردن مدل مداری بر روی محور d نیز میتوان همانند مدل محور q عمل کرد.



مدار معادل مولفه صفر روتور و استاتور



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



استاتور



رتور





معادله دینامیکی ماشین

پس از آنکه معادلات الکتریکی بدست آمد، اکنون برای نوشتن معادله دینامیکی ماشین رابطه ای برای گشتاور الکترومغناطیسی بدست می آوریم. برای اینکار از رابطه توان لحظه ای استفاده میکنیم:

$$P_{in} = \left[\mathbf{v}_s^{abc} \right]^T \left[\dot{\mathbf{i}}_s^{abc} \right] + \left[\mathbf{v}_r^{abc} \right]^T \left[\dot{\mathbf{i}}_r^{abc} \right]$$

$$P_{in} = (V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c)_s + (V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c)_r$$

$$P_{in} = \frac{3}{2} \left[V_{qs} i_{qs} + V_{ds} i_{ds} + 2V_{os} i_{os} + V_{qr} i_{qr} + V_{dr} i_{dr} + 2V_{or} i_{or} \right]$$

$$v_{qs} = R i_{qs} + \frac{d}{dt} l_{qs} + w l_{ds}$$

$$P_{in} = \frac{3}{2} \left[R_s i_{qs}^2 + i_{qs} \frac{d}{dt} l_{qs} + w l_{ds} i_{qs} + R_s i_{ds}^2 + i_{ds} \frac{d}{dt} l_{ds} - w l_{qs} i_{ds} + \dots \right]$$



از آنجائی که عبارات تلفات اهمی و انرژی مغناطیسی نقشی در تولید گشتاور ندارند، از این عبارات صرفنظر میکنیم. عبارات باقیمانده در ایجاد گشتاور نقش دارند :

$$P_T = \frac{3}{2} \left[w l_{ds} \cdot i_{qs} - w l_{qs} i_{ds} + (w - w_r) l'_{dr} i'_{qr} - (w - w_r) l'_{qr} i'_{dr} \right]$$


با استفاده از روابط شار- جریان میتوان ثابت کرد :

$$l_{ds} i_{qs} - l_{qs} i_{ds} = -(l'_{dr} i'_{qr} - l'_{qr} i'_{dr}) = L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds})$$

$$[(L_{1s} + L_m) i_{ds} i_{qs} + L_m i'_{dr} i_{qs}] - [(L_{1s} + L_m) i_{ds} i_{qs} + L_m i'_{qr} i_{ds}] = L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds})$$

$$[(L'_{1r} + L_m) i'_{dr} i'_{qr} + L_m i_{ds} i'_{qr}] - [(L'_{1r} + L_m) i'_{qr} i'_{dr} + L_m i_{qs} i'_{dr}] = -L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds})$$



در نتیجه داریم : 

$$P_T = \frac{3}{2} \left[w(l_{ds} \cdot i_{qs} - l_{qs} i_{ds}) + (w - w_r)(l'_{dr} i'_{qr} - l'_{qr} i'_{dr}) \right]$$

$$P_T = \frac{3}{2} \left[w(l_{ds} \cdot i_{qs} - l_{qs} i_{ds}) - (w - w_r)(l_{ds} \cdot i_{qs} - l_{qs} i_{ds}) \right]$$

$$p_T = \frac{3}{2} \left[l_{ds} i_{qs} - l_{qs} i_{ds} \right] [w - w + w_r] = \frac{3}{2} w_r (l_{ds} i_{qs} - l_{qs} i_{ds})$$



معادله گشتاور

اکنون رابطه گشتاور بدست می آید:

$$T = \frac{p_T}{\Omega_r} = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{p}{2}\right)(I_{ds}i_{qs} - I_{qs}i_{ds})$$

$$\Omega_r = \frac{2}{p} \omega_r$$

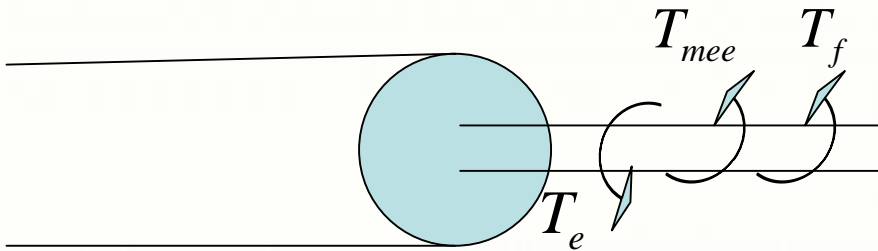
همچنین میتوان روابط مشابهی برای گشتاور الکترو مغناطیسی بدست آورد:

$$T = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{p}{2}\right)(I'_{dr}i'_{qr} - I'_{qr}i'_{dr})$$

$$T = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{p}{2}\right)L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds})$$



معادله دینامیکی حاکم بر ماشین همانند هر جسم دورانی دیگر بصورت زیر نوشته میشود:



حالت موتورسی



$$T_e - T_{mec} - T_f = J \frac{d\Omega_r}{dt}$$

حالت ژنراتوری



$$T_e + T_{mee} - T_f = J \frac{d\Omega_r}{dt}$$



سیستمهای مرجع در ماشینهای القائی

در معادلات قبل هیچ فرضی راجع به سرعت مرجع گردان نکرده و W را دلخواه فرض کردیم. بر اساس فرضی که راجع به سرعت مرجع گردان میکنیم، سه سیستم مرجع معمول در ماشینهای القائی خواهیم داشت :

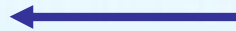
$$W = 0$$



سیستم مرجع ساکن

①

$$W = W_r$$



سیستم مرجع گردان چسبیده به روتور

②

$$W = W_s$$



سیستم مرجع گردان چسبیده به میدان استاتور

③



قسمت دهم

شبه سازی ماشین القائی



شبه سازی ماشین القایی :





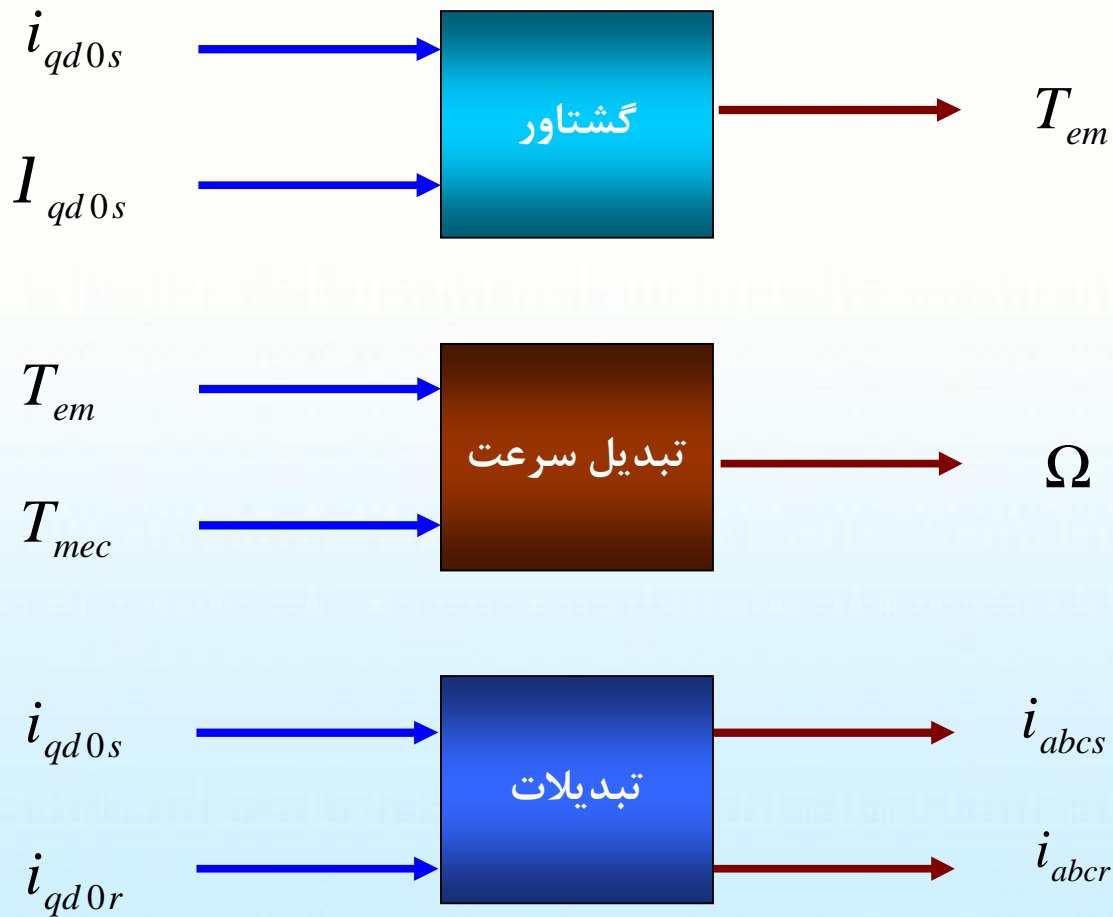
بلوکهای شبیه سازی

بلوک شبیه سازی فوق شامل چندین زیر بلوک به شرح زیر میباشد :



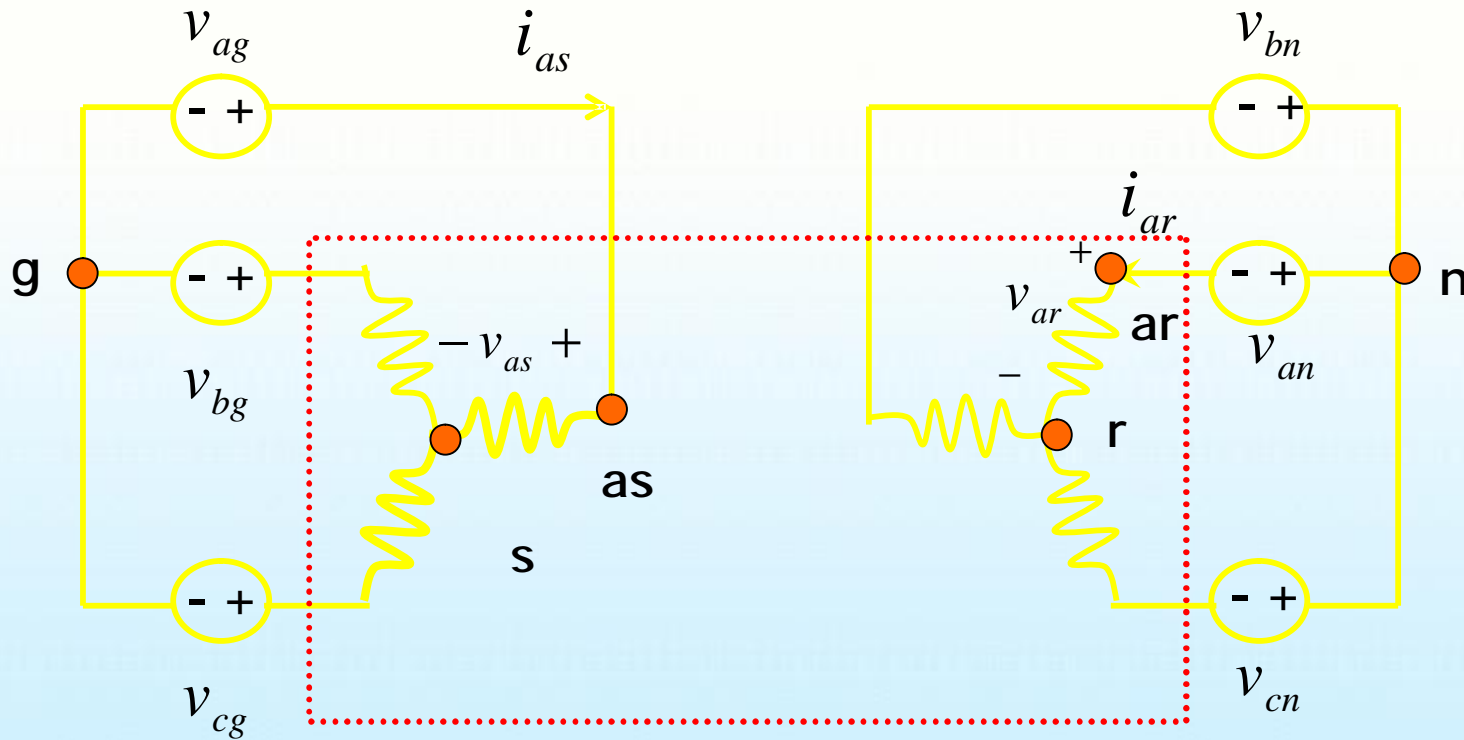


بلوکهای شبیه سازی





شبیه سازی مجموعه موتور القایی و منابع تغذیه



موتور القایی



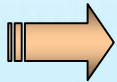
شبیه سازی مجموعه موتور القایی و منابع تغذیه

ابتدا ولتاژهای سیم پیچها را بر اساس مقدار ولتاژ منابع ولتاژ اعمالی به سیستم باز نویسی میکنیم :

$$\begin{cases} v_{as} = v_{ag} - v_{sg} \\ v_{bs} = v_{bg} - v_{sg} \\ v_{cs} = v_{cg} - v_{sg} \end{cases}$$

$$-3v_{sg} = v_{as} + v_{bs} + v_{cs} - (v_{ag} + v_{bg} + v_{cg})$$

$$v_{sg} = R_{sg} (i_{as} + i_{bs} + i_{cs}) + L_{sg} \frac{d}{dt} (i_{as} + i_{bs} + i_{cs})$$



$$= 3(R_{sg} + L_{sg} \frac{d}{dt})(i_{0s})$$



شبیه سازی مجموعه موتور القایی و منابع تغذیه

اکنون تبدیل قاب مرجع ساکن ($w = 0$) را به ولتاژهای ورودی اعمال میکنیم
 $(q = wt)$:

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q & \cos(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q + \frac{2p}{3}) \\ \sin q & \sin(q - \frac{2p}{3}) & \sin(q + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \Rightarrow T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$v_{qs}^s = \frac{2}{3} v_{as} - \frac{1}{3} v_{bs} - \frac{1}{3} v_{cs} = \frac{2}{3} v_{ag} - \frac{1}{3} v_{bg} - \frac{1}{3} v_{cg}$$

$$v_{ds}^s = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{bs} - v_{cs}) = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{cg} - v_{bg})$$

$$v_{0s}^s = \frac{1}{3} v_{as} + \frac{1}{3} v_{bs} + \frac{1}{3} v_{cs} = \frac{1}{3} v_{ag} + \frac{1}{3} v_{bg} + \frac{1}{3} v_{cg}$$



شبيه سازى مجموعه موتور القايى و منابع تغذيه

حال معادلات $qd0$ را در دستگاه مرجع ساکن نوشته و با توجه به ورودیها و خروجیها و متغیرهای حالت، آنها را بازنویسی میکنیم.

معادلات محور q

$$v_{qs}^s = r_s i_{qs}^s + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y_{qs}^s + \cancel{\frac{w}{w_b}} y_{ds}^s \quad 0$$




$$y_{qs}^s = w_b \int (v_{qs}^s - r_s i_{qs}^s) dt$$




شبیه سازی مجموعه موتور القایی و منابع تغذیه

اما معادلات حالت باید بر اساس متغیرهای حالت، ورودیها و پارامترها نوشته شود، پس جریان جایگزین میشود :

$$\Psi_{qs}^s = X_{1s} i_{qs}^s + \Psi_{mq}^s$$


$$i_{qs}^s = \frac{y_{qs}^s - y_{mq}^s}{x_{1s}}$$


$$y_{qs}^s = w_b \int \left(v_{qs}^s - \frac{r_s}{x_{1s}} (y_{qs}^s - y_{mq}^s) \right) dt$$

اما y_{mq}^s نیز باید بر حسب متغیرهای حالت انتخاب شده جایگزین گردد :



شبیه سازی مجموعه موتور القایی و منابع تغذیه

$$\Psi_{mq}^s = X_m (i_{qs}^s + i_{qr}'^s)$$

$$\left\{ \begin{aligned} i_{qs}^s &= \frac{y_{qs}^s - y_{mq}^s}{x_{1s}} \\ i_{qr}'^s &= \frac{y_{qr}'^s - y_{mq}^s}{x_{1r}'} \end{aligned} \right.$$

حال جریانها را در معادله شار مغناطیسی جایگزین میکنیم :

$$y_{mq}^s = x_M \left(\frac{y_{qs}^s}{x_{1s}} + \frac{y_{qr}'^s}{x_{1r}'} \right) \quad \rightarrow \quad \frac{1}{x_M} = \left[\frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{1s}} + \frac{1}{x_{1r}'} \right]$$



شبیه سازی مجموعه موتور القایی و منابع تغذیه

مشابه این رابطه برای شار مغناطیسی محور مستقیم بدست میاید :

معادلات محور d

$$v_{ds}^s = r_s i_{ds}^s + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} y_{ds}^s - \frac{\omega}{\omega_b} y_{qs}^s$$

$$y_{ds}^s = \omega_b \int (v_{ds}^s - r_s i_{ds}^s) dt$$

$$y_{ds}^s = \omega_b \int (v_{ds}^s - \frac{r_s}{x_{1s}} (y_{ds}^s - y_{md}^s)) dt$$

$$y_{md}^s = x_M \left(\frac{y_{ds}^s}{x_{1s}} + \frac{y_{dr}'^s}{x_{1r}'} \right) \rightarrow \frac{1}{x_M} = \left[\frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{1s}} + \frac{1}{x_{1r}'} \right]$$



معادلات ولتاژ - جریان استاتور

$$y_{qs}^s = w_b \int \left[v_{qs}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (y_{mq}^s - y_{qs}^s) \right] dt$$

$$y_{ds}^s = w_b \int \left[v_{ds}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (y_{md}^s - y_{ds}^s) \right] dt$$

$$y_{os}^s = \int (v_{os}^s - \frac{r_s}{x_{ls}} y_{os}^s) dt$$



معادلات ولتاژ - جریان رتور

$$y'_{qr} = w_b \int [V'_{qr} - w_r y'_{dr} + r'_r (y_{mq} - y'_{qr})] dt$$

$$y'_{dr} = w_b \int [V'_{dr} + w_r y'_{qr} + r'_r (y_{md} - y'_{dr})] dt$$

$$y'_{or} = w_b \int (V'_{or} - \frac{r'_r}{x'_{1r}} y'_{or}) dt$$



قسمت یازدهم

معادلات ماشین القایی در سیستم PU



معادلات ماشین القایی در سیستم PU

در سیستم پریونیت دوکمیت را مبنا میگیریم و بقیه پارامترها را بر اساس این مقادیر مبنا بدست می آوریم :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u}_{B(abc)} \\ \mathbf{i}_{B(abc)} \\ P_{B(abc)} = 3\mathbf{u}_{B(abc)}\mathbf{i}_{B(abc)} \\ \mathbf{Z}_B = \frac{\mathbf{u}_{B(abc)}}{\mathbf{i}_{B(abc)}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u}_{B(qd0)} = \sqrt{2}\mathbf{u}_{B(abc)} \\ \mathbf{i}_{B(qd0)} = \sqrt{2}\mathbf{i}_{B(abc)} \\ P_B = \frac{3}{2}\mathbf{u}_{B(qd0)}\mathbf{i}_{B(qd0)} \\ \mathbf{Z}_B = \frac{3}{2} \frac{\mathbf{u}_{B(qd0)}}{P_B} \end{array} \right.$$



گشتاور الکترومغناطیسی

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} \left[y_{ds}^s i_{qs}^s - y_{qs}^s i_{ds}^s \right]$$

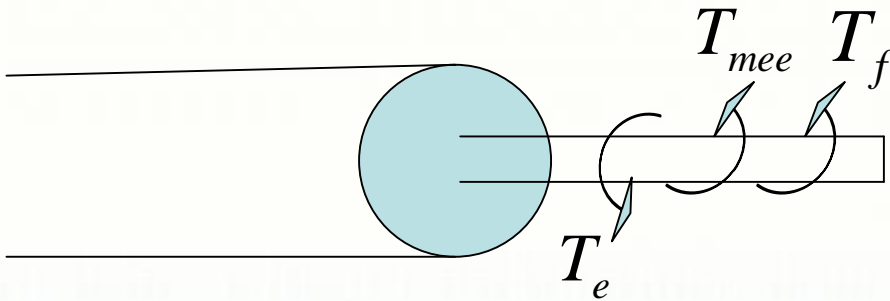
حال گشتاور را در سیستم پریونیت بدست می آوریم :

$$T_B = \frac{P_B}{\Omega_B} = \frac{P_B}{\left(\frac{2}{P} \right) \omega_b} \rightarrow T_B = \frac{3}{2} \frac{P}{2} u_{B(qd0)} i_{B(qd0)}$$

$$T_e(pu) = \frac{T_e}{T_B} = y_{ds}^s(pu) I_{qs}^s(pu) - y_{qs}^s(pu) I_{ds}^s(pu)$$



معادله الکترومکانیکی حاکم بر ماشین در سیستم پرینیت



$$T_e - T_{mee} - T_f = J \frac{d\Omega_r}{dt} = J \frac{d^2 q_r}{dt^2}$$

برای بردن معادله گشتاور به حالت پرینیت طرفین را بر T_B تقسیم می کنیم

$$\frac{T_e - T_{mee} - T_f}{T_B} = \frac{J d\Omega_r / dt}{P_B / \Omega_B}$$



معادله الکترومکانیکی حاکم بر ماشین در سیستم پریونیت

در معادله گشتاور معمولاً از عبارت ثابت اینرسی استفاده میشود که طبق تعریف برابر است با :

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \Omega_B^2}{P_B}$$

اکنون معادله الکترو دینامیکی در سیستم پریونیت چنین میشود :

$$T_e - T_{mee} - T_f(pu) = \frac{J d(\Omega_r \Omega_B)}{P_B dt} = 2H \frac{d\left(\frac{\Omega_r}{\Omega_B}\right)}{dt}$$



قسمت دوازدهم

تأثیر پدیده اشباع مغناطیسی



پدیده اشباع مغناطیسی

الف- ماهیت پدیده اشباع مغناطیسی

ب- مضرات پدیده اشباع مغناطیسی

ج- تاثیر پدیده اشباع مغناطیسی بر پارامترهای ماشین القایی

د- نحوه تغییر مدل برای در نظر گرفتن پدیده اشباع مغناطیسی



تأثیر پدیده اشباع مغناطیسی بر پارامترهای ماشین القایی

همانطور که میدانیم شار و اندوکتانس مغناطیس کنندگی در ماشین القایی کاملاً متأثر از میزان اشباع مغناطیسی میباشد اما شار و اندوکتانس پراکندگی به میزان کمتری متأثر از پدیده اشباع مغناطیسی است.

