« به نام خدا »

بخش دوم : مشخصه ها و مدلسازی تجهیزات

فصل سوم : نظریه و مدلسازی ماشینهای سنکرون

استاد : جناب آقای دکتر فرزاد رضوی

ارائه دهنده : مصطفی شامی (۸۷۳۱۲۱۰۰۸)

پاییز ۸۷

ماشین سنکرون ← تحریک (عبور جریان DC) میدان تحریک ایجاد شده با تحریک روتور می‌چرخد

← آرمیچر (القای ولتاژ متناوب در آن)

از آنجا که در ولتاژهای بسیار بالا اگر ولتاژ تحریک کار می‌کند نیاز به عایق بیشتری است لذا معمولاً روی استاتور قرار می‌گیرد. میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریان سه فاز متعادل از سیم‌پیچ‌ها با سرعت سنکرون می‌چرخد.

* برای تولید گشتاور ماندگار روتور باید دقیقاً در سرعت سنکرون بچرخد

$$n = \frac{120 f}{P_f}$$

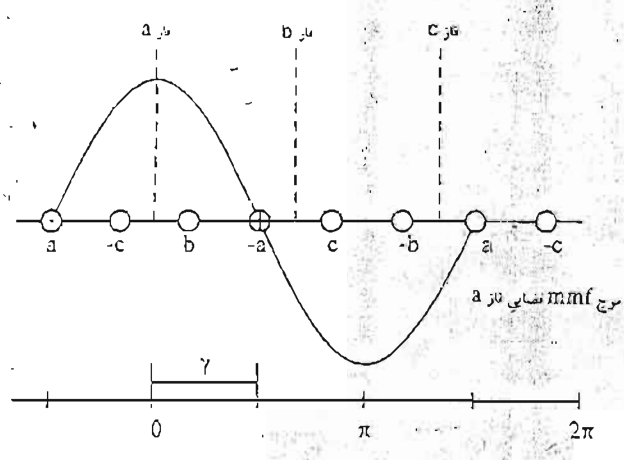
rpm برحسب — فرکانس ولتاژ استاتور — تعداد قطبهای تحریک

توربینهای آبی ← n کم ← P_f زیاد ← روتور قطب برجسته سیم‌پیچی متمرکز با استفاده از سیم‌پیچ‌های پراکنده

توربینهای بخار و گاز ← n زیاد ← P_f ۲ یا ۴ ← روتور سیلندری از فولاد یکپارچه و سیم‌پیچ پراکنده دارد زیرا روتور یکپارچه است.

* در سیم‌پیچ‌ها گسترش مناسب کلافها در روتور سیلندری و نیز شکل دهی مناسب قطبهای روتور قطب برجسته سعی می‌شود تا شکل موج mmf حاصله سینوسی بوده و از هارمونیکهای شار حاصل بکاهیم.

$$\theta_e = \frac{P_f}{2}\,\theta_m$$



فرض کنیم

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos(\omega_s t) \\ i_b = I_m \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c = I_m \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} MMF_a = K\, i_a \cos\gamma \\ MMF_b = K\, i_b \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ MMF_c = K\, i_c \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$$MMF_{total} = MMF_a + MMF_b + MMF_c = \boxed{\frac{3}{2} K I_m \cos(\gamma - \omega_s t)}$$

$\omega_s = 2\pi f$ فرکانس زاویه‌ای جریان استاتور

اگر ماشین دارای P_f قطب تحریک باشد آنگاه $\omega_{sm} = \frac{2}{P_f}\,\omega_s$

سرعت گردش مکانیکی — فرکانس زاویه‌ای ولتاژ القا شده

rpm برحسب

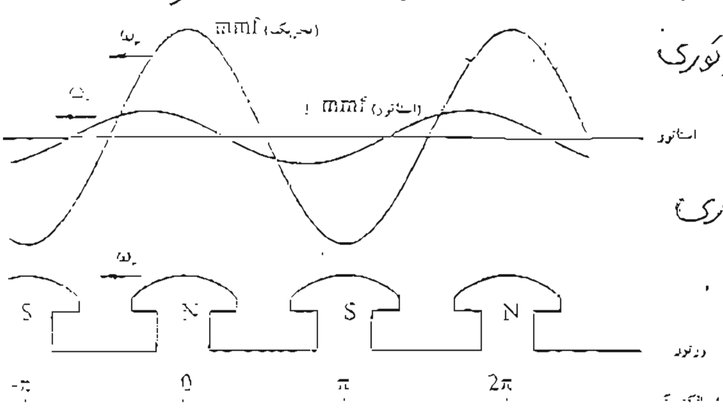
$$n_s = 60 \times \frac{\omega_{sm}}{2\pi} = \frac{120 f}{P_f}$$

فرکانس ولتاژ استاتور

⟹ که این سرعت همان سرعت سنکرون است.