بدلیل تأثیر گذار کمتر و بدلیل پیچیدگی ماهیت شار پراکندگی در بررسی پدیده اشباع مغناطیسی فقط تأثیر آن بر شار مغناطیس کنندگی در نظر گرفته میشود.



نحوه وارد کردن پدیده اشباع مغناطیسی در مدل ماشین

استفاده از رابطه بین شار مغناطیسی اشباع شده و خطی

$$\Psi_{mq}^s = X_m (i_{qs}^s + i_{qr}'^s)$$

$$i_{qs}^s = \frac{y_{qs}^s - y_{mq}^s}{x_{1s}}$$

$$i_{qr}'^s = \frac{y_{qr}'^s - y_{mq}^s}{x_{1r}'}$$

$$y_{mq}^s = x_M \left(\frac{y_{qs}^s}{x_{1s}} + \frac{y_{qr}'^s}{x_{1r}'} \right)$$

$$\frac{1}{x_M} = \left[\frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{1s}} + \frac{1}{x_{1r}'} \right]$$



نحوه وارد کردن پدیده اشباع مغناطیسی در مدل ترانسفورماتور

استفاده از رابطه بین شار مغناطیسی اشباع شده و خطی

$$y_{mq}^{unsat} = y_{mq}^{sat} + \Delta y_{mq}$$
$$y_{mq}^s = x_m \underbrace{(i_{qs}^s + i_{qr}^{\prime s})}_{\text{اشباع نشده}}$$

اشباع نشده

$$y_{mq}^{sqt} = x_m \left[\frac{y_{qs} - y_{mq}^{sqt}}{x_{1s}} + \frac{y_{qr}' - y_{mq}^{sqt}}{x_{1r}'} \right] - \Delta y_{mq}$$



$$\Rightarrow \left\{ \begin{aligned} y_{mq}^{sqt} &= x_M \left[\frac{y_{qs}}{x_{1s}} + \frac{y'_{qr}}{x'_{1r}} - \frac{\Delta y_{mq}}{x_m} \right] \\ \frac{1}{x_M} &= \underbrace{\left[\frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{1s}} + \frac{1}{x'_{1r}} \right]}_{\text{اشباع نشده}} \end{aligned} \right.$$

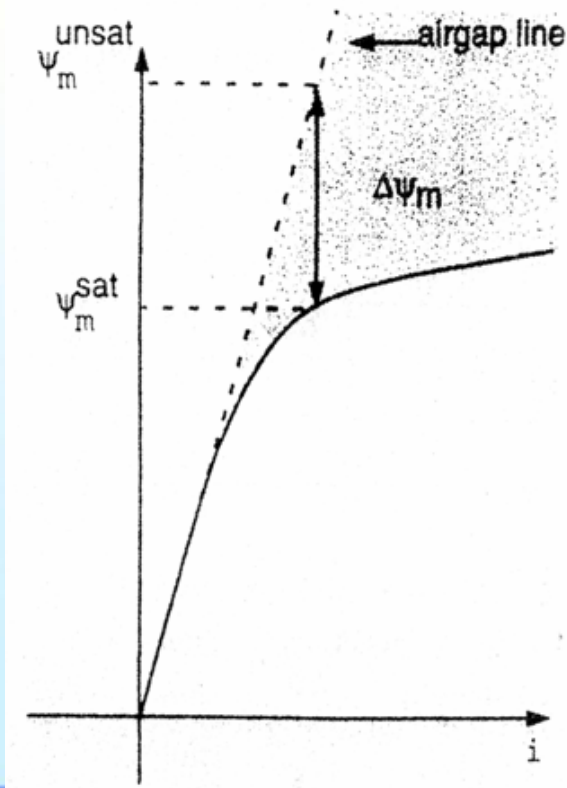
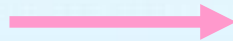
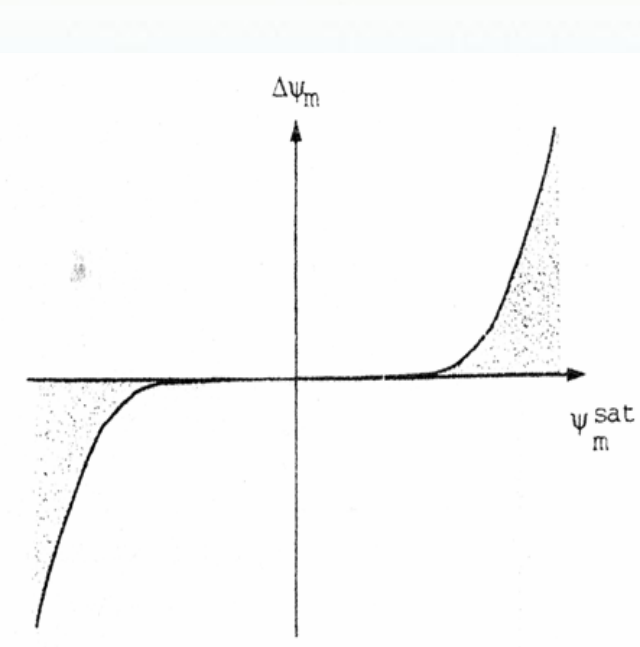
همانطور که از معادلات بالا مشخص است تنها فرق مدل خطی با مدل اشباع در

مقدار $\frac{\Delta y_{mq}}{x_m}$ میباشد در نتیجه بلوک اشباع مربوط به محور q باید ساخته و به بلوکهای قبلی اضافه شود.



منحنی اشباع مغناطیسی

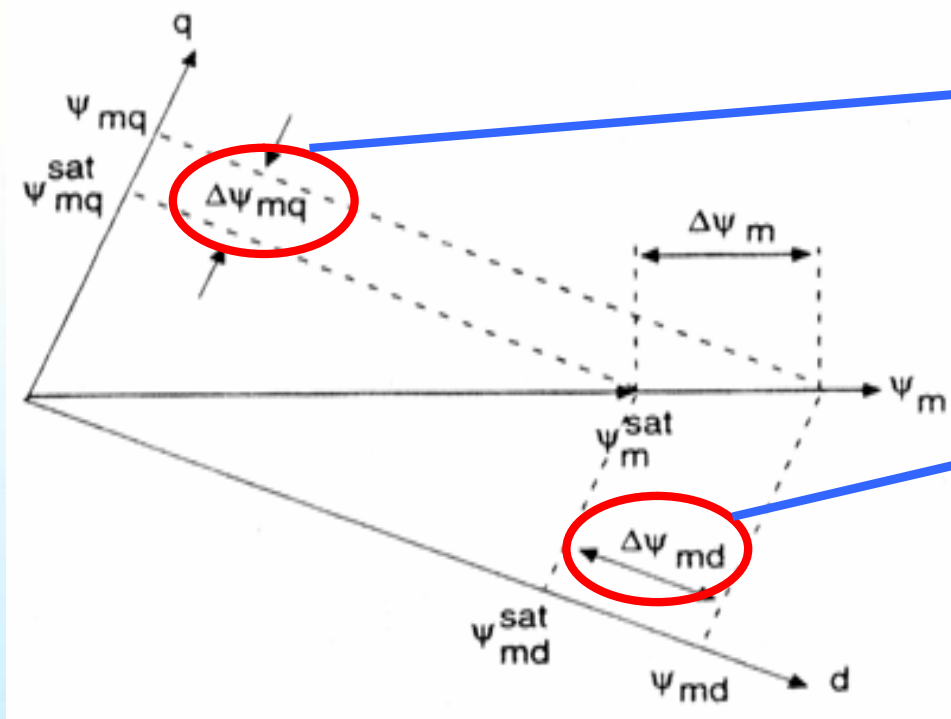
با فرض همسانگرد بودن اثر اشباع مغناطیسی روی دو محور داریم :





اثر اشباع مغناطیسی

در نتیجه داریم



$$\Delta y_{mq} = \frac{y_{mq}^{sqt}}{y_m^{sqt}} \Delta y_m$$

$$\Delta y_{md} = \frac{y_{md}^{sqt}}{y_m^{sqt}} \Delta y_m$$



$$y_m^{sqt} = \sqrt{y_{mq}^2 + y_{md}^2}$$

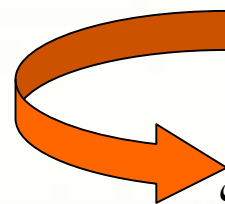


قسمت سیزدهم

خطی سازی معادلات ماشین القایی

خطی سازی معادلات ماشین القایی

معادلات ماشین غیر خطی است



عدم امکان استفاده از تئوری کنترل سیستمهای خطی



خطی سازی معادلات



تعیین تابع انتقال سیستم
تعیین مقادیر ویژه ماشین



خطی سازی معادلات ماشین القایی

$$v_{qs} = R i_{qs} + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y_{qs} + \frac{w}{w_b} y_{ds}$$

$$v_{ds} = R i_{ds} + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y_{ds} - \frac{w}{w_b} y_{qs}$$

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y'_{dr} - \frac{(w - w_r)}{w_b} y'_{qr}$$

$$v'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y'_{qr} + \frac{(w - w_r)}{w_b} y'_{dr}$$

ترمهائی که باعث غیر خطی شدن معادلات شده اند





خطی سازی معادلات ماشین القایی

معادلات ماشین القایی را در مرجع گردان با سرعت سنکرون و در حالت تغذیه متعادل در نظر میگیریم:

$$\begin{bmatrix} u_{qs}^e \\ u_{ds}^e \\ u_{qr}'^e \\ u_{dr}'^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{P}{W_b} x_{ss} & \frac{W_e}{W_b} x_{ss} & \frac{p}{W_b} x_m & \frac{W_e}{W_b} x_m \\ -\frac{W_e}{W_b} x_{ss} & r_s + \frac{p}{W_b} x_{ss} & -\frac{W_e}{W_b} x_m & \frac{p}{W_b} x_m \\ \frac{p}{W_b} x_m & s \frac{W_e}{W_b} x_m & r_r' + \frac{p}{W_b} x_{rr}' & s \frac{W_e}{W_b} x_{rr}' \\ -s \frac{W_e}{W_b} x_m & \frac{p}{W_b} x_m & -s \frac{W_e}{W_b} x_{rr}' & r_r' + \frac{p}{W_b} x_{rr}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \\ i_{qr}'^e \\ i_{dr}'^e \end{bmatrix}$$



خطی سازی معادلات ماشین القایی

مولفه های این معادلات عبارتند از :

$$(X'_{rr} = X'_{lr} + X_m) \text{ خودی رتور راکتانس}$$

$$X_{ss} = X_{ls} + X_m$$

$$(X_m \text{ خودی استاتور راکتانس})$$

$$s = \frac{(W_e - W_{\text{تور}})}{W_e} \text{ مغناطیس کنندگی استاتور}$$



خطی سازی معادلات ماشین القایی

معادلات غیر خطی ماشین

$$\begin{bmatrix} u_{qs}^e \\ u_{ds}^e \\ u_{qr}^{\prime e} \\ u_{dr}^{\prime e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{P}{W_b} x_{ss} & \frac{W_e}{W_b} x_{ss} & \frac{p}{W_b} x_m & \frac{W_e}{W_b} x_m \\ -\frac{W_e}{W_b} x_{ss} & r_s + \frac{p}{W_b} x_{ss} & -\frac{W_e}{W_b} x_m & \frac{p}{W_b} x_m \\ \frac{p}{W_b} x_m & s \frac{W_e}{W_b} x_m & r_r' + \frac{p}{W_b} x_{rr}' & s \frac{W_e}{W_b} x_{rr}' \\ -s \frac{W_e}{W_b} x_m & \frac{p}{W_b} x_m & -s \frac{W_e}{W_b} x_{rr}' & r_r' + \frac{p}{W_b} x_{rr}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \\ i_{qr}^{\prime e} \\ i_{dr}^{\prime e} \end{bmatrix}$$

$$T = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) L_m (i_{dr}^{\prime e} i_{qs}^e - i_{qr}^{\prime e} i_{ds}^e)$$



روشهای خطی سازی معادلات

دو روش معمول برای خطی سازی معادلات استفاده میشود:

① بسط به سری تیلور

② روش اعمال اغتشاش (perturbation)

بسط به سری تیلور

$$g(x) \quad x = x_0 + \Delta x$$

$$g(x) = g(x_0) + g'(x_0)\Delta x + \frac{g''(x_0)}{2!}\Delta x^2 + \frac{g'''(x_0)}{3!}\Delta x^3 + \dots$$

$$\Delta x \Rightarrow 0$$

$$g(x) \approx g(x_0) + g'(x_0)\Delta x$$



بسط به سری تیلور

حال اگر بخواهیم معادلات مربوطه را خطی کنیم داریم:

$$(P_0) \Rightarrow (i_{qso}^e, i_{dro}^{\prime e}, i_{dso}^e, i_{qro}^{\prime e})$$

$$(P_1) \Rightarrow (i_{qs}^e, i_{dr}^{\prime e}, i_{ds}^e, i_{qr}^{\prime e})$$

$$T_e(P_0) = x_m [i_{qso}^e i_{dro}^{\prime e} - i_{dso}^e i_{qro}^{\prime e}]$$

$$T(P_1) = T(P_0) + \frac{\partial T}{\partial i_{qs}^e}(P_0) \Delta i_{qs}^e + \frac{\partial T}{\partial i_{ds}^e}(P_0) \Delta i_{ds}^e + \frac{\partial T}{\partial i_{qr}^{\prime e}}(P_0) \Delta i_{qr}^{\prime e} + \frac{\partial T}{\partial i_{dr}^{\prime e}}(P_0) \Delta i_{dr}^{\prime e}$$

$$\Delta T_e = x_m [i_{qso}^e \Delta i_{dr}^{\prime e} + i_{dro}^{\prime e} \Delta i_{qs}^e - i_{dso}^e \Delta i_{qr}^{\prime e} - i_{qro}^{\prime e} \Delta i_{ds}^e]$$



روش اغتشاش

در این روش به همه متغیرها در معادلات مربوطه اغتشاشی اعمال میشود. با توجه به کوچک بودن جابجائیها یا دامنه تغییرات ($\Delta x \Rightarrow 0$) میتوان از عبارات (Δ^2) صرف نظر کرد.

معادله گشتاور را مجدداً با استفاده از این روش بدست میآوریم :

$$T_{e0} + \Delta T_e = x_m \left[(i_{qs0}^e + \Delta i_{qs}^e)(i_{dro}^{\prime e} + \Delta i_{dr}^{\prime e}) - (i_{dso}^e + \Delta i_{ds}^e)(i_{qro}^{\prime e} + \Delta i_{qr}^{\prime e}) \right]$$

$$\Delta T_e = x_m \left[i_{qs0}^e \Delta i_{dr}^{\prime e} + i_{dro}^{\prime e} \Delta i_{qs}^e - i_{dso}^e \Delta i_{qr}^{\prime e} - i_{qro}^{\prime e} \Delta i_{ds}^e \right]$$



خطی سازی کلیه معادلات

حال معادلات را حول یک نقطه کار $(i_{qso}^e, i_{dso}^e, i'_{qro}{}^e, i'_{dro}{}^e, W_{ro})$ خطی نموده و بازنویسی میکنیم :

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{qs}^e \\ \Delta u_{ds}^e \\ \Delta u_{qr}^e \\ \Delta u_{dr}^e \\ \Delta T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{P}{W_b} x_{ss} & \frac{W_e}{W_b} x_{ss} & \frac{P}{W_b} x_m & \frac{W_e}{W_b} x_m & 0 \\ -\frac{W_e}{W_b} x_{ss} & r_s + \frac{P}{W_b} x_{ss} & -\frac{W_e}{W_b} x_m & \frac{P}{W_b} x_m & 0 \\ \frac{P}{W_b} x_m & s_0 \frac{W_e}{W_b} x_m & r'_r + \frac{P}{W_b} x'_{rr} & s_0 \frac{W_e}{W_b} x'_{rr} & -x_m i_{dso}^e - x'_{rr} i'_{dro}{}^e \\ s_0 \frac{W_e}{W_b} x_m & \frac{P}{W_b} x_m & -s_0 \frac{W_e}{W_b} x'_{rr} & r'_r + \frac{P}{W_b} x'_{rr} & x_m i_{qso}^e + x'_{rr} i'_{qro}{}^e \\ x_m i'_{dro}{}^e & -x_m i'_{qro}{}^e & -x_m i_{dso}^e & x_m i_{qro}^e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{qs}^e \\ \Delta i_{ds}^e \\ \Delta i'_{qr}{}^e \\ \Delta i'_{dr}{}^e \\ \Delta \frac{W_r}{W_b} \end{bmatrix}$$



خطی سازی معادلات

اکنون معادلات خطی شده را بر حسب بردار متغیرهای حالت بصورت زیر بازنویسی میکنیم:

$$[U] = Ep[x] - F[x]$$

در این رابطه :

$$[x]^T = \left[\Delta i_{qs}^e \quad \Delta i_{ds}^e \quad \Delta i_{qr}^e \quad \Delta i_{dr}^e \quad \frac{\Delta w_r}{w_b} \right] \quad [x] \text{ بردار متغیرهای حالت}$$

$$[U]^T = \left[\Delta v_{qs}^e \quad \Delta v_{ds}^e \quad \Delta v_{qr}^e \quad \Delta v_{dr}^e \quad T_L \right] \quad [U] \text{ بردار ورودی}$$

$$P \quad \text{اپراتور مشتق}$$

ماتریس ضرایب بشرح زیر میباشد :

خطی سازی معادلات

$[E]$ و $[F]$ ماتریس ضرایب بشرح زیر میباشند :

$$[F] = - \begin{bmatrix} r_s & \frac{W_e}{W_b} x_{ss} & 0 & \frac{W_e}{W_b} x_m & 0 \\ -\frac{W_e}{W_b} x_{ss} & r_s & -\frac{W_e}{W_b} x_m & 0 & 0 \\ 0 & s_0 \frac{W_e}{W_b} x_m & r'_r & s_0 \frac{W_e}{W_b} x'_{rr} & -x_m i_{ds0}^e - x'_{rr} i_{dr0}^e \\ s_0 \frac{W_e}{W_b} x_m & 0 & -s_0 \frac{W_e}{W_b} x'_{rr} & r'_r & x_m i_{qs0}^e + x'_{rr} i_{qr0}^e \\ x_m i_{dr0}^e & -x_m i_{qr0}^e & -x_m i_{ds0}^e & x_m i_{qr0}^e & 0 \end{bmatrix}$$

$$[E] = \frac{1}{W_b} \begin{bmatrix} x_{ss} & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ss} & 0 & x_m & 0 \\ x_m & 0 & x'_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & x'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2Hw_b \end{bmatrix}$$



معادله مشخصه ماشین

اگر معادلات را بصورت معادلات حالت معمول بنویسیم :

$$p[x] = A[x] + B[u]$$

$$\begin{cases} A = [E]^{-1}[F] \\ B = [E]^{-1} \end{cases} \quad \leftarrow \quad \text{با مقایسه با معادله قبلی داریم:}$$

اگر ورودی سیستم برابر صفر باشد، پاسخ سیستم چنین میشود :

$$x = e^{At} K$$

بردار نشاندهنده
شرایط اولیه

ماتریس انتقال حالت



ریشه های معادله مشخصه ماشین

پایداری در جابجایی کوچک زمانی حاصل میشود که همه مولفه های ماتریس انتقال با میل زمان به بینهایت، به سمت صفر میل کنند. این اتفاق زمانی رخ میدهد که همه ریشه های معادله مشخصه دارای قسمت های حقیقی منفی باشند.

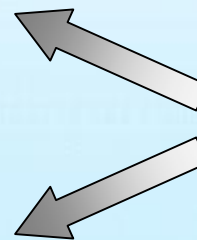
معادله مشخصه : $\det(A - \lambda I) = 0$

در این معادله I ماتریس واحد و λ ریشه های معادله یا ریشه های مشخصه یا مقادیر ویژه سیستم هستند. این مقادیر برای پیش بینی رفتار سیستم بکار میروند.

مقادیر حقیقی (نوسانات میراشونده یا افزایشی)

مقادیر مختلط (نوسانی)

مقادیر ویژه





نحوه محاسبه مقادیر ویژه ماشین

برای محاسبه مقادیر ویژه ماشین القایی بشکل زیر عمل میکنیم :

- ① معادلات حاکم بر سیستم را مینویسیم
- ② معادلات را حول یک نقطه کارخطی میکنیم
- ③ بازنویسی معادلات بصورت معادلات حالت کلاسیک
- ④ بدست آوردن معادله مشخصه
- ⑤ حل معادله و تعیین مقادیر ویژه

با توجه به ابعاد معادلات بدست آمده برای ماشین القایی، در هر نقطه کار 5 مقدار ویژه وجود دارد.



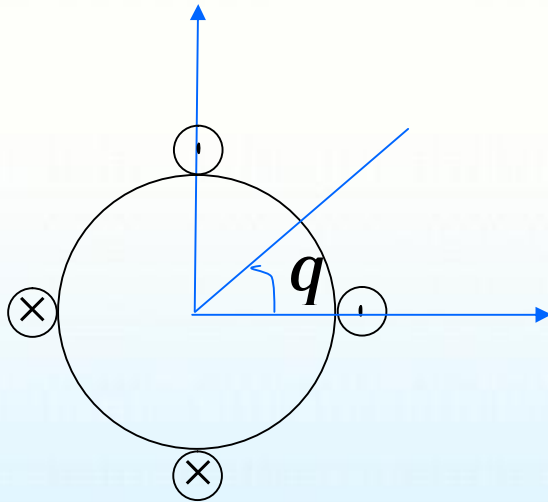
قسمت چهاردهم

موتور القایی تک فاز



موتورهای القایی دو فاز

سیم پیچی استاتور شامل دو فاز است که با یکدیگر 90 درجه اختلاف دارند



$$\left\{ \begin{array}{l} F_a = k.i_a.\cos q \\ F_b = k.i_b.\cos\left(q - \frac{p}{2}\right) \end{array} \right.$$

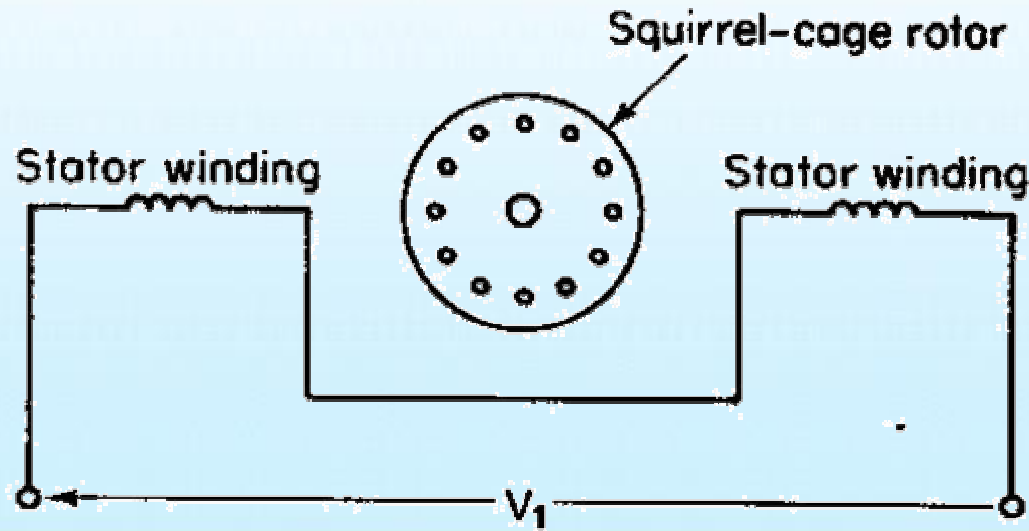
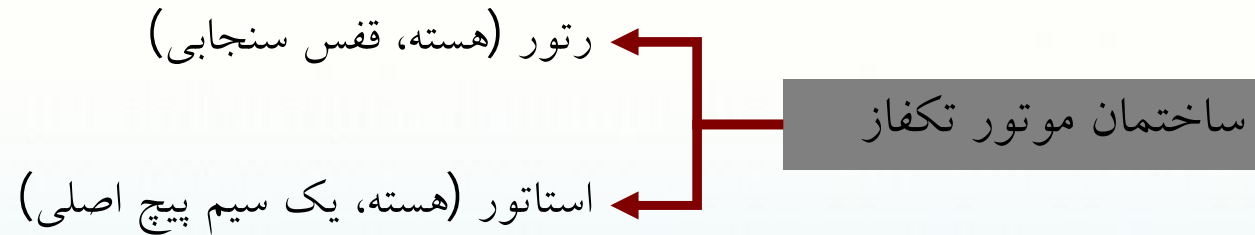
$$\left\{ \begin{array}{l} i_b = I_m.\cos\left(\omega t - \frac{p}{2}\right) \\ i_a = I_m.\cos \omega t \end{array} \right.$$

$$\rightarrow F = F_a + F_b = k.I_m[\cos q.\cos \omega t + \sin q.\sin \omega t] = k.I_m.\cos(q - \omega t)$$



موتورهای القائی تکفاز

در موتور تکفاز استاتور فقط شامل یک سیم پیچ اصلی بوده و روتور از نوع قفس سنجابی است :





موتورهای القائی تکفاز

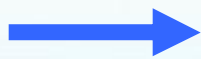
با فرض اینکه توزیع mmf مربوط به سیم‌پیچی‌ها سینوسی است

$$F_a = k i_a \cos\theta$$

$$i_a = I_m \cos\omega t$$



$$F = k I_m \cos\theta \cos\omega t$$

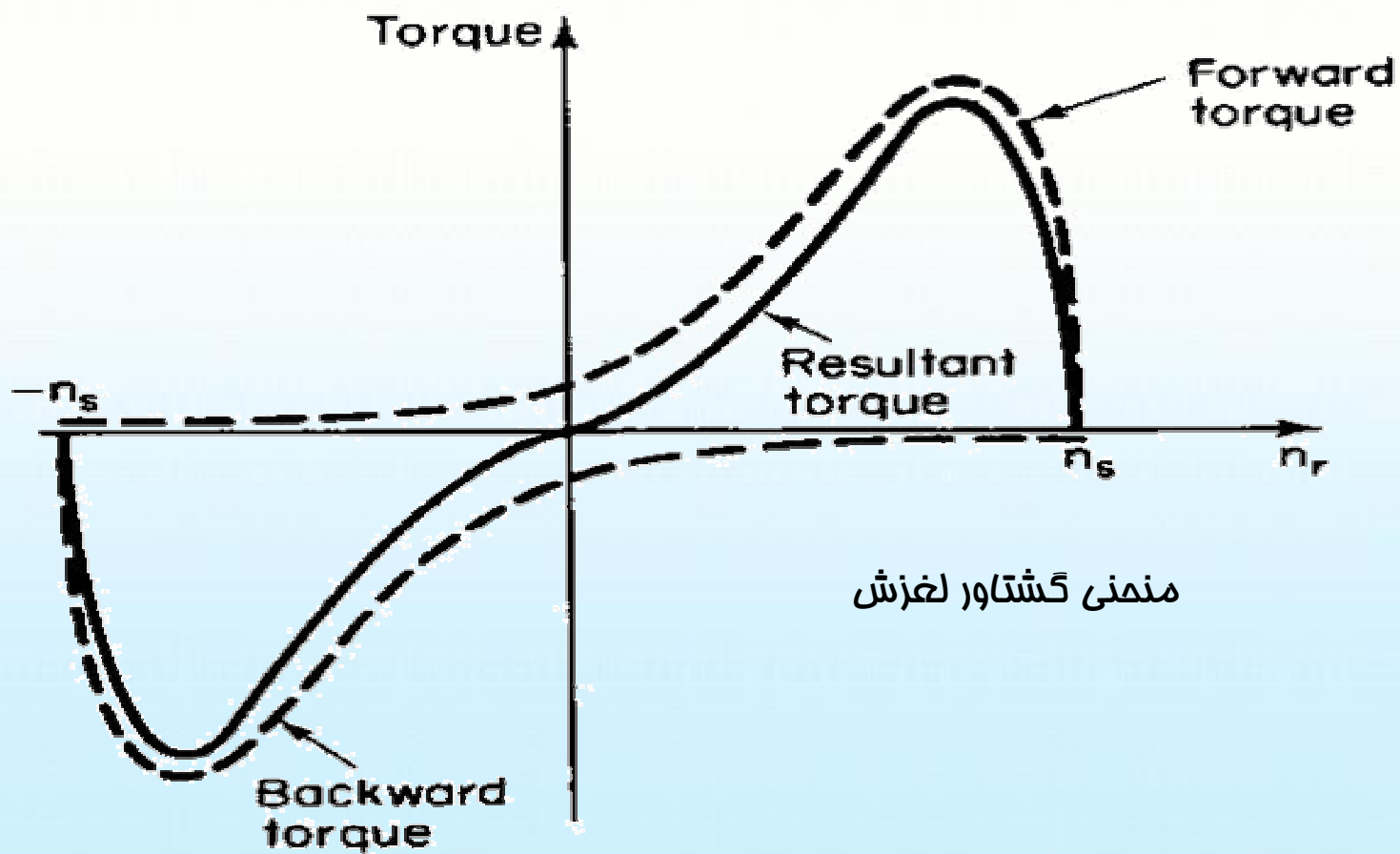


$$F = 0.5 k I_m [\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t)]$$

موج ضربانی متشکل از دو مولفه میدان جلوگرد و عقب گرد (F_+ ، F_-) با دامنه‌های ثابت می‌باشد.

موتورهای القائی تکفاز

مولفه برآیند گشتاور، مجموع دو مولفه جلوگرد و عقب گرد است. برخلاف موتورهای سه فاز گشتاور راه اندازی این موتور صفر است.





موتورهای القائی تکفاز

اگر بتوانیم به نوعی یکی از میدانها را تقویت کنیم و یا اینکه اگر روتور را در یک جهت به گردش در آوریم، گشتاوری ایجاد شده و روتور در همان جهت شروع به چرخیدن خواهد کرد.

مهمترین مسئله در موتورهای تکفاز، موضوع نحوه راه اندازی می باشد که دسته بندی موتورهای تکفاز نیز بر اساس نوع راه اندازی می باشد.



موتورهای القایی تکفاز

انواع موتورهای القایی تکفاز:

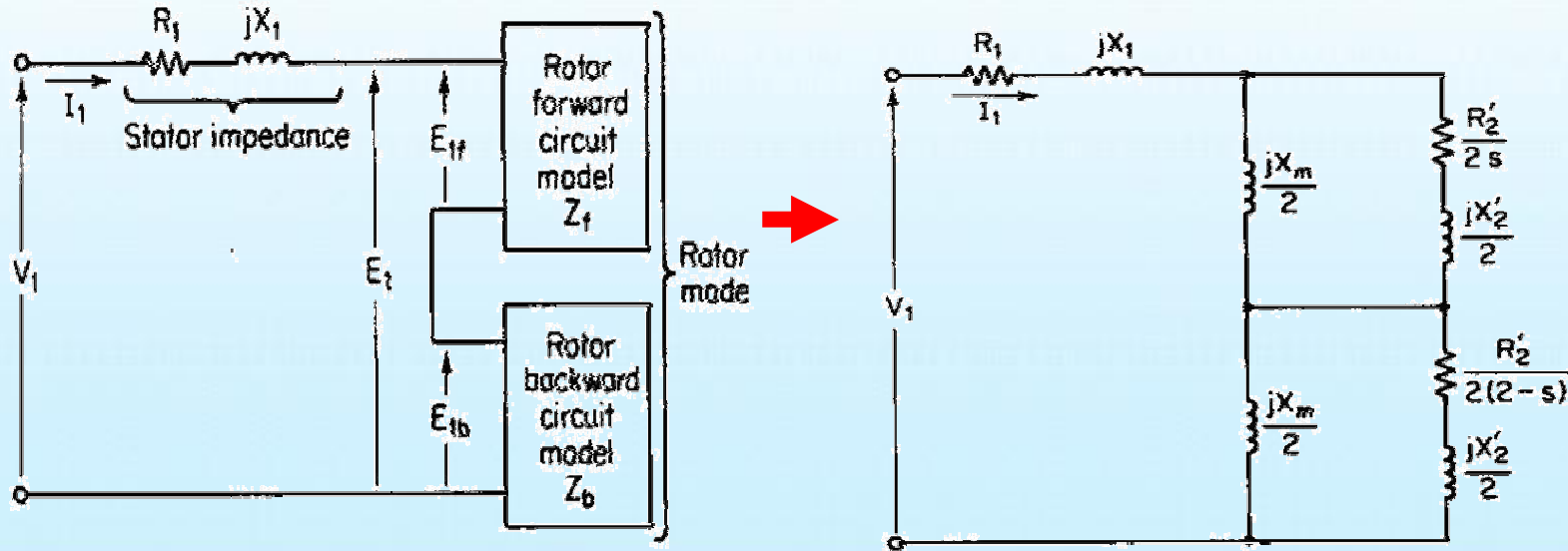
- 1 موتور القایی تکفاز از نوع فاز شکسته
- 2 موتور القایی تکفاز از نوع خازن راه انداز
- 3 موتور القایی تکفاز از نوع خازن دائم
- 4 موتور القایی تکفاز از نوع دو خازنی
- 5 موتور القایی تکفاز از نوع راه انداز ریپالسیونی



مدار معادل موتور القائی تکفاز

در لحظه سکون $E_- = E_+$ است و بنابراین مدار معادل زیر را داریم:

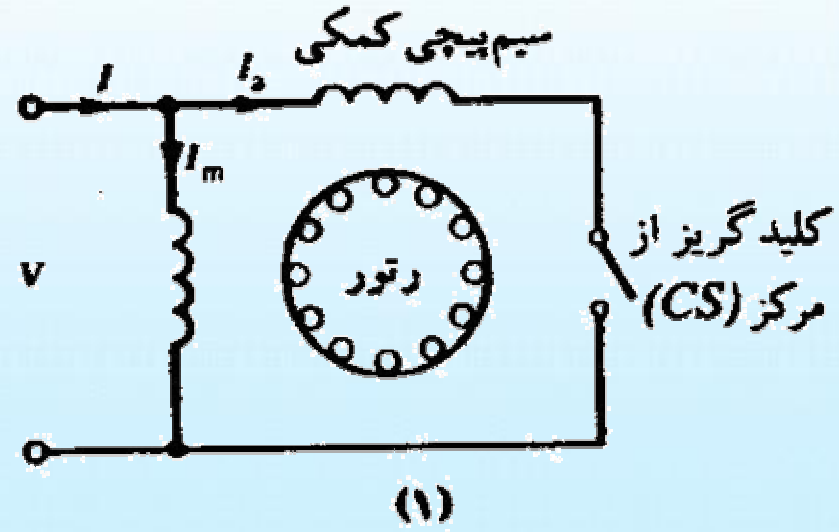
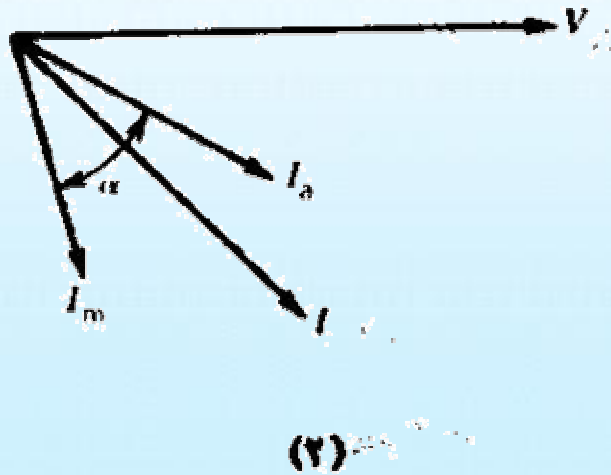
$$E_+ = E_- = E/2$$



روشهای راهاندازی موتور القایی تکفاز

1- موتورهای القایی تکفاز - فاز شکسته

در موتور فاز شکسته یک سیم پیچی فرعی را در مدار قرار داده ایم و امپدانس سیم پیچی فرعی Z_a با امپدانس سیم پیچی اصلی Z_m متفاوت است.





روشهای راهاندازی موتور القائی تکفاز

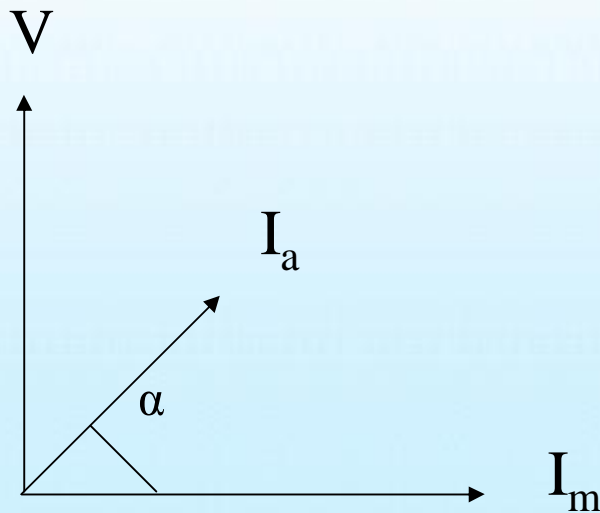
در این وضعیت موتور تکفاز شبیه موتور دو فاز نامتعادل با اختلاف فاز ولتاژهای صفر و امیدانسهای مختلف است. (تغذیه و سیم پیچی ها هر دو نامتقارن)

$$T_s = k I_m I_a \sin\alpha$$

(گشتاور راه اندازی)

α = زاویه‌ای که جریان I_m با I_a می‌سازد

V = بردار ولتاژ القا شده





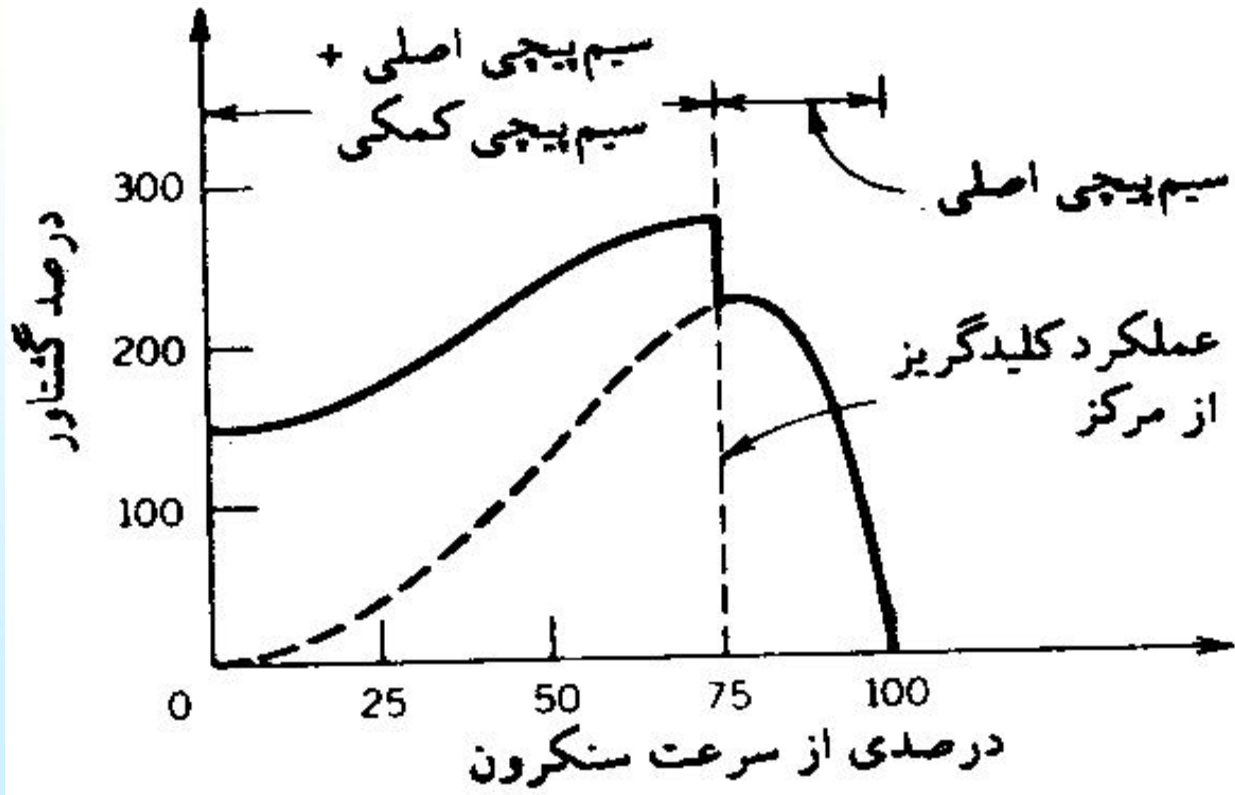
روشهای راهاندازی موتور القائی تکفاز

- سیم پیچی اصلی به گونه‌ای است که خاصیت سلفی به اهمی آن بیشتر از خاصیت سلفی به اهمی سیم پیچی فرعی است.

- برای افزایش گشتاور راهاندازی لازم است $I_a \sin\alpha$ افزایش یابد. با توجه به دیاگرام فوق R_a یک مقدار بهینه دارد که محاسبه R_a بهینه اهمیت زیادی پیدا می‌کند.