لذا سرعت گردش روتور با سرعت گردش MMF_{total} در شکاف هوایی برابر است.

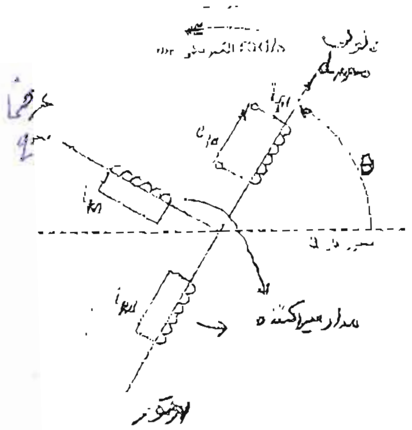
* گشتاور در ماشین سنکرون تمایل دارد که میدانهای مغناطیسی روتور و استاتور را در یک راستا قرار دهد.

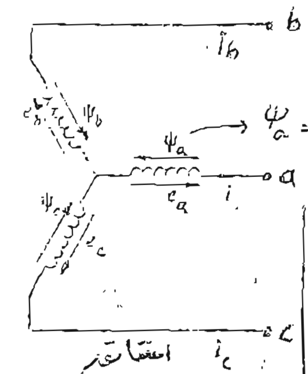


میدان روتور نسبت به میدان آرمیچر:

پیش‌فاز ← گشتاور در خلاف جهت چرخش روتور ← ژنراتوری

پس‌فاز ← ″ در جهت ″ ″ ← موتوری



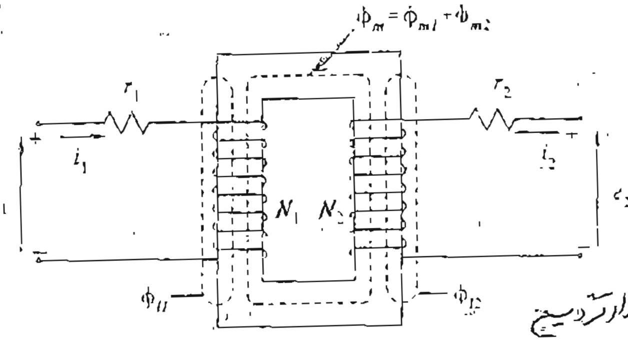


$\theta = \omega_r t \qquad \psi = Li \qquad L = N\frac{\varphi}{i}$

$L = N^2 P$

$P = \frac{1}{R}$ نفوذپذیری مغناطیسی

$\psi_a = \lambda_a = N\varphi$ شار پیوندی



مدار ترانس

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + r_1 i_1 \qquad \begin{cases} \psi_1 = N_1(\varphi_{m_1} + \varphi_{l_1}) + N_1\varphi_{m2} \\ \psi_2 = N_2(\varphi_{m_2} + \varphi_{l_2}) + N_2\varphi_{m_1} \end{cases}$$

$$e_2 = \frac{d\psi_2}{dt} + r_2 i_2$$

$$\begin{cases} L_{11} = N_1(\varphi_{m_1} + \varphi_{l_1})/i_1 = L_{m_1} + L_{l_1} \\ L_{22} = N_2(\varphi_{m2} + \varphi_{l2})/i_2 = L_{m2} + L_{l_2} \end{cases}$$