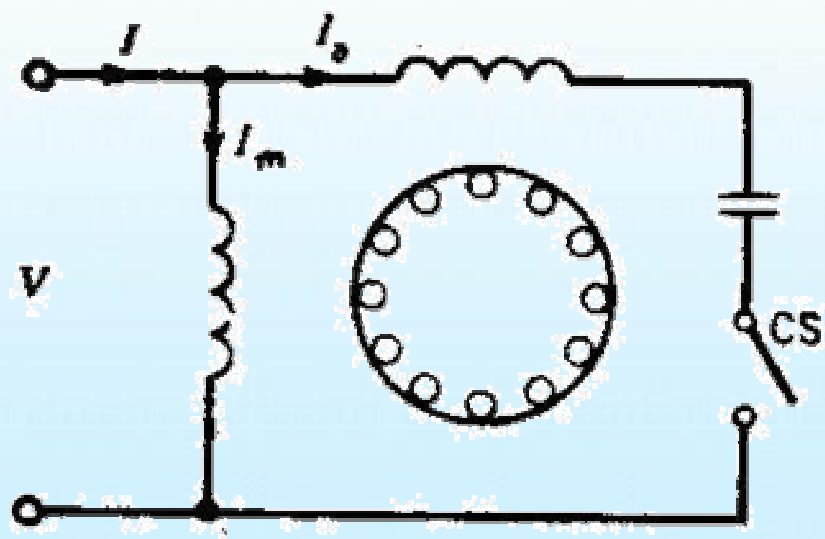
نمودار گشتاور موتور فاز شکسته



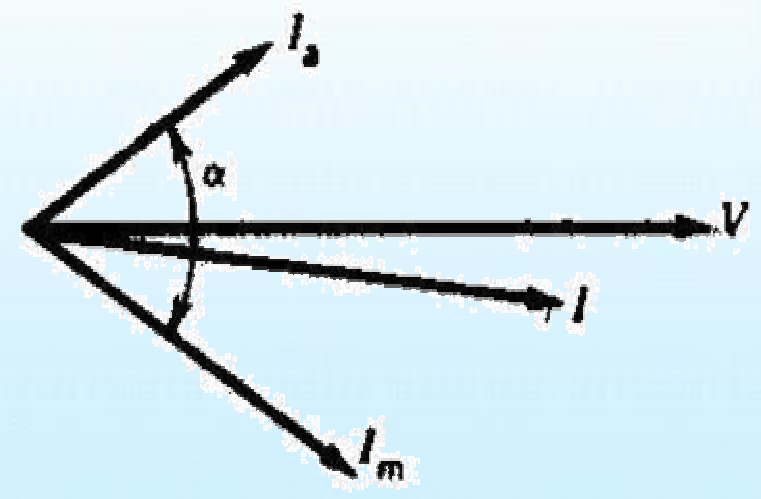


2- موتور تکفاز از نوع خازن راه انداز

برای ماکزیمم کردن $I_a \sin \alpha$ ، بخاطر خاصیت سلفی و پسفازی ولتاژ محدودیت داریم. ولی اگر درسیم پیچی کمکی یک خازن قرار دهیم به طوری که جریان به سمت همفازی و حتی پیشفازی برود هم I_a و هم $\sin \alpha$ افزایش می یابد.



مدار معادل موتور خازن راه انداز

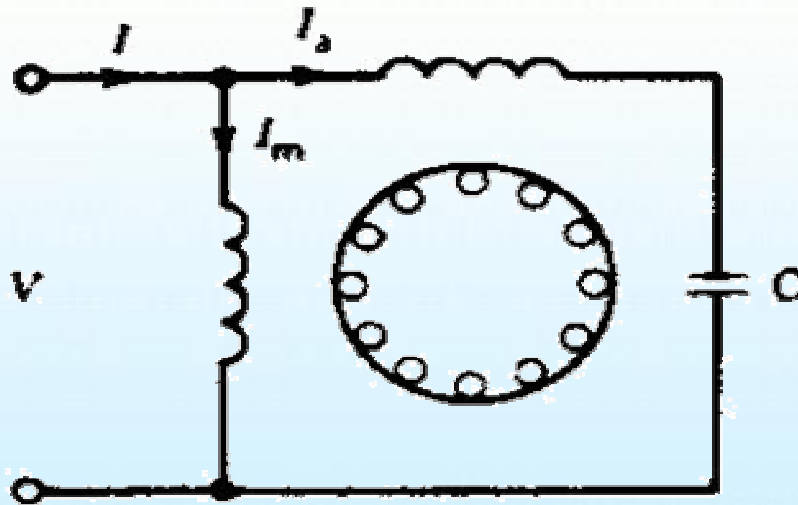


دیاگرام برداری در حالت خازن راه انداز



3- موتور خازن دائم

موتورهای خازن دائم طوری طراحی می‌شوند که کلید گریز از مرکز ندارند. این موتورها با راندمان بیشتر و سر و صدای کمتری کار میکنند.



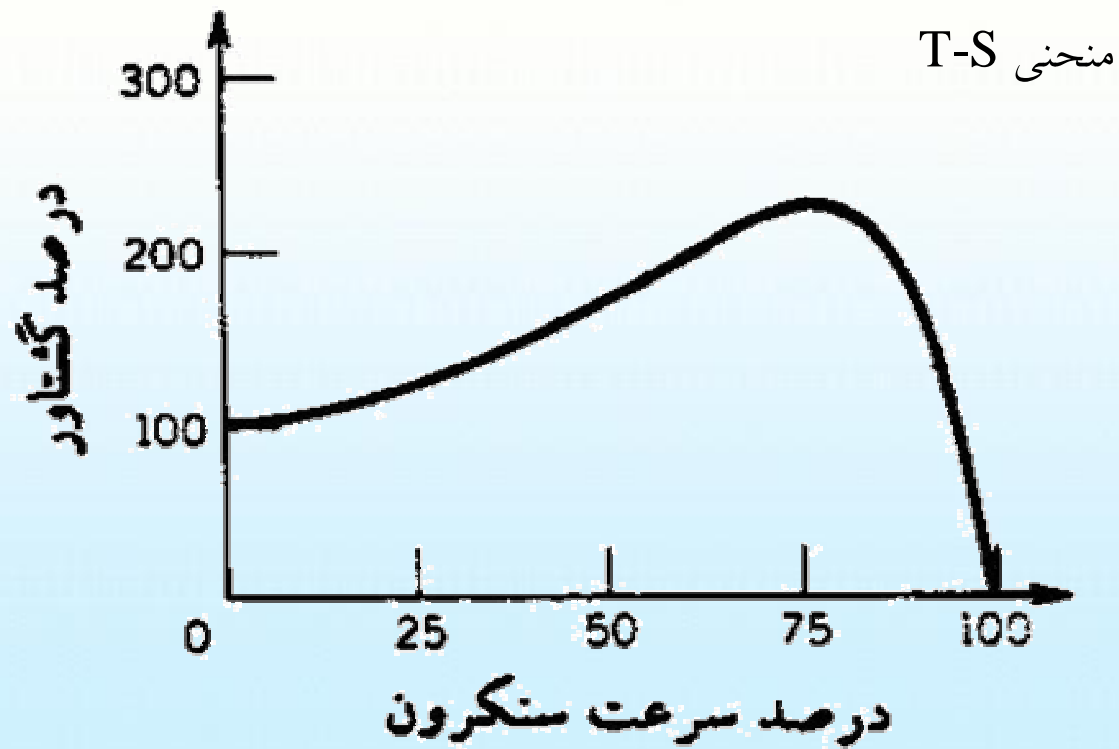
کیفیت خازن باید مرغوب باشد لذا از خازن روغنی استفاده میشود.

نمای شماتیک موتور خازن دائم

منحنی گشتاور سرعت موتور خازن دائم

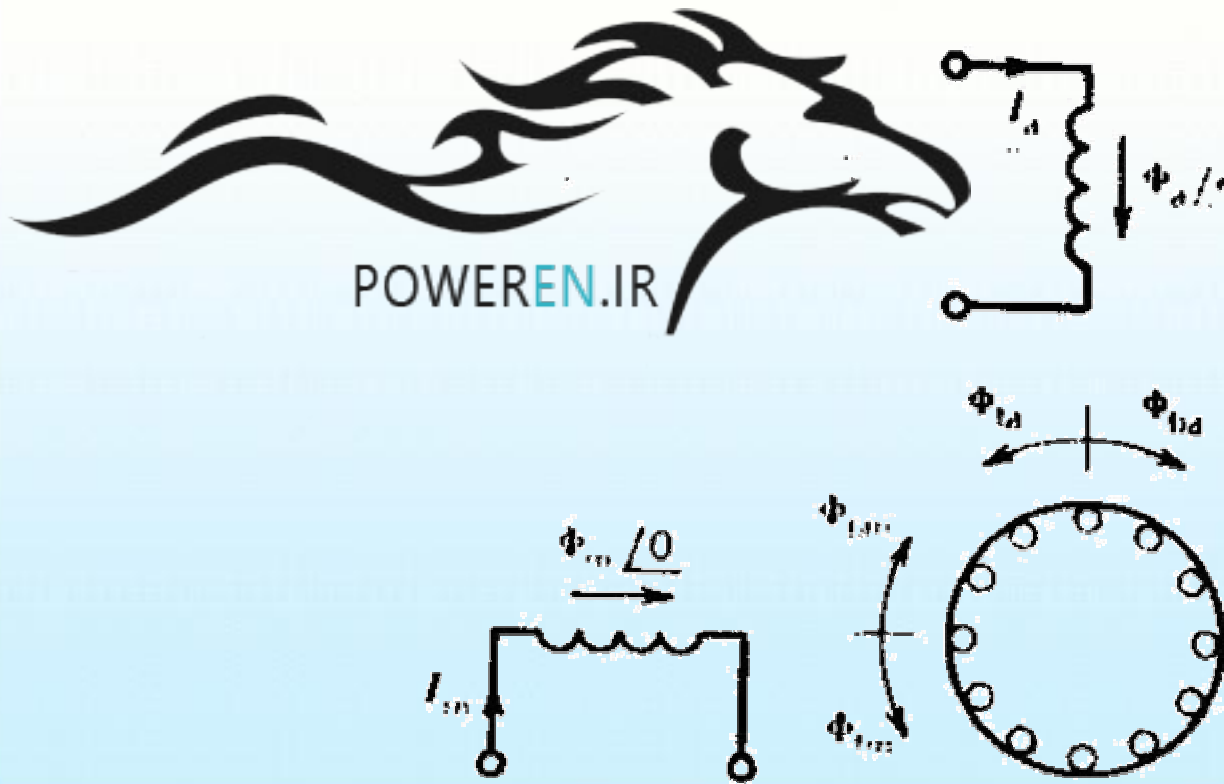


دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



مدار معادل موتور خازن دائم

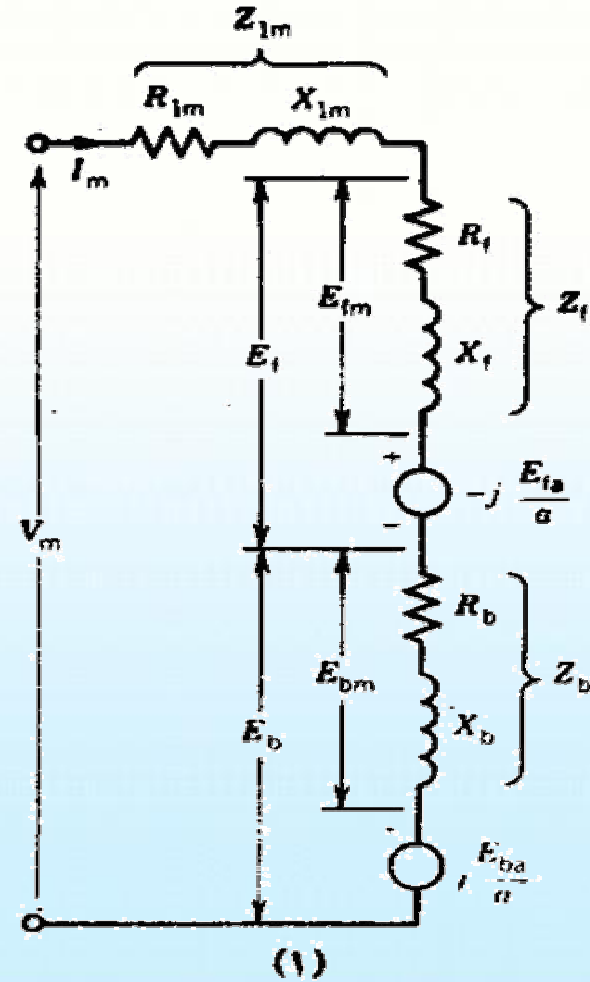
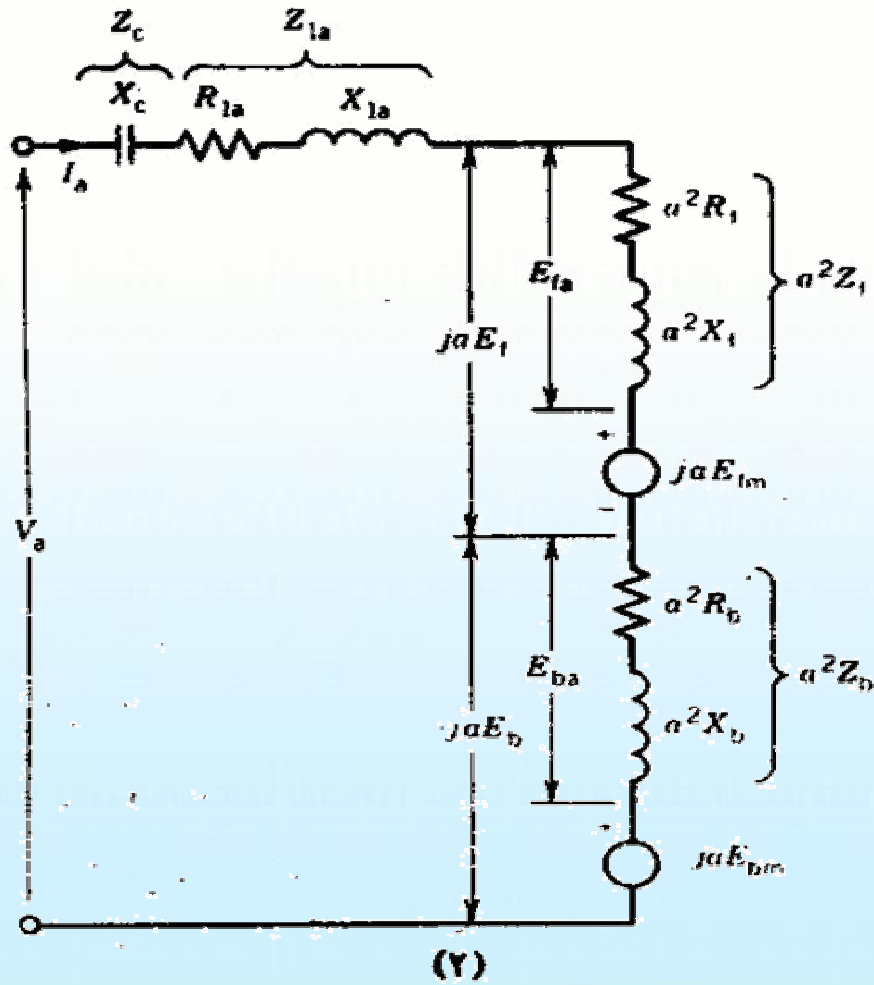
در موتور خازن دائم با دو سیم پیچی مواجه هستیم که هر سیم پیچی شارژی (میدانی) دارد که هر کدام از این میدانها میتوانند به دو مولفه جلوگرد و عقب گرد تقسیم شوند:



مدار معادل موتور خازن دائم



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳





مدار معادل موتور خازن دائم

E_{fm} ولتاژ القا شده ناشی از میدان جلوگرد سیم پیچی اصلی و E_{bm} ولتاژ القا شده ناشی از میدان عقبگرد سیم پیچی اصلی است

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{fm} = Z_f I_m \\ E_{fa} = a^2 Z_f I_a \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} E_{bm} = Z_b I_m \\ E_{ba} = a^2 Z_b I_a \end{array} \right.$$

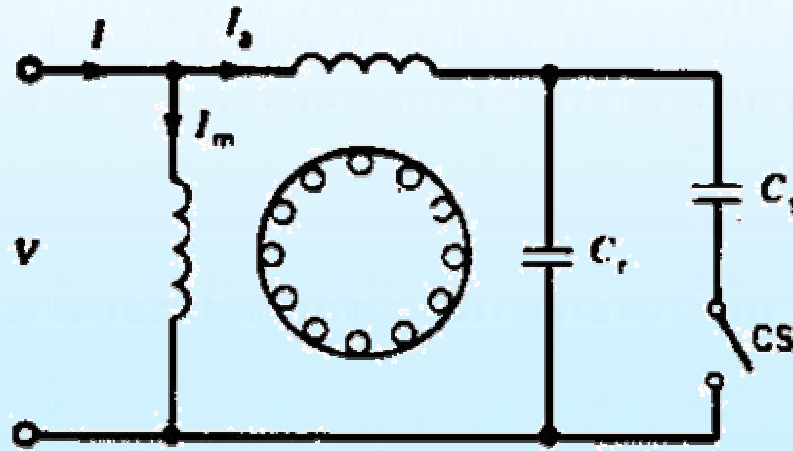
$$a = \frac{N_a}{N_m}$$

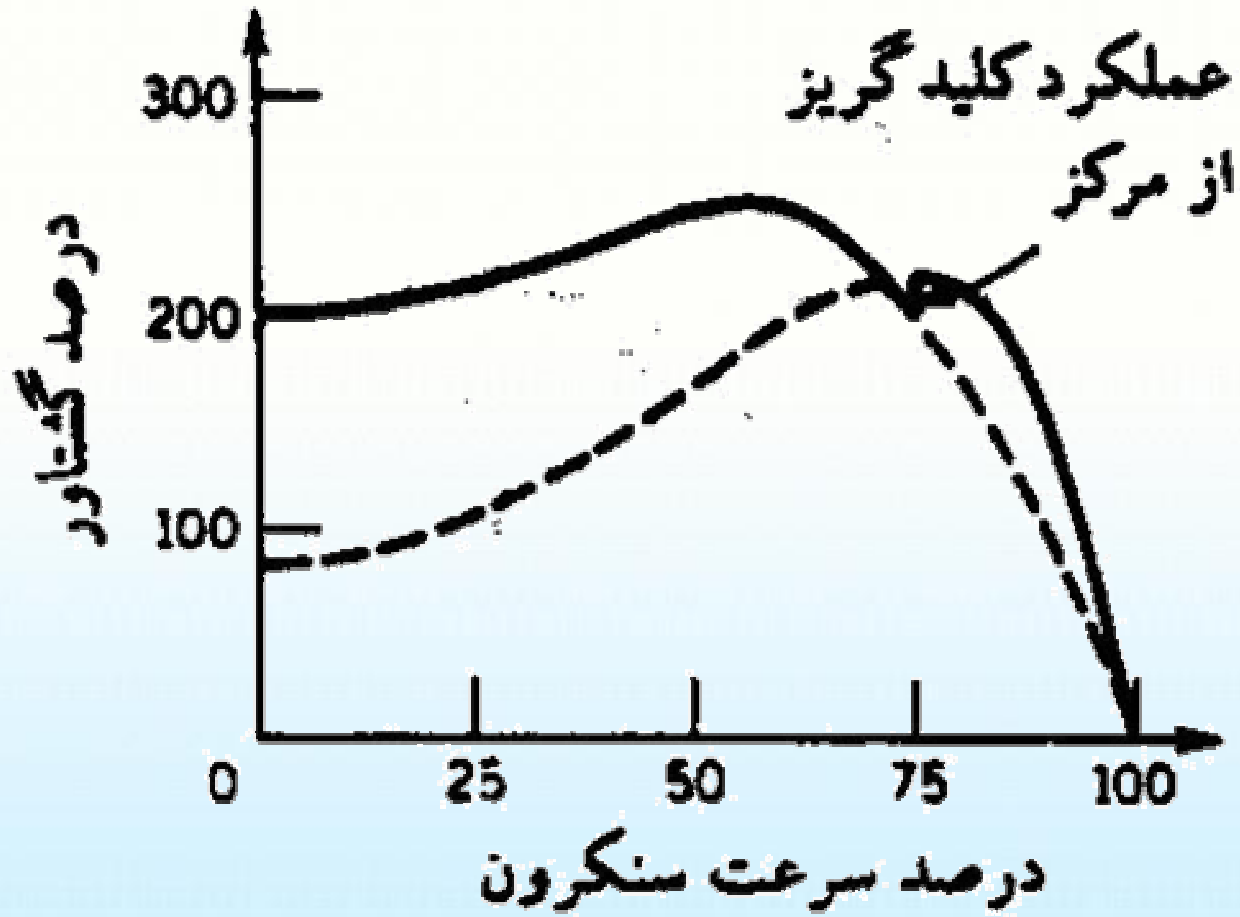


4- موتورهای دو خازنی

اگر بخواهیم موتوری داشته باشیم که نرم کار کند و گشتاور راه‌اندازی و گشتاور نامی و راندمان مطلوب داشته باشد، از موتورهای دو خازنی استفاده می‌کنیم.

شمای موتور دو خازنی

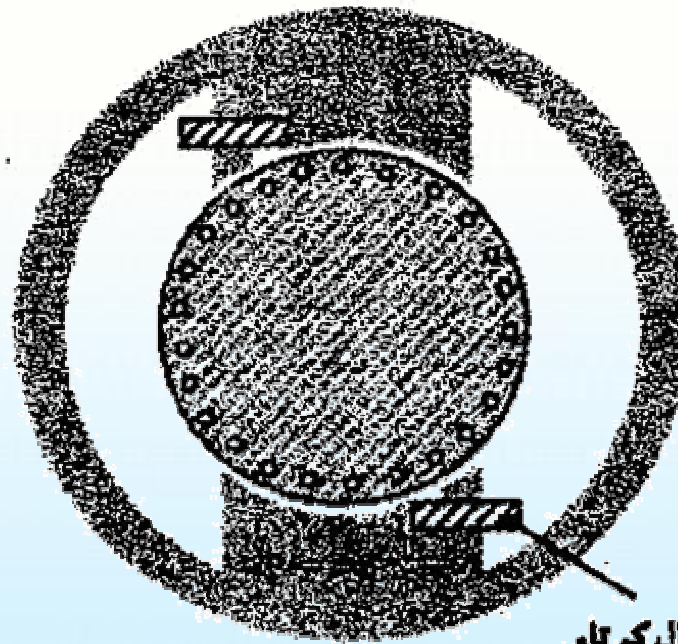




موتور القايي تكفاز قطب چاكدار



دانشگاه علم و صنعت ايران / دانشكده برق / تئوري جامع ماشينهاي الكتريكي / دكتور واحدی / پاييز ۸۳



سیم پیچ اتصال کوتاه

القاب قطب چاكدار



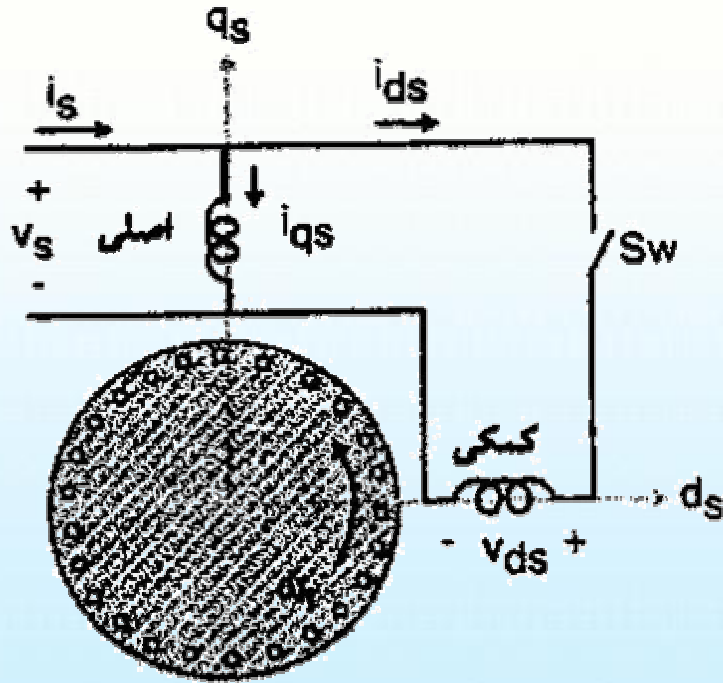
جدول ۱-۷ مشخصه‌ها و کاربردهای موتورهای القایی تکفاز

نوع موتور و علامت اختصاری	گشتاور (درصدی از گشتاور اسمی)		بار اسمی		اسب بخار	مقایسه تقریبی قیمت (درصد)	کاربردها
	راه اندازی	ماکزیمم	ضریب توان (درصد)	بازده (درصد)			
موتور فازشکته "SPM"	۱۰۰-۲۵۰	۳۰۰ تا	۵۰-۶۵	۵۵-۶۵	$\frac{1}{20}$ تا ۱	۱۰۰	پنکه‌ها، دمنده‌ها، پمپ‌های گریز از مرکز، ماشین رختشویی که به گشتاور راه‌انداز متوسط و کم نیاز دارند
موتور باخازن راه‌انداز "CSM"	۲۵۰-۴۰۰	۲۵۰ تا	۵۰-۶۵	۵۵-۶۵	$\frac{1}{8}$ تا ۱	۱۲۵	کمربورها - پمپها، پخش‌ها، لوازم تهریه مطبوع - ماشین رختشویی
موتور با خازن دائمی "CRM"	۱۰۰-۲۰۰	۲۵۰ تا	۷۵-۹۰	۶۰-۷۰	$\frac{1}{8}$ تا ۱	۱۴۰	پنکه‌ها، دمنده‌ها که به صدای کم نیاز داریم
موتور دو خازنی "ZGM"	۲۰۰-۳۰۰	۲۵۰ تا	۷۵-۹۰	۶۰-۷۰	$\frac{1}{8}$ تا ۱	۱۸۰	کمربورها، پمپ‌ها و... که به صدای کم و گشتاور راه‌انداز زیاد نیاز داریم
موتور قطب چاک‌دار "SHPM"	۴۰-۶۰	۱۴۰	۲۵-۴۰	۲۵-۴۰	$\frac{1}{20}$ تا $\frac{1}{2}$	۶۰	پنکه‌ها، موخشک‌کن‌ها اسباب بازی‌ها که به گشتاور راه‌انداز کم نیاز است.

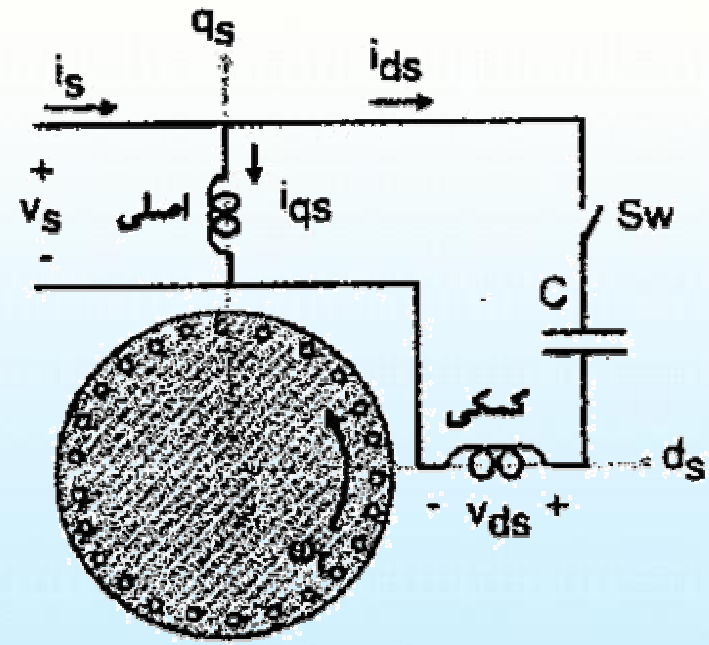
مدل سازی موتور القایی تکفاز



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



ب) مدل موتور

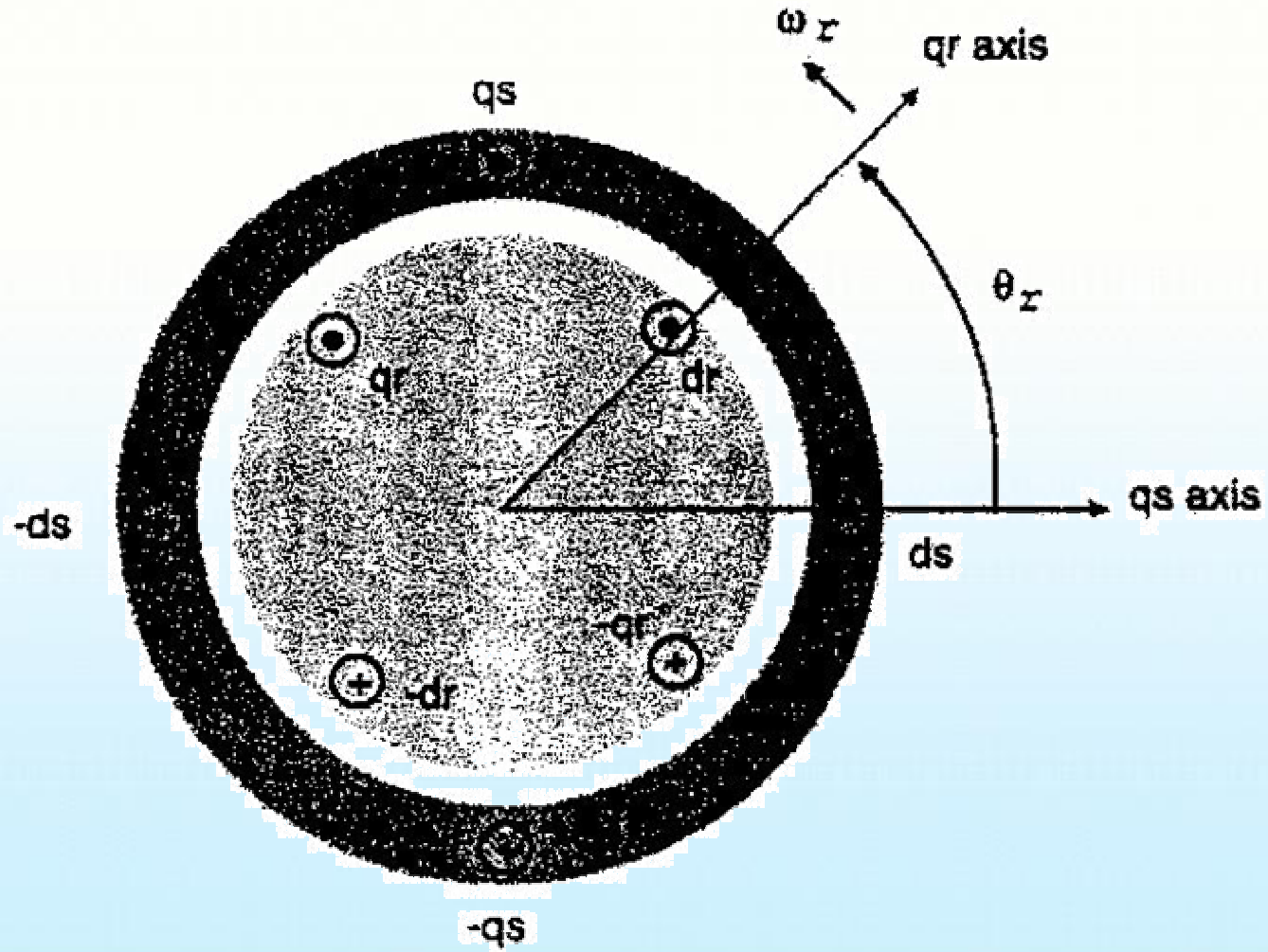


ج) مدل موتور

مدل مداری موتور القایی تکفاز



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳





معادلات دینامیکی موتور القایی تکفاز

معادلات ولتاژ - جریان مربوط به موتور القایی تکفاز

$$u_{qs} = r_{qs} i_{qs} + \frac{d}{dt} l_{qs}$$

$$u_{ds} = r_{ds} i_{ds} + \frac{d}{dt} l_{ds}$$

$$u_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d}{dt} l_{qr}$$

$$u_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d}{dt} l_{dr}$$

روابط شار - جریان



$$\begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{qr} \\ I_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{qsqs} & 0 & L_{qsqr} \cos q_r & L_{qsdr} \sin q_r \\ 0 & L_{dsds} & -L_{dsqr} \sin q_r & L_{dsdr} \cos q_r \\ L_{qrqs} \cos q_r & -L_{qrds} \sin q_r & L_{qrqs} & 0 \\ L_{drqs} \sin q_r & L_{drds} \cos q_r & 0 & L_{drds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

برای ساده کردن ماتریس از روابط زیر استفاده میکنیم:

$$L_{qsqr} = N_{qs} N_{qr} P_g$$

$$L_{qsqs} = N_{qs}^2 P_g$$

$$L_{dsdr} = N_{ds} N_{dr} P_g$$

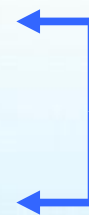
روابط شار _ جریان

قاب مرجع را استاتور گرفته و کمیت‌های روتور را با استفاده از ماتریس انتقال به طرف استاتور منتقل می‌کنیم:

$$T = \begin{bmatrix} \cos q_r & \sin q_r \\ -\sin q_r & \cos q_r \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} F_{qr}^s \\ F_{dr}^s \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} F_{qr}^r \\ F_{dr}^r \end{bmatrix}$$

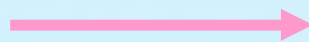
انتقال محورهای روتور به استاتور

یکی کردن Scale



بازنویسی معادلات

تغییر Scale



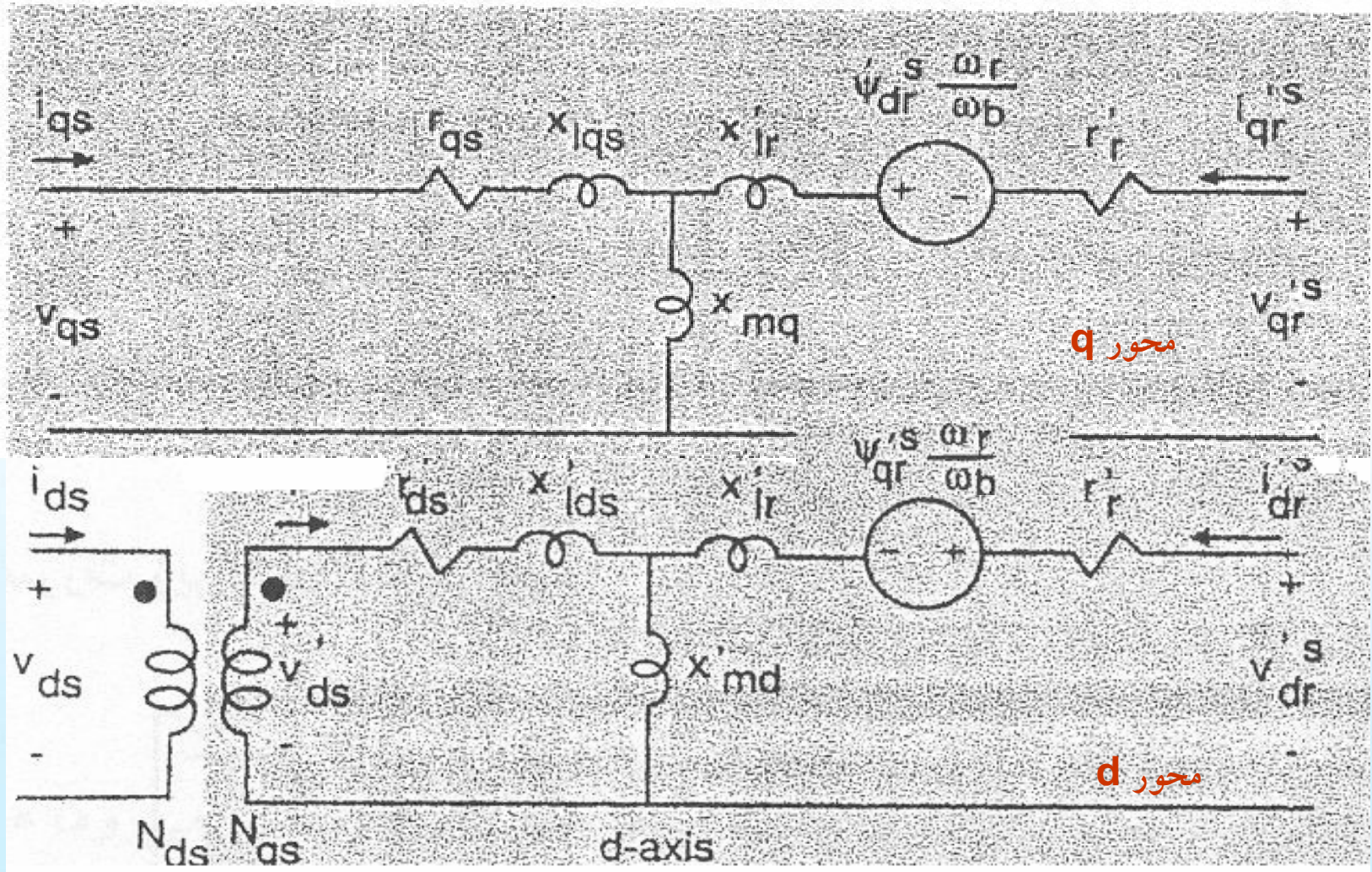
$$v'_{ds} = \frac{n_{qs}}{n_{ds}} v_{ds}$$

روابط ولتاژ

معادلات انتقال داده شده از طرف روتور به طرف سیم پیچ اصلی استاتور:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{qs} = r_{qs} i_{qs} + \frac{d}{dt} l_{qs} \\ u'_{ds} = r'_{ds} i'_{ds} + \frac{d}{dt} l'_{ds} \\ u'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} l'_{qr} - w_r l'_{dr} \\ u'_{dr} = r'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} l'_{dr} + w_r l'_{qr} \end{array} \right.$$

مدار معادل مربوط به محور q و d :



روابط گشتاور

$$T_{em} = \frac{p}{2} (I'_{qr} i'_{dr} - I'_{dr} i'_{qr}) = \frac{p}{2} L_{mq} (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds})$$

برای ادامه شبیه سازی باید معادلاتمان را بازنویسی کنیم ابتدا ورودیها، خروجیها و متغیرهای حالتمان را انتخاب میکنیم.





قسمت پنزدهم

مدل سازی ماشین سنکرون

مدل سازی ماشین سنکرون



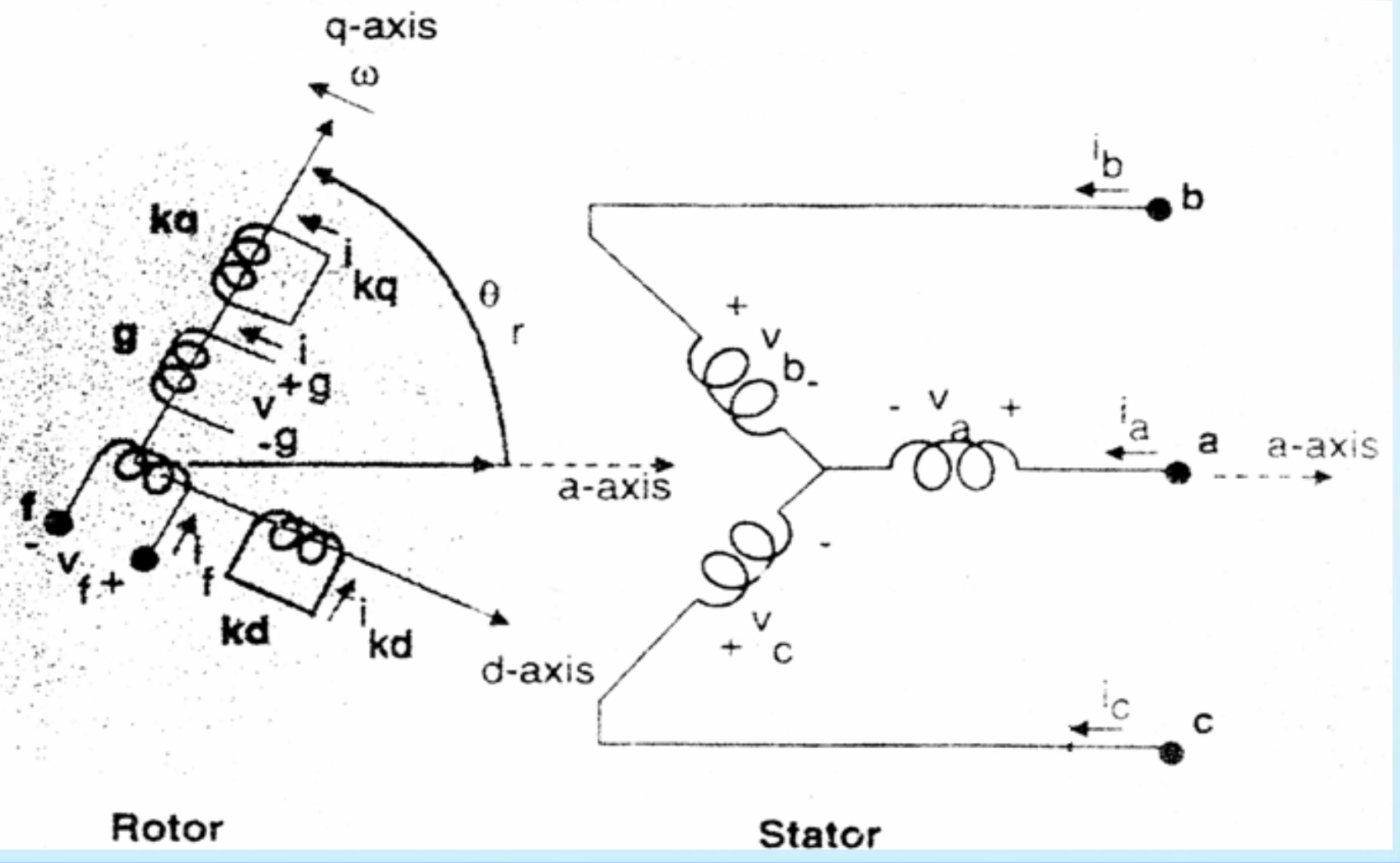
در مدل ماشین سنکرون تحریک توسط یک سیم پیچی روی محور مستقیم مدل میشود. برای ایجاد تقارن، یک سیم پیچی تحریک نیز روی محور عرضی در نظر گرفته میشود.

همچنین برای مدل کردن ماشین سنکرون، نقش دمپرها نیز در نظر گرفته میشود. در این مدل دمپرها توسط دو سیم پیچی اتصال کوتاه روی محورهای مستقیم و عرضی در نظر گرفته میشوند.