اندوکتانس نشتی

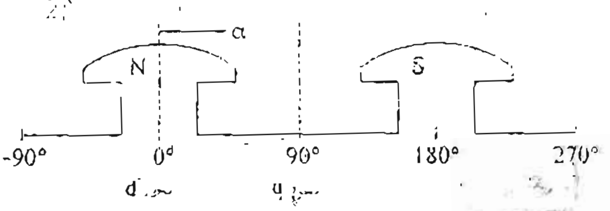
اندوکتانس مغناطیس کننده

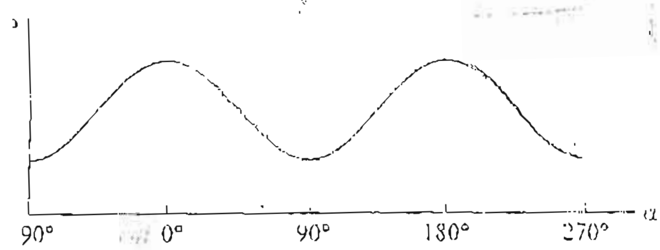
$$\begin{cases} L_{12} = N_1\varphi_{m2}/i_2 \\ L_{21} = N_2\varphi_{m_1}/i_1 \end{cases} \Rightarrow L_{12} = L_{21} = N_1 N_2 P$$

$$\begin{cases} \psi_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \\ \psi_2 = L_{21} i_1 + L_{22} i_2 \end{cases}$$

* اگر جریانهای مثبت در هر دو سیم پیچ شارهایی در دو سیم پیچ متقابل را افزایش دهند تولید کنند اندوکتانس متقابل مثبت است در غیر اینصورت منفی است.

$$P = P_0 + P_2\cos 2\alpha$$

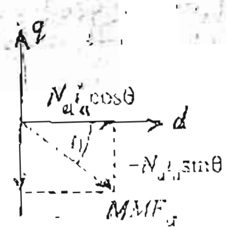




$$\psi_a = -l_{aa}i_a - l_{ab}i_b - l_{ac}i_c + l_{afd}i_{fd} + l_{akd}i_{kd} + l_{akq}i_{kq}$$

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_a i_a$$ همینطور برای e_b و e_c

$\boxed{\text{معادلات استاتور}}$



$$\begin{cases} MMF_{ad} = N_a i_a \cos\theta \\ MMF_{aq} = -N_a i_a \sin\theta \end{cases}$$

ضریب نفوذپذیری محور d

شار فاصله هوایی در محور

$$\begin{cases} \varphi_{gad} = (N_a i_a \cos\theta) P_d \\ \varphi_{gaq} = (-N_a i_a \sin\theta) P_q \end{cases}$$

شار کل فاصله هوایی

$$\varphi_{gaa} = \varphi_{gad}\cos\theta - \varphi_{gaq}\sin\theta = N_a i_a(P_d\cos^2\theta + P_q\sin^2\theta) = N_a i_a\left[\frac{P_d + P_q}{2} + \frac{P_d - P_q}{2}\cos 2\theta\right]$$

خودالقای کل

$$l_{gaa} = L_{g_0} + L_{aa_2}\cos 2\theta \Leftarrow l_{gaa} = \frac{N_a\varphi_{gaa}}{i_a}$$ خودالقای فاز a به علت فاصله هوایی

$$\begin{cases} l_{aa} = L_{al} + L_{gaa} = L_{al} + L_{g_0} + L_{aa2}\cos 2\theta = \boxed{L_{aa_0} + L_{aa_2}\cos 2\theta} \\ \boxed{l_{bb} = L_{aa_0} + L_{aa_2}\cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)} \quad , \quad \boxed{l_{cc} = L_{aa_0} + L_{aa_2}\cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)} \end{cases}$$

اندوکتانس نشتی

با جایگذاری $\theta - \frac{2\pi}{3}$ به جای θ در رابطه φ_{gaa} (برای بدست آوردن اندوکتانسهای متقابل استاتور)

$$\varphi_{gba} = \varphi_{gad}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - \varphi_{gaq}\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) = N_a i_a\left[-\frac{P_d + P_q}{4} + \frac{P_d - P_q}{2}\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

$$l_{gba} = \frac{N_a\varphi_{gba}}{i_a} = -\frac{1}{2}L_{g_0} + L_{ab_2}\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$l_{ab} = l_{ba} = -L_{ab_0} + L_{ab_2}\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) = \boxed{-L_{ab_0} - L_{ab_2}\cos\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right)}$$

$$\boxed{l_{bc} = l_{cb} = -L_{ab_0} - L_{ab_2}\cos(2\theta - \pi)} \qquad \boxed{l_{ca} = l_{ac} = -L_{ab_0} - L_{ab_2}\cos\left(2\theta - \frac{\pi}{3}\right)}$$

$$\boxed{l_{afd} = L_{afd}\cos\theta} \quad , \quad \boxed{l_{akd} = L_{akd}\cos\theta} \quad , \quad l_{akq} = L_{akq}\cos(\theta + \tfrac{\pi}{2}) = -L_{akq}\sin\theta$$