مدل سازی ماشین سنکرون



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



معادلات ولتاژ - جریان

$$\begin{bmatrix} V_s^{abc} \\ V_r^{qd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s^{abc} & 0 \\ 0 & R_r^{qd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{qd} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Lambda_s^{abc} \\ \Lambda_r^{qd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_s^{abc} \end{bmatrix}^T = [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]$$

$$\begin{bmatrix} V_r^{qd} \end{bmatrix}^T = [V_g \quad 0 \quad V_f \quad 0]$$

معادلات ولتاژ - جریان

استاتور

$$V_{as} = r_s i_{as} + \frac{d}{dt} l_{as}$$

$$V_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d}{dt} l_{bs}$$

$$V_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d}{dt} l_{cs}$$

روتور

$$V_g = r_g i_g + \frac{d}{dt} l_g$$

$$V_f = r_f i_f + \frac{d}{dt} l_f$$

$$0 = r_{kq} i_{kq} + \frac{d}{dt} l_{kq}$$

$$0 = r_{kd} i_{kd} + \frac{d}{dt} l_{kd}$$

معادلات شار - جریان

$$\begin{bmatrix} \Lambda_s^{abc} \\ \Lambda_r^{qd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr}^{qd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{qd} \end{bmatrix}$$

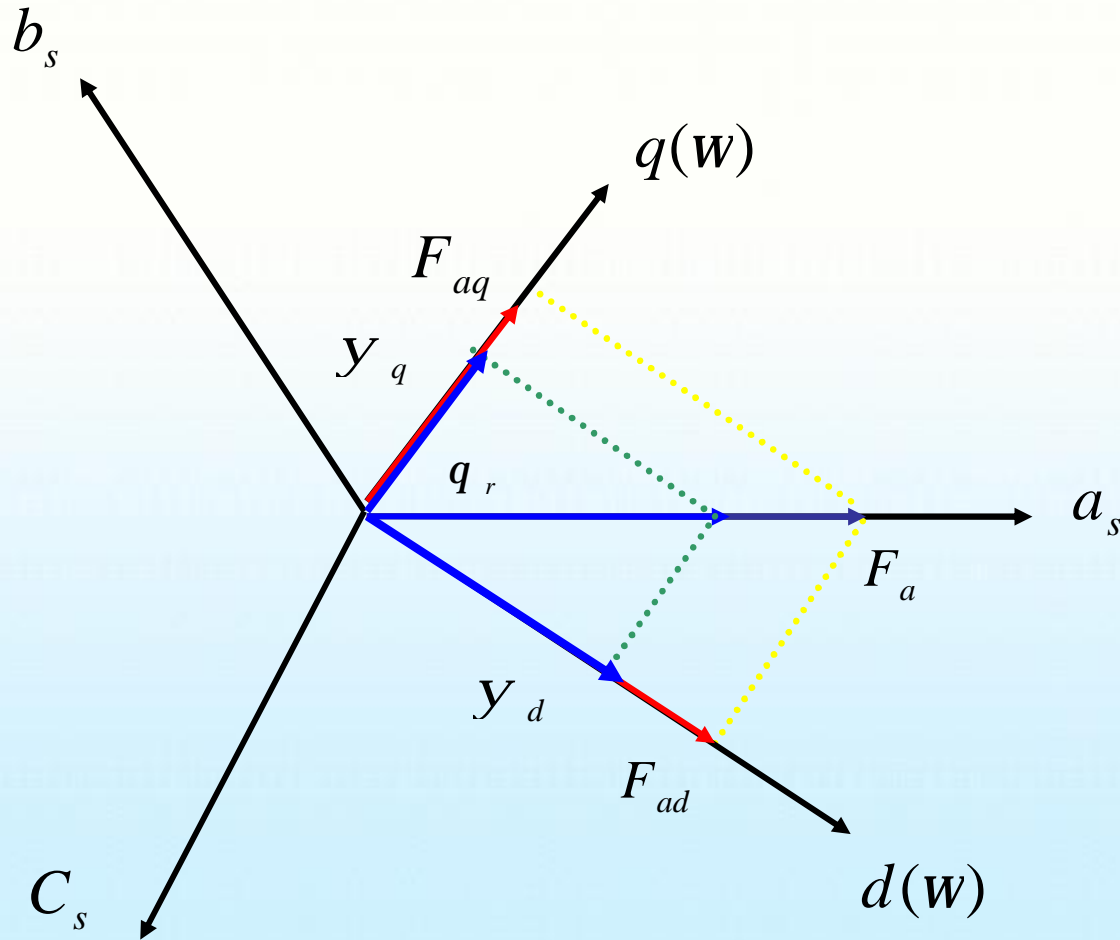
$$\rightarrow [\Lambda_s^{abc}]^T = [l_{as} \ l_{bs} \ l_{cs}]$$

$$\rightarrow [i_s^{abc}]^T = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]$$



ماتریس اندوکتانس استاتور

ماتریس اندوکتانس استاتور یک ماتریس با عناصر متغیر با زمان میباشد.



ماتریس اندوکتانس استاتور

$$[L_{ss}^{abc}] = \begin{bmatrix} L_{aa}^s & L_{ab}^s & L_{ac}^s \\ L_{ba}^s & L_{bb}^s & L_{bc}^s \\ L_{ca}^s & L_{cb}^s & L_{cc}^s \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} I_{aa} = N_a (j_q \cos q_r + j_d \sin q_r) \\ I_{aa} = N_a F_a [P_q \cos^2 q_r + P_d \sin^2 q_r] \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_{aa} = N_s F_a \left[\frac{P_d + P_q}{2} - \left(\frac{P_d - P_q}{2} \right) \cos 2q_r \right]$$

$$\Rightarrow I_{ba} = N_s F_a \left[-\frac{P_d + P_q}{4} - \left(\frac{P_d - P_q}{2} \right) \cos \left(2q_r - \frac{2p}{3} \right) \right]$$

$$L_{aa} = L_0 - L_{ms} \cos 2q_r$$

$$L_{ab} = -\frac{L_0}{2} - L_{ms} \cos \left(2q_r - \frac{2p}{3} \right)$$



ماتریس اندوکتانس استاتور

ماتریس اندوکتانس استاتور یک ماتریس با عناصر متغیر با زمان بوده و مولفه های آن عبارتند از :

اندوکتانس پراکندگی فاز استاتور (L_{1s})

حداکثر اندوکتانس متقابل دو فاز استاتور (L_{ms})

مقدار ثابت اندوکتانس متقابل بین فاز سیم پیچهای استاتور (L_0)

$$\left[L_{ss}^{abc} \right] = \begin{bmatrix} L_{1s} + L_0 - L_{ms} \cos 2q_r & -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2\left(q_r - \frac{p}{3}\right) & -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2\left(q_r - \frac{p}{3}\right) \\ -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2\left(q_r - \frac{p}{3}\right) & L_{1s} + L_0 - L_{ms} \cos 2\left(q_r - \frac{2p}{3}\right) & -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2\left(q_r - \frac{p}{3}\right) \\ -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2\left(q_r - \frac{p}{3}\right) & -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2\left(q_r - \frac{p}{3}\right) & L_{1s} + L_0 - L_{ms} \cos 2\left(q_r + \frac{2p}{3}\right) \end{bmatrix}$$



ماتریس اندوکتانس رتور

مولفه های ماتریس اندوکتانس رتور که نا متغییر با زمان هستند، به شرح زیر میباشد :

اندوکتانس پراکندگی سیم پیچی رتور (L_{1g})

اندوکتانس مغناطیس کننده رتور (L_{mg})

اندوکتانس متقابل بین سیم پیچهای رتور (L_{gkq})

$$\left[L_{rr} \right] = \begin{bmatrix} L_{gg} & L_{gkq} & 0 & 0 \\ L_{gkq} & L_{kqkq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{ff} & L_{fkd} \\ 0 & 0 & L_{fkd} & L_{kdkd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1g} + L_{mg} & L_{gkq} & 0 & 0 \\ L_{gkq} & L_{1kq} + L_{mkq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{1f} + L_{mf} & L_{fkd} \\ 0 & 0 & L_{fkd} & L_{1kd} + L_{mkd} \end{bmatrix}$$

ماتریس اندوکتانس متقابل استاتور - روتور

ماتریس اندوکتانس استاتور یک ماتریس با عناصر متغیر با زمان بوده و مولفه های آن عبارتند از :

حداکثر اندوکتانس متقابل یک سیم پیچی استاتور با رتور (L_{sg})

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{sg} \cos q_r & L_{skq} \cos q_r & L_{sf} \sin q_r & L_{skd} \sin q_r \\ L_{sg} \cos(q_r - \frac{2p}{3}) & L_{skq} \cos(q_r - \frac{2p}{3}) & L_{sf} \sin(q_r - \frac{2p}{3}) & L_{skd} \sin(q_r - \frac{2p}{3}) \\ L_{sg} \cos(q_r + \frac{2p}{3}) & L_{skq} \cos(q_r + \frac{2p}{3}) & L_{sf} \sin(q_r + \frac{2p}{3}) & L_{skd} \sin(q_r + \frac{2p}{3}) \end{bmatrix}$$

ماتریس اندوکتانس متقابل روتور - استاتور

مقدار q_r به سرعت رتور و طبعا به زمان وابسته است :

$$q_r = w_r t + q_{r0}$$

همانگونه که میدانیم، ماتریس $[L_{rs}]$ ترانهاده ماتریس $[L_{sr}]$ می باشد

$$[L_{rs}] = [L_{sr}]^T$$

معادلات ولتاژ - جریان

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \right)$$

$$[R_s^{abc}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r^{qd}] = \begin{bmatrix} R_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{kq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{kd} \end{bmatrix}$$



معادلات ولتاژ - جریان

در معادلات ولتاژ - جریان :

کمیات فازها به هم وابسته هستند

ماتریس اندوکتانس متغییر با زمان است

پس برای سهولت محاسبات و حل مشکلات فوق از تبدیل ($qd0$)

در قاب مرجع گردان با سرعت سنکرون ($q = w_s t + q_0$) استفاده میکنیم

لازم به ذکر است که ماتریس تبدیل فقط برای مولفه های استاتور است و مولفه های رتور، نیازی به تبدیل ندارند.

روابط تبدیل (qd0) برای مولفه های استاتور



$$\begin{cases} [f_s^{qd0}] = [T_{qd0}(q)] [f_s^{abc}] \\ [f_s^{abc}] = [T_{qd0}(q)]^{-1} [f_s^{qd0}] \end{cases}$$

توابع تبدیل

$$[T_{qdo}(q)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos q & \cos(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q + \frac{2p}{3}) \\ \sin q & \sin(q - \frac{2p}{3}) & \sin(q + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

ماتریس تبدیل

روابط تبدیل (qd0) برای مولفه های استاتور

$$[V_s^{abc}] = [R_s^{abc}][i_s^{abc}] + \frac{d}{dt}[\lambda_s^{abs}]$$

$$[V_s^{abc}] = [T_{qd0}(q)]^{-1}[V_s^{qd0}]$$

$$[i_s^{abc}] = [T_{qd0}(q)]^{-1}[i_s^{qd0}]$$

$$[I_s^{abc}] = [T_{qd0}(q)]^{-1}[I_s^{qd0}]$$

با جایگزینی مقادیر ولتاژ، جریان و شار سه فاز با مقادیر متناظر قاب مرجع گردان داریم :

$$[T_{qd0}(q)]^{-1}[V_s^{qd0}] = [R_s^{abc}][T_{qd0}(q)]^{-1}[i_s^{qd0}] + p([T_{qd0}(q)]^{-1}[I_s^{qd0}])$$

روابط تبدیل (qd0) برای مولفه های استاتور

حال طرفین معادله ولتاژ - جریان را در ماتریس $[T_{qd0}(q)]$ ضرب میکنیم :

$$[T_{qd0}(q)][T_{qd0}(q)]^{-1}[V_s^{qd0}] =$$

$$[T_{qd0}(q)][R_s^{abc}][T_{qd0}(q)]^{-1}[i_s^{qd0}] + [T_{qd0}(q)]p([T_{qd0}(q)]^{-1}[I_s^{qd0}])$$

ماتریس مقاومت استاتور را بصورت زیر میتوان نوشت :

$$[R_s^{abc}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} = R_s [I]$$

با جایگزینی ماتریس مقاومت داریم :

$$[V_s^{qd0}] = R_s [T_{qd0}(q)][I][T_{qd0}(q)]^{-1}[i_{as}^{qd0}] + [T_{qd0}(q)]p([T_{qd0}(q)]^{-1}[I_s^{qd0}])$$

روابط تبدیل (qd0) برای مولفه های استاتور

پس از ساده سازی و بسط رابطه شار دور داریم :

$$[V_s^{qd0}] = [R_s^{qd0}][i_s^{qd0}] + [T(q)][T(q)]^{-1} p[l_s^{qd0}] + [T(q)]p[T(q)]^{-1}[l_s^{qd0}]$$

$$[V_s^{qd0}] = [R_s^{qd0}][i_s^{qd0}] + p[l_s^{qd0}] + [T(q)]p[T(q)]^{-1}[l_s^{qd0}]$$

$$[T(q)](p[T(q)]^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{dq}{dt} = w \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

روابط تبدیل (qd0) برای مولفه های استاتور

$$[V_s^{qd0}] = \underbrace{[R_s^{qd0}]}_1 [i_s^{qd0}] + \underbrace{p [l_s^{qd0}]}_2 + \underbrace{w \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_3 [l_s^{qd0}]$$

در رابطه فوق بخش اول ولتاژ اهمی، بخش دوم ولتاژ ترانسفورمیری و بخش سوم ولتاژ گردشی میباشد که به سرعت نسبی قاب مرجع و محور سیم پیچها بستگی دارد:

$$\begin{cases} V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} l_{qs} + w l_{ds} \\ V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} l_{ds} - w l_{qs} \\ V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d}{dt} l_{os} \end{cases}$$



اعمال تبدیل (qd0) بر روی روابط شار - جریان استاتور



$$\begin{bmatrix} I_s^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{sr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{qd} \end{bmatrix}$$

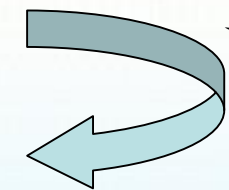
$$\begin{bmatrix} T(q) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_s^{qd0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(q) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_s^{qd0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{sr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{qd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_s^{qd0} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} T(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(q) \end{bmatrix}^{-1}}_{\begin{bmatrix} L_{ss}^{qd0} \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} i_s^{qd0} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} T(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{sr}^{abc} \end{bmatrix}}_{\begin{bmatrix} L_{sr}^{qd0} \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} i_r^{qd0} \end{bmatrix}$$

ماتریس اندوکتانس
خودی استاتور (qd0)

ماتریس اندوکتانس متقابل
استاتور- رتور (qd0)

ضرب طرفین در
 $\begin{bmatrix} T(q) \end{bmatrix}$





اعمال تبدیل (qd0) بر روی روابط شار - جریان استاتور

فرض می کنیم ماده مغناطیسی داخل روتور و استاتور ایده آل می باشد

حال کارهای زیر را انجام می دهیم:

1 کاهش تعداد متغیرها

2 یک scale کردن تمام متغیرها

روابط شار - جریان استاتور و روتور



$$\begin{bmatrix} l_q \\ l_d \\ l_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_g \\ i'_{kq} \\ i'_f \\ i'_{kd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} l'_g \\ l'_{kq} \\ l'_f \\ l'_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{mq} & 0 & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L'_{gg} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & L'_{kqkq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L'_{ff} & L_{md} \\ 0 & 0 & L_{md} & L'_{kdkd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_g \\ i'_{kq} \\ i'_f \\ i'_{kd} \end{bmatrix}$$

ماتریس اندوکتانس انتقال یافته



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳

$$\begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{os} \\ I'_g \\ I'_{kq} \\ I'_f \\ I'_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1s} + L_{mq} & 0 & 0 & L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1s} + L_{md} & 0 & L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{1s} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 & L'_{1g} + L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 & L_{mq} & L'_{1kq} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 & 0 & 0 & L'_{1f} + L_{md} & L_{md} \\ 0 & L_{md} & 0 & 0 & 0 & L_{md} & L'_{1kd} + L_{md} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_g \\ i'_{kq} \\ i'_f \\ i'_{kd} \end{bmatrix}$$

روابط ولتاژ - جریان استاتور

از آنجا که معمولاً راکتانسها بجای اندوکتانسها در اختیار قرار میگیرد، بنابراین ترجیح داده میشود که معادلات بر حسب راکتانسها نوشته شود. در نتیجه معادلات ولتاژ - جریان استاتور به صورت زیر تغییر میکند:

$$v_{qs} = Ri_{qs} + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y_{qs} + \frac{w}{w_b} y_{ds}$$

$$v_{ds} = Ri_{ds} + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y_{ds} - \frac{w}{w_b} y_{qs}$$

روابط ولتاژ - جریان روتور



$$v'_g = R'_g i'_g + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y'_g$$

$$0 = R'_{kq} i'_{kq} + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y'_{kq}$$

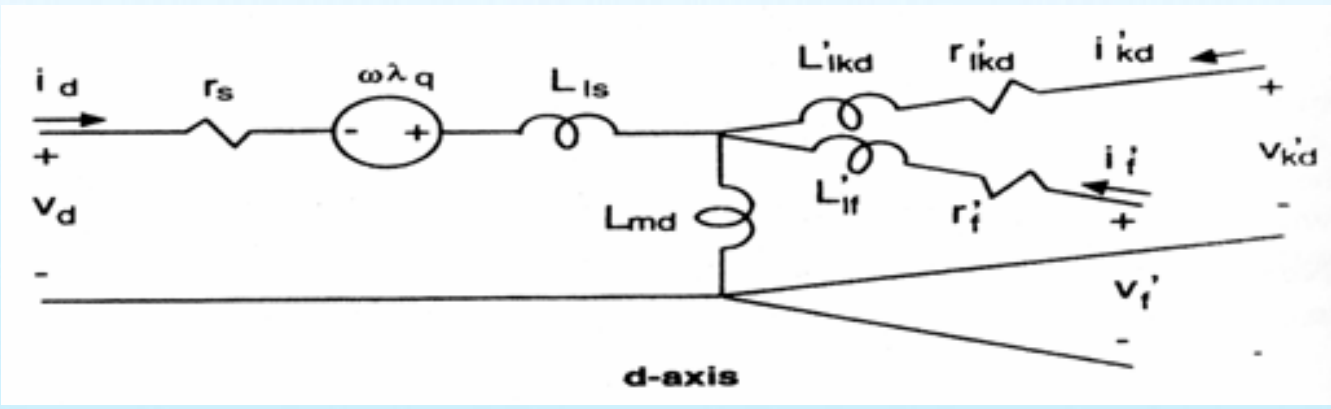
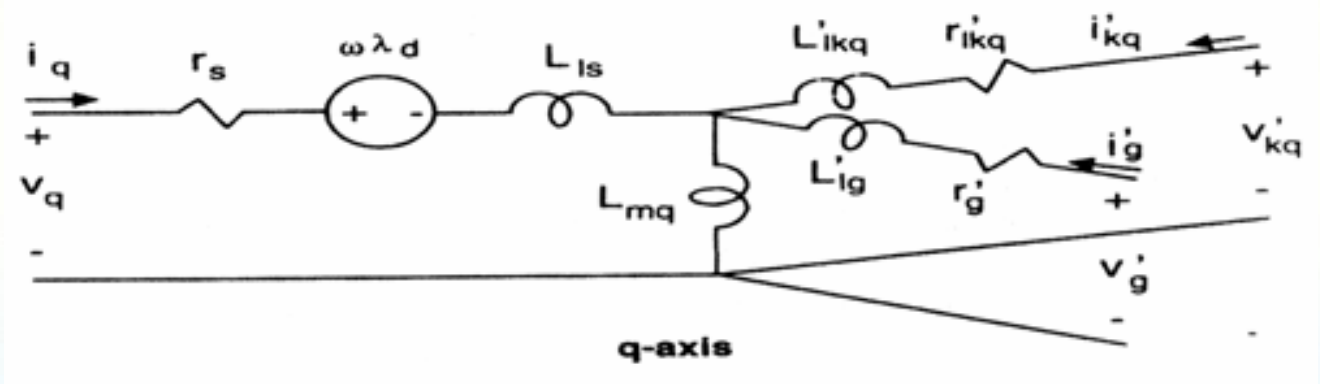
$$v'_f = R'_f i'_f + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y'_f$$

$$0 = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{1}{w_b} \frac{d}{dt} y'_{kd}$$

مدار معادل محورهای q و d



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



گشتاور الکترومغناطیسی در ماشین سنکرون

برای بدست آوردن گشتاور الکترومغناطیسی نیز همانند ماشین القایی عمل میکنیم.

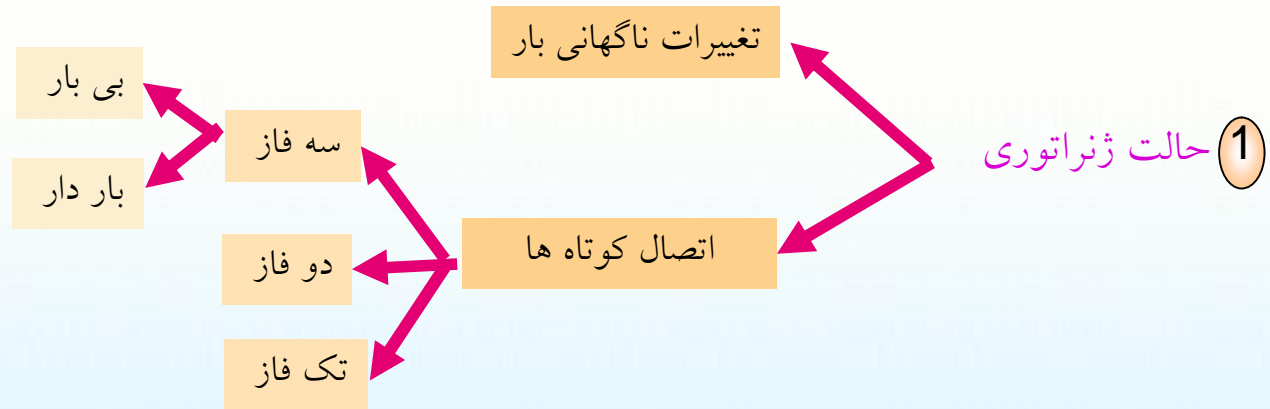
$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (l_d i_q - l_q i_d)$$



شبیه سازی معادلات ماشین سنکرون

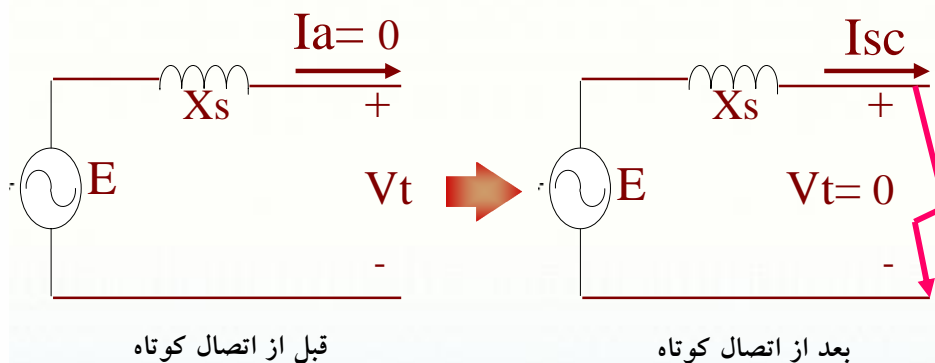
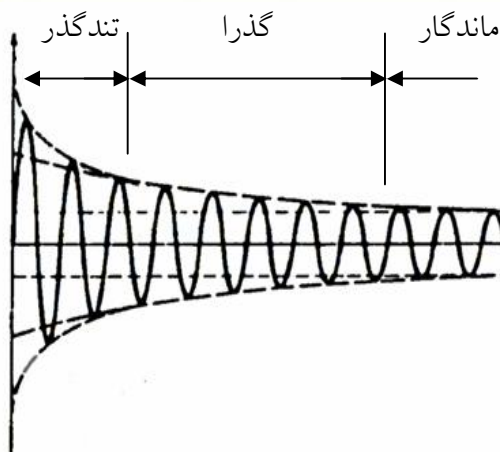
- 1) معادلات ریاضی را بدست بیاوریم
- 2) ورودی، خروجی و معادلات حالت را مشخص کنیم
- 3) معادلات را بازنویسی کنیم
- 4) ایجاد بلوکهای مربوط به انجام شبیه سازی

حالت‌های گذرا در ماشین سنکرون



2) **حالت موتور** : در حالت موتوری ، شرایط گذرا را می توان بعنوان تغییرات ناگهانی بار روی محور موتور تعبیر کرد

بررسی اتصال کوتاه در ژنراتور



همانگونه که در نمودار جریان فوق (که با صرف نظر از مولفه dc رسم شده) دیده می شود، دامنه جریان سینوسی، تغییرات زیادی دارد. نکات مهمی که در این نمودار دارای اهمیت است به شرح زیرند:

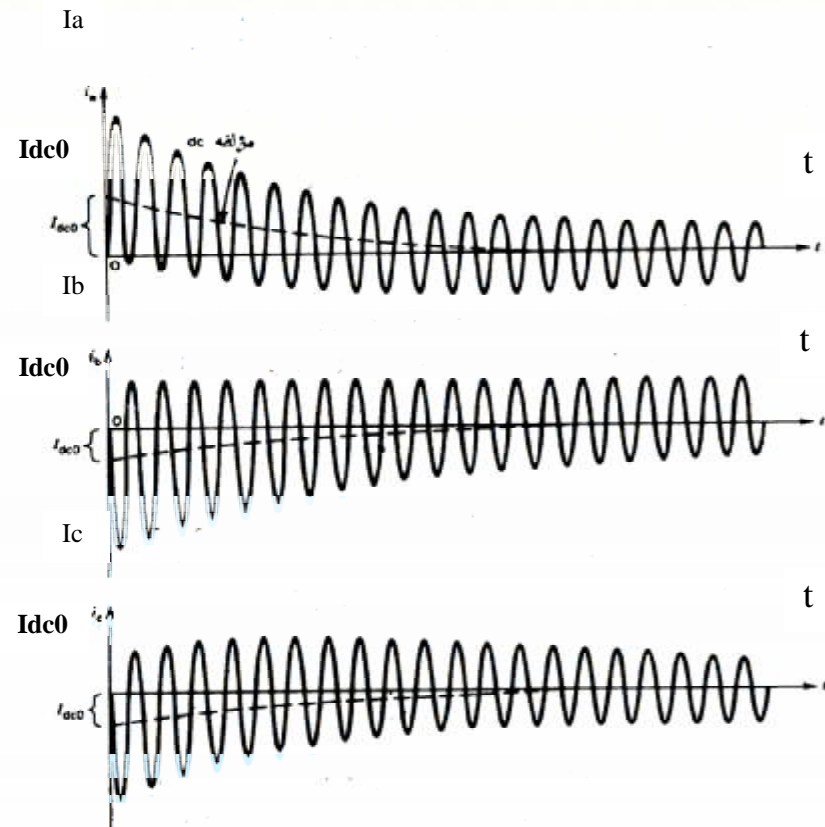
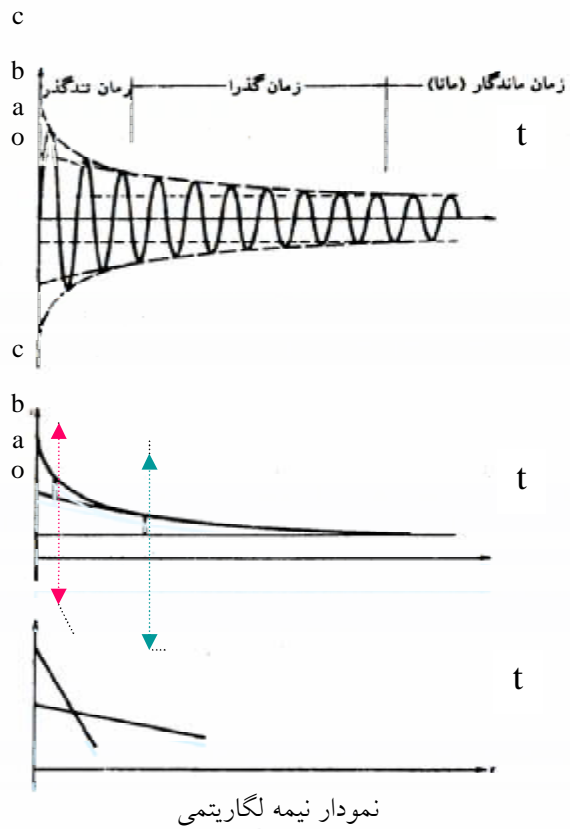
1- این نمودار را می توان به سه قسمت با زمانهای خاص خود تقسیم کرد

2- علت وقوع این تغییرات در هر کدام از بازه های زمانی

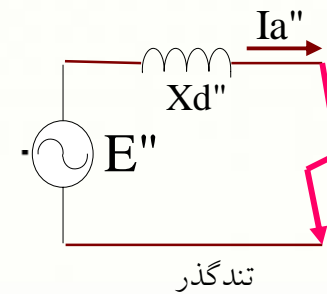
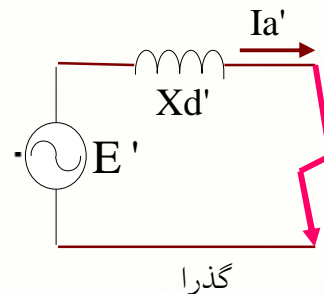
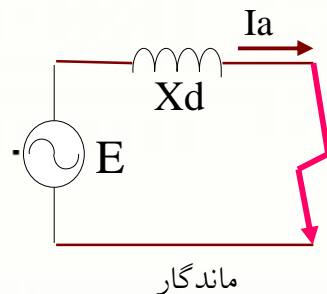
جریانهای اتصال کوتاه ژنراتور سه فاز در حالت بی باری



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



مدار معادل ژنراتور سنکرون در حالت‌های اتصال کوتاه بی بار و باردار



مدار معادل ژنراتور اتصال کوتاه شده در حالت بی باری و بارداری به همین صورت است تنها تفاوت آنها در مقدار ولتاژ القایی آنها می باشد . در حالت بی بار ولتاژهای القایی در تمام حالات یکسان و برابر ولتاژ بی بار ژنراتور می باشند .

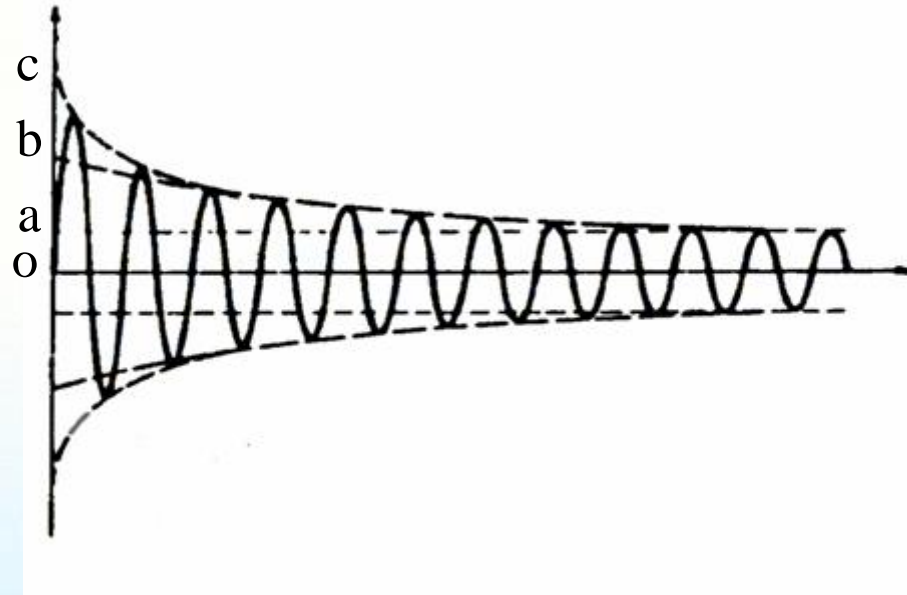
در حالت بار دار ولتاژهای القایی را بصورت زیر در نظر می گیرند :

$$E = V_t + jX_d I_a$$

$$E' = V_t + jX_d' I_a$$

$$E'' = V_t + jX_d'' I_a$$

رابطه جریان اتصال کوتاه

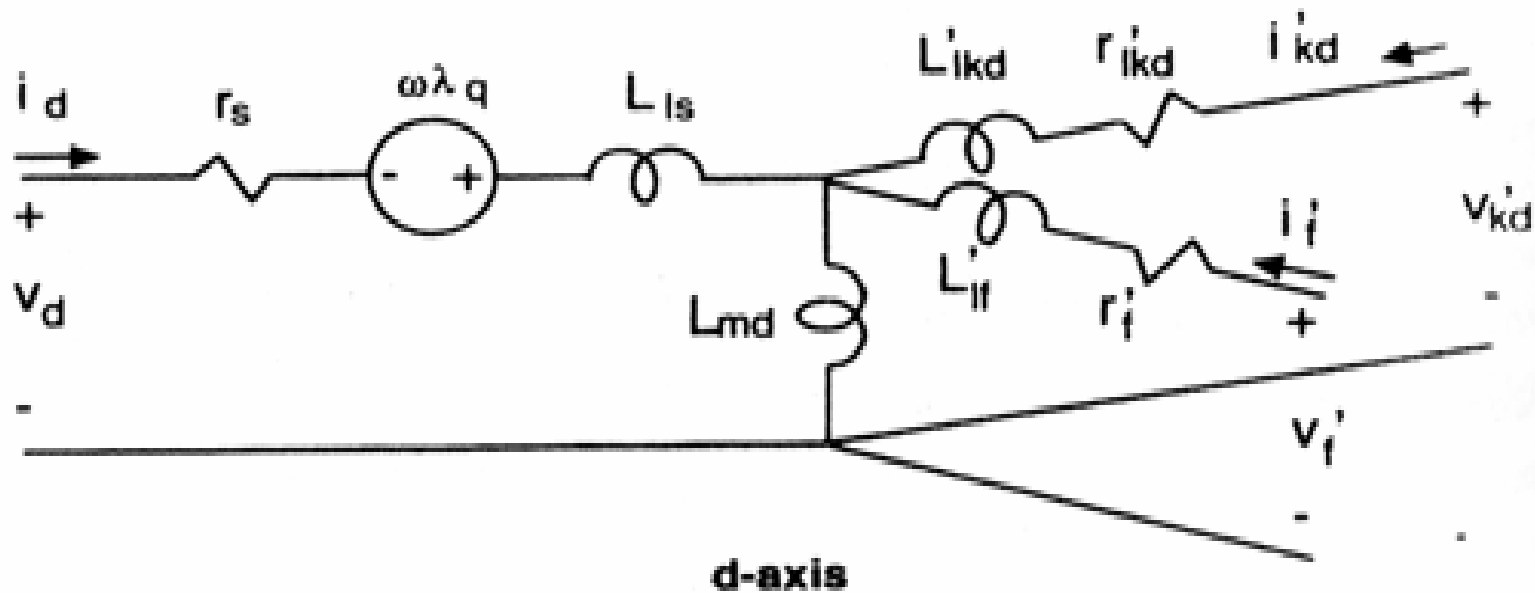


$$i_{sc} = \sqrt{2} \left[\underbrace{\frac{E}{X_d}}_{oa} + \underbrace{\left(\frac{E}{X'_d} - \frac{E}{X_d} \right)}_{ab} e^{\frac{-t}{T'_{d0}}} + \underbrace{\left(\frac{E}{X''_d} - \frac{E}{X'_d} \right)}_{bc} e^{\frac{-t}{T''_{d0}}} \right] \sin \omega t + I_{dco} e^{\frac{-t}{T_a}}$$



پارامترهای ماشین سنکرون

اگر به مدار معادل ماشین سنکرون نظری بیاندازیم، پارامترهای متفاوتی نظیر مقامت استاتور، تحریک و دمپرها و همچنین مقادیر اندوکتانسها پراکندگی را مشاهده میکنیم:





پارامترهای ماشین سنکرون

برخی از این پارامترها را میتوان با استفاده از اندازه گیری بدست آورد اما برخی دیگر نظیر مقاومت واندوکتانس دمپرها را مستقیماً نمی توان اندازه گیری کرد.

اگر ارتباط بین پارامترهای مدار معادل را بدست آوریم، با دانستن بخشی از پارامترها، سایر پارامترها را میتوان بدست آورد.

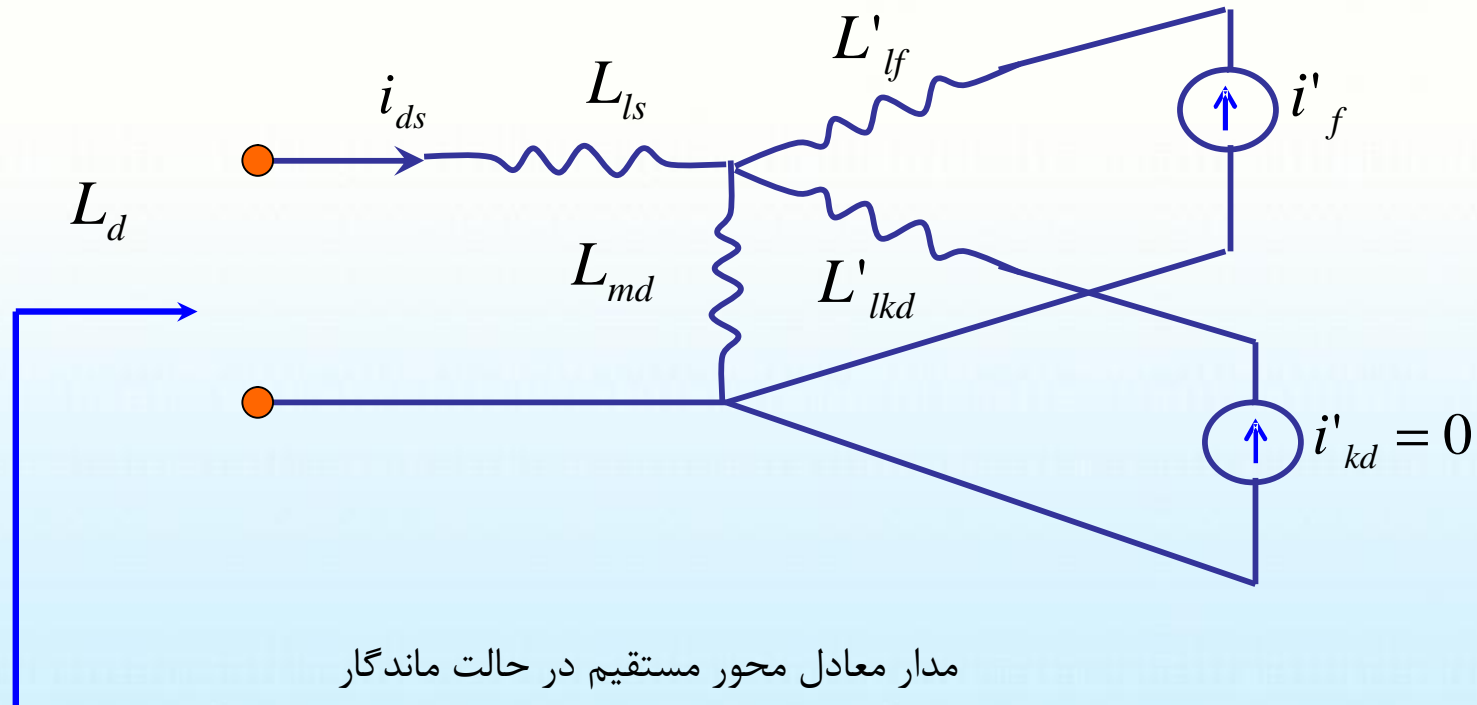
به این منظور اندوکتانس ها و ثابتهای زمانی (مدار باز و اتصال کوتاه) مربوط به هر محور را در حالتی مختلف دائم، گذرا و تند گذر بدست میآوریم.