برای فاز b کافیست $\theta \leftarrow \theta - \frac{2\pi}{3}$ و برای فاز c کافیست $\theta \leftarrow \theta + \frac{2\pi}{3}$

حال که اندوکتانس‌ها را محاسبه نمودیم در رابطه Ψ قرار می‌دهیم:

$$\Psi_a = -i_a[L_{aa_0} + L_{aa_2}\cos 2\theta] + i_b[L_{ab_0} + L_{aa_2}\cos(2\theta + \tfrac{\pi}{3})] + i_c[L_{ab_0} + L_{aa_2}\cos(2\theta - \tfrac{\pi}{3})] +$$
$$+ i_{fd}L_{afd}\cos\theta + i_{kd}L_{akd}\cos\theta - i_{kq}L_{akq}\sin\theta$$

$$\Psi_b = i_a[L_{ab_0} + L_{aa_2}\cos(2\theta + \tfrac{\pi}{3})] - i_b[L_{aa_0} + L_{aa_2}\cos(2\theta - \tfrac{2\pi}{3})] + i_c[L_{ab_0} + L_{aa_2}\cos(2\theta - \pi)] +$$
$$+ i_{fd}L_{afd}\cos(\theta - \tfrac{2\pi}{3}) + i_{kd}L_{akd}\cos(\theta - \tfrac{2\pi}{3}) - i_{kq}L_{akq}\sin(\theta - \tfrac{2\pi}{3})$$

$$\Psi_c = i_a[L_{ab_0} + L_{aa_2}\cos(2\theta - \tfrac{\pi}{3})] + i_b[L_{ab_0} + L_{aa_2}\cos(2\theta - \pi)] - i_c[L_{aa_0} + L_{aa_2}\cos(\theta + \tfrac{2\pi}{3})] +$$
$$+ i_{fd}L_{afd}\cos(\theta + \tfrac{2\pi}{3}) + i_{kd}L_{akd}\cos(\theta + \tfrac{2\pi}{3}) - i_{kq}L_{akq}\sin(\theta + \tfrac{2\pi}{3})$$

$$e_{fd} = \frac{d\Psi_{fd}}{dt} + R_{fd}i_{fd} \quad , \quad 0 = \frac{d\Psi_{kd}}{dt} + R_{kd}i_{kd} \quad , \quad 0 = \frac{d\Psi_{kq}}{dt} + R_{kq}i_{kq}$$

دمپرها

معادلات روتور

$$\Psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{fkd}i_{kd} - L_{afd}[i_a\cos\theta + i_b\cos(\theta - \tfrac{2\pi}{3}) + i_c\cos(\theta + \tfrac{2\pi}{3})]$$
$$\Psi_{kd} = L_{fkd}i_{fd} + L_{kkd}i_{kd} - L_{akd}[i_a\cos\theta + i_b\cos(\theta - \tfrac{2\pi}{3}) + i_c\cos(\theta + \tfrac{2\pi}{3})]$$
$$\Psi_{kq} = L_{kkq}i_{kq} + L_{akq}[i_a\sin\theta + i_b\sin(\theta - \tfrac{2\pi}{3}) + i_c\sin(\theta + \tfrac{2\pi}{3})]$$

تبدیل dq_0

$$\begin{cases} i_d = k_d[i_a\cos\theta + i_b\cos(\theta - \tfrac{2\pi}{3}) + i_c\cos(\theta + \tfrac{2\pi}{3})] \\ i_q = -k_q[i_a\sin\theta + i_b\sin(\theta - \tfrac{2\pi}{3}) + i_c\sin(\theta + \tfrac{2\pi}{3})] \end{cases}$$

مقادیر K_d و K_q دلخواه هستند اما زیرا که آنها جهت ساده‌سازی با $\frac{2}{3}$ انتخاب شده است.

اگر جریان‌های فازها متعادل باشند:

$$\begin{cases} i_d = K_d\frac{3}{2}I_m\sin(\omega_s t - \theta) \xrightarrow{K_d = \frac{2}{3}} i_d = I_m\sin(\omega_s t - \theta) \\ i_q = -K_q\frac{3}{2}I_m\cos(\omega_s t - \theta) \xrightarrow{K_d = \frac{2}{3}} i_q = I_m\cos(\omega_s t - \theta) \end{cases}$$

* دامنه جریان‌های استاتور و روتور برابر شده‌اند.