ابتدا مدار معادل برای حالت دائم بدست آورده و بعد این کار را برای حالتی دیگر تکرار میکنیم:

اندوکتانس محور مستقیم در حالت دائم



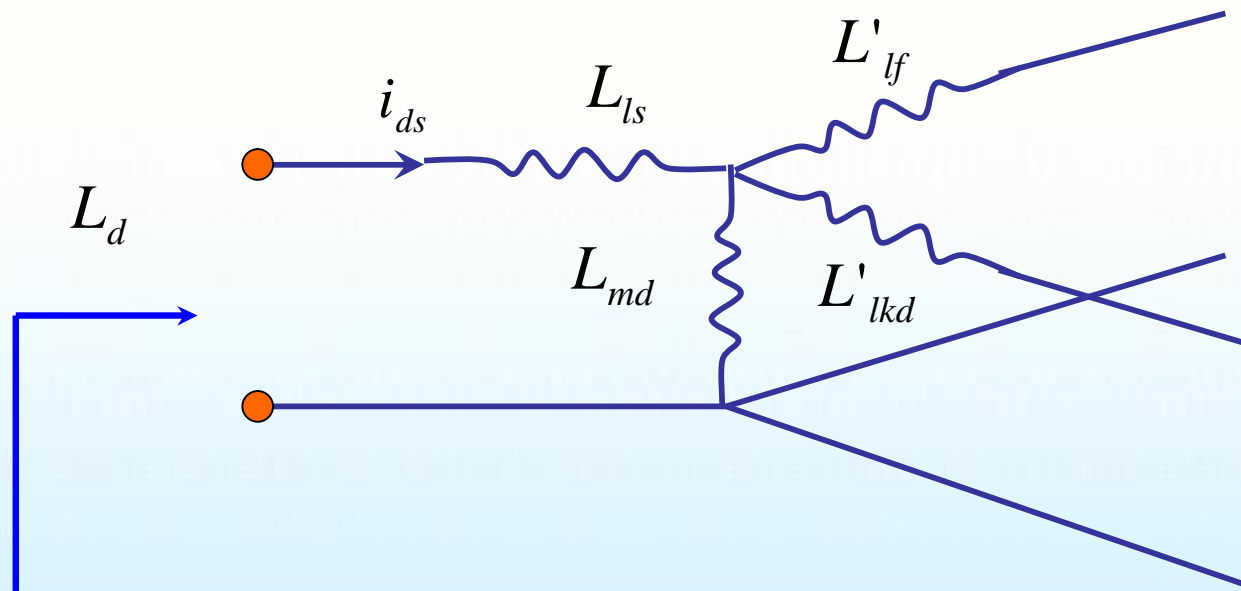
دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



اندوکتانس محور مستقیم در حالت دائم



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳

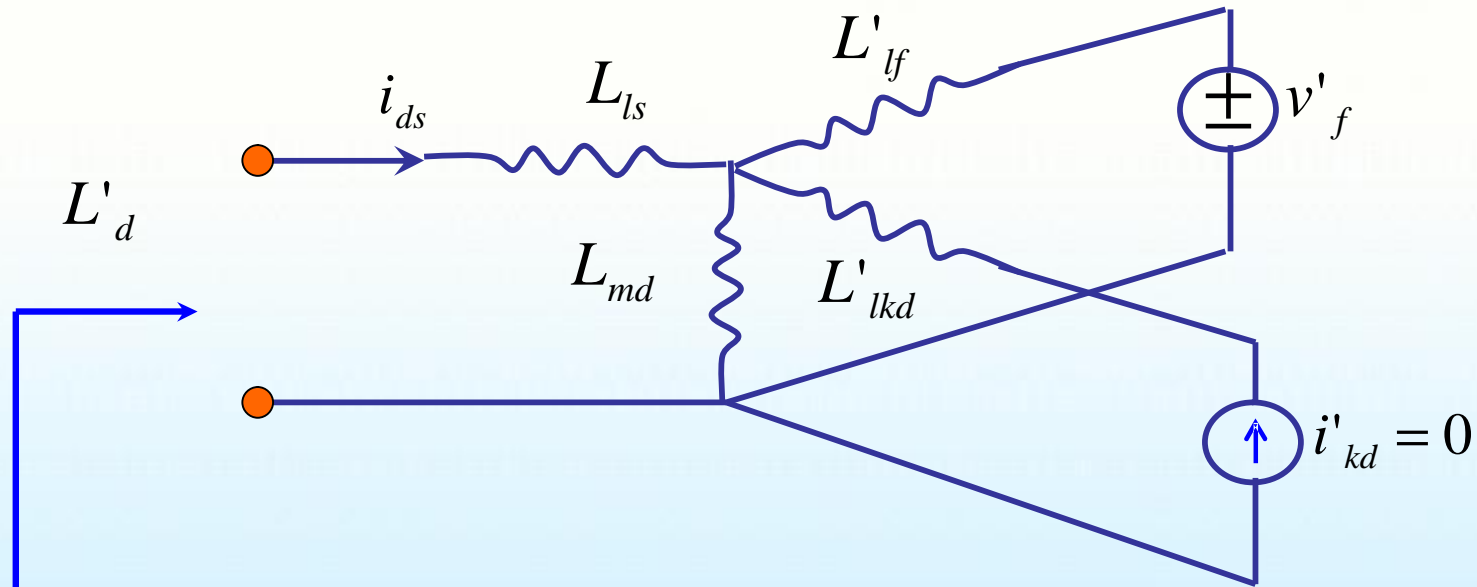


$$L_d = L_{ls} + L_{md}$$

اندوکتانس محور مستقیم در حالت گذرا



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳



مدار معادل محور مستقیم در حالت گذرا



پارامترهای ماشین سنکرون

در حالت گذرا حضور سیم پیچی تحریک باعث میرا شدن نوسانات میگردد. در این حالت سیم پیچیهای دمپر دیگر در مدار نیستند. از اصل ثابت ماندن شارها اگر استفاده کنیم، داریم:

$$\begin{cases} \Delta i'_{kd} = 0 \\ \Delta i'_{kq} = 0 \\ \Delta I'_f = 0 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \Delta I'_f = L_{md} \Delta i_d + L'_{ff} \Delta i'_f = 0 \\ \Delta I_d = L_d \Delta i_d + L_{md} \Delta i'_f \end{cases}$$

$$L'_d = \frac{\Delta I_d}{\Delta i_d}$$



پارامترهای ماشین سنکرون

در حالت گذرا حضور سیم پیچی تحریک باعث میرا شدن نوسانات میگردد. در این حالت سیم پیچیهای دمپر دیگر در مدار نیستند. از اصل ثابت ماندن شارها اگر استفاده کنیم، داریم:

$$\Delta i'_f = -\frac{L_{md}}{L'_{ff}} \Delta i_d \quad \Rightarrow \quad \Delta I_d = L_d \Delta i_d + L_{md} \left(-\frac{L_{md}}{L'_{ff}} \right) \Delta i_d$$

$$L'_d = \frac{\Delta I_d}{\Delta i_d} = L_d - \frac{L_{md}^2}{L'_{ff}}$$



پارامترهای ماشین سنکرون

به روابط زیر توجه کنید :

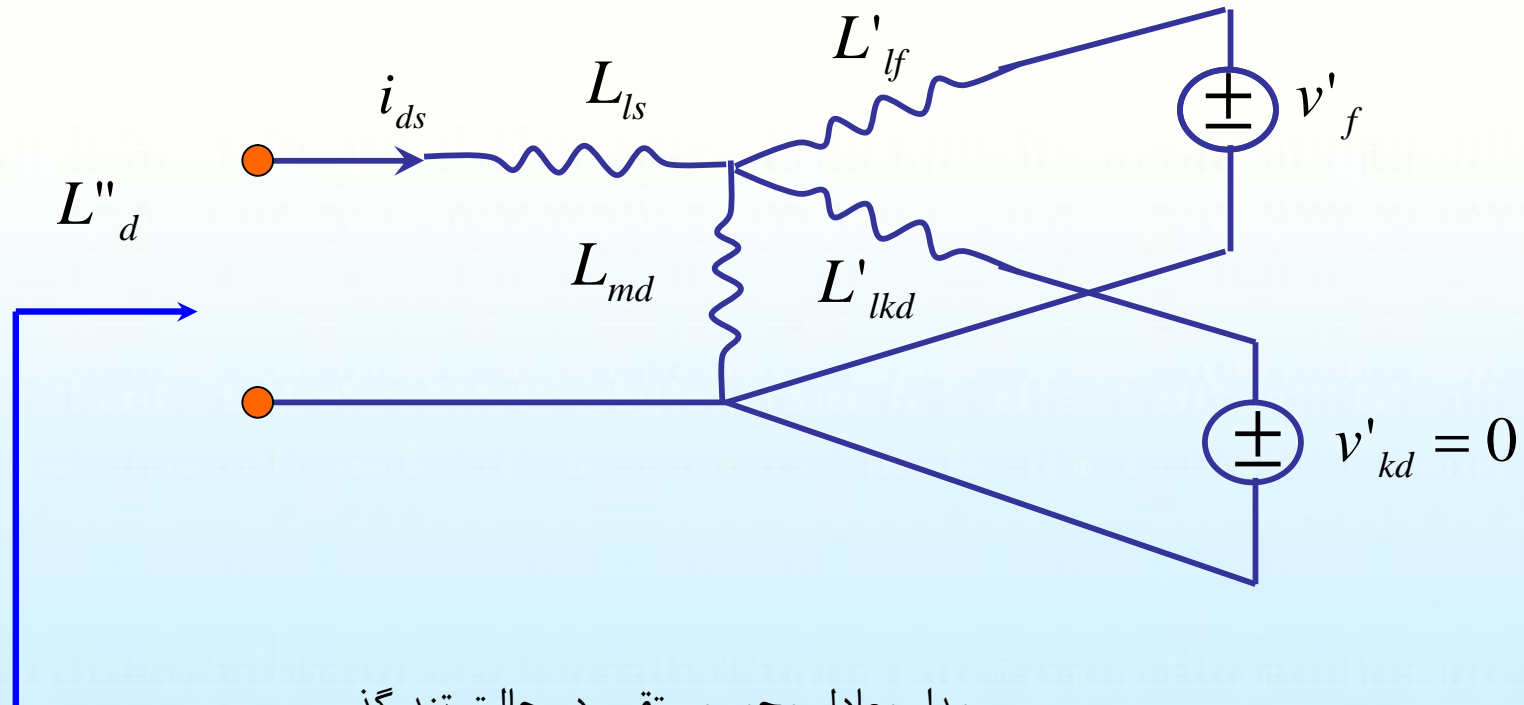
$$\begin{cases} L_d = L_{1s} = L_{md} \\ L'_{ff} = L'_{1f} + L_{md} \end{cases}$$

$$L'_d = L_{1s} + L_{md} \parallel L'_{1f}$$

مشابه این روابط را برای محور q داریم:

$$L'_q = \frac{\Delta I_q}{\Delta i_q} = L_q - \frac{L_{mq}^2}{L'_{gg}}$$

اندوکتانس محور مستقیم در حالت تند گذرا



مدار معادل محور مستقیم در حالت تند گذر



پارامترهای ماشین سنکرون

در حالت تندگذر حضور سیم پیچیهای دمپر و تحریک باعث میرا شدن نوسانات میگردد. در این حالت سیم پیچیهای دمپر هم در مدار هستند. اگر از اصل ثابت ماندن شارها استفاده کنیم، داریم :

$$\begin{cases} \Delta I'_f = 0 \\ \Delta I'_{kd} = 0 \end{cases} \implies \begin{cases} \Delta I'_f = L_{md} \Delta i_d + L'_{ff} \Delta i'_f = 0 \\ \Delta I'_{kd} = L_{md} \Delta i_d + L_{md} \Delta i'_f + L'_{kd} \Delta i'_{kd} = 0 \end{cases}$$

$$L''_d = \frac{\Delta I_d}{\Delta i_d}$$



پارامترهای ماشین سنکرون

در حالت گذرا حضور سیم پیچی تحریک باعث میرا شدن نوسانات میگردد. در این حالت سیم پیچیهای دمپر دیگر در مدار نیستند. از اصل ثابت ماندن شارها اگر استفاده کنیم، داریم:

$$\begin{bmatrix} \Delta i'_f \\ \Delta i'_{kd} \end{bmatrix} = - \frac{L_{md}}{L'_{ff} L'_{kd} - L_{md}^2} \begin{bmatrix} L'_{lkd} \\ L'_{lf} \end{bmatrix} \Delta i_d$$

$$L''_d = \frac{\Delta I_d}{\Delta i_d} \implies L'_d = \frac{\Delta I_d}{\Delta i_d} = L_d - \frac{L_{md}^2 (L'_{lkd} + L'_{lf})}{L'_{ff} L'_{kd} - L_{md}^2}$$



پارامترهای ماشین سنکرون

توجه داشته باشید میتوان ثابت کرد :

$$L''_d = L_{1s} + L_{md} \parallel L'_{1f} \parallel L'_{kd}$$

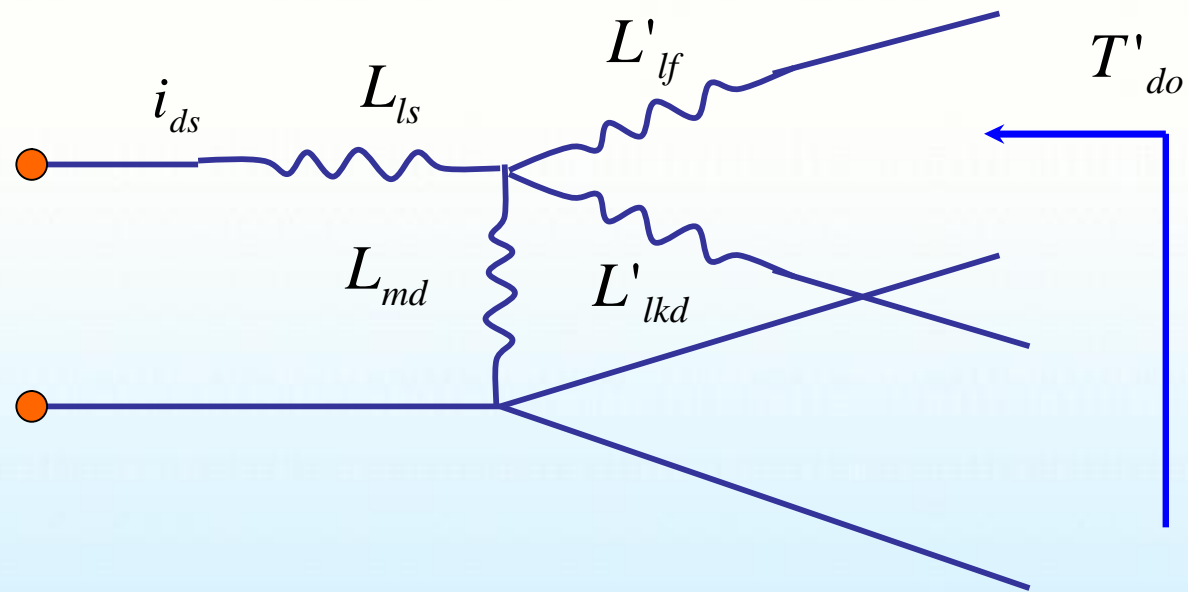
مشابه این روابط را برای محور q داریم:

$$L''_q = \frac{\Delta I_q}{\Delta i_q} = L_q - \frac{L_{mq}^2 (L'_{lkq} + L'_{1g})}{L'_{gg} L'_{kqkq} - L_{mq}^2}$$

ثابتهای زمانی بی باری محور مستقیم در حالت گذرا



دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳

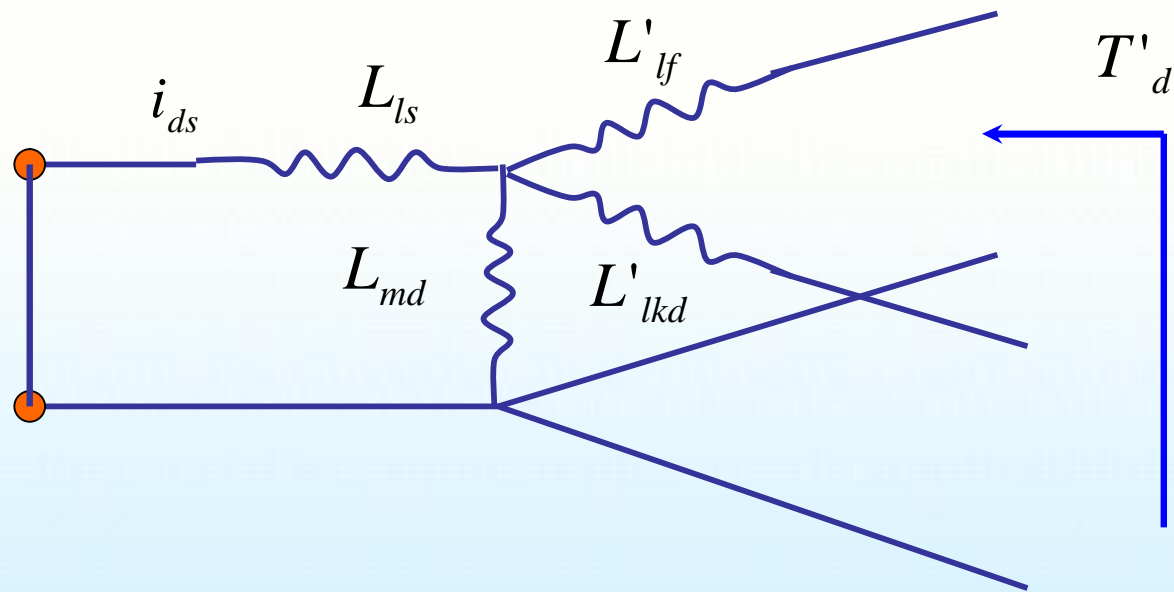


$$T'_{do} = \frac{L'_{lf} + L_{md}}{r'_f}$$

ثابتهای زمانی کوتاه اتصال محور مستقیم در حالت گذرا

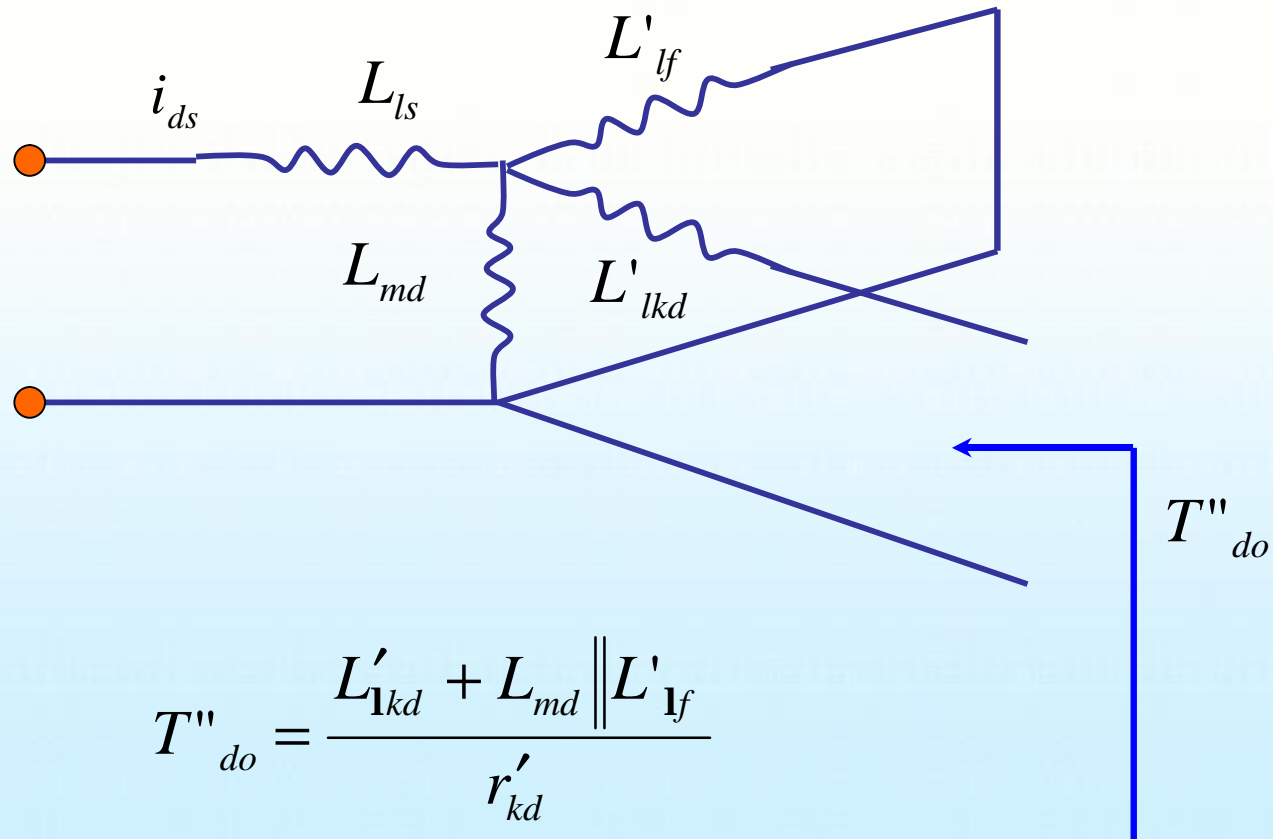


دانشگاه علم و صنعت ایران / دانشکده برق / تئوری جامع ماشینهای الکتریکی / دکتر واحدی / پاییز ۸۳

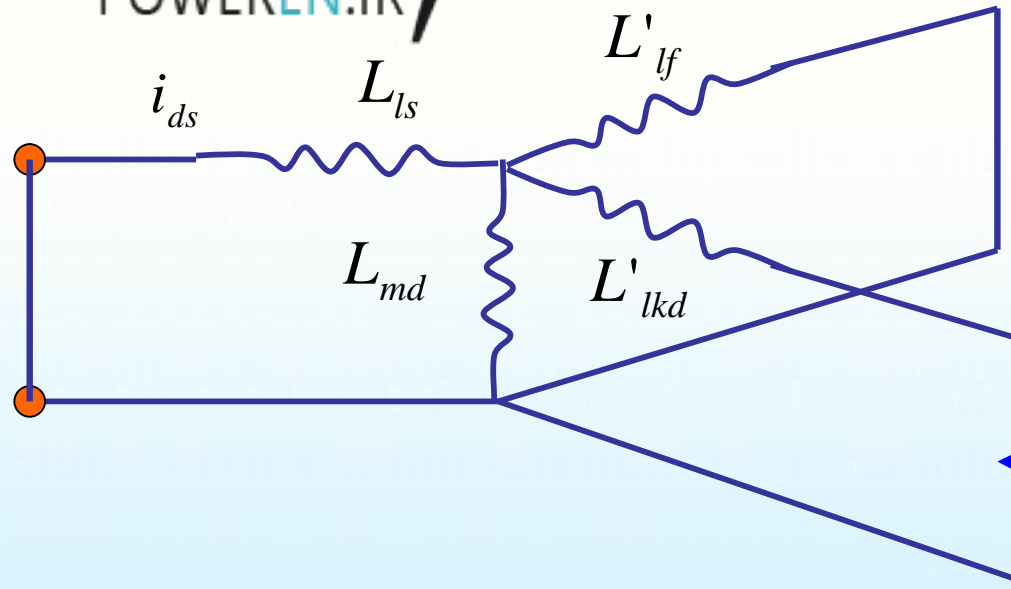


$$T'_{do} = \frac{L'_{lf} + L_{md} \parallel L_{ls}}{r'_f}$$

ثابتهای زمانی بی باری محور مستقیم در حالت تند گذرا



ثابتهای زمانی کوتاه محور مستقیم در حالت تندگذرا



$$T''_d = \frac{L'_{lkd} + L_{md} \parallel L_{ls} \parallel L'_{lf}}{r'_{kd}}$$

T''_d