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \xrightarrow{\text{شرایط متعادل}} I_0 = 0$$

تبدیل dq_0

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

عکس تبدیل dq_0

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

معادل شار دورها (ψ) را به صورت مولفه‌های dq_0 می‌نویسیم :

$$\psi_d = -(\underbrace{L_{aa0}+L_{ab0}+\frac{3}{2}L_{aa2}}_{L_d})\, i_d + L_{afd}\, i_{fd} + L_{akd}\, i_d$$

$$\psi_q = -(\underbrace{L_{aa0}+L_{ab0}-\frac{3}{2}L_{aa2}}_{L_q})\, i_q + L_{akq}\, i_{kq}$$

$$\psi_0 = -(\underbrace{L_{aa0}-2L_{ab0}}_{L_0})\, i_0$$

استاتور

$$\psi_{fd} = L_{ffd}\, i_{fd} + L_{fkd}\, i_{kd} - \frac{3}{2}L_{afd}\, i_d$$

$$\psi_{kd} = L_{fkd}\, i_{fd} + L_{kkd}\, i_{kd} - \frac{3}{2}L_{akd}\, i_d$$

$$\psi_{kq} = L_{kkq}\, i_{kq} - \frac{3}{2}L_{akq}\, i_q$$

روتور

* i_0 در معادلات شار دورهای روتور ظاهر نمی‌شود زیرا مولفه صفر جریان آرمیچر نیروی محرکه خاصی را در فاصله هوایی ایجاد نمی‌کند.

ولتاژ استاتور برحسب dq_0 :

ولتاژ ترانسفورمری

$$e_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \underbrace{\frac{d\theta}{dt}}_{\omega_r} - R_a i_d$$

$$e_q = \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \frac{d\theta}{dt} - R_a i_q$$

$$e_0 = \frac{d\psi_0}{dt} - R_a i_0$$

ولتاژ چرخشی

توان P_t و گشتاور T_e

$$P_t = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$$

$$P_t = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q + 2e_0 i_0)$$

اگر حالت متعادل باشد $e_0 = i_0 = 0$: $P_t = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q)$

$$P_t = \frac{3}{2}\left[\left(i_d\frac{d\psi_d}{dt} + i_q\frac{d\psi_q}{dt} + 2i_0\frac{d\psi_0}{dt}\right) + (\psi_d i_q - \psi_q i_d)\,\omega_r - (i_d^2 + i_q^2 + 2i_0^2)\,R_a\right]$$

* بیان می‌کند که توان برابر است با تغییر انرژی مغناطیسی آرمیچر به علاوه توان انتقال یافته از طریق فاصله هوایی منهای تلفات مقاومتی آرمیچر

$$T_e = \frac{3}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d)\frac{\omega_r}{\omega_{mech}} = \frac{3}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d)\frac{P_f}{2}$$

$$\begin{cases} i_a = I_m \sin(\omega_s t + \phi) \\ i_b = I_m \sin(\omega_s t + \phi - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c = I_m \sin(\omega_s t + \phi + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_d = I_m \sin(\omega_s t + \phi - \theta) \\ i_q = -I_m \sin(\omega_s t + \phi - \theta) \\ i_0 = 0 \end{cases}$$

در شرایط جریان متعادل

در تبدیل dq_0 اگر k_d و k_q را برابر $\sqrt{2/3}$ انتخاب کنیم داریم:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}}\underbrace{\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}}_{A}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}}\, A^T \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

معادلات در مبنای واحد

① کمیتهای پایه استاتور :

سه فاز $VA_{base} = VA$ نامی ماشین

$e_{s\,base} = V$ ولتاژ نامی خط خنثی

$f_{base} =$ فرکانس نامی ، $i_{s\,base} =$ جریان نامی خط $= \frac{\text{سه فاز } VA_{base}}{\frac{3}{2}e_{s\,base}}$ و $Z_{s\,base} = \frac{e_{s\,base}}{i_{s\,base}}$

$\omega_{base} = 2\pi f_{base}$ الکتریکی ، $\omega_{m\,base} = \omega_{base}\frac{2}{P_f}$ مکانیکی و $L_{s\,base} = \frac{Z_{s\,base}}{\omega_{base}}$

$\psi_{s\,base} = L_{s\,base}\, i_{s\,base}$

۳) کمیتهای پایه روتور :

$$i_{fd\,base} = \frac{L_{ad}}{L_{afd}}\, i_{s\,base} \;,\quad i_{kd\,base} = \frac{L_{ad}}{L_{akd}}\, i_{s\,base}$$

$$i_{kq\,base} = \frac{L_{aq}}{L_{akq}}\, i_{s\,base} \;,\quad e_{fd\,base} = \frac{\text{فاز}3\; VA_{base}}{i_{fd\,base}} \;,\quad Z_{fd\,base} = \frac{e_{fd\,base}}{i_{fd\,base}} = \frac{\text{فاز}3\; VA}{i^2_{fd\,base}}$$

$$Z_{kd\,base} = \frac{\text{فاز}3\; VA_{base}}{i^2_{kd\,base}} \;,\quad Z_{kq\,base} = \frac{\text{فاز}3\; VA_{base}}{i^2_{kq\,base}} \;,\quad L_{fd\,base} = \frac{Z_{fd\,base}}{\omega_{base}}$$

$$L_{kd\,base} = \frac{Z_{kd\,base}}{\omega_{base}} \;,\quad L_{kq\,base} = \frac{Z_{kq\,base}}{\omega_{base}} \;,\quad t_{base} = \frac{1}{\omega_{base}} \;,\quad T_{base} = \frac{\text{فاز}3\; VA_{base}}{\omega_{m\,base}}$$

$$\begin{cases} L_{afd} = L_{fda} = L_{akd} = L_{kda} = L_{ad} \\ L_{akq} = L_{kqa} = L_{aq} \\ L_{fkd} = L_{kdf} \end{cases}$$

معادلات ماشین سنکرون در مبنای واحد : اپراتور مشتق

استاتور

$$\begin{cases} e_d = P\psi_d - \psi_q \omega_r - R_a i_d \\ e_q = P\psi_q + \psi_d \omega_r - R_a i_q \\ e_0 = P\psi_0 - R_a i_0 \end{cases}$$

روتور

$$\begin{cases} e_{fd} = P\psi_{fd} + R_{fd} i_{fd} \\ 0 = P\psi_{1d} + R_{1d} i_{1d} \\ 0 = P\psi_{1q} + R_{1q} i_{1q} \\ 0 = P\psi_{2q} + R_{2q} i_{2q} \end{cases}$$

شار استاتور

$$\begin{cases} \psi_d = -(L_{ad}+L_l) i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{1d} \\ \psi_q = -(L_{aq}+L_l) i_q + L_{aq} i_{1q} + L_{aq} i_{2q} \\ \psi_0 = -L_0 i_0 \end{cases}$$

شار روتور

$$\begin{cases} \psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} + L_{f1d} i_{1d} - L_{ad} i_d \\ \psi_{1d} = L_{f1d} i_{fd} + L_{11d} i_{1d} - L_{ad} i_d \\ \psi_{1q} = L_{11} i_{1q} + L_{aq} i_{2q} - L_{aq} i_q \\ \psi_{2q} = L_{aq} i_{1q} + L_{22q} i_{2q} - L_{aq} i_q \end{cases}$$

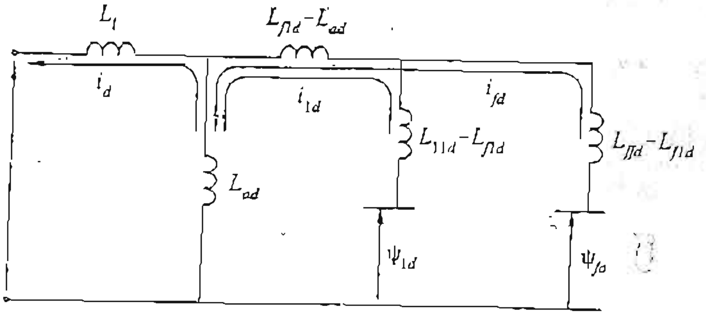
در محور q دو سیم پیچ 1 و 2 و در محور d یک سیم پیچ میراکننده 1 در نظر گرفته شده است .

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d$$

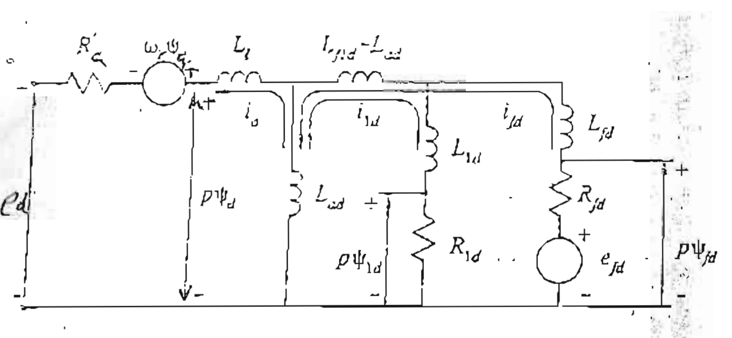
در معادلات فوق اگر t برحسب ثانیه باشد اپراتور مشتق با P ($\frac{1}{\omega_{base}}$) جایگزین می شود .

مدار معادل d : تعریف می کنیم ←

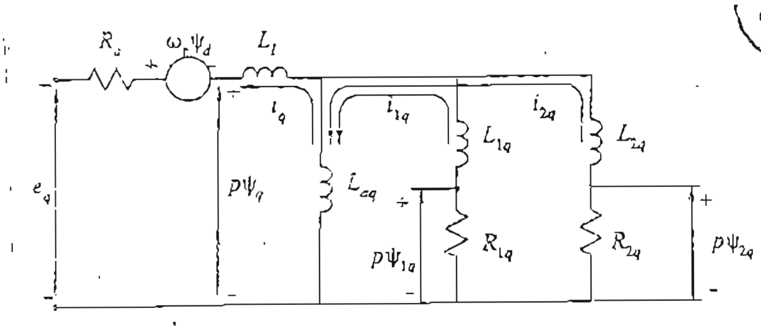
$$\begin{cases} L_{fd} = L_{ffd} - L_{f1d} \\ L_{1d} = L_{11d} - L_{f1d} \end{cases} \qquad \begin{cases} L_{1q} = L_{11q} - L_{aq} \\ L_{2q} = L_{22q} - L_{aq} \end{cases}$$



شکل ۳-۱۷ مدار معادل محور d ، نمایشگر رابطه ۱۴-۳

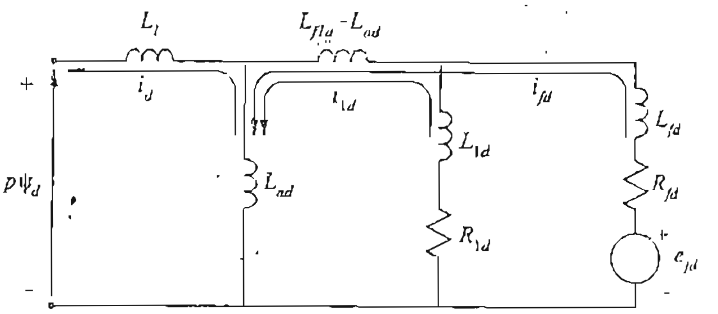


(الف) مدار معادل محور d

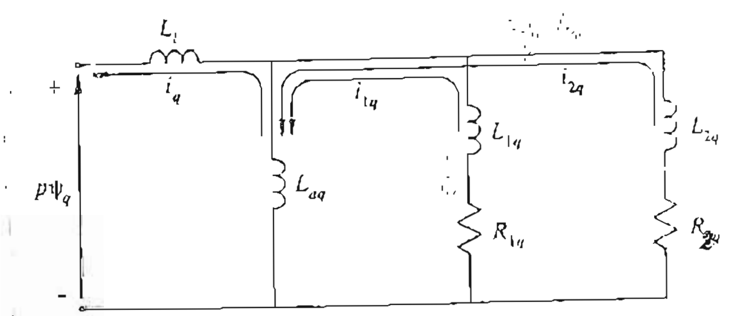


(ب) مدار معادل محور q

در مدارات فوق مدارهای معادل کامل محور d و q ما باشند اما اگر از افت ولتاژ مقاومتهای استاتور و ولتاژهای
چرخشی صرفنظر کنیم مدارهای زیر را داریم :



(الف) مدار معادل محور d



(ب) مدار معادل محور